

Ю. Г. Кривонос, Ю. В. Крак, О. В. Бармак

Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України
Проспект Академіка Глушкова, 40, 03680 МСП, Київ, Україна

Моделювання рухів віртуального персонажа для просторового відтворення жестової мови

Запропоновано підхід для моделювання рухів жестової мови для подальшого просторового відтворення на 3D-моделі. Показано спроможність запропонованої технології досить реалістично відтворювати на трьохмірній моделі рухи, що отримані з відеозображення конкретної людини — носія жестової мови.

Ключові слова: *жестова мова, комп'ютерне моделювання, трьохмірна модель людини, анімація*

Вступ

Люди з вадами слуху для спілкування між собою використовують жестову мову [1]. Основними візуальними засобами, які відтворюють цю мову, є фотографічні та відеозображення жестів. Створювати за допомогою цих засобів сучасні навчальні та комунікаційні комп'ютерні системи досить проблематично. Фотографічне зображення не відтворює потрібної динаміки жестів, а відеозображення досить громіздке, і в ньому відсутня потрібна інтерактивність (не можливо подивитися на людину, яка відтворює жест з інших ракурсів крім того, в якому проведений відеозапис).

Ці суттєві обмеження існуючих засобів відтворення жестової мови спонукають до розробки більш гнучких технологій, за допомогою яких можна було б створювати нові комп'ютерні системи навчання та комунікації для людей з вадами слуху. В розвиток цього запропонована концепція інформаційної технології невербального спілкування людей з вадами слуху [2]. Комплексна інформаційна технологія включає в себе крім іншої і функціональність по синтезу рухів жестової мови глухих на просторовій моделі людини.

Реалізація можливості генерації анімації процесу мовлення за допомогою жестової мови з використанням віртуальних моделей людей потребує розробки відповідних інформаційних і математичних моделей. Слід зауважити, що жестова мова складається із комбінації жестів, кожен з яких виконується руками при певному положенні корпусу та міміки, ротових і губних рухів. У даній публікації розглядається моделювання рухів руками з урахуванням положень корпусу, так як відбуваються зміни у всьому скелетному контурі.

Підходи до проектування рухів анімованого персонажа в задачах просторового відтворення

На практиці, найбільш часто застосовується схема подання віртуального персонажа у вигляді дерева. Суть цієї схеми полягає в наступному: скелет персонажа моделюється деревом $S = D(V, E)$, де V — множина ланок скелета, E — множина з'єднань (ребер дерева). Таке дерево називають кінематичною схемою. За основу приймають вузол, що співпадає з центром мас персонажа, а від нього відходять гілки рук, ніг тощо [1]. З кожною ланкою пов'язується локальна система координат і матриця переходу від попередньої ланки до поточної ланки. Матриці переходу залежать від значень узагальнених координат, що визначають зв'язки між ланками, які входять до даної кінематичної пари. Для основного (кореневого) вузла скелета матриця переходу визначає перехід із глобальної системи відрахунку до системи відліку персонажа [4].

Такий підхід дуже зручний для опису руху персонажа і використовується в системах і методах анімації.

Розглянемо найбільш відомі методи моделювання рухів, що використовуються в сучасних системах 3D-графіки. Безпосередньо процес руху може бути поданий за допомогою сімейства функцій $m1(t), m2(t), \dots, mn(t)$ — змін значень узагальнених координат за часом t , де n — кількість узагальнених координат кінематичного ланцюга скелета [3]. Окрім цього, процес руху персонажа може бути описаний на основі методів моделювання фізики та біомеханіки [5, 6]. Тоді рухи персонажа можуть бути подані сімейством функцій $f1(t), f2(t), \dots, fn(t)$ — зміни значень напружень у м'язах. Але такий підхід вимагає великої кількості параметрів, що описують динамічну схему персонажа. До переваг такого підходу можна віднести зменшення об'єму інформації про рух і використання фізичних властивостей персонажа в процесі руху.

Однією з основних вимог при моделюванні жестової мови є реалістичність рухів, що відтворюватимуться. Виходячи з цього, найбільш прийнятним методом моделювання рухів можна вважати метод захвату рухів (motion capture) [7, 8]. Це технологія цифрового запису рухів, що використовується у розважальному, медичному, спортивному, анімаційному та кінематографічному програмному забезпеченні. Вона дозволяє отримати реалістичну анімацію, «знімаючи» її з рухів конкретних людей. Оцифрований рух отримується як множина змін узагальнених координат кінематичного ланцюга скелета за часом.

