

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УКРАЇНСЬКОЇ ЖЕСТОВОЇ МОВИ**

**Ю.Г. КРИВОНОС, Ю.В. КРАК, О.В. БАРМАК**

Запропоновано математичну модель та її комп'ютерну реалізацію для отримання та відтворення жестової мови за допомогою трьохвимірних моделей людей. Запропоновано технологію, яка досить реалістично відтворює рухи на трьохвимірній моделі, що отримані з відеозображення конкретної людини — носія жестової мови.

### **ВСТУП**

Дослідження закономірностей і анімації рухів є актуальною задачею. Розв'язок цієї проблеми у формі інноваційних технологій може суттєво вплинути на такі сфери людської діяльності як медицина, робототехніка, комп'ютерна графіка та системи віртуальної реальності.

В Україні більше півмільйона дітей з вадами слуху, а кількість глухих людей, для яких потрібно розробляти сучасні засоби навчання та спілкування — становить багато сотень тисяч. Розвиток сучасної науки, комп'ютеризація суспільства, використання мультимедійних та Інтернет-технологій створили достатні умови для розробки комп'ютерних систем комунікації цих людей у формах і образах близьких і зрозумілих для них і для оточуючого середовища.

Люди з вадами слуху для спілкування між собою використовують жестову мову. 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 із вадами слуху. Для розвитку цього запропоновано концепцію [1, 2] інформаційної технології невербального спілкування людей з вадами слуху. Комплексна інформаційна технологія включає в себе і функціональність по

синтезу рухів жестової мови глухих та дактильної абетки на тривимірній моделі людини.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Реалізація можливості генерації анімації процесу мовлення за допомогою жестової мови з використанням віртуальних моделей людей потребує розробки відповідних інформаційних та математичних моделей. Виходячи з цього, сформульована така постановка задачі:

- розробити інформаційну та математичну модель для фіксації морфем (мінімально значимих одиниць) жестової мови;
- у межах цієї моделі потрібно розробити технологію та відповідне програмне забезпечення для отримання, збереження та відтворення жестів;
- запропонувати алгоритмічне рішення для розрахунку людиноподібних траєкторій руху при переходах від жесту до жесту.

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ФІКСАЦІЇ МОРФЕМ МОВИ ЖЕСТІВ

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

Скелетна модель людини спрощено відтворює скелет живої людини. Її можна формалізувати як ієрархічну структуру, яка складається з поєднаних кінематичних пар, які відтворюють основні кістки скелета людини. Сучасні пакети трьохвимірного моделювання (Poser, 3D Studio Max) можуть генерувати анімацію за допомогою віртуальної статичної моделі та інформації про зміну відповідних кутів скелета. Отже, для формального опису процесу фіксації жесту можна використовувати множину, що відображає спрощений скелет людини та зміни значення кутів Ейлера і порядок їх застосування для відповідних кісток цього скелета з плином часу (дискретно, з відповідною частотою — 1/30 с тощо):

$$H = \{H_i : H_i = \{k, d_i, M_i \in M\}\}, \quad (1)$$

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, яка пов'язана з початком цієї кістки;

$$M = \{M_i : M_i = \{order_i, \theta_i^j\}\}, \quad (2)$$

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 вісей 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).

## ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ЖЕСТІВ

Історія трьохвимірної анімації нараховує вже не одне десятиліття, і прогрес у цій області очевидний. У цій роботі, для отримання та збереження жестових одиниць, використовується Motion Capture — технологія захвату рухів. Типова система Motion Capture є набором пристроїв-показчиків, які прикріплені до тіла людини (або інтегровані в костюм). Інформація з пристроїв надходить до комп'ютера та опрацьовується відповідним програмним забезпеченням, завдяки чому відтворюється математичний опис руху актора, який, у свою чергу, використовується для керування віртуальною моделлю-актором. Основним недоліком існуючих Motion Capture-систем є досить велика вартість як самого обладнання, так і відповідних послуг з відцифровки рухів. Авторами запропоновано простішу реалізацію цієї технології.

Для отримання множини кутів, які характеризують зміни положення кісток від початкового стану скелета запропоновано таку технологічну схему.

1. За допомогою трьох камер проводимо зйомку людини, яка відтворює певний жест. Камери встановлено на однаковій фокусній відстані ( $L$ ) від об'єкта зйомки та фіксують проєкції — фронтальну, ліву та праву. Стани скелета характеризують  $N$  кадрів зйомки (із заданою частотою кадрів на секунду).

2. Для фіксації  $i$ -го стану ( $i=1...N$ ) скелета відтворимо відповідні кадри зйомки у вигляді відображення на трьох дзеркальних поверхнях типу «трюмо», які розташуємо на задньому плані трьохвимірної сцени (рис. 1). Скелет розташуємо перед цими дзеркалами і спроектуємо на них ті кістки,

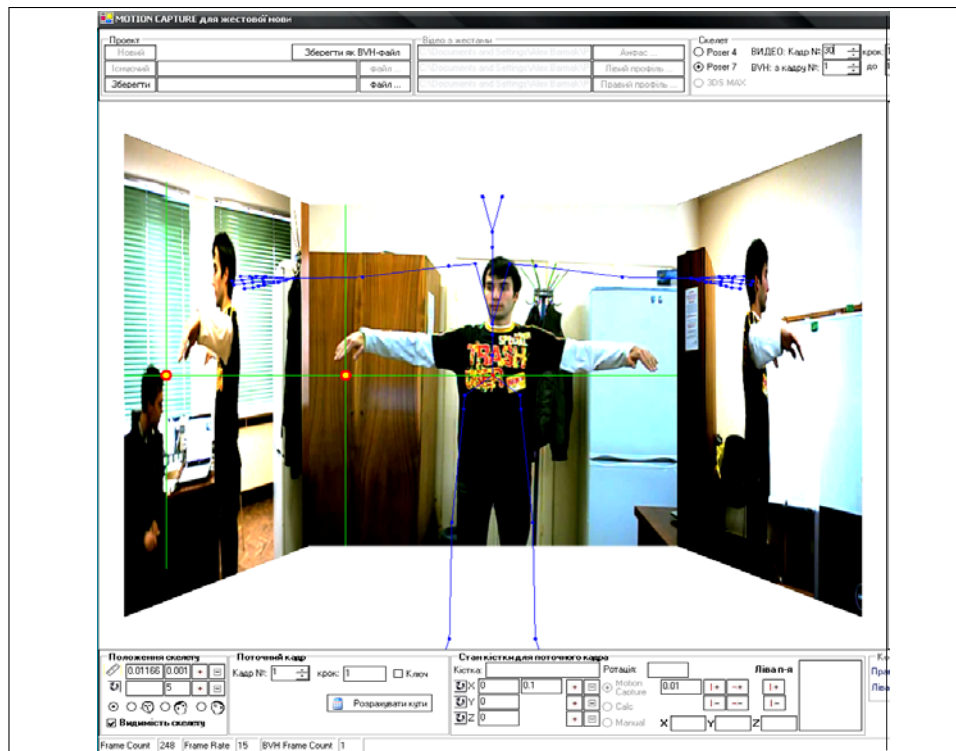


Рис. 1. Сцена для фіксації змін кутів у скелета

кути зміни для яких потрібно визначити (рис. 1). Співставимо точки проєкцій кісток скелета з відповідним їм зображенням реальної людини (для фронтального, лівого та правого кадрів), тобто отримаємо нові координати.

3. Для  $j$ -го ( $j = 1 \dots N$ ) кадру на парі зображень (фронтальне і ліве, або фронтальне і праве) вказуємо точки зчленувань кісток, які змінили положення  $((x_{i,new}^{front}, y_{i,new}^{front})$  та  $(x_{i,new}^{left\ or\ right}, y_{i,new}^{left\ or\ right}))$  та визначаємо їх трьохвимірні координати (у системі координат, пов'язаній з кореневою точкою скелета).

Далі, маючи трьохвимірні координати нового положення точок зчленування кісток визначимо значення кутів Ейлера, повороти на які переводять кожну кістку з попереднього стану до поточного. Маємо систему координат  $XYZ$  і в ній два одиничних вектори:  $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$  та  $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ . Потрібно знайти кути Ейлера  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  обертання навколо відповідних вісей  $X, Y, Z$  такі, що переводять вектор  $r_1$  у вектор  $r_2$ . Для цього:

1. Знайдемо два кути такі, щоб вектор  $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$  сумістився з віссю  $OX$ . Вектор  $r_1$  є одиничним вектором, отже,  $x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = 1$ . Проведемо відрізок від початку координат у точку  $(x_1, y_1, z_1)$ . Цей відрізок має одиничну довжину та орієнтований у напрямку вектора  $r_1$ . Опустимо перпендикуляри із точки  $(x_1, y_1, z_1)$  на кожну координатну вісь. Три направляючих кути —  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  — це кути між вектором  $r_1$  та координатними вісями. Між направляючими косинусами і компонентами  $r_1$  існує співвідношення:  $\cos(\phi_x) = x_1, \cos(\phi_y) = y_1, \cos(\phi_z) = z_1$ . У силу виконання рівності  $\cos^2(\phi_x) + \cos^2(\phi_y) + \cos^2(\phi_z) = 1$ , незалежні тільки два кути. Знаючи значення направляючих косинусів, можна визначити і кути:

$$R_z(\varphi_1^n) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1^n) & -\sin(\varphi_1^n) & 0 \\ \sin(\varphi_1^n) & \cos(\varphi_1^n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1/d & -y_1/d & 0 \\ y_1/d & x_1/d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{matrix} \cos(\varphi_1^n) = \frac{x_1}{d} \\ \sin(\varphi_1^n) = \frac{y_1}{d} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varphi_1^n = \arctg\left(\frac{y_1}{x_1}\right) + n\pi;$$

$$R_y(\varphi_2^n) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2^n) & 0 & \sin(\varphi_2^n) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_2^n) & 0 & \cos(\varphi_2^n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d & 0 & z_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -z_1 & 0 & d \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{matrix} \cos(\varphi_2^n) = d \\ -\sin(\varphi_2^n) = -z_1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varphi_2^n = \arctg\left(\frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}\right).$$

Знаходимо базисні вектори для системи координат  $X^n Y^n Z^n$ :

$$oX^{\eta} : j_1^{\eta} = (j_1^{x_1}, j_1^{y_1}, j_1^{z_1}) = (x_1, y_1, z_1),$$

$$oY^{\eta} : j_2^{\eta} = (j_2^{x_1}, j_2^{y_1}, j_2^{z_1}) = R_y(\varphi_2^{\eta})R_z(\varphi_1^{\eta})(0,1,0)^T = \left( -y_1, \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \frac{y_1 z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right),$$

$$oZ^{\eta} : j_3^{\eta} = (j_3^{x_1}, j_3^{y_1}, j_3^{z_1}) = R_y(\varphi_2^{\eta})R_z(\varphi_1^{\eta})(0,0,1)^T = \left( z_1, 0, \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right).$$

2. Аналогічно знаходимо кут  $\varphi_1^{\prime 2}$  обертання навколо вісі  $Z$  і кут  $\varphi_2^{\prime 2}$  обертання навколо вісі  $Y$  такі, що переводять систему координат  $XYZ$  у систему координат  $X^{\prime 2} Y^{\prime 2} Z^{\prime 2}$ , в якій вісь  $oX^{\prime 2}$  співпадає з вектором  $r_2$  та базисні вектори для цієї системи:

$$oX^{\prime 2} : j_1^{\prime 2} = (j_1^{x_2}, j_1^{y_2}, j_1^{z_2}) = (x_2, y_2, z_2),$$

$$oY^{\prime 2} : j_2^{\prime 2} = (j_2^{x_2}, j_2^{y_2}, j_2^{z_2}) = \left( -y_2, \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}, \frac{y_2 z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right),$$

$$oZ^{\prime 2} : j_3^{\prime 2} = (j_3^{x_2}, j_3^{y_2}, j_3^{z_2}) = \left( z_2, 0, \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right)^T.$$

3. Будемо матрицю повороту  $T$ , що переводить вектори  $r_1$  у  $r_2$ :

$$r_1 = Tr_2, \text{ де } T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{X^{\eta} X^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{X^{\eta} Y^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{X^{\eta} Z^{\prime 2}}) \\ \cos(\alpha_{Y^{\eta} X^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{Y^{\eta} Y^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{Y^{\eta} Z^{\prime 2}}) \\ \cos(\alpha_{Z^{\eta} X^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{Z^{\eta} Y^{\prime 2}}) & \cos(\alpha_{Z^{\eta} Z^{\prime 2}}) \end{pmatrix},$$

де, беручи до уваги, що вектори одиничні:

$$t_{11} = j_1^{x_1} j_1^{x_2} + j_1^{y_1} j_1^{y_2} + j_1^{z_1} j_1^{z_2} = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2,$$

$$t_{21} = j_2^{x_1} j_1^{x_2} + j_2^{y_1} j_1^{y_2} + j_2^{z_1} j_1^{z_2} = -y_1 x_2 + \frac{x_1 y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{y_1 z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}},$$

$$t_{31} = j_3^{x_1} j_1^{x_2} + j_3^{y_1} j_1^{y_2} + j_3^{z_1} j_1^{z_2} = z_1 x_2 + z_2 \sqrt{x_1^2 + y_1^2},$$

$$t_{12} = j_1^{x_1} j_2^{x_2} + j_1^{y_1} j_2^{y_2} + j_1^{z_1} j_2^{z_2} = -x_1 y_2 + \frac{y_1 x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} + \frac{z_1 y_2 z_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}},$$

$$t_{22} = j_2^{x_1} j_2^{x_2} + j_2^{y_1} j_2^{y_2} + j_2^{z_1} j_2^{z_2} =$$

$$= y_1 y_2 + \frac{x_1 x_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} + \frac{y_1 z_1 y_2 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}},$$

$$t_{32} = j_3^{x_1} j_2^{x_2} + j_3^{y_1} j_2^{y_2} + j_3^{z_1} j_2^{z_2} = -z_1 y_2 + \frac{y_2 z_2 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}},$$

$$t_{13} = j_1^{x_1} j_3^{x_2} + j_1^{y_1} j_3^{y_2} + j_1^{z_1} j_3^{z_2} = x_1 z_2 + z_1 \sqrt{x_2^2 + y_2^2},$$

$$t_{23} = j_2^{x_1} j_3^{x_2} + j_2^{y_1} j_3^{y_2} + j_2^{z_1} j_3^{z_2} = -y_1 z_2 + \frac{y_1 z_1 \sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}},$$

$$t_{33} = j_3^{x_1} j_3^{x_2} + j_3^{y_1} j_3^{y_2} + j_3^{z_1} j_3^{z_2} = z_1 z_2 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}.$$

4. Далі визначимо кути Ейлера  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ . Слід звернути увагу на те, що множення матриць не комутативне, тому потрібно розглянути шість випадків, які характеризують порядок обертання навколо вісей. Тобто, потрібно визначити кути для наступних порядків обертання навколо вісей:  $ZYX, YXZ, YZX, XYZ, XZY, ZXY$ .

4.1. Порядок обертання:  $ZYX$  ( $c() = \cos()$ ,  $s() = \sin()$ ):

$$\begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c(\varphi_y)c(\varphi_x) & c(\varphi_z)s(\varphi_x)s(\varphi_y) - c(\varphi_x)s(\varphi_z) & c(\varphi_x)c(\varphi_z)s(\varphi_y) + s(\varphi_x)s(\varphi_z) \\ c(\varphi_y)s(\varphi_z) & c(\varphi_x)c(\varphi_z) + s(\varphi_x)s(\varphi_y)s(\varphi_z) & -c(\varphi_z)s(\varphi_x) + c(\varphi_x)s(\varphi_y)s(\varphi_z) \\ -s(\varphi_z) & c(\varphi_y)s(\varphi_x) & c(\varphi_x)c(\varphi_y) \end{pmatrix}.$$

Звідси визначимо кути Ейлера шляхом вирішення таких систем:

$$\left. \begin{matrix} t_{11} = \cos(\varphi_y)\cos(\varphi_z) \\ t_{21} = \cos(\varphi_y)\sin(\varphi_z) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \frac{t_{21}}{t_{11}} = \frac{\sin(\varphi_z)}{\cos(\varphi_z)} \Rightarrow \varphi_z = \arctg\left(\frac{t_{21}}{t_{11}}\right) + n\pi,$$

$$\left. \begin{matrix} t_{11} = \cos(\varphi_y)\cos(\varphi_z) \\ t_{21} = \cos(\varphi_y)\sin(\varphi_z) \\ t_{31} = -\sin(\varphi_y) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varphi_y = \arctg\left(\frac{-t_{31}}{\sqrt{t_{11}^2 + t_{21}^2}}\right) + n\pi,$$

$$\left. \begin{matrix} t_{32} = \cos(\varphi_y)\sin(\varphi_x) \\ t_{33} = \cos(\varphi_x)\cos(\varphi_y) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varphi_x = \arctg\left(\frac{t_{32}}{t_{33}}\right) + n\pi.$$

4.2. Для інших порядків обертання кути визначаються аналогічно.

## СИНТЕЗ ПРОЦЕСУ АНІМАЦІЇ ЖЕСТОВОЇ МОВИ

Для синтезу процесу анімації жестів та міміки трьохвимірною моделлю людини запропоновано такий формальний опис, який використовує відповідні множини параметрів та алгоритми роботи з ними. Трьохвимірний модель людини, на якій реалізуватиметься процес анімації жестів та міміки, має такі атрибути:

- $V = \{v_i : v_i = \{x, y, z\}\}$  — множина вершин трикутників для триангуляції поверхні трьохвимірної моделі людини;
- $N = \{n_i : n_i = \{x, y, z\}\}$  — множина нормалей до вершин;
- $T = \{t_i : t_i = \{t, s\}\}$  — множина текстурних координат до вершин;

- $V^{\text{ind}} = \{V_i^{\text{ind}} : V_i^{\text{ind}} = \{k_1, k_2, k_3\}\}$  — множина індексів, які вказують порядок побудови трикутників з множини вершин;
- $I = \{I_i : I_i = \{img\}\}$  — множина фотографічних зображень елементів моделі — текстури.

Для моделювання скелетної анімації потрібно вміти розраховувати нові значення вершин трикутників ( $V$ ). Для цього пропонується використовувати механізм скінінга. Скінінг можна означити як алгоритм прив'язки множини вершин трикутників, які означають поверхню моделі до значень кутів скелета. Тоді модель скелетної анімації можна формалізувати таким чином:  $MH = \{MH_i : HM_i = \{k, \{l_1, \dots, l_m\}, d_i, Glb_i, Order_i\}\}$  — опис спрощеного скелета людини (ієрархія кісток) для реалізації скелетної анімації, де  $MH_i$  —  $i$ -та кістка скелета ( $i = 0, \dots, N-1$ ,  $N$  — кількість кісток у скелеті);  $k$  — індекс кістки-предка;  $\{l_1 \dots l_m\}$  — множина індексів нащадків кістки;  $d_i = [x_i, y_i, z_i]^T$  — координати точки — кінця кістки в системі координат, яка пов'язана з початком цієї кістки;  $Glb$  — вектор для визначення координат кістки в глобальній системі координат;  $Order_i$  — порядок застосування обертання.  $Skin = \{Skin_i : Skin_i = \{(IndexVertex_1, Weight_1), \dots\}\}$  — множини вершин, які впливають на поточну вершину при зміні кутів.

Скінінг розраховується для кожної вершини  $V$  таким чином:

$$v'_j = \sum_{i=0}^N \{(v_j * IBM_{H_i} * JM_{H_i}) * JW_{H_i}\},$$

де  $n$  — кількість кісток, пов'язаних із вершиною  $v$ ;  $IBM_{H_i}$  — інверсна bind-pose матриця для кістки  $H_i$ ;  $JM_{H_i}$  — матриця переміщення для кістки  $H_i$ ;  $JW_{H_i}$  — ваговий коефіцієнт для застосування впливу точок кістки  $H_i$  на вершину  $v$ .

Для моделювання анімації промовляння та емоційного забарвлення запропоновано використовувати механізм морфінгу. Морфінг можна означити як алгоритм плавного переходу від одного стану об'єкта до іншого. Під час використання морфінгу використовуються лише опорні стани, за допомогою яких розраховуються проміжні стани і моделюється процес анімації. Модель морфінгу міміки промовляння можна формалізувати таким чином.

Відображення або побудова міміки на обличчі трьохвимірної моделі досягається шляхом застосування відносного (сегментного) морфінгу до моделі голови та мімічного процесу. Формула відносного морфінгу для  $M$  морфів у формалізмі моделі матиме такий вигляд:

$$V' = V + \sum_{m=1}^M w_m TM_m,$$

де  $w_m$  — вагові коефіцієнти,  $V$  — меