



Politechnika Gdańska

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Katedra Systemów Multimedialnych

Rozprawa doktorska

**ZASTOSOWANIE REGUŁ ROZMYTYCH
W KOMPUTEROWEJ ANIMACJI
POSTACI**

mgr inż. Piotr Szczuko

prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej

Gdańsk 2007

Podziękowania

Autor pragnie wyrazić słowa podziękowania Pani Promotor, prof. dr hab. inż. Bożenie Kostek za wszelkie sugestie i pracę włożoną w konsultację rozprawy oraz Kierownikowi Katedry Systemów Multimedialnych, prof. dr hab. inż. Andrzejowi Czyżewskiemu za zapewnienie możliwości rozwoju zainteresowań naukowych, które przyczyniły się do powstania niniejszej rozprawy.

Lista najważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie

A	Wektor \mathbf{A}_i dla i -tego segmentu, $\mathbf{A}_i=[A_i, V_i, t_i]$
A_i	amplituda głównej fazy ruchu i -tego segmentu
a_i	bezwzględna wartość amplitudy zapisana w klatce kluczowej
α	współczynnik amplitudowy determinujący proporcjonalność $dA=\alpha \cdot V_i \cdot A_i$
B	Wektor \mathbf{B}_i dla i -tego segmentu
β	współczynnik czasowy determinujący proporcjonalność $dt=\beta \cdot V_i \cdot t_i$
c	położenie maksimum funkcji Gaussa, średnia rozkładu normalnego
dA	amplituda dodatkowej fazy: dA_a – fazy antycypacji, dA_o – fazy przerzutu;
dt	czas trwania dodatkowej fazy: dt_a – fazy antycypacji, dt_o – fazy przerzutu, dt_h – fazy zatrzymania;
$f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$	funkcja oceny, przyporządkowująca animacji o cechach obiektywnych \mathbf{A} i \mathbf{B} wektor oceny \mathbf{J}
$f(\cdot), g(\cdot)$	funkcje nasycania o charakterze <i>tgh</i>
J	wektor badanych parametrów subiektywnych animacji $\mathbf{J}=\{\text{płynność, styl}\}$
J*	wektor zmierzonych parametrów subiektywnych
p	statystyczny poziom istotności
Q	zmierzona ocena subiektywna animacji
R	Współczynnik korelacji
S	Sekwencja ruchu animowanego
S_i	Segment animacji, zaczynający się i kończący fazą zatrzymania
t_i	czas trwania głównej fazy ruchu i -tego segmentu
t_i	bezwzględna wartość czasu (numer klatki animacji) zapisany w klatce kluczowej
V_i	prędkość głównej fazy ruchu i -tego segmentu
σ	odchylenie standardowe funkcji Gaussa

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	6
2. Animacja postaci	11
2.1. Gestykulacja w komunikacji interpersonalnej.....	11
2.2. Animacja tradycyjna	16
2.3. Komputerowe techniki animacji.....	17
2.4. Reguły animacji	27
2.4.1 reguły animacji tradycyjnej	28
2.4.2 realizacja reguł animacji w metodach komputerowych.....	37
2.5. Jakość ruchu w animacji komputerowej.....	39
2.6. Wirtualne postaci	42
2.7. Percepcja ruchu	45
3. Podstawy teoretyczne systemu wspomaganie animacji	48
3.1. Tworzenie animacji komputerowych jako proces decyzyjny.....	51
3.2. Techniki wspomaganie decyzji.....	53
3.3. Zbiory przybliżone.....	59
3.4. Wnioskowanie rozmyte	64
3.5. Metodyka testów subiektywnych.....	71
4. Wykorzystanie reguł rozmytych w animacji ruchu postaci	78
4.1. Dane uczące	80
4.1.1. Parametryzacja animacji schematycznych	84
4.1.2. Wzbogacanie animacji o nowe fazy	90
4.1.3. Założenia dotyczące zależności między parametrami animacji	92
4.2. Budowa systemu wnioskowania rozmytego.....	101
4.3. Wyznaczanie reguł dla systemu wnioskowania rozmytego	112
4.3.1. Pozyskiwanie reguł z danych uczących.....	113
4.3.2. Ocena uzyskanych reguł	135
4.3.3. Transkrypcja reguł z języka naturalnego i modyfikacja reguł	136
4.4. Wykorzystanie reguł do wzbogacania animacji	137
5. Testy subiektywne	141

6. Wnioski i podsumowanie	153
7. Bibliografia.....	157
8. Załącznik a – oceny animacji w teście subiektywnym	I

1. WPROWADZENIE

Chęć naśladowania istniejącego świata, utrwalania jego wizerunku, tworzenie światów nieistniejących, są nadrzędnymi celami twórczości ludzkiej. Nieruchome obrazy, dźwięki i obrazy ruchome, wykorzystywane są od stuleci do przekazywania artystycznych idei, wymaganych koncepcji i realistycznych reprezentacji świata. Tworzenie złudzenia ruchu pojawiało się w twórczości ludzkiej od dawna: od prostych urządzeń demonstrujących złudzenie poruszania, przez przedstawiony na rys. 1.1 pierwszy „rzutnik” animacji, tzw. Zoetrop autorstwa wynalazcy Ting Huana, żyjącego w Chinach około 180 roku, przez wykorzystanie kinematografii do prezentacji rysowanych odrębnie na pozytywowej kliszy klatek animacji, aż po najnowsze osiągnięcia animacji komputerowej.



Rys. 1.1. Zoetrop [35]

Systematyczne i naukowe podejście do badania ruchu rozpoczęło się prawdopodobnie od prac E. Muybridgea, który w 1901 roku stworzył niezwykle ważne dzieło, „*The Human Figure in Motion*”. Katalog ten, wypełniony seriami zdjęć, przedstawia kolejne fazy ruchu ludzi w różnym wieku i płci, wykonujących liczne codzienne czynności, sportowców różnych dyscyplin oraz zwierzęta w ruchu [101]. Muybridge za pomocą systemu sprzężonych aparatów fotograficznych rejestrował kolejne fazy ruchu, które później, po wywołaniu fotografii, przerysowywane były na obrotowe

tarcze skonstruowanego przez niego odtwarzacza ruchu nazwanego zoopraxiscopem, przedstawionego na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Tarcza obrotowa zoopraxiscopu Muybridga [101]

Naśladowanie i odtwarzanie rzeczywistego ruchu w animacji artystycznej ustąpiły miejsca ruchowi stylizowanemu, karykaturalnemu, przejaskrawionemu, a dzięki temu bardziej czytelnemu i zdolnemu ujawnić emocje i charakter postaci w jasny i jednoznaczny sposób. Książka „Illusion of Life” („Złudzenie życia”), autorstwa dwóch animatorów ze studia Walta Disneya [134], opisuje początki animacji jako sztuki. Ujawnia ona styl pracy sławnego twórcy filmów animowanych, zdradza tajniki tworzenia tytułowego złudzenia życia i w bardzo wnikliwy sposób przedstawia warsztat animatora. Opisano w niej także prowadzone przez Disneya analizy zachowania ludzi i zwierząt, które legły u podstaw stworzenia reguł animacji i są wykorzystywane również obecnie zarówno w animacji tradycyjnej, jak i w komputerowej.

Obecnie technika cyfrowa jest bardzo często wykorzystywana do tworzenia animacji. Prostymi, pracochłonnymi czynnościami można obciążyć program komputerowy, który w algorytmiczny sposób wykona zaprogramowane zadanie. W filmie i animacji tworzenie złudzenia ruchu polega na wyświetlaniu 24 lub więcej nieruchomych klatek na sekundę. Wykonanie animacji wymaga ustalenia pozycji obiektów i postaci w każdej chwili czasu, przedstawianej na kadrach filmu i wykonanie wirtualnego zdjęcia, czyli wyrenderowanie klatki animacji. Jest to zadanie, które niewątpliwie wymaga dużego nakładu pracy i może być wspomagane metodami komputerowymi. Wykonanie algorytmu

wspierającego animatora w realizacji tego zadania jest przedmiotem rozprawy. Algorytm ten wykorzystuje osiągnięcia animacji tradycyjnej oraz wnioskowanie w logice rozmytej.

Tradycyjne metody animacji rysunkowej doskonalone są od dziesiątków lat. Zdołano sformułować wiele ważnych reguł, teorii i wskazówek mówiących, w jaki sposób uzyskać realistyczny ruch – wymowny i bardzo wyraźnie nacechowany emocjonalnie [90][93][103][123]. Logicznym krokiem w rozwoju animacji jest więc zbudowanie na bazie tej wiedzy systemu komputerowego, który umożliwiłby animatorowi szybkie przygotowanie animacji o wysokiej jakości subiektywnej. W niniejszej rozprawie zaproponowano wykorzystanie rozmytego przetwarzania danych opisowych animacji. Wnioskowanie oparte na logice rozmytej, stanowi analogię do sposobu rozumowania człowieka i pozwala operować na określeniach nieprecyzyjnych, pozostając jednocześnie intuicyjne i zrozumiałe dla animatora nie dysponującego rozległą wiedzą techniczną.

Obszar zagadnień poruszanych w niniejszej rozprawie ograniczony jest do zakresu analizy i przetwarzania animacji nazywanych w literaturze „od pozy do pozy” (ang. *pose-to-pose*), podczas wykonywania których praca animatora jest ściśle zorganizowana w określony sposób. W trakcie wykonywania animacji metodą „od pozy do pozy” na początku przygotowana jest schematyczna wersja ruchu (ang. *blocking*) z odpowiednimi pozami ciała postaci i odpowiednim układem czasowym zatrzymań ruchu i przejść między pozami. Następnie animacja jest wzbogacana dodatkowymi elementami, nowymi fazami. W praktyce polega to na dodawaniu, pomiędzy istniejące klatki kluczowe, nowych klatek odpowiedzialnych np. za przygotowanie postaci do ruchu, zwane antycypacją, albo drobnych oscylacji postaci w zatrzymaniu, które mają podtrzymywać złudzenie życia. Przytoczony powyżej schemat postępowania stanowi punkt wyjścia do realizacji algorytmów opisywanych w rozprawie. Wejściem algorytmów jest animacja schematyczna, a celem przetwarzania jest uzupełnienie jej o elementy dodatkowe. Tym samym wykonywana jest część najbardziej mozolnej pracy animatora. Kluczowym zagadnieniem analizowanym w rozprawie jest odpowiedni dobór wartości parametrów ruchu w nowych klatkach kluczowych i ich rozmieszczenia na osi czasu, w taki sposób, aby spełnione były kryteria jakościowe i subiektywne założenia dotyczące charakteru animacji wynikowej.

Przedmiotem badawczym rozprawy jest wykazanie możliwości wspomagania komputerowej animacji postaci poprzez wykorzystanie metod inteligentnych, szczególnie logiki rozmytej, w taki sposób, aby możliwe było uzyskiwanie animacji realistycznych

i płynnych, do których punktem wyjścia są animacje schematyczne, które nie posiadają tych cech. Wiedza zawarta w literaturze animacji i wiedza oparta na wynikach wydobywania danych (ang. *data mining*) z przykładów uczących jest reprezentowana w postaci reguł rozmytych. Przetwarzanie tych reguł pozwala na wyznaczenie opisu elementów animacji, które wpływają na subiektywnie postrzegane cechy: jakość, płynność i naturalność ruchu postaci. Najbardziej pracochłonne czynności występujące w procesie tworzenia animacji komputerowej zostają zalgorytmizowane, ich wykonaniem obciążony zostaje komputer, wydajność tworzenia klatek animacji zwiększa się znacząco.

Przedstawiony powyżej zakres eksperymentów wiąże się z postawionymi w rozprawie tezami:

- 1. Wykorzystanie w algorytmach komputerowej animacji klasycznych reguł animacji rysunkowej sformułowanych w języku naturalnym, pozwala na poprawę realizmu ruchu wirtualnych postaci.**
- 2. Logika rozmyta może być stosowana jako narzędzie przetwarzania reguł opisujących animację w procesie generowania animowanych gestykulacji.**
- 3. Zastosowanie rozmytego przetwarzania reguł animacji zwiększa efektywność procesu tworzenia klatek pośrednich animowanego obrazu.**

W rozprawie uzyskano bazę reguł wyznaczonych na podstawie wiedzy zgromadzonej w toku przeprowadzonych testów oceny subiektywnej i wiedzy zawartej w regułach animacji spotykanych w literaturze, wyrażonych w języku naturalnym. Baza reguł pozwala na wyznaczenie parametrów elementów dodatkowych ruchu z uwzględnieniem subiektywnych założeń jakościowych stawianych przez użytkownika. Reguły zaimplementowane są w systemie wnioskowania, w którym lingwistyczne zmienne wejściowe i wyjściowe opisujące ruch przetwarzane są z wykorzystaniem logiki rozmytej. Na etapie analizy wiedzy i poszukiwania rozwiązań wykorzystana jest metoda zbiorów przybliżonych, w celu spełnienia założenia o kompletności systemu, rozumianej jako istnienie rozwiązania dla każdej kombinacji wartości zmiennych wejściowych. Metoda zbiorów przybliżonych została użyta w celu wyznaczania ze zmienną precyzją przybliżeń analizowanych konceptów, przedstawiających różne wartości zmiennych subiektywnych. Dodatkowym czynnikiem mediacyjnym użytym w wyborze jednego z wielu istniejących rozwiązań jest subiektywna ocena ogólna jakości animacji określona przez uczestników testów subiektywnych. Skuteczność systemu wspomaganie animacji, weryfikowana jest

w teście parametrycznym poprzez ocenę subiektywną jakości, stylu i płynności animacji powstałych z wykorzystaniem opracowanego systemu i animacji nieprzetworzonych.

Rozdział 2. zawiera informacje podstawowe dotyczące technik animacji, reguł animacji tradycyjnej, znaczenia odwzorowania ruchu postaci w przekazie treści w medium wizyjnym. Ponadto przedstawiono w nim analizę i krytykę obecnie rozwijanych komputerowych technik animacji, wspomaganie animacji lub symulowania ruchu. Opisano także możliwości oceny cech subiektywnych ruchu i wykorzystania postaci animowanych w komunikacji człowieka z komputerem. Rozdział 3. przytacza podstawy teoretyczne stworzonego systemu wspomaganie animacji. Opiera się on na modelu procesu decyzyjnego wykonywanego przez animatora. Implementacja takiego modelu wymaga przeprowadzenia procedury poszukiwania rozwiązania optymalnego w przestrzeni parametrów. Wymagane do tego techniki zostały zawarte w podrozdziale 3.2. Następnie opisane są podstawy metody zbiorów przybliżonych, która wykorzystywana jest do przetworzenia wyników testów subiektywnej oceny cech animacji. W dalszej kolejności przytoczono zagadnienia związane z wnioskowaniem rozmytym, które jest podstawą działania zaprojektowanego systemu. Na zakończenie części erudycyjnej rozprawy zamieszczono wytyczne dotyczące prowadzenia testów subiektywnych, którymi kierowano się w trakcie prowadzonych badań, a które opierają się na uznanych rekomendacjach ITU-R [115] i ITU-T [116].

Rozdziały 4. i 5. przedstawiają etapy zrealizowanej praktycznej części rozprawy. W rozdziale 4. zawarto opis sposobu przygotowania danych uczących, realizację testu oceny subiektywnej, analizę danych uzyskanych w toku testu, dyskusję istnienia i poszukiwania rozwiązania, sposób poszukiwania rozwiązania w wielowymiarowej przestrzeni parametrów opisujących ruch, budowę systemu wnioskowania rozmytego, wyznaczenie funkcji przynależności rozmytych zmiennych wejściowych i wyjściowych. Rozdział 5. opisuje etap subiektywnej weryfikacji jakości animacji uzyskiwanych z wykorzystaniem systemu wspomaganie animacji. Rozdział 6. przedstawia wnioski i przytacza dowody postawionych tez. Zawarto w nim także propozycje dalszego rozwoju i kontynuacji prac.

2. ANIMACJA POSTACI

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie podstawowych informacji dotyczących animacji postaci. Pierwsza część zawiera uwagi dotyczące komunikacji interpersonalnej i znaczenia gestykulacji w komunikacji międzyludzkiej. Następnie opisane są techniki animacji oraz reguły animacji tradycyjnej i możliwości wykorzystania ich w technikach komputerowych. Przedstawiona jest analiza i krytyka obecnie rozwijanych komputerowych technik animacji, wspomaganie animacji lub symulowania ruchu. Wykazana zostaje potrzeba rozwoju metod umożliwiających tworzenie animacji stylizowanych o wysokiej jakości subiektywnej. W dalszej części rozdziału omawiane jest znaczenie odwzorowania ruchu postaci w przekazie treści w medium wizyjnym i przedstawiane są uwagi dotyczące wykorzystania postaci animowanych w komunikacji człowieka z komputerem. W zakończeniu rozdziału zawarto omówienie podstawowych zagadnień percepcji ruchu rzeczywistego i ruchu w animacji komputerowej oraz zaznaczenie subiektywności tych zjawisk. Przytaczane informacje stanowią wiedzę istotną z punktu widzenia rozdziałów praktycznych, dotyczących przetwarzania animacji i badania jej cech subiektywnych.

2.1. Gestykulacja w komunikacji interpersonalnej

Poniżej przedstawiono ogólne uwagi dotyczące funkcji gestykulacji w komunikacji międzyludzkiej, rozumienia przekazu niewerbalnego, klasyfikacji typów gestów oraz mimiki twarzy [132].

Mehabian przeprowadził liczne eksperymenty psychologiczne, z których wnioskował o znaczeniu każdego z kanałów komunikacji dla czytelności treści komunikatu opisującego emocje [97]. Reguła Mehabiana, zwana często regułą 7%-38%-55%, mówi o tym, iż w komunikacie dotyczącym uczuć mówcy lub jego nastawienia emocjonalnego 7% treści odbiorca czerpie z przekazu werbalnego (słów), pozostałą zaś część z przekazu niewerbalnego, mianowicie 38% z barwy głosu i 55% z gestykulacji (mowy ciała, wyrazu twarzy). Mylnie uważa się, że prace Mehabiana dowodzą słuszności

podziału 7%-38%-55% dla przekazu o dowolnej treści. Sam badacz wyraźnie podkreśla, iż eksperymenty i wyniki dotyczą wyłącznie rozmów, w których są identyfikowane emocje.

Podobne prace przeprowadzone zostały przez Birdwhistella [11], specjalizującego się w kinezjetyce, nauce o postawie ciała i gestykulacji, analizowanych z punktu widzenia komunikacji niewerbalnej. Autor ten pokusił się nawet o zdefiniowanie jednostki ruchu, nazwanej kinemem na podobieństwo fonemu, posiadającej konkretne znaczenie, wchodzącej w skład złożonych komunikatów. Z prac Birdwhistella wynika, iż około 35% treści przekazywanych jest przez słowa, czyli w sposób werbalny. Birdwhistell i Mehabian zdecydowanie podkreślają konieczność występowania w komunikacie zgodności między częściami werbalną i niewerbalnymi, bowiem niezgodność prowadzi do błędów w zrozumieniu treści przekazywanego komunikatu.

Z kolei Hall zauważa, że zestawy gestów, jakimi posługuje się dana osoba są specyficzne dla jej kultury [47]. Ponadto kultura nakazuje wykonywanie określonego gestu w sytuacji tego wymagającej, uczy zachowania, nie tylko słów grzecznościowych, ale całego rytuału zachowań. *Savoir-vivre* w przeważającej części dotyczy właśnie gestów i czynności. Głęboko zakorzone gesty, wykonywane często nieświadomie, np. potwierdzanie poprzez skinięcie głową, także są podyktowane kanonem kulturowym. W Polsce skinienie oznacza potwierdzenie, w Grecji natomiast zaprzeczenie. Uniesienie kciuka w Polsce oznacza akceptację pewnego działania, w Australii, Bangladeszu i Nigerii jest to gest bardzo obraźliwy. Jednakże oczywiste jest, iż gesty zależne są także od stanu psychicznego, emocjonalnego, fizycznego człowieka: objęcie ciała ramionami może być nieświadomym gestem obronnym lub reakcją na chłód. Emocje oprócz wpływu na nieświadome gesty mają także wpływ na wiele funkcji organizmu: wstyd często wywołuje rozszerzenie naczyń krwionośnych skóry twarzy i jej zaczerwienienie, strach – przyspieszenie bicia serca i napięcie mięśni, itp.

Badania komunikacji międzyludzkiej [104] pokazują, iż rozmawiające osoby synchronizują ruchy swoich ciał. Zmiana współrozmówcy wywołuje krótkotrwałą fazę przejściową, w trakcie której rytmy gestykulacji stopniowo „zgrywają się” ze sobą. Podobna synchronizacja widoczna jest już u niemowląt, które ucząc się języka, artykułują sylaby i rytmicznie machają rękami [112]. Gestykulacja pomaga także w zapamiętywaniu. Dowodem na to są wyniki eksperymentów dotyczących szczegółowości zapamiętania złożonych obrazów lub historii, które badany ma opisać [71]. W przeprowadzonym eksperymencie część badanych w chwili zapoznania się z przedmiotem opisuje go z gestykulacją, a pozostała część bez gestykulacji. Po dłuższej przerwie, badani mają

przywołać opis z pamięci. Występowanie gestykulacji podczas omawiania przedmiotu ułatwia zapamiętanie większej liczby szczegółów. Ponadto opisywanie przedmiotu w trakcie jego obserwacji i opisywanie z pamięci charakteryzują się różnym natężeniem gestykulacji. W tym drugim przypadku jest ona zdecydowanie intensywniejsza. Jeżeli w trakcie eksperymentu uczestnikom zabraniano gestykulacji, często gubili wątek, zacinali się, mówili mało płynnie. W popularnej w psychologii klasyfikacji typów ludzi z podziałem na wzrokowców i słuchowców, często dodawany jest także typ trzeci – motoryk. Ten typ określa osobę, która najlepiej przyswaja wiedzę i nią operuje, wspomagając się aktywnie ruchem ciała, a nie mówieniem czy wyłącznie obserwacją.

Za składnię języka i za artykulację odpowiedzialny jest ośrodek Broca [50] w części ciemieniowej płata czołowego mózgu. Ewolucyjnie język ludzki wywodzi się od gestów, które obecnie pełnią rolę pomocniczą w nauce języka i komunikacji [28]. Wykazano, iż wiele gestów jest wrodzonych człowiekowi [71]. W badaniach tych poprzez obserwację komunikacji niewidomych osób (wiek 8-18) w trakcie zadania opisywania wcześniej wykonanej czynności stwierdzono, że niezależnie od tego czy współrozmówca widzi mówiącego czy nie, gestykulacja jest tak samo intensywna, jak u widzących interlokutorów.

Ludzie w trakcie rozmowy spontanicznie gestykulują, co wspiera i poszerza informacje przekazywane słowami. Fakt, że nieświadome gesty pojawiają się synchronicznie z mową oraz niosą tę samą informację potwierdza teorię dotyczącą ewolucyjnych źródeł mowy. Niezaprzeczalnie gesty pełnią, tak jak mowa, funkcję komunikacyjną oraz regulacyjną. Niektóre gesty wykonywane w trakcie rozmowy realizują dodatkowo funkcję strukturyzacji dialogu, określania kontynuacji lub zmiany tematu, akcentowania ważności wypowiedzianych słów, przekazywania głosu między rozmówcami [23].

Mowa ciała, zarówno statyczna, wyrażająca się poprzez pozy, jak dynamiczna, czyli gesty, niesie jeszcze informację dodatkową o charakterze osoby. Dzięki właściwej interpretacji mowy ciała specjaliści prowadzący np. rozmowy kwalifikacyjne, są w stanie wyciągnąć wiele prawdziwych wniosków o kandydacie [10].

Gesty pozwalają uporządkować wypowiedź, zaakcentować odpowiednie fragmenty, ilustrują obiekty, kształty i czynności. Podobnie, jak w podziale mowy na części mowy, wprowadza się także klasyfikację gestów:

Emblematy to bardzo konkretne gesty o ustalonym, niezmiennym znaczeniu, wykonywane i odbierane świadomie. Są to gesty posiadające werbalne znaczenie.

Wykorzystywane są do zastępowania wybranych słów i bliżej im do znaków języka migowego niż do pozostałych typów gestów. Do takich gestów należy gest zwycięstwa, z palcami ustawionymi w kształt litery „V”, gest pocierania palcami, oznaczający liczenie pieniędzy oraz np. gesty obraźliwe.

Gesty ikoniczne zwane są także ilustracyjnymi. Wykorzystywane są do przedstawiania cech przedmiotów, zwłaszcza ich kształtów i rozmiarów, reprezentują obiekty i akcje. Wykorzystywane są do uzupełniania wypowiedzi. Zbadano, iż gest ikoniczny, wykonywany nieświadomie, rozpoczyna się przed słowem, które jest z nim związane, a gest świadomy – po rozpoczęciu słowa.

Gesty metaforyczne wyjaśniają idee, na przykład przez machanie dłonią, symbolizujące złożoność wypowiedzi lub rytmiczne skręcanie na boki dłoni z rozstawionymi palcami podczas wypowiadania słów „mniej więcej”.

Regulatory to gesty wykonywane w celu przejmowania głosu w rozmowie, np. opuszczenie swobodnie dłoni wzdłuż ciała po zakończeniu wypowiedzi, a podniesienie na początku.

Gesty wskazujące (ang. *deictic*) kierują uwagę odbiorców na rzeczywisty obiekt lub kierunek.

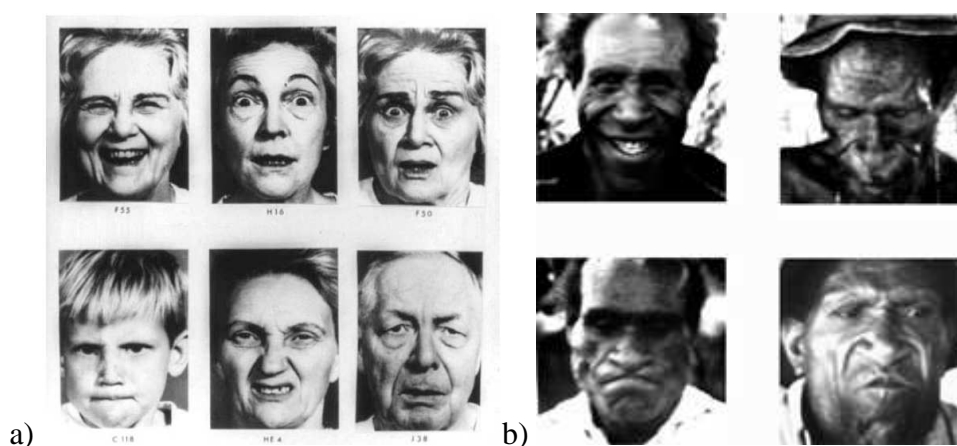
Gesty rytmiczne (ang. *beat*) to zazwyczaj postukiwanie palcem lub wymachiwanie dłonią w rytm słów, celem podkreślenia ich znaczenia i zyskania uwagi słuchacza. Prezentery telewizyjni realizują gesty rytmiczne samymi tylko ruchami głowy, o intensywności zazwyczaj większej niż podczas rozmowy twarzą w twarz.

Podkreślanie znaczeń słów gestami powinno być synchroniczne i przejaskrawione. Odpowiednie słowo, zaakcentowane i podkreślone intonacją, może być wzmocnione poprzez użycie gestu. Jeżeli gest ten będzie wykonany z większą niż zazwyczaj prędkością, wysunięciem rąk lub wzmocniony ruchem całego ciała oraz mimiką twarzy, przekaz uzyska maksymalną możliwą emfazę. Czasami, podczas publicznych występów, zaobserwować można wzmoczony ruch mówiącego po scenie, szerokie gesty, uderzenie pięścią w otwartą dłoń, czasem nawet w stół, nagłe i cykliczne rytmiczne ruchy. Inne zachowania dominują natomiast w trakcie komunikacji między dwiema tylko osobami. Gesty charakteryzują się mniejszymi amplitudami, są to ruchy nadgarstków i palców, a nie całych rąk, pochYLENIA głowy, wyrazy twarzy, występuje więcej gestów statycznych, np. złączenie dłoni palcami, ustawienie nóg i rąk w statycznej pozycji o odpowiednim wyrazie.

Większość gestów wykonywanych nieświadomie w trakcie konwersacji lub poza nią pełni rolę przekazywania informacji o emocjach osoby, np. splatanie dłoni i ramion, krzyżowanie nóg, są odbierane jako gesty obronne.

Komunikacja niewerbalna, czyli gestykulacja i układ sylwetki mają znaczenie nie tylko w porozumiewaniu między ludźmi, są także ważnym środkiem wyrazu w malarstwie, fotografii i animacji. Animacja bez dialogów, film niemy lub nieruchomy obraz są w stanie przekazać bardzo wiele treści, często trudnych do wyrażenia słowami. W wielu językach świata funkcjonuje znane również w Polsce przysłowie: „jeden obraz wart jest tysiąc słów”, pochodzące z Chin, znane także np. w Anglii – „*a picture is worth a thousand words*”.

Okazuje się, iż mimika twarzy jest bardziej od gestów jednoznaczna formą przekazu emocjonalnego. Ekman [36][37] dokonuje parametryzacji najważniejszych cech twarzy (Facial Action Coding System – FACS) i wykazuje, że podstawowe emocje: gniew, pogarda, smutek, strach, radość, zdziwienie, wstręt, są uniwersalne i rozpoznawalne dla ludzi we wszystkich kulturach. Przykład zdjęć twarzy o zróżnicowanej mimice wykorzystywanych w badaniach Ekmana przedstawiony jest na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zdjęcia twarzy wykorzystane w eksperymentach międzykulturowego rozpoznawania emocji:
a) przedstawiciele ras europejskich, b) mieszkańcy Nowej Gwinei [36]

Za umiejętność rozpoznawania wyrazu twarzy odpowiada ciało migdałowe w mózgu. Jest ono lepiej rozwinięte u kobiet niż u mężczyzn. Brizendine zauważa, iż u niemowląt płci żeńskiej potrzeba oglądania twarzy jest silniejsza niż u chłopców, którzy chętniej niż za twarzą rodzica wodzą oczyma za kolorowymi i świecącymi zabawkami. W pierwszych trzech miesiącach zdolność dziewczynek nawiązywania kontaktu

wzrokowego z ludźmi wzrasta o 400%, gdy tymczasem u chłopców pozostaje bez zmian. Uważa się, że testosteron w przypadku płci męskiej hamuje rozwój ciała migdałowatego i w chwili narodzin niemowlęta tej płci mogą mieć w tym ośrodku o 11% połączeń między komórkami nerwowymi mniej niż płci żeńskiej [16].

Łatwość ekstrakcji cech emocjonalnych mimiki twarzy (system FACS Ekmana) i ich jednoznaczność sprawiają, iż synteza właściwego wyrazu twarzy wirtualnych postaci jest zagadnieniem względnie prostym. Niniejsza rozprawa pomija kwestię animacji mimiki twarzy, zakładając, że zagadnienie to w dziedzinie animacji komputerowej jest już dobrze rozpoznane i nie wymaga pogłębionej analizy. Animacja ruchu całego ciała, gestykulacji, jest jednakże mniej rozwiniętą dziedziną, stąd też wynikło zainteresowanie autora tą właśnie tematyką.

2.2. Animacja tradycyjna

Pod pojęciem animacja tradycyjna rozumieć należy dowolne sposoby tworzenia, bez pomocy komputera, kolejnych nieruchomych klatek (faz ruchu). Pierwszą z metod jest animacja kukiełkowa. Wynalazek kinematografii umożliwił poklatkowe sekwencyjne fotografowanie lalek wykonywanych np. z plasteliny lub innych materiałów, wzmocnionych wewnętrznym drucianym szkieletem, ustawionych w scenografii. Zmiany w ułożeniu postaci i obiektów w scenie z klatki na klatkę muszą być na tyle niewielkie, by zachować złudzenie ciągłości ruchu. Dzięki tym metodom uzyskiwano dość duży realizm obrazu, jakość animowanego ruchu pozostawiała niestety dużo do życzenia. Często stosowano tę technikę do realizacji efektów specjalnych, takich jak np. interakcja animowanej postaci z pomniejszoną repliką rzeczywistego miasta. Pierwszym spektakularnym zastosowaniem animacji tego typu jest film King Kong z 1933 roku. Podstawową wadą metody kukiełkowej jest konieczność wstępnego zaplanowania ruchu i jego liniowego odtwarzania, klatka po klatce. Pewne analogie do tej metody znaleźć można w komputerowej animacji 3D, opisywanej w kolejnych rozdziałach, zwłaszcza, jeżeli rozpatruje się aspekty przygotowywania (modelowania, rzeźbienia, budowania) trójwymiarowych modeli scenografii i lalek.

Druga z tradycyjnych metod, którą porównać można z kolei do komputerowej animacji 2D, polega na odręcznym rysowaniu klatek. Technika ta pozwala na wielokrotne wykorzystanie gotowych rysunków, łatwe ich łączenie (np. nakładanie różnych postaci na

to samo tło), kopiowanie i poprawianie. Nie jest konieczne rysowanie klatek od pierwszej do ostatniej, gdyż można najpierw zaprojektować klatki ważniejsze, tzw. kluczowe, a klatki pośrednie dorysować później [12]. Tworzenie klatek pośrednich w większości przypadków jest na tyle proste, iż z powodzeniem można posłużyć się komputerem.

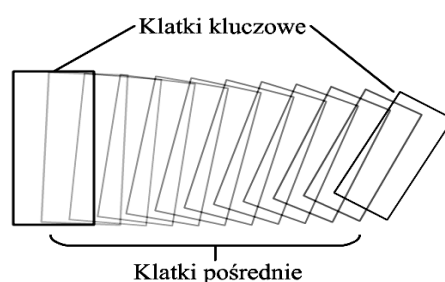
2.3. Komputerowe techniki animacji

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie aktualnych nurtów rozwoju komputerowych technik animacji i skonfrontowanie z nimi metody tworzenia animacji zaproponowanej przez autora. Na wstępie omówione są podstawy tworzenia animacji komputerowych, wykorzystujących klatki kluczowe i szkielet postaci. Wprowadzony zostaje podział na animacje wspomagane i generowane komputerowo. Omówione i skomentowane są sposoby uzyskiwania realistycznego ruchu: metody symulacyjne i rejestracja ruchu rzeczywistego. Wykazany zostaje brak metod pozwalających na stylizację animacji. Na zakończenie omówiona jest pokrótce metoda zaproponowana przez autora, która umożliwi uzyskiwanie animacji stylizowanych o zróżnicowanym charakterze subiektywnym.

Komputerowa animacja 2D w praktyce przebiega podobnie, jak animacja tradycyjna. Technika ta nazywana jest animacją na zasadzie klatek kluczowych. Podstawą jej jest zapisywanie w wybranych chwilach czasu, w tzw. klatkach kluczowych, wartości parametrów wskazanych przez użytkownika, natomiast wewnątrz zakresów pomiędzy nimi, czyli w tzw. klatkach pośrednich, wartości tych parametrów zmieniają się płynnie na zasadzie interpolacji. Przykład ruchu uzyskanego tą metodą jest przedstawiony na rys. 2.2, na którym widoczne są dwie skrajne klatki kluczowe ustalone przez użytkownika i szereg klatek pośrednich uzupełnianych automatycznie przez program komputerowy. Uzyskiwane są dzięki temu np. płynne zmiany przezroczystości (od 0% do 100%), zmiany koloru, położenia, orientacji obiektu w przestrzeni.

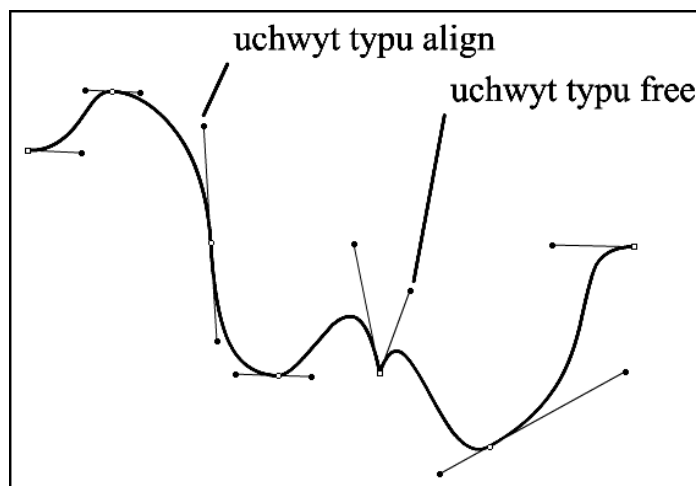
Omawiana technika przypomina tradycyjną technikę animacji rysunkowej, w której główny animator projektuje pozy kluczowe postaci, rozmieszcza je na osi czasu, zapisuje wskazówki dotyczące przejść między nimi, np. nieliniowości prędkości, a następnie klatki pośrednie dorysowuje asystent animatora. Takim asystentem jest obecnie program komputerowy, wykorzystujący prosty algorytm interpolacji.

Dużą popularnością cieszy się środowisko graficzne Macromedia Flash [58], w którym w bardzo przystępny dla użytkownika sposób można wykonywać animacje tego typu. Animacja z klatkami kluczowymi jest wykorzystywana powszechnie w programach nie tylko do animacji (3Dstudio, Macromedia Flash, Blender), ale także do edycji i montażu wideo (Adobe Premiere) oraz do tworzenia efektów specjalnych (Adobe AfterEffects), w których interpolowane mogą być dowolne parametry opisujące efekt, np. płynnie zmieniany stopień przezroczystości.



Rys. 2.2. Przykład animacji 2D z klatkami kluczowymi i pośrednimi

Zastosowanie interpolacji liniowej pozwala stworzyć ruch obiektu z jednostajną prędkością, wielomianowej – ruch niejednostajny. Dostępne w wielu systemach animacji narzędzia edycji krzywej interpolującej pozwalają w sposób wizualny modyfikować jej nachylenie poprzez zmianę długości uchwyty kontrolnego. Dodatkowo podobnie, jak w narzędziach graficznych edycji krzywych wektorowych, możliwe jest dodawanie punktów oraz definiowanie sposobów ekstrapolacji poza przedział zdefiniowany podanymi wartościami parametrów w klatkach kluczowych. W celu uzyskania płynności ruchu, należy zapewnić ciągłość pierwszej pochodnej w punktach kluczowych poprzez użycie punktów kontrolnych, tzw. uchwyty, typu *align*. Z kolei dla uzyskania gwałtownej zmiany kierunku ruchu, czyli nieciągłości pierwszej pochodnej stosowane są uchwyty typu *free*, co przedstawione jest w sposób graficzny na rys. 2.3.

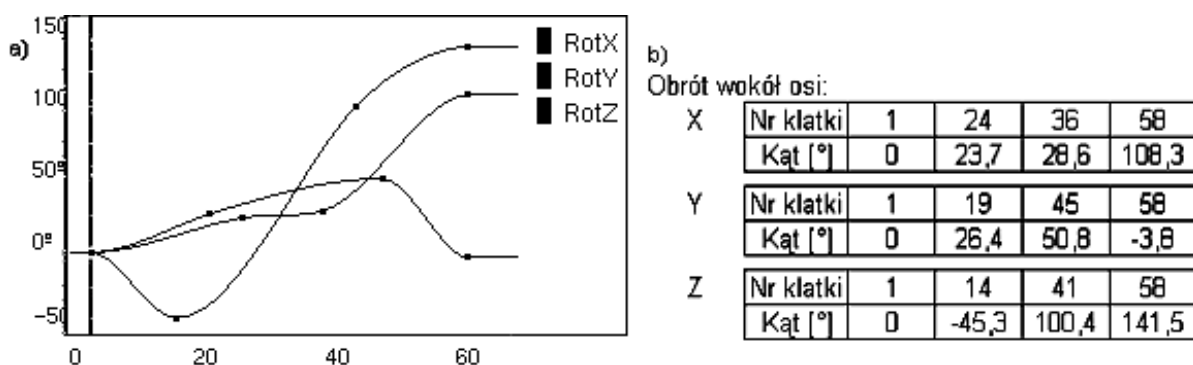


Rys. 2.3. Edycja krzywych interpolacyjnych z wykorzystaniem uchwytów: wykorzystanie uchwytu nazywanego *align* gwarantuje ciągłość pierwszej pochodnej krzywej w punkcie kluczowym, uchwyt *free* pozwala projektować krzywe o nieciągłej pierwszej pochodnej

Komputerowa animacja 3D może być traktowana jako rozwinięcie podejścia dwuwymiarowego z tym, że definicja obiektów, ruchu i przekształceń wzbogacona zostaje o kolejny wymiar – głębie. Konieczne jest zaprojektowanie trójwymiarowej sceny i obiektów w pamięci komputera, ustawienie punktu obserwacji sceny, czyli położenia kamery, oświetlenie i „wykonanie zdjęcia”, zwane renderingiem, co może nasuwać skojarzenia z tradycyjną techniką animacji lalkowej. W przypadku technik komputerowych możliwe jest uzyskanie zaawansowanej nieliniowej edycji, wykorzystanie klatek kluczowych i automatyczne uzupełnianie klatek pośrednich.

Każde przekształcenie w przestrzeni 2D i 3D opisywane jest danymi umieszczanymi w tzw. kanałach, które zawierają ciągi danych w postaci par (t, a) – *czas*, *wartość*, gdzie czas oznacza numer klatki, w której odpowiedni parametr ruchu musi przyjąć założoną wartość. Rys. 2.4 przedstawia trzy wybrane krzywe dla parametrów obrotu i powiązane z nimi dane zapisane w kanałach. Dostępne parametry to:

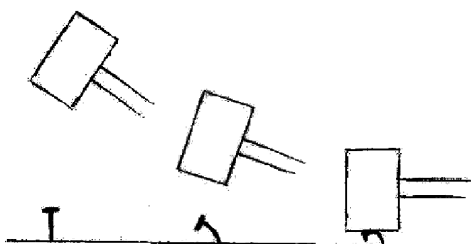
- położenie obiektu mierzone wzdłuż osi X, Y, Z;
- obrót obiektu wokół osi X, Y, Z;
- skalowanie obiektu wzdłuż osi X, Y, Z.



Rys. 2.4. a) Krzywe interpolacyjne ruchu, b) wektory opisujące ruch

Animacja wspomagana komputerowo

W przypadku, gdy komputer wykorzystywany jest wyłącznie do obliczania klatek pośrednich ruchu na podstawie klatek kluczowych przygotowanych przez użytkownika, można mówić o **wspomaganiu animacji**¹. Jak to już zostało wspomniane wcześniej, podstawą wyliczania klatek pośrednich jest interpolacja. Całkowita automatyzacja procesu interpolacji wartości pośrednich niesie za sobą niebezpieczeństwo stworzenia animacji nierealistycznej, której przykład przedstawiony jest na rys. 2.5. Z tego powodu konieczne jest korygowanie przez użytkownika przebiegu krzywych interpolujących do potrzeb konkretnych animacji poprzez edycję krzywych lub wprowadzanie nowych klatek kluczowych.

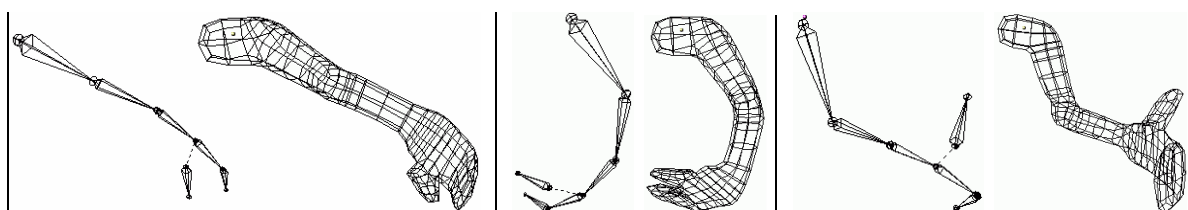


Rys. 2.5. Nieprawidłowa klatka pośrednia pomiędzy dwiema klatkami kluczowymi

Animowanym obiektem może być bryła 3D lub bardziej skomplikowany obiekt. W przypadku animacji złożonych obiektów, które podlegają deformacjom, takich jak np. postać ludzka składająca się z części ciała połączonych ruchomymi stawami, konieczne jest zdefiniowanie szkieletu o odpowiedniej hierarchii. Ruchy kości tego szkieletu

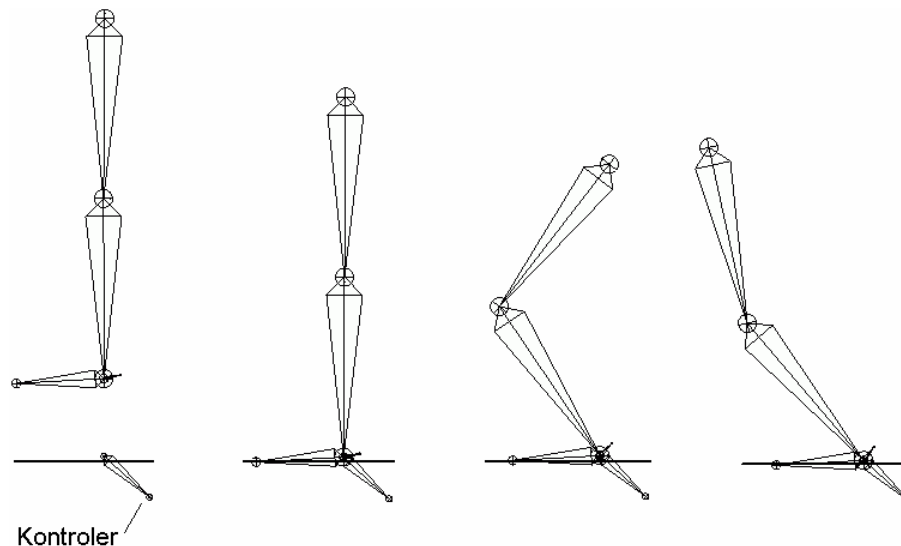
¹ Klasyfikacja animacji zaproponowana przez Autora. Wspomaganie animacji jest przeciwieństwem do generowania animacji, opisywanego dalej.

modyfikować będą siatkę 3D opisującą powierzchnię obiektu [20][42][102]. Przykład odkształcania siatki ręki animowanej pięcioma kośćmi przedstawiony jest na rys. 2.6. Dla czytelności szkielet pokazany jest obok siatki, a nie wewnątrz niej, gdzie w rzeczywistości jest umieszczany. Stosowana pomiędzy kośćmi szkieletu hierarchia rodzic-dziecko, umożliwia przenoszenie zmian parametrów na obiekty potomne, dzięki czemu np. zgięcie nogi w stawie biodrowym pociąga za sobą zmianę położenia uda, łydki i stopy. Taki kierunek przekazywania parametrów transformacji nosi nazwę kinematyki prostej (FK – ang. *forward kinematics*) i znany jest z tradycyjnych metod animacji poklatkowej z lalkami o drucianym szkielecie.



Rys. 2.6. Wykorzystanie szkieletu do odkształcania siatki 3D

Znacznym ułatwieniem w projektowaniu ruchu jest zastosowanie kinematyki odwrotnej (IK – ang. *inverse kinematics*), w której określa się położenie jednego z obiektów potomnych poprzez zastosowanie dodatkowego obiektu kontrolującego, a obroty obiektów nadrzędnych obliczane są automatycznie, np. ustawienie kontrolera położenia stopy na podłożu podczas wykonywania przysiadu i przesuwanie tułowia w dół, powoduje automatyczne uginanie nóg, zaprezentowane na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Kinematyka odwrotna: pozycja kontrolera ustawiona na podłożu. Gdy następuje poruszanie kością uda, staw kolanowy i kostka ustawiane są automatycznie, a stopa pozostaje na podłożu w miejscu wyznaczonym przez kontroler

Częstym przypadkiem zastosowania kinematyki odwrotnej jest animowanie sekwencji sięgania po przedmiot i chwytania go. Wystarczy zaprojektować trajektorię ruchu samej dłoni, a ułożenie ramienia i przedramienia wyliczone zostaną przez komputer. Trafienie dłonią w przedmiot nie będzie wymagać ręcznego ustawiania obrotów wielu kości, tylko zdefiniowana położenia kontrolera kości dłoni. W tradycyjnej animacji podobne możliwości daje użycie lalek zwanych jawajkami (rys. 2.8). Lalka umocowana jest na kiju, a do jej dłoni przymocowane są pręty, tzw. czempuryty, których odpowiednikiem w kinematyce odwrotnej są kontrolery. Lalkarz kieruje wyłącznie położeniem dłoni lalki, a jej ręce zginają się swobodnie w stawach.



Rys. 2.8. Jawajka

Animacja wspomagana komputerowo wymaga od animatora znajomości narzędzi edycji krzywych interpolacyjnych, posługiwania się kośćmi szkieletu postaci, niełatwej umiejętności zaprojektowania ruchu wymownego, naturalnego lub przejawionego w zależności od potrzeb. Wszystkie istotne elementy ruchu są pod kontrolą animatora, co pozwala kształtować go całkowicie wedle uznania.

Animacja generowana komputerowo

Odwzorowując w programach komputerowych prawa fizyki [142] i biomechanikę ludzkiego układu motorycznego, można uzyskać w metodach symulacyjnych ruch zbliżony jakością do rzeczywistego. Dotyczy to animowania dynamicznych zachowań, tj. uderzenia, skoku, spadania, itp. [38]. W takich zastosowaniach konieczne jest zadanie warunków brzegowych: wektorów prędkości na początku ruchu i miejsca, w których ruch powinien się zakończyć. Na tej podstawie wyliczana jest faza przejściowa. W metodach symulacyjnych pomijane są cechy emocjonalne postaci. W takim wypadku mówić można o **animacji generowanej komputerowo**. Zwykle animator ma ograniczony wpływ na przebieg symulacji, co może zawęzić zakres zastosowań, jednakże uzyskiwane rezultaty często charakteryzują się wysokim realizmem ruchu. Symulacja dobrze sprawdza się w zastosowaniach prototypowania maszyn, przykładowo testowania funkcjonalności robotów w wirtualnym środowisku [91][92][119].

Aktualne badania prowadzone w różnych ośrodkach badawczych dotyczą wprowadzenia do symulacji dodatkowych możliwości interakcji i wpływu na przebieg symulacji. Badania mają na celu umożliwienie tworzenia w ten sposób animacji nacechowanych artystycznie [32]. Rozwijane są także metody generowania animacji wiarygodnego ruchu, odpowiadającego prawom fizyki, której scenariuszem jest sekwencja zaprojektowana ręcznie przez użytkownika [114]. Ponadto często w celu przyspieszenia obliczeń rezygnuje się z dokładności symulacji, zapewniając jednak dostateczną wiarygodność ruchu [98]. Systemy animacji interaktywnej z szybkim czasem reakcji znajdują szerokie zastosowania, np. w grach komputerowych.

W celu generowania realistycznego ruchu wykorzystuje się także **algorytmy genetyczne** i **sieci neuronowe**, symulujące działanie układu nerwowo-ruchowego człowieka. Poniżej przedstawiono pokrótce zastosowania tych metod w animacji komputerowej lub pokrewnych dziedzinach.

W systemie *Morphine* algorytmy genetyczne i sieci neuronowe wykorzystano do stworzenia modelu układu ruchowego człowieka i do nauczenia go podstawowych

zachowań i reagowania w ludzki sposób na działanie sił zewnętrznych [38]. Przykładowe zachowania użyte w treningu to utrzymywanie postawy wyprostowanej, balansowanie, skok, chwywanie, asekuracja ciała podczas upadku. Rozwiązanie to stosowane jest w studiach filmowych do realizacji efektów specjalnych, a podstawową jego wadą jest brak możliwości złożonego reżyserowania akcji oraz generowania gry aktorskiej, np. gestykulacji. Oprogramowanie to jest dostępne komercyjnie. W roku 2007 zrealizowano nowe wersje omawianych algorytmów działające w czasie rzeczywistym, które zaczęto wykorzystywać także w produkcji gier wideo, w celu zwiększenia stopnia interakcji gracza z innymi postaciami. Aplikacja *Morphine* umożliwia wczytanie animacji rzeczywistego zarejestrowanego ruchu i zaznaczenie miejsca, od którego postać sterowana ma być algorytmem symulacyjnym w celu zareagowania na bodziec zewnętrzny. Przykładowo idąca postać zostaje uderzona przez postać gracza. Przed momentem uderzenia odtwarzana jest sekwencja marszu w postaci ruchu przechwyconego lub sekwencja wykonana wcześniej przez animatora, zwykle odtwarzana w pętli, następnie, w chwili kolizji obu postaci, włączana jest symulacja uwzględniająca dotychczasowy stan obu postaci, kierunek poruszania i siłę uderzenia. Animator nie ma możliwości ingerowania w algorytmy symulacji zachowań, które są wytworzone przez autorów programu metodami genetycznymi, choćby w celu uzyskania animacji nierealistycznej, komiksowej, co ogranicza zakres zastosowań tej aplikacji.

Do generowania ruchu stosowane są także podejścia energetyczne, w których zakłada się, że ilość energii wydatkowana na poruszanie się powiązana jest z charakterem ruchomej postaci. Założono, że duży zasób energii towarzyszący ruchowi utożsamiany będzie przez widzów z ruchem żywym i wesołym, mały – ze smutnym i zmęczonym. Nierówne rozłożenie energii pomiędzy dwoma kończynami może przykładowo prowadzić do generowania w ten sposób animacji kroku kulejącego. Algorytmy uczące dostrajają parametry ruchu w celu optymalizacji funkcji kosztu związanej z ograniczeniami energii i osiągnięciem punktu docelowego. Metody te stosowano m.in. do kierowania czworonożnym robotem [107], którego zachowanie poddawano następnie subiektywnej ocenie. Prace te są nadal w fazie badań.

Densley i Willis pracują nad algorytmicznym modyfikowaniem póz postaci w celu zmiany ich subiektywnego wydźwięku. Tworzą odpowiednie reguły opisujące np. odległość rąk od ciała wykorzystując wiedzę na temat mowy ciała i komunikacji niewerbalnej [31].

Prowadzone są również badania dotyczące nowych interfejsów kontroli ruchu. Przykładem jest sterowanie animacją za pomocą tabletu [133]. Ruch pióra po tablecie jest rejestrowany i przenoszony w czasie rzeczywistym na wybrane parametry animowanego ruchu, jak na przykład zmianę położenia obiektu bądź poruszanie oczyma postaci. Pozwala to intuicyjnie tworzyć ruch, podobnie jak w tradycyjnej technice lalkarskiej.

Osobną, daleką od opisanych powyżej, techniką uzyskiwania animowanego ruchu, jest rejestrowanie zachowania aktorów i przenoszenie go na postaci wirtualne. Już w początkach animacji artysta wspomagał się zarejestrowanym na kliszy filmowej ruchem postaci ludzkich. W filmie „Królewna Śnieżka” z 1937 roku, animatorzy studia Walta Disneya wykorzystali technikę rotoskopii, polegającą na przerysowywaniu klatka po klatce ruchu sfilmowanego aktora na ruch postaci animowanej. Współcześnie wykorzystywana jest zaawansowana wersja tej techniki zwana przechwytywaniem ruchu (ang. *Motion Capture*). Przechwycony rzeczywisty ruch można wykorzystywać do tworzenia realistycznych animacji postaci ludzkich. Zarejestrowane dane o ruchu aktora są odwzorowywane jako kąty obrotu i przesunięć kości szkieletu wirtualnej postaci. Jeśli dane te nie zostały zakłócone w procesie akwizycji, to animowany ruch charakteryzuje się wysoką jakością i realizmem.

Techniczna realizacja przechwytywania ruchu polega na montowaniu czujników ruchu w ważnych punktach na ciele aktora, odgrywającego daną akcję. Ruch czujników w przestrzeni trójwymiarowej śledzony jest aparaturą optyczną bądź elektromagnetyczną. W celu uzyskania dobrej jakości nagrania konieczne jest próbkowanie położzeń od 20 do 30 znaczników z częstotliwością co najmniej 60 Hz. Zaawansowane systemy przechwytywania ruchu oferują także rejestrację mimiki twarzy aktora (ang. *performance capture*), na której również możliwe jest umieszczanie odpowiednich znaczników. Niestety technika ta nie jest pozbawiona wad. Wysoka cena aparatury i surowe wymagania technologiczne dotyczące realizacji nagrań ruchu to tylko jeden z negatywnych aspektów tej techniki. Istotny jest fakt, że dane rejestrowanego ruchu praktycznie nie nadają się do ręcznej edycji, błąd popełniony podczas odgrywania ruchu przez aktora wymaga ponownego nagrania całej sekwencji. Przetwarzanie zarejestrowanego ruchu jest trudne i nieintuicyjne.

W ostatnich latach rozwijane są metody bezznacznikowego rejestrowania ruchu, przydatne szczególnie do przechwytywania mimiki twarzy [60][117][147], a także całego ciała [61] i rekwizytów [87]. Rozwijane są metody wykorzystywania danych zarejestrowanego ruchu w celu uzyskiwania ruchu różnego od oryginalnego [146].

Dokonywane jest skalowanie zmian parametrów w dziedzinie ich wartości oraz w czasie. Generowany jest dość realistyczny ruch o tempie innym od zarejestrowanego, poprzez zmianę skali czasu oryginalnego nagrania lub nacechowany uczuciami, poprzez zmianę zakresu zmienności wartości parametrów. Dzięki zastosowaniu nieliniowego przekształcenia czasu (ang. *time warping*) możliwe jest także tworzenie nowych sekwencji z kilku połączonych i zsynchronizowanych ruchów różnego typu, np. płynne i wiarygodne przejście od marszu do biegu. Połączenie technik przechwytywania ruchu i rotoskopii pozwoliło na ekstrakcję ruchu z tradycyjnych filmów animowanych i przenoszenie go na postaci wirtualne, dzięki czemu w łatwy sposób uzyskiwany jest ruch stylizowany i nacechowany emocjonalnie [15]. Analiza danych ruchu o różnorodnym nacechowaniu emocjonalnym pozwala na parametryzację i dokładniejszy opis emocji [2][19], zaś analiza Fourierska sygnałów ruchu umożliwia ekstrapolację sekwencji [135]. Odejmowanie widmowe stosowane jest do ekstrakcji parametrów emocjonalnych. Przykładowo analiza ruchu wyraźnie nacechowanego pozwala wyodrębnić składowe odpowiedzialne za wrażenia subiektywne i wykorzystać je do generowania ruchu innych czynności o podobnym nacechowaniu emocjonalnym. Jednakże zależności między składowymi ruchu o danej częstotliwości a subiektywnym odczytywaniem treści nie są do tej pory dobrze zbadane.

Istniejące systemy edycji danych przechwyconego ruchu oparte są na algorytmach i metodach często zbyt zawiłych, nieintuicyjnych i niezrozumiałych dla animatora. Dlatego badania prowadzone przez autora rozprawy, dotyczące redukcji nadmiarowych danych z przechwyconego ruchu mają na celu ułatwienie ręcznej edycji i zapis danych ruchu jako animacji z klatkami kluczowymi [124] poprzez tworzenie algorytmów automatycznego opisywania i klasyfikacji sekwencji [85][127].

Większość współczesnych systemów animacji stanowią narzędzia wspomagające pracę animatora tylko poprzez wyliczanie klatek pośrednich. Odbywa się to za pomocą parametrów granicznych zadanych w klatkach kluczowych oraz krzywych interpolacyjnych. Realistyczny ruch powstaje więc dzięki umiejętnościom i wiedzy animatora. Z kolei komputerowe techniki symulacyjne i rejestracja ruchu rzeczywistego pozwalają na uproszczenie procesu tworzenia animacji, jednak prawdopodobnie metody takie nie znajdują zastosowania w animacji stylizowanej czy artystycznej ze względu na trudności zasymulowania lub odegrania przez aktora nierealistycznych, stylizowanych, przejaskrawionych sekwencji ruchu. Ponadto wymagają wysokich nakładów finansowych, zakupu lub wynajmu drogiego studia, sprzętu i oprogramowania i

dotychczasowych umiejętności technicznych, niedostępnych dla animatorów pracujących metodami tradycyjnymi. W związku z tym konieczne jest zweryfikowanie i rozwinięcie metod wspomagania animacji z naciskiem na umożliwienie tworzenia ruchu stylizowanego i nierealistycznego o wysokiej jakości subiektywnej.

Metoda zaproponowana w rozprawie i przebadana przez autora nie ma na celu uzyskania animacji realistycznych, natomiast pozwala wygenerować wersje ruchu, które różnią się *płynnością* oraz *stylem* ruchu, od ruchu bardziej naturalnego do bardziej karykaturalnego, komiksowego. Ponadto generowane animacje charakteryzują się wysoką jakością subiektywną ruchu. W metodzie tej nie jest uwzględniana biomechanika ludzkiego ciała, ani metody symulacji zjawisk fizycznych, wykorzystywane są natomiast reguły animacji znane w animacji tradycyjnej, w sposób, w jaki zwykle korzysta z nich animator. Możliwe jest dzięki temu uzyskiwanie ruchu stylizowanego o wysokiej jakości. Narzędzie zaprojektowane przez autora może być włączone w proces realizacji animacji komputerowych. Punktem wyjścia jest wstępnie przygotowana, schematyczna wersja ruchu, zaś efektem przetwarzania animacja, która jest zrealizowana przez program w sposób intuicyjny dla animatora i której elementy można łatwo interpretować w celu „nastrojenia” algorytmu na pożądane działanie.

2.4. Reguły animacji

Poniżej opisano reguły animacji tradycyjnej i sposób ich realizacji w technice komputerowej. Reguły dotyczą sposobu wykorzystania faz ruchu i są one podstawą przetwarzania animacji w metodzie zaproponowanej i rozwijanej przez autora w ramach rozprawy.

Podstawą działań animatora, bez względu na to czy pracuje on metodami tradycyjnymi, czy wykorzystuje komputer, są reguły animacji. Reguły te sformułowane zostały przez animatorów ze studia Walta Disneya na początku XX wieku [57][134][145]. Sprecyzowano kilkanaście wytycznych, mówiących, w jaki sposób należy wykorzystać dostępne środki techniczne w celu uzyskania najlepszego efektu subiektywnego. Ostateczna subiektywna ocena animacji zależy od rozmieszczenia klatek kluczowych i od zmian prędkości ruchu między nimi. Reguły mają postać zdań napisanych w języku naturalnym i wykorzystują subiektywnie określone wartości parametrów animacji, takich jak np. mała prędkość lub duże ściśnięcie. Z tego względu w rozprawie do przetwarzania

danych animacji wykorzystywana jest logika rozmyta . Animacja opisywana jest parametrami rozmytymi wyznaczanymi subiektywnie, reguły zaś przedstawiane są w postaci rozmytych reguł decyzyjnych, będących wynikiem wydobywania wiedzy z animacji uczących oraz transkrypcji reguł animacji z języka naturalnego.

Animatorzy Disneya, opierając się na poniższych regułach i wieloletnich doświadczeniach, stworzyli dziesiątki filmów animowanych, uznawanych do dzisiaj za największe osiągnięcia w tej dziedzinie. Wymowność i emocjonalność postaci w filmach Disneya wzrusza i bawi kolejne pokolenia widzów.

Bez względu na stosowane środki techniczne, metody i algorytmy symulacyjne [123], animacja musi posiadać kilka podstawowych cech, aby uznana została za interesującą i wiarygodną. Realistycznie wyrenderowany obiekt 3D, dopóki pozostaje nieruchomy jest wiarygodny, jednakże utrzymanie tego realizmu, gdy zacznie się on poruszać, jest zadaniem trudnym. Jeśli komputer służy wyłącznie jako narzędzie wspomagające pracę animatora, to właśnie od umiejętności wykorzystania reguł i od wiedzy człowieka zależy efekt końcowy.

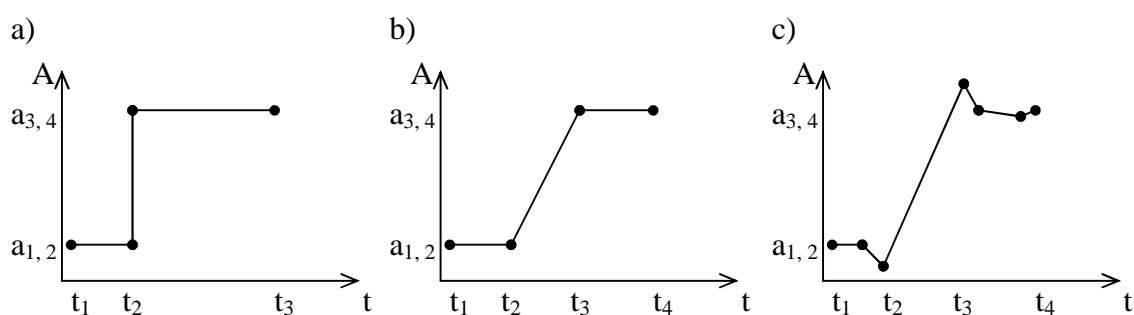
2.4.1 Reguły animacji tradycyjnej

Poniżej przytoczone zostały najważniejsze reguły animacji tradycyjnej i wskazany został ich wpływ na wynikową jakość subiektywną ruchu. Od doboru klatek kluczowych i zmian prędkości zależy ostateczny subiektywny wydźwięk animacji. W literaturze opisanych jest kilkanaście reguł animacji, które są wskazówkami dla animatorów, mówiącymi, w jaki sposób wykorzystać dostępne środki techniczne w celu osiągnięcia najlepszego efektu. Ruch uzyskiwany za pomocą tej metody nie zawsze jest realistyczny, jednakże jest interesujący i nacechowany indywidualnym stylem, zwykle odczytywany jest przez widza jako przejawiskrawiony, ale dzięki temu jest on bardzo czytelny.

Od pozy do pozy (ang. *pose-to-pose*) jest to ogólna wskazówka dla animatora (lub też styl pracy), w jaki sposób można zorganizować tryb pracy, aby uzyskiwać animacje zgodne z założeniami dostarczonymi przez reżysera. Animator powinien na początku zaprojektować główne ułożenia ciała postaci, pozy, które następnie są rozmieszczane odpowiednio w czasie i ustalany jest czas ich trwania za pomocą klatek kluczowych. Między pozami występują liniowe przejścia, czyli ruch jednostajny. Układ póż definiuje czynność wykonywaną przez animowaną postać. Uzyskiwana jest w ten sposób prosta animacja nazywana schematyczną (ang. *blocking*). Drugim krokiem jest wprowadzanie do przejść między pozami faz dodatkowych, nowych klatek kluczowych, zgodnie z

pozostałymi opisanymi poniżej, regułami animacji. Wstępna, schematyczna wersja animacji jest w ten sposób stopniowo rozbudowywana, ruch nabiera płynności i charakteru, pojawiają się dodatkowe elementy ruchu, zmieniające subiektywny charakter animacji. Zaprojektowanie póz w pierwszym etapie jest niezwykle ważne dla odzwierciedlenia przekazu, treści odgrywanej akcji i emocji postaci, gdyż widzowie już na podstawie statycznej informacji o ułożeniu kończyn i ciała są w stanie przypisać animowanej postaci wyrażane przez nią emocje [30]. Rozpoczęcie pracy od ustalenia czasowego rozkładu klatek kluczowych póz pozwala spełnić wymagania reżysera oraz synchronizować wyniki pracy wielu osób, np. odpowiedzialnych za ruch pierwszoplanowy i drugoplanowy.

W praktyce zwykle na początku tworzony jest film z nieruchomych szkiców wyświetlanych przez odpowiednio długi fragment czasu. Pełni on rolę obrazkowego scenariusza animacji (ang. *animatic*), przedstawiającego zdarzenia rozgrywające się w danej scenie. Często do niego dodaje się ścieżkę dźwiękową, nagraną przed realizacją animacji, do której synchronizowane są czasy wykonywania czynności, długości ujęć, a w kolejnych etapach pracy nad animacją, także ruchy ust postaci w dialogach. Stopniowo, zgodnie z metodą „od pozy do pozy”, taki scenariusz jest najpierw wzbogacany o liniowe przejścia między pozami, a następnie o fazy dodatkowe, co przedstawione jest dla pojedynczej krzywej interpolacyjnej na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Dane ruchu w etapach projektowania: a) *animatic*,
b) animacja schematyczna, c) animacja końcowa

Przeciwieństwem tego stylu animacji jest animacja wprost (ang. *straight ahead*), w której klatki wykonywane są chronologicznie jedna po drugiej. Gotowa animacja nie jest poprawiana, do ruchu nie wstawia się nowych klatek, można go jedynie kontynuować. Ten styl owocuje zwykle spontanicznym, przejawskrawionym ruchem i nie jest on przedmiotem

rozważań w niniejszej rozprawie. Reguła „od pozy do pozy” stanowi podstawę systemu wspomagającego animatora, zaproponowanego przez autora rozprawy.

Reguła antycypacji (ang. *anticipation*) polega na przygotowaniu postaci do wykonania czynności głównej poprzez wprowadzenie krótkiego ruchu w kierunku przeciwnym do głównego ruchu (np. zamach przed rzutem, przysiad przed skokiem, itp.). Wprowadzenie fazy antycypacji w formie np. lekkiego ruchu ręki przed jej wysunięciem jest celowe, gdyż kieruje uwagę widza na to, co ma się wydarzyć. Brak antycypacji zaskakuje widza, ruch wydaje się nieprzyczynowy. Jeśli akcja jest zbyt szybka i nie zostanie odpowiednio zapowiedziana, widz może nie zrozumieć jej znaczenia. Prawidłowo wprowadzona faza antycypacji ma za zadanie przygotować widza na wystąpienie głównej czynności, a ponadto wpływa na jej subiektywny wydzźwięk. Dla przykładu animacja związana z poruszeniem z miejsca ciężkiego lub lekkiego przedmiotu będzie miała odpowiednio dłuższą i krótszą fazę antycypacji. Często spotykana w filmach animowanych sekwencja długiego rozpędzania się rysunkowej postaci w miejscu i błyskawicznego zniknięcia z ekranu jest dobrym przykładem wykorzystania fazy antycypacji w procesie tworzenia animowanego ruchu.

Jest to jedna z faz ruchu analizowanych w ramach niniejszej rozprawy. Parametryzacja fazy antycypacji i jej generowanie opisane są w rozdziale 5.1.

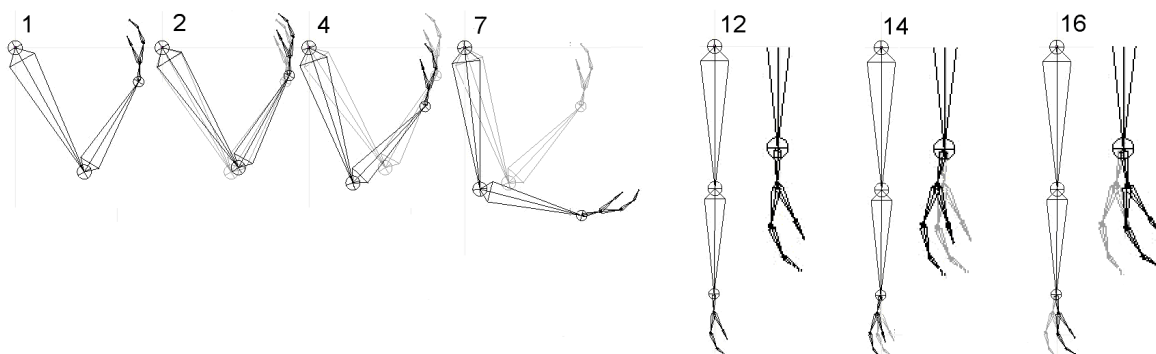
Reguła następstw ruchu (ang. *follow through*) dotyczy opóźnień w przenoszeniu ruchu na kolejne części ciała, zgodnie z hierarchią połączeń kości w szkielecie. Wprawianie kończyny w ruch powinno przebiegać etapami: pierwsze poruszy się biodro, przenosząc środek ciężkości postaci i przekazując pobudzenie na udo i dalej łydkę i stopę. Podobnie realizowana powinna być faza zatrzymania. Jeśli każda z części łańcucha szkieletu ręki zatrzyma się w tym samym momencie, ruch będzie robił wrażenie nienaturalnego. W animacji ruchu ręki w pierwszej kolejności powinno przestać poruszać się ramię, później przedramię, a na końcu dłoń. Klatki oznaczone numerami 2, 4 i 7 na rys. 2.10 są przykładem wykorzystania reguły następstw. Widoczne jest opóźnienie momentu zmiany kąta ustawienia kości położonych niżej w hierarchii szkieletu. W klatce 2. rozpoczyna się ruch w barku, w klatce 4. rozpoczyna się ruch w łokciu, a dopiero w klatce 7. zaczyna się zmiana ustawienia nadgarstka.

Powyższa reguła została wpisana „na stałe” w algorytmie przetwarzania animacji zaproponowanym przez autora rozprawy. Oznacza to przyjęcie założenia, że dla animacji przetwarzanych w zrealizowanych eksperymentach wysoką jakość ruchu uzyskuje się dla konfiguracji 3-2-2, tzn. przedramię w stosunku do ramienia jest opóźnione o 3 klatki, dłoń

względem przedramienia o kolejne 2, palce względem dłoni o kolejne 2 klatki. Uzyskana w testach subiektywnych ocena wykazała, iż takie założenie jest prawidłowe.

Reguła przerzutu (ang. *overshoot*) polega na przekraczaniu przez ruchomy obiekt położenia docelowego (kluczowego) przed zatrzymaniem. Zatrzymanie nigdy nie jest natychmiastowe. Kilka klatek animacji poświęconych na pokazanie bezwładności i wytracanie energii ruchu pozytywnie wpływa na odbiór jego realizmu. W opisanym powyżej przykładzie ruchu ręką, dłoń przed zatrzymaniem powinna minimalnie przekroczyć położenie spoczynkowe, a następnie zmienić kierunek ruchu i do niego wrócić, co przedstawiają klatki oznaczone numerami 12, 14 i 16 na rys. 2.10. Nawet, gdy faza trwa ta tylko ułamek czasu, np. 3 klatki (1/8 sekundy), jest zauważalna i pozytywnie wpływa na ocenę realizmu. Ruch taki, podobny do trzaśnięcia biczem, nabiera dynamizmu, charakteru i siły. Zachowanie się dłoni w ostatniej fazie oddaje jej ciężar. Obiekt lżejszy zatrzyma się szybciej niż ciężki i amplituda wychylenia poza położenie spoczynkowe będzie mniejsza.

Jest to obok antycypacji druga najważniejsza faza ruchu wzbogacająca animację schematyczną. Faza ta także jest parametryzowana, analizowana i generowana w systemie wspomaganego animacji zaproponowanym przez autora rozprawy. Etapy te opisuje rozdział 5.1.



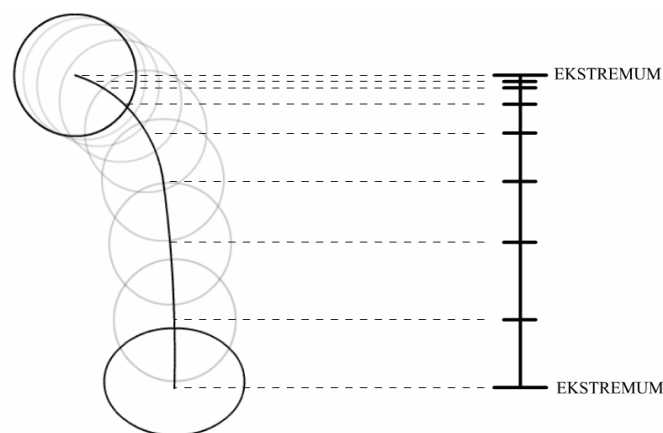
Rys. 2.10. Klatki animacji spełniającej reguły

Reguła przyspieszania i opóźniania (ang. *slow in*, *slow out*) dotyczy odpowiedniego wykorzystania zmian prędkości podczas ruchu. Ruch między klatkami kluczowymi z jednostajną prędkością powoduje wrażenie mechaniczności i nienaturalności. Postać, rozpoczynając ruch, powinna nabierać prędkości, w połowie ruchu uzyskiwać największą prędkość, zaś przed zatrzymaniem stopniowo ją wytracać. W tradycyjnej animacji złudzenie zwalniania i przyspieszania osiąga się poprzez

rysowanie w kolejnych klatkach obiektu z odpowiednim, sukcesywnie malejącym bądź rosnącym przesunięciem. Przed rozpoczęciem tworzenia klatek pośrednich wykonywany jest uproszczony wykres (ang. *timing chart* lub *spacing chart*), przedstawiający sposób rozmieszczenia klatek w dziedzinie czasu. Przykład takiego wykresu i klatki animacji przedstawione są na rys. 2.11. Wykres ten jest informacją dla asystenta animatora, w jaki sposób ma on uzupełnić klatki pośrednie między pozami zaprojektowanymi przez głównego animatora.

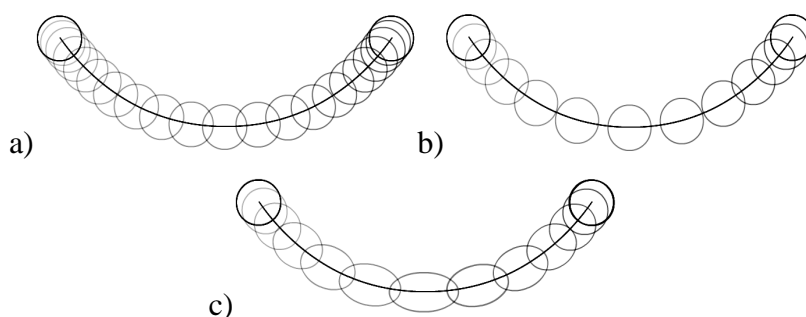
Reguła ta w zaprojektowanym w ramach rozprawy algorytmie wspomaganie animacji spełniana jest automatycznie poprzez zastosowanie między klatkami kluczowymi interpolacji krzywymi Beziera. Ten typ interpolacji często jest ustawiany jako domyślny dla obliczania wartości parametrów ruchu w klatkach pośrednich. Gwarantuje on stopniowe przyspieszenie na początku ruchu i zwolnienie na jego końcu, przed zatrzymaniem. Animator może ręcznie edytować krzywe, aby realizować zatrzymania gwałtowne, a nie płynne, jednakże w animacji gestykulacji, która jest przedmiotem rozprawy, ruch postaci nigdy nie ustaje natychmiastowo i zawsze powinien spełniać regułę przyspieszania i opóźniania. Stanowi to uzasadnienie wykorzystania w proponowanym systemie wspomaganie animacji interpolacji krzywymi Beziera.

Reguła ściskania i rozciągania (ang. *squash and stretch*) polega na zmianie kształtu obiektu podczas jego ruchu. Odształcenie pokazuje działanie sił na obiekt i jego sztywność lub elastyczność. Spadająca piłka, przedstawiona na rys. 2.11 przy uderzeniu o podłoże spłaszczy się w pionie, jednocześnie rozciągając proporcjonalnie w poziomie, tak by zachować wrażenie stałej objętości. Stopień zniekształcenia przekłada się na postrzeganą subiektywnie sprężystość obiektu.



Rys. 2.11. Klatki animacji i wykres czasu, przedstawiające reguły przyspieszania i opóźniania oraz ściskania i rozciągania

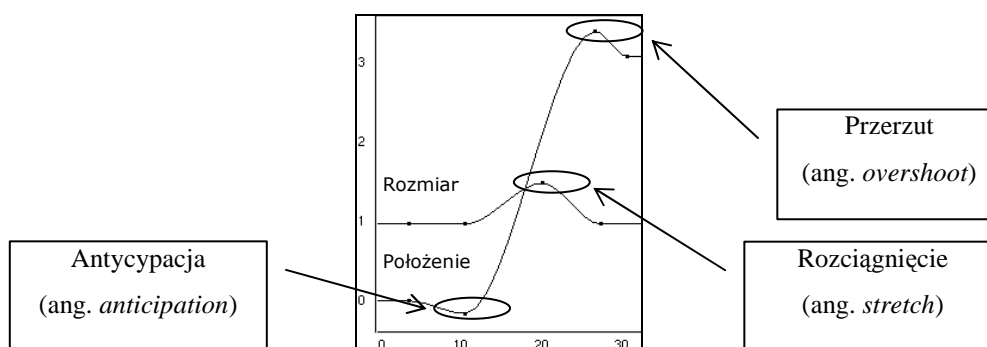
Rozciągnięcie stosowane jest także do zatuszowania niedoskonałości animacji: szybko poruszający się obiekt często jest rozciągany w kierunku ruchu, aby dobitniej wyrazić prędkość, ale także, by zapobiec efektowi strobowania ruchu, czyli zanikowi wrażenia ciągłości, gdy położenia obiektu w kolejnych klatkach ruchu są zbyt oddalone od siebie. Przykład klatek szybkiego ruchu ze strobowaniem i bez przedstawiony jest na rys. 2.12. W animacji komputerowej efekt ten można wyeliminować stosując rozmazanie ruchomego obiektu (ang. *motion blur*), obecne w tradycyjnej fotografii.



Rys. 2.12. Ruch: a) wolny bez efektu strobowania, b) szybki ze strobowaniem, c) szybki bez strobowania dzięki wprowadzeniu rozciągnięcia

Omówiona powyżej reguła nie została uwzględniona w proponowanym systemie wspomaganiania animacji, założono bowiem, że części ciała animowanej postaci ludzkiej nie będą zmieniały swojego kształtu. W przypadku animacji ruchu naturalnego jest to całkowicie uzasadnione, natomiast ruch przejawiony, karykaturalny, często dopuszcza, a czasem wręcz wymaga, aby części ciała postaci poddawane były rozciąganiu i ścisnaniu.

Zamieszczony poniżej rys. 2.13 przedstawia krzywe ruchu dla parametru położenia i rozmiaru. Ruch wykorzystuje reguły antycypacji, przerzutu oraz zmiany kształtu w czasie szybkiego przemieszczania obiektu.



Rys. 2.13. Ruchu szybkiego przesunięcia obiektu z wykorzystaniem reguł antycypacji, przerzutu i rozciągnięcia

Reguła przejawiania (ang. *exaggeration*) polega na zniekształceniu i wyolbrzymieniu ruchu w celu zwiększenia zrozumiałości akcji i emocji postaci. Osoba smutna powinna wyglądać wręcz na nieszczęśliwą, od kroków ciężkiego bohatera powinna trząść się ziemia, itp. W uzasadnionych przypadkach dopuszczalne, a nawet wskazane jest zaniedbanie praw fizyki w celu dobitniejszego przedstawienia głównej idei tworzonej sceny. Przejawiać można praktycznie każdy z elementów: kształt, rozmieszczenie obiektów, akcję, emocję, kolor, dźwięk.

Badane metody wzbogacania animacji zakładają uzyskanie przejawiania poprzez odpowiednie wykorzystanie faz antycypacji, przerzutu i zatrzymania. Dobór właściwych wartości parametrów czasowych i amplitudowych tych faz pozwala uzyskać pożądane rezultaty. Jest to opisane w rozdziale 5.1 i jego podrozdziałach.

Reguła ruchu po łuku oznacza, że ruch naturalny nigdy nie odbywa się po linii prostej. Przykładowo, podczas przekręcania głowy z lewej w prawo broda nie będzie przesuwana dokładnie poziomo, w połowie ruchu obniży się. Każda z ruchomych części ciała powinna w trakcie ruchu zakreślać łuk. Dzięki temu ruch sprawia wrażenie bardziej płynnego i bardziej naturalnego. Reguła ta, bardzo istotna w animacji rysunkowej, w przypadku animacji komputerowej wykorzystującej szkielet realizowana jest praktycznie bez wiedzy animatora. Obroty kości szkieletu wokół połączeń, czyli wirtualnych stawów, implikują ruch końców kości po łuku. Tylko w przypadku zastosowania kinematyki odwrotnej animator powinien świadomie kontrolować spełnienie tej reguły².

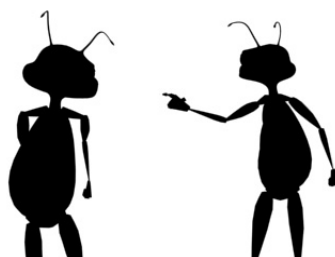
Reguła zatrzymania (ang. *moving hold*) oznacza, że ruch nie powinien nigdy całkowicie ustawać. Po zakończeniu czynności pojawiają się drobne ruchy całego ciała, np. podczas stania należy animować przemieszczanie ciężaru ciała z nogi na nogę oraz poruszanie rękami i głową w prawie niezauważalny sposób. Brak tych drobnych ruchów jest zawsze odbierany jako nienaturalny.

Algorytmy wzbogacania animacji, opracowane w ramach rozprawy, uwzględniają tę regułę, wprowadzając w fazie zatrzymania dodatkowe klatki z drobnymi zmianami ustawienia ciała postaci. Sposób wyznaczenia takich ruchów opisany jest w rozdziale 5.1.

² Szczegółowo jest to komentowane w rozdziale 2.4.2, dotyczącym realizacji reguł technikami komputerowymi.

Kolejne cztery reguły animacji tradycyjnej przedstawione poniżej nie są tematem rozprawy. Dotyczą one bowiem kształtowania wymownych i czytelnych dla widza póż. W przeprowadzonych badaniach założono, iż to animator na etapie projektowania schematycznej animacji według zaleceń reguły „od pozy do pozy” odpowiednio dobiera pozy postaci, aby możliwie najlepiej przekazać zamierzoną treść. W związku z tym algorytm wzbogacania animacji nie ingeruje w układ ciała w pozach.

Reguła inscenizacji (ang. *staging*) odnosi się do tego, że akcja i pozy muszą być tak zaplanowane, aby skupiać uwagę widza [134]. Wskazówka dotycząca zwiększenia siły wyrazu sylwetki pochodzi z czasu czarno-białych filmów i animacji. W początkach filmów rysunkowych używano wyłącznie koloru czarnego bez odcieni szarości. Przy takim ograniczeniu konieczne było planowanie układu sylwetki w taki sposób, by sam obrys postaci wyrażał najważniejsze idee, tak jak w przykładzie na rys. 2.14, bowiem wówczas wyraz pozy jest najbardziej czytelny. Reguła ta sprawdza się także dla animacji kolorowych i postaci tworzonych narzędziami animacji 3D.



Rys. 2.14. Nieprawidłowa i prawidłowa sylwetka postaci [56]

Reguła nakładania akcji (ang. *overlapping action*) mówi, że akcje następujące po sobie powinny nakładać się w czasie, aby nie doprowadzić do całkowitego zatrzymania. Walt Disney opisuje przykładową sekwencję [134]: „*Bohater zamierza zatrzaskać drzwi, zamknąć je na klucz, zdjąć ubranie i położyć się spać. Podchodząc do drzwi, wyciągnie rękę w ich kierunku. W chwili zatrzaskiwania ich będzie sięgał do kieszeni po klucz. Przekręcając go w zamku, zacznie się odwracać od drzwi. Wracając do pokoju, zacznie poluzowywać krawat.*” Podobnie jak w przypadku inscenizacji, to animator jest odpowiedzialny za dobór póż i przebieg czynności. Badania opisywane w rozprawie nie podejmują jednak tego wątku.

Reguła odpowiedniej długości akcji (ang. *timing*) odnosi się do tego, jak długo trwa dany ruch i może mieć duże znaczenie dla jego interpretacji [144]. Przykładowo, pomiędzy pierwszą klatką kluczową, przedstawiającą głowę zwróconą w lewą stronę

i lekko pochyloną a drugą klatką kluczową, w której głowa skierowana jest w prawą stronę i w górę, wprowadzić można dowolną ilość klatek pośrednich, zmieniając przez to wydźwięk całej sekwencji (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Interpretacja zachowania animowanego bohatera w zależności od długości trwania czynności zwracania głowy z lewej na prawo

liczba klatek pośrednich między pozami	interpretacja widzów
0	uderzony został z bardzo dużą siłą
3	uderzony został jakimś lecącym przedmiotem
6	ma nerwowy tik, skurcz mięśni, drgawkę
9	unika lecącego przedmiotu
12	wyraża ponaglenie, "ruszać się!", "no idźmy już!"
15	zachęca bardziej przyjacielsko, "idźmy tam!"
18	obserwuje przechodzącą obok osobę
21	chce się lepiej czemuś przyjrzeć
24	szuka czegoś na górnej półce
27	rozmyśla, ocenia dogłębnie sytuację
30	rozciąga bolące mięśnie karku

Ponadto wskazane jest, aby długość pojedynczej akcji nigdy nie była mniejsza niż jedna stopa (ang. *feet*), czyli jednostka czasu przyjęta w animacji równa 16 klatkom. Długość ta przelicza się na 2/3 sekundy dla filmu o 24 klatkach na sekundę. Animatorzy pracujący w studiach Disneya sprawdzili w praktyce, iż akcje krótsze są nieczytelne dla widza [134][144]. Przykładowo, jeżeli ruch rozpoczynający akcję trwa tylko 6 klatek, po ruchu powinna nastąpić co najmniej 10-klatkowa faza zatrzymania, po której dopiero może rozpocząć się kolejna faza ruchu – przechodzenia do następnej pozy.

Ruch szybki zwykle kojarzony jest z agresywnością, dużym pobudzeniem, wolny natomiast ze spokojem, smutkiem lub zmęczeniem. Zmianę wyrazu uzyskuje się w tym wypadku poprzez zmianę długości trwania fazy przejścia między pozami (ruch dłuższy będzie wolniejszy, szybszy będzie krótszy), kosztem zmiany czasu trwania zatrzymania w danej pozie. Dokładniejsze badania związku prędkości ruchu z percypowanymi przez widzów emocjami podejmowane są przez Patersona [108].

W regule asymetrii dla zachowania realizmu sylwetka postaci ułożona musi być niesymetryczne. Jeśli lewa i prawa ręka będą wykonywały dokładnie tę samą czynność w tym samym czasie, ruch postrzegany będzie jako nieciekawym i mało wiarygodnym.

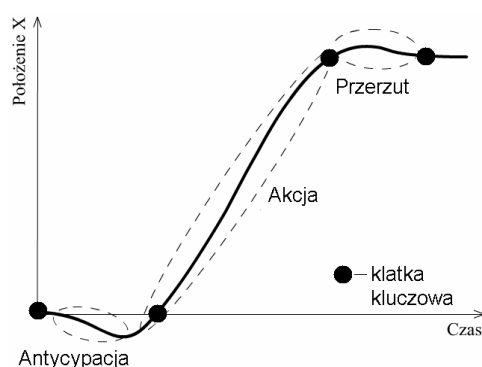
2.4.2 Realizacja reguł animacji w metodach komputerowych

W pracy Lassetera z 1987 roku [90], opisane zostały najważniejsze reguły animacji w kontekście zastosowania w animacji komputerowej oraz możliwość realizacji reguł z wykorzystaniem dostępnych wówczas narzędzi. Poniżej przedstawiony jest podobny opis, jednakże zaktualizowany w kontekście nowoczesnych technik animacji.

Animator musi znać reguły animacji i ich przestrzegać. Obecnie rozwiązania techniczne, dostępne w wielu programach komputerowych, pozwalają w dość prosty sposób przygotować animację spełniającą większość reguł. Programy komputerowe wizualizują zmiany w czasie wartości parametrów przesunięcia, obrotu, skalowania w postaci krzywych interpolujących. Niektóre systemy dysponują dodatkową możliwością edycji pierwszej pochodnej tych parametrów, czyli prędkości zmian.

Poniżej przedstawione są techniczne możliwości realizacji reguł w animacji komputerowej.

Realizacja reguł **antycypacji** oraz **przerzutu** w technice komputerowej wymaga odpowiedniej edycji krzywej interpolującej wybranego parametru. Przykład krzywej zainterpolowanej między czterema klatkami kluczowymi i zmodyfikowanej tak, by spełniać te reguły przedstawiony jest na rys. 2.15.

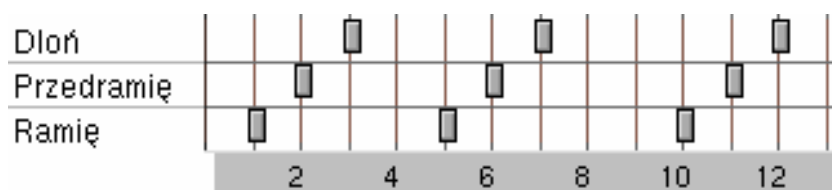


Rys. 2.15. Etapy ruchu opisane regułami animacji

Reguła „**ściśnij i rozciągnij**”, łatwa do zastosowania i występująca niezwykle często w tradycyjnej animacji rysunkowej, w niektórych przypadkach jest trudna do realizacji w technice animacji 3D. Proste obiekty pozbawione szkieletu można skalować wzdłuż dowolnego kierunku, jednak postać kontrolowana szkieletem nie ma możliwości zmiany proporcji części ciała, odkształcania ich w nienaturalny sposób, a stopnie swobody szkieletu ograniczone są do zgięć w stawach i przesunięć postaci. Przy zastosowaniu

dotychczasowych technik [93], łączących rysunek 2D i animację 3D, możliwe jest pełniejsze kontrolowanie odkształceń trójwymiarowej siatki obiektu i dokładniejsza realizacja tej reguły animacji w intuicyjny sposób. Rozwiązanie to jednakże nie jest zaimplementowane w komercyjnych środowiskach animacji. W środowiskach animacji udostępniających możliwość tworzenia złożonych hierarchii animowanego szkieletu z wymuszeniami, wykorzystuje się dodatkowe kości, odpowiedzialne za odkształcanie siatki 3D, jednakże realizacja reguły ściskania i rozciągania za ich pośrednictwem nie jest ani prosta, ani intuicyjna.

Następstwa ruchu w animacji komputerowej osiąga się poprzez odpowiednie opóźnienie w czasie klatek kluczowych, definiujących obrót kolejnych kości w pewnej ustalonej hierarchii. Dla przykładu animacji ręki przedstawionego na rys. 2.16 ruch ramienia powinien zaczynać się i kończyć najwcześniej. Kilka klatek później powinien zacząć się ruch przedramienia i skończyć się także z opóźnieniem. Natomiast z największym przesunięciem w czasie powinien nastąpić ruch dłoni.



Rys. 2.16. Klatki kluczowe – realizacja reguły następstw ruchu

Nakładanie akcji w czasie realizuje system animacji nieliniowej, pozwalający na zmontowanie złożonej animacji z animacji prostszych. Dostępne systemy umożliwiają konfigurowanie sposobu nałożenia składowych i superpozycję ruchów podczas przejścia przez „zakładkę”, podobnie jak ma to miejsce przy miksowaniu dźwięków. Synchronizację sekwencji ruchów odbywających się z różnym tempem realizuje się z kolei poprzez nieliniowe przekształcenie czasu (ang. *time warping*) [146].

Reguła **ruchu po krzywej** realizowana jest dzięki wykorzystaniu obrotu kości wokół punktu początkowego – stawu. Koniec kości, która obraca się, zatacza łuk. Wyjątkiem jest zastosowanie w szkielecie metody kinematyki odwrotnej (IK, ang. *inverse kinematics*), która pozwala poruszać po zadanej trajektorii kość najbliższą w hierarchii, a kości starsze ustawiane są automatycznie. Należy zadbać o to, aby kość najbliższa, poruszana poprzez kontroler IK nie była przesuwana po linii prostej, ale po trajektorii

będącej łukiem, bowiem w przeciwnym wypadku nienaturalność ruchu jest bardzo wyraźnie dostrzegalna.

Zwalnianie i przyspieszanie ruchu ustalane jest poprzez zmianę nachylenia krzywej interpolującej przebieg czasowy wartości parametru ruchu lub też ustalenie niezerowej wartości krzywej przedstawiającej pierwszą pochodną wartości tego parametru.

Spełnienie pozostałych reguł (układ sylwetki, inscenizacja, asymetria, przejaskrawienie, odpowiedni czas trwania akcji) wymaga większego nakładu pracy: ustawienia kamery, szkieletu postaci, drugoplanowych elementów sceny. Do zadań tych mogą być w przyszłości wykorzystane inteligentne systemy decyzyjne, które są w stanie analizować układ postaci w pojedynczych klatkach oraz zmienność parametrów podczas sekwencji ruchu. Komputer może stać się narzędziem wspomagającym pracę człowieka we wszystkich aspektach tworzenia animacji. Komputerowe wspomaganie animacji może być wzbogacone o narzędzia weryfikujące poprawność realizacji reguł, a także o dodatkowe parametry opisowe animacji i algorytm modyfikowania ich wartości w celu lepszego dopasowania animacji do wymagań [86].

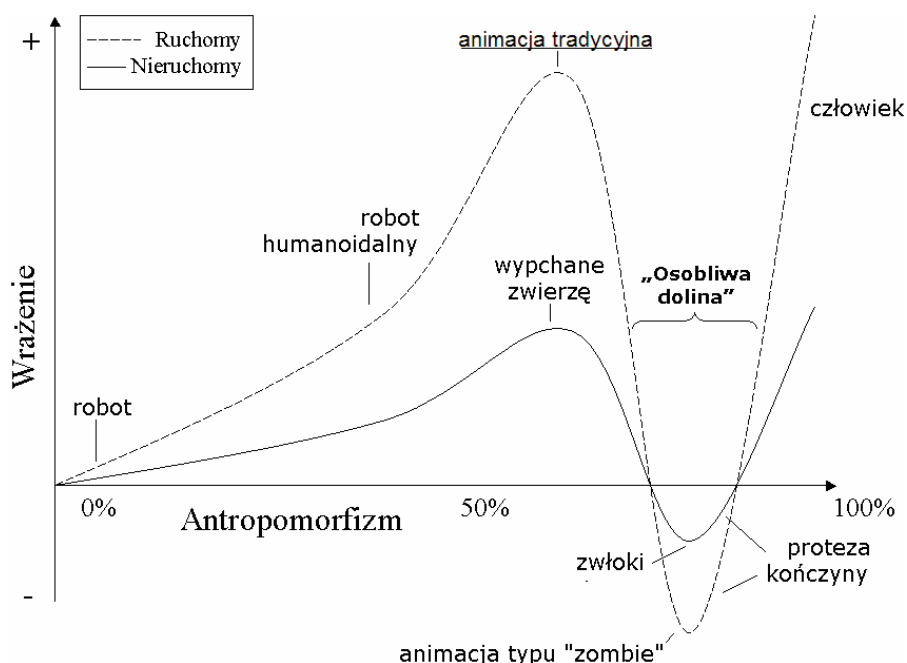
W niniejszej rozprawie wykorzystane zostaną reguły antycypacji, przerzutu, zatrzymania, przyspieszania i opóźniania oraz następstw ruchu.

2.5. Jakość ruchu w animacji komputerowej

Celem rozdziału jest przedstawienie rozważań związanych z oceną jakości ruchu w animacji komputerowej. Obserwowane są dwa nurty rozwoju animacji. Pierwszy dąży do poprawy i rozwoju metod animacji w celu osiągnięcia ruchu coraz bardziej zbliżonego do naturalnego oraz uzyskania realistycznego wyglądu wirtualnych postaci. Drugi w opozycji do pierwszego zakłada, że wirtualne, nierzeczywiste postaci powinny zachowywać się nienaturalnie, w sposób przejaskrawiony, spotykany w tradycyjnych filmach animowanych, gdyż wówczas zagwarantowana jest wysoka czytelność emocji, charakteru postaci i toczącej się na ekranie akcji. Fakt wykorzystania reguł animacji tradycyjnej w niniejszej rozprawie oznacza, że praca ta należy do tego drugiego nurtu.

Wymienione w poprzednich rozdziałach metody demonstrują ogólnie kierunki rozwoju technik komputerowych w animacji. Wszystkie z nich dążą do uzyskania ruchu najbardziej zbliżonego do ruchu naturalnego. Jednakże w wielu zastosowaniach daleko posunięty realizm jest uważany za niewskazany. Równie trudne, jak stworzenie

realistycznego ruchu jest uzyskanie realistycznego wyglądu postaci. Jak zauważył Mori [100], wzrost antropomorfizmu wyglądu i ruchu postaci generowanych komputerowo, robotów, lalek, itp. prowadzić może do efektu nazwanego „osobliwą doliną” (ang. *Uncanny Valley*), gdy, zamiast spodziewanego nasilenia pozytywnych wrażeń odbioru takiej postaci, widz doświadcza uczucia niepokoju i reaguje bardziej negatywnie niż w przypadku obrazu mniej realistycznej postaci. Obecność ruchu jeszcze bardziej potęguje tę reakcję. Dopiero uzyskanie całkowicie ludzkiego wyglądu i ruchu powoduje powrót reakcji pozytywnej, co Mori przedstawił na wykresie zamieszczonym na rys. 2.17. Krzywe przedstawiają zmiany wrażenia od negatywnego do pozytywnego dla postaci ruchomej i nieruchomej w zależności od stopnia antropomorfizmu wyglądu i sposobu poruszania.



Rys. 2.17. Efekt osobliwej doliny (ang. *Uncanny Valley*) [100]. Do oryginalnego rysunku zaczerpniętego od M. Mori dodano oznaczenie miejsca w którym, według autora rozprawy, umieścić można pomiar antropomorfizmu i wrażenia dla animacji tradycyjnej

W związku z powyższym, pomimo postępów technicznych w realizmie obrazów generowanych komputerowo, większość animatorów tworzy animacje podobne do tradycyjnych, to znaczy z nierealistycznymi postaciami i przejawionym ruchem. Dużą zaletą takiego podejścia jest łatwość uzyskania czytelnego wyrazu animacji. Wydarzenia rozgrywają się w sposób odbiegający od rzeczywistości, ale widz nie ma wątpliwości, co dzieje się na ekranie, a dodatkowo animacja taka jest odbierana jako interesująca i zajmująca.

Najnowsze techniki animacji, stosowane przez sławne studia animatorskie, Dreamworks i Pixar (obecnie część Walt Disney Corp.), łączą w sobie techniki symulacji i tradycyjne ręczne planowanie ruchu postaci. Symulacja stosowana jest w animacji tkanin, włosów, wody, efektów specjalnych, natomiast animacja z klatkami kluczowymi pozostaje najważniejszym narzędziem animacji postaci. Stopniowo coraz większą rolę odgrywa także rejestracja ruchu i mimiki rzeczywistego aktora (ang. *performance capture*), jednakże ruch uzyskiwany w ten sposób zwykle i tak wymaga edycji klatek kluczowych. Rocznie powstaje kilka pełnometrażowych filmów animowanych, które, jak na przykład seria Shrek, odnoszą komercyjne sukcesy na całym świecie.

Reguły animacji zastosowano w interfejsie użytkownika produktu iPhone firmy Apple w celu zwiększenia komfortu pracy i subiektywnie postrzeganej jakości ruchu. Komfort pracy z takim interfejsem oceniany jest jako wyraźnie wyższy niż z dotychczas stosowanymi interfejsami [51][52]. W trakcie opracowywania nowego systemu operacyjnego Apple OS X stworzona została seria zaleceń dla programistów tworzących interfejsy użytkownika, podkreślających wagę czytelności ruchu elementów na ekranie, poprawę komfortu pracy, właśnie poprzez zastosowanie reguł animacji³. Doświadczenia w pracy nad komfortowymi, animowanymi interfejsami, wykorzystane zostały w nowym systemie operacyjnym Mac OS X Leopard [55].

Oprócz opisanej powyżej subiektywnej jakości i poprawności ruchu należy także rozpatrywać obiektywne miary poprawności, oparte na biomechanice ludzkiego układu motorycznego. Łokcie i kolana zginają się tylko w jednym kierunku i mają tylko jeden stopień swobody, środek ciężkości ciała położony jest na wysokości pasa, jeśli przesunięty zostanie poza obszar podparcia ciała, postać powinna się przewrócić, itd. Równie ważne są techniczne parametry animacji, takie jak liczba klatek obrazu wyświetlanych na sekundę, które zadecydują o tym czy ruch jest skokowy, czy płynny, ustawienie wirtualnej kamery filmującej animowaną postać, które wpłynąć może na czytelność odgrywanej czynności, dostateczne oświetlenie sceny, zachowanie się obiektów drugoplanowych, które nie powinny odciągać uwagi widza od głównej akcji, itp. Ten aspekt nie jest jednak tematem niniejszej pracy, analizowana jest natomiast ogólna, subiektywnie rozumiana jakość animowanego ruchu, jego płynność i stopień naturalności.

³ <http://developer.apple.com/documentation/UserExperience/Conceptual/OSXHIGuidelines/OSXHIGuidelines.pdf>

2.6. Wirtualne postaci

Poniżej przedstawiono rozważania dotyczące wykorzystania animowanych postaci w komunikacji komputera z człowiekiem oraz interakcji między użytkownikami w aplikacjach wirtualnej rzeczywistości.

Proces komunikacji człowiek-maszyna jest procesem o wiele bardziej skomplikowanym niż komunikacja interpersonalna. Jest on bowiem narażony na wpływ większej ilości czynników mogących ten proces zakłócić, nie posiada cech naturalności ani spontaniczności. Relacje człowiek-maszyna zmieniają się wraz z rozwojem technologicznym maszyn, wzrostem znaczenia technik multimedialnych oraz upowszechnianiem się sieci komputerowych i nowoczesnych systemów informatycznych. O ile komunikacja naturalna między ludźmi nie wymaga niczego poza znajomością języka, to komunikacja człowieka z komputerem nie może się obyć bez umiejętności obsługi konkretnej aplikacji, a w każdej z nich prowadzenie konwersacji jest zwykle zorganizowane w inny sposób. W powyższej sytuacji mówi się o kodzie komunikatu, który musi być zrozumiały dla obu stron. Użytkownik zmuszony jest do nauki pewnych symboli i obsługi programu, dzięki którym jest w stanie wydawać polecenia maszynie. Bardzo istotne jest zaprojektowanie odpowiedniego, intuicyjnego i czytelnego interfejsu, wystarczającego do prowadzenia komunikacji.

Wirtualna postać z możliwością prowadzenia konwersacji jest popularnie nazywana awatarem. „Awatara” (z sanskrytu: zstąpienie, zejście) to w hinduizmie wcielenie bóstwa zstępujące na ziemię w postaci śmiertelnej — ludzkiej lub zwierzęcej. Awatarem nazywany jest program komputerowy, zwykle wykorzystujący technologie agentowe, czyli samodzielnie realizujący określone zadania bez konieczności sterowania nim przez użytkownika, czasem także komunikujący się z innymi programami, korzystający z osiągnięć kognitywistyki i sztucznej inteligencji. Zaproponowana przez Franklina i Greassera definicja pojęcia „agent”, dokonana na podstawie przeglądu i syntezy najbardziej popularnych, brzmi następująco: *„Autonomiczny agent to system usytuowany wewnątrz środowiska, którego jest częścią. System ten postrzega własne środowisko i oddziałuje na nie w czasie, w trakcie realizacji własnego programu (agendy) tak, aby wpłynąć na to, co odbiera”* [43]. Obecnie najbardziej rozpowszechnione znaczenie słowa „awatar” to wirtualne wcielenie użytkownika, które przyjmować może różne formy: od najprostszej – reprezentacji osoby poprzez unikatowy identyfikator tekstowy, nazywany nickiem (ang. *nickname* – przydomek), poprzez statyczne obrazy i ikony, aż po

animowane trójwymiarowe postaci, dysponujące szeroką gamą zachowań i licznymi kanałami komunikacji [3][76].

Jeżeli od awatarów w przyszłości będzie się wymagać reprezentowania wizerunku użytkownika w wirtualnej rzeczywistości tak, by możliwe było zdalne porozumienie ludzi za pośrednictwem awatarów, wówczas większa waga będzie przywiązywana do technicznej i subiektywnej jakości takiej postaci. Jej wygląd, szczegółowy model, barwny ubiór, a także jakość syntetyzowanego głosu, jakość ruchów, przedstawiających przekaz niewerbalny decydować będą o zadowoleniu użytkownika, korzystającego z awatara i o możliwości przekazywania za jego pośrednictwem złożonych komunikatów, nieodzownych w komunikacji interpersonalnej [24][27][73][75][126][128].

Zastosowanie urządzeń do akwizycji multimodalnego przekazu generowanego przez użytkownika, a następnie wykorzystanie technicznych możliwości do przeniesienia tych zachowań na wirtualną postać usprawnią komunikację osób za pośrednictwem maszyny lub człowieka z maszyną. Poprawnie realizowany dialog i gestykulacja wpływają na wzrost naturalności komunikacji, gdyż są nieodzownymi elementami kontaktów międzyludzkich [120][78]. Wpływ na jakość komunikacji mają także zachowania interakcyjne składające się z gestów regulujących proces konwersacji (np. kiwanie głową oraz odgłosy wydawane w celu potwierdzenia). Automatyczna analiza i generowanie informacji o intonacji, wyrazie twarzy, ruchach głowy i gestach rąk pozwala na zwiększenie interaktywności człowieka z wirtualną postacią.

Bates, bazując na osiągnięciach animatorów pracujących w studiach Disneya, przedstawia wskazówki poprawnego portretowania reakcji emocjonalnych [6]:

- stan emocjonalny postaci musi być ściśle określony — animator musi wiedzieć, jaki jest ten stan w każdej klatce animacji i musi umieć pokazać go w sposób czytelny, wykorzystując mowę ciała tak, by widz mógł go jednoznacznie odczytać,

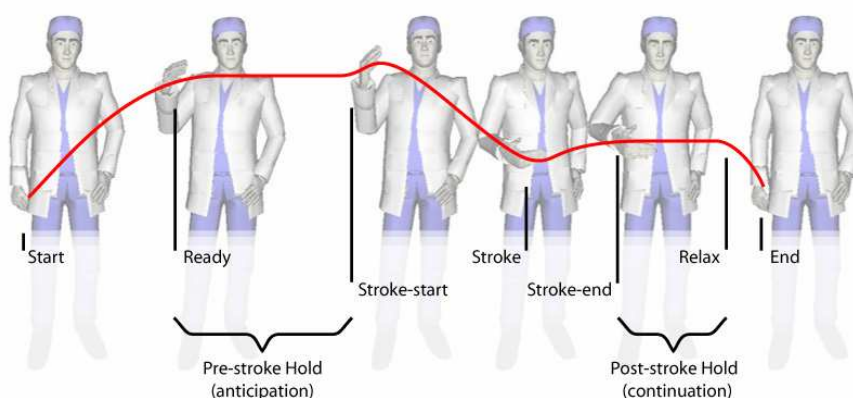
- rozsądne używanie czasu — w przypadku zmiennych emocji ekspozycja jednej idei nie może być zbyt krótka, należy odpowiednio długo prezentować ją widzom, dając czas na wczucie się w sytuację postaci,

- przesadne ukazywanie emocji – animacja, w której głównym medium przekazu jest ruch, a nie słowa, powinna prezentować emocje postaci w sposób przejawiony, tak jak czynią to np. mimowicie lub klauni, by interpretacja była jednoznaczna. Odejście od realizmu w celu wyrazistości jest powszechne w animacji, zarówno tradycyjnej, jak i komputerowej.

Zachowania przekazywane z wykorzystaniem wielu kanałów są interpretowane przez odbiorców w kontekście spójności, szczerości, uczciwości oraz pełnionych funkcji socjalnych, relacji, mocy i intencji. Jeżeli między kanałami przekazu zachodzi niespójność, awatar może być odbierany jako nierealistyczny [45]. Kanały mogą nawzajem się zastępować, np. w obecności zakłóceń, jednakże nie powinny nieść informacji sprzecznych (patrz: rozdział 2.1).

Aktualnie prowadzone są badania nad automatyzacją procesu decyzyjnego realizującego poprawny dobór gestykulacji do treści przekazu. System BEAT generuje animację postaci na podstawie wejściowego tekstu, który zawiera deskryptory lingwistyczne i kontekstowe, wymagane do sterowania ruchami rąk, mimiką twarzy i intonacją głosu. Mapowanie tekstu na gestykulację i głos jest zawarte w zestawie reguł pochodzących z aktualnego stanu badań na temat zachowań niewerbalnych w konwersacji. Co ważne, system jest elastyczny — pozwala animatorom na wstawianie własnych zasad odzwierciedlających interesujące ich osobowości, charakterystyki ruchów. BEAT przekształca tekst pisany w ekspresyjne, indywidualizowane zachowania [25].

Autorzy systemu BEAT aktywnie uczestniczą w tworzeniu specyfikacji języka BML, *Behavior Markup Language*, który prawdopodobnie zostanie przyjęty jako standard opisu multimodalnych zachowań awatara [54][59]. Język ten, zbliżony składnią do XML, posiada hierarchiczną strukturę opisu zdarzenia, układu ciała postaci, czasów realizacji czynności. Przewidziana składnia pozwala realizować następujące reguły animacji: antycypację, przerzut, zatrzymanie, które na rys. 2.18 oznaczone są jako *anticipation*, *stroke* i *continuation*.



Rys. 2.18. Atrybuty czasowe akcji w języku BML [54][59]. Na rysunku zachowano oryginalne nazewnictwo, spójne ze składnią języka. Widoczne są fazy przygotowania do czynności, antycypacji, wykonania czynności, przerzutu, odpowiadające fazom opisywanym w regułach animacji

Badania opisywane w niniejszej rozprawie mogą znacząco wpłynąć na efektywność generowania animacji na podstawie opisów w języku BML. Aktualnie rozwijana wersja tego języka zakłada, że dane o wszystkich fazach ruchu, które mają wystąpić w animacji muszą być zapisane w pliku. Proponowane przez autora algorytmy mogą zniwelować to ograniczenie: fazy dodatkowe ruchu, takie jak antycypacja, przerzut i zatrzymanie nie muszą być z góry zaplanowane przez autora animacji, bowiem zostaną wyznaczone na podstawie subiektywnego opisu i danych o pozach głównych ruchu.

2.7. Percepcja ruchu

Celem rozdziału jest omówienie podstawowych zagadnień percepcji ruchu rzeczywistego i ruchu w animacji komputerowej oraz zaznaczenie subiektywności tych zjawisk.

Parametry ruchu: prędkość, amplituda, czas trwania, mierzone mogą być na dwa sposoby, obiektywnie, jako fizyczne wartości opisujące ruch i subiektywnie poprzez przypisanie cechom ruchu wartości lingwistycznych przez uczestnika testów. Cechy ruchu, takie jak jakość, siła wyrazu, emocjonalność, płynność, realizm, trudne są do zdefiniowania w sposób obiektywny, w związku z czym muszą być mierzone subiektywnie. Ponadto w dziedzinie animacji komputerowej prowadzi się testy oceny poprawności ruchu. Widzowie wykazują pewien określony próg tolerancji niezgodności prezentowanego ruchu z prawami fizyki. Mówi się o ruchu dostatecznie wiarygodnym (ang. *plausible motion*) [137], który można osiągać w animacjach na zasadzie klatek kluczowych lub w symulacjach zmniejszając złożoność obliczeniową.

Eksperymenty w dziedzinie psychologii i neuropsychologii wykazują, iż ruch ludzkiego ciała (ang. *biological motion*) jest bardzo charakterystyczny i jest rozpoznawalny nawet w obecności zakłóceń bądź ograniczonej reprezentacji ciała, np. tylko w postaci punktów umieszczonych w stawach szkieletu. Zostało to wykazane w eksperymentach Johanssona [72] i Muybridgea [101]. Obserwacja ruchomych punktów pozwala na rozpoznanie płci osoby i wykonywanej czynności. Zdolność rozpoznawania ruchu człowieka jest wrodzona i występuje nawet u niemowląt [41]. Co więcej, na podstawie ograniczonych informacji o ruchu, człowiek jest nawet w stanie wnioskować o właściwościach fizycznych i kształcie ciała [62]. Nie istnieje jeszcze naukowe wyjaśnienie tej umiejętności ludzkiego zmysłu wzroku.

Próbie wyznaczenia niezmienników ruchu, czyli parametrów, właściwości lub cech, które pozostawałyby stałe podczas dowolnych ciągłych przekształceń, podjął Viviani w pracach poświęconych analizie pisma odręcznego. Wykazał on istnienie nieliniowej zależności między prędkością kątową dłoni a krzywizną ruchu: $a(t)=k \cdot c(t)^{2/3}$ [89][141]. Zależność ta okazuje się bardzo silna, naturalny ludzki ruch zwykle jej nie łamie. Ruch nie spełniający tej zależności jest percypowany z zaburzeniami trajektorii. Eliptyczny ruch, niezgodny z powyższą zależnością może być postrzegany przez widza jako kołowy, bowiem obserwacja ruchu punktu po elipsie ze stałą prędkością kątową, właściwą ruchowi po okręgu, daje wrażenie ruchu kołowego. Viviani mówi o „motorycznej teorii percepcji”, według której ludzka percepcja ruchu jest zdeterminowana ludzkim sposobem poruszania się [139]. „Prawo potęgi 2/3” (w literaturze ang. *2/3 power law*) uważane jest za podstawowe ograniczenie centralnego układu nerwowego w tworzeniu trajektorii dłoni w czasie wykonywania gestów, np. w rytmicznych ruchach. Zależność ta sprawdza się również dla bardziej złożonych ruchów, jak poruszanie całego ciała [70][138]. W związku z tym prawo potęgi 2/3 jest uznawane za niezmiennik trajektorii ruchu ludzkiego, jest niemożliwe do obejścia i jest wykorzystywane w obiektywnej ocenie animacji ruchu wirtualnych postaci [48][139][140].

Wykazano, iż bezwładność w ruchu jest trwale zakodowana w ludzkim ośrodku widzenia. Jeżeli film przedstawiający ruch człowieka zostaje nagle zatrzymany i obraz zgaśnie, to w pamięci widza utrwala się nie poza ostatnia, ale poza ze zmianami, które są wynikiem bezwładności ruchu [44][66].

Badania pozwoliły określić obszary mózgu aktywne w trakcie percepcji ruchu rzeczywistego. Neurony lustrzane (ang. *mirror neurons*) zlokalizowane w okolicach przedruchowych kory czołowej (ang. *premotor cortex*), uaktywniają się zarówno w trakcie obserwacji osób gestykulujących, jak i w trakcie samodzielnego wykonywania gestów. Prawdopodobnie obszar ten pełni istotną rolę w procesie nauki przez naśladowanie i w komunikacji międzyludzkiej w zachowaniach empatycznych, rozpoznawaniu intencji i emocji [67].

W niniejszej rozprawie analizowane jest postrzeganie jakości ogólnej ruchu, płynności i stopnia realizmu. Indywidualna ocena tych cech ruchu przez uczestników testu może zależeć od doświadczenia, przyzwyczajień, zdolności obserwacji, oczekiwań, a także stanu fizjologicznego i emocjonalnego. Jednakże na potrzeby zawartych w rozprawie badań przyjęto, że możliwe jest wyznaczenie wzorca ocen każdej z badanych cech ruchu poprzez realizację testów oceny subiektywnej na dużej grupie uczestników i uśrednienie

wyników. Wzorzec oceny cechy jest następnie traktowany jako wartość obiektywna, opisująca cechę ruchu i jest uwzględniany w procesie przetwarzania opisu animacji. Podejście takie może okazać się zbyt uproszczone i konieczna może być personalizacja algorytmów przetwarzania animacji w celu dopasowania do preferencji aktualnego użytkownika, twórcy animacji. Zagadnienie to jest omawiane w rozdziale 5.3.3, dotyczącym modyfikowania zbioru reguł systemu wnioskowania. Modyfikowanie algorytmów wspomagających animację może nie tylko zapewnić lepsze dopasowanie do preferencji pojedynczego użytkownika, ale może także stanowić podstawę do uczenia algorytmów wnioskowania w trakcie pracy wielu osób z systemem.

W rozdziale 2. przedstawiono najważniejsze informacje dotyczące tworzenia animacji komputerowych, które stanowią postawę realizacji części praktycznej niniejszej rozprawy. W ramach rozprawy zaproponowany jest i zrealizowany system wykorzystujący animację z klatkami kluczowymi i metodę animacji „od pozy do pozy”. Zgodnie z tą metodą animator wykonuje animację schematyczną, która następnie poddawana jest odpowiedniemu przetwarzaniu. Ma ono na celu dodanie nowych faz i klatek kluczowych zgodnie z opisanymi w niniejszym rozdziale regułami animacji. Uzyskiwana animacja charakteryzuje się wysoką jakością subiektywną i stylizacją ruchu, które ważne są z punktu widzenia czytelności przekazu niewerbalnego gestykulacji. Przytoczone informacje stanowią podstawę dla rozdziałów dotyczących przetwarzania animacji i badania jej cech subiektywnych.

3. PODSTAWY TEORETYCZNE SYSTEMU WSPOMAGANIA ANIMACJI

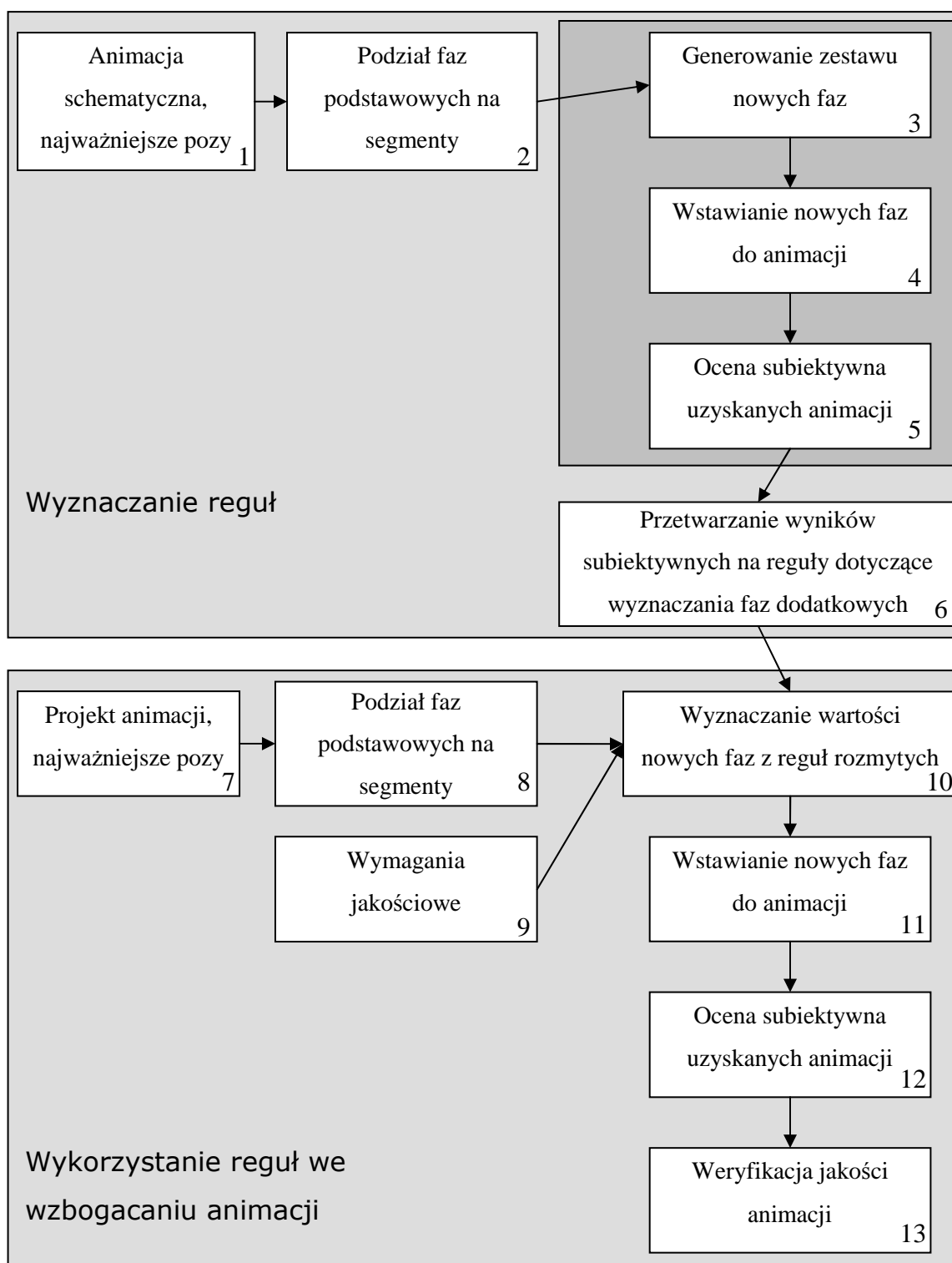
Na podstawie przeglądu literatury dotyczącego omawianej tematyki można stwierdzić, iż nie podjęto dotychczas próby opracowania metody wspomagającej pracę animatora, która wykorzystywałaby logikę rozmytą i oparta była na wiedzy pozyskanej z reguł animacji tradycyjnej. Celem rozprawy jest zaproponowanie algorytmów opartych na logice rozmytej, wspomagających pracę animatora, wyręczających go na etapie wstawiania klitek kluczowych odpowiedzialnych za dodatkowe fazy ruchu. Reguły rozmyte odzwierciedlać mają wiedzę dotyczącą sposobów projektowania faz dodatkowych ruchu, zawartą w regułach animacji dostępnych w literaturze. Logika rozmyta doskonale nadaje się do przetwarzania języka naturalnego (rozdział 3.4), a reguły dostępne są właśnie w postaci zdań języka naturalnego.

Zadaniem animatora jest zaprojektowanie najważniejszych klitek, póź definiujących daną czynność, czyli zaprojektowanie animacji schematycznej. W następnej kolejności animator powinien określić wartości parametrów opisowych pożądanej animacji wynikowej. Zadaniem komputera jest wygenerowanie klitek kluczowych dodatkowych faz antycypacji, przerzutu, zatrzymania, które wprowadzają do schematycznego ruchu szczegóły decydujące o subiektywnej treści animacji. Zaproponowany tok postępowania jest analogiczny do metody „od pozy do pozy” (ang. *pose-to-pose*), gdzie animator wykonuje pierwszy etap, a komputer kolejne etapy, które w animacji tradycyjnej wykonywał pomocnik animatora. Zakłada się, iż ruch ma być dobrej jakości (płynny) i zawierać wyraźną stylizację (ruch naturalny, ruch komiksowy). Tego typu wspomaganie animacji wykorzystane może być w codziennej pracy animatora, zmniejszając wymagany nakład pracy. Ponadto wyniki niniejszych badań wykorzystać można do redukcji ilości danych potrzebnych do zapisania animowanej sekwencji ruchu. Wystarczy bowiem zapisać parametry faz głównych, najważniejszych póź oraz parametry opisowe animacji wynikowej, by na etapie odtwarzania animacji generować klatki dodatkowe, wykorzystując zaprojektowany system wnioskowania. Kolejny aspekt to możliwość parametryzacji animacji, czyli tworzenia jej subiektywnego opisu. Oprócz parametrów opisujących stylizację i płynność, możliwe jest także wprowadzenie parametrów emocjonalnego nacechowania ruchu postaci. Parametry opisujące emocje ruchu zależą z

pewnością od faz dodatkowych ruchu, analizowanych w niniejszej rozprawie, ale także od innych cech ruchu, np. względnych zależności między czasami i amplitudami faz, które analizowane były we wcześniejszych badaniach autora [85][124][127]. Ponadto emocje przekazywane są w animacji poprzez prawidłowe wykorzystanie mimiki twarzy, póz postaci, ułożeniu całego ciała, które to elementy nie są tematem niniejszej rozprawy.

Kolejne podrozdziały opisują zastosowane podejście, w którym uczące animacje wzorcowe (pozy wykonane ręcznie przez animatora, a fazy dodatkowe wstawiane automatycznie w celu utworzenia wielu wersji animacji) po parametryzacji i ocenie subiektywnej służą do wytrenowania systemu wnioskowania. Oceny subiektywne wykorzystywane są do wyznaczenia zakresów wartości w przestrzeni parametrów, w których spełniane są założenia o wysokiej jakości, płynności i pożądanym stylu animacji. Spełnienie założeń zachodzić może multiplikatywnie, gdy dąży się do maksymalizacji dopasowania każdego parametru do założeń lub addytywnie, jeśli dopuszcza się maksymalizację dla wybranych parametrów kosztem pogorszenia dla innych.

Schemat przebiegu eksperymentów, przedstawiony na rys. 3.1, podzielony jest na etap wyznaczania reguł i etap wykorzystania reguł. Wyznaczanie reguł wymaga wygenerowania na podstawie animacji schematycznej (blok 1), wielu wersji animacji (bloki 2, 3, 4), pewnej populacji obiektów, które następnie poddawane są ocenie subiektywnej (blok 5). Zgromadzone oceny służą do wyznaczenia reguł reprezentujących informację o tym, w jaki sposób wstawiać dodatkowe fazy ruchu, aby uzyskać animację o pożądanym wydźwięku subiektywnym, m.in. o wysokiej jakości ruchu (blok 6). Uzyskiwane reguły implementowane są w systemie wnioskowania. Wejściem do etapu wykorzystania reguł jest animacja schematyczna (bloki 7, 8) i wektor cech subiektywnych, które występują w regułach (blok 9). W procesie wnioskowania wyznaczane są fazy dodatkowe (blok 10), które wstawiane są do animacji schematycznej (blok 11). Ostatecznie animacja wyjściowa poddawana jest ocenie subiektywnej (blok 12) weryfikującej poprawność działania algorytmu wzbogacania animacji (blok 13).



Rys. 3.1. Schemat przebiegu zrealizowanego eksperymentu

3.1. Tworzenie animacji komputerowych jako proces decyzyjny

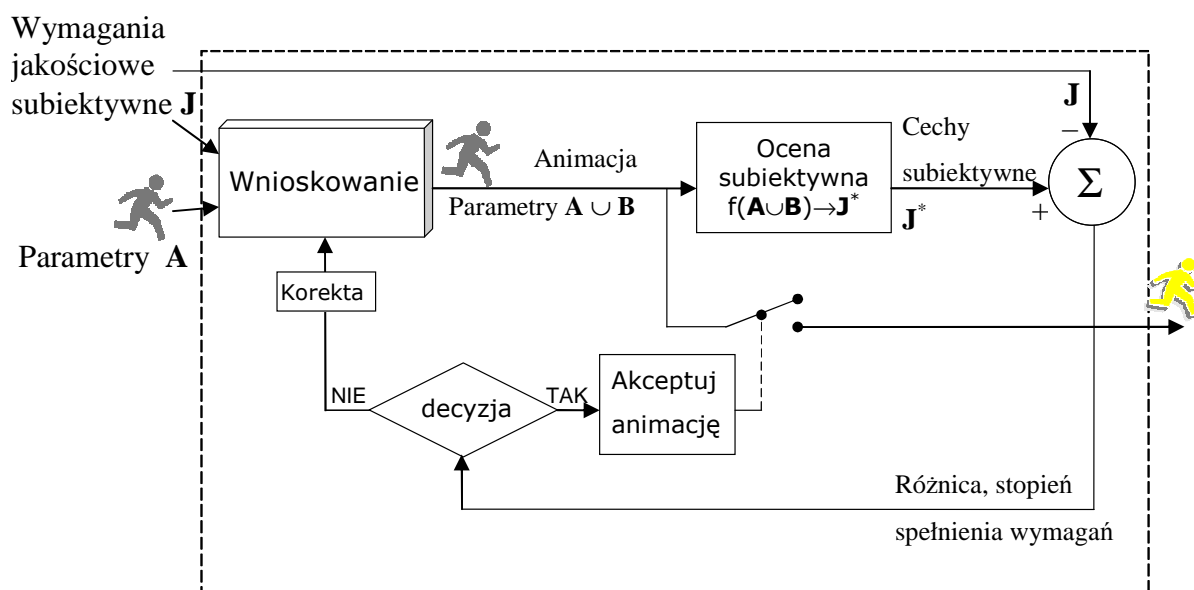
W niniejszym rozdziale przedstawiona jest analiza procesu tworzenia animacji zgodnie z metodą „od pozy do pozy”. Wprowadzone zostaną oznaczenia wykorzystywane w dalszym ciągu rozważań teoretycznych rozprawy i w praktycznej realizacji algorytmu wzbogacania animacji.

Praktyczne wykonywanie animacji może być opisane jako proces decyzyjny, w którym na wejściu podawane są instrukcje reżysera, a na wyjściu otrzymywana jest przygotowana animacja. Instrukcje dla animatora precyzują rodzaj czynności, czyli jakie fazy ruchu mają po sobie następować i jaki ma być ich czas trwania. Dane te w bezpośredni sposób przekładają się na parametry animacji schematycznej. Na ich podstawie pozy są projektowane i rozmieszczane zgodnie z założonymi ramami czasowymi. Jednakże wśród danych wejściowych, czyli instrukcji reżysera, są także zawarte informacje o subiektywnych cechach postaci, które mają być w animacji odtworzone lub też ogólne założenia odnośnie wysokiej jakości wizualnej animacji. Założenia takie niekiedy nie są podawane w sposób jawny, tylko uwzględniane przez animatora domyślnie. Dane wejściowe, opisujące tylko schematyczną animację (pozy i czasy ich trwania), nie wystarczają do stworzenia animacji o zadawalającej jakości, bowiem nie uwzględniają zachowania animowanego obiektu podczas dodatkowych faz ruchu (antycypacji, przerzutu, zatrzymania). Reżyser pozostawia animatorowi pewną dowolność w wykorzystaniu wymienionych faz dodatkowych, jednakże przy założeniu, że końcowa animacja będzie spełniała kryteria jakościowe. Zadaniem animatora jest więc podejmowanie decyzji polegających na doborze parametrów faz dodatkowych ruchu przy założonych z góry parametrach faz głównych tak, aby ostateczna, kompletna animacja cechowała się domyślnie założoną wysoką jakością wizualną ruchu lub też innymi zadanymi cechami subiektywnymi.

Poprzestanie w trakcie przygotowywania animacji na wersji zawierającej wyłącznie fazy główne powoduje uzyskanie ruchu, który jest nierealistyczny i nieciekawym. W takim przypadku składa się on z liniowych, odbywających się z jednostajną prędkością, translacji pomiędzy pozami kluczowymi animowanego obiektu, co jest odbierane subiektywnie jako ruch mechaniczny, nieinteresujący i sztuczny. Środowiska animacji 3D udostępniają automatyczne wyznaczanie interpolacji wielomianowej, zmieniającej ruch jednostajny między pozami w ruch przyspieszony na początku i opóźniony na końcu. Niejednostajność

prędkości może poprawić subiektywną jakość ruchu tylko w niewielkim stopniu, dlatego konieczne staje się dodanie nowych faz do animacji.

Na potrzeby rozważań zawartych w niniejszej rozprawie zaproponowany został przez autora model procesu realizacji animacji przedstawiony na rys. 3.2. Dane wejściowe do modelu stanowią wymagania reżysera dotyczące czasów i położenia animowanych obiektów (wektor parametrów **A**) oraz wymagania jakościowe (wektor parametrów **J**). Przygotowywana jest robocza wersja animacji, która opisana jest niezmiennymi parametrami podstawowymi **A** i parametrami faz dodatkowych **B**. Wersja robocza poddawana jest ocenie subiektywnej, której wynik – zaobserwowane subiektywne cechy jakościowe **J*** – są porównywane z założonymi cechami jakościowymi **J**. Jeśli wynik porównania odbiega od wartości progowej, to wersja robocza animacji jest korygowana, jeśli natomiast wynik porównania jest zadowalający, to wersja robocza jest akceptowana i podawana na wyjście, jako wersja ostateczna.



Rys. 3.2. Model procesu realizacji animacji

Wspomniany proces decyzyjny wymaga, aby:

- utrzymane zostały niezmiennie wartości założonych parametrów opisanych wektorem **A**, czyli pól głównych ruchu i ich rozkładu w czasie,
- w zależności od **A**, dobierane były parametry opisane wektorem **B** tak, aby możliwe było spełnienie kryteriów jakościowych zawartych w wektorze **J**.

Konieczne może być w ogólności ustalenie preferencji dla kryteriów jakościowych, w celu spełnienia przede wszystkim kryteriów najważniejszych, a następnie kryteriów drugorzędnych. Dla zadanego wektora parametrów \mathbf{A} spełnienie i -tego kryterium jakościowego \mathbf{J}_i generuje wynikowy wektor \mathbf{B}_i poprzez dobór optymalnych względem tego kryterium wartości parametrów wektora \mathbf{B} . Próba spełnienia kryterium \mathbf{J}_j ($j \neq i$) generuje z kolei wynikowy wektor \mathbf{B}_j taki, że $\mathbf{B}_i \neq \mathbf{B}_j$. Poszukiwane jest jednakże jednoznaczne rozwiązanie, które będzie można traktować jako optymalne dla zadanych \mathbf{A} i \mathbf{J} . Konieczne jest w tej sytuacji wykorzystanie metod wielokryterialnego podejmowania decyzji lub optymalizacji wielowymiarowej, które pozwolą wybrać pojedyncze rozwiązanie \mathbf{B} , które spełni w jak najlepszym stopniu najważniejsze z kryteriów jakościowych wektora \mathbf{J} .

3.2. Techniki wspomaganie decyzji

Przyjęto założenie, że zależność między parametrami obiektywnymi animacji wejściowej (wektory \mathbf{A} dla faz animacji schematycznej), parametrami obiektywnymi faz wzbogacających animację (wektory \mathbf{B}) a parametrami subiektywnymi uzyskanymi w pomiarze subiektywnych cech (wektor \mathbf{J} dla całej animacji) można opisać funkcją odwracalną ze względu na parametry \mathbf{B} . Oznacza to, iż znając zależność $\mathbf{A} \cup \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$, można dla danego \mathbf{A} i \mathbf{J} wyznaczyć \mathbf{B} , które spełni $\mathbf{A} \cup \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$. W dalszym toku rozważań pokazane zostanie, iż nie jest to typowe zagadnienie poszukiwania funkcji odwrotnej i zostanie zaproponowana procedura poszukiwania rozwiązania \mathbf{B} .

Jeżeli dla każdego \mathbf{A} i każdego \mathbf{B} istnieje odwzorowanie:

$$f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J} \quad (3.1)$$

będące bijekcją, to można znaleźć odwzorowanie odwrotne do (3.1) postaci:

$$f_A^{-1}: \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}. \quad (3.2)$$

W dalszych rozważaniach odwzorowanie (3.1) nazywane jest funkcją oceny.

Istnienie funkcji odwrotnej jest warunkiem koniecznym i dostatecznym bijekcji. Należy sprawdzić, w jakich warunkach funkcja oceny (3.1) jest bijekcją. Bijekcja to funkcja będąca jednocześnie różnowartościowa (iniekcja)⁴ i „na” (surjekcja)⁵. Spełnienie

⁴ Funkcja, która dla dowolnych różnych argumentów przyjmuje różne wartości

⁵ Funkcja, która przyjmuje wartości z całej przeciwdziedziny

warunku, aby funkcja oceny była **surjekcją** wymaga w praktyce wygenerowania takiego zbioru animacji przeznaczonych do oceny, aby każda z możliwych kombinacji ocen **J** pojawiła się choć raz w trakcie oceniania. W teście oceny subiektywnej oczekiwane są odpowiedzi, które pokryją dostatecznie dobrze dostępny zakres ocen. W ogólności, uśredniana po odpowiedziach wszystkich osób oceniających, wielowymiarowa ocena **J** ma dziedzinę ciągłą, jednakże na potrzeby prowadzonych badań zakłada się jej dyskretyzację. W takim razie „dostatecznie dobre” pokrycie wynikami testu zakresu ocen oznacza wystąpienie co najmniej raz każdej dyskretnej wartości oceny w odpowiedziach oceniających. Warunek ten łatwo jest spełnić zapewniając dostateczną liczebność grupy uczestników testu i odpowiednio liczny zbiór animacji do oceny.

Funkcja oceny $f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$ według definicji iniekcji będzie **iniekcją** tylko wtedy, gdy:

$$\forall \mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y: \mathbf{B}_x \neq \mathbf{B}_y \Rightarrow \mathbf{J}_x \neq \mathbf{J}_y, \quad (3.3)$$

gdzie: $f_A(\mathbf{B}_x) = \mathbf{J}_x$, $f_A(\mathbf{B}_y) = \mathbf{J}_y$.

Założone zostało, że dziedzina ocen **J** jest dyskretna i przyjąć może N różnych wartości (przy zastosowaniu N -stopniowej skali ocen), dziedziny parametrów wektora **B** także są dyskretne, łącznie możliwych jest M różnych wektorów **B**. Funkcja oceny na pewno nie będzie iniekcją, jeśli:

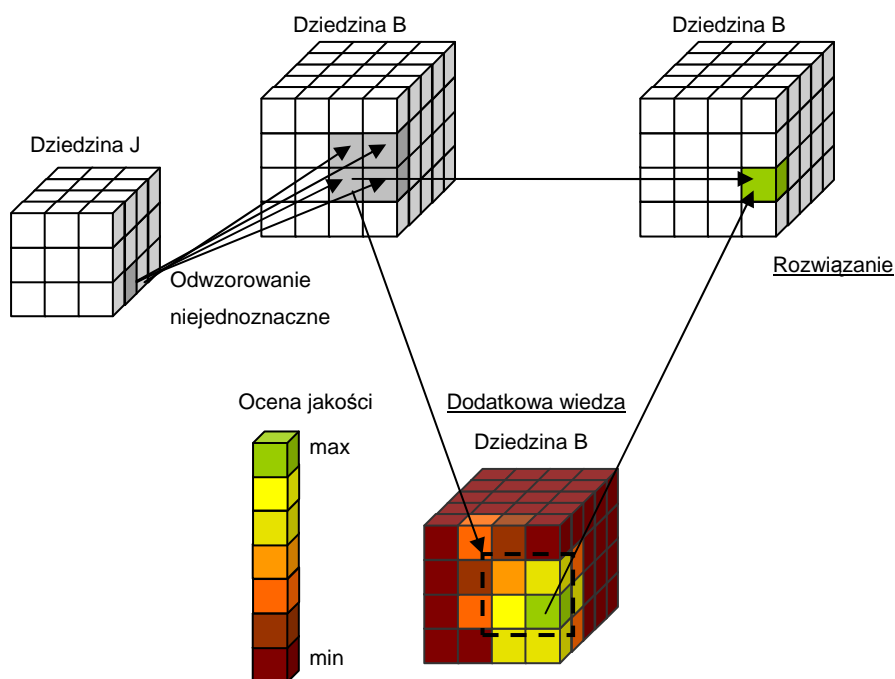
$$N < M*(M-1)/2, \quad (3.4)$$

czyli liczba dostępnych ocen będzie mniejsza od liczby różnych par $\mathbf{B}_x, \mathbf{B}_y$. W zależności od mocy dyskretnych dziedzin ocen i parametrów, czyli od spełnienia nierówności (3.4), odwzorowania (3.1) mogą lub zdecydowanie nie mogą być iniekcjami. Założyć więc należy przypadek ogólniejszy, iż odwzorowanie to faktycznie nie jest iniekcją. Rzeczywiście, w praktyce okazuje się, że oceny **J** animacji różniących się w nieznacznym sposobie wartościami parametrów **B** są identyczne, co przeczy definicji (3.3).

Postawiony problem nie jest zadaniem wyznaczania funkcji odwrotnej do funkcji oceny (3.1), ale jest zadaniem poszukiwania i optymalizacji wielowymiarowej. Przy założonych **A** i **J** poszukiwanie rozwiązania **B** takiego, że $f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$, może przynieść wiele wyników, gdyż założono, że odwzorowanie nie jest iniekcją i jego odwrotność jest niejednoznaczna. W związku z tym, poza omawianymi powyżej parametrami oceny **J**, wprowadza się dodatkowy parametr subiektywny: jakość animacji **Q**, który wykorzystywany jest jako dodatkowe kryterium optymalizacji. Wówczas spośród wielu **B**

będących rozwiązaniami wybierane jest takie, dla którego ocena jakości animacji Q , ma wartość największą. Otrzymywane jest rozwiązanie spełniające założone cechy subiektywne, sprecyzowane jako elementy wektora \mathbf{J} , a jednocześnie dające najlepszą możliwą w danej sytuacji jakość subiektywną animacji. Strategia ta jest optymalna w sensie Pareto, co oznacza, że modyfikacja decyzji nie prowadzi do pogorszenia wyników osiągniętych w poprzednich przybliżeniach decyzji optymalnej, ale do ich polepszenia lub braku zmian [106]. Otrzymane subiektywne cechy określone wektorem \mathbf{J} nie zmieniają wartości w wyniku przeprowadzenia powyżej opisanej procedury optymalizacji, czyli dopasowanie do założeń nie pogarsza się.

Rys. 3.3 stanowi graficzną reprezentację problemu poszukiwania jednoznacznego rozwiązania opisanego powyżej. Dyskretne hiperkostki parametrów reprezentują dziedziny zmienności wielowymiarowych wektorów \mathbf{J} oraz \mathbf{B} . Zgodnie z powyższymi rozważaniami dane \mathbf{J} dla funkcji odwrotnej do funkcji oceny $f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$ wskazuje na wiele wartości \mathbf{B} – odwzorowanie jest niejednoznaczne. Dla każdego \mathbf{B} istnieje wartość oceny subiektywnej jakości animacji Q , która jest dodatkowym kryterium. W wyniku poszukiwania maksymalnej wartości Q dla wszystkich \mathbf{B} , uzyskanych w kroku poprzednim (obszar oznaczony linią przerywaną na rys. 3.3), wybierane jest tylko jedno rozwiązanie \mathbf{B} i uzyskiwane rozwiązanie jest jednoznaczne.



Rys. 3.3. Ilustracja poszukiwania jednoznacznego rozwiązania

Można ponadto podjąć próbę wykorzystania oceny efektywności Kaldora-Hicksa [136], będącej rozwinięciem optymalizacji Pareto, w której decyzja modyfikowana może być także w obliczu ewentualnych strat, jednak tylko wówczas, gdy zysk względem jednego kryterium jest większy niż strata względem innych. Ponadto istnieje w tym przypadku mechanizm kompensacji tych strat. W rozważanym zastosowaniu konieczne byłoby wykorzystywanie porównywalnych skal ocen dla każdej z optymalizowanych cech subiektywnych. Wówczas możliwe byłoby porównanie zysków i strat w ocenach i wybór priorytetów ważności cech. Założyć można, że kompensacja straty wyrażałaby się w bezwzględny wzroście oceny ogólnej jakości animacji Q . Strategia ta nie jest jednakże wykorzystywana w badaniach opisanych w rozprawie.

Problem poszukiwania optymalnego rozwiązania w omawianym przypadku rozważyć można dokładniej. Według formalnej definicji optymalizacja polega na znalezieniu ekstremum (minimum lub maksimum w zależności od problemu) funkcji oceny $f()$ pewnego stanu opisanego wartościami zmiennych decyzyjnych \mathbf{X} [39][49][99][122][143]. W przypadku optymalizacji wielokryterialnej stan ten oceniany jest wieloma kryteriami $f_i(\mathbf{X})$. Może pomiędzy nimi dochodzić do sprzeczności, tzn. maksymalizacja jednego prowadzi do pogorszenia drugiego lub kilku pozostałych jednocześnie. Konieczne jest wówczas ustalenie strategii osiągania kompromisu, opartego najczęściej na maksymalizacji w pierwszym rzędzie kryteriów priorytetowych a następnie kolejnych, w taki sposób, aby nie pogorszyć rozwiązania już osiągniętego.

Kryteria oceny $f_i(\mathbf{X})$ mogą być zarówno ilościowe, jak i jakościowe (w formie słownych opisów). Dla kryteriów tworzyć można odpowiednie funkcje przynależności, które opisują ich użyteczność. Przyjmują one wartości od 0 w przedziale niekorzystnym do 1 w przedziale wartości najbardziej korzystnych z punktu widzenia danego parametru. W przypadku kryteriów nierównoważnych określone są subiektywnie ważności dla każdej możliwej pary kryteriów, w wyniku czego tworzona jest macierz parzystych porównań kryteriów. Na jej podstawie wyliczane są stopnie ważności (rangi) w_i ($i=1, \dots, m$) każdego kryterium $f_i(\mathbf{X})$. Dla tak zdefiniowanej ważności kryteriów w trakcie optymalizacji wykorzystywana jest zwykle metoda kryteriów ważonych (ang. *Weighted Objectives Method*), w której poszukiwane jest ekstremum funkcji będącej kombinacją liniową funkcji ocen [143]:

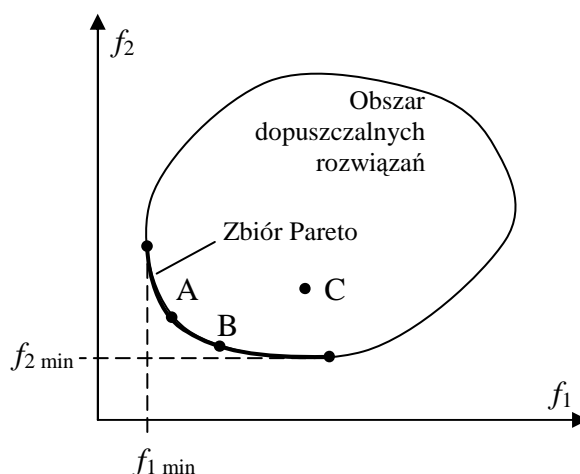
$$\sum_i [w_i f_i(\mathbf{X})] \rightarrow \min \quad (3.5)$$

gdzie:

$$0 \leq w_i \leq 1, \quad \sum_i (w_i) = 1.$$

Powszechnie wykorzystywaną m.in. w ekonomii zasadę optymalizacji wielokryterialnej sformułował ekonomista V. Pareto. Mówi się, iż rozwiązanie jest optymalne w sensie Pareto, jeżeli nie jest możliwe znalezienie rozwiązania korzystniejszego z uwagi na co najmniej jedno kryterium bez pogorszenia dotychczasowego rozwiązania z uwagi na jedno lub więcej pozostałych kryteriów.

Na rys. 3.4 rozwiązanie C może zostać polepszone względem kryteriów f_1 i f_2 . Dla rozwiązań A i B poprawa względem jednego kryterium powoduje pogorszenie względem drugiego. Rozwiązania A i B należą do zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto.



Rys. 3.4. Graficzna prezentacja optimum w sensie Pareto

W modelu optymalizowanego systemu konieczne są do zdefiniowania:

- funkcje celu, wyrażające kryteria optymalizacyjne,
- zbiór zmiennych decyzyjnych i pozostałych parametrów opisujących system
- zbiór warunków ograniczających, czyli określenie obszaru dopuszczalnego rozwiązań

Konstrukcja adekwatnego modelu matematycznego optymalizowanego systemu pozwala wykorzystać znane metody w celu uzyskania rozwiązania optymalnego (poszukiwanie ekstremum w kierunku gradientu, wychodzenie z ekstremum lokalnego np. dzięki algorytmowi symulowanego wyżarzania). Modele mogą być budowane poprzez analizę statystyczną danych z eksperymentu lub poprzez przedstawianie istniejących zależności między zmiennymi a stanem w postaci liniowych i nieliniowych równań regresyjnych wielu zmiennych. W tych przypadkach, gdy otrzymanie wystarczającej liczby danych eksperymentalnych nie jest możliwe, wykorzystywać można modele procesów, zbudowane na podstawie zasad fizyki czy chemii.

W badaniach opisanych w rozprawie optymalizacja prowadzona jest względem kryteriów subiektywnych, dostępnych w postaci funkcji oceny. Funkcja oceny wyznaczana jest na podstawie wyników testów oceny subiektywnej z udziałem widzów oceniających cechy animacji. Analizowane są dwa priorytetowe i równoważne kryteria: *płynność* i *styl* oraz kryterium drugorzędne: *jakość*, wykorzystywane w przypadku wystąpienia dla kryteriów priorytetowych rozwiązania niejednoznacznego. Wykonano zamianę kryteriów jakościowych na ilościowe poprzez reprezentację preferencji oceniających w skali liczbowej, zgodnie z uznaną metodyką oceny subiektywnej [116]:

Dla oceny płynności:

3 - *płynna*

2 - *pośrednia*

1 - *skokowa*

Dla oceny stylu:

3 - *komiksowy*

2 - *pośredni*

1 - *naturalny*

Dla oceny jakości w skali 5-stopniowej:

5 - *doskonała*

4 - *dobra*

3 - *zadowolająca*

2 - *słaba*

1 - *zła*

Zabieg ten pozwala na stosowanie dostępnych metod analizy statystycznej: wyznaczenie średniej, odchylenia standardowego, korelacji między ocenami, testów równości średnich ocen różnych animacji i określenia istotności różnic między ocenami średnimi.

Kryteria priorytetowe wykorzystywane są do znalezienia w zbiorze obiektów testowych tych, które oceniane były przez widzów, jako posiadające poszukiwaną kombinację wartości cech, np. *płynność*=*płynna* i *styl*=*naturalny*. Tym samym omawiane zadanie optymalizacji polega w zasadzie na realizacji 9 zadań: poszukiwania rozwiązania optymalnego dla każdej kombinacji wartości cech stylu i płynności, z których każda przyjąć może 3 różne wartości. Funkcję miary dopasowania do zadanej pary cech zapisać można następująco:

$$|płynność_i - płynność_0| + |styl_i - styl_0| \rightarrow \min \quad (3.6)$$

Minimalizowana jest więc suma błędów niedopasowania pomiędzy zmierzonymi wartościami cech $ptynność_i$ i $styl_i$ a wartościami poszukiwanymi (założonymi) w danej kombinacji: $ptynność_0$ i $styl_0$. Cechy $ptynność_i$ i $styl_i$ zależą od parametrów animacji, można je więc przedstawić w postaci funkcji ocen:

$$\begin{aligned} plynność_i &= f_p(\mathbf{X}_i) \\ styl_i &= f_s(\mathbf{X}_i). \end{aligned} \tag{3.7}$$

Kolejne przekształcenie doprowadza zależność (3.7) do postaci analogicznej do (3.6):

$$\begin{aligned} g_p(\mathbf{X}_i) &= |f_p(\mathbf{X}_i) - plynność_0| \\ g_s(\mathbf{X}_i) &= |f_s(\mathbf{X}_i) - styl_0| \\ g_p(\mathbf{X}_i) + g_s(\mathbf{X}_i) &\rightarrow \min \end{aligned} \tag{3.8}$$

Z zależności (3.8) wynika jasno, iż rozważane w rozprawie zagadnienie optymalizacji jest optymalizacją względem dwu równoważnych kryteriów: dopasowania *ptynności* i dopasowania *stylu*.

Ponieważ odpowiedzi oceniających są niejednoznaczne, tj. dana animacja nie jest oceniana przez wszystkich identycznie, realizowane jest przetwarzanie danych opisane w rozdziale 4.3.1, które generuje rozwiązanie w postaci zbioru obiektów – „kandydatów na optimum”. Z tego zbioru wybierany jest jeden obiekt na podstawie kryterium drugorzędowego, czyli maksymalizacji wartości *ogólnej oceny jakości* i jego zmienne decyzyjne \mathbf{X} podawane są jako rozwiązanie.

3.3. Zbiory przybliżone

W wyniku prowadzenia testów oceny, animacjom, które opisane są szeregiem atrybutów zawartych w wektorach \mathbf{A} i \mathbf{B} , przypisywane są decyzje \mathbf{J} . Do przetwarzania danych wielu obiektów o wielu atrybutach i o określonych decyzjach stosowane jest w niniejszej rozprawie podejście znane z teorii zbiorów przybliżonych. Poniżej przytoczono pokrótce formalizm występujący w teorii zbiorów przybliżonych. Obecnie zbiory przybliżone są szeroko wykorzystywane w licznych badaniach [18][46][68][105][150] i dlatego poniżej przywołane zostaną tylko najważniejsze elementy tej metody [7][8][77][109][110][151].

Przyjmuje się [77]:

– system informacyjny: $S = (U, A)$

– podzbiór atrybutów: $B \subseteq A$

– podzbiór uniwersum: $X \subseteq U$

gdzie U to uniwersum obiektów, A to ich atrybuty.

Zbiór obiektów nierozróżnialnych względem wartości atrybutów $a \in B$ oznaczany jest jako:

$$IND(B) = \{(x, x') \in U^2 \mid \forall a \in B \ a(x)=a(x')\} \quad (3.9)$$

Jeżeli para obiektów x i x' należy do zbioru $IND(B)$, czyli $(x, x') \in IND(B)$, to x, x' są nierozróżnialne względem wartości atrybutów w B i są reprezentowane przez klasę abstrakcji $[x]_B$.

Możliwa jest aproksymacja arbitralnego zbioru X , zawierającego obiekty x , uzyskana przez wykorzystanie atrybutów ze zbioru B , poprzez określenie *B-dolnej* i *B-górnej* aproksymacji zbioru X :

$$\underline{BX} = \{ x \mid [x]_B \subseteq X \} \quad (3.10)$$

$$\overline{BX} = \{ x \mid [x]_B \cap X \neq \emptyset \} \quad (3.11)$$

Do dolnej aproksymacji zbioru należą więc te obiekty, których klasy abstrakcji w pełni zawierają się wewnątrz poszukiwanego zbioru (3.10). Do górnej aproksymacji należą natomiast te wszystkie obiekty, których klasy abstrakcji mają niepustą część wspólną z poszukiwanym zbiorem (3.11). Natomiast zbiór wyznaczany przez różnicę:

$$BN_B(X) = \overline{BX} \setminus \underline{BX} \quad (3.12)$$

nazywany jest obszarem granicznym zbioru X . Stosunek mocy dolnego i górnego przybliżenia zbioru wyznacza miarę jakości przybliżenia tego zbioru za pomocą zbioru atrybutów B :

$$\alpha_B(X) = |\underline{BX}| / |\overline{BX}| = |\underline{BX}| / (|\underline{BX}| + |BN_B(X)|) \quad (3.13)$$

gdzie: $0 \leq \alpha_B(X) \leq 1$.

Zbiór tradycyjny charakteryzuje się: $\alpha_B(X) = 1$, natomiast zbiór przybliżony: $\alpha_B(X) < 1$. Zbiory przybliżone klasyfikuje się w zależności od dolnego i górnego przybliżenia w następujący sposób:

- X jest w przybliżeniu B -definiowalny, gdy: $\underline{B}(X) \neq \emptyset$ i $\overline{B}(X) \neq U$
- X jest wewnętrznie B -niedefiniowalny, gdy: $\underline{B}(X) = \emptyset$ i $\overline{B}(X) \neq U$
- X jest zewnętrznie B -niedefiniowalny, gdy: $\underline{B}(X) \neq \emptyset$ i $\overline{B}(X) = U$
- X jest całkowicie B -niedefiniowalny, gdy: $\underline{B}(X) = \emptyset$ i $\overline{B}(X) = U$

Niech $X^1_A, X^2_A, \dots, X^{r(d)}_A$ będą klasami decyzyjnymi w systemie decyzyjnym S , gdzie liczba różnych decyzji to $r(d)$, natomiast X^i oznacza zbiór przybliżony obiektów, co do których podejmowana jest i -ta decyzja. Wówczas zbiór wyznaczony przez sumę:

$$POS_B(d) = \underline{B}X^1_A \cup \underline{B}X^2_A \cup \dots \cup \underline{B}X^{r(d)}_A \quad (3.14)$$

nazywany jest obszarem B -pozytywnym.

Obszar pozytywny zawiera te wszystkie obiekty, które należą do dolnych przybliżeń zbiorów przybliżonych związanych z decyzjami w systemie decyzyjnym. Na potrzeby dalszych rozważań wykorzystywany jest termin „koncept decyzji i ”, który oznacza pojedynczy zbiór przybliżony związany z i -tą decyzją X^i [77].

W klasycznym podejściu do zbiorów przybliżonych, funkcja charakterystyczna zbioru przyjmuje wartości 1 dla obiektów, a dokładniej dla klas abstrakcji obiektów $[x]_B$, należących z pewnością do dolnego przybliżenia zbioru, z kolei nieokreślone wartości z przedziału $(0; 1)$ dla obszaru granicznego zbioru oraz wartości 0 dla obiektów leżących poza górnym przybliżeniem zbioru. W przypadku wprowadzenia zmiennej precyzji, parametr $\pi \in (1/2, 1)$ pozwala ustalać arbitralnie dokładność określania przybliżeń [77].

Rozpatrywane jest następujące odwzorowanie:

$$\begin{aligned} \mu^X_B: U &\rightarrow [0;1] \\ \mu^X_B(x) &= |[x]_B \cap X| / |[x]_B| \end{aligned} \quad (3.15)$$

$\mu^X_B(x)$ jest to względna miara nakładania się klasy równoważności obiektu x ze zbiorem X . Przykładowo dla konceptu X^1 , $\mu^{X^1}_B(x_i)$ równać się będzie 0,75 wtedy, gdy spośród wszystkich obiektów o atrybutach takich samych, jak atrybuty obiektu x_i trzem czwartym przypisana jest decyzja X^1 , a pozostałym inne decyzje. Wówczas klasa równoważności $[x]_B$ leży częściowo poza zbiorem X^1 . Sytuacja ta może mieć miejsce w przypadku testów subiektywnych, kiedy obiekt o danych atrybutach przez różnych widzów

oceniany jest w różny sposób – generowane obiekty mają różne decyzje, a te same atrybuty.

Wprowadza się przybliżenia dolne i górne o zmiennej precyzji [77][151]:

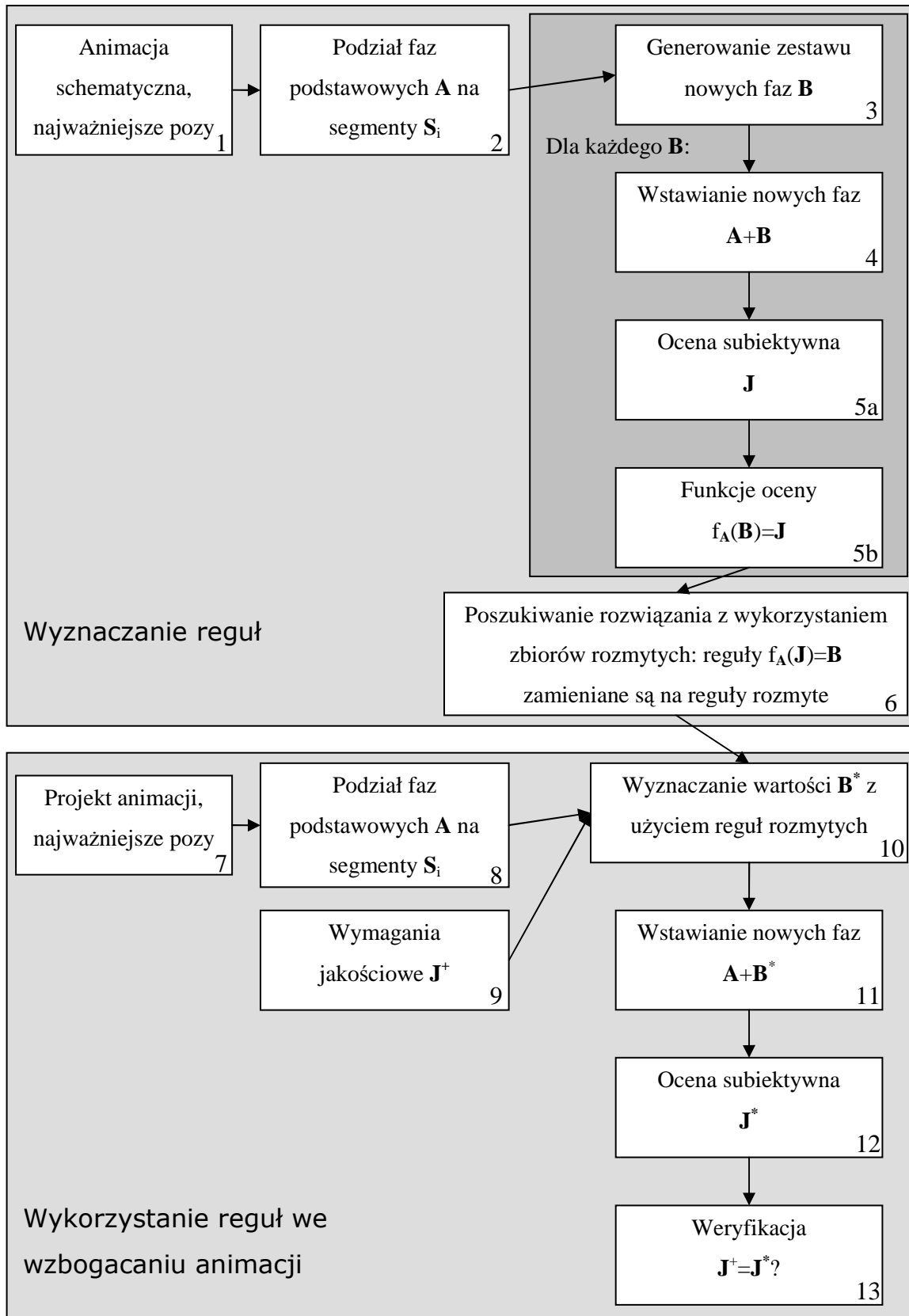
$$\begin{aligned}\underline{B}_\pi X &= \{x \mid \mu_B^X(x) \geq \pi\} \\ \overline{B}_\pi X &= \{x \mid \mu_B^X(x) > 1 - \pi\}\end{aligned}\tag{3.16}$$

Przybliżenie o precyzji $\pi=1$ jest przypadkiem klasycznego zbioru przybliżonego.

Jeżeli w przykładzie opisanym powyżej $\pi=0,75$, a dla obiektu x_i zachodzi $\mu_B^{X^1}(x_i) \geq 0,75$, to obiekt x_i należy do dolnego przybliżenia konceptu X^1 . W przypadku klasycznego zbioru przybliżonego obiekt x_i należałby wyłącznie do przybliżenia górnego.

Dla danych zgromadzonych w testach subiektywnych konieczne jest określenie, jakie wartości atrybutów **A** i **B** jednoznacznie wskazują na daną decyzję, czyli wyznaczenie dolnego przybliżenia konceptu związanego z decyzją. Dopełnienie górnego przybliżenia umożliwia z kolei określenie, jakie wartości atrybutów na pewno wykluczają daną decyzję. Zmiana dokładności przybliżenia wykorzystywana jest w niniejszej rozprawie w przypadku, gdy dla $\pi=1$ dolne przybliżenia są zbiorami pustymi. Wówczas kosztem obniżenia dokładności uzyskiwana jest informacja o wartościach atrybutów **A** i **B** powiązanych z analizowaną decyzją **J** i znajdowane jest rozwiązanie w postaci wektora parametrów **B**, co w przypadku klasycznych zbiorów przybliżonych byłoby niemożliwe.

Rys. 3.5 przedstawia uzupełnioną wersję schematu zaprezentowanego wcześniej na rys. 3.1 (str 50). Wprowadzone oznaczenia zgodne są z oznaczeniami użytymi w powyższych rozważaniach.



Rys. 3.5. Schemat blokowy przetwarzania animacji w celu wydobywania reguł i ich wykorzystania do wzbogacania animacji

3.4. Wnioskowanie rozmyte

Logika rozmyta szczególnie dobrze nadaje się do implementacji systemów sterowania, w których wiedza dostępna jest w postaci heurystycznej, a przede wszystkim daje się przedstawiać w formie zdań:

JEŻELI zmienna1=wartość1 I zmienna2=wartość2 I ... TO wynik=wartość_wyniku

Zmienne w tych zdaniach przyjmują wartości rozmyte, opisane wartościami lingwistycznymi, np. zmienna „*temperatura*” przyjąć może wartości „*zimno*”, „*chłodno*”, „*ciepło*”, „*gorąco*”, itp. Zadeh [149] definiuje zmienną lingwistyczną następująco (tłumaczenie za [33]):

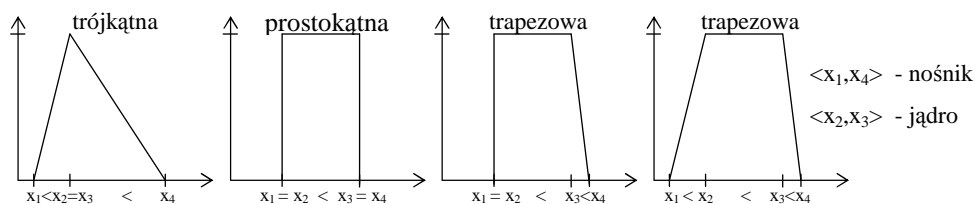
„Przez *zmienną lingwistyczną* rozumiemy zmienną, której wartościami są słowa lub zdania w języku naturalnym lub sztucznym. Dla przykładu *Wiek* jest zmienną lingwistyczną, jeśli jej wartości są wyrażone słowami, a nie liczbami, to znaczy *młody*, *niemłody*, *bardzo młodu*, *całkiem młody*, *stary*, *nie bardzo stary*, *nie bardzo młody* itd. Zamiast 20, 21, 22, 23, ...”

Konieczne jest zdefiniowanie stopnia przynależności określonych ostrych wartości do zbioru opisanego wartością lingwistyczną. Wyznacza się funkcję przynależności:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1] \quad (3.17)$$

gdzie: A – zbiór rozmyty. Przypisuje ona wartości $x \in X$ siłę przynależności do zbioru rozmytego. Przykładowo temperatura $x_1 = -5^\circ\text{C}$ należeć może z siłą 1 do zbioru „*zimno*” ($\mu_{zimno}(x_1) = 1$), a temperatura $x_2 = 2^\circ\text{C}$ należeć może do zbioru „*zimno*” z siłą 0,25 ($\mu_{zimno}(x_2) = 0,25$) i jednocześnie do zbioru „*chłodno*” z siłą 0,75 ($\mu_{chłodno}(x_2) = 0,75$). Wyznaczanie stopni przynależności danej ostrej wartości do zdefiniowanych zbiorów rozmytych nazywane jest rozmywaniem tej wartości.

Występuje wiele typów funkcji przynależności, m.in. odcinkami łamane, przedstawione na rys. 3.6 lub posiadające ciągłą pierwszą pochodną, np. symetryczna funkcja Gaussa lub dwustronna funkcja gaussowska, powstająca przez wykorzystanie lewej „połówki” funkcji o zadanym c_L i σ_L i prawej połówki funkcji o innych wartościach c_R i σ_R . Nośnikiem funkcji nazywany jest przedział, w którym przyjmuje ona wartości różne od zera, a jądrem przedział, w którym jej wartości są równe jeden.



Rys. 3.6. Przykładowe kształty funkcji przynależności

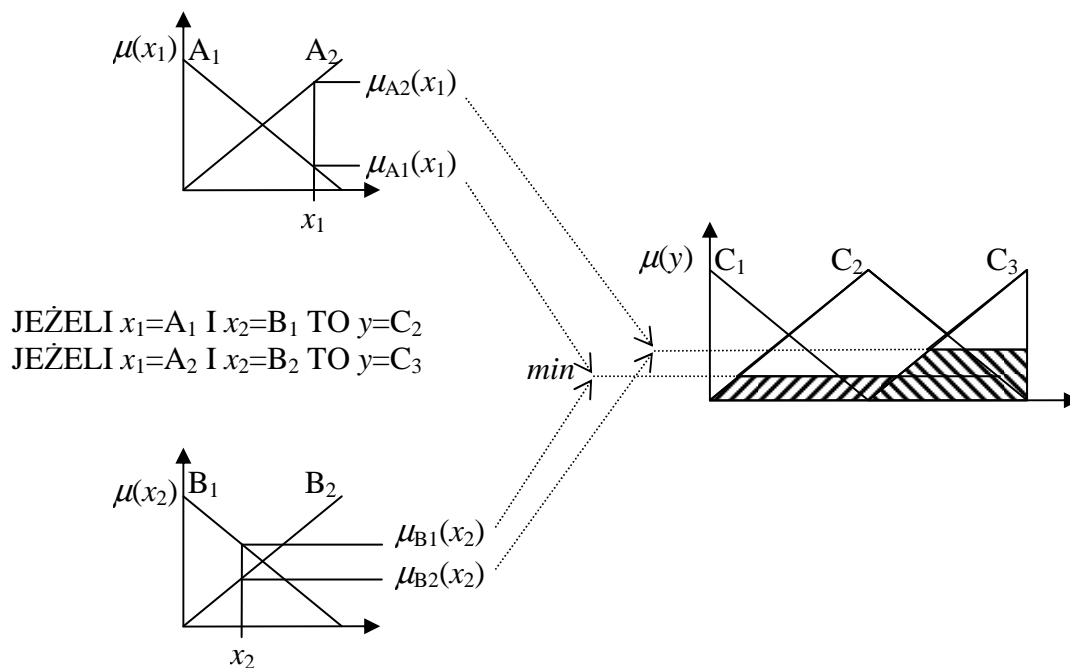
W pojedynczej regule występują koniunkcje zdań logicznych, tzn. (zmienna1=wartość1) I (zmienna2=wartość2), których wartość rozmytą wyznacza się w trakcie wnioskowania. W miejsce spójnika logicznego „I” wstawić można T-normę, np. operator minimum. Wartość przesłanki reguły stanowi o jej stopniu aktywacji. Dla zdania „JEŻELI temperatura=zimno I wilgotność=sucho TO podlewanie=mało” stopień aktywacji można policzyć jako [148]:

$$\mu_{zimno \cap sucho}(x_1, x_2) = \min(\mu_{zimno}(x_1), (\mu_{sucho}(x_2))) \quad (3.18)$$

Reguły, których stopnie aktywacji są różne od zera podlegają w trakcie wnioskowania procesowi agregacji, w którym określana jest rozmyta wartość zmiennej wyjściowej. Agregacja wykorzystuje operator logiczny LUB, którego rolę pełnić może dowolna S-norma, np. operator maksimum. Wówczas zmienna wyjściowa opisana jest jako połączenie rozmytych konkluzji aktywowanych reguł:

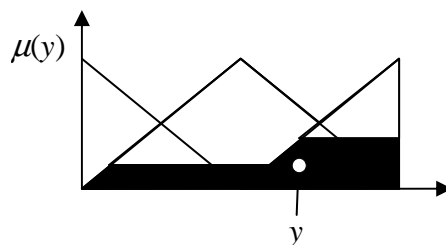
$$\mu(y) = \max(\mu_{R1}, \mu_{R2}, \dots, \mu_{Rn}) \quad (3.19)$$

Graficzna reprezentacja procesu wnioskowania przedstawiona jest na rys. 3.7. Funkcje przynależności A_i opisują zmienną wejściową x_1 , funkcje B_i zmienną x_2 , zaś funkcje przynależności C_i opisują zmienną wyjściową y . Oznaczono kształt sumarycznej funkcji przynależności zmiennej wyjściowej y , uzyskany w wyniku agregacji dwu aktywowanych reguł. Funkcja przynależności C_2 „odcinana” jest na poziomie zdeterminowanym siłą reguły pierwszej, a funkcja C_3 – reguły drugiej.



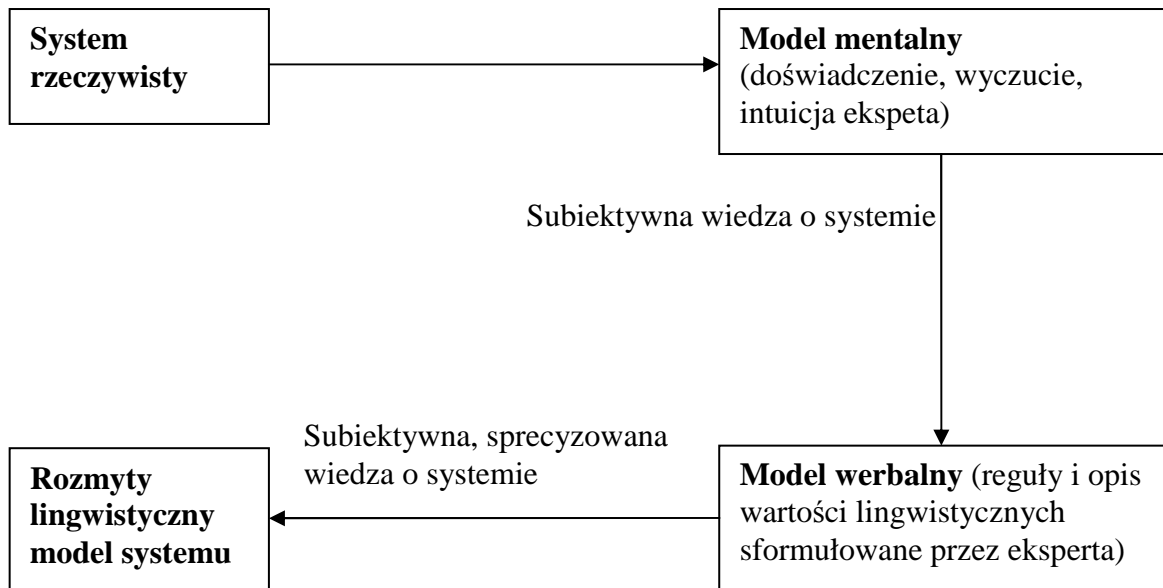
Rys. 3.7. Graficzna interpretacja procesu wnioskowania rozmytego

Ostateczna, ostra wartość zmiennej wyjściowej wyznaczana jest w procesie wyostrzania, na podstawie kształtu sumarycznej funkcji przynależności. Istnieje kilka metod wyostrzania, w tym najczęściej stosowane jest wyznaczanie położenia środka ciężkości figury.



Rys. 3.8. Wyostrzanie metodą środka ciężkości figury

Reguły dla systemu wnioskowania tworzone są zwykle w oparciu o wiedzę eksperta. Suma świadomej i podświadomej wiedzy o systemie rzeczywistym zawarta w umyśle eksperta określana jest jako „model mentalny” lub umysłowy (ang. *mental model*) [4][69]. Wynika on z wiedzy i doświadczenia eksperta w danej dziedzinie. Wiedza świadoma może być wyrażona poprzez słowa, w postaci modelu werbalnego, na bazie którego budować można modele rozmyte rys. 3.9.



Rys. 3.9. Proces tworzenia rozmytego lingwistycznego modelu systemu rzeczywistego

W procesie wzbogacania animacji wykorzystane zostaną parametry wejściowe nie tylko obiektywne, ale także subiektywne związane z opisem cech animacji, czyli parametrami zawartymi w wektorze **J**. W związku z powyższym wnioskowanie rozmyte zaproponowane zostało jako główne narzędzie przetwarzania danych i wyznaczania parametrów wyjściowych.

Reprezentacja wiedzy w postaci reguł lingwistycznych oraz rozmywanie zmiennych pozwalają opisywać modelowane zależności w sposób podobny do subiektywnego opisu, jakim posługuje się człowiek. Stąd też logika rozmyta znajduje często zastosowanie w systemach, w których na pierwszym planie stawiane jest uzyskanie działania zbliżonego do działania eksperta w danej dziedzinie, a dokładność obliczeń stoi na dalszym planie. Należy nadmienić, że modelowanie systemów na bazie wiedzy ekspertów jest szybkie, a implementacja nieskomplikowana obliczeniowo [34][111][113][125][129][130].

Jedno z często stosowanych podejść w modelowaniu za pomocą logiki rozmytej nazywane jest czarną skrzynką. Stosowane jest ono w celu uzyskania rozmytego modelu systemu, o którym jedyna możliwa do zdobycia wiedza pochodzi z pomiarów zależności wyjścia od wejść i nic nie wiadomo o budowie jego wnętrza. Wykorzystuje ono systemy rozmyte Mamdaniego [94][95][113], które w następniku każdej reguły posiadają wartość rozmytą zmiennej wyjściowej. Najważniejszą zaletą modeli Mamdaniego jest ich łatwość interpretacji (ang. *interpretability*). System taki może być trenowany z wykorzystaniem

danych uzyskiwanych w wyniku badania wybranych zjawisk rzeczywistych. Na podstawie zgromadzonych i przetworzonych danych pomiarowych tworzony jest model zjawiska, urządzenia, systemu, który w założeniu ma zachowywać się w sposób zbliżony do oryginału. Modelowanie tego systemu możliwe jest dzięki właściwościom interpolacyjnym i ekstrapolacyjnym systemów wnioskowania rozmytego. Mianowicie wykorzystanie dyskretnych danych z pomiarów rzeczywistych do określenia odpowiedzi modelu w tak zwanych punktach podparcia jest wystarczające, aby wykorzystywać model dla ciągłych wartości wejściowych, a także w zakresach danych wejściowych leżących poza zakresem badanym w rzeczywistym systemie.

Alternatywą dla modeli Mamdaniego są modele Takagi-Sugeno [113][131], które w następniku n -tej reguły nie posiadają wartości rozmytej tylko funkcję przenoszenia modelu $f_n: x \rightarrow y$, opisującą charakterystykę modelu i zjawiska w nim zachodzące. W trakcie wnioskowania podejmowany jest wybór właściwej z N funkcji, ewentualnie superpozycja kilku funkcji pochodzących z reguł o niezerowym stopniu aktywacji. Zaprojektowanie takiego systemu wymaga posiadania wiedzy dotyczącej charakteru funkcji, jakie powinny znajdować się w następnikach reguł. Tworzenie takich modeli jest zadaniem trudnym, jednakże gwarantują one większą dokładność działania modelu.

Dla badanego zjawiska percepcji i oceny ruchu w animacji komputerowej przyjęto, że reguły rozmyte, które będą implementowane wewnątrz systemu mają mieć postać zdań logicznych tak, jak w systemie Mamdaniego. Zaletą tego podejścia jest uzyskanie reguł czytelnych dla użytkownika–animatora.

W projektowanym systemie wykorzystywane są funkcje przynależności będące dwustronnymi funkcjami gaussowskimi. Funkcje gaussowskie mają następujące zalety:

- powierzchnie uzyskanego modelu są gładkie, różniczkowalnie ciągłe,
- funkcje te posiadają pochodną dowolnego stopnia, co ułatwia analizę teoretyczną modeli rozmytych,
- pozwalają w przybliżeniu spełnić kryterium sumowania do jedności, przy założeniu o pomijalności wartości funkcji w odległości 3σ (trzech odchylen standardowych) od średniej c (będącej także miejscem występowania maksimum funkcji). Funkcja gaussowska w punktach $c \pm 3\sigma$ ma wartość 0,011,
- funkcje gaussowskie są zalecane do modelowania funkcji przynależności w przypadku przetwarzania modelu na model rozmytej sieci neuronowej [113], wówczas ułatwione jest strojenie sieci algorytmem wstecznej propagacji błędu, metodami

gradientowymi, ze względu na różniczkowalność funkcji Gaussa. Ponadto podczas strojenia sieci neuronowej istnieje możliwość eliminacji niektórych nieistotnych reguł, a dzięki nieskończonym nośnikom gaussowskich funkcji przynależności model pozostaje kompletny, gdyż zawsze aktywowana jest co najmniej jedna reguła i istnieje wyjście dla dowolnej kombinacji zmiennych wejściowych.

Wady gaussowskich funkcji przynależności są następujące:

- funkcje dwustronne są opisywane czterema parametrami, symetryczne zaś dwoma, co może utrudniać automatyczne strojenie systemu wnioskowania, w porównaniu do przypadku zastosowania funkcji trójkątnych z sumowaniem do jedności opisywanych tylko jednym parametrem, czyli położeniem wierzchołka,

- nośnik funkcji przynależności, czyli przedział, gdzie wartość funkcji jest różna od zera, dla krzywych gaussowskich jest nieskończenie duży. W praktyce dla x odleglejszych od c o więcej niż 3σ różnica jest pomijana mała,

- zastosowanie funkcji gaussowskich utrudnia uzyskiwanie lokalnie liniowej powierzchni modelu.

Wnioskowanie rozmyte stosowane jest w licznych badaniach dotyczących złożonego przetwarzania danych wielowymiarowych. Między innymi stworzony został system symulacji lotu klucza ptaków z uwzględnieniem przeszkód i współoddziaływania elementów [5]. Na podobnej zasadzie działa robot znajdujący drogę do celu w nieznanym terenie z przeszkodami [1]. Reguły rozmyte wykorzystywane są także w animacji do wyznaczania mimiki twarzy i gestów głowy, jako kombinacji kilku wzorców [74].

Logika rozmyta znajduje zastosowanie w dziedzinie przetwarzania danych wielowymiarowych [26] i podejmowania decyzji wielokryterialnych [9][96]. Wnioskowanie rozmyte jest z powodzeniem stosowane w badaniach percepcji, wymagających przetwarzania subiektywnych danych, gromadzonych w wyniku prowadzonych testów subiektywnych. Poniżej przedstawiono przykłady tego typu badań prowadzonych w macierzystej Katedrze autora.

Kostek zrealizowała i przebadła system kompleksowej oceny jakości akustyki wnętrza. Zagadnienie oceny jakości dźwięku wymaga przetwarzania danych subiektywnych i do tego celu wybrano przetwarzanie rozmyte. Zaproponowany system składa się z bloku budowania bazy wiedzy i bloku automatycznej oceny jakości obiektu akustycznego [79][80]. W kolejnych badaniach Kostek zaproponowała wykorzystanie koncepcji „przetwarzania słów języka naturalnego” (ang. *Computing with Words*) do celów rozpoznawania klas instrumentów muzycznych z wykorzystaniem słownego opisu barwy

dźwięku [81] oraz do znalezienia związku między parametrami dźwięków muzycznych a subiektywnie postrzegana barwą [82][83]. Badania te skupiały się na sposobie obróbki wyników testów subiektywnych z wykorzystaniem logiki rozmytej.

W licznych badaniach zespołu naukowego Czyżewski, Kostek, Suchomski wnioskowanie rozmyte wykorzystywane jest w systemie eksperckim doboru protez słuchowych. W tym celu wykorzystywana jest metoda LGOB (ang. *Loudness Growth in 1/2-Octave Bands*), pozwalająca na zbadanie zależności subiektywnego wrażenia głośności w funkcji częstotliwości. W metodzie tej badany określa odbierany sygnał według skali subiektywnej. Zgromadzone dane przetwarzane są za pomocą logiki rozmytej. W wyniku wnioskowania wyznaczany jest zakres dynamiki słuchu i sposób narastania głośności u badanego, co pozwala na szybkie i poprawne wyznaczenie charakterystyk protez słuchowych [29][84][121].

Subiektywność badanych w niniejszej rozprawie zjawisk percepcji i oceny ruchu naturalnego i animowanego, jest najważniejszym powodem wyboru logiki rozmytej, jako narzędzia przetwarzania danych. Analizowane parametry animacji opisywane są zmiennymi lingwistycznymi. Tworzone reguły, zawierające opis zależności między parametrami animacji, są w pełni czytelne, zrozumiałe i intuicyjne dla użytkownika, także artysty animatora i projektanta systemu.

W podsumowaniu można stwierdzić, że za wykorzystaniem logiki rozmytej w omawianym zagadnieniu przemawiają następujące czynniki:

- własności interpolacyjne między punktami podparcia modelu,
- możliwość modelowania parametrów i zależności subiektywnych,
- przetwarzanie subiektywnych wartości lingwistycznych, np. uzyskiwanych z reguł zapisanych w języku naturalnym z literatury,
- łatwość uwzględniania aktualnej wiedzy ekspertów,
- łatwość w interpretacji reguł rozmytych.

Ponieważ do tej pory nie stosowano przetwarzania w oparciu o logikę rozmytą w implementacji reguł animacji, stąd też proponowane podejście wydaje się interesujące i warte zweryfikowania.

Przeprowadzone badania dążą do realizacji modelu percepcji animowanego ruchu, dla animacji „od pozy do pozy”, opartego o dane zgromadzone w trakcie testów oceny subiektywnej, opisanych w rozdziale 4.3.1. Zadaniem modelu jest, w odpowiedzi na parametry schematycznej wejściowej animacji, zwracanie wartości parametrów faz ruchu

wzbogacających ruch w sposób dający pożądany efekt subiektywny. Wykorzystanie modelu rozmytego do wzbogacania animowanego ruchu opisano w rozdziale 4.4.

3.5. Metodyka testów subiektywnych

W niniejszym rozdziale opisano podstawy przeprowadzania testów subiektywnych, zaczerpnięte z rekomendacji dotyczących oceny jakości transmisji dźwięku i jakości obrazu telewizyjnego [115][116]. Zamieszczone zalecenia wyboru skali ocen, przygotowania sygnałów do oceny, doboru uczestników i sposobu analizy zgromadzonych danych można z powodzeniem stosować w trakcie realizacji dowolnych testów subiektywnych.

Skale oceny

W dziedzinie testów subiektywnych przez lata wypracowany został standard skal ocen subiektywnych [116], które zostaną pokrótce opisane.

Najczęściej stosowana jest skala pięciostopniowa oceny *jakości*. W języku angielskim przedstawia się ona następująco:

- *Excellent*
- *Good*
- *Fair*
- *Poor*
- *Bad*

Powyższym nazwom przypisywana jest skala liczbowa: *Excellent* = 5; *Good* = 4; *Fair* = 3; *Poor* = 2; *Bad* = 1. Obróbka statystyczna danych przeprowadzana jest w skali liczbowej, stąd też możliwe jest wyliczenie np. średniej arytmetycznej, która typowo nazywana jest oceną MOS (ang. *mean opinion score*) – średnią wartością oceny, a następnie przeprowadzenie testu równości średnich, analizy wariancji lub korelacji pomiędzy różnymi zmiennymi.

Zalecane jest, aby nazewnictwo ocen w innych językach było możliwie zbliżone do oryginału, stąd też w polskojęzycznych formularzach ocen stosuje się skalę: doskonała (ang. *excellent*); dobra (ang. *good*); zadowolająca (ang. *fair*); słaba (ang. *poor*); zła (ang. *bad*).

Jeżeli pytanie w formularzu testowym pozwala odpowiedzieć tylko w sposób binarny, stosowane są odpowiedzi:

- *Yes* – Tak
- *No* – Nie

Przypisywane są im także wartości liczbowe: Tak = 1, Nie = 0 i jako wynik testu wyliczany jest procentowy udział odpowiedzi twierdzących, który jest tożsamy ze średnią z ocen.

Ponadto dopuszcza się stosowanie innych skal, przykładowo skali punktowej od 1 do 5, w której opis słowny mają tylko oceny skrajne, np. 1=zły, 5=doskonały, aby oceniającemu uzmysłować w ten sposób rozpiętość ocen. Stosowana jest także graficzna skala ocen, tzn. odcinek z naniesioną podziałką, na którym oceniający zaznaczyć ma położenie swojej odpowiedzi. W tym przypadku nie ma ograniczenia do wartości całkowitych, a odczyt odbywa się za pomocą ręcznego pomiaru długości na papierze, z zaokrągleniem np. do 5mm.

Jeszcze inne skale stosowane są w testach oceny zniekształceń lub zakłóceń. W zaleceniach ITU-T [116] opisano test detekcji (zauważalności), wykorzystujący skalę oceny poziomu danego niekorzystnego zjawiska. Oceniający ma do dyspozycji następujące odpowiedzi:

- 3 - *Objectionable* – niedopuszczalny,
- 2 - *Detectable* – zauważalny,
- 1 - *Not detectable* – niezauważalny,

gdzie „2” rozumieć należy jako zauważalny, jednakże dopuszczalny.

Wykorzystanie takiej skali pozwala statystycznie analizować dwie możliwe dychotomie: rozróżnienie między przypadkami zauważalności i niezauważalności zniekształcenia oraz podział na niedopuszczalne i dopuszczalne poziomy tego zniekształcenia.

Testy oceny parametrycznej o skalach wyszczególnionych powyżej nazywane są testami ACR (ang. *Absolute Category Rating*) – testami oceny w skali bezwzględnej. Ich główną wadą jest słabe rozróżnienie pomiędzy materiałami (dźwiękiem, obrazem, wideo) o jakości zbliżonej do maksymalnej, czyli przypadkami jakości dobrej, bardzo dobrej i doskonałej. W celu efektywnej oceny materiałów o wysokiej jakości stosuje się szereg testów DCR (ang. *Degradation Category Rating*) – testy oceny względnego stopnia degradacji. DCR wykorzystuje skale opisowe uciążliwości zakłóceń, zniekształceń lub degradacji i stosuje porównanie z wzorcem. Sygnały prezentowane są w parach AB lub

ABAB, gdzie A zawsze stanowi sygnał referencyjny, zaś B to sygnał poddawany ocenie. Odtwarzanie wzorca ma na celu „zakotwiczenie” (ang. *anchoring*) skali ocen na najlepszym możliwym do uzyskania materiale, względem którego oceniane są pozostałe sygnały. Procedura ta jest powszechnie stosowana w psychoakustyce. Stosowane skale punktowe odnoszą się do degradacji sygnału:

- 5: *Degradation is inaudible* – degradacja niedostrzegalna (dosłownie: niedosłyszalna)
- 4: *Degradation is audible but not annoying* – degradacja dostrzegalna, jednakże nie dokuczliwa
- 3: *Degradation is slightly annoying* – degradacja minimalnie dokuczliwa
- 2: *Degradation is annoying* – degradacja dokuczliwa
- 1: *Degradation is very annoying* – degradacja bardzo dokuczliwa

Dla badań opisywanych w niniejszej rozprawie metoda testów DCR nie znajduje zastosowania z powodu braku możliwości wygenerowania animacji referencyjnej, która reprezentowałaby obiektywne maksimum parametru *jakości* czy *płynności*. Do oceny animacji stosowane są skale ACR oceny *jakości*, *płynności*, *stylizacji*.

Sygnały testowe

W celu wyeliminowania **niepożądanego** **zmienności** pomiędzy ocenianymi sygnałami i warunkami oceny, zaleca się przeprowadzanie testów w znormalizowanych warunkach. Dla testów oceny animacji prowadzonych w ramach rozprawy przygotowano następujące warunki:

- wykorzystano identyczne komputery i monitory LCD 17”, dostępne w laboratoryjnych Katedry Systemów Multimedialnych. Każdy z monitorów ustawione miał następujące identyczne parametry obrazu: jasność 40, kontrast 80, neutralna temperatura barwowa, rozdzielczość ekranu 1024x768, częstotliwość odświeżania 60Hz,

- zgodnie z rekomendacją ITU-R BT.500-11 [115] odległość oceniającego od monitora równa była w przybliżeniu ośmiokrotnej wysokości ocenianego obrazu, czyli 1,15m. Zwykle testowy materiał wyświetlany jest na pełnym ekranie, wówczas wysokość obrazu jest tożsama z wysokością ekranu. Jednakże w niniejszych badaniach na ekranie umieszczono dodatkowo panel sterowania odtwarzaniem i graficzny interfejs oceny, a sam materiał wideo odtwarzany był w oknie o wysokości 480 pikseli. Okno odtwarzacza wideo stanowiło więc 62,5% całej wysokości ekranu przy rozdzielczości 1024x768 pikseli.

Wynikająca z normy [115] odległość dla monitora LCD 17" równa jest 8·0,23m=1,84m, natomiast po przeskalowaniu o 62,5% równa jest 1,15m,

- sekwencje wideo odtwarzane były z plików cyfrowych, co zapewniło 100% powtarzalności i wyeliminowało degradację materiału w trakcie wielokrotnego odtwarzania, która jest istotna dla mediów analogowych,

- sygnały odtwarzane były w losowej kolejności, innej dla każdego oceniającego, w celu wyeliminowania wpływu kolejności oceniania na ocenę.

Uczestnicy testów

Również uczestnicy testu mogą wprowadzać niepożądaną zmienność do uzyskiwanych ocen głównie z powodu różnic osobniczych. Z tego powodu grupa osób dobierana jest w kontrolowany sposób tak, aby cechowały się one zbliżonym doświadczeniem w styczności z danym materiałem. Uczestnicy testów:

- nie byli bezpośrednio związani z tematyką oceniania jakości materiału wideo i animacji,
- nie brali udziału w testach subiektywnej oceny jakości animacji w przeciągu ostatnich 6 miesięcy
- nigdy wcześniej nie widzieli ocenianych animacji.

Analiza statystyczna danych

Dla ocen zgromadzonych w testach subiektywnych przeprowadza się wyznaczenie wartości średniej ocen dla danej animacji lub dla wybranej grupy animacji (np. wszystkich animacji poddanych przetworzeniu lub wszystkich, do których wprowadzono subiektywny element płynności) i określany jest przedział ufności dla średniej. Należy następnie sprawdzić, czy animacje różnych czynności jeszcze przed wzbogaceniem o nowe fazy nie charakteryzowały się istotnymi różnicami, które mogłyby zaburzać ocenę końcową. W tym celu przeprowadzony zostaje *test t* równości średnich. Następnie dla wybranych grup wyników, np. ocen wszystkich animacji przed wzbogaceniem i ocen po wzbogaceniu stosuje się test analizy wariancji ANOVA, który wykazać może istotne różnice między średnimi wartościami ocen. Jeśli różnice są istotne, to uprawnione są wnioski o zmianie *jakości* na skutek wzbogacenia animacji o nowe fazy.

Istotność statystyczna wyniku (poziom *p*) jest estymowaną miarą stopnia, w jakim wynik jest „prawdziwy”, czyli reprezentatywny dla populacji. Im wyższy poziom *p*, tym mniej prawdopodobne, że zaobserwowana zależność między zmiennymi w próbie jest tożsama z zależnością między odpowiednimi zmiennymi w całej populacji. Poziom *p*

reprezentuje bowiem prawdopodobieństwo błędu, polegającego na przyjęciu wyniku jako prawomocnego. Przykładowo poziom p równy 0,10 wskazuje, że istnieje 10% prawdopodobieństwo, że wykryta zależność jest dziełem przypadku. Poziom $p=0,05$ jest zwyczajowo przyjęty jako graniczny akceptowalny poziom błędu m.in. w badaniach w dziedzinie psychoakustyki i taka wartość istotności została przyjęta także w badaniach prowadzonych w ramach rozprawy.

Wartość średnia wyznaczana z wyników testów oceny subiektywnej jest przybliżeniem położenia centralnego punktu rozkładu rozpatrywanej oceny. Przedział ufności dla średniej określa przedział wartości wokół wyznaczonej średniej, co do którego oczekuje się, że z danym prawdopodobieństwem zawarta jest w nim średnia prawdziwa dla całej populacji.

Średnia z próby dla j -tego kryterium i k -tej sekwencji to:

$$\bar{u}_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ijk} \quad (3.20)$$

gdzie N równe jest liczbie uczestników.

Zwyczajowo w badaniach subiektywnej oceny przyjmowany jest 95% poziom ufności [115]. Zależy on od odchylenia standardowego i wielkości badanej próby. Definiuje się go jako:

$$[\bar{u}_{jk} - \delta_{jk}, \bar{u}_{jk} + \delta_{jk}] \quad (3.21)$$

gdzie:
$$\delta_{jk} = 1,96 \frac{S_{jk}}{\sqrt{N}} \quad (3.22)$$

a odchylenie standardowe S_{jk} jest określone jako:

$$S_{jk} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{u}_{jk} - u_{ijk})^2}{(N-1)}} \quad (3.23)$$

Z prawdopodobieństwem 95% rzeczywista wartość średniej dla całej populacji leży w wyznaczonym przedziale ufności (3.21), którego środkiem jest średnia z próby \bar{u}_{jk} (3.20).

Test t dla prób niezależnych

Przeprowadzając *test t* dla prób niezależnych realizuje się następujące kroki, które na początku dotyczą sprawdzenia założeń testu, a następnie interpretacji wyniku:

1. należy sprawdzić **założenie o normalności**, np. przez analizę rozkładu danych (obserwacja histogramu) lub przy pomocy testu normalności,

2. **założenie o równości wariancji** sprawdzane jest za pomocą *testu F*,

3. przeprowadzany jest *test t* - oceny **różnic między średnimi** w dwóch grupach. Odrzucana jest hipoteza zerowa H_0 ="średnie są równe", p to prawdopodobieństwo błędnego odrzucenia H_0 . Na podstawie liczby stopni swobody obliczana jest wartość statystyki. Jeżeli mieści się ona w przedziale zależnym od przyjętego poziomu istotności p , nie ma przesłanek do odrzucenia hipotezy i przyjmuje się statystyczną równość średnich w badanych próbkach.

4. do przeprowadzenia *testu t* dla prób niezależnych wymagana jest jedna niezależna zmienna grupująca – np. numer animowanej czynności oraz zmienna zależna – wynik testu, tzn. ocena *jakości*. W ten sposób w teście porównywane są średnie oceny uzyskane przez dwie grupy sygnałów,

Test t dla prób zależnych

Test t stosowany jest także wówczas, gdy dwie serie uzyskanych ocen dotyczą tej samej grupy sygnałów, np. jednej przed przetwarzaniem i drugiej po przetworzeniu:

1. test dla prób zależnych stosuje się wtedy, gdy nie ma możliwości wyeliminowania wariancji pochodzącej od indywidualnych różnic poszczególnych obiektów. Ta sama próba zostaje zmierzona dwukrotnie i wówczas ową wariancję łatwo jest wyeliminować. Poprzez odjęcie wyników przed przetwarzaniem sygnału i po przetworzeniu i analizowanie samych różnic dokonuje się wyeliminowania tej części wariancji w zbiorze danych, która pochodzi od różnic w wartościach bezwzględnych poszczególnych obiektów pomiarowych,

2. analizowane różnice pomiędzy parami pomiarów powinny mieć rozkład normalny,

3. jeśli analiza dotyczy więcej niż dwu skorelowanych prób, np. przed przetwarzaniem, po wykonaniu algorytmu 1. oraz po wykonaniu algorytmu 2., wówczas stosuje się analizę wariancji ANOVA z powtarzanymi pomiarami.

Analiza wariancji

Test analizy wariancji ANOVA stosowany jest w celu stwierdzenia czy dwie lub więcej grup różni się istotnie od siebie ze względu na **wartość średnią** pewnej zmiennej. W przypadku stwierdzenia istotności różnic średnia może być wykorzystywana jako parametr dyskryminujący (rozróżniający) grupy między sobą.

W niniejszym rozdziale opisano teoretyczne podstawy systemu wspomaganie animacji, wykorzystującego optymalizację wielowymiarową, metody zbiorów

przybliżonych i logiki rozmytej oraz testy subiektywne. Rozdziały kolejne opisują procedurę przygotowania sygnałów testowych, które są oceniane w teście subiektywnym. Wyniki testu są następnie wykorzystywane w procesie poszukiwania optymalnego rozwiązania i na bazie zbioru rozwiązań dla różnych zadanych wartości kryteriów *płynności*, *stylizacji* i *jakości* animacji, tworzone są reguły rozmyte, wykorzystywane do wyznaczania parametrów faz wzbogacających animację o pożądane cechy subiektywne.

4. WYKORZYSTANIE REGUŁ ROZMYTYCH W ANIMACJI RUCHU POSTACI

Celem postępowania opisywanego w niniejszym rozdziale jest wyznaczenie reguł rozmytych dla systemu wnioskowania. Mają one umożliwić wygenerowanie animacji wzbogaconych, które charakteryzowałyby się zadanymi cechami subiektywnymi dla dowolnych wejściowych animacji i parametrów subiektywnych. W tym celu konieczne jest stworzenie zbioru uczącego, w postaci zróżnicowanej populacji obiektów, które byłyby reprezentatywne zarówno pod względem zmienności parametrów obiektywnych związanych z fazami ruchu, jak i pod względem zróżnicowania uzyskiwanych przez nie ocen subiektywnych. Animacje uczące różnią się między sobą parametrami fazy głównej ruchu i sposobem umieszczenia klatek kluczowych w fazach dodatkowych, czyli elementami, które opisane są w wektorach parametrów **A** i **B**. Jednakże zadanie ocenienia wszystkich możliwych do wygenerowania animacji jest trudne w realizacji. W pierwszym kroku przetwarzania danych animacji wprowadzone zostają założenia, mające na celu ograniczyć wymiarowość przestrzeni parametrów i zakresy ich zmienności. Atrybutami obiektów nie są wówczas wszystkie parametry animacji zawarte w wektorach **A**, **B**. Odpowiednie założenia opisane w rozdziale 4.1.3, prowadzą do uproszczenia do dwuwymiarowej przestrzeni atrybutów, od których zależne są wartości wszystkich pozostałych analizowanych parametrów.

Animacje uczące zostają poddane ocenie subiektywnej w celu określenia *jakości* ruchu **Q** oraz subiektywnego *stylu* i *płynności* każdej z nich. Dysponując wartością funkcji oceny dla każdego **A** i **B**, czyli $f_A: \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{J}$, można przeprowadzić postępowanie wyznaczające funkcję odwrotną o postaci $f_A^{-1}: \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}$ dla każdego **A** i **J**. Wymaga ono znalezienia w zbiorze obiektów uczących tych animacji, które cechują się zadanym **A** i ocenione zostały przez uczestników testu zadaną wartością oceny $\mathbf{J} = \{\text{styl}, \text{płynność}\}$. Cechy **B** tych animacji stanowią poszukiwane rozwiązanie. W teście oceny prócz parametrów zawartych w wektorze **J** gromadzone są także oceny jakości ogólnej **Q**, której wartości umożliwiają wybór jednoznacznego rozwiązania **B**, optymalnego pod względem jakości ruchu. Z kolei w przypadku braku rozwiązania następuje złagodzenie kryteriów zgodności rozwiązania z zadanymi wartościami subiektywnymi ocen *stylu* i *płynności* tak, aby znaleźć rozwiązanie najlepiej dopasowane.

Procedura poszukiwania obiektów o pożądanych wartościach atrybutów decyzyjnych lub wartościach do nich zbliżonych realizowana jest w oparciu o zbiory przybliżone. Jest to wskazane z tego względu, iż wiele animacji otrzymuje niejednoznaczne oceny subiektywne i wówczas animacje te analizowane są jako należące do obszaru granicznego wybranego zbioru przybliżonego. Reprezentacja konceptów (inaczej zbiorów przybliżonych) związanych z poszukiwanymi wartościami ocen subiektywnych jest więc przybliżona. W tym przypadku określone są przecięcia dwu zbiorów przybliżonych: pierwszego związanego z przyjętą wartością atrybutu decyzyjnego $styl=x$ i drugiego związanego z $płynność=y$. Przecięcia wyznaczają obiekt o atrybutach **A** i **B**, dla którego $f_A^{-1}: \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}$.

W celu wygenerowania reguł rozmytych parametry wejściowe są rozmywane w oparciu o subiektywne przydzielanie określeń słownych zakresom zmienności parametrów animacji. Dane uzyskane w trakcie oceny wykorzystywane są do wyznaczania funkcji przynależności dla tych parametrów. Na podstawie wyznaczonych odwzorowań $f_A^{-1}: \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}$ tworzone są reguły rozmyte dla wszystkich kombinacji wartości lingwistycznych parametrów subiektywnych z wektora **J** i parametrów animacji z wektora **A**.

Założono następujący tok postępowania:

- generowanie animacji uczących opisywane jest w rozdziale 4.1. Do animacji, przygotowanych przez animatora zgodnie z metodą „od pozy do pozy” i sparametryzowanych parametrami faz głównych zawartymi w wektorze **A**, dodawane są automatycznie fazy dodatkowe w celu przygotowania serii wielu wersji animacji do oceny. Parametry faz dodatkowych wektora **B**, wybierane są w pewnej dozwolonej wielowymiarowej podprzestrzeni wartości. Parametryzacja faz głównych animacji przedstawiona jest w rozdziale 4.1.1. Sposób umieszczania nowych faz w animacji opisany jest w rozdziale 4.1.2. Metoda ograniczenia wymiarowości i zakresów zmienności parametrów opisana jest w rozdziale 4.1.3,
- następuje badanie subiektywne jakości związanej z dobranymi parametrami, każda animacja oceniana jest przez widzów, animacjom przypisywane są wartości parametrów wektora oceny **J**,
- dla każdego zadanego opisu faz głównych, w postaci wektora **A**, poszukiwany jest zbiór wektorów **B**, które implikują wysoką jakość subiektywną **J**,

- na podstawie powyższego generowane są reguły przyporządkowujące zadaniem **A** i **J** odpowiednie **B**.

Kolejne podrozdziały przedstawiają dokładniej zaproponowaną metodykę postępowania. Na etapie poszukiwania dla zadanych **A** i **J** rozwiązań w postaci **B**, wykorzystywana jest strategia optymalizacji przedstawiona wcześniej w rozdziale 3.2.

4.1. Dane uczące

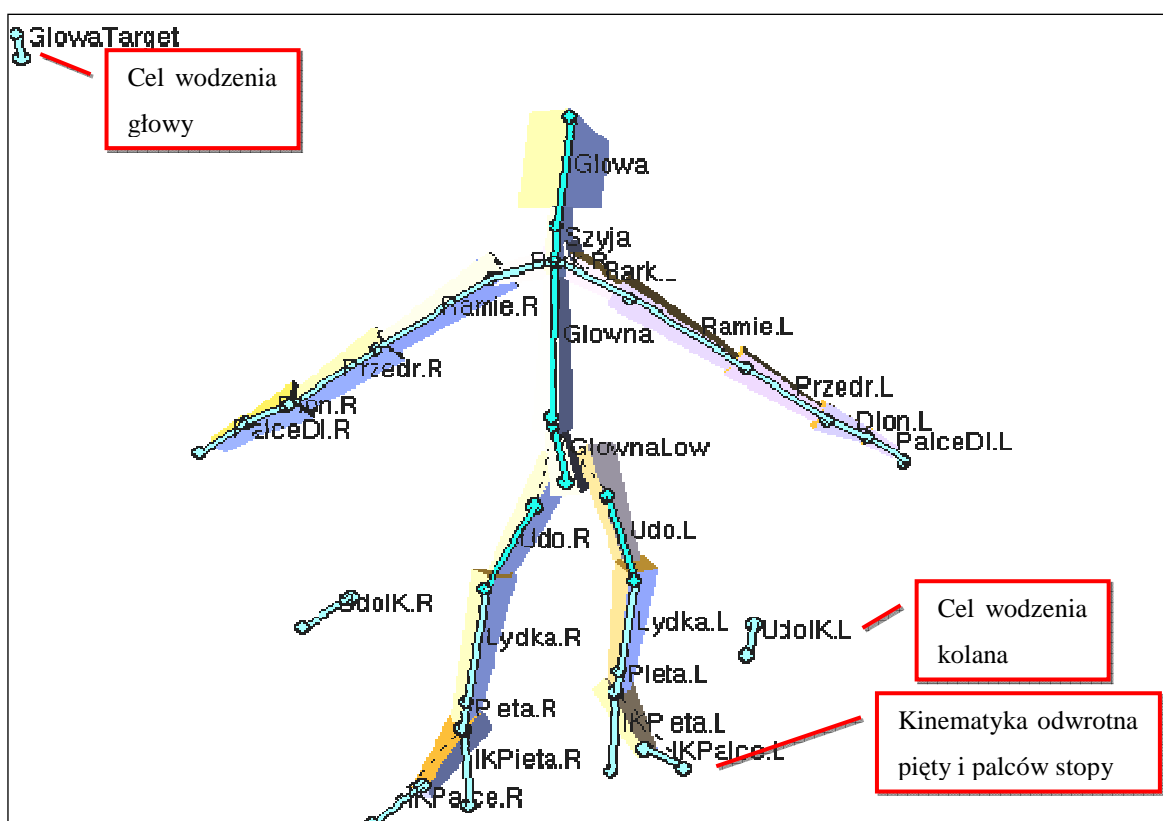
W animacjach wykorzystywana jest prosta postać przedstawiona na rys. 4.1. Postać pozbawiona jest rysów twarzy w celu wyeliminowania wpływu braku zmian mimiki twarzy⁶ na odbiór i ocenę treści animacji. Z takich samych powodów zdecydowano się na postać zbudowaną z brył, gdyż pozwala to skupić większą część uwagi na ocenie ruchu, a nie np. niedoskonałościach wyglądu postaci ludzkiej, co jest częstą praktyką stosowaną w podobnych badaniach [1][14][17][32][40][72][98][103][114][135][137].

Na rys. 4.1. zaznaczono nazwy kości nadane według następującej konwencji: nazwa kości, kropka, litera oznaczająca stronę prawą lub lewą ciała. Kręgosłup podzielony jest na dwie części „Głowna” i „GłownaLow”, która odpowiedzialna jest za ruch bioder. Kości, które w nazwie posiadają skrót „IK” i znajdują się na zewnątrz siatki 3D postaci są kontrolerami kinematyki odwrotnej dla odpowiednich kości w szkielecie postaci (IK – ang. *Inverse Kinematics*). Mianowicie kontroler „UdoIK” ułatwia pozycjonowanie kości „Udo”, gdyż koniec kości, czyli kolano postaci, ustawiany jest samoczynnie zawsze w kierunku tego kontrolera. Taka zależność nazywana jest wodzeniem. Podobnie realizowane jest wodzenie głowy. Kości rąk połączone są w łańcuch kinematyczny wykorzystujący kinematykę prostą, czyli poruszenie kością starszą w hierarchii powoduje przemieszczenie się kości młodszych. Dłoń reprezentowana jest tylko przez dwie kości – kość śródreczą i jedną kość dla wszystkich palców. Takie uproszczenie anatomii ułatwia pozycjonowanie postaci i animację podstawowych czynności angażujących całe ciało. W badaniach opisywanych w niniejszej rozprawie postać pokazywana jest na ekranie w całości w tak zwanym planie pełnym. W takim ujęciu nie ma konieczności dokładnego animowania

⁶ Animacja mimiki twarzy nie jest przedmiotem badań opisanych w rozprawie, por.: komentarz pod koniec rozdziału 2.1, str. 16.

ruchu palców dłoni. Animacja wszystkich pięciu palców dłoni niezależnie byłaby konieczna dla czynności obserwowanych w planie średnim lub bliskim. Kinematyka odwrotna nóg wpływa na położenie stóp i w razie potrzeby pozwala na automatyczny obrót kości piszczelowej i udowej w celu zachowania pozycji stóp na podłożu.

Dzięki połączeniu kinematyki prostej i odwrotnej ułatwione jest animowanie swobodnych i naturalnych gestów rękoma oraz zapewnienie trwałej styczności stóp z podłożem podczas przemieszczania kości głównej – miednicy postaci. Jest to szczególnie przydatne dla animacji gestykulacji, która nie wiąże się z przemieszczaniem, a jedynie z ruchem rąk i głowy oraz przenoszeniem ciężaru ciała z nogi na nogę i balansowaniem ciałem w fazie zatrzymania.



Rys. 4.1. Model postaci zastosowany w eksperymentach

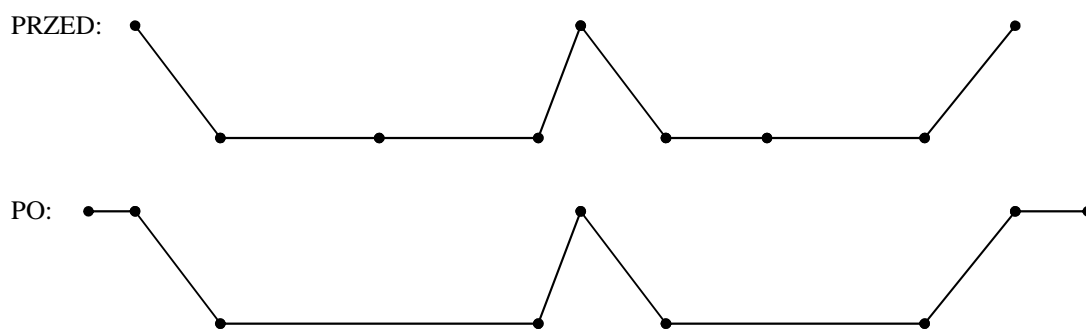
Animacje uczące przygotowane zostały według metody animacji „od pozy do pozy”, opisaney w regułach animacji. W celu przeprowadzenia testów subiektywnej oceny animacji autor rozprawy przygotował bazę póz (załącznik A), z których następnie utworzone zostały scenariusze czynności, np. poza zrelaksowana przechodzi w pozę gestu wskazującego, a później podparcia się pod boki.

Wejściowe sekwencje są wstępnie przetwarzane w celu przygotowania do dalszych etapów. Rys. 4.2 przedstawia wynik przetwarzania wstępnego złożonego z następujących kroków:

- jeśli sekwencja ruchu nie zaczyna się od fazy zatrzymania, faza ta jest wstawiana na podstawie wartości parametru ruchu w pierwszej klatce kluczowej animacji. Klatka ta jest kopiowana i wstawiana na trzy klatki przed jej oryginalnym wystąpieniem. W ten sposób powstaje faza zatrzymania trwająca 4 klatki animacji. Kolejne etapy przetwarzania wymagają, aby animacja zaczynała się od fazy zatrzymania,

- analogicznie do kroku poprzedniego, jeśli sekwencja ruchu nie kończy się fazą zatrzymania, faza ta jest dodawana poprzez skopiowanie i przesunięcie klatki ostatniej o 16 klatek wprzód,

- jeśli w animacji występują pod rząd więcej niż dwie klatki o jednakowych wartościach, czyli reprezentujące fazę zatrzymania, to pozostawiane są tylko klatki pierwsza i ostatnia z takiej fazy zatrzymania. Pozostałe są usuwane, gdyż są zbędne do reprezentacji zatrzymania. Ponadto kolejne etapy wymagają, aby faza zatrzymania zawierała wyłącznie dwie klatki.



Rys. 4.2. Wynik przygotowania sekwencji do dalszego przetwarzania

Następnie sekwencje są dzielone na segmenty rozpoczynające się od fazy zatrzymania, zawierające jedną lub więcej faz głównego ruchu, czyli ruchu przejścia między pozami, kończące się także fazą zatrzymania, co przedstawione jest na rys. 4.3. Sąsiednie segmenty nakładają się na siebie wspólnymi fazami zatrzymania. Na rysunku oznaczono miejsca występowania ośmiu póż, z których tylko 1, 2 i 8 zawierają zatrzymanie. Sekwencja podzielona na dwa segmenty, wyznaczone przez położenie trzech faz zatrzymań.

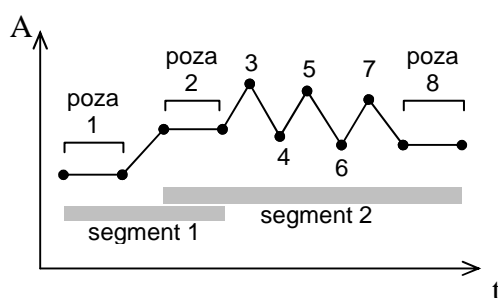
W zależności od liczby występujących w segmencie faz głównych ruchu, zależnie od tego czy jest to jedna, czy więcej faz, stosowane są dwa różne podejścia do

wzbogacania ruchu o fazy antycypacji i przerzutu, które zostały opisane dokładniej w rozdziale 4.1.2.:

- podejście pierwszego typu (typ I) dla segmentu z jedną fazą główną ruchu poprzedzoną i zakończoną fazami zatrzymania,

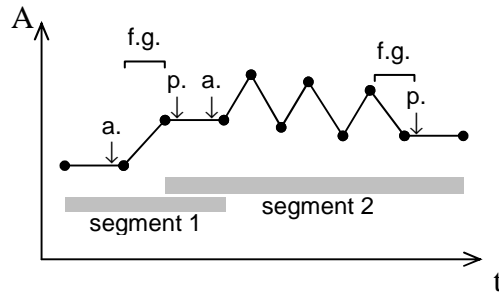
- podejście drugiego typu (typ II) dla wielu faz głównych ruchu, następujących bezpośrednio po sobie, z których pierwsza poprzedzona jest fazą zatrzymania, a ostatnia zakończona jest fazą zatrzymania.

Na rys. 4.3 segment pierwszy zawierający zatrzymania w pozach 1 i 2 i jedną zmianę wartości jest segmentem pierwszego typu. Segment drugi zaczynający się od zatrzymania w pozie 2 i kończący zatrzymaniem w pozie 8 jest segmentem typu drugiego.



Rys. 4.3. Sekwencja podzielona na dwa segmenty. Segment pierwszy typu I i segment drugi typu II. Pozy 1, 2 i 8 zawierają zatrzymanie, pozy 3-7 stanowią etap przejściowy segmentu typu II

W dalszych krokach każda faza główna ruchu, która występuje w konfiguracji typu I wzbogacona jest o fazy dodatkowe: antycypację, przerzut i ruch oscylacyjny w fazie zatrzymania, z parametrami zależnymi od parametrów fazy głównej. W przypadku segmentów typu II, klatki dodatkowe antycypacji i przerzutu wstawiane są tylko do ruchów, które bezpośrednio sąsiadują z fazami zatrzymania. Oznacza to, że faza główna ruchu, która jest poprzedzana zatrzymaniem zostanie wzbogacona o antycypację, a faza główna ruchu, po której następuje zatrzymanie zostanie wzbogacona o przerzut. Segment typu II kończony jest fazą zatrzymania wzbogaconą oscylacjami ruchu. Miejsca wstawiania faz dodatkowych do przykładowej sekwencji ruchu oznaczone są na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Fazy główne i miejsca wstawiania faz dodatkowych: f.g. – faza główna, a. – miejsce wstawienia antycypacji, p. – miejsce wstawienia przerzutu. W fazach zatrzymania dodawane są oscylacje ruchu (niezaznaczone na rysunku)

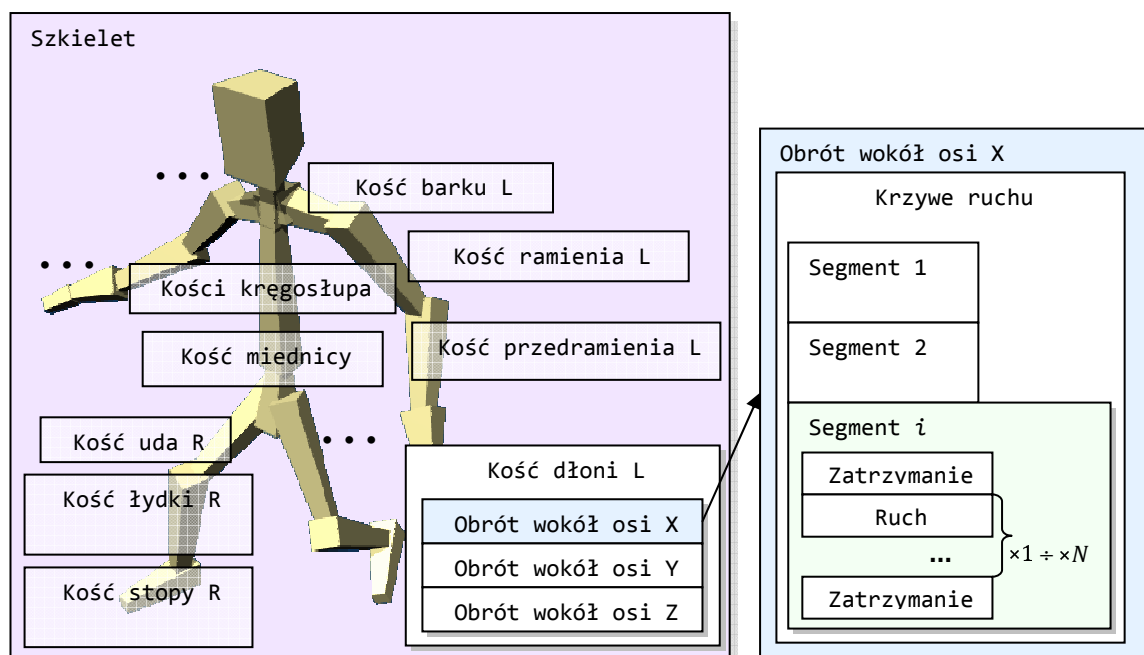
Każdy z segmentów wzbogacany jest więc o jedną klatkę kluczową antycypacji, jedną klatkę kluczową przerzutu oraz oscylacje w fazie zatrzymania, która kończy segment. Wartości i położenie klatek dodawanych do segmentu wyznaczone są na podstawie parametrów faz głównych, dlatego też konieczne jest sparametryzowanie oryginalnej animacji przed uzupełnianiem jej o nowe elementy.

Z kolei fazy główne ruchu, które następują bezpośrednio po sobie nieoddzielane fazami zatrzymania, będące częścią segmentów typu II, traktowane są jako część ruchu, która nie musi być modyfikowana przez wstawianie faz dodatkowych. Dzięki temu powstają czynności z tymi samymi pozami (fazy główne bez zmian czasowych i amplitudowych), uzupełnione o fazy dodatkowe, opisywane wektorem parametrów **B**.

Poniżej w rozdziałach 4.1.1 i 4.1.2 szczegółowo opisano kroki generowania animacji uczących.

4.1.1. Parametryzacja animacji schematycznych

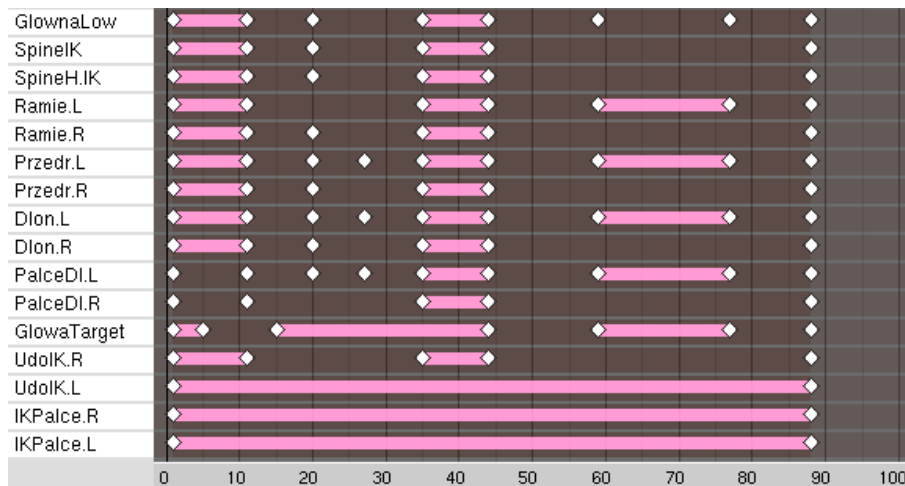
Dane o ruchu szkieletu postaci zorganizowane są w sposób hierarchiczny, co przedstawiono na rys. 4.5. Szkielet podzielony jest na kości. Do każdej z kości przypisana jest macierz danych zawierająca informacje o zmianach w czasie każdego ze stopni swobody kości (np. obrotów wokół wszystkich trzech osi). Dane obrotu lub innego przekształcenia reprezentowane są krzywymi interpolacyjnymi ruchu z klatkami kluczowymi. Te z kolei dzielone są na segmenty, które rozpoczynają się i kończą fazami zatrzymania, między którymi występuje co najmniej jedna faza główna ruchu.



Rys. 4.5. Hierarchiczny podział animacji na: kości, kanały, segmenty i fazy ruchu

Po wyznaczeniu segmentów i ich typów (typ I z jedną fazą głównego ruchu, typ II z większą liczbą faz głównego ruchu), dla każdego segmentu przeprowadzana jest parametryzacja ruchu. W trakcie parametryzacji tworzone są wektory parametrów **A**, które opisują animacje schematyczne. Sposób wyznaczania wektorów **A** opisany jest poniżej.

W pierwszym etapie animacja składa się z dowolnej liczby póz wybranych z biblioteki lub zaprojektowanych przez animatora, rozmieszczonych w czasie. Założono, że animator realizuje wskazania reżysera, który opisał czynność, jej czas trwania, kolejność póz, interakcje z innymi obiektami lub aktorami. Klatki kluczowe takiej animacji przedstawione są na rys. 4.6. Widoczne na rysunku odcinki łączące klatki kluczowe symbolizują fazy zatrzymania, w trakcie których wartości wszystkich parametrów ruchu pozostają stałe.



Rys. 4.6. Klatki animacji wejściowej na osi czasu. Kolorem pomiędzy klatkami zaznaczono fazy, w których parametry zachowują stałą wartość – nastąpiło zatrzymanie w pozie

W animacji schematycznej wyróżniane są następujące fazy:

- **faza główna, faza ruchu właściwego** – wykonanie głównej, charakterystycznej czynności, np. skok, rzut, wyprostowanie ręki, obrót głowy. Jest to przejście między dwiema sąsiednimi pozami,
- **faza zatrzymania** – po ruchu, gdy osiągnięta zostaje poza docelowa, następuje jej podtrzymanie przez zadany okres czasu, będący długością fazy zatrzymania.

Na potrzeby dalszego toku rozprawy przyjęto następujące założenia:

- sekwencja ruchu S wybranej kości szkieletu i wybranego przekształcenia⁷, podzielona jest na m segmentów S_i :

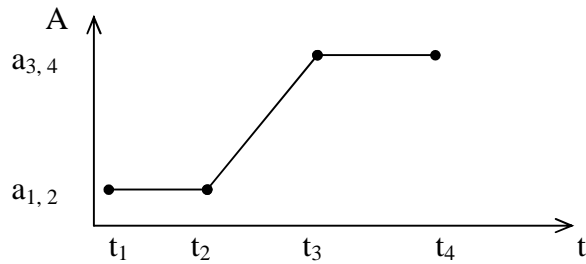
$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m\} \quad (4.1)$$

- segmenty typu I zawierają następujące dane ruchu:

$$S_i = [(t_1, a_1), (t_2, a_2), (t_3, a_3), (t_4, a_4)] \quad (4.2)$$

gdzie para (t_i, a_i) oznacza położenie i -tej klatki kluczowej segmentu w czasie i i wartość parametru ruchu w niej zapisaną. Przykładowy segment przedstawiony jest na rys. 4.7.

⁷ Dla uproszczenia zapisu nie jest podawane, której kości dotyczy ten segment, ani jakiego przekształcenia.



Rys. 4.7. Segment animacji $S_i = [(t_1, a_1), (t_2, a_2), (t_3, a_3), (t_4, a_4)]$ typu I

Na podstawie danych ruchu segmentu S_i dokonywana jest parametryzacja segmentu i wyznaczane są wartości parametrów głównej fazy ruchu (rys. 4.8):

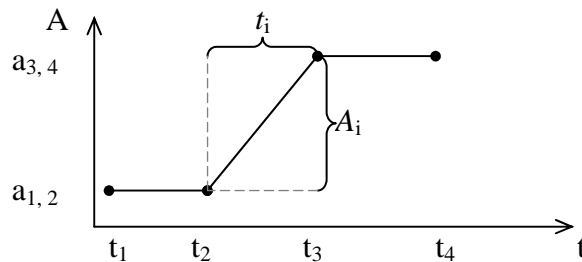
$$\mathbf{A}_i = [A_i, V_i, t_i], \quad (4.3)$$

gdzie:

$A_i = a_3 - a_2$ – zmiana wartości parametru w fazie głównej, np. amplituda obrotu,

$t_i = t_3 - t_2$ – długość fazy głównej,

$V_i = A_i / t_i$ – prędkość zmian parametru w fazie głównej.



Rys. 4.8. Sposób wyznaczania parametrów A_i, t_i w segmencie ruchu typu I

Zaproponowane parametry obliczane są dla każdego przekształcenia geometrycznego (rotacja, przesunięcie) dla każdej kości szkieletu. Są to parametry głównych faz ruchu, oznaczane wektorem \mathbf{A} . W toku wzbogacania animacji na podstawie tych parametrów wyznaczane są wartości faz antycypacji i przerzutu, które są dodawane do segmentu animacji.

Z kolei dla segmentów typu II, na potrzeby wyznaczenia antycypacji, parametryzowana jest pierwsza faza główna w segmencie podobnie, jak dla segmentów typu I, natomiast na potrzeby wyznaczenia przerzutu parametryzowana jest ostatnia faza główna w segmencie.

Segment S_i typu II zapisać można jako:

$$S_i = [(t_1, a_1), (t_2, a_2), (t_3, a_3), \dots, (t_{j-2}, a_{j-2}), (t_{j-1}, a_{j-1}), (t_j, a_j)] \quad (4.4)$$

gdzie pary:

- (t_1, a_1) – początek fazy zatrzymania,
- (t_2, a_2) – koniec fazy zatrzymania i początek pierwszej fazy głównej ruchu,
- (t_3, a_3) – koniec pierwszej fazy głównej ruchu,
- (t_{j-2}, a_{j-2}) – początek ostatniej fazy głównej ruchu,
- (t_{j-1}, a_{j-1}) – koniec ostatniej fazy głównej ruchu i początek kończącej segment fazy zatrzymania,
- (t_j, a_j) – koniec fazy zatrzymania kończącej segment.

Wektory parametrów faz głównych w segmencie typu II oznaczane są przez $A_{i \text{ Start}}$, $A_{i \text{ End}}$, czyli parametry pierwszej i ostatniej fazy głównej odpowiednio. Wyznaczane są podobnie, jak dla segmentów typu I, a mianowicie:

$$A_{i \text{ Start}} = [A_{i \text{ Start}}, V_{i \text{ Start}}, t_{i \text{ Start}}], \quad (4.5)$$

$$A_{i \text{ End}} = [A_{i \text{ End}}, V_{i \text{ End}}, t_{i \text{ End}}], \quad (4.6)$$

gdzie:

$$A_{i \text{ Start}} = a_3 - a_2$$

$$t_{i \text{ Start}} = t_3 - t_2$$

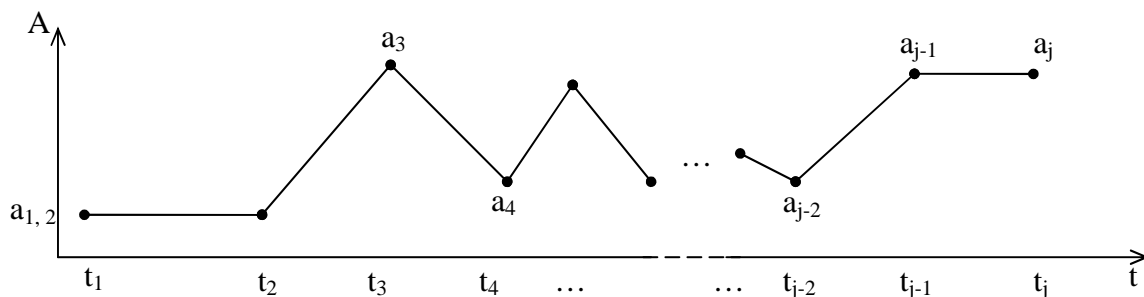
$$V_{i \text{ Start}} = A_{i \text{ Start}} / t_{i \text{ Start}}$$

$$A_{i \text{ End}} = a_{j-1} - a_{j-2}$$

$$t_{i \text{ End}} = t_{j-1} - t_{j-2}$$

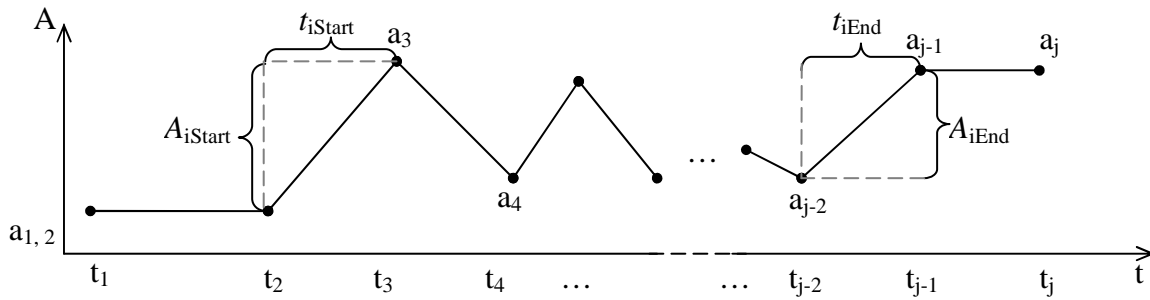
$$V_{i \text{ End}} = A_{i \text{ End}} / t_{i \text{ End}}$$

Na rys. 4.9 i 4.10 pokazano odpowiednio segment typu II opisany równaniem (4.4) i sposób wyznaczania parametrów $A_{i \text{ Start}}$, $t_{i \text{ Start}}$, $A_{i \text{ End}}$, $t_{i \text{ End}}$ faz głównych.



Rys. 4.9. Segment animacji typu II:

$$S_i = [(t_1, a_1), (t_2, a_2), (t_3, a_3), \dots, (t_{j-2}, a_{j-2}), (t_{j-1}, a_{j-1}), (t_j, a_j)]$$



Rys. 4.10. Parametry faz głównych: $A_{i\text{ Start}}$, $t_{i\text{ Start}}$, $A_{i\text{ End}}$, $t_{i\text{ End}}$ w segmencie ruchu typu II

Parametry w wektorze $\mathbf{A}_i = \{A_i, V_i, t_i\}$ w praktyce przyjmują ograniczone wartości:

- $A_i \in \langle 0; \pi \rangle$ (maksymalnie π rad, gdy A_i oznacza amplitudę obrotu⁸ wokół osi X, Y lub Z). Ograniczenie wartości tego parametru wynika głównie z biomechaniki ludzkiego układu motorycznego, którego większość stawów pozwala na ograniczony obrót 180° , czyli π rad. Natomiast animacje obrotów o kąt większy, np. 360° obrót ręki w stawie barkowym, realizowane są w kilku odcinkach, z wykorzystaniem klatek kluczowych, pomiędzy którymi znajdują się zmiany o kąt 180° lub mniejszy.

- $t_i \in \langle 0; 50 \rangle$ (maksymalnie 50 klatek, czyli ponad 2 sekundy w animacji z 24 klatkami na sekundę). Ograniczenie to wynika z praktyki animacji, mianowicie ruch przejścia między pozami trwający ponad 2 sekundy jest nienaturalnie długi. W animacji postaci tak długi ruch w trakcie pojedynczej fazy nie występuje. Właściwie tylko animacje zjawisk fizycznych, np. spadania, lotu, mogą posiadać dłuższe fazy główne ruchu.

- $V_i \in \langle 0; 0,4 \rangle$ (maksymalnie 0,4 rad na klatkę lub 0,4 jednostki przesunięcia na klatkę). Większe wartości prędkości zwykle w animacji nie występują, np. obrót z prędkością 0,4 rad/klatkę przy 24 klatkach na sekundę daje półtora obrotu wokół własnej osi w ciągu sekundy filmu, a tak szybki ruch jest już postrzegany jako nieciągły, pojawia się efekt strobowania, czyli percepcji osobnych obrazów, nie składających się w ciągły ruch. Niepożądane strobowanie występuje także w przypadku szybkich przesunięć animowanego obiektu.

⁸ A_i w niektórych przypadkach może również oznaczać amplitudę przesunięcia, jednakże dla szkieletu postaci wykorzystywanego w badaniach przesunięcia w zasadzie nie występują – animacja odbywa się na zasadzie kinematyki prostej, w której przesunięciom podlega tylko kość główna hierarchii kości, miednica, pozostałe zaś są tylko obracane. Opisywane w rozprawie postępowanie jest jednakże poprawne także dla translacji i skalowania, choć operacje te nie są w niniejszej rozprawie przywoływane.

Jeśli parametry wejściowe przyjmą wartości większe od założonych powyżej, to zostają one w systemie wnioskowania zastąpione przyjętymi wartościami maksymalnymi. Wyznaczane w etapach kolejnych funkcje przynależności zaprojektowane będą dla tychże zakresów zmienności parametrów wektora A .

Na etapie wnioskowania na podstawie parametrów wektorów A_i dla segmentów typu I i II wyznaczane są parametry faz dodatkowych: antycypacji, przerzutu i zatrzymania, które wstawiane są następnie do animacji wynikowej.

4.1.2. Wzbogacanie animacji o nowe fazy

Poniżej przedstawiono sposób wprowadzania faz dodatkowych do segmentów animacji. Do animacji schematycznych opisanych wyłącznie fazami głównymi, czyli najważniejszymi poza czynności wstawiane są następujące fazy dodatkowe:

- **faza antycypacji** – rozumiana zgodnie z regułami animacji,
- **faza przerzutu** – rozumiana zgodnie z regułami animacji.

Ponadto w **fazie zatrzymania** wprowadza się dodatkowe klatki kluczowe, zgodnie z regułą zatrzymania (ang. *moving hold*), która odnosi się do tego, że ruch nie powinien całkowicie ustawać. Modyfikacja ta polega na wprowadzeniu losowych wychyleń o małej amplitudzie w miejscach, gdzie w animacji schematycznej występowało całkowite zatrzymanie.

Dwie pierwsze fazy opisane są parametrami: czas trwania, amplituda, prędkość; natomiast trzecia: czas trwania, średnia względna amplituda wychyleń, średni okres wychyleń. Opis parametrów przedstawiono poniżej:

- **Czas trwania** – odstęp czasowy między klatkami kluczowymi uznawanymi za początek i koniec fazy; dt_a – fazy antycypacji, dt_o – fazy przerzutu, dt_h – fazy zatrzymania;
- **Amplituda** – różnica wartości między klatkami uznawanymi za początek i koniec fazy; dA_a – fazy antycypacji, dA_o – fazy przerzutu;
- **Prędkość** – stosunek amplitudy do czasu trwania; V_a – fazy antycypacji, V_o – fazy przerzutu;
- **Średnia względna amplituda wychyleń** – średnia z amplitud wychyleń występujących w fazie zatrzymania odniesiona do amplitudy przerzutu dA_o występującego

bezpośrednio przez fazą zatrzymania⁹ – A_h . Generowane są wychylenia o amplitudach dobieranych losowo zgodnie z **rozkładem normalnym** o przyjętej względnej średniej A_h i odchyleniu standardowym równym A_{dh} . Wartość względnej amplitudy wybrana z rozkładu losowego oznaczana jest dA_h . Rzeczywista amplituda wyliczana jest z iloczynu $dA_o \cdot dA_h$.

- **Średni okres wychyleń** – T_h . Wartość ta jest przeliczana na liczbę wychyleń pojawiających się w fazie zatrzymania. Dla długich faz zatrzymania występuje kilka wychyleń, których okresy średnio równe są T_h , a dobierane są zgodnie z rozkładem normalnym o odchyleniu standardowym T_{dh} . Ponadto suma czasów trwania wychyleń nie może przekroczyć czasu trwania fazy zatrzymania dt_h . Wartość długości trwania pojedynczego wychylenia wybrana z rozkładu losowego oznaczana jest dT_h .

W celu wzbogacenia animacji o wszystkie założone fazy konieczne jest wyliczenie dla każdego z wydzielonych segmentów ruchu S_i wektorów parametrów faz dodatkowych \mathbf{B}_i :

$$\mathbf{B}_i = [dt_a, dA_a, dt_o, dA_o, T_h, T_{dh}, A_h, A_{dh}] \quad (4.7)$$

Parametry te wykorzystywane są do wyznaczania przebiegu animacji w segmencie wynikowym S'_i w sposób następujący:

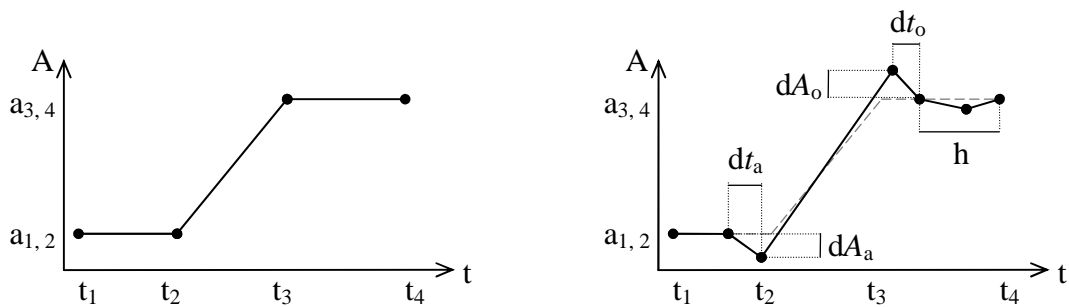
– z założonych rozkładów normalnych losowane jest N par parametrów wychyleń (dT_{hi}, dA_{hi}) , (długość trwania i -tego wychylenia, amplituda względna i -tego wychylenia), dla $i=1 \dots N$,

– dla segmentów typu I tworzony jest nowy opis segmentu animacji:

$$S'_i = [(t_1, a_1), (t_2 - dt_a, a_2), (t_2, a_2 + dA_a), (t_3, a_3 + dA_o), (t_3 + dt_o, a_3), (t_3 + dt_o + dT_{h1}, a_3 + dA_o \cdot dA_{h1}), (t_3 + dt_o + dT_{h2}, a_3 + dA_o \cdot dA_{h2}), \dots, (t_4, a_4)] \quad (4.8)$$

Uzyskany w powyższy sposób wzbogacony segment animacji typu I przedstawiony jest na rys. 4.11.

⁹ Założono istnienie zależności między przzerwem a wychyleniami następującymi po nim w fazie zatrzymania. Uzasadnienie znajduje się w dalszej części, w opisie założeń dotyczących fazy zatrzymania.



Rys. 4.11. Segment typu I po uzupełnieniu o fazy dodatkowe, „h” oznacza miejsce występowania oscylacji w fazie zatrzymania (ang. *hold*)

W analogiczny sposób następuje wzbogacenie segmentów typu II o fazy opisywane elementami wektora \mathbf{B}_i :

$$S'_i = [(t_1, a_1), (t_2 - dt_a, a_2), (t_2, a_2 + dA_a), \dots, (t_{n-1}, a_{n-1} + dA_o), (t_{n-1} + dt_o, a_{n-1}), (t_{n-1} + dt_o + dT_{h1}, a_{n-1} + dA_o \cdot dA_{h1}), (t_{n-1} + dt_o + dT_{h2}, a_{n-1} + dA_o \cdot dA_{h2}) \dots, (t_n, a_n)] \quad (4.9)$$

W zależności od wartości parametrów wektorów \mathbf{B} , uzyskiwane animacje wzbogacone będą cechowały się zróżnicowanym wyrazem subiektywnym, stylem, jakością ruchu. Dalszym celem rozprawy jest ocena wpływu wartości wektorów \mathbf{B} parametrów faz dodatkowych na subiektywny odbiór treści animacji przez widzów.

4.1.3. Założenia dotyczące zależności między parametrami animacji

Zadanie oceny wszystkich możliwych do wygenerowania animacji jest trudne w realizacji. W związku z tym wprowadzone zostają założenia, mające na celu ograniczenie wymiarowości przestrzeni parametrów i zakresów ich zmienności do subiektywnie akceptowalnych zakresów. Uzasadnienie w ten sposób sformułowanych założeń przedstawione jest poniżej.

W celu oszacowania zakresów zmienności wartości parametrów animacji, subiektywnie sprawdzono, jakie zakresy wartości parametrów faz dodatkowych gwarantują uzyskanie dobrej jakości subiektywnej animacji. Wykonane zostały animacje z dwiema pozami z dodanymi fazami dodatkowymi o różnych wartościach parametrów wektorów \mathbf{B}_i (4.7). Kilkukrotnie dokonywano zmiany wartości pojedynczych parametrów i oceniano subiektywnie jakość wynikowych animacji. W ocenie brało udział 5 osób: autor rozprawy i 4 osoby nie związane z tematyką animacji. Ustalono progowe wartości

parametrów, powyżej których jakość animacji ulegała widocznemu pogorszeniu według co najmniej trzech osób oceniających. Za ostateczną wartość progową przyjmowano wartość parametru zwiększoną dodatkowo o 15%. Wyznaczone w ten sposób zakresy zmienności dla parametrów wektora \mathbf{B}_i są następujące:

$$\begin{aligned}
 dA_a &\in \langle 0; 0,265\pi \rangle \\
 dA_o &\in \langle 0; 0,265\pi \rangle \\
 dt_a &\in \langle 0, 10 \rangle \\
 dt_o &\in \langle 0, 10 \rangle \\
 T_h &\in \langle 6; 10 \rangle \\
 A_h &\in \langle 0,2; 1,0 \rangle
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Założono, że dla ustalonego *stylu* i *płynności* animacji, zmiana wartości parametrów \mathbf{A}_i segmentu animacji musi pociągać za sobą zmianę wartości w wektorze parametrów \mathbf{B}_i , aby subiektywne odczucia *stylu* i *płynności* się nie zmieniły. Dla oszacowanych powyżej zakresów zmienności (4.10) prowadzone jest dalsze postępowanie, mające na celu sformułowanie założeń o współzależnościach między powyższymi parametrami i w wyniku doprowadzenie do zmniejszenia wymiarowości przestrzeni parametrów.

Założenia dotyczące antycypacji i przerzutu

Zgodnie z regułami animacji (rozdział 2.4) założono, że amplitudy antycypacji i przerzutu (dA_a, dA_o) powinny być proporcjonalne do prędkości ruchu V_i w fazie głównej segmentu animacji. Widz musi być przygotowany na szybką animację fazy głównej, dlatego też jest ona zaakcentowana wcześniejszym dużym wychyleniem – antycypacją o dużej amplitudzie. Zatrzymanie po szybkim ruchu nie może być natychmiastowe, stąd też oczekiwana duża amplituda przerzutu. Jednocześnie mała amplituda fazy głównej ruchu implikuje brak konieczności dużej antycypacji tej fazy, dlatego też przyjęto, iż zależność ma charakter jakościowy multiplikatywny:

$$dA_a, dA_o \propto V_i \cdot A_i \tag{4.11}$$

czyli amplitudy antycypacji i przerzutu są proporcjonalne¹⁰ do prędkości i amplitudy fazy głównej ruchu.

¹⁰ Przyjęto, że znak \propto oznacza proporcjonalność, w odróżnieniu do symbolu nieskończoności ∞

Podobnie czasy trwania faz: jeżeli faza główna ruchu jest długa, a jednocześnie ma dużą prędkość, to antycypacja i przerzut powinny być długie:

$$dt_a, dt_o \propto V_i \cdot t_i \quad (4.12)$$

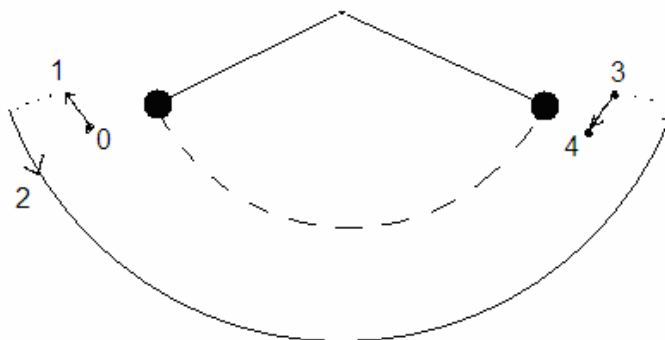
Iloczyn $V_i \cdot t_i$ w dalszych rozważaniach nie jest zastępowany wartością amplitudy A_i , ponieważ zapis powyższy, tj. proporcjonalność czasów do prędkości i do czasu, wydaje się być bardziej intuicyjny dla animatora.

Powyższe założenia (4.11) i (4.12) pozwalają po oszacowaniu współczynników proporcjonalności zawęzić zakresy zmienności parametrów: dt_a , dt_o , dA_a , dA_o do wycinka czterowymiarowej przestrzeni, którego granice zależne są od wartości V_i , t_i i A_i . Zakłada się, że poszukiwane współczynniki proporcjonalności są zależne od *płynności* i założonego *stylu* animacji.

Kolejne przyjęte założenie dotyczące wektora parametrów \mathbf{B} , czyli fazy antycypacji i przerzutu mówi, iż ruch zwykle ma charakter wahadłowy, co należy rozumieć w następujący sposób: antycypacja jest wychyleniem ciała z pozycji spoczynkowej, pozycji rozumianej jako rozpoczęcie czynności, przerzut jest wychyleniem ciała poza pozycję spoczynkową, tj. pozycję zakończenia czynności. Schematycznie jest to przedstawione na rys. 4.12. Energia wkładana we wprowadzenie ciała w ruch ujawnia się wizualnie jako antycypacja. Jest ona wytracana w fazie przerzutu, jeżeli pominiemy opory ośrodka i gdy nie dochodzi do kolizji obiektu z innym. W związku z tym czasy i amplitudy rozpatrywanych wychyleń można przyrównać do siebie, uzyskując w ten sposób $dt_o \approx dt_a$ oraz $dA_o \approx dA_a$. W dalszej części parametry wektora \mathbf{B} są wyznaczone i modyfikowane zgodnie z tym założeniem, czyli proces decyzyjny dotyczy parametrów dt i dA , natomiast później następują podstawienia:

$$\begin{aligned} dt_o &= dt_a = dt \\ dA_a &= dA_o = dA \end{aligned} \quad (4.13)$$

W ten sposób uzyskuje się uproszczenie przeszukiwania parametrów z wycinka 4- do wycinka 2-wymiarowej przestrzeni, którego granice zależne są od wartości V_i , t_i i A_i aktualnie przetwarzanego segmentu animacji schematycznej.



Rys. 4.12. Wahadłowy charakter ruchu. 0 – poza początkowa, 1 – antycypacja, 2 – faza główna ruchu, 3 – przerzut, 4 – poza końcowa ruchu

Założenia dotyczące współczynników proporcjonalności

Do zależności opisujących proporcjonalność między wybranymi parametrami faz głównych a parametrami faz dodatkowych (4.11) i (4.12) wprowadzono współczynniki proporcjonalności, uzyskując:

$$dA = V_i \cdot A_i \cdot \text{alfa} \quad (4.14)$$

$$dt = V_i \cdot t_i \cdot \text{beta} \quad (4.15)$$

Współczynnik *alfa* nazywany będzie w dalszej części współczynnikiem amplitudowym, *beta* zaś czasowym. Współczynniki te decydują o zmianie wydźwięku subiektywnego animacji, gdyż wpływają na wartości parametrów faz dodatkowych. Sama czynność nie zmienia się, gdyż opisana jest parametrami V_i , A_i , t_i , które nie są modyfikowane w procesie wzbogacania animacji.

Rozważany w rozprawie problem poszukiwania zależności między parametrami wektora \mathbf{A}_i , wektora \mathbf{B}_i i subiektywnymi cechami animacji wzbogaconej zostaje zatem sprowadzony do problemu zależności między współczynnikami *alfa* i *beta* a subiektywnymi ocenami wynikowej animacji.

Możliwe jest określenie dopuszczalnych zakresów zmienności parametrów *alfa* i *beta*, które zapewnią, że parametry wektora \mathbf{B}_i przyjmować będą wartości z przedziałów gwarantujących subiektywną poprawność animacji, wyznaczonych wcześniej (4.10). Jednakże na podstawie zależności (4.14) i (4.15) nie da się wyznaczyć zakresów dopuszczalnych wartości parametrów *alfa* i *beta*, gdyż po przekształceniach uzyskuje się:

$$\begin{aligned}
\alpha_{\min} &= dA_{\min}/(V_{i\max} \cdot A_{i\max})=0, \\
\alpha_{\max} &= dA_{\max}/(V_{i\min} \cdot A_{i\min})=+\infty, \\
\beta_{\min} &= dt_{\min}/(V_{i\max} \cdot t_{i\max})=0, \\
\beta_{\max} &= dt_{\max}/(V_{i\min} \cdot t_{i\min})=+\infty.
\end{aligned}
\tag{4.16}$$

Na potrzeby praktycznej implementacji konieczne jest jednakże ograniczenie tych zakresów zmienności. Z wykorzystaniem zależności (4.14) i (4.15) wygenerowano serię próbnych animacji dla współczynników α i β z zakresów:

$$\begin{aligned}
\alpha &\in (0; 2), \\
\beta &\in (0; 10).
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

Wykorzystanie współczynników o wartościach z tych zakresów prowadzi do uzyskiwania faz o parametrach w przedziałach:

$$\begin{aligned}
dA &\in \langle 0; 2,5 \rangle \\
dt &\in \langle 0; 200 \rangle,
\end{aligned}
\tag{4.18}$$

co wyliczone zostało z zależności (4.14) i (4.15) i znajomości zakresów zmienności parametrów faz głównych: $A_i \in \langle 0; \pi \rangle$, $t_i \in \langle 0; 50 \rangle$, $V_i \in \langle 0; 0,4 \rangle$.

Wartości przedstawione w zależności (4.18) przekraczają wyznaczone wcześniej zakresy akceptowalne subiektywnie $dA_{\max}=0,265\pi$ i $dt_{\max}=10$ (4.10). Odpowiednie ograniczenie realizowane jest poprzez wprowadzenie funkcji nasycenia o charakterze $tgh(x)$ (tangens hiperboliczny) do zależności (4.14) i (4.15), co daje równania o następującej postaci:

$$dA' = 0,265\pi \cdot tgh(V_i \cdot A_i \cdot \alpha / 0,22\pi) \tag{4.19}$$

$$dt' = 10 \cdot tgh(V_i \cdot t_i \cdot \beta / 0,125) \tag{4.20}$$

W dalszej części dla uproszczenia zapisu wykorzystywane będzie:

$$dA = f(V_i \cdot A_i \cdot \alpha) \tag{4.21}$$

$$dt = g(V_i \cdot t_i \cdot \beta) \tag{4.22}$$

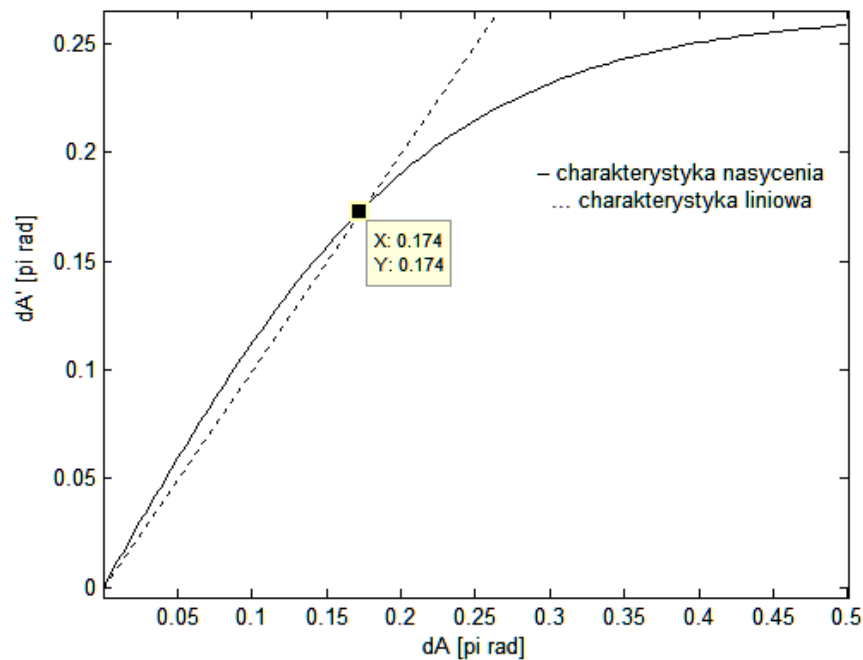
gdzie:

$$f(x) = 0,265\pi \cdot tgh(x / 0,22\pi) \tag{4.23}$$

$$g(x) = 10 \cdot tgh(x / 0,125) \tag{4.24}$$

Parametry $0,265\pi$ i 10 w równaniach (4.19) i (4.20) wynikają ze zbadanych wcześniej maksymalnych, subiektywnie akceptowalnych poziomów, jakie przyjąć mogą amplituda dA i czas dt (4.10). Parametry $0,22\pi$ i $0,125$ tych równań wynikają z kolei z

subiektywnego oszacowania maksymalnych wartości dA i dt , które, przy wykorzystaniu niezmodyfikowanych zależności (4.14) i (4.15), skutkują animacją o dostatecznie dobrej jakości. Od $x=0$ do $x=0.174\pi$ funkcja $f(x)$ jest w przybliżeniu liniowa, potem zmierza asymptotycznie do wartości $0,265\pi$ rad (rys. 4.13). Podobnie funkcja $g(x)$, która do $x=7$ jest w przybliżeniu liniowa, a następnie asymptotycznie zmierza do 10.



Rys. 4.13. Charakterystyka nasycenia dA

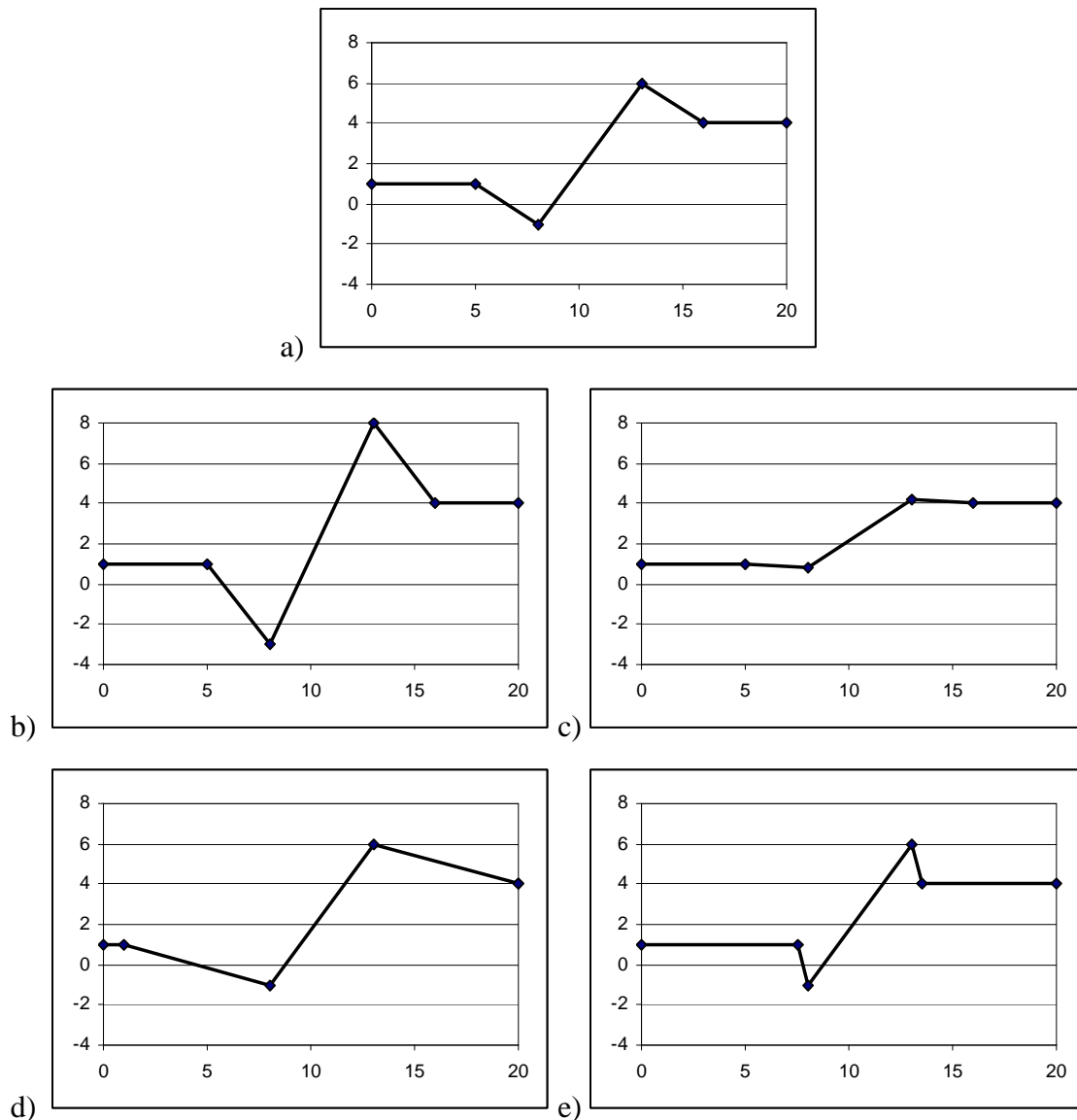
Dzięki powyższemu zabiegowi zapewniony jest warunek $dA_{\max}=0,265\pi$ i $dt_{\max}=10$. Jednakże uzyskane animacje próbne wygenerowane dla przyjętych $\alpha \in (0; 2)$, $\beta \in (0; 10)$, poddane subiektywnej ocenie, wykazały konieczność dodatkowego ograniczenia od góry i od dołu zakresów zmienności współczynników czasowych i amplitudowych. Duża wartość α skutkowała bowiem ruchem zbyt przejaskrawionym, amplitudy uzyskiwanych antycypacji i przerzutów były rażąco zbyt duże w stosunku do amplitud i prędkości faz głównych segmentów ruchu. Przykład segmentu ruchu o zbyt dużych amplitudach antycypacji i przerzutu względem amplitudy ruchu przedstawiony jest na rys. 4.14b. Obniżenie wartości α do 1,3 dało ostatecznie animacje o dobrej jakości subiektywnej i o ruchu przejaskrawionym w sposób komiksowy. Ponadto zauważono, iż zbyt mała wartość α daje ruch o subiektywnie niskiej jakości, zbliżony do animacji schematycznej nie wzbogacanej dodatkowymi fazami ze zbyt małymi, właściwie niedostrzegalnymi fazami antycypacji, czego przykład przedstawiono na rys. 4.14c. W związku z tym, minimalną

wartość *alfa* ustalono na 0,3, co pozwala generować animacje o niewielkich amplitudach antycypacji i przerzutu i wyraźnym, naturalnym nieprzejaskrawionym stylu ruchu.

Duża wartość parametru czasowego *beta* powodowała z kolei, iż uzyskiwane animacje cechowały się subiektywnie zbyt długimi czasami antycypacji i przerzutu w porównaniu do czasów i prędkości faz głównych ruchu. Ruch był płynny, jednakże zbyt „rozciągnięty” w czasie, a fazy zatrzymania były za bardzo skracane przez wstawianie klatek antycypacji i przerzutu. Stawały się przez to za krótkie i mniej czytelne, co można zaobserwować w przetworzonym segmencie animacji przedstawionym na rys. 4.14d. Obniżenie wartości *beta* do 7 pozwoliło uzyskać animacje płynne o długościach przerzutu i antycypacji dobrze dopasowanych do faz głównych ruchu. Zbyt małe *beta* daje z kolei animacje o krótkich fazach antycypacji i przerzutu, co skutkuje tym, że, gdy amplitudy tych faz są duże, pojawia się skokowość ruchu widoczna na rys. 4.14e, a gdy amplitudy są małe ruch bardzo upodabnia się do animacji schematycznych, niewzbogacanych dodatkowymi fazami. W związku z tym, minimalna wartość *beta* została przyjęta jako 1. Dla takiej wartości animacje o małym *alfa* są subiektywnie naturalne i płynne, zaś dla *alfa* dużego stają się skokowe.

W trakcie powyższej procedury subiektywnej oceny zmian współczynników amplitudowych i czasowych *alfa* i *beta*, ujawniony został zakładany wcześniej ich duży wpływ na subiektywnie postrzegane cechy płynności (*płynność* i *skokowość*) i stylu (*naturalność* i *karykaturalność*) animacji wynikowych. Ilościowo zależności te badane są na etapie generowania reguł dla systemu wnioskowania, co opisane jest w rozdziale 4.3. Potwierdzono, iż przyjęte współczynniki amplitudowe i czasowe decydują o subiektywnym wydzwieku animacji i mogą posłużyć do generowania animacji o zmiennych cechach naturalności i płynności ruchu.

Zakresy $alfa \in \langle 0,3; 1,3 \rangle$ i $beta \in \langle 1; 7 \rangle$ zostają skwantowane odpowiednio do 11 i 4 wartości w interwałach 0,1 i 2,0 odpowiednio. Łącznie możliwych jest $11 \cdot 4 = 44$ kombinacji parametrów *alfa*, *beta* i tyle animacji jest generowanych na etapie oceny subiektywnej (rozdział 4.3.1).



Rys. 4.14. Antycypacje i przerzuty dla za małych i za dużych α , β :
 a) wersja referencyjna, b) za duże α , c) za małe α skutkuje zbyt małymi amplitudami fazy, d) zbyt duże β wydłuża zbytnio fazy dodatkowe, e) za małe β

Założenia dotyczące fazy zatrzymania

Możliwe jest dalsze uproszczenie procesu przeszukiwania przestrzeni parametrów. Założono, iż wychylenia występujące w fazie zatrzymania powinny być logiczną kontynuacją fazy przerzutu, występującej bezpośrednio przed zatrzymaniem. Wówczas duży przerzut skutkuje dużymi średnimi wychyleniami w zatrzymaniu. Oscylacje te mają być subiektywnie wyraźniejsze, jeśli uzyskiwana animacja ma charakteryzować się subiektywnym *przejaskrawionym* i *komiksowym* charakterem, mniejsze, jeśli oczekiwana jest animacja *realistyczna* i *naturalna*. Losowość oscylacji zwiększy realizm ruchu,

ponieważ jakiegokolwiek deterministyczne wygasanie lub okresowość są zauważalne i wpływają negatywnie na realizm ruchu.

Pomiędzy dwie klatki kluczowe, reprezentujące zatrzymanie ruchu, wstawiane są klatki dodatkowe, które odpowiadają za drobne ruchy, jakie w sposób nieświadomy zawsze wykonuje ciało. Faza ta opisywana jest parametrami:

- **czas trwania** – t_h ,
- **średnia względna amplituda oscylacji** – A_h , z odchyleniem standardowym A_{dh}
- **średni okres wychyleń** – T_h , z odchyleniem standardowym T_{dh} .

Bezwzględne wartości, które mają być wstawione w nowych klatkach kluczowych fazy zatrzymania obliczane są jako iloczyn:

$$dA_h = dA_o \cdot dA_h, \quad (4.25)$$

gdzie: dA_o – amplituda przerzutu,

dA_h – wartość wylosowana z rozkładu normalnego o średniej A_h i odchyleniu A_{dh} .

Liczba wychyleń, które mają nastąpić w trakcie fazy zatrzymania obliczana jest jako:

$$N = \text{floor}(T_h / dt_h), \quad (4.26)$$

gdzie: floor() oznacza zaokrąglanie liczby w dół do wartości całkowitej.

Następnie losowo wybierane jest N wartości par dA_{hi} i dT_{hi} (amplituda względna i czas trwania i -tego wychylenia, $i=1, \dots, N$, wybierane z rozkładu normalnego), a każde dT_{hi} jest normalizowane do wartości $dT_{hi \text{ norm}} = dT_{hi} \cdot \text{norm}$ stałym współczynnikiem $\text{norm} = t_h / \sum_i dT_{hi}$ tak, aby $\sum_i dT_{hi \text{ norm}}$ równa była czasowi trwania fazy zatrzymania t_h . Dzięki temu, w fazie zatrzymania, występuje N losowych oscylacji, a łączny czas trwania fazy zatrzymania nie zmienia się.

W pierwszym przeprowadzonym oszacowaniu uzyskano następujące, subiektywnie akceptowalne, zakresy zmienności parametrów fazy zatrzymania:

$$\begin{aligned} A_h &\in \langle 0,2; 1,0 \rangle, \\ A_{dh} &= 0,25, \\ T_h &\in \langle 6; 10 \rangle, \\ T_{dh} &= 2. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Wartość $A_h=1$ skutkuje średnią amplitudą oscylacji równą amplitudzie przerzutu, co wynika z zależności (4.25), natomiast $A_h=0$ skutkuje oscylacjami o średniej równej 0, dlatego też wartość 0 nie należy do dziedziny, a minimum A_h ustalone zostało na 0,2. Taka

wartość minimalna skutkuje występowaniem najmniejszych zauważalnych oscylacji, dających subiektywnie wrażenie poprawy jakości ruchu w fazie zatrzymania i brak „zamrożenia” postaci w jednej pozycji.

Kolejne wstępne eksperymenty percepcji jakości ruchu w fazie zatrzymania, przeprowadzone na pięcioosobowej grupie uczestników, pozwoliły ostatecznie wybrać za optymalne następujące wartości:

$$\begin{aligned} A_h &= 0,77, \\ A_{dh} &= 0,25, \\ t_h &= 8, \\ t_{dh} &= 2. \end{aligned} \tag{4.28}$$

Wartości te wykorzystywane są w procesie automatycznego generowania animacji testowych.

Parametry klitek wstawianych do fazy zatrzymania są niedeterministyczne, stąd też zachodzi konieczność obliczenia ich poza systemem wnioskowania rozmytego.

4.2. Budowa systemu wnioskowania rozmytego

Zadaniem systemu wnioskowania rozmytego jest wyznaczenie wartości wektora parametrów \mathbf{B}_i dla każdego segmentu animacji S_i , na podstawie parametrów głównej fazy ruchu segmentu, czyli wektora \mathbf{A}_i . Zakłada się, iż możliwe jest wygenerowanie wielu zestawów parametrów \mathbf{B}_i , które pozwalają w połączeniu z parametrami \mathbf{A}_i tworzyć nowe wersje animacji różniące się wydziwieniem subiektywnym, oceną *płynności* animacji przez widzów lub *stylem* animacji (naturalna, przejaskrawiona, komiksowa, pośrednia).

Postawione zadania określają wymaganą strukturę systemu wnioskowania. Parametrami wejściowymi systemu są wszystkie parametry wektora \mathbf{A}_i pojedynczego segmentu animacji, tj. A_i , t_i , V_i oraz pożądane parametry opisowe animacji wynikowej $\mathbf{J} = \{\text{styl}, \text{płynność}\}$. Parametry wyjściowe stanowią wybrane elementy wektora $\mathbf{B}_i = \{dt, dA\}$, wymagane do wyznaczenia faz dodatkowych wzbogacających animację zgodnie z wcześniejszym założeniem: $dt_o = dt_a = dt$, $dA_o = dA_a = dA$ (4.13). Losowe parametry fazy zatrzymania (dA_h , dT_h) wyznaczane są poza systemem wnioskowania, w oparciu o uzyskaną w wyniku wnioskowania rozmytego amplitudę przerzutu dA_o (rozdział 4.1.3).

System wnioskowania ma w związku z powyższym pięć wejść i dwa wyjścia:

$$\mathbf{X}=[A_i, t_i, V_i, styl, płynność] \quad (4.29)$$

$$\mathbf{Y}=[dt, dA]$$

We wnioskowaniu rozmytym operacja AND jest operacją minimum, a OR maksimum, natomiast wyostrzenie realizowane jest poprzez wyznaczenie środka ciężkości obszaru. System wnioskowania składa się z dwóch elementów wnioskujących, każdy posiada zestaw reguł, opisujący bądź zależność dt od zmiennych wejściowych, bądź zależność dA od zmiennych wejściowych. Zestawy reguł mają postać:

JEŻELI $A_i=...$ AND $t_i=...$ AND $V_i=...$ AND $styl=...$ AND $płynność=...$ TO $dt=...$

oraz:

JEŻELI $A_i=...$ AND $t_i=...$ AND $V_i=...$ AND $styl=...$ AND $płynność=...$ TO $dA=...$

Obie części wykorzystują te same wejścia i te same funkcje przynależności parametrów wejściowych. Na wyjściu jednego otrzymywana jest ostra wartość parametru dt , na wyjściu drugiego ostra wartość dA .

Wyznaczanie funkcji przynależności

Występujące zmienne lingwistyczne są określone subiektywnie w postaci funkcji przynależności tak, aby reguły opisywały możliwie najlepiej zależności między subiektywnymi odczuciami czasu, amplitudy, prędkości ruchu i jego stylu, płynności, jakości.

Wyznaczanie funkcji przynależności dla wejściowych zmiennych lingwistycznych systemu wnioskowania $\mathbf{A}_i=[A_i, t_i, V_i]$ odbyło się poprzez przetwarzanie wyników testu subiektywnego, w którym grupa 10 osób oceniających miała za zadanie obserwować różne wersje prostej animacji i przypisać opis słowny do poszczególnych parametrów:

- dla **amplitudy** ruchu obrotowego ramienia prostej postaci 3D określenia: *mała, średnia, duża, bardzo duża*,
- dla **prędkości** ruchu obrotowego ramienia tej samej postaci określenia: *mała, średnia, duża, bardzo duża*,
- dla **czasu** trwania animacji ruchu ramienia określenia: *krótki, średni, długi, bardzo długi*.

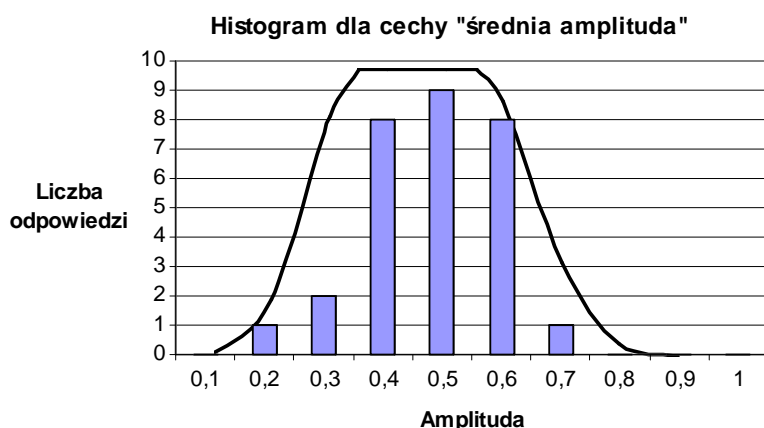
Test podzielony był na trzy sesje, w każdej z nich oceniany był tylko jeden parametr:

- pierwsza sesja zawierała 10 sekwencji ruchu obrotowego ramienia postaci 3D charakteryzujących się amplitudami ruchu $A=\{0,1; 0,2; \dots; 1,0\} [\pi rad]$,

- druga sesja zawierała 9 sekwencji ruchu obrotowego ramienia postaci 3D charakteryzujących się prędkością kątową ruchu $V=\{0,01; 0,05; 0,1; 0,15; \dots; 0,4\}$ [π rad/klatka],
- trzecia sesja zawierała 10 sekwencji ruchu obrotowego ramienia postaci 3D charakteryzujących się czasem trwania ruchu $t=\{5, 10, 15, \dots, 50\}$ [klatka].

Każda sekwencja została zaprezentowana dokładnie raz, w losowej kolejności innej dla każdego widza.

Do wyznaczenia funkcji przynależności autor zaproponował metodykę opisaną poniżej. Wyniki oceny subiektywnej przedstawiane są w postaci histogramu, w którym prezentowane jest, ile razy parametrowi o danej wartości przydzielono daną etykietę słowną. Na osi poziomej przedstawiane są przedziały wartości parametru, na osi pionowej zaś liczba wystąpień odpowiedzi *cecha=x* (np. *amplituda=średnia*). Histogram taki tworzony jest dla każdej wartości lingwistycznej każdego parametru. Następnie histogram dzielony jest na trzy przedziały. Przedział pierwszy rozpoczyna się od minimalnej wartości badanej zmiennej, której została przypisana dana wartość lingwistyczna. Szerokość przedziału dobrana jest tak, aby wewnątrz niego leżało 10% wskazań danej wartości lingwistycznej. Przedział ten stanowi lewą część funkcji przynależności, gdzie stopień przynależności rośnie od 0 do 1. Przedział kolejny rozciąga się od miejsca będącego końcem przedziału pierwszego i zawiera kolejne 80% wskazań danej wartości lingwistycznej. Jest on przyjmowany jako przedział jądra funkcji przynależności. Ostatni przedział zawiera pozostałe 10% wskazań i jest przyjmowany jako przedział w którym, stopień przynależności maleje od 1 do 0. Przykładowy histogram i wykreślona na jego podstawie funkcja przynależności przedstawione są na rys. 4.15.



Rys. 4.15. Histogram wskazań wartości wybranej cechy i dwustronna krzywa gaussowska będąca funkcją przynależności tej wartości w logice rozmytej

Dla oceny amplitudy *średniej* uzyskane liczby ocen dla różnych wartości amplitud przedstawione są poniżej (tabela 4.1).

Tabela 4.1. Liczba wskazań uzyskana przez animacje o zadanych amplitudach ruchu w przypadku pytania o amplitudę *średnią* (histogram)

Amplituda	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Liczba wskazań	0	1	2	8	9	8	1	0	0	0

Tworzona jest tabela zawierająca sumy liczb wskazań występujących dla danej wartości parametru i wartości mniejszych (skumulowany histogram) (tabela 4.2). W tabeli z sumą liczb wskazań widoczne jest, iż w teście subiektywnym oceniający udzielili łącznie 29 wskazań. 10% z tej liczby to 2,9, zaś 90% z niej¹¹ to 26,1, stąd w przybliżeniu pierwszy przedział, który zawierać ma 10% wskazań to $\langle c_{n, 0}, c_{n, 10} \rangle = \langle 0,1; 0,3 \rangle$, drugi z 80% wskazań: $\langle c_{n, 10}, c_{n, 90} \rangle = \langle 0,3; 0,55 \rangle$, trzeci z pozostałymi 10% wskazań: $\langle c_{n, 90}, c_{n, 100} \rangle = \langle 0,55; 0,85 \rangle$. Przyjęto oznaczenie $c_{n, x}$, gdzie indeks n to numer kolejnej funkcji przynależności, a x to procent wskazań odczytywany ze skumulowanego histogramu.

¹¹ Pierwszy przedział zawierać ma 10% wskazań, drugi 80%, więc koniec drugiego przedziału wyznaczany jest przez punkt $90\% = 10\% + 80\%$.

Tabela 4.2. Suma liczb wskazań dla amplitud (histogram skumulowany)

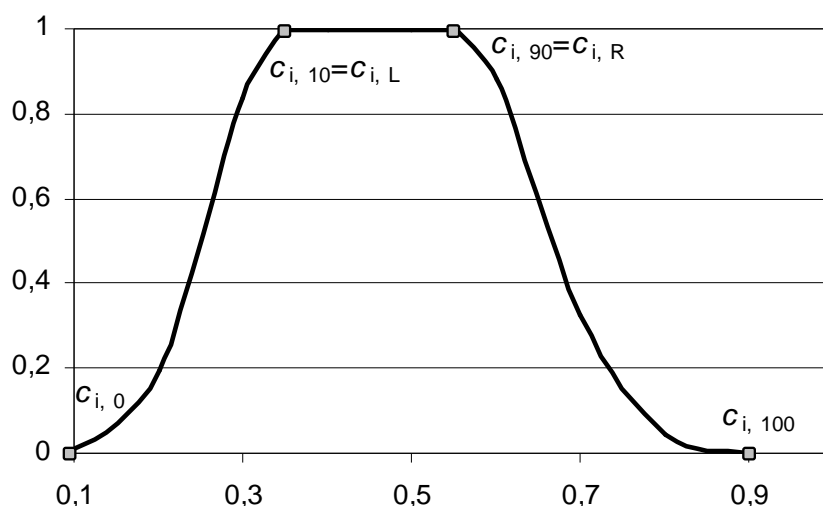
Amplituda	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Suma liczb wskazań	0	1	3	11	20	28	29	29	29	29
Procent wskazań [%]	0	3	10	38	69	97	100	100	100	100

Jako jądro funkcji n -tego zbioru rozmytego (zakres, w którym jej wartość równa jest 1) przyjęto zakres $\langle c_{n,10}, c_{n,90} \rangle$. Nośnik funkcji przynależności rozciąga się w zakresie $\langle c_{n,0}, c_{n,100} \rangle$, natomiast przedziały, w których stopień przynależności mieści się pomiędzy 0 a 1 opisywane są jednostronnymi krzywymi gaussowskimi. Parametry c i σ krzywych lewo- i prawostronnej dobierane są następująco:

– c to wartość, dla której krzywa posiada maksimum, więc równa jest $c_{n,L}=c_{n,10}$ dla lewostronnej i $c_{n,R}=c_{n,90}$ dla prawostronnej krzywej,

– σ wyznaczane są jako $\sigma_{n,L} = 1/3 \cdot (c_{n,10} - c_{n,0})$ i $\sigma_{n,R} = 1/3 \cdot (c_{n,100} - c_{n,90})$, wówczas na krańcach przedziałów, czyli dla $c_{n,0}$ i $c_{n,100}$ funkcja przynależności przyjmuje wartość bardzo bliską zeru, mianowicie 0,011.

Postać uzyskanej w ten sposób funkcji przynależności przedstawiono na rys. 4.16.



Rys. 4.16. Konstrukcja dwustronnej gaussowskiej funkcji przynależności

Gaussowska dwustronna funkcja przynależności opisana jest więc następująco:

$$\text{gauss2mf}(x, \sigma_{n,L}, c_{n,L}, \sigma_{n,R}, c_{n,R}) = \begin{cases} \exp(-(x - c_{n,L})^2 / (2 \cdot \sigma_{n,L}^2)) & \text{dla } x < c_{n,L}; \\ 1 & \text{dla } c_{n,L} < x < c_{n,R}; \\ \exp(-(x - c_{n,R})^2 / (2 \cdot \sigma_{n,R}^2)) & \text{dla } x > c_{n,R}; \end{cases} \quad (4.30)$$

Po wyznaczeniu funkcji przynależności dla każdej wartości lingwistycznej dla danej zmiennej konieczne jest ich skorygowanie w celu zapewnienia, że ich jądra nie nachodzą na siebie, a ponadto spełniony jest w przybliżeniu warunek sumowania do jedności.

Zachodzenie na siebie jąder funkcji przynależności zachodzi między innymi dla zmiennej prędkość. Może być to spowodowane trudnościami w stopniowaniu wrażenia prędkości przez uczestników testu. Funkcje dla *średniej*, *dużej* i *bardzo dużej* prędkości mają **przecinające się zakresy jąder**, czyli przedziałów $\langle c_{n,10}, c_{n,90} \rangle$. Konieczne jest ich zawężenie w taki sposób, aby zachodzenie zostało zredukowane. Zaproponowana zostaje następująca heurystyka:

- nośniki funkcji nie są modyfikowane,
- przedział jądra funkcji zostaje przeskalowany względem swojego środka, punktu $c_{n,50}$ o współczynnik $s_n < 1$, czyli:

$$\langle c'_{n,L}, c'_{n,R} \rangle = \langle c_{n,50} - s_n \cdot (c_{n,50} - c_{n,L}), c_{n,50} + s_n \cdot (c_{n,R} - c_{n,50}) \rangle \quad (4.31)$$

Współczynnik skali s_n dobierany jest indywidualnie dla każdej z funkcji przynależności tak, aby odległości między nowymi jądrami sąsiednich funkcji wyrażały się wzorem:

$$c'_{n,L} - c'_{n-1,R} = 1/3 \cdot \min(c'_{n,R} - c'_{n,L}; c'_{n-1,R} - c'_{n-1,L}), \quad (4.32)$$

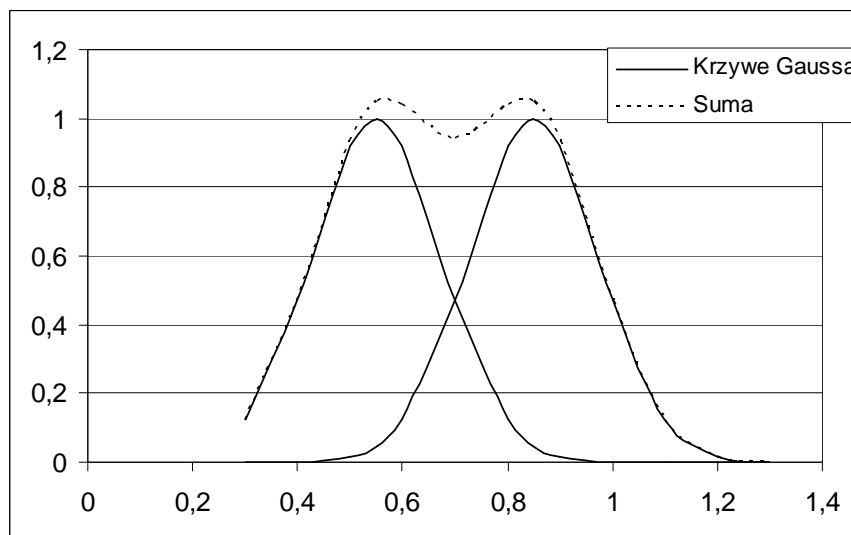
gdzie: $n=2 \dots N$,

N – liczba funkcji przynależności dla zmiennej,

Oznacza to, że odległości między nowymi jądrami zostają powiększone do 1/3 z szerokości mniejszego jądra sąsiednich funkcji.

Kolejna operacja ma na celu zapewnienie spełnienia warunku **sumowania do jedności**. Sąsiednie funkcje są sumowane w przedziałach pomiędzy ich jądrami, czyli $\langle c_{n,R}, c_{n+1,L} \rangle$. Następnie modyfikowane są parametry $\sigma_{n,R}$ i $\sigma_{n+1,L}$ tak, aby w danym przedziale zminimalizowany był błąd średniokwadratowy sumy funkcji przynależności

liczony względem wartości pożądanej, czyli 1. Przykład sumowania krzywych Gaussa, które w przybliżeniu spełniają warunek sumowania do jedności przedstawiony jest na rys. 4.17.



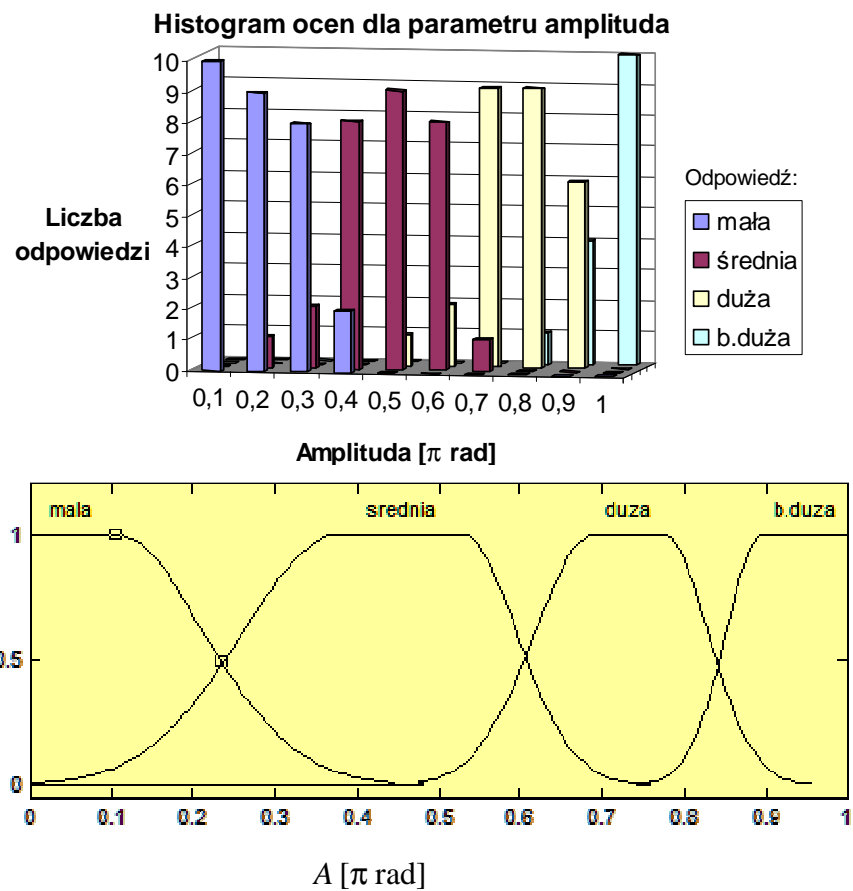
Rys. 4.17. Przykład sumowania krzywych Gaussa w przybliżeniu spełniających warunek sumowania do jedności

Dla skrajnych funkcji przynależności parametry $c_{1, L}$ i $c_{N, R}$ są równe granicom dziedziny zmienności rozmywanego parametru, dzięki czemu funkcje przyjmują wartość 1 na krańcach dziedziny zmienności.

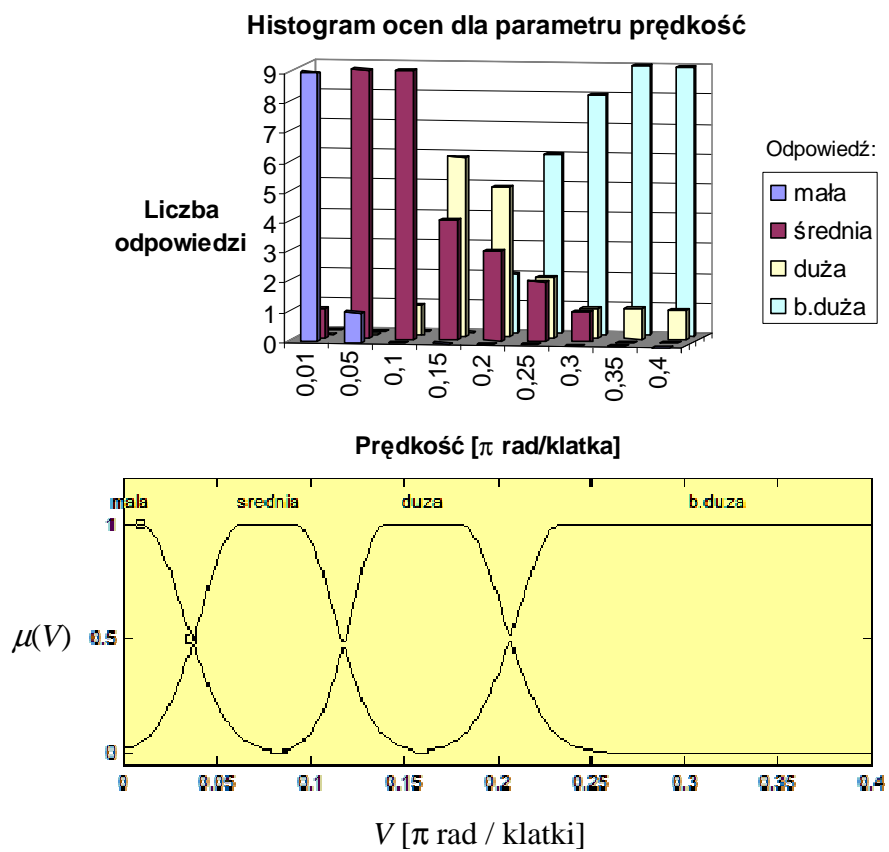
Histogramy odpowiedzi i wyznaczone funkcje przynależności przedstawione są na rysunkach poniżej (rys. 4.18a, b, c). Poniższe funkcje przynależności wykorzystane są w zaproponowanym systemie wspomagania tworzenia animacji.

Dwa pozostałe parametry wejściowe: *styl* i *płynność* są opisane trójkątnymi funkcjami przynależności, rozmieszczonymi arbitralnie, o wierzchołkach w punktach 1, 2, 3, co przedstawione jest na rys. 4.19. Funkcje opisują wartości lingwistyczne *płynna*, *pośrednia*, *skokowa* dla płynności i *naturalna*, *pośrednia*, *komiksowa* dla stylu. Dobór takich funkcji gwarantuje liniową interpolację. Oznacza to, że w przypadku wybrania przez użytkownika płynności animacji pomiędzy *płynną* a *pośrednią*, nastąpią aktywacje reguł z przesłanką *płynność=płynna* i z przesłanką *płynność=pośrednia*. Gdy wybrana wartość znajduje się w jednej czwartej przedziału między wartością płynną a pośrednią, to stopnie aktywacji wyniosą 0,25 i 0,75, czyli będą proporcjonalne do położenia wybranej wartości.

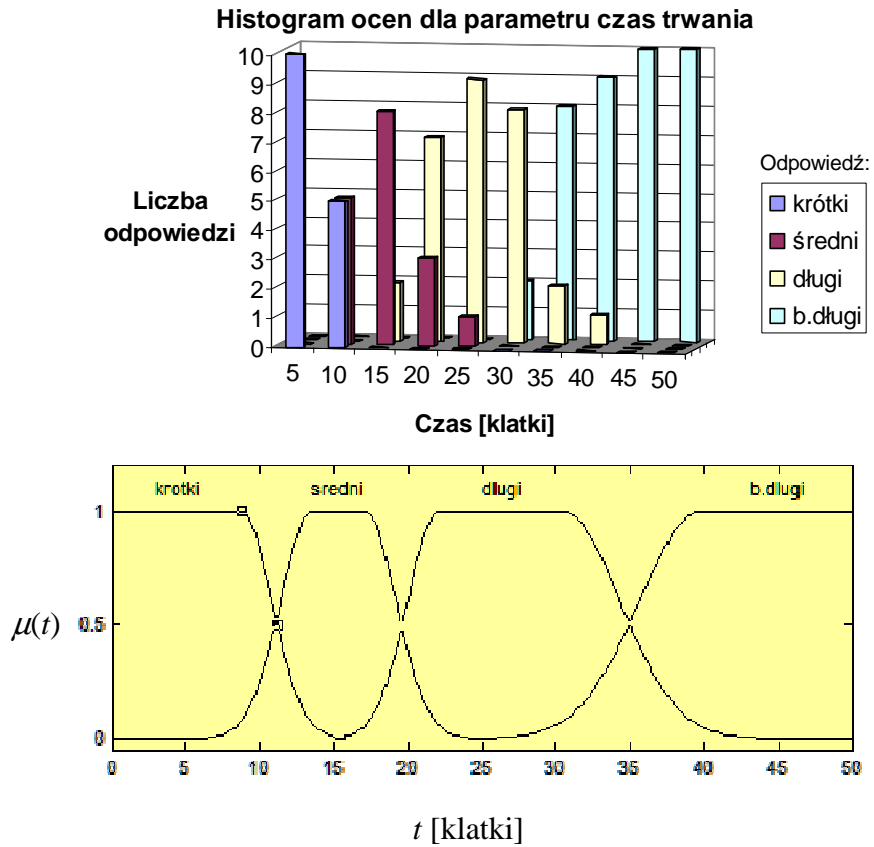
a)



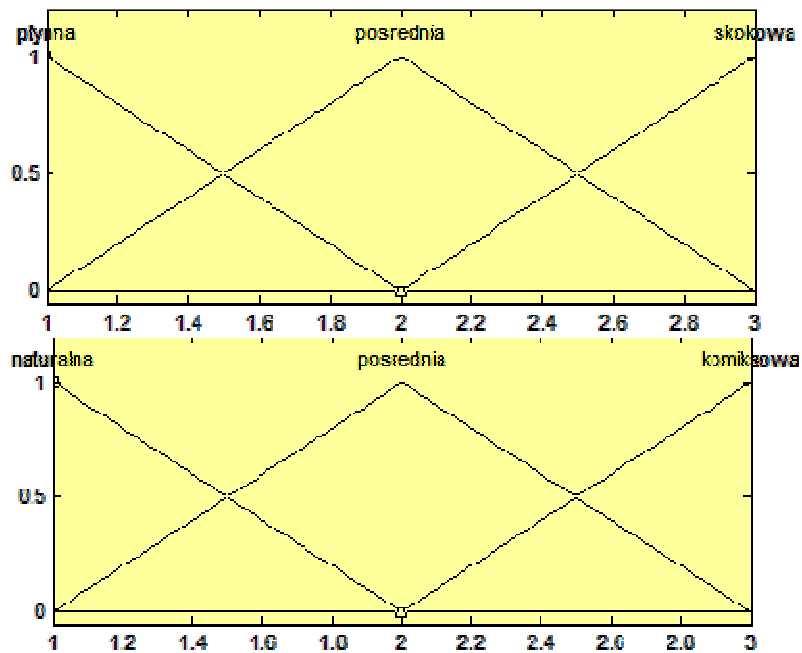
b)



c)



Rys. 4.18. Funkcje przynależności dla parametrów wektora **A**:
 a) amplituda fazy głównej ruchu A , b) prędkość ruchu w fazie głównej V ,
 c) czas trwania fazy głównej ruchu t



Rys. 4.19. Funkcje przynależności zmiennych wejściowych *płynność* i *styl*

Funkcje przynależności dla parametrów wyjściowych dt i dA wyznaczone są w następujący sposób:

– wyznaczone są wartości ostre dA i dt dla każdej kombinacji zmiennych występujących w równaniach: $dA=f(\alpha \cdot V_i \cdot A_i)$, $dt=g(\beta \cdot V_i \cdot t_i)$, odpowiednio (4.21) i (4.22). Wartości α i β podstawiane do równań wynikają z przyjętej dyskretyzacji: dla α {0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3}, dla β {1; 3; 5; 7}. Dla zmiennych rozmytych wybierane są wartości będące środkami przedziałów między jądrami kolejnych funkcji przynależności: V_i przyjmuje wartości ze zbioru {0,05; 0,12; 0,2; 0,4}, A_i wartości {0,2; 0,65; 0,8; 1}, t_i wartości {0; 10; 20; 35},

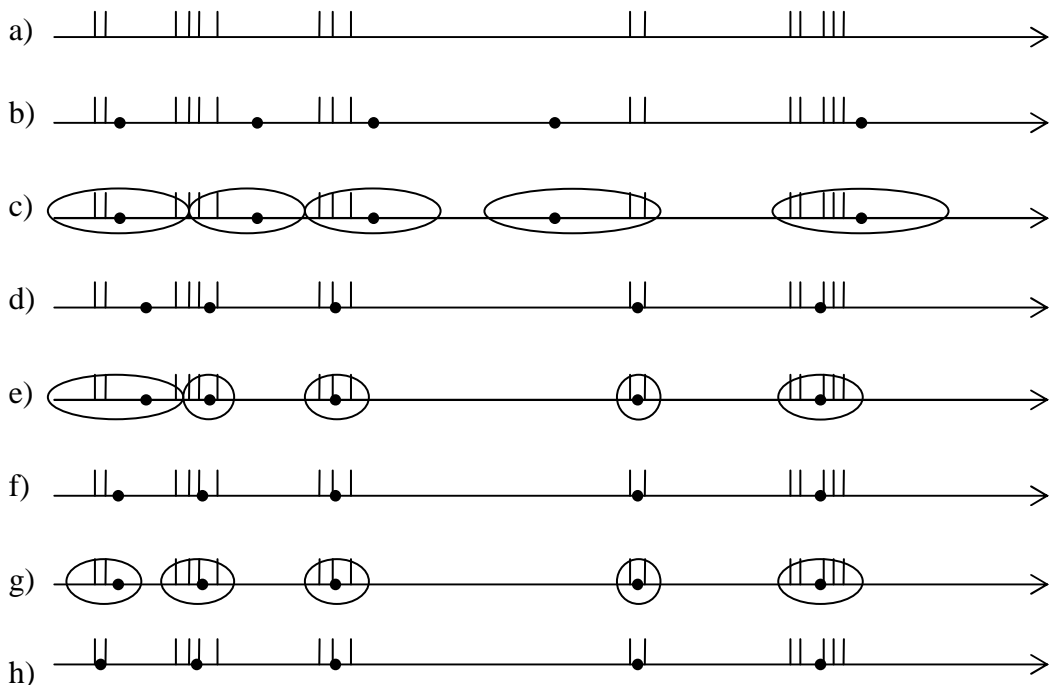
– uzyskane zbiory wartości dt i dA są poddawane klasteryzacji standardową metodą k -środków [113]. Dla amplitud dA liczba klastrów ustalona została na $k_A=11$, a dla czasów dt na $k_t=10$. Liczności te przyjęte zostały arbitralnie na podstawie obserwacji wizualnej wykresów wartości dt i dA , które ujawniły występowanie skupisk wartości. Istnienie takich skupisk uzasadnione jest wykorzystaniem skończonej liczby dyskretnych wartości zmiennych do wyznaczenia dA i dt z równań: $dA=f(\alpha \cdot V_i \cdot A_i)$, $dt=g(\beta \cdot V_i \cdot t_i)$. Następnie realizowany jest algorytm:

- krok 1: środki klastrów rozmieszczane są losowo, jednakże z zachowaniem między punktami startowymi odległości co najmniej $(dA_{\max}-dA_{\min})/(k_A+1)$ i $(dt_{\max}-dt_{\min})/(k_t+1)$,
- krok 2: do każdego klastrera przyporządkowywane są próbki najbliższe jego środkowi,
- krok 3: następuje korekcja położenia środka klastrera, poprzez przypisanie mu wartości równej średniej ze wszystkich próbek do niego przyporządkowanych. Jeśli środek chociaż jednego klastrera przemieścił się o więcej niż przyjęta wartość progowa $\varepsilon=0,01$, to algorytm wraca do kroku 2, w przeciwnym wypadku algorytm jest zakończony.

W oparciu o wyznaczone środki klastrów tworzone są funkcje przynależności zmiennych wyjściowych:

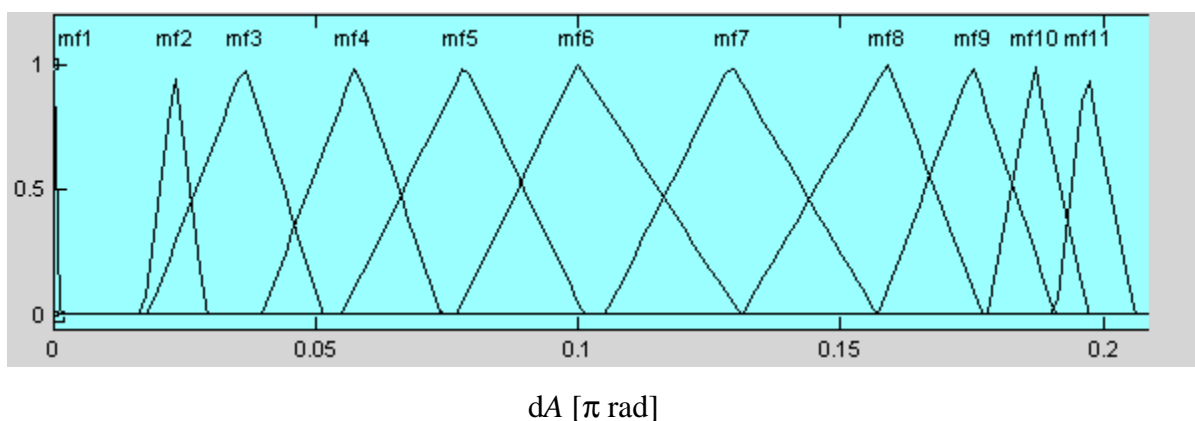
- funkcje przynależności są trójkątne, wierzchołki znajdują się w punktach równych środkom klastrów,
- ramiona trójkątów rozstawione są tak, aby funkcje z lewej i prawej strony osiągały wartości 0 pod wierzchołkami sąsiednich funkcji przynależności, uzyskiwane jest w ten sposób sumowanie do jedności,
- stosowane są ponumerowane etykiety $mfnr$ (ang. *membership function*) zamiast nazw.

Uzyskane w ten sposób funkcje przynależności dla zmiennych dA i dt przedstawione są odpowiednio na rys. 4.21 i 4.22.

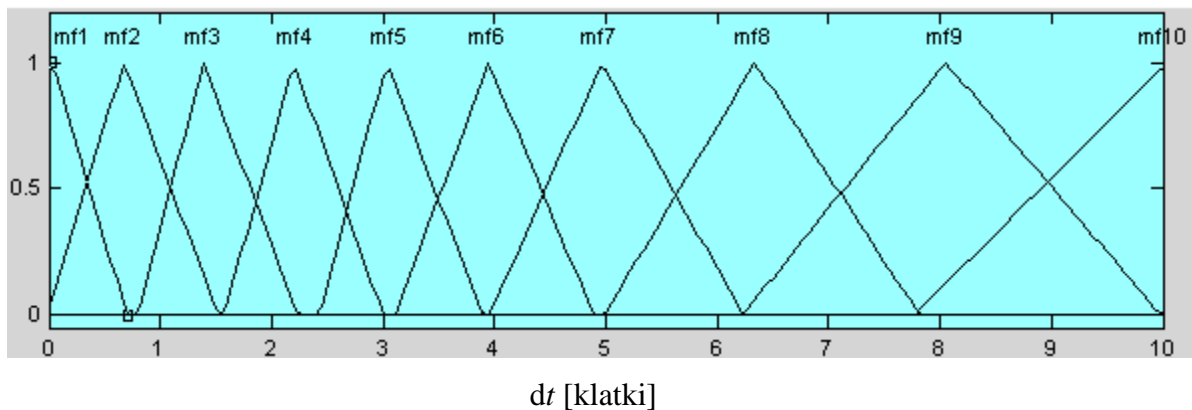


Rys. 4.20 Graficzne objaśnienie algorytmu k -środków dla przypadku jednowymiarowego:

- a) analizowane dane, b) inicjalizacja losowa k -środków ($k=5$),
- c) przyporządkowanie do każdego klastra najbliższych jemu próbek
- d) zmiana położenia środków klastrów na podstawie wyznaczenia średniej z przypisanym mu próbek, e) nowe klaster, f) aktualizacja położenia środków,
- g) nowe klaster, h) aktualizacja położenia środków. W kolejnych krokach środki już się nie przemieszczają, algorytm jest zakończony



Rys. 4.21. Funkcje przynależności dla zmiennej wyjściowej dA



Rys. 4.22. Funkcje przynależności dla zmiennej wyjściowej dt

Uzyskane powyżej funkcje przynależności zmiennych wejściowych i wyjściowych wykorzystane są w systemie wnioskowania. Reguły dla tego systemu wyznaczane są w procesie analizy wyników testu subiektywnej oceny animacji, opisanym w kolejnym podrozdziale (rozdział 4.3).

4.3. Wyznaczanie reguł dla systemu wnioskowania rozmytego

Tworzona baza reguł animacji operuje pojęciami subiektywnymi, takimi jak „szybki i wolny ruch”, „długie, średnie, krótkie przygotowanie do ruchu” (antycypacja), „duży, mały przerzut”, „wysoka jakość animacji” oraz posługuje się subiektywnym opisem ekspresji ruchu animowanych postaci. Wyliczanie wartości parametrów wyjściowych z systemu realizowane jest w oparciu o reguły rozmyte postaci:

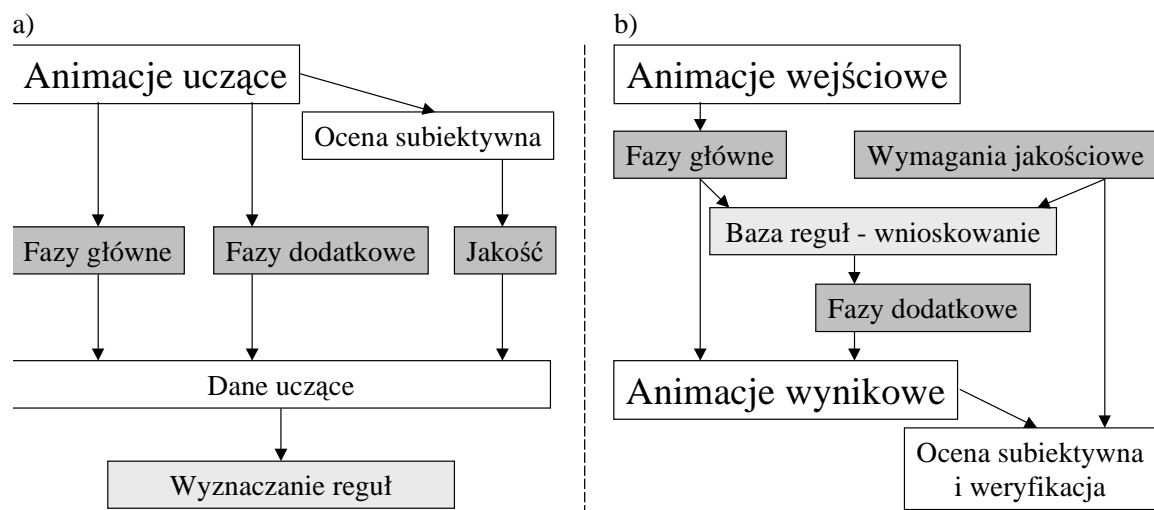
$$\begin{aligned}
 &\text{JEŻELI } A_i = \dots \text{ AND } t_i = \dots \text{ AND } V_i = \dots \text{ AND } styl = \dots \text{ AND } płynność = \dots \text{ TO } dt = \dots \\
 &\text{JEŻELI } A_i = \dots \text{ AND } t_i = \dots \text{ AND } V_i = \dots \text{ AND } styl = \dots \text{ AND } płynność = \dots \text{ TO } dA = \dots
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

W celu uzyskania kompletności systemu wnioskowania utworzone powinny być reguły dla wszystkich kombinacji wartości lingwistycznych zmiennych wejściowych. Wnioskowanie polega na obliczaniu stopni aktywacji wszystkich reguł, następnie wykonywana jest agregacja reguł i wyliczanie wartości ostrej (ang. *crisp*), czyli dokładnej liczbowej wartości zmiennej wyjściowej [148][150].

Przygotowany eksperyment, mający na celu wyznaczenie reguł rozmytych o postaci przedstawionej powyżej (4.33), przebiega zgodnie ze schematem z rys. 4.23.

Animacje uczące, przygotowane zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4.1, poddawane są ocenie subiektywnej. Dane uczące stanowią: obiektywny opis animacji, czyli wektory A_i i B_i zawierające parametry faz głównych i faz dodatkowych dla każdego segmentu S_i oraz subiektywny opis w postaci oceny *jakości*, *płynności* i *naturalności* ruchu w animacji (*jakość* jako ocena Q , *płynność* i *naturalność* jako ocena zawarta w wektorze J). Następnie są one poddawane analizie w celu wyznaczenia reguł przedstawiających zależności między J i B_i dla danego A_i .

Poniżej przedstawiona jest procedura wydobywania reguł z danych uczących (rozdział 4.3.1), zaś rozdział 4.4 zawiera opis wykorzystania reguł. Dla animacji o cechach subiektywnych, określanych w toku oceny subiektywnej, wyznaczane są reguły na podstawie parametrów fazy głównej i parametrów faz dodatkowych (rys. 4.23a). Wykorzystując reguły, system wyznacza wartości parametrów faz dodatkowych, które są optymalnie dobrane do wstawienia do schematycznej animacji, posiadającej jedynie fazę główną. Wynikowa animacja poddawana jest subiektywnemu testowi weryfikacji jakości (rys. 4.23b).



Rys. 4.23. Procedura wydobywania reguł z danych uczących i wykorzystania reguł do wzbogacania animacji

4.3.1. Pozyskiwanie reguł z danych uczących

Sygnaly testowe

Animacje uczące do testu oceny subiektywnej wygenerowane zostały na podstawie dwóch animacji schematycznych. Przeszają one dwie czynności, zawierające przejścia od pozy

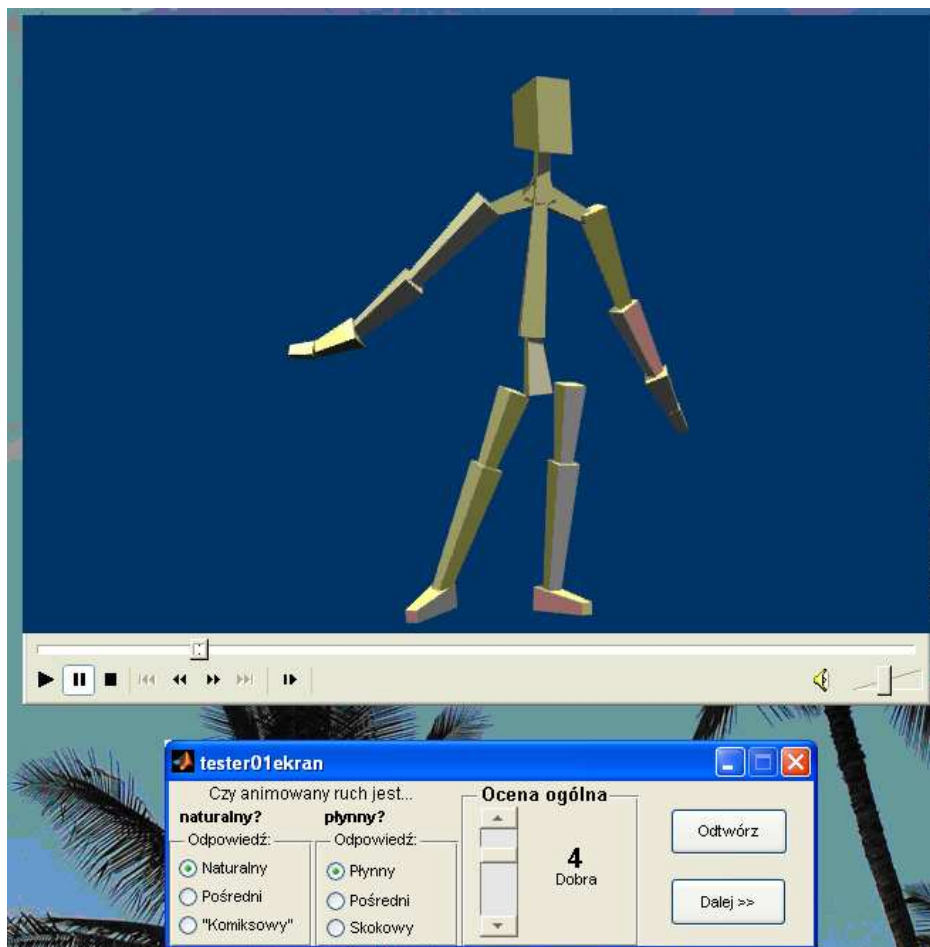
do pozy z różną prędkością, dla ciągu 4 póż: od 1 do 2 z prędkością subiektywnie bardzo dużą, od 2 do 3 z prędkością subiektywnie średnią, od 3 do 4 z prędkością subiektywnie dużą, zgodnie z funkcjami przynależności opisującymi zbiory rozmyte parametru V_i . Wersje animacji różniły się doбором wartości współczynników amplitudowych *alfa* (11 różnych wartości) i czasowych *beta* (4 wartości). Uzyskano po **44 animacje** uczące na każdą czynność. Animacje te są oceniane w teście oceny subiektywnej opisanym poniżej.

Metodyka testu

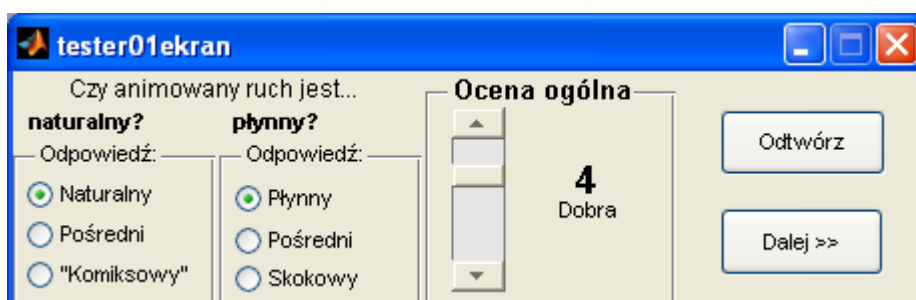
Zrealizowany test przeprowadzony został zgodnie z metodyką zaprezentowaną w rozdziale 3.5. Sygnały do oceny stanowiły animacje o rozdzielczości 640x480 odtwarzane z prędkością 24 klatek na sekundę, w formacie avi, z kompresją wideo algorytmem DivX i maksymalnymi ustawieniami jakości obrazu. Animacje prezentowane były na ekranie komputera w rozdzielczości 1024x768, która umożliwiła umieszczenie na ekranie jednocześnie okna odtwarzania animacji i okna oceny parametrycznej (rys. 4.24).

Okno oceny parametrycznej, przedstawione na rys. 4.25 zawierało klawisze odtwarzania animacji, przejścia do następnej animacji oraz interfejs wprowadzania odpowiedzi. Dla parametrów ocenianych w skali słownej wartości do oceny zgrupowane były w grupę przycisków opcji (ang. *radio button*), dla parametrów ocenianych w skali ciągłej wartość ustalana była suwakiem, przy którym opisana była aktualnie ustawiona ocena. Ocena była wymuszona, tzn. przejście do kolejnego sygnału nie było możliwe, jeżeli nie były udzielone odpowiedzi dla każdego z parametrów.

W trakcie testu prowadzona była przez aplikację automatyczna randomizacja kolejności prezentacji sygnałów testowych dla każdego z widzów z osobna. Wyniki gromadzone były w plikach, zawierających numer identyfikacyjny animacji i wartości udzielonych ocen parametrycznych. Pozyskane dane uzupełnione były datą i godziną odbycia testu. Fragment pliku tekstowego z zapisem wyników testu zawiera tabela 4.3. Kompletne wyniki oceny zamieszczono w **Załączniku A** – oceny animacji w teście subiektywnym. Wyniki uzyskane w teście parametrycznym były przetwarzane w środowisku Matlab.



Rys. 4.24. Wygląd ekranu komputera w trakcie przeprowadzania testu



Rys. 4.25. Interfejs graficzny zaprojektowany dla przeprowadzonego testu subiektywnego

Tabela 4.3. Fragment pliku z zapisem wyników testu. Kolumny r1-r6 zawierają binarną informację o stanie przycisków opcji typu *radiobutton*

29-May-2007 16:13:01							
Nr klipu	r1	r2	r3	r4	r5	r6	o.ogolna
6	0	0	1	1	0	0	3
3	0	1	0	0	1	0	4
9	0	1	0	0	1	0	3
4	1	0	0	0	1	0	4
8	0	0	1	1	0	0	4
1	0	1	0	0	1	0	5
10	0	0	1	1	0	0	3

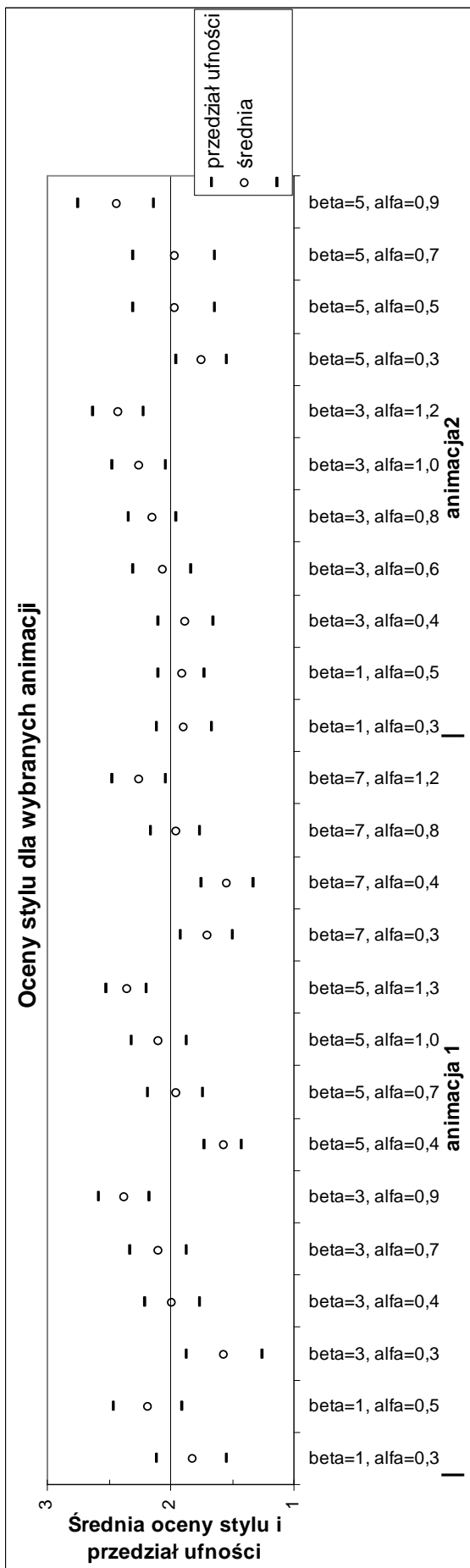
Przed przystąpieniem do testu przedstawiono uczestnikom założenia eksperymentu, cel badań i zaprezentowano serię animacji przykładowych, w których odtwarzane były czynności z minimalną i maksymalną wartością współczynnika *alfa* i współczynnika *beta*. Celem fazy treningowej było zapoznanie oceniających z możliwymi zmianami w zawartości animacji i przygotowanie uczestników do oceny stylu i płynności animacji.

W teście oceny subiektywnej animacje te oceniane były pod kątem cech:

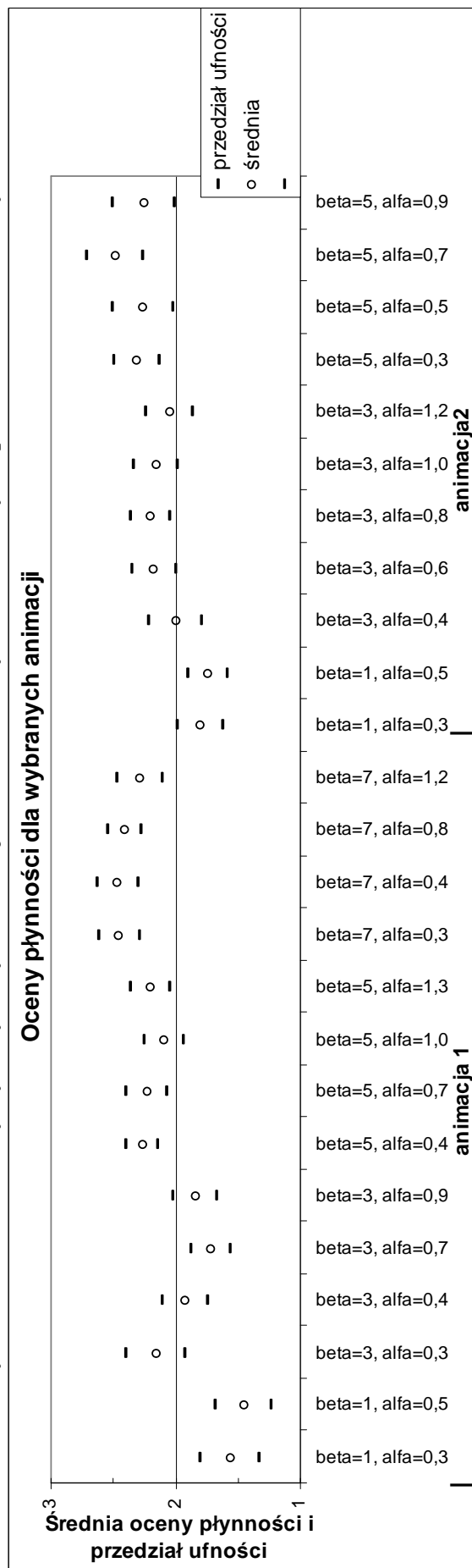
- **płynność** ruchu – uczestnik testu przydzielał animacji etykietę słowną ze zbioru możliwości: 1- *ruch skokowy*, 2- *pośredni*, 3 - *płynny*,
- **styl** ruchu – uczestnicy przydzielali animacji etykiety: 1 - *ruch naturalny*, 2 - *pośredni*, 3 - *komiksowy*,
- ogólna **jakość** ruchu – uczestnicy oceniali animację w skali 1–5.

W trakcie oceny uwaga oceniających była szczególnie skierowana na realizację faz **antycypacji** i **przerzutu**.

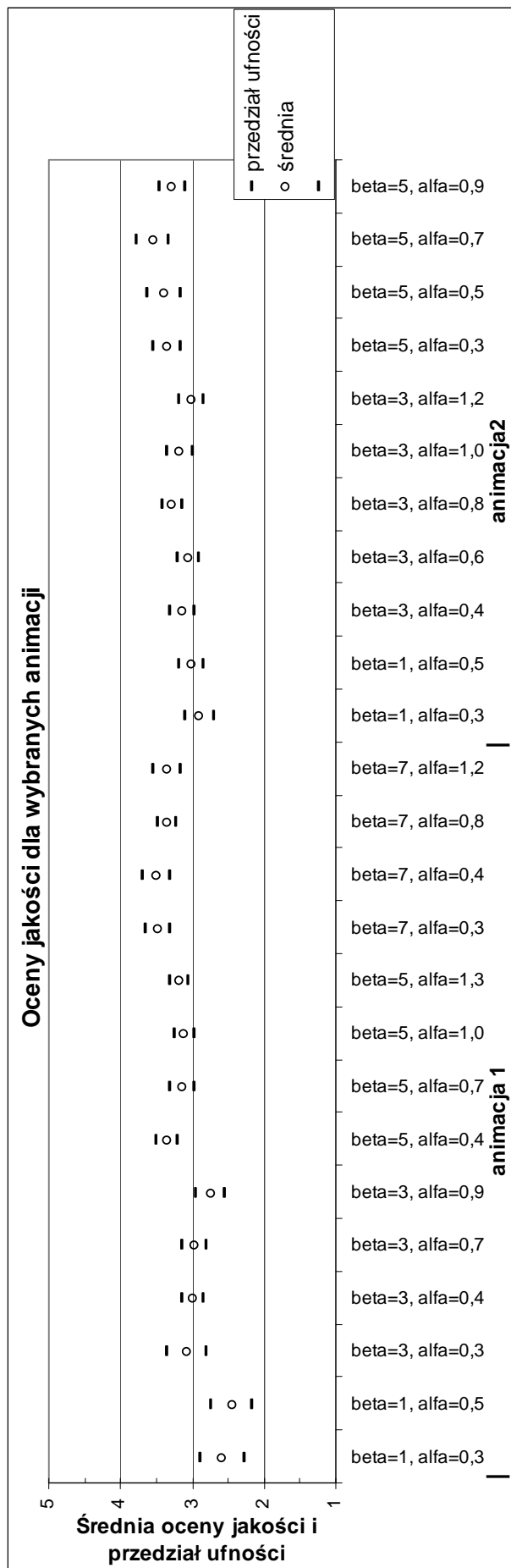
Rysunki 4.26÷4.28 przedstawiają wyniki dla kilkunastu animacji wybranych z ocenianej grupy 44 animacji dla obu czynności. Na wykresach zaznaczone są wartości średnie ocen i 95% przedziały ufności (3.21) wyznaczone w oparciu o analizę danych opisaną w rozdziale 3.5.



Rys. 4.26. Średnie oceny stylu wybranych animacji. Oznaczenia stylów: 1: naturalny, 2: pośredni, 3: komiksowy



Rys. 4.27. Średnie oceny płynności wybranych animacji. Oznaczenia płynności: 1: skokowa, 2: pośrednia, 3: płynna



Rys. 4.28. Średnie oceny jakości wybranych animacji

Oceny średnie dla wszystkich 44 animacji dla zbadanej subiektywnie dwuwymiarowej przestrzeni współczynników $\alpha \times \beta$ przedstawiono poniżej (tabela 4.4).

Tabela 4.4. Preferencje widzów, średnia ocena *jakości*, dla przestrzeni $\alpha \times \beta$. Kolor żółty to obiekty ocenione powyżej 3,2, kolor czerwony to oceny powyżej 3,8

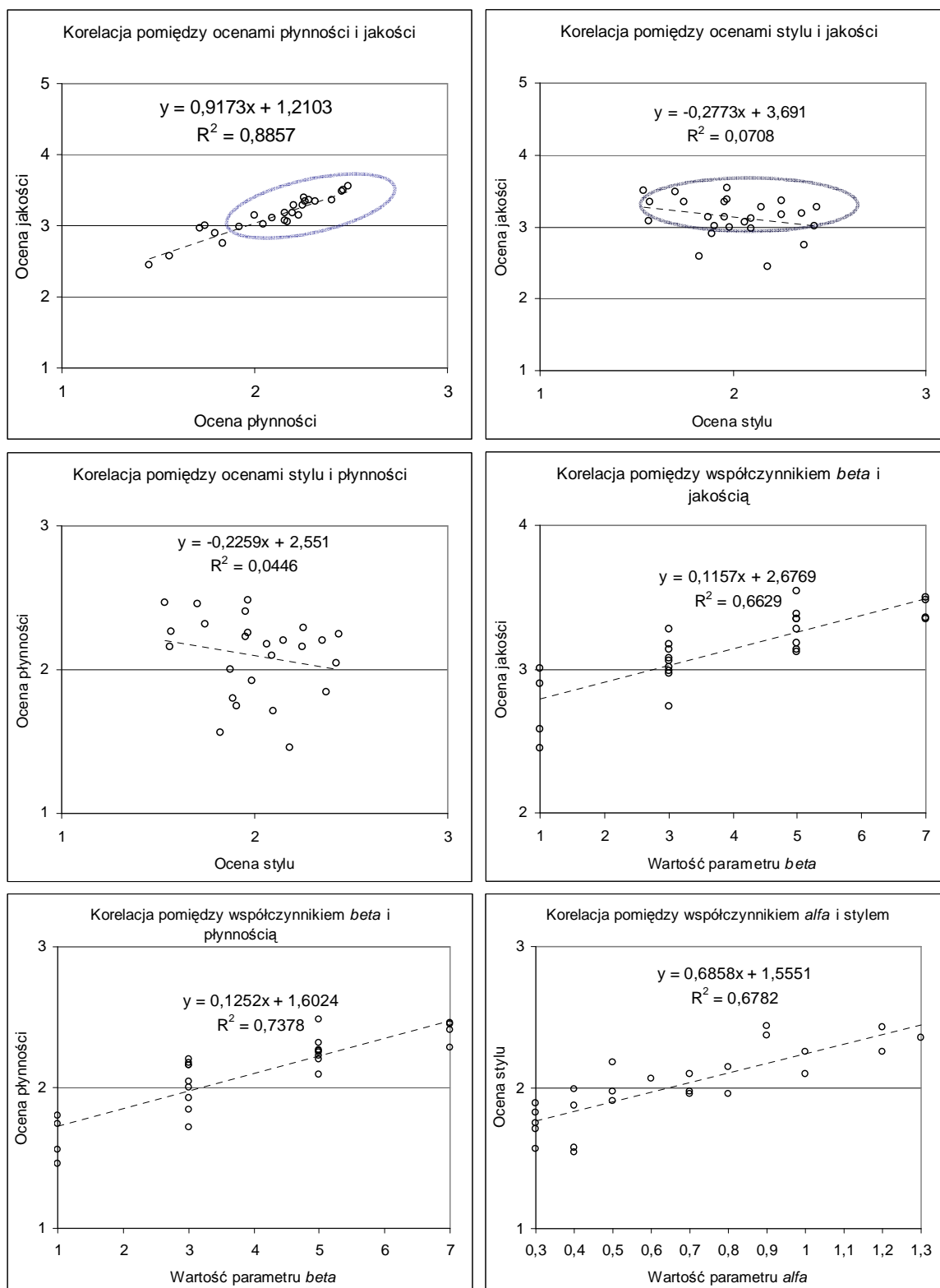
		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
beta	1	3,21	3,16	2,68	2,91	2,92	3,3	2,8	3,11	3,08	3,06	3,07
	3	3,22	3,19	3,2	3,14	2,92	3,41	2,41	3,42	3,23	3,04	3,28
	5	3,7	4,03	3,8	3,5	3,69	3,8	3,82	3,35	3,41	3,47	3,53
	7	4,17	4,04	3,92	3,7	3,8	4,1	3,9	3,5	3,5	3,85	3,69

Zauważalne są pewne tendencje wzrostu oceny stylu wraz ze wzrostem współczynnika amplitudowego α oraz wzrostu oceny płynności ze wzrostem współczynnika czasowego β . Współczynniki korelacji, obrazujące siłę tych zależności przedstawione są w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Współczynniki korelacji pomiędzy zmiennymi a ocenami uzyskanymi w teście

	<i>beta-styl</i>	<i>beta-płynność</i>	<i>beta-jakość</i>	<i>alfa-styl</i>	<i>alfa-płynność</i>	<i>alfa-jakość</i>	<i>styl-płynność</i>	<i>styl-jakość</i>	<i>płynność-jakość</i>
<i>R</i>	-0,14	0,86	0,81	0,82	0,16	0,09	-0,21	-0,27	0,94

Rys. 4.29 przedstawia zależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi z zaznaczonymi trendami liniowymi. Na wykresach zaznaczono elipsami przybliżone lokalizacje obszarów, które zawierają wartości istotne z punktu widzenia wyznaczania reguł, które wiązać będą wartości zmiennych z wysokimi ocenami *jakości*. Spostrzeżenia dotyczące silnej korelacji pomiędzy parametrami a cechami subiektywnymi są potwierdzane także w teście oceny animacji wzbogacanych docelowym zbiorem reguł, opisywanym w rozdziale 5.



Rys. 4.29. Zależności pomiędzy ocenami subiektywnymi animacji i współczynnikami *alfa* i *beta*

Wyniki oceny **płynności** i **stylu** posłużyły do ustalenia przedziałów wartości współczynników *alfa* i *beta*, w których występuje regularność w przydzielaniu wybranych

ocen. Tabele 4.6÷4.11 zawierają wyniki wstępnie przetworzone. Każda z tabel zawiera wyniki dotyczące innej etykiety słownej. Wyznaczona jest częstość występowania wśród wszystkich ocen danego parametru (stylu czy płynności) wybranej wartości lingwistycznej w zależności od współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem w tabelach oznaczono częstości powyżej 0,5, czyli te pary wartości (*alfa*, *beta*), dla których dana wartość oceny powtarza się w ponad 50% odpowiedzi uczestników. Uwidaczniają się w ten sposób obszary, które cechują się **skokowością ruchu** lub **płynnością** ruchu, **naturalnością** lub **komiksowością**. Potwierdzone zostają wcześniej uzyskane wnioski (rozdział 4.1.3), a mianowicie: małe *beta* wpływa na skracanie czasu antycypacji i przerzutu i skutkuje uzyskiwaniem animacji ocenianych najczęściej jako skokowe, a duże *alfa* oznacza zwiększenie amplitudy tych faz i skutkuje generowaniem animacji o przejaskrawionym i komiksowym charakterze.

Tabela 4.6. Częstość występowania odpowiedzi **styl=naturalny** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi styl=naturalny większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
	1	0,69	0,43	0,23	0,27	0,22	0,23	0,21	0,16	0,18	0,15	0,19
	3	0,69	0,45	0,31	0,42	0,36	0,39	0,23	0,3	0,25	0,23	0,23
	5	0,54	0,63	0,32	0,31	0,29	0,36	0,25	0,38	0,34	0,3	0,29
beta	7	0,56	0,71	0,37	0,3	0,28	0,33	0,25	0,22	0,27	0,29	0,29

Tabela 4.7. Częstość występowania odpowiedzi **styl=pośredni** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi styl=pośredni większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
	1	0,21	0,36	0,53	0,21	0,19	0,19	0,22	0,27	0,2	0,21	0,21
	3	0,26	0,16	0,23	0,09	0,11	0,06	0,18	0,16	0,13	0,12	0,12
	5	0,35	0,14	0,17	0,14	0,13	0,08	0,06	0,14	0,13	0,13	0,07
beta	7	0,29	0,12	0,15	0,21	0,06	0,06	0,16	0,21	0,18	0,17	0,13

Tabela 4.8. Częstość występowania odpowiedzi **styl=komiksowy** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi styl=komiksowy większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
	1	0,1	0,21	0,24	0,52	0,59	0,58	0,57	0,57	0,62	0,64	0,6
	3	0,05	0,38	0,46	0,48	0,53	0,54	0,6	0,55	0,62	0,65	0,65
	5	0,11	0,22	0,51	0,55	0,58	0,56	0,69	0,48	0,53	0,57	0,64
beta	7	0,15	0,17	0,48	0,49	0,66	0,61	0,59	0,57	0,55	0,54	0,58

Tabela 4.9. Częstość występowania odpowiedzi **płynność=płynna** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi płynność=płynna większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
beta	1	0,84	0,88	0,07	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	3	0,8	0,83	0,18	0,1	0,13	0,16	0,12	0,09	0,09	0,08	0,09
	5	0,68	0,79	0,39	0,36	0,58	0,34	0,26	0,22	0,2	0,19	0,15
	7	0,88	0,86	0,89	0,85	0,81	0,78	0,76	0,77	0,85	0,82	0,8

Tabela 4.10. Częstość występowania odpowiedzi **płynność=pośrednia** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi płynność=pośrednia większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
beta	1	0,11	0,05	0,47	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
	3	0,12	0,07	0,25	0,21	0,2	0,21	0,17	0,12	0,12	0,11	0,1
	5	0,24	0,14	0,48	0,5	0,33	0,44	0,6	0,66	0,68	0,71	0,75
	7	0,09	0,12	0,09	0,13	0,15	0,15	0,17	0,18	0,11	0,12	0,13

Tabela 4.11. Częstość występowania odpowiedzi **płynność=skokowa** dla animacji o wskazanych wartościach współczynników *alfa*, *beta*. Kolorem zielonym oznaczono częstość odpowiedzi płynność=skokowa większą od 0,5

		alfa										
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
beta	1	0,04	0,07	0,47	0,94	0,92	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95
	3	0,08	0,1	0,57	0,69	0,67	0,63	0,71	0,79	0,79	0,81	0,81
	5	0,08	0,07	0,13	0,14	0,09	0,22	0,14	0,12	0,12	0,1	0,1
	7	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,05	0,04	0,06	0,07

W rozdziale 4.1.3 opisane zostało założenie wiążące wartości parametrów *alfa* i *beta* z poszukiwanymi wartościami *dt* i *dA*. Jak widać z powyższych wyników analizy ocen, współczynniki *alfa* i *beta* równań (4.21) i (4.22) pozwalają w pewnym stopniu separować obszary oznaczane przez widzów jako związane z cechami: *styl naturalny*, *styl komiksowy* oraz cechami: *ruch płynny* i *ruch skokowy*. W celu obiektywnej oceny stopnia separacji obszarów, związanych z konceptami subiektywnymi, wykorzystywana jest metodyka zbiorów przybliżonych [7][8][109][118].

W celu ilościowej oceny jakości zgromadzonej wiedzy w postaci związku pomiędzy wartościami współczynników amplitudowych *alfa* i czasowych *beta* z uzyskiwanymi subiektywnymi ocenami *stylu* i *płynności*, autor rozprawy zastosował podejście znane z teorii zbiorów przybliżonych, w którym wykorzystać można zmienną precyzję określania dolnego i górnego przybliżenia zbioru (rozdział 3.3). W przypadku niniejszych eksperymentów poszukiwane są przybliżenia zbiorów reprezentujących

subiektywne koncepty, związane z ocenami w teście subiektywnym: *styl=naturalny*, *styl=komiksowy*, *styl=pośredni*, *płynność=płynna*, *płynność=skokowa*, *płynność=pośrednia*.

W rozprawie analizowane są dwa systemy decyzyjne rozumiane zgodnie z teorią zbiorów przybliżonych A_{styl} i $A_{płynność}$, które zawierają po trzy koncepty, tzn. klasy decyzyjne *styl=naturalny*, *styl=pośredni*, *styl=komiksowy* oraz *płynność=płynna*, *płynność=skokowa*, *płynność=pośrednia*. **Obiektami** w rozumieniu teorii zbiorów przybliżonych są animacje ocenione przez widzów, tzn. obiekt x_1 – animacja pierwsza oceniona przez widza pierwszego, x_2 – animacja druga oceniona przez widza pierwszego, $x_{N \cdot (w-1) + i}$ – animacja i -ta oceniona przez w -tego widza, gdzie N to liczba wszystkich animacji. Łącznie liczba wszystkich obiektów to $W \cdot N$, gdzie W to liczba widzów, N to liczba animacji.

Atrybutami obiektów w systemach decyzyjnych A_{styl} i $A_{płynność}$ są parametry amplitudowe *alfa* i czasowe *beta*. **Decyzjami** dla każdego z obiektów są odpowiedzi widzów, określające płynność i styl animacji. Założyć należy, iż obszar pozytywny dla każdego systemu decyzyjnego jest pusty. Sytuacja przeciwna, niepusty obszar pozytywny, nastąpiłaby tylko wtedy, gdy wszyscy W widzowie przydzieliliby taką samą ocenę choć jednej z animacji, czyli wszystkie obiekty opisane pewną wybraną dwójką atrybutów *alfa*, *beta* uzyskałyby tę samą decyzję. Wówczas klasa abstrakcji tych obiektów w całości należałaby do wybranego konceptu, związanego z przydzieloną oceną.

Pustość obszarów pozytywnych implikuje pustość dolnych przybliżeń konceptów, które są wówczas B -niedefiniowalne, dlatego też, w celu dalszej analizy, należy przyjąć zmienną dokładność przybliżenia. Do analizy wyników uzyskanych w niniejszych badaniach, równania określające dolne i górne przybliżenia (3.16) przyjmują postać:

$$\underline{B}_{\pi} X^{naturalny} = \{x \mid \mu^{X^{naturalny}}_B(x) \geq \pi_{styl}\}, \quad (4.34)$$

$$\overline{B}_{\pi} X^{naturalny} = \{x \mid \mu^{X^{naturalny}}_B(x) > 1 - \pi_{styl}\} \quad (4.35)$$

co oznacza, iż w systemie decyzyjnym A^{styl} do konceptu $X^{naturalny}$ należą z pewnością te wszystkie obiekty x , które zostały ocenione w teście jako naturalne z częstością odpowiedzi co najmniej π_{styl} , a na pewno nie należą obiekty ocenione jako naturalne z częstością mniejszą niż $1 - \pi_{styl}$. Dla wstępnego oszacowania wartości parametru dokładności π_{styl} autor rozprawy zaproponował, aby empirycznie wyznaczona została

maksymalna wartość π_{styl} , dla której uzyskane są przybliżenia konceptów $X^{naturalny}$, $X^{komiksowy}$, $X^{pośredni}$ spełniają warunki:

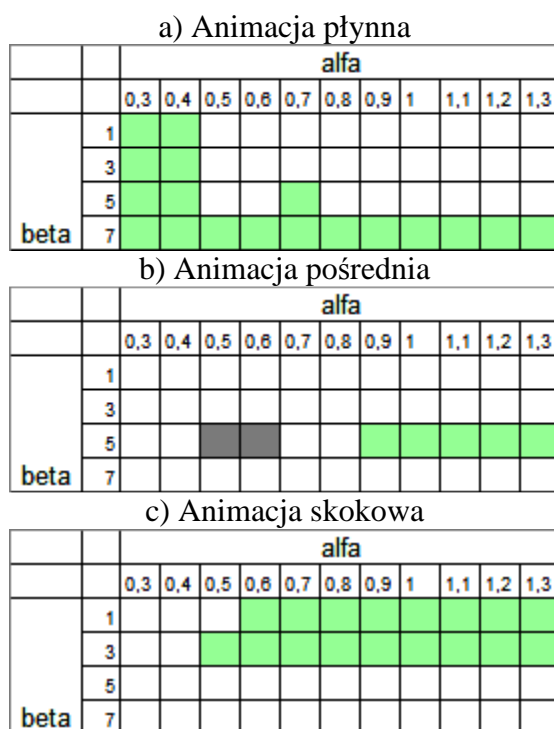
- dolne przybliżenia są rozłączne,
- dolne przybliżenia nie przecinają się z górnym przybliżeniem żadnego z innych konceptów.

W sposób analogiczny określana jest wartość parametru dokładności przybliżenia $\pi_{płynność}$ dla konceptów $X^{płynna}$, $X^{pośrednia}$, $X^{skokowa}$ w systemie decyzyjnym $A^{płynność}$. Przykład takich przybliżeń przedstawiony jest na rys. 4.30.

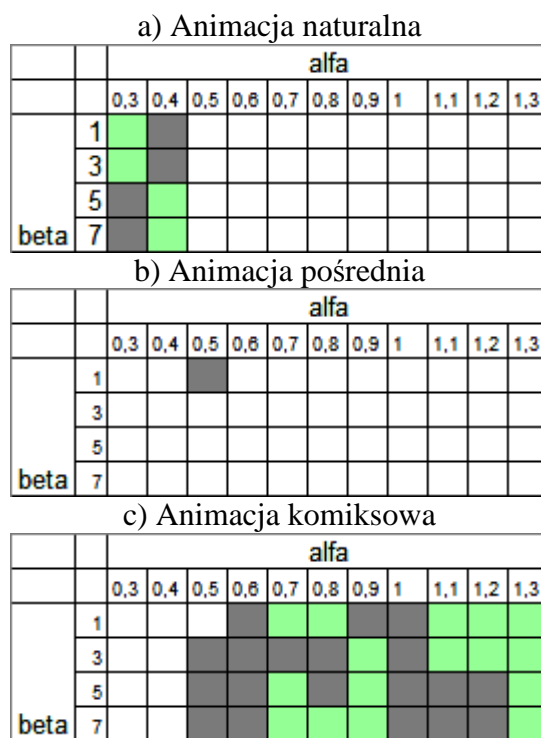


Rys. 4.30. Ilustracja założonej dokładności przybliżeń poszukiwanych konceptów z zastosowaniem teorii zbiorów przybliżonych. Dolne przybliżenia są rozłączne i ponadto nie przecinają się z górnymi przybliżeniami pozostałych konceptów

Parametr π_{styl} precyzji przybliżenia, w przypadku badania oceny *styl*, ustalony został na 0,57, a $\pi_{płynność}$ dla oceny *płynność* na 0,53. Obiekty o atrybutach *alfa*, *beta* klasyfikujących je do dolnego przybliżenia i do obszaru granicznego odpowiednich konceptów zaznaczone są kolorami na rys. 4.31 i 4.32 poniżej, gdzie kolorem zielonym oznaczono obiekty należące do przybliżenia dolnego, szarym zaś obiekty obszaru granicznego. Suma obu tych obszarów oznacza przybliżenie górne. Zaznaczone na rysunku kolorem zielonym położenie przybliżeń dolnych koresponduje z obszarami o najwyższych częstościach odpowiedzi, oznaczonymi w tabelach 4.6 ÷ 4.11 na str. 121 i 122.



Rys. 4.31. Przynależność obiektów opisanych atrybutami *alfa* i *beta* do konceptów różnych stopni płynności. Kolor zielony – objekty przybliżenia dolnego, szary – objekty obszaru granicznego



Rys. 4.32. Przynależność obiektów opisanych atrybutami *alfa* i *beta* do konceptów różnych stopni naturalności. Kolor zielony – objekty przybliżenia dolnego, szary – objekty obszaru granicznego

Miara jakości przybliżenia wyrażona jako:

$$\alpha_B(X) = |\underline{BX}| / |\overline{BX}| = |\underline{BX}| / (|\underline{BX}| + |BN_B(X)|), \quad (4.36)$$

dla $\pi_{styl}=1$ i $\pi_{płynność}=1$ dla oceny „styl” równa jest:

$$\alpha_B(X^{\text{naturalny}}) = \alpha_B(X^{\text{komiksowy}}) = \alpha_B(X^{\text{pośredni}}) = 0,$$

zaś dla oceny „płynność” równa jest:

$$\alpha_B(X^{\text{płynna}}) = \alpha_B(X^{\text{skokowa}}) = \alpha_B(X^{\text{pośrednia}}) = 0.$$

Wynik ten uzyskany jest z powodu pustości dolnych przybliżeń konceptów, które są wówczas B -niedefiniowalne.

Dla precyzji $\pi_{styl}=0,57$ i $\pi_{płynność}=0,53$ przyjętych powyżej dla oceny „styl” uzyskiwane jest:

$$\begin{aligned} \alpha_B(X^{\text{naturalny}}) &= 0,5, \\ \alpha_B(X^{\text{komiksowy}}) &= 0,457, \\ \alpha_B(X^{\text{pośredni}}) &= 0, \end{aligned}$$

dla oceny „płynność” z kolei:

$$\begin{aligned} \alpha_B(X^{\text{płynna}}) &= 1, \\ \alpha_B(X^{\text{skokowa}}) &= 1, \\ \alpha_B(X^{\text{pośrednia}}) &= 0,714. \end{aligned}$$

Wartości te pokazują skuteczność przybliżenia, porównując ilość obiektów będących wewnątrz dolnego przybliżenia do ilości obiektów wewnątrz górnego przybliżenia (4.36). Jeśli obszar graniczny $BN_B(X) = \overline{BX} \setminus \underline{BX}$ jest pusty, przybliżenie jest idealne, $\alpha_B(X)=1$. Jeśli zaś \underline{BX} jest puste, koncept jest całkowicie niedeterministyczny i $\alpha_B(X)=0$.

Rozwiązanie opisane powyżej, o precyzjach przybliżeń π_{styl} i $\pi_{płynność}$, traktowane jest jako globalne przybliżenie konceptów. Rozwiązanie to jest punktem wyjścia do wyznaczania rozwiązań lokalnych – obiektów reprezentatywnych dla zadanej pary wejściowych zmiennych lingwistycznych styl i płynność.

Generowanie reguł

Wyznaczając część wspólną dolnych przybliżeń konceptów *styl* i *płynność* dla zadanych wartości ocen, np. $styl=naturalny \wedge animacja=płynna$, uzyskuje się zbiory obiektów opisanych parami współczynników amplitudowych i czasowych *alfa*, *beta*. Elementami zbiorów są animacje ocenione przez widzów w zadany sposób.

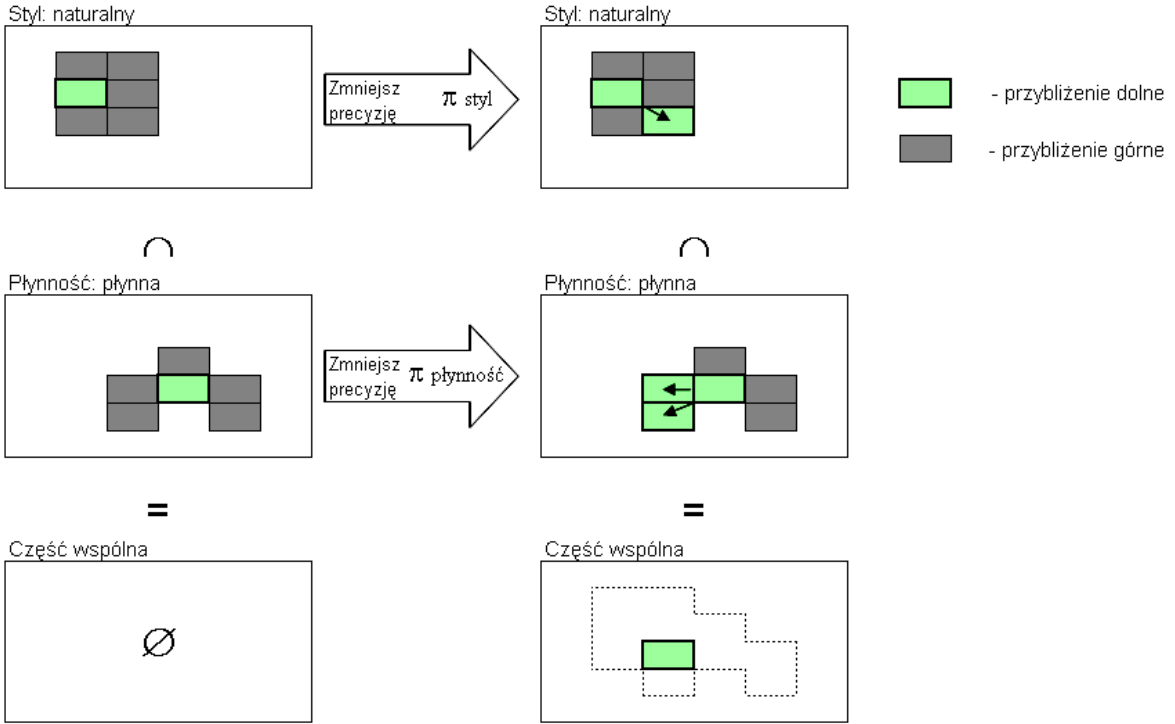
Poprzez znalezienie obiektów należących do części wspólnych każdego połączenia dolnych przybliżeń konceptów *stylu* i *płynności*, uzyskiwana jest baza reguł typu:

JEŻELI $styl=x$ AND $płynność=y$ TO współczynniki= $\{(alfa_1, beta_1), \dots, (alfa_n, beta_n)\}$, które w następnikach reguł wskazywać mogą na jedną lub więcej par współczynników.

Jeżeli dla zadanego $styl=x$ i $płynność=y$ część wspólna dolnych przybliżeń konceptów jest pusta (brak współczynników *alfa*, *beta*), to wartości parametrów dokładności przybliżenia π_{styl} i $\pi_{płynność}$ są zmniejszane, aż część wspólna nie będzie niepusta. W jednym kroku zmniejszane są wartości obydwu parametrów dokładności o taką wartość, która zwiększy moc analizowanego dolnego przybliżenia danego konceptu dla każdego konceptu. Oznacza to, że π_{styl} jest zmniejszane do wartości, która spowoduje powiększenie mocy dolnego przybliżenia konceptu $styl=x$, a $\pi_{płynność}$ zmniejszane jest do wartości, która spowoduje powiększenie mocy dolnego przybliżenia konceptu $płynność=y$. Jeśli część wspólna konceptów jest nadal pusta, zmniejszanie obu współczynników dokładności przybliżeń jest powtarzane, do czasu, gdy część wspólna konceptów będzie niepusta. Po znalezieniu obiektu(-ów) reprezentujących łączny koncept $styl=x \wedge płynność=y$ parametry π_{styl} i $\pi_{płynność}$ przyjmują poprzednie wartości, przyjęte dla globalnie wyznaczonych przybliżeń i następuje poszukiwanie części wspólnej dla kolejnej kombinacji wartości *styl* i *płynność*. Powyższe postępowanie przedstawione jest graficznie na rys. 4.33, który zawiera pseudokod algorytmu i przykład wyznaczania części wspólnej dwu zbiorów przybliżonych. Na rysunku graficznie pokazane są zbiory przybliżone przed zmniejszeniem wartości parametrów dokładności przybliżeń i po ich zmniejszeniu.

Jeśli w toku powyższego postępowania uzyskana została więcej niż jedna para współczynników *alfa*, *beta*, to w celu podjęcia ostatecznej decyzji uwzględniane jest dodatkowe kryterium maksymalnej oceny ogólnej **Q** dla danej pary *alfa*, *beta*, zgodnie z wnioskami uzyskanymi w dyskusji nad istnieniem rozwiązania (rozdział 4.2.1).

1. Wybierz niesprawdzoną kombinację styl i płynność.
2. Sprawdź przecięcie konceptów styl i płynność.
3. Przecięcie niepuste?
 - a. TAK: Wybierz obiekt o najwyższym Q , zwróć *alfa* i *beta* obiektu
 - b. NIE: Zmniejsz π tak, aby zwiększyć moc konceptów styl i płynność.
Idź do 2.
4. Czy są niesprawdzone kombinacje styl i płynność?
 - a. TAK: Idź do 1.
 - b. NIE: Koniec



Rys. 4.33. Graficzna reprezentacja algorytmu poszukiwania części wspólnej konceptów przybliżonych z wykorzystaniem zmiennej precyzji

Dane uzyskane w teście subiektywnym po przeprowadzeniu opisywanego powyżej postępowania poszukiwania rozwiązań dostępne są w postaci reguł:

$$\text{JEŻELI styl}=x \text{ AND płynność}=y \text{ TO współczynniki}=(\text{alfa},\text{beta}) \quad (4.37)$$

Baza reguł o powyższej postaci przedstawiona jest poniżej (tabela 4.12). Zostały one wyznaczone w oparciu o wyniki testu subiektywnego i algorytm z rys. 4.33.

Tabela 4.12. Reguły nieprzetworzone uzyskane w eksperymencie:

- a) wyznaczanie wartości współczynnika *alfa* na podstawie zmiennych styl i płynność,
 b) wyznaczanie wartości współczynnika *beta* na podstawie zmiennych styl i płynność

a)

		<i>alfa</i>		
		płynność		
		skokowa	pośrednia	płynna
styl	naturalny	0,7	0,5	0,3
	pośredni	0,9	0,7	0,5
	komiksowy	1,3	1,1	0,9

b)

		<i>beta</i>		
		płynność		
		skokowa	pośrednia	płynna
styl	naturalny	3	5	7
	pośredni	1	5	5
	komiksowy	3	5	7

Pomimo, iż określono zależność współczynników amplitudowych i czasowych *alfa* i *beta* od *stylu* i *płynności* animacji (4.37) (tabela 4.12) oraz bezpośrednią zależność dA i dt od *alfa* i *beta* (4.21) i (4.22), w systemie wnioskowania nie są wykorzystywane reguły typu:

$$\text{JEŻELI styl}=x \text{ AND płynność}=y \text{ TO } \alpha, \quad (4.38)$$

$$\text{JEŻELI styl}=x \text{ AND płynność}=y \text{ TO } \beta, \quad (4.39)$$

gdyż reguły takie są trudne w interpretacji dla animatora. Współczynniki *alfa*, *beta* wyrażane są w jednostkach [klatka/kąt], mają fizyczny sens odwrotności prędkości kątowej, a takie wielkości fizyczne nie występują w praktyce pracy nad animacją. Ponadto wyznaczenie w module wnioskowania tylko wartości *alfa* i *beta* wymagałoby późniejszego uwzględnienia poza systemem wnioskowania nasycania się wartości dA i dt do ich maksimum, co wyrażają zależności (4.21) i (4.22). Logika rozmyta pozwala operacje deterministyczne opisać w postaci odpowiednich reguł i rozważane nasycanie realizowane może być wewnątrz systemu wnioskowania. W przypadku konieczności dostrajania systemu, jest dostępna możliwość wpływania na charakterystykę nasycenia poprzez modyfikację reguł.

Z kolei warto w tym miejscu przypomnieć o konieczności obliczenia poza systemem wnioskowania niedeterministycznych parametrów fazy zatrzymania, która zawierać ma losowe wahania o rozkładzie zależnym od wyniku wnioskowania, a dokładnie od amplitudy fazy przerzutu.

W zaprojektowanym systemie wnioskowania na wejściu są podawane wektor \mathbf{A}_i i \mathbf{J} , na wyjściu systemu oczekiwany jest natomiast wektor \mathbf{B}_i parametrów faz dodatkowych animacji. Dlatego też wymagane jest przekształcenie reguł (4.37) do poniższej postaci:

$$\text{JEŻELI styl}=x \text{ AND płynność}=y \text{ AND } V_i=x \text{ AND } t_i= x \text{ AND } A_i=x \text{ TO } dt=x \quad (4.40)$$

$$\text{JEŻELI styl}=x \text{ AND płynność}=y \text{ AND } V_i=x \text{ AND } t_i= x \text{ AND } A_i=x \text{ TO } dA=x \quad (4.41)$$

i ponadto:

$$dt_o=dt_a=dt \quad (4.42)$$

$$dA_o=dA_a=dA \quad (4.43)$$

Procedura wyznaczania reguł (4.40) i (4.41) przedstawiona jest w postaci pseudokodu na rys. 4.34.

1. Na podstawie funkcji przynależności ustal nowe reprezentatywne wartości $styl=s$ i $płynność=p$
2. Wylicz na podstawie zadanych $styl$ i $płynność$ wartości $alfa$ i $beta$, jeśli trzeba to zmniejsz precyzję przybliżenia, zmieniając parametry π_{styl} i $\pi_{płynność}$
3. Jeżeli odnaleziona jest wiele par $alfa, beta$ wybierz tę, dla której w testach uzyskana była największa ocena jakości animacji \mathbf{Q}
4. Na podstawie funkcji przynależności ustal nowe reprezentatywne wartości parametrów ruchu zapisanych w postaci wektora $\mathbf{A}_i=\{A_i, V_i, t_i\}$
5. Na podstawie zadanych $\mathbf{A}_i, alfa$ i $beta$ wylicz wartości $\mathbf{B}_i=\{dt, dA\}$, korzystając ze wzorów: $dA=f(alfa \cdot V_i \cdot A_i)$, $dt=g(beta \cdot V_i \cdot t_i)$.
6. Utwórz odpowiednią regułę JEŻELI $styl=s$ AND $płynność=p$ AND $A_i=a$ AND $V_i=V$ AND $t_i=t$ TO $\mathbf{B}_i=\{ \}$
7. Jeżeli są jeszcze niewykorzystane \mathbf{A}_i , przejdź do 4.
8. Jeżeli są jeszcze niewykorzystane wartości parametrów $styl$ i $płynność$ przejdź do 1.
9. Koniec generowania reguł.

Rys. 4.34. Pseudokod algorytmu generowania reguł

W trakcie generowania reguł wybierana jest tylko jedna reguła na każdą kombinację zmiennych wejściowych $\mathbf{A}_i, alfa$ i $beta$. Jeżeli w systemie występowałyby

wiele sprzecznych reguł o tych samych przesłankach, ale różnych konkluzjach, byłby to model relacyjny, który jest mniej czytelny dla użytkownika i mniej przejrzysty. Model wygenerowany powyższym algorytmem nie jest relacyjny, zawiera tylko jedną, prawdziwą regułę dla każdej kombinacji wartości atrybutów w przesłance reguły.

Reguły występujące w bazie reguł tworzą tzw. punkty podparcia modelu, pomiędzy nimi zaś powierzchnia modelu kształtuje się w sposób ciągły, dzięki właściwościom interpolacyjnym wnioskowania rozmytego. Reguły uzyskane poprzez wykorzystanie algorytmu przedstawionego na rys. 4.34 i funkcji przynależności zmiennych wyjściowych dA i dt z rys. 4.21 i 4.22 przedstawione są poniżej w postaci zestawień w tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Reguły w systemie logiki rozmytej wykorzystywane w wyznaczaniu wartości dA i dt w zależności od A_i , V_i i t_i dla różnych kombinacji zmiennych wejściowych *styl* i *płynność* animacji. Pośrednio wartości te są uzależnione od współczynników *alfa* i *beta*

<i>alfa</i> =0,3	$dA=$	V_i					
			mała	średnia	duża	b.duża	
		A_i	mała	mf1	mf1	mf2	mf3
			średnia	mf2	mf2	mf3	mf5
			duża	mf2	mf3	mf4	mf6
b.duża	mf2		mf3	mf4	mf7		
Animacja: styl=naturalny i płynność=płynna							
<i>alfa</i> =0,5	$dA=$	V_i					
			mała	średnia	duża	b.duża	
		A_i	mała	mf1	mf2	mf2	mf4
			średnia	mf2	mf3	mf5	mf8
			duża	mf2	mf4	mf6	mf8
b.duża	mf3		mf4	mf7	mf9		
Animacja: styl=naturalny, płynność=średnia lub styl=pośredni i płynność=płynna							
<i>alfa</i> =0,7	$dA=$	V_i					
			mała	średnia	duża	b.duża	
		A_i	mała	mf1	mf2	mf3	mf4
			średnia	mf2	mf4	mf6	mf8
			duża	mf3	mf5	mf7	mf9
b.duża	mf3		mf6	mf8	mf10		
Animacja: styl=naturalny, płynność=skokowa lub styl=pośredni, płynność=średnia							
<i>alfa</i> =0,9	$dA=$	V_i					
			mała	średnia	duża	b.duża	
		A_i	mała	mf2	mf2	mf3	mf5
			średnia	mf3	mf5	mf7	mf9
			duża	mf3	mf6	mf8	mf10
b.duża	mf4		mf7	mf8	mf10		
Animacja: styl=pośredni, płynność=skokowa lub styl=komiksowy, płynność=płynna							

<i>alfa=1,1</i>	<i>dA=</i>	<i>V_i</i>					
			<i>mała</i>	<i>średnia</i>	<i>duża</i>	<i>b.duża</i>	
		<i>A_i</i>	<i>mała</i>	mf2	mf3	mf4	mf6
			<i>średnia</i>	mf3	mf6	mf8	mf10
			<i>duża</i>	mf4	mf7	mf8	mf10
<i>b.duża</i>	mf4		mf8	mf9	mf11		
Animacja: styl=komiksowy, płynność=średnia							

<i>alfa=1,3</i>	<i>dA=</i>	<i>V_i</i>					
			<i>mała</i>	<i>średnia</i>	<i>duża</i>	<i>b.duża</i>	
		<i>A_i</i>	<i>mała</i>	mf2	mf3	mf4	mf7
			<i>średnia</i>	mf4	mf7	mf8	mf10
			<i>duża</i>	mf4	mf8	mf9	mf11
<i>b.duża</i>	mf5		mf8	mf9	mf11		
Animacja: styl=komiksowy, płynność=skokowa							

<i>beta=1</i>	<i>dt=</i>	<i>t_i</i>					
			<i>krótki</i>	<i>średni</i>	<i>długi</i>	<i>b.długi</i>	
		<i>V_i</i>	<i>mała</i>	mf1	mf2	mf2	mf3
			<i>średnia</i>	mf1	mf2	mf3	mf3
			<i>duża</i>	mf1	mf2	mf3	mf3
<i>b.duża</i>	mf1		mf2	mf3	mf3		
Animacja: styl=pośredni, płynność=skokowa							

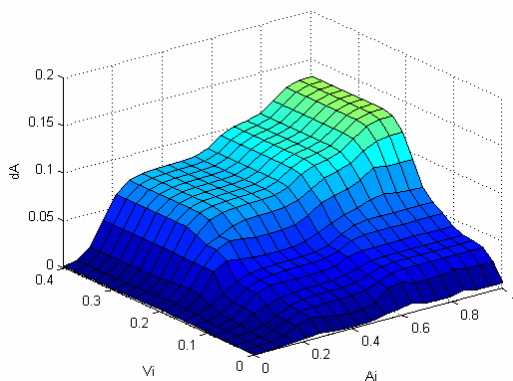
<i>beta=3</i>	<i>dt=</i>	<i>t_i</i>					
			<i>krótki</i>	<i>średni</i>	<i>długi</i>	<i>b.długi</i>	
		<i>V_i</i>	<i>mała</i>	mf1	mf3	mf4	mf5
			<i>średnia</i>	mf1	mf4	mf5	mf5
			<i>duża</i>	mf1	mf4	mf5	mf5
<i>b.duża</i>	mf1		mf4	mf5	mf5		
Animacja: styl=naturalny, płynność=skokowa lub styl=komiksowy, płynność=skokowa							

<i>beta=5</i>	<i>dt=</i>	<i>t_i</i>					
			<i>krótki</i>	<i>średni</i>	<i>długi</i>	<i>b.długi</i>	
		<i>V_i</i>	<i>mała</i>	mf1	mf4	mf6	mf7
			<i>średnia</i>	mf1	mf6	mf7	mf8
			<i>duża</i>	mf1	mf6	mf7	mf8
<i>b.duża</i>	mf1		mf6	mf7	mf8		
Animacja: styl dowolny, płynność=średnia lub styl=pośredni, płynność= płynna							

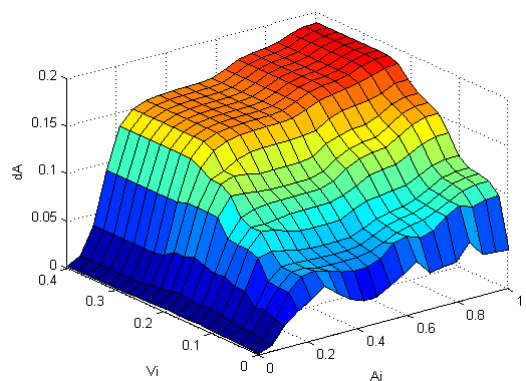
<i>beta=7</i>	<i>dt=</i>	<i>t_i</i>					
			<i>krótki</i>	<i>średni</i>	<i>długi</i>	<i>b.długi</i>	
		<i>V_i</i>	<i>mała</i>	mf1	mf6	mf8	mf9
			<i>średnia</i>	mf1	mf8	mf9	mf10
			<i>duża</i>	mf1	mf8	mf9	mf10
<i>b.duża</i>	mf1		mf8	mf9	mf10		
Animacja: styl=naturalny, płynność=płynna lub styl=komiksowy, płynność=płynna							

Analiza powierzchni interpolacyjnych przedstawionych na rys. 4.35 wykazuje niewielką zależność zmiennej wyjściowej dt od zmiennej wejściowej V_i . Konkluzje reguł wyznaczania dt faktycznie posiadają identyczną wartość dla $V_i=średnia$, $V_i=duża$ i $V_i=b. duża$, co zaobserwować można w tabeli 4.13. W związku z tym można zredukować liczbę zbiorów rozmytych opisujących dziedzinę zmienności V_i , o funkcje V_i duża i V_i b. duża,

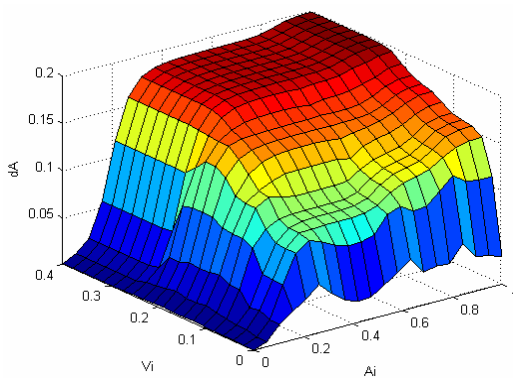
których nośniki rozmieszczone są w przedziałach $(0,075; 0,25)$ i $(0,15; 0,4)$, uzyskując dzięki temu drastyczne zmniejszenie liczby reguł systemu. Niska wartość informacyjna tych wartości zmiennej *prędkość* w połączeniu z trudnością określenia funkcji przynależności w teście subiektywnym (patrz: histogram ocen prędkości rys. 4.18, str. 109) potwierdzają spostrzeżenie o braku konieczności uwzględniania całego zakresu zmienności prędkości. Możliwe jest skuteczne rozpoznanie pomiędzy prędkościami *małą* i *średnią* i tylko te dwie wartości mają wpływ na przesłanki w wyznaczonych regułach.



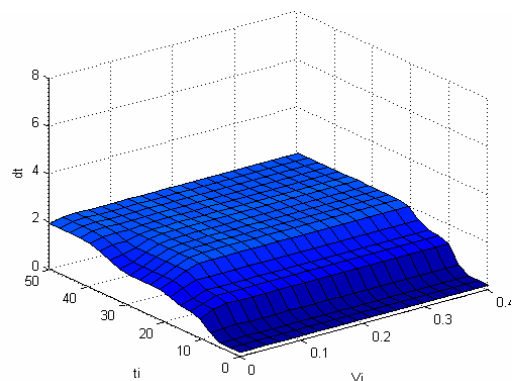
a) Styl naturalny, animacja płynna



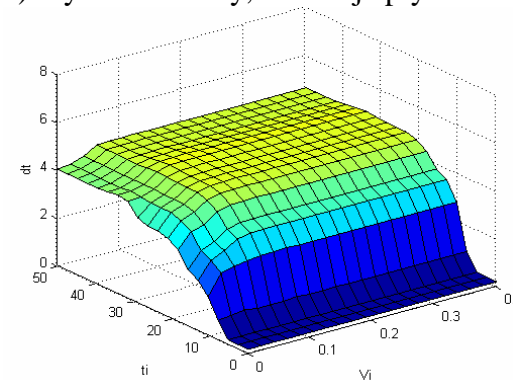
b) Styl pośredni, średnia płynność



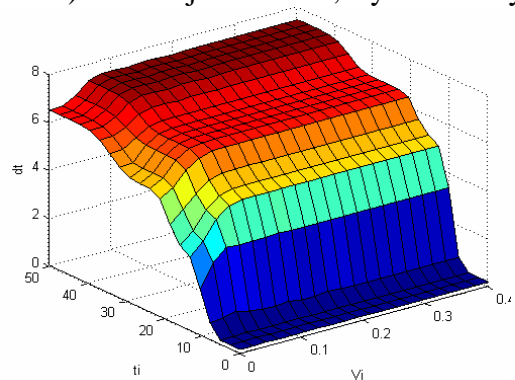
c) Styl komiksowy, animacja płynna



d) Animacja skokowa, styl naturalny



e) Średnia płynność, styl dowolny



f) Wysoka płynność, styl naturalny

Rys. 4.35. Płaszczyzny modelu rozmytego przedstawiające zależności dA od V_i i A_i oraz dt od t_i i V_i , dla kilku wybranych kombinacji parametrów *styl* i *płynność*

Docelowe reguły wyznaczania dt uzyskane po redukcji liczby zbiorów rozmytych opisujących zmienną wejściową prędkości V_i , wykorzystywane we wspomaganii animacji, przedstawione są poniżej (tabela 4.14).

Tabela 4.14. Docelowe reguły wyznaczania wartości dt

$beta=1$	$dt=$	t_i	krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf2	mf2	mf3
				średnia	mf1	mf2	mf3	mf3
Animacja: styl=pośredni, płynność=skokowa			krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf3	mf4	mf5
				średnia	mf1	mf4	mf5	mf5
$beta=3$	$dt=$	t_i	krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf4	mf6	mf7
				średnia	mf1	mf6	mf7	mf8
Animacja: styl=dowolny, płynność=średnia lub styl=pośredni, płynność=płynna			krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf6	mf8	mf9
				średnia	mf1	mf8	mf9	mf10
$beta=5$	$dt=$	t_i	krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf8	mf9	mf10
				średnia	mf1	mf8	mf9	mf10
Animacja: styl=naturalna płynność=płynna lub styl=komiksowa płynność=płynna			krótki	średni	długi	b.długi		
			V_i	mała	mf1	mf6	mf8	mf9
				średnia	mf1	mf8	mf9	mf10

Parametry fazy zatrzymania, jak zostało to opisane w rozdziale 5.1.3, przyjmują stałe wartości równe:

$$\begin{aligned}
 dA_h &= 0,77 \\
 dA_{dh} &= 0,25 \\
 dt_h &= 8 \\
 dt_{dh} &= 2,
 \end{aligned}
 \tag{4.44}$$

natomiast średnia amplituda wahań dla klatek kluczowych fazy zatrzymania wyznaczana jest jako $A_h = dA_o \cdot dA_h$ (4.25). Parametry zawarte w wektorze \mathbf{B}_i wyznaczone przez system wnioskowania oraz powyższe parametry fazy zatrzymania uwzględniane są w procesie

wstawiania do segmentu animacji nowych klatek kluczowych, co zostało opisane w rozdziałach 4.1.2 i 4.1.3.

4.3.2. Ocena uzyskanych reguł

Poniżej przytoczone są wnioski dotyczące wyznaczonej bazy reguł. Omówione i skomentowane są najważniejsze uzyskane cechy modelu rozmytego: kompletność i niesprzeczność.

Zastosowanie odpowiednio dobranych funkcji przynależności dwustronnie gaussowskich, pozwoliło w przybliżeniu spełnić warunek sumowania do jedności, który zwykle gwarantuje gładszą powierzchnię modelu w porównaniu modelami z funkcjami niespełniającymi tego warunku. Warunek sumowania do jedności polega na tym, iż dla każdej wartości x jej wartości przynależności do każdego zbioru rozmytego sumują się do jedności:

$$\forall x \text{ zachodzi: } \sum_i \mu_i(x) = 1 \quad (4.45)$$

Uzyskany w rozprawie model rozmyty jest kompletny, co oznacza, iż dla każdego stanu wejść istnieje stan wyjściowy systemu wnioskowania. Było to możliwe do spełnienia dzięki wygenerowaniu reguły dla każdej kombinacji lingwistycznych zmiennych wejściowych. Ponadto model jest niesprzeczny, czyli nie występują w nim reguły o identycznych przesłankach i różnych konkluzjach. Spełnienie tego kryterium uzyskano dzięki wyznaczeniu dokładnie jednej reguły dla każdej z możliwych kombinacji stanów wejściowych.

W trakcie budowania modelu zakładano, że nie występuje konieczność ekstrapolacji jego działania poza przyjęte zakresy zmiennych wejściowych. Możliwe jest podanie na wejściu wartości spoza zakresu, jednak przed operacją rozmycia zostaną im przypisane wartości wynikające z obcięcia zmienności do założonej dziedziny i wygenerowana zostanie odpowiedź modelu.

W przeciwieństwie do modelu w pełni mentalnego, jak nazywany jest model tworzony na bazie wiedzy i przekonań eksperta, a nie w oparciu o obiektywne pomiary, stworzony system charakteryzuje się:

- kompletnością bazy reguł,
- niesprzecznością reguł,

– posiada wiele wejść, co w przypadku tworzenia modelu mentalnego jest dla eksperta zadaniem trudnym do wykonania.

4.3.3. *Transkrypcja reguł z języka naturalnego i modyfikacja reguł*

Reguły uzyskane w ramach prowadzonego w poprzednich podrozdziałach postępowania są czytelną reprezentacją wiedzy wydobytej w sposób algorytmiczny z danych uczących. Intuicyjnie poprawna wydaje się być przykładowa reguła:

„Jeżeli animacja ma być naturalna i płynna, a amplituda ruchu głównego jest mała i jego prędkość jest mała i czas trwania jest średni, to amplitudy antycypacji i przerzutu powinny być małe, a ich długość średnia.”

Powyższe zdanie utworzone jest na podstawie reguł w logice rozmytej, reprezentujących pozyskaną wiedzę:

JEŻELI styl=naturalny AND płynność=duża AND V_i =mała AND t_i =średni TO dt =mf6 (4.46)

JEŻELI styl=naturalny AND płynność=duża AND A_i =mała AND V_i =mała TO dA =mf1(4.47)

Może zająć potrzeba modyfikowania zbioru reguł np. na podstawie wyników nowych testów oceny subiektywnej lub poprzez rekursywne dostrajanie systemu wnioskowania, albo też wprowadzanie reguł, pochodzących nie z wyników testów z udziałem dużej liczby osób, ale z subiektywnego przekonania aktualnego użytkownika aplikacji. Konieczne jest wówczas sformułowanie przez użytkownika reguł w języku naturalnym i następnie ich transkrypcja na reguły rozmyte. W regułach animatora powinny zostać użyte odpowiednie zmienne i wartości lingwistyczne. Dopuszczalne są tylko takie, które reprezentowane są w formie odpowiednich funkcji przynależności. W związku z tym, stosowane przez użytkownika określenia opisowe dla zmiennych wyjściowych dt i dA powinny zostać zamienione na nazwy typu „mf n r” funkcji przynależności obecnych w systemie. Jednakże w ramach rozprawy nie zrealizowano dokładnego subiektywnego opisu zakresów zmienności dt i dA , który mógłby posłużyć do wnioskowania rozmytego w miejsce funkcji mf n r.

Możliwe jest powtarzanie całego postępowania przedstawionego w rozprawie, prowadzącego do wytworzenia reguł, automatycznie za każdym razem, gdy projektowana jest przez animatora nowa animacja. Efekt działania systemu, animacja wynikowa, wzbogacona o nowe fazy, może być w takim przypadku oceniona przez animatora, który wskazać może stopień spełnienia oczekiwań i ocenić uzyskane w animacji styl i płynność,

czyli określić wartość funkcji oceny $f_A(\mathbf{B})=J$. Brak równości między wartością funkcji oceny animatora i wynikami zrealizowanych testów subiektywnych wskazałaby na to, że *alfa* i *beta*, przy zadanych wartościach oczekiwanych *stylu* i *płynności*, wyznaczone są niepoprawnie i prowadzą do wyliczenia nieprawidłowego wektora \mathbf{B} . Odpowiedź animatora, dodana do zgromadzonych wcześniej danych, wpływa w procesie generowania reguł na wyznaczenie nowych reguł. Odpowiedź animatora może zastąpić wcześniej otrzymaną odpowiedź dla tej samej pary \mathbf{A} , \mathbf{B} lub być dodana do bazy wiedzy z wagą wyższą od ocen zgromadzonych wcześniej w teście. Korekta algorytmu wyznaczania parametrów faz wzbogacających daną animację może następować poprzez zmiany wartości *alfa* i *beta* w zależnościach (4.38) i (4.39). Mianowicie, jeżeli *styl* wynikowej animacji jest oceniony jako zbyt komiksowy w porównaniu do oczekiwań animatora, to koncepty pozostałych wartości *stylu*: naturalny lub pośredni powinny zostać zmienione, aby obejmować te *alfa* i *beta*, dla których wygenerowano oceniony wynik. Koncept ruchu o *stylu* komiksowym powinien z kolei zostać zmieniony tak, aby tych wartości *alfa* i *beta* nie obejmował.

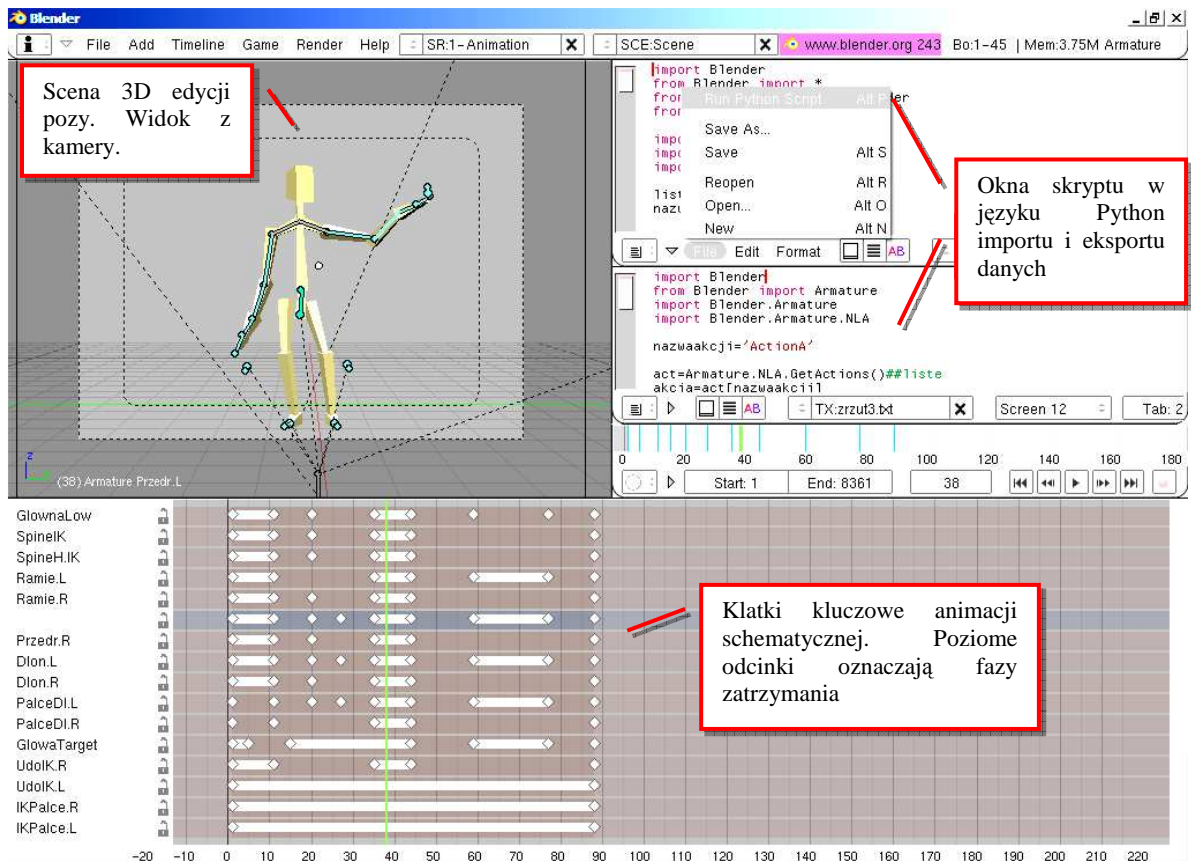
4.4. Wykorzystanie reguł do wzbogacania animacji

Zgodnie z praktyką animacji „od pozy do pozy”, pierwszym zadaniem animatora jest zwykle zaprojektowanie animatiku, filmu składającego się z nieruchomych szkiców, wyświetlanych tak długo, jak trwa dane ujęcie. Projekt ten uwzględnia wytyczne reżysera. Zwykle też na tym etapie dostępna jest już dialogowa ścieżka dźwiękowa, do której mogą być synchronizowane ujęcia. Następnie każde ujęcie dzielone jest na pozy postaci, powstaje animacja schematyczna, w której poza podtrzymywana jest przez określony czas i z odpowiednią prędkością przekształca się w pozę kolejną. Na tym etapie możliwe jest wykorzystanie aplikacji wspomagającej tworzenie animacji, wykorzystującej system wnioskowania zaprojektowany w rozprawie.

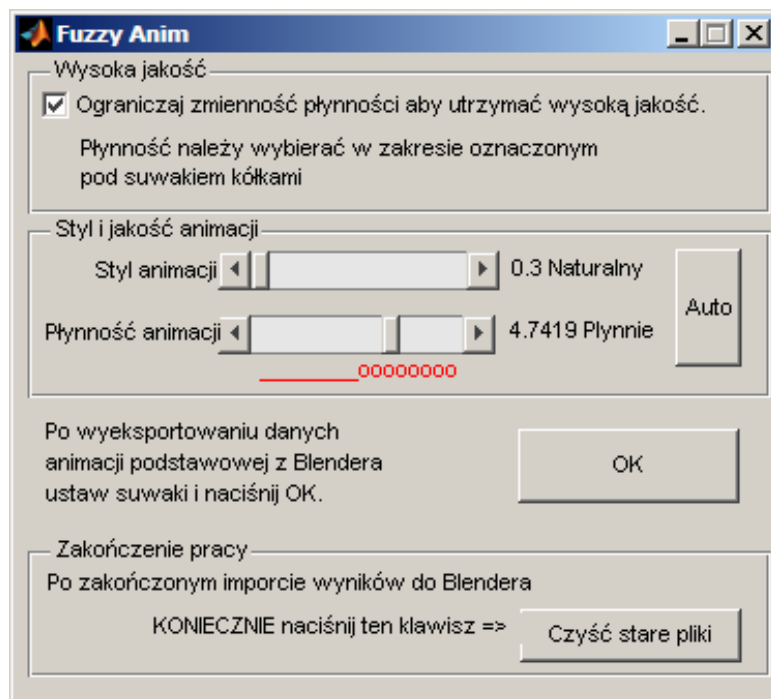
Zrealizowana w ramach rozprawy aplikacja wzbogacania animacji wykorzystuje środowisko Matlab i oprogramowanie do animacji 3D – Blender [13][88]. Z punktu widzenia implementacji najważniejszą zaletą systemu Blender jest możliwość rozszerzania funkcjonalności programu poprzez skrypty przygotowane w języku Python [63]. W Matlabie zaimplementowany został system wnioskowania realizujący przetwarzanie rozmyte danych animacji. W celu połączenia środowiska animacji i Matlaba napisane

zostały skrypty eksportujące i importujące dane animacji z i do środowiska Blender. Eksportowane dane zapisywane są w zewnętrznym pliku w formacie odczytywanym przez system wnioskowania. Z kolei w procesie przetwarzania rozmytego generowany jest plik z danymi animacji wynikowej, który importowany jest do systemu Blender, gdzie możliwe jest uruchomienie animacji i ewentualnie jej dalsza edycja.

Na rys. 4.36 przedstawiony jest wygląd okna środowiska Blender w trakcie pracy ze zrealizowanym systemem wzbogacania animacji. Praca animatora z systemem przebiega w następujący sposób: schematyczna animacja projektowana jest w systemie Blender lub otwierana z istniejącego pliku i wykonywany jest skrypt eksportujący dane. W środowisku Matlab otwierany jest plik z danymi animacji. Animacja schematyczna jest poddawana obróbce wstępnej przez algorytm zaprojektowany w rozprawie, następnie dzielona jest na segmenty, rozpoczynające się i kończące fazami zatrzymania. Segmenty są parametryzowane, wyznaczone są wektory opisujące ruch schematyczny A_i w każdym z segmentów S_i . Uruchamiany jest interfejs użytkownika przedstawiony na rys. 4.37. Pożądane przez animatora wartości *płynności* i *stylu* ustalane są za pomocą suwaków, które posiadają oznaczenia skrajnych wartości podane w sposób lingwistyczny: minimalne ustawienie suwaka *styl* to styl *naturalny*, maksymalne – *komiksowy*. Przesuwanie w prawo zmienia animację stopniowo w coraz bardziej przejaskrawioną, w lewo zaś w animację naturalną. Podobnie przebiega ustalenie wartości parametru *płynność* pomiędzy animacją *skokową* a *płynną*. Ostre wartości parametrów ustawionych suwakami są rozmywane i razem z parametrami A_i podawane są na wejście systemu wnioskowania. Na podstawie reguł rozmytych, które występują w systemie, wyznaczany jest wektor parametrów $B_i = \{dA, dt\}$, opisujących cechy nowych faz ruchu, wzbogacających animację dla każdego segmentu animacji S_i . Wyznaczane są na ich podstawie dodatkowe fazy antycypacji, przerzutu i zatrzymania. Segmenty wzbogacone nowymi fazami łączone są we wzbogaconą animację wyjściową. W programie Blender wynikowy plik z danymi animacji wzbogaconej jest importowany i zastępuje on animację schematyczną.



Rys. 4.36. Interfejs użytkownika w programie do animacji i grafiki 3D, opracowany w środowisku Blender



Rys. 4.37. Interfejs użytkownika modułu generowania animacji wzbogaconych opracowanej aplikacji

W interfejsie użytkownika pod suwakami parametrów wprowadzona jest dodatkowa sugestia, wskazująca kolorem, jaki zakres wartości płynności animacji należy wykorzystywać w celu utrzymania wysokiej jakości wynikowej.

Klawisz „Auto” pozwala generować serię 36 animacji do oceny, o *stylu i płynności* zmienianych w 6 równych krokach. Animacje te są poddawane ocenie subiektywnej w celu weryfikacji poprawności zaproponowanego postępowania. Etap oceny wyników opisany jest w rozdziale 5.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostały procedury wyznaczania reguł rozmytych zawierających wiedzę o doborze odpowiednich wartości parametrów animacji, które skutkują subiektywnym wzbogaceniem animacji o pożądane cechy płynności ruchu i stylizacji. Opisano sposób przetworzenia danych z testów subiektywnych w celu wyznaczenia zbiorów parametrów, które związane są z animacjami ocenianymi w pożądanym sposób. Przedstawiono procedury wyznaczania funkcji przynależności zmiennych i generowania reguł rozmytych z danych. W ten sposób udowodniona została **teza 2. rozprawy:**

Logika rozmyta może być stosowana jako narzędzie przetwarzania reguł opisujących animację w procesie generowania animowanych gestykulacji.

W rozdziale kolejnym opisano sposób przeprowadzenia testu subiektywnej oceny uzyskiwanych animacji oraz przedstawiono wyniki i wnioski.

5. TESTY SUBIEKTYWNE

Celem rozdziału jest przedstawienie procedury testów i wyników testów subiektywnej **weryfikacji poprawności działania** zrealizowanego systemu rozmytego wspomagającego wykonywanie animacji. Weryfikacja następuje w oparciu o pomiar jakości subiektywnej oraz o ocenę zdolności widzów do prawidłowego interpretowania *stylu i płynności* w animacjach wzbogaconych.

Animacje testowe, wykorzystujące uzyskane reguły i weryfikujące poprawność ich działania, przygotowywane są i oceniane pojedynczo w teście subiektywnym oceny parametrycznej.

Test parametryczny przeprowadzony został zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 3.5. W teście wzięło udział 30 uczestników, wybranych spośród studentów czwartego i piątego roku kierunku Telekomunikacja Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.

Przygotowane zostały schematyczne animacje pięciu czynności, z których każda trwa około 10 s:

- sięganie po umowny przedmiot umieszczony na wysokości oczu z dwoma fazami zatrzymania: zatrzymanie dłoni na przedmiocie, umieszczenie go przed oczyma,
- cykliczne wymachy rękoma z dwoma powtarzającymi się zatrzymaniami: w ekstremalnym wymachu rąk w pozie końcowej,
- przysiady z cyklicznymi zatrzymaniami: w przysiadzie, a następnie w wyproście,
- przeciąganie się, dwa zatrzymania: w pierwszej pozie przeciągania i w drugiej pozie przeciągania, powrót do pozy neutralnej,
- masowanie karku: zatrzymanie w pozie neutralnej startowej, zatrzymanie w pozie z dłonią na karku, powrót do pozy neutralnej.

Dla każdej z powyższych 5 czynności wygenerowane zostało 9 wersji wzbogaconych z wykorzystaniem kombinacji parametrów subiektywnych: $płynność = \{skokowa, \text{pośrednia}, \text{płynna}\}$, $styl = \{naturalny, \text{pośredni}, \text{komiksowy}\}$. Łącznie uzyskano $5 \cdot 9 = 45$ animacji wzbogaconych. Do zbioru animacji dodano **kontrolne animacje** schematyczne powyższych 5 czynności nie poddane przetwarzaniu.

We wprowadzeniu do testu uczestnikom zaprezentowano cztery wybrane animacje o skrajnie dobranych wartościach cech: animacja naturalna o pośredniej płynności, animacja komiksowa o pośredniej płynności, animacja płynna o pośrednim stylu i skokowa o pośrednim stylu. Sekwencje te zostały odtworzone kilkakrotnie z ustnym komentarzem autora w celu zaznajomienia widzów z zakresem zmienności ocenianych cech i przygotowania na obserwację faz antycypacji, przerzutu i zatrzymania.

Test prowadzony był za pomocą opracowanej aplikacji komputerowej prezentującej animacje i gromadzącej oceny. W celu ograniczenia długości trwania testu do 20 minut, pojedynczemu widzowi prezentowane było tylko 30 animacji wybranych ze zbioru 50 animacji. Realizowany przez aplikację wybór animacji do oceny prowadzony był w taki sposób, aby kolejni widzowie oceniali animacje, które do tej pory ocenione zostały najmniejszą liczbą razy. Dzięki temu po zakończeniu testów każda z 50 animacji oceniona była dokładnie 18 razy.

Ocenię poddane były następujące parametry:

- płynność ruchu – ocena słowna w skali trójstopniowej: 1 - *skokowa*, 2 - *pośrednia*, 3 - *płynna*,
- stylizacja ruchu – ocena słowna w skali trójstopniowej: 1 - *naturalna*, 2 - *pośrednia*, 3 - *komiksowa*,
- ocena ogólna jakości ruchu – ocena w skali od 1 do 5, z ciągłą zmianą wartości parametru.

Ponieważ kryteria oceny i specyfika prezentowanych materiałów były identyczne do tych, wykorzystanych wcześniej w trakcie testu oceny stopnia *płynności*, *stylizacji* i jakości, test zrealizowano stosując aplikację do prowadzenia testów subiektywnych, opisaną w rozdziale 4.3.1 na str. 113. Ocena jednej animacji dla wszystkich widzów trwała średnio 40 sekund, w tym zawarte było dwukrotne lub trzykrotne obejrzenie animacji i wystawienie oceny.

Tabela 5.1 zawiera średnie wartości oceny ogólnej jakości animacji, również z wyszczególnieniem ocen jakości uzyskiwanych przez **animacje kontrolne**, czyli schematyczne czynności nie poddawane przetwarzaniu.

Tabela 5.1. Ocena ogólna *jakości* animacji w wybranych wariantach płynności i stylu

sięganie	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	2,1	2,2	2,5
	pośrednia	3,5	3,6	3,6
	płynna	4,4	4,3	4,4
animacja kontrolna		2,1		

wymach	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	2,4	2,3	2,4
	pośrednia	3,7	3,5	2,9
	płynna	4,1	4	4,2
animacja kontrolna		1,9		

przysiad	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	2,2	2,1	2
	pośrednia	3,2	3,7	3,6
	płynna	4,6	3,8	4,3
animacja kontrolna		1,2		

przeciąganie	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	1,9	2	1,8
	pośrednia	3,9	3,4	3,8
	płynna	4,3	3,9	4,1
animacja kontrolna		1,4		

masowanie	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	1,8	1,7	1,7
	pośrednia	2,1	1,9	1,6
	płynna	3,8	3,6	3,1
animacja kontrolna		1,1		

Wszystkie animacje	ocena ogólna	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	2,08	2,06	2,08
	pośrednia	3,28	3,22	3,1
	płynna	4,24	3,92	4,02
animacja kontrolna		1,5		

Test t równości średnich przeprowadzony dla wyników animacji kontrolnych, wykazuje, iż przygotowane proste animacje stanowią próby z dwóch różnych populacji: animacji schematycznych o **niższej** wyjściowej jakości i animacji schematycznych o **wyższej** wyjściowej jakości. Wyniki oceny jakości uzyskane przez **nieprzetworzone**, schematyczne animacje przedstawione są w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Oceny uzyskane przez animacje kontrolne, nie poddane przetwarzaniu

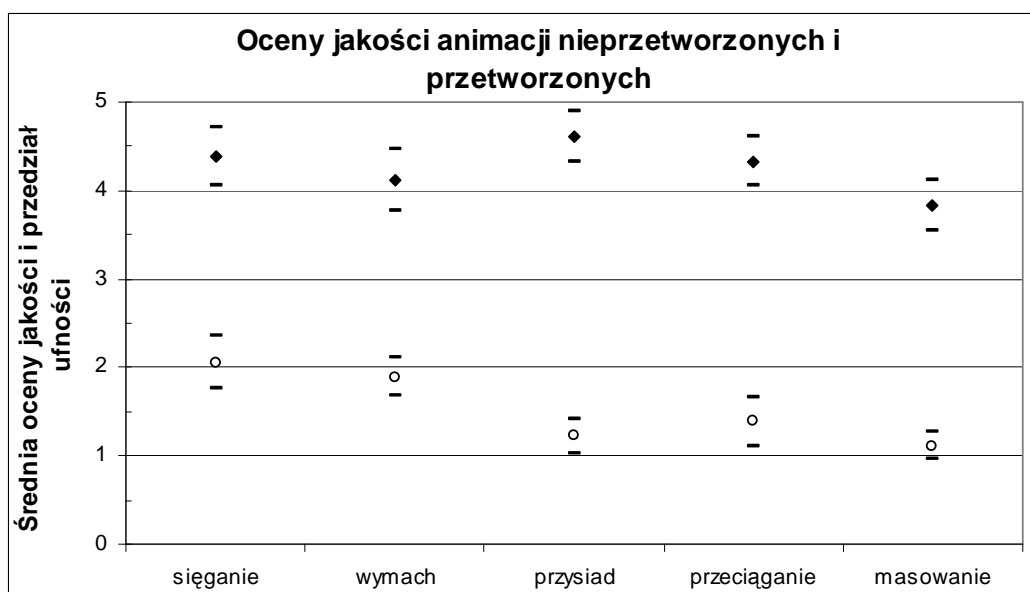
	sięganie	wymach	przysiad	przeciąganie	masowanie
1	2	2	1	2	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	1	1
4	2	2	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	2	2	2	2	1
7	2	2	1	1	1
8	2	2	1	1	1
9	3	2	1	1	1
10	2	2	2	1	1
11	1	2	1	1	1
12	2	2	1	1	1
13	2	2	1	1	1
14	3	2	1	3	1
15	2	1	1	1	2
16	2	2	2	2	1
17	3	3	1	2	1
18	3	2	1	1	1
średnia	2,06	1,89	1,22	1,39	1,11

Test t przeprowadzony na danych z tabeli 5.2 wykazuje, że na poziomie istotności $p=0,05$:

- animacje schematyczne **sięgania** i **wymachu** mają równe średnie, stanowią grupę o wyższej jakości,
- animacje schematyczne **przysiadu**, **przeciągania** i **masowania** mają równe średnie, stanowią grupę o niższej jakości,
- średnie pomiędzy tymi dwiema grupami są istotnie różne.

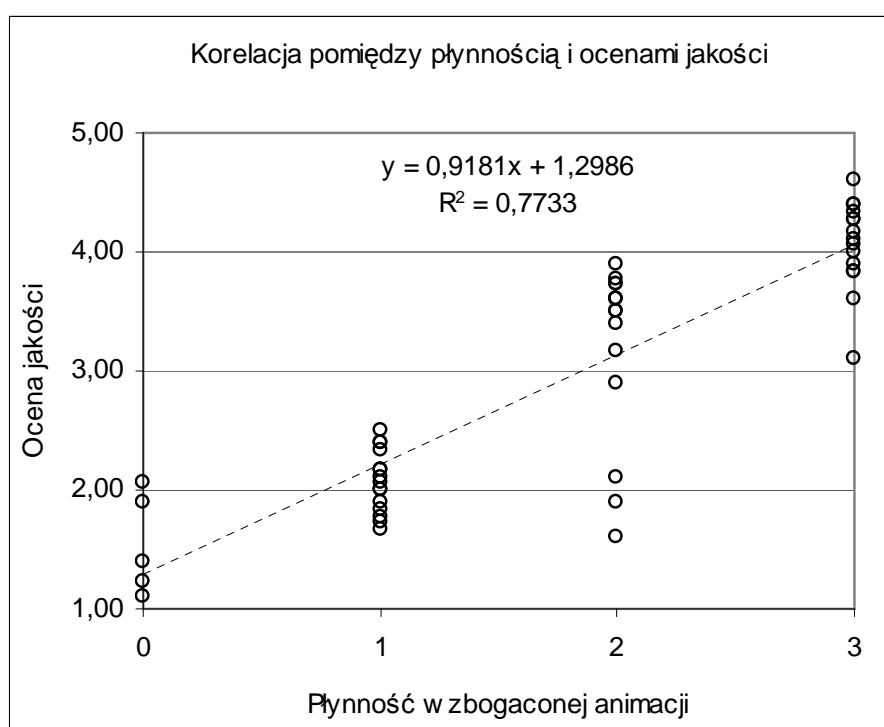
Wybrane do testów animacje stanowią więc dobry przykład próby przetworzenia animacji schematycznych, które niekoniecznie muszą być przygotowane przez profesjonalnego animatora. Analiza ocen uzyskiwanych przez animacje z grupy o niższej jakości wykazuje, że jakość animacji po wzbogaceniu znacząco się poprawia i mniej odbiega od jakości pozostałych sekwencji.

Wzrost jakości dla animacji przetworzonych w porównaniu do kontrolnych jest statystycznie istotny na poziomie $p=0,05$. Jak wykazała analiza statystyczna opisywana poniżej, nawet przetworzenie animacji polegające na dodaniu nowych klatek kluczowych w celu uzyskania animacji wzbogaconej jednakże **skokowej** skutkuje istotnie wyższą oceną jakości. Dla ustalonej wartości płynności (np. najwyższej) modyfikowanie wartości parametru stylu nie wpływa istotnie na ocenę jakości. Spełnione zostaje założenie mówiące, że modyfikacja stylu nie powinna wpływać istotnie na ocenę, a co za tym idzie animacja o dowolnym stylu ruchu może w wyniku przetwarzania cechować się wysoką jakością. Rys. 5.1 obrazuje jakiego rzędu poprawę oceny można uzyskać stosując wzbogacanie animacji.



Rys. 5.1. Średnie oceny uzyskiwane przez animacje nieprzetworzone oraz animacje przetworzone o stylu naturalnym i dużej płynności

Jeżeli zostanie przyjęte, że zmienną grupującą jest *styl animacji*, możliwe jest przeprowadzenie testów równości średnich dla ocen uzyskiwanych przez animacje wzbogacone. Test t wykazuje, iż pomiędzy grupami animacji o różnym nacechowaniu stylistycznym nie ma istotnych statystycznie różnic w uzyskiwanych przez nie ocenach średnich. Z kolei dla zmiennej grupującej *płynność* test t wykazuje, że nie tylko na poziomie istotności $p=0,05$, ale także na poziomie $p=0,003$, zwiększenie płynności powoduje istotne zwiększenie średniej oceny *jakości*. Korelacja między płynnością a jakością przedstawiona jest na rys. 5.2. „Płynność=0” oznacza grupę animacji kontrolnych – nieprzetworzonych. Współczynnik korelacji wynosi $R=0,88$.



Rys. 5.2. Zależność między stopniem płynności animacji wzbogaconej a ocenami jakości uzyskiwanymi przez te animacje

Analiza wariancji ANOVA posłużyła weryfikacji czy po wykonaniu wzbogacania animacji na ustalonej próbie pojawiła się istotna zmiana średniej oceny jakości. Jak wynika z wcześniejszej dyskusji, zmienna *styl* nie wprowadza różnic istotnych statystycznie, dlatego zrealizowana została jednoczynnikowa analiza wariancji dla zmiennej *płynność*.

Tabela 5.3. Wyniki analizy wariancji dla animacji nieprzetworzonych i animacji o *płynności skokowej*

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	5	7,66	1,53	0,174
Kolumna 2	15	31	2,07	0,067

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	1,06	1	1,066	11,7	0,003	4,42
W obrębie grup	1,64	18	0,09			
Razem	2,71	19				

Tabela 5.4. Wyniki analizy wariancji dla animacji nieprzetworzonych i animacji o *płynności pośredniej*

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	5	7,66	1,53	0,174
Kolumna 2	15	48	3,2	0,54

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	10,4	1	10,417	22,5	0,0001	4,4
W obrębie grup	8,29	18	0,461			
Razem	18,7	19				

Tabela 5.5. Wyniki analizy wariancji dla animacji nieprzetworzonych i animacji o *płynności płynnej*.

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	5	7,66	1,53	0,174
Kolumna 2	15	60,89	4,06	0,139

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	23,9	1	23,9	163	2E-10	4,4
W obrębie grup	2,63	18	0,14			
Razem	26,56	19				

Tabela 5.6. Wyniki analizy wariancji dla animacji *skokowej i pośredniej*.

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	15	31	2,06	0,067
Kolumna 2	15	48	3,2	0,54

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	9,63	1	9,6	31,5	5E-06	4,2
W obrębie grup	8,55	28	0,3			
Razem	18,2	29				

Tabela 5.7. Wyniki analizy wariancji dla animacji *skokowej* i *płynnej*.

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	15	31	2,06	0,068
Kolumna 2	15	60,9	4,06	0,14

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	29,78	1	29,78	286	3E-16	4,19
W obrębie grup	2,89	28	0,1			
Razem	32,6	29				

Tabela 5.8. Wyniki analizy wariancji dla animacji *pośredniej* i *płynnej*.

Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja
Kolumna 1	15	48	3,2	0,54
Kolumna 2	15	60,9	4,06	0,14

ANALIZA WARIANCJI

Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	5,54	1	5,53	16	0,0004	4,2
W obrębie grup	9,55	28	0,34			
Razem	15,0	29				

W tabeli 5.9 przedstawiona jest procentowa zgodność oceny *stylu* przez uczestników z wartościami *stylu*, które wykorzystane zostały do wygenerowania animacji. Dane te zostały także zobrazowane na rys. 5.3. Przykładowo w wynikach trafności oceny *stylu* wartość na przecięciu *płynność=skokowa* z *styl=naturalny* równa 55% oznacza, że styl naturalny, jaki w rzeczywistości był wprowadzony do tej animacji został w 55% procentach odpowiedzi rozpoznany prawidłowo. Analogicznie tabela 5.10 przedstawia zgodność oceny *płynności* przez uczestników z wartościami *płynności*, które wykorzystane zostały do wygenerowania animacji.

Styl animacji

Znaczna liczba animacji *naturalnych* i *komiksowych* oceniona została jako *pośrednie*, jeżeli odtwarzana animacja była mało płynna. Z kolei dla animacji płynnych prawidłowa ocena *stylu* nie przysparzała problemów. *Styl* jest więc cechą dość mało czytelną, jeżeli **animacja nie jest płynna**. Ponadto dla animacji *płynnych* o *stylu pośrednim* uczestnicy wykazywali tendencję udzielania niewłaściwych odpowiedzi - trafność wynosiła tylko około 40%. Wynika z tego, iż należy unikać stosowania *stylu* *pośredniego*, który jest niejednoznaczny w interpretacji, a jedynie przyjąć skrajne wartości *stylu*, *naturalny* i *komiksowy*. Potwierdza to spostrzeżenia zawarte w teorii animacji tradycyjnej o

stosowaniu możliwe najbardziej wyrazistego prezentowania idei, emocji postaci, czynności, charakteru.

Tabela 5.9. Trafność oceny [%] *stylu* dla animacji w wybranych wariantach płynności i stylu

sięganie	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	55%	35%	55%
	pośrednia	60%	35%	60%
	płynna	85%	40%	85%

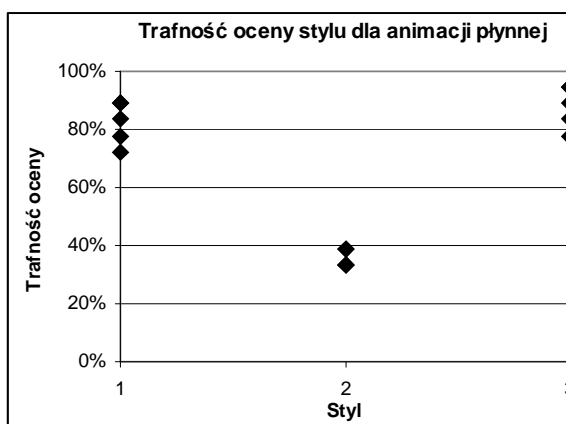
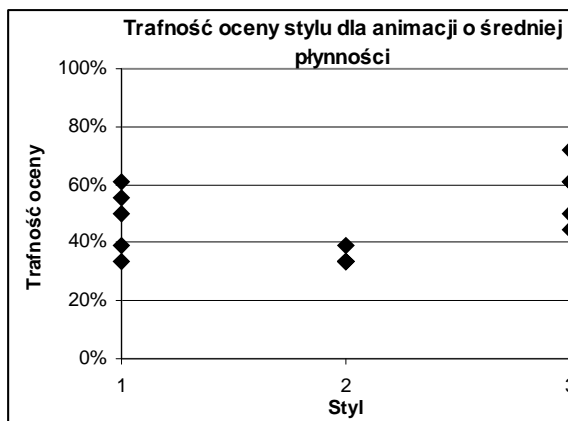
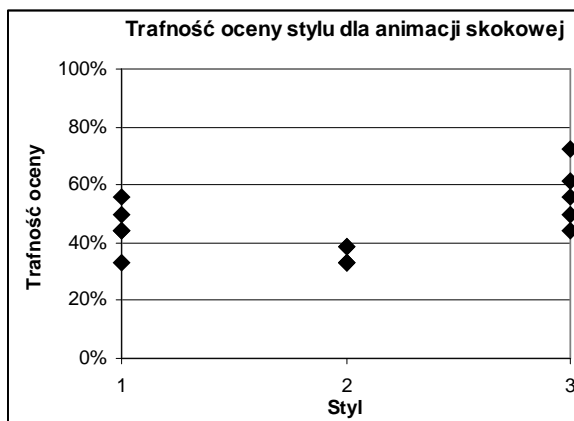
przeciąganie	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	50%	34%	50%
	pośrednia	40%	40%	45%
	płynna	90%	35%	95%

wymach	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	45%	35%	60%
	pośrednia	55%	30%	60%
	płynna	90%	35%	95%

przysiad	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	45%	40%	45%
	pośrednia	35%	35%	50%
	płynna	80%	40%	90%

masowanie	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	90%	90%	95%
	pośrednia	35%	40%	50%
	płynna	80%	60%	75%

Wszystkie animacje	ocena stylu	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	46%	37%	57%
	pośrednia	46%	35%	58%
	płynna	84%	37%	89%



Rys. 5.3. Trafność oceniania dla animacji o ruchu skokowym, płynności pośredniej i płynności maksymalnej. Oznaczenie stylów: 1: naturalny, 2: pośredni, 3: komiksowy

Płynność animacji

Trafność oceniania płynności animacji przedstawia tabela 5.10. Cecha skokowości była rozpoznawana bezbłędnie dla animacji o parametrze *płynność=skokowa*. Płynność pośrednia była oceniana z niższą trafnością, około 50%. Animacje o najwyższym stopniu płynności oceniane były najbardziej trafnie. Rozróżnienie *skokowości* i *płynności* ruchu jest zadaniem łatwiejszym dla widza niż klasyfikacja *stylu* animacji.

Tabela 5.10. Trafność ocen *płynności* animacji w wybranych wariantach płynności i stylu

sięganie	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	95%	100%	100%
	pośrednia	65%	70%	65%
	płynna	95%	75%	100%

przeciąganie	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	85%	85%	95%
	pośrednia	45%	55%	50%
	płynna	95%	80%	100%

wymach	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	95%	90%	95%
	pośrednia	55%	45%	55%
	płynna	100%	80%	95%

masowanie	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	35%	40%	75%
	pośrednia	40%	35%	75%
	płynna	75%	35%	80%

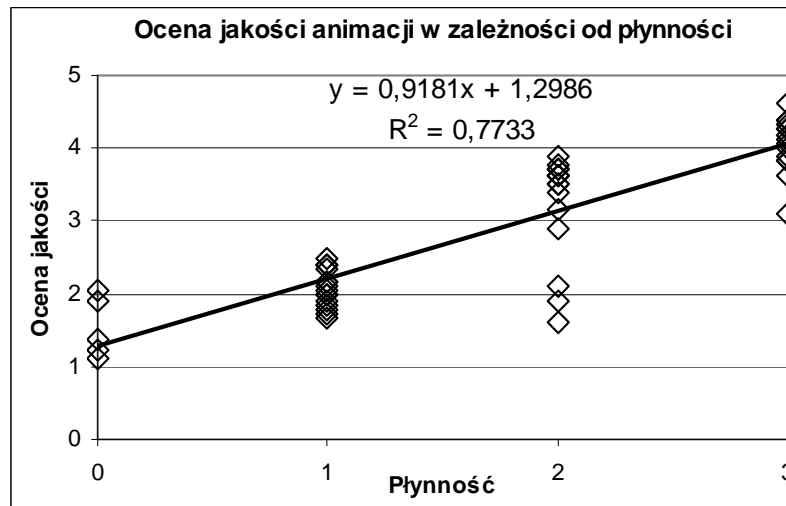
przysiad	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	95%	90%	100%
	pośrednia	45%	45%	60%
	płynna	95%	75%	90%

Wszystkie animacje	ocena płynność	styl		
		naturalny	pośredni	komiksowy
płynność	skokowa	92%	91%	97%
	pośrednia	49%	51%	56%
	płynna	93%	74%	92%

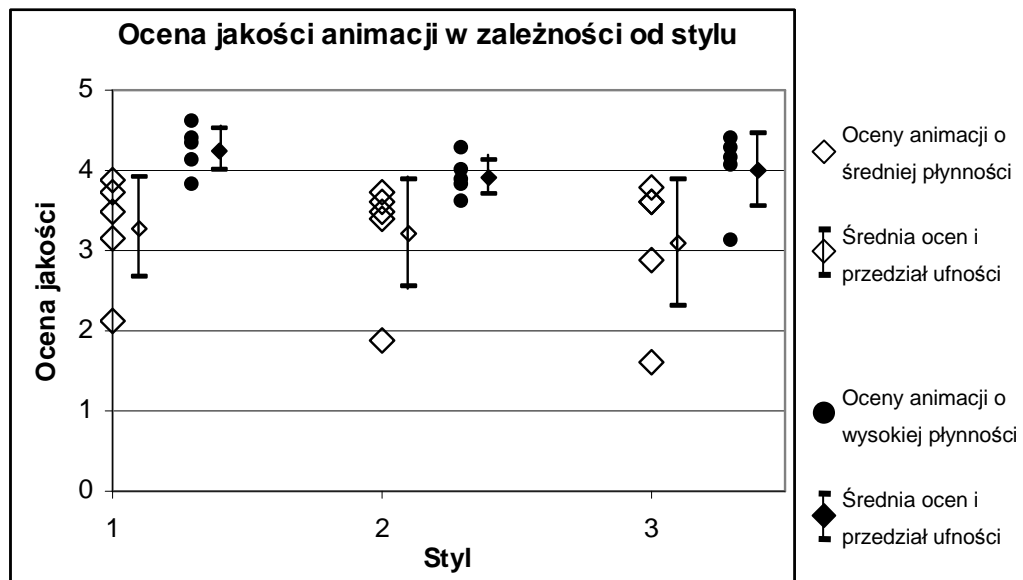
Jakość animacji

Skokowa animacja zawsze oceniana jest jako gorsza od *płynnej*. Zależność ta jest bardzo silna, co przedstawiono na rys. 5.4. Animacje o pośredniej płynności oceniane są wyżej, a najlepsze oceny uzyskiwane są konsekwentnie przez animacje płynne. Ponadto animacje o stylu pośrednim są oceniane zwykle niżej niż animacje o stylu czytelnym i wyraźnie naturalnym lub wyraźnie komiksowym, co przedstawione jest na rys. 5.5, na którym zaznaczone zostały oceny dla animacji płynnych i średnio płynnych dla trzech typów stylizacji. To także potwierdza wniosek o stosowaniu w animacji możliwe najbardziej wyrazistych emocji i czynności.

Widzowie wykazywali tendencję do wystawiania niskich ocen *jakości* tych animacji, dla których nie rozpoznawali prawidłowo *stylu* bądź stopnia *płynności*. Trudności w określeniu cech animacji oznaczają, iż przekaz subiektywny jest w pewnym stopniu nieczytelny i wpływa to na obniżenie subiektywnie postrzeganej jakości.



Rys. 5.4. Zależności jakości animacji od płynności. Oznaczenia płynności: 0: brak przetwarzania, 1: skokowa, 2: pośrednia, 3: płynna



Rys. 5.5. Oceny jakości animacji w zależności od stylu i płynności.

Oznaczenie stylu: 1: naturalny, 2: pośredni, 3: komiksowy

Niskie oceny *jakości* wystawione zostały wszystkim **animacjom kontrolnym**, które nie poddane zostały przetwarzaniu. Dla każdej z czynności średnia ocena jest mniejsza niż oceny najslabiej ocenianych animacji skokowych.

Animacja czynności „masowania karku”, w której w jednej z póz dochodzi do zetknięcia kości dłoni z głową, została oceniona nisko dla animacji *komiksowej*, ponieważ brak kontroli kolizji obiektów skutkowało przenikaniem kości przy dużych amplitudach antycypacji i przerzutu. W tym przypadku wskazane by było rozwinięcie algorytmu

przetwarzania końcowego, w którym odbywałoby się odpowiednie ograniczanie zmienności parametrów ruchu w zależności od odległości między częściami ciała postaci.

Podsumowując przeprowadzoną analizę wyników testów należy podkreślić osiągnięcie celu założonego w **tezie 1. rozprawy**:

Wykorzystanie w algorytmach komputerowej animacji klasycznych reguł animacji rysunkowej sformułowanych w języku naturalnym, pozwala na poprawę realizmu ruchu wirtualnych postaci.

Reguły użyte do wnioskowania wyznaczono posługując się metodyką i wskazówkami zawartymi w regułach klasycznej animacji rysunkowej. Reguły animacji wykorzystane były do sprecyzowania założeń, pozwalających zawęzić obszary poszukiwań rozwiązania, gwarantującego najlepsze dopasowanie wyniku do założonego stylu i płynności (wektor **J**) z zachowaniem wysokiej oceny całościowej **Q**. Z praktyki animacji tradycyjnej zaczerpnięto regułę pracy „od pozy do pozy” i podział animacji na fazę główną i fazy antycypacji, przerzutu i zatrzymania. Analiza wyników testu subiektywnej oceny parametrycznej wykazała, że animacje wzbogacone uzyskiwane w oparciu o przyjętą metodykę w porównaniu do animacji kontrolnych, oceniane są wyżej pod względem jakości ruchu animowanego. Ponadto przetworzenie animacji schematycznej, przygotowanej przez animatora nie będącego profesjonalistą, której jakość początkowo oceniana jest bardzo nisko, skutkuje zawsze istotnym zwiększeniem jakości. **Prowadzi to do udowodnienia powyższej tezy.**

Opracowana aplikacja prawidłowo realizuje postawione zadanie i można ją wykorzystywać w praktyce do wzbogacania animacji komputerowych, charakteryzuje się jednak pewnymi ograniczeniami, które w przypadku kontynuacji badań i rozwoju algorytmów powinny zostać uwzględnione. Uwagi te zamieszczone są poniżej.

Testy subiektywne przeprowadzone na innych danych i innych animacjach testowych, prawdopodobnie zniósłoby potrzebę zmiany precyzji przybliżeń w analizie zbiorów przybliżonych (rozdział 4.3.1). Musiałby jednak być spełniony warunek, aby obiekty z dolnego przybliżenia konceptu były przez wszystkich widzów ocenione jednakowo.

W obecnym rozwiązaniu wprowadzone są założenia upraszczające przeszukiwanie przestrzeni parametrów w celu znalezienia parametrów implikujących uzyskanie określonych cech subiektywnych (rozdział 4.1.3). Należy dążyć do rozwiązania, które

pozwole wyznaczać odpowiednie parametry bez tych założeń, czyli wyznaczać przerzut niezależnie od antycypacji, modyfikować parametry fazy zatrzymania, a także uwzględnić inne reguły ruchu, takie jak np. pominięte w niniejszych badaniach: ściskanie i rozciąganie.

Założono, iż jakościowa zależność między dt a $V_i \cdot t_i$ oraz dA a $V_i \cdot A_i$ jest proporcjonalnością odpowiednio ze współczynnikiem *beta* i *alfa*. Następnie wprowadzono **nasycanie** się wartości dt i dA , ograniczające zakres ich zmienności do subiektywnie akceptowanych wartości, jednakże można by dokładniej zbadać zależności między parametrami, co mogłoby doprowadzić do lepszego zamodelowania systemu i uproszczenia procesu wyznaczania optymalnych wartości.

Zrealizowany algorytm wzbogacania animacji nie może być zastosowany:

- w animacjach, które pozbawione są faz zatrzymania, czyli utrzymania stałej wartości parametru ruchu przez pewien okres czasu. Takimi danymi opisany jest ruch przechwycony, w którym występuje szum, a ponadto w ruchu żywego aktora nigdy nie ma całkowitego zatrzymania,
- w animacjach z wymuszeniami ruchu, takimi jak np. kontrola wnikania stóp w podłoże. W obecnej wersji kość, która ma się poruszyć, zawsze przed ruchem wykona antycypację a po ruchu przerzut, zaś w fazie zatrzymania oscylacje. Brak jest dodatkowego kroku, w którym podjęta byłaby decyzja, która z tych faz ma być dodana, a która, z racji obecnych wymuszeń ruchu, nie może występować. Możliwe jest proste ograniczenie zakresów zmienności wartości parametrów, np. w celu ograniczenia przesunięć wzdłuż osi pionowej poniżej wartości 0, która reprezentować może poziom podłoża, co wyeliminuje wnikanie stopy w podłoże. Jednakże faza zatrzymania, zawierająca oscylacje wokół wartości stałej, pozbawiona zostaje w ten sposób ujemnych „połówek” oscylacji, co objawia się cyklicznym, nieuzasadnionym podnoszeniem stopy w fazie zatrzymania.

6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W rozprawie zaproponowano i zweryfikowano autorską metodę przetwarzania danych subiektywnych z testów oceny wizualnych parametrów animowanego ruchu i sposób wydobywania danych w celu generowania reguł opisujących związki między parametrami obiektów i uzyskanymi przez nie ocenami.

Nowatorskimi podejściami w dziedzinie przetwarzania animacji są: wykorzystanie optymalizacji wielowymiarowej i dążenie do spełnienia wielu kryteriów jednocześnie oraz poszukiwanie rozwiązania w przestrzeni parametrów animacji metodą części wspólnej zbiorów przybliżonych i zmiennej precyzji przybliżeń.

Posługując się metodyką animacji tradycyjnej i wskazówkami zawartymi w regułach klasycznej animacji rysunkowej opracowano system wspomagania animacji. W systemie tym reguły rozmyte wykorzystywane są do wyznaczania parametrów faz, które należy dodać do animacji w celu poprawy jej subiektywnej jakości i nadania jej pożądanej stylizacji i płynności. Analiza wyników testu subiektywnej oceny parametrycznej przedstawiona w rozdziale 5. wykazała, że uzyskiwane w oparciu o przyjętą metodykę animacje wzbogacone oceniane są wyżej od animacji niewzbogaconych pod względem jakości i płynności ruchu animowanego. Ponadto przetworzenie animacji schematycznej, przygotowanej przez animatora nie będącego profesjonalistą, której jakość początkowo oceniana jest bardzo nisko, prowadzi zawsze do istotnego zwiększenia jakości. Dowodzi to pierwszej postawionej tezy:

1. Wykorzystanie w algorytmach komputerowej animacji klasycznych reguł animacji rysunkowej sformułowanych w języku naturalnym, pozwala na poprawę realizmu ruchu wirtualnych postaci.

Jak wykazano w rozdziale 4., w oparciu o przetwarzanie rozmyte możliwe jest wygenerowanie bazy reguł reprezentujących wiedzę pozyskaną w trakcie testów subiektywnych. Wiedza ta po przetworzeniu, wykorzystana została do generowania gestykulacji postaci nacechowanej stylistycznie o wysokiej jakości subiektywnej i zadanym przez użytkownika wydźwięku subiektywnym. Dowodzi to w sposób praktyczny drugiej tezy:

2. Logika rozmyta może być stosowana jako narzędzie przetwarzania reguł opisujących animację w procesie generowania animowanych gestykulacji.

W porównaniu do pracy animatora animacja z wykorzystaniem przygotowanej bazy reguł i wnioskowania rozmytego jest wydajniejsza. Klatki animacji, które ręcznie musi przygotować animator, opisują czynność i czasowy rozkład póz postaci, natomiast klatki dodatkowe, antycypacja, przerzut, zachowanie w fazie zatrzymania dodawane są przez system na podstawie wymagań precyzowanych przez użytkownika. Znaczna liczba klatek jest więc wstawiana automatycznie na podstawie subiektywnego opisu podanego przez animatora. Zwykle mniej niż 50% klatek w animacji stanowią klatki faz głównych i zatrzymania, pozostałe 50% lub więcej zawiera klatki faz antycypacji, przerzutu i oscylacji w zatrzymaniu. Przykładowo dla animacji z krótkimi zatrzymaniami, w których jest tylko jedna klatka oscylacji, animacja z 10 pozami zawiera:

- $k \cdot (10 \text{ klatek póz} + 10 \text{ kopii podtrzymujących pozy w czasie})$,
- $k \cdot [(10-1) \text{ faz ruchu głównego, na które przypada po 1 klatce antycypacji i 1 klatce przerzutu}]$, razem $k \cdot 18$,
- $k \cdot [(10-1) \text{ faz zatrzymania po ruchu, na które przypada 1 klatka oscylacji}]$, razem $k \cdot 9$,

gdzie k to liczba kości w szkielecie postaci.

Razem daje to: $k \cdot 20$ klatek animatora i $k \cdot 27$ klatek wstawionych przez algorytm wspomaganie animacji.

Jeżeli animacja zawiera P póz i po N klatek oscylacji w każdym zatrzymaniu, to stosunek liczby klatek animatora do liczby klatek wstawionych automatycznie wyraża się następująco:

$$2P / [(2+N) \cdot (P-1)] \quad (6.1)$$

Ponadto założyć można, że zaprojektowanie P póz w oparciu o ściśle wskazówki reżysera, animatork lub ścieżkę dialogową jest zadaniem pod każdym względem **mniej wymagającym** niż dobranie właściwych wartości czasów i amplitud faz dodatkowych, które zwykle realizowane jest metodą prób i błędów i wymaga sukcesywnego poprawiania i oglądania animacji wynikowej.

Powyższe rozumowanie dowodzi tezy trzeciej:

3. Zastosowanie rozmytego przetwarzania reguł animacji zwiększa efektywność procesu tworzenia klatek pośrednich animowanego obrazu.

Poprzez udowodnienie postawionych we wprowadzeniu tez osiągnięty został założony cel rozprawy.

Perspektywy rozwoju

Opracowana metodyka wzbogacania animacji pozwala na łatwą zmianę systemu wnioskowania, zmianę zbioru reguł, ręczne dodawanie reguł. Wprowadzony przez autora podział animacji na segmenty i składanie wynikowej animacji z segmentów wzbogaconych umożliwia wykorzystanie dowolnej funkcji przetwarzającej segment animacji, która może realizować na przykład symulację fizyczną ruchu i być rozbudowana o opis biomechaniki ludzkiego ciała.

Włączenie do systemu wspomagania animacji postaci dodatkowego modułu odpowiedzialnego za generowanie mimiki twarzy zgodnie z założeniami o przekazie emocjonalnym, może podnieść walor użytkowy systemu. Metody syntezy realistycznej mimiki na podstawie opisu [21][22][23][53][65], a nawet samego tekstu wypowiedzi wirtualnej postaci są już dobrze rozwinięte i implementowane w produktach komercyjnych. Wykorzystanie takich algorytmów, które działają na zasadzie modyfikacji kształtu siatki 3D opisującej twarz nie zaburzałyby przebiegu zaproponowanego postępowania, które operuje na kościach szkieletu postaci. Integracja tych metod może być z powodzeniem zrealizowana w przyszłości.

W rozprawie zostało założone, iż animator w etapie wstępnym, czyli podczas tworzenia animacji schematycznej prawidłowo dobrał pozy postaci i ich rozstawienie w czasie do przekazania zamierzonej treści. Te elementy nie są modyfikowane. Do animacji dodawane są nowe klatki, które z ruchu schematycznego tworzą ruch płynny lub skokowy, naturalny lub karykaturalny o wysokiej jakości subiektywnej. Subiektywna treść przekazu, np. ładunek emocjonalny, wynika w znacznej mierze z póz postaci [134]. W przyszłych wersjach systemu wspomagania można rozważyć możliwość utworzenia bazy póz o konkretnym wyrazie subiektywnym, wariantów tych póz i odpowiedniego interfejsu użytkownika ułatwiającego animatorowi wybór pozy z całej przestrzeni możliwości. Odrębne badania, nie będące bezpośrednią kontynuacją badań opisanych w rozprawie, mogą wykazać możliwość klasyfikowania póz na podstawie nowych deskryptorów związanych np. z względnym ułożeniem kości wirtualnego szkieletu postaci [30] oraz modyfikacji tych póz na podstawie nowych parametrów tak, aby dobrze wyrażały zamierzone treści.

Kolejną możliwością wykorzystania badanych metod jest nowy sposób kompresji danych ruchu, w którym relacje między fazami głównymi ruchu a fazami dodatkowymi zapisane są w postaci parametru subiektywnego, takiego jak styl i płynność. Fazy dodatkowe mogłyby być z animacji usunięte, a zapisywane byłyby tylko deskryptory

subiektywne i fazy główne lub też tylko pozy i informacja o czasach przejścia między nimi i czasach zatrzymania. Odzyskiwanie oryginalnej sekwencji polegałoby wówczas na wstawieniu do ruchu faz dodatkowych na podstawie pól i opisu subiektywnego cech ruchu. Ponadto rozwiązanie takie umożliwia uzyskiwanie różnych wariantów ruchu, różniących się cechami subiektywnymi. Ma to szczególne znaczenie w aplikacjach rzeczywistości wirtualnej, w których postać użytkownika, awatar, może wykonywać na swój własny sposób czynności zdefiniowane w bazie ruchów. Po stronie serwera nie muszą być w tej sytuacji przechowywane wszystkie warianty ruchu w trakcie wykonywania określonej czynności, a jedynie zapisy o pozach składających się na daną czynność. Po stronie klienta na podstawie danych konfiguracyjnych postaci, aplikacja wyświetlająca postać może ją animować we właściwy sposób, generując ruch wzbogacony o dodatkowe fazy. Podczas interakcji z awatarami innych użytkowników aplikacja odbierałaby z serwera zapis o pozach przyjmowanych przez nie i o ich subiektywnych cechach, na tej podstawie w aplikacji użytkownika odtwarzane może być całe trójwymiarowe środowisko i zachowania wszystkich awatarów. Zgodnie z metodyką zaproponowaną w rozdziale 4.3.3 użytkownik miałby możliwość „wytrenowania” zachowania własnej postaci, w celu uzyskiwania charakteru, który nie był wcześniej przewidziany w środowisku wirtualnej rzeczywistości. W ten sposób można by wzbogacić możliwości personalizacji animowanej postaci.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] AL-JUMAILY A., AMIN S., Fuzzy Logic Based Behaviors Blending For Intelligent Reactive Navigation of Walking Robot. 5th International Symposium on Signal Processing and its Applications, ISSPA '99, Brisbane, Australia, 1999.
- [2] AMAYA K., BRUDERLIN A., CALVERT T., Emotion from Motion. Proc. Graphics Interface '96, 222-229, Toronto, Canada, 1996.
- [3] ANDRE E., RIST T., MULLER J., Integrating reactive and scripted behaviors in a life-like presentation agent. Proc. 2nd International Conference on Autonomous Agents, 261-268, Minneapolis, 1998.
- [4] BABUSKA R., Fuzzy modeling – a control engineering perspective. Proc. International Conference FUZZ-IEEE/IFES'95, Yokohama, Japan, 1995.
- [5] BAJEC I.L., MRAZ M., ZIMIC N., Boids with a Fuzzy Way of Thinking. Proc. Artificial Intelligence and Soft Computing, 58-62, 2003.
- [6] BATES J., The Role of Emotion in Believable Agents. Communications of the Association for Computing Machinery, Special Issue on Agents, 1994.
- [7] BAZAN J.G., SZCZUKA M.S., The Rough Set Exploration System. Transactions on Rough Sets III. James F., Peters J.F., Skowron A. (eds.): Lecture Notes in Computer Science 3400, 37-56, Springer Verlag, 2005.
- [8] BAZAN J.G., SZCZUKA M.S., WRÓBLEWSKI J., A new version of rough set exploration system. Alpigini J., Peters J., Skowron A., Zhong N. (eds.): 3rd International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing RSCTC, LNAI vol. 2475, 397-404, Malvern, PA, Springer-Verlag, 2002.
- [9] BELLMAN R., ZADEH L., Decision making in a fuzzy environment. Management Science, vol. 17, no. 4, 141-164, 1970.
- [10] BENEDIKT A., Mowa ciała. Astrum, Wrocław 2005.
- [11] BIRDWHISTELL R., Kinesics in Context. University of Pennsylvania Press, Philadelphia 1970.
- [12] BLAIR P., Cartoon Animation. Walter Foster Publishing, Laguna Hills 1995.
- [13] BLENDER 3D, <http://www.blender.org/>
- [14] BRAND M., HERTZMANN A., Style machines. Proc. SIGGRAPH, 183-192, New Orleans, 2000.

- [15] BREGLER C., LOEB L., CHUANG E., DESHPANDE H., Turning to the Masters: Motion Capturing Cartoons. Proc. 29th Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 399-407, San Antonio, 2002.
- [16] BRIZENDINE L., *Mózg kobiety*. VM Group, Gdańsk 2006.
- [17] BRUDERLIN A., WILLIAMS L., Motion signal processing. Computer Graphics 29, 97–104, 1995.
- [18] BYNIARSKI R., Formal conception of rough sets. Fundamenta Informaticae 27, 1996.
- [19] CAMURRI A., TROCCA R., VOLPE G., Interactive systems design: a KANSEI-based approach. New Interfaces for Musical Expression, Session 7, Dublin, 2002.
- [20] CAPELL S., GREEN S., CURLESS B., DUCHAMP T., POPOVIĆ Z., Interactive Skeleton-Driven Dynamic Deformations. Proc. SIGGRAPH, 586-593, Los Angeles, 2002.
- [21] CASSELI J., More than Just Another Pretty Face: Embodied Conversational Interface Agents. Communications of the Association for Computing Machinery, 43(4), 70-78, Cambridge, 2000.
- [22] CASSELI J., Nudge Nudge Wink Wink: Elements of Face-to-Face Conversation for Embodied Conversational Agents. Embodied Conversational Agents, 1-27, Cambridge, MIT Press, 2000.
- [23] CASSELI J., PELACHAUD C., BADLER N., Animated Conversation: Rule-Based Generation of Facial Expression, Gesture & Spoken Intonation for Multiple Conversational Agents. Proc. SIGGRAPH '94, 413-420, New York, 1994.
- [24] CASSELI J., THÓRISSON K.R., The Power of a Nod and a Glance: Envelope vs. Emotional Feedback in Animated Conversational Agents. Applied Artificial Intelligence, Cambridge, 1999.
- [25] CASSELL J., VILHJALMSSON H., BICKMORE T., BEAT: the Behavior Expression Animation Toolkit. Proc. SIGGRAPH '01, 477-486, Los Angeles, 2001.
- [26] CHEN S.J., HWANG C.L., Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, New York, 1992.
- [27] CHOROŚ K., Psychologiczne i informatyczne aspekty tworzenia awatarów w systemach wirtualnej rzeczywistości. II Krajowa Konferencja Multimedialne i Sieciowe Systemy Informacyjne, MISSI, Politechnika Wrocławska, 2000.
- [28] CORBALLIS M.C., Did Language Evolve from Manual Gestures? Wray A. (ed.): The Transition to Language. Oxford University Press, 2002.

- [29] CZYŻEWSKI A., KOSTEK B., SUCHOMSKI P., Expert System for Hearing Aids Fitting. 108th Audio Engineering Society Convention, Preprint 5094, Paris, 2000.
- [30] DE SILVA R., BIANCHI-BERTHOUBE N., Modeling human affective postures: an information theoretic characterization of posture features. *Computer Animation and Virtual Worlds* 15, 269–276, 2004.
- [31] DENSLEY D.J., WILLIS P.J., Emotional Posturing: A Method Towards Achieving Emotional Figure Animation. *Proc. IEEE*, 1997.
- [32] DONTCHEVA M., YNGVE G., POPOVIĆ Z., Layered Acting For Character Animation. *Proc. SIGGRAPH*, 409-416, Los Angeles, 2003.
- [33] DRIANKOV D., HELLENDORRN H., REINFRANK M., Wprowadzenie do sterowania rozmytego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [34] DUBOIS D., PRADE H., *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press, Orlando 1980.
- [35] DULAC N., GAUDREAULT A., Heads or Tails: The Emergence of a New Cultural Series, from the Phenakisticope to the Cinematograph. *Invisible Culture: A Journal for Visual Culture*. The University of Rochester 2004. Wydanie internetowe:
http://www.rochester.edu/in_visible_culture/Issue_8/dulac_gaudreault.html
- [36] EKMAN P., *Emotion in the human face*. Cambridge University Press, New York 1982.
- [37] EKMAN P., Facial Expression. Dalglish T., Power M. (eds.): *Handbook of Cognition and Emotion*. New York, John Wiley & Sons 1999.
- [38] ENDORPHINE SOFTWARE: *Whitepaper: Dynamic Motion Synthesis*. Oxford, NaturalMotion Ltd. 2004.
- [39] ESCHENAUER H., KOSKI J., OSYCZKA A., *Multicriteria Design Optimization. Procedures and Applications*. Springer-Verlag, Berlin 1990.
- [40] FANG A., POLLARD N., Efficient Synthesis of Physically Valid Human Motion. *Association for Computing Machinery Transactions on Graphics*, 417—426, Vol. 22, 2003.
- [41] FOX, R., MCDANIEL, C., The perception of biological motion by human infants. *Science* 218, 486-487, 1982.
- [42] FRANCIK J., TRYBICKA-FRANCIK K., A framework for program control of animation of human and animal characters. *Studia Informatica* 24(4), 55—65, 2003.

- [43] FRANKLIN S., GRAESSER A., Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. Proc. 3rd International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Springer-Verlag, London, 1996.
- [44] FREYD J.J., The mental representation of movement when static stimuli are viewed. *Percep & Psychophys.* 33, 575-581, 1983.
- [45] GRATCH J. RICKEL J., ANDRE E., Creating Interactive Virtual Humans: Some Assembly Required. *IEEE Intelligent Systems*, 17(4), 54-63, Piscataway, 2002.
- [46] GRZYMALA-BUSSE J.W., Mining Numerical Data – A Rough Set Approach. Proc. International Conference on Rough Sets and Emerging Intelligent System Paradigms 2007, LNAI 4585. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007.
- [47] HALL E., Poza kulturą. Warszawa 1984.
- [48] HARRIS, C.M., WOLPERT, D.M., Signal dependent noise determines movement planning. *Nature* 394, 780-784, 1998.
- [49] HOZER J. (ed.), Statystyka. Opis statystyczny. Stowarzyszenie Pomoc i Rozwój, Szczecin 1998.
- [50] http://en.wikipedia.org/wiki/Broca's_area
- [51] <http://events.apple.com.edgesuite.net/j47d52oo/event>
- [52] http://headrush.typepad.com/creating_passionate_users/2007/01/iphone_and_the_.html
- [53] <http://web.media.mit.edu/~justine/publications.html>
- [54] <http://wiki.mindmakers.org/projects:BML:main>
- [55] <http://www.apple.com/macosx/>
- [56] <http://www.comet-cartoons.com>
- [57] <http://www.evl.uic.edu/ralph/508S99/contents.html>
- [58] <http://www.macromedia.com>
- [59] <http://www.mindmakers.org/projects/BML>
- [60] <http://www.mova.com> - Mova Contour Reality Capture, bezkontaktowa technologia rejestracji mimiki twarzy
- [61] <http://www.organicmotion.com>, bezkontaktowa technologia rejestracji ruchów całego ciała
- [62] <http://www.psy.vanderbilt.edu/faculty/blake/BM/BioMot.html>
- [63] <http://www.python.org>, Python Programming Language
- [64] http://www.rmit.edu.au/aim/a_notes/anim_contents.html
- [65] http://www.soc.northwestern.edu/justine/jc_papers.htm

- [66] HUBBARD T.L., Environmental invariants in the representation of motion. *Psychonomic Bulletin & Review*, nr 2, 322-338, 1995.
- [67] IACOBONI M., WOODS R.P., BRASS M., BEKKERING H., MAZZIOTTA J.C., RIZZOLATTI G.: Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286, 2526-2528, 1999.
- [68] INUIGUCHI M., TANINO T., Generalized Rough Sets and Rule Extraction. Alpigini J.J. (ed): *Proc. International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing 2002*, LNAI 2475, 105–112, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [69] ISERMANN R., On fuzzy logic applications for automatic control, supervision and fault diagnosis. *Proc. International Conference EUFIT'96*, Aachen, Germany, 1996.
- [70] IVANENKO Y.P., GRASSO R., MACELLARI V., LACQUANITI F. Two-thirds power law in human locomotion: role of ground contact forces. *NeuroReport* 13, 1171-1174, 2002.
- [71] IVERSON J., GOLDIN-MEADOW S., *The Nature and Functions of Gesture in Children's Communication*. Jossey-Bass 1998.
- [72] JOHANSSON G., Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics* 14, 201-211, 1973.
- [73] JOHNSON W.L., RICKEL J.W., LESTER J.C., *Animated Pedagogical Agents: Face-to-Face Interaction in Interactive Learning Environments*. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Leeds, 2000.
- [74] KARUNARATNE S., YAN H., 3D Animated Movie Actor Training using Fuzzy Logic. *Computer Graphics International*, 23 – 30, IEEE, 2001.
- [75] KIESLER S., SPROULL L., *Social human-computer interaction. Human Values and the Design of Computer Technology*, 191-199, Stanford, 1997.
- [76] KODA T., MAES P., Agents with faces: the effects of personification of agents. 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, London, 1996.
- [77] KOMOROWSKI J., PAWLAK Z., POLKOWSKI L., SKOWRON A., *Rough Sets: A Tutorial*. Pal S.K., Skowron A. (eds.): *Rough Fuzzy Hybridization. A New Trend in Decision-Making*. Springer Verlag, Singapore, 1999.
- [78] KOPP S., TEPPER P., CASSELL J., *Towards Integrated Microplanning of Language and Iconic Gesture for Multimodal Output*. *Proc. International Conference on Multimodal Interfaces*, Penn State University, State College, 2004.

- [79] KOSTEK B., Assessment of Concert Hall Acoustics Using Rough Set and Fuzzy Set Approach. Pal S.K., Skowron A. (red.): *Rough-Fuzzy Hybridization: A New Trend in Decision-Making*, Springer-Verlag, Singapore, 1999.
- [80] KOSTEK B., *Soft Computing in Acoustics. Applications of Neural Networks, Fuzzy Logic and Rough Sets to Musical Acoustics*, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica Verlag, Heidelberg, New York 1999.
- [81] KOSTEK B., „Computing with Words” Concept Applied to Musical Instrument Recognition. Proc. International Conference on Internet and Multimedia Systems and Applications, 72 – 79, Mexico, 2002.
- [82] KOSTEK B., „Computing with Words” Concept Applied to Musical Information Retrieval. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 4, vol. 82, 1–12, 2003.
- [83] KOSTEK B., *Perception-Based Data Processing in Acoustics. Applications to Music Information Retrieval and Psychophysiology of Hearing*, Springer Verlag, Series on Cognitive Technologies, Berlin, Heidelberg, New York 2005.
- [84] KOSTEK B., CZYZEWSKI A., Employing Fuzzy Logic and Noisy Speech for Automatic Fitting of Hearing Aids. 142nd Acoustical Society of America Meeting, *Journal of Acoustic Society of America* 5, vol. 110. Fort Lauderdale, 2001.
- [85] KOSTEK B., SZCZUKO P., Rough Set-Based Application to Recognition of Emotionally-Charged Animated Character's Gestures. Peters J.F., Skowron A., Slezak D. (eds.): *LNCS Transactions on Rough Sets V*, Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [86] KOSTEK B., SZCZUKO P., Inteligentne wspomaganie komputerowej animacji postaci. Kowalczyk Z., Wiszniewski B. (eds.): *Diagnostyka: Inteligentne wydobywanie informacji w celach diagnostycznych*, PWNT, Gdańsk 2007.
- [87] KUJAWIŃSKA M., SITNIK R., PAWŁOWSKI M., GARBAT P., WĘGIEL M., 3D object data acquisition and processing for virtual reality applications. *Opto - Electronics Review* 11(3), 181—191, 2003.
- [88] KUKLO K., KOLMAGA J., *Blender. Kompendium*. Helion, Gliwice, 2007.
- [89] LACQUANITI F., TERZUOLO C., VIVIANI P., The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica* 54, 115-130, 1983.
- [90] LASSETER J., *Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation*. Proc. SIGGRAPH, 35-44, Los Angeles, 1987.
- [91] LENIOWSKI R., Zastosowanie grafiki komputerowej do wirtualnego prototypowania robotów. *Pomiary, Automatyka, Kontrola* nr 1, 63—65, 2005.

- [92] LENIOWSKI R., SAMOLEJ S., Zastosowanie biblioteki OpenGL do animacji robotów. VI Krajowa konferencja robotyki, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej vol. 99, nr 45, 125-132, 1998.
- [93] LI Y., GLEICHER M., XU Y., SHUM H., Stylizing Motion with Drawings. Proc. SIGGRAPH, 309-319, Los Angeles, 2003.
- [94] MAMDANI EH., Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers. International Journal of Man-Machine Studies 8, 1976.
- [95] MAMDANI EH., Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers. Mamdani E.H., Gaines B.R. (eds.): Fuzzy Reasoning and Its Applications, Academic Press, London 1981.
- [96] MARKS L.A., DUNN E.G., KELLER J.M., GODSEY L.D., Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Using Fuzzy Logic: An Innovative Approach to Sustainable Agriculture. Proc. International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis (ISUMA-NAFIPS '95), IEEE, 1995.
- [97] MEHABIAN A., Silent messages: Implicit communication of emotions and attitudes. Wadsworth, Belmont, California 1981.
- [98] MILENKOVIC V.J., SCHMIDL H., Optimization-Based Animation. Proc. SIGGRAPH, 37-46, Los Angeles, 2001.
- [99] MITRA G., Mathematical Models for Decision Support. Springer, Berlin 1988.
- [100] MORI M., The uncanny valley. Energy 7, 33—35, 1970.
- [101] MUYBRIDGE E., Complete Human and Animal Locomotion. Dover Publications, Mineola 1979.
- [102] MYSŁEK T., GRUDZIŃSKI T., ROSS J., Zaawansowane techniki animacji trójwymiarowych modeli szkieletowych w środowisku FRS. Studia Informatica vol. 27, nr 1, 41—54, 2006.
- [103] NEFF M., FIUME E., Artistically based computer generation of expressive motion. Proc. Symposium on Language, Speech and Gesture for Expressive Characters, 29-39, 2004.
- [104] NĘCKI Z., Komunikacja międzyludzka. Kraków 1996.
- [105] NGUYEN H.S., NGUYEN S.H., Discretization methods for data mining. Polkowski L., Skowron A. (eds.): Rough Sets in Knowledge Discovery. Physica-Verlag, Heidelberg 1998.
- [106] OSBORNE M.J., Introduction to Game Theory. Oxford University Press, USA 2003.

- [107] PARK J., KANG Y., KIM S., CHO H., Expressive Character Animation with Energy Constraints. Proceedings of Edu+Compugraphics '97, 260-268, Vilamoura, Portugal, 1997.
- [108] PATERSON H.M., POLLICK F.E., SANFORD A.J., The role of velocity in affect discrimination. Proc. 23rd Annual Conference of the Cognitive Science Society, 2000.
- [109] PAWLAK Z., Rough Sets: Theoretical aspects of reasoning about data. Kluwer Academic, Dordrecht 1991.
- [110] PAWLAK Z., SKOWRON A., Rough sets: some extension. Information Science nr. 177, 2007.
- [111] PEDRYCZ W., Fuzzy control and fuzzy systems. John Willey & Sons, New York 1993.
- [112] PETITTO L.A., How the brain begets language: On the neural tissue underlying human language acquisition. McGilvray J. (ed.): The Cambridge Companion to Chomsky, Cambridge University Press, 2005.
- [113] PIEGAT A., Modelowanie i sterowanie rozmyte. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
- [114] POPOVIĆ J., SEITZ S.M. ERDMANN M., Motion Sketching for Control of Rigid-Body Simulations. Association for Computing Machinery Transactions on Graphics, Vol. 22, No. 4, 1034-1054, 2003.
- [115] RECOMMENDATION ITU-R BT.500-11, Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Picture, 2002.
- [116] RECOMMENDATION ITU-T P.800, Methods for Subjective Determination of Transmission Quality. Geneva, Switzerland, 1996.
- [117] REMONDINO F., SCHROTTER G., RODITAKIS A., D'APUZZO N., Markerless Motion Capture from Single or Multi-Camera Video Sequence. Int. Workshop on Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments (CAPTECH), Zermatt, Switzerland, 2004.
- [118] ROUGH SET EXPLORATION SYSTEM, <http://alfa.mimuw.edu.pl/~rses/>
- [119] STASZULONEK A., Modelowanie ruchu eksperymentalnego robota przemysłowego w czasie rzeczywistym. XI Krajowa Konferencja Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych, Zakopane. Zeszyty Naukowe. Automatyka, Politechnika Śląska, 213--224, 1998.

- [120] STOCKY T., CASSELL J., Shared Reality: Spatial Intelligence in Intuitive User Interfaces. Proc. Intelligent User Interfaces, 224-225, San Francisco, 2002.
- [121] SUCHOMSKI P., Computing the Static Characteristics of Hearing Dynamics Basing on Fuzzy Processing. Multimedialne i Sieciowe Systemy Informacyjne, MISSI, 561 – 572, Wrocław, 2002.
- [122] SUŁKOWSKI C. (ed.), Makroekonomia. Teoria i polityka makroekonomiczna. ZAPOL, Szczecin 2001.
- [123] SZCZUKO P., Zagadnienia komputerowej animacji 2D i 3D w odniesieniu do tradycyjnych metod animacji. X Sympozjum Nowości w Technice Audio i Wideo, Wrocław, 2004.
- [124] SZCZUKO P., Parametryzacja danych ruchu postaci ludzkich z wykorzystaniem logiki rozmytej. Seminarium Naukowo-Techniczne TECHNICON, Gdańsk, 2005.
- [125] SZCZUKO P., System logiki rozmytej wspomagający tworzenie animacji komputerowych w oparciu o język Python. III Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI PG, nr 7, 455-462, Gdańsk, 2005.
- [126] SZCZUKO P., Multimodal learning application with interactive animated character. New Trends in Audio and Video, XI Sympozjum Audio Engineering Society, Białystok, 2006.
- [127] SZCZUKO P., KOSTEK B., Analysis and Generation of Emotionally Featured Animated Motion. The 10th International Conference on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing (RSFDGrC), 333-341, Regina, 2005.
- [128] SZCZUKO P., KOSTEK B., Hearing Impaired Speech Rehabilitation Application Using Animated Avatar With Non-verbal Communication. 3rd International Conference on Telemedicine and Multimedia Communication, Kąjetany, 2005.
- [129] SZCZUKO P., KOSTEK B., Implementacja reguł animacji w logice rozmytej. XI Międzynarodowe Sympozjum Reżyserii i Inżynierii Dźwięku i Obrazu, 211-218, Kraków, 2005.
- [130] SZCZUKO P., KOSTEK B., Zastosowanie przetwarzania rozmytego w animacji komputerowej. Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe, 287–296, Wrocław, 2006.
- [131] TAKAGI T., SUGENO M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 15(1), 116-132, 1985.
- [132] TEGZE O., Komunikacja niewerbalna. One Press, Gliwice 2006.

- [133] TERRA S., METOYER R., Performance Timing for Keyframe Animation. Proc. Eurographics SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 253—258, 2004.
- [134] THOMAS F., JOHNSTON O., Disney Animation – The Illusion of Life. Abbeville Press, New York 1981.
- [135] UNUMA M., ANJYO K., TAKEUCHI R., Fourier Principles for Emotion-based Human Figure Animation. Proc. 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 91-96, New York, 1995.
- [136] VARIAN H.R., Mikroekonomia. Kurs średni. Ujęcie nowoczesne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [137] VERCHER J.L., Perception and Synthesis of Biologically Plausible Motion: From Human Physiology to Virtual Reality. Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI 3881, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [138] VIEILLEDENT S., KERLIRZIN Y., DALBERA S., BERTHOZ A., Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory. Neuroscience Letters 305, 65-69, Elsevier, 2001.
- [139] VIVIANI P., Motor perceptual interactions: the evolution of an idea. Palmarini M. (ed.): Cognitive Science in Europe: Issues and Trends, 11-39, 1990.
- [140] VIVIANI P., FLASH T., Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance 21, 32-53, 1995.
- [141] VIVIANI P., TERZUOLO C., Trajectory determines movement dynamics. Neuroscience 7, 431-437, 1982.
- [142] WCISŁO R., KITOWSKI J., MOŚCIŃSKI J., Animation of group of elastic objects based on distributed physical simulation. Machine Graphics and Vision Vol. 7, nr 1/2, 41—48, 1998.
- [143] WELFE W. et al., Ekonometria stosowana. PWE, Warszawa 1996.
- [144] WHITAKER H., HALAS J., Timing for animation. Focal Press 2002.
- [145] WILLIAMS R., The Animator's Survival Kit: A Manual of Methods, Principles, and Formulas for Classical, Computer, Games, Stop Motion, and Internet Animators. Faber & Faber, 2002.
- [146] WITKIN A., POPOVIĆ Z., Motion Warping. Proc. SIGGRAPH, 105-108, Los Angeles, 1995
- [147] WITKOWSKI M., KUJAWIŃSKA M., SITNIK R., Automatic detection of 3D object deformation for face animation purposes. 5th International Conference

Mechatronics, Warsaw. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania Vol. 45, nr 8-9, 307—310, 2004..

- [148] ZADEH L.A., Fuzzy sets. Information and Control 8, 338–353, 1965.
- [149] ZADEH L.A., The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Information Science, Nr 8, 9, 10, 1975.
- [150] ZADEH L.A., Fuzzy Logic = Computing with Words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 4, 103-111, 1996.
- [151] ZIARKO W., Variable precision Rough Set Model. Journal of Computer and System Sciences 46, 1993.