Постановка задачі

Необхідно запропонувати модель для фіксації одиниць (морфем) жестової мови, модель для синтезу проміжних станів між жестовими одиницями при поєднанні їх у жестові конструкції (речення) та реалізувати відтворення змодельованих жестових одиниць і конструкцій за допомогою просторової віртуальної моделі людини.

Модель для фіксації одиниць жестової мови

Процес відтворення жесту трьохмірною моделлю людини можна вважати анімацією з відповідною частотою різних станів спрощеної скелетної моделі людини.

Скелетна модель людини спрощено відтворює скелет живої людини. Її можна формалізувати як ієрархічну структуру, яка складається з поєднаних кінематичних пар, що відтворюють основні кістки скелета людини. Для повноцінного відтворення жестової мови пропонується використовувати наступну модель спрощеного скелета (рис. 1).

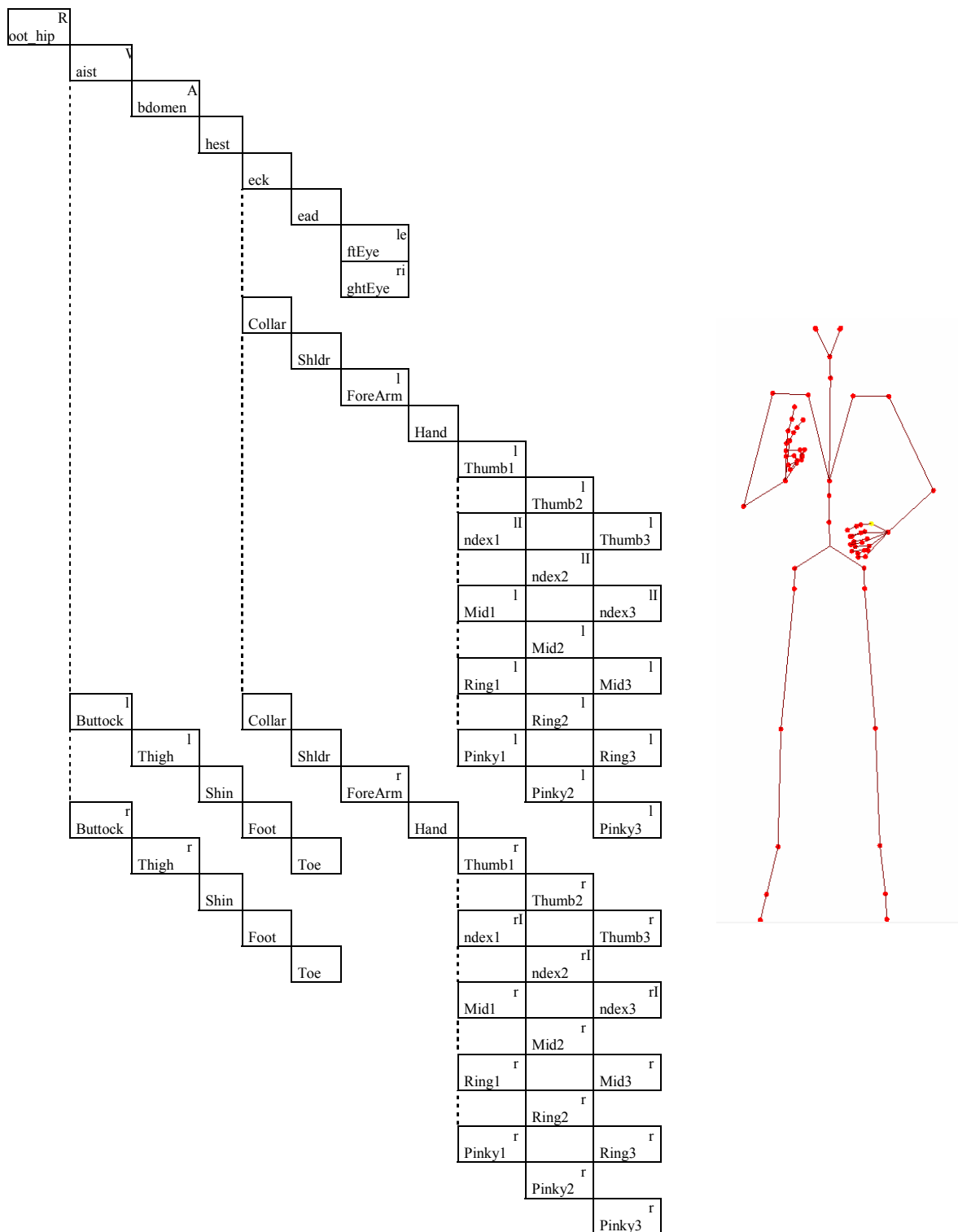


Рис. 1. Модель спрощеного скелета людини

У моделі використано 56 ланок (кісток). Особлива деталізація зроблена для області рук — основне навантаження по реалістичному відтворенню жестів саме на руках. У запропонованій моделі спрощеного скелета для рук використовуються майже всі ті кістки, що і в скелеті людини. З кожною ланкою пов'язана своя система координат (Евк-

лідова). Поворот однієї ланки відносно іншої характеризується параметрами зміни положення даної ланки відносно попередньої за умови, що система координат попередньої ланки фіксована. Ці параметри є узагальненими координатами. Положення всього скелета обчислюється у фіксованій (абсолютній) системі координат.

В якості узагальнених координат запропоновано використовувати кути Ейлера [9]. Такий вибір обумовлений тим, що переважна більшість систем захвату рухів продукує інформацію про рух у вигляді BVH-файлів, які використовують кути Ейлера [10]. Кути Ейлера визначають три повороти системи координат, за допомогою яких довільне положення системи приводиться до поточного. Матриці поворота ($R_x(\theta)$, $R_y(\theta)$, $R_z(\theta)$) на кут θ навколо відповідних осей x , y та z матимуть вигляд:

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Порядок застосування поворотів навколо відповідних осей приводить до множини можливих систем кутів Ейлера. З цієї множини виберемо кути обертання навколо осей oX , oY та oZ у заданому порядку. З множини можливих порядків, виберемо 6: XYZ , XZY , YXZ , YZX , ZXY , ZYX . Тоді для вибраних можливих порядків підсумкові матриці обертання матимуть вигляд (позначимо: $c_a = \cos(\theta_a)$ і $s_a = \sin(\theta_a)$, для $a = x, y, z$):

$$R_{xyz} = R_x(\theta_x) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_z(\theta_z) = \begin{pmatrix} c_y c_z & -c_y s_z & s_y \\ c_z s_x s_y + c_x s_z & c_x c_z - s_x s_y s_z & -c_y s_x \\ -c_x c_z s_y + s_x s_z & c_z s_x + c_x s_y s_z & c_x c_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R_{xzy} = R_x(\theta_x) \cdot R_z(\theta_z) \cdot R_y(\theta_y) = \begin{pmatrix} c_y c_z & -s_z & c_z s_y \\ s_x s_y + c_x c_y s_z & c_x c_z & -c_y s_x + c_x s_y s_z \\ -c_x s_y + c_y s_x s_z & c_z s_x & c_x c_y + s_x s_y s_z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$R_{yxz} = R_y(\theta_y) \cdot R_x(\theta_x) \cdot R_z(\theta_z) = \begin{pmatrix} c_y c_z + s_x s_y s_z & c_z s_x s_y - c_y s_z & c_x s_y \\ c_x s_z & c_x c_z & -s_x \\ -c_z s_y + c_y s_x s_z & c_y c_z s_x + s_y s_z & c_x c_y \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$R_{yzx} = R_y(\theta_y) \cdot R_z(\theta_z) \cdot R_x(\theta_x) = \begin{pmatrix} c_y c_z & s_x s_y - c_x c_y s_z & c_x s_y + c_y s_x s_z \\ s_z & c_x c_z & -c_z s_x \\ -c_z s_y & c_y s_x + c_x s_y s_z & c_x c_y - s_x s_y s_z \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$R_{zxy} = R_z(\theta_z) \cdot R_x(\theta_x) \cdot R_y(\theta_y) = \begin{pmatrix} c_y c_z - s_x s_y s_z & -c_x s_z & c_z s_y + c_y s_x s_z \\ c_z s_x s_y + c_y s_z & c_x c_z & -c_y c_z + s_y s_z \\ -c_x s_y & s_x & c_x c_y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$R_{zyx} = R_z(\theta_z) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_x(\theta_x) = \begin{pmatrix} c_y c_z & -c_x s_z & c_x c_z s_y + s_x s_z \\ c_y s_z & c_x c_z + s_x s_y s_z & -c_z s_x + c_x s_y s_z \\ -s_y & c_y s_x & c_x c_y \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В ієрархічній структурі з поєднаних кінематичних пар для обчислення стану з'єднання, потрібно створити матрицю перетворення трьохмірного вектора положення в евклідовому просторі, що переводить його координати з локальної повернутої системи відліку в абсолютну систему координат. Матриця поворотів R (2)–(7) є суперпозицією трьох матриць обертань Ейлера в одному з 6 заданих порядків обертання. Беручи до уваги те, що переміщення даної моделі не передбачається, визначення нової позиції з'єднання (p_G) при переході від локальної системи координат до абсолютної (глобальної) може бути подане як

$$p_G = R \cdot p_L, \quad (8)$$

де $p_G = (p_x, p_y, p_z)^T$; p_L — позиція цього з'єднання в локальній системі координат $p_L = (p_x, p_y, p_z)^T$.

Перетворення для поточної ланки буде пов'язане з перетворенням для її предка, предка предка тощо. Позиція цього з'єднання у абсолютній системі координат (p_{world}) може бути отримана як:

$$p_{world} = R_{Root} \cdot R_{grandparent} \cdot R_{parent} \cdot R_{child} \cdot p_{child}. \quad (9)$$

Отже для формального опису процесу фіксації жесту можна використовувати множину, що відображає модель спрощеного скелета людини (рис. 1) та зміни значення кутів Ейлера і порядок їхнього застосування для відповідних кісток цього скелета з плином часу (дискретно, з відповідною частотою (1/30 с тощо):

$$H = \{H_i : H_i = \{k, d_i, M_i \in M\}\}, \quad (10)$$

де H_i — i -та кістка скелета ($i = 0, \dots, N-1$, N — кількість кісток у скелеті); k — індекс кістки-предка; $d_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ — координати точки — кінця кістки в системі координат, що пов'язана з початком цієї кістки:

$$M = \{M_i : M_i = \{order_i, \theta_i^j\}\}, \quad (11)$$

де M_i — для i -ї кістки значення кутів Ейлера та порядок застосувань обертань для кістки з плином часу; $order_i \in \{1, \dots, 6\}$ — порядок застосування обертання навколо відповідних координатних осей для i -ї кістки (1-XYZ, 2-XZY, 3-YXZ, 4-YZX, 5-ZXY, 6-ZYX); $\theta = (\theta^j)$, $\theta^j = \{\theta_i^j : \theta_i^j = (\varphi_{iX}^j, \varphi_{iY}^j, \varphi_{iZ}^j)\}$ — множина зміни кутів Ейлера для i -ї кістки з плином часу ($j = 0, \dots, K-1$, K — кількість кадрів відтворення руху із заданою частотою).

Синтез проміжних траєкторій-переходів між жестами

Лексичною одиницею у звичайній мові є слово, стале словосполучення або інша конструкція, що спроможна означувати предмети, явища, їхні ознаки тощо. У жестовій мові такою лексичною одиницею є жест. Він має вигляд або знака, або завершеного руху. В запропонованій моделі жесту-знаку буде відповідати один стан спрощеного скелета людини H з відносно сталим значенням кутів M , а жесту-руху — послідовна зміна значення кутів і порядку застосувань обертань для кожної кістки з плином часу.

Суттєвою відмінністю жестового мовлення є його аморфність. Мовленевий жест містить поняття, але не виражає форму числа, рід, відмінок, час тощо. Тобто із досить обмеженої кількості жестів утворюються їхні прості поєднання шляхом аглютинації (склеювання) у відомому порядку:

- дійова особа, предмет – дія ([Я] – [ПРАЦЮВАТИ]),
- дія – заперечення ([ХОТІТИ] – [НІ]),
- предмет – якість,
- стан ([ДИТИНА] – [ХВОРА] [ТЯЖКО])

тощо. Беручи до уваги, що однією з важливих ознак жестової одиниці є локалізація (місце виконання жесту), виникає проблема розрахунку траєкторій-переходів від одного жесту до іншого, що подібні до рухів людей. У моделі жести отримуються шляхом оцифрування жестів реальних людей — носіїв жестової мови. Як екстенсивний, можна запропонувати підхід для отримання траєкторій-переходів шляхом фіксації та оцифрування всіх можливих траєкторій між областями-локалізаціями жестів. При такому підході залишиться задача згладжування стиків між жестом і початком траєкторії переходу. Це пов'язано з тим, що локалізація жесту досить відносно поняття — для групи жестів з однією локалізацією неможливо точно зафіксувати стан спрощеного скелета.

Виходячи з цього, сформульована наступна *постановка задачі*: необхідно, в рамках запропонованої моделі, розв'язати задачу розрахунку траєкторій-переходів між двома довільними жестами.

У загальному випадку, задача планування рухів маніпуляційної системи в області з обмеженнями є досить складною проблемою. Розв'язок оберненої задачі (за відомим значенням трьохмірних координат точки-цілі визначити значення узагальнених координат маніпуляційної системи) є задачею мінімізації функціоналу в просторі з обмеженнями (так як таких значень узагальнених координат — множина, і потрібно знайти оптимальне значення), і вона не має загального аналітичного розв'язку [11]. Існуючі чисельні підходи [12] пропонують оптимальний пошук траєкторії із множини можливих. У рамках моделі, яка використовується, потрібно знайти функціональний перехід від кінцевого стану спрощеного скелета (вектор узагальнених координат — значення кутів обертання навколо відповідних осей при кожній ланці (кістці)) одного жесту до початкового стану (інший вектор узагальнених координат) іншого жесту. При цьому цей функціональний перехід повинен породжувати таку траєкторію, яка візуально близька до траєкторії людини при аналогічному переході.

Скористаємося тим, що можна організувати планування траєкторій маніпуляційної системи як аналога процедур навчання та прийняття рішень виконання маніпуляцій і локомоцій вищих організмів [13]. Можна сказати, що вищі організми для переміщення використовують те керування, для здійснення якого потрібно зробити найменшу роботу, тобто найменшу кількість руху. У нашому випадку найменшою кількістю руху буде лінійна зміна кутів для переводу одного стану скелета в інший. Для формалізації жесту та з метою подальшого використання механізму аглютинації (для створення жес-

тових конструкцій типу речень) використаємо наступну множину:

$$G = \{G_i : G_i = \{f_i^{beg}, f_i^{end}, S_i^{beg}, S_i^{end}, \theta_i\}\}, \quad (12)$$

де G_i — конкретний жест ($i = 0, \dots, \infty$), який відповідає послідовності зміни станів спрощеного скелета з дискретним (з відповідною частотою) плином часу (10), (11); f_i^{beg} — номер стану, що відповідає початку жесту; f_i^{end} — номер стану, що відповідає кінцю жесту; $S_i^{beg} = \{(x, y, z)\}$ — координати кінців кісток спрощеного скелета для стану f_i^{beg} (у системі координат, пов'язаний з корневою кісткою спрощеного скелета); S_i^{end} — аналогічно для стану f_i^{end} ; θ_i — множина змін кутів Ейлера (із (11)).

Для розрахунку траєкторії (θ) між жестами G_l та G_m пропонується розрахувати значення узагальнених координат наступним чином:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \theta_{end}(G_l), \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + (\theta_{beg}(G_m) - \theta_{end}(G_l)) / k, i = 1, \dots, k-1, \end{aligned} \quad (13)$$

де $\theta_{end}(G_l)$ — значення узагальнених координат для останнього стану (f_i^{end}) жесту G_l ; $\theta_{beg}(G_m)$ — значення узагальнених координат для першого стану (f_i^{beg}) жесту G_m ; k — кількість станів між цими двома жестами

Кількість станів між двома жестами є фактично часом, за який потрібно перейти з кінцевого положення одного стану до початкового положення іншого. Для автоматичного визначення кількості станів пропонується обрахувати коефіцієнт, який є відношенням кількості станів переходу між двома жестами до відстані, на яку зроблено при цьому переміщення деякої точки скелета, тобто

$$coef = \frac{k}{L}, \quad (14)$$

де k — кількість станів між двома положеннями (отриманими з людини-носія жестової мови при фіксованій швидкості показування жесту); L — відстань, на яку перемістилася деяка точка скелета.

Оцифрування жестів G проводилося в одному (середньому) темпі. Розрахувавши коефіцієнт (14) для різних жестів, можливо отримати його середнє значення і використати його для розрахунку кількості перехідних станів (K) між двома жестами.

Маючи коефіцієнт $coef$, та знаючи для кожного жесту координати початку кісток спрощеного скелета S_i^{beg} для стану f_i^{beg} та S_i^{end} для стану f_i^{end} , можливо визначити кількість станів переходу від одного жесту до іншого (k):

$$k = coef \cdot L_{max}, \quad (15)$$

де $L_{max} = \max\left\{\sqrt{(S_i^{end}(G_l) - S_i^{beg}(G_m))^2}\right\}$ — максимальна відстань між двома відповідними точками-кінцями кожної кістки спрощеного скелета ($i = 0, \dots, N-1$, N — кількість кіс-

ток у скелеті) між станами f_l^{end} (для жесту G_l) і f_m^{beg} (для жесту G_m).

Беручи до уваги те, що існують деякі доволі складні жести (що відтворюють двома руками складні асоціації з реального життя) можливі ситуації, коли отримана означеним чином траекторія (13) приведе до колізії при відтворенні просторовою моделлю (неприродні перетини рук, занурення однієї руки в іншу тощо). Для подолання таких ситуацій пропонується обраховувати траекторії з використанням проміжних станів. Тобто для таких складних рухів вводиться додаткові проміжні стани, розрахунок траекторії через які не приводить до колізій.

Результати тестування запропонованого моделювання рухів

Для відтворення процесу анімації жестів і міміки трьохмірною моделлю людини створено засіб, який реалізує запропонований підхід для моделювання. Реалізована відповідна програмна функціональність, яка, використовуючи трьохмірне API OpenGL, відтворює за означеними атрибутами модель людини та, з використанням алгоритмів скінінга та морфінгу, відтворює анімацію. Тестування показало досить високу реалістичність відтворення процесу анімації жестової мови. Це досягнуто за рахунок оцифрування жестів з реальних людей — носіїв жестової мови.

Тестування алгоритму синтезу проміжних траекторій-переходів між жестами показало їхню спроможність та реалістичність для відтворення, побудованих на основі жестів, жестових конструкцій. На рис. 2. та 3 зображені побудовані та реальні траекторії для проміжних станів між жестами у жестових конструкціях. Можна констатувати, що побудовані за допомогою запропонованого підходу траекторії реалістичні і відповідають оцифрованим траекторіям-переходам.

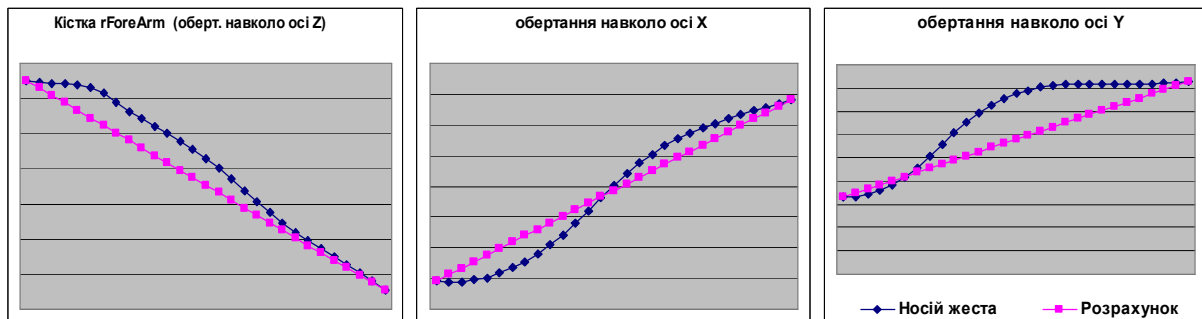


Рис. 2. Порівняння траекторій руху при переході між жестами «ТИ» і «Початковий»



Рис. 3. Кадри переходу від жесту «ТИ» до початкового жесту

Висновки

Використовуючи модель для фіксації рухів, які відтворюють українську жестову мову, була оцифрована множина з 50 жестів. Відтворення жестів із цієї множини (за допомогою моделі для відтворення анімації) показало спроможність запропонованої технології досить реалістично відтворювати на трьохмірній моделі рухи, що отримані з відеозображення конкретної людини — носія жестової мови. Реалізовано підхід для автоматичної побудови проміжних траєкторій між довільними жестами, що дало можливість з існуючої множини жестових одиниць будувати жестові конструкції — речення.

Розроблене програмне забезпечення може стати основою для створення стандарту жестової мови. Стане можливим вирішити проблему відмінностей для одних і тих самих жестів, яка виникає від того, що жести, які вивчаються, містять особливості конкретного викладача.

Подальші дослідження направлені на вдосконалення запропонованої технології:

— наповнення бази даних жестів основною множиною жестів української жестової мови — створення стандарту жестової мови;

— розробка методів і програмна реалізація для семантичного зв'язування речень українською мовою з реченнями на жестовій мові.

1. *Беликов В.И.* Жестовые системы коммуникация / В.И. Беликов // Семиотика и информатика. Вып. 20. — М.: Языки русской культуры. Русские словари, 1973. — С. 127–148.
2. *Кривонос Ю.Г.* Інформаційна технологія невербального спілкування людей з вадами слуху / Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В., Бармак О.В. [та ін.] // Штучний інтелект. — 2008. — № 3. — С. 325–331.
3. *Silva V.* A New Interface Paradigm for Motion Capture Based Animation Systems [Електронний ресурс] / Vieira da Silva // Eurographics Workshop on Animation and Simulation. — 1997. — Р. 18. — Режим доступу: <http://www.visgraf.impa.br/Projects/mcapture/publ/cas97.pdf>
4. *Grassia F.S.* Practical Parameterization of Rotations Using the Exponential Map. to Appear in jgt / F. Sebastian Grassia // Journal of Graphics Tools. — A K Peters, Ltd., 1998. — Vol. 3.3. — P. 3–18.
5. *Ильиных М.С.* Подход к параметризации движений в компьютерной анимации персонажа [Електронний ресурс] / М.С. Ильиных // Междунар. конференция по компьютерной графике GraphiCon 2003. — М., 2003. — С. 4. — Режим доступу: <http://www.graphicon.ru/2003/>
6. *Savenko A.* A Biomechanics-Based Model for the Animation of Human Locomotion [Електронний ресурс] / Alexander Savenko // The 9-th International Conference Computer Graphics & Vision GraphiCon 1999. — М., 1999. — Р. 6. — Режим доступу: <http://www.graphicon.ru/1999/>
7. *Molet T.* A Real-Time Converter for Human Motion Capture [Електронний ресурс] / T. Molet, R. Boulic, D. Thalmann // Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, Proceedings of the Eurographics Workshop'96, 1996. Comput. Graphics Lab., Fed. Inst. of Technol., Lausanne (Switzerland). — 1996. — Режим доступу: <http://infoscience.epfl.ch/record/98827>
8. *Bodenheimer B.* The Process of Motion Capture: Dealing with the Data [Електронний ресурс] / Bobby Bodenheimer, Charles Rose, Seth Rosenthal // Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, Wien: Springer-Verlag, 1997. — Режим доступу: <http://www.vuse.vanderbilt.edu/~bobbyb/pubs/dealingdata97.html>
9. *Зенкевич С.Л.* Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 400 с.
10. *Lander J.* Working with Motion Capture File Formats / Jeff Lander Darwin. — 3D, LLC. — Jan. 1998. — Р. 30–37
11. *Кириченко М.Ф.* Оптимізація маніпуляційних роботів / М.Ф. Кириченко, Ю.В. Крак, Р.О. Сорока. — К.: Либідь, 1990. — 144 с
12. *Бармак А.В.* Информационная компьютерная технология для моделирования и управления манипуляционными и виртуальными системами / Бармак А.В. // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 5. — С. 143–154.
13. *Бернштейн Н.А.* Очерки по физиологии движений и физиологии активности / Бернштейн Н.А. — М.: Медицина, 1966. — 350 с.

Надійшла до редакції 10.06.2010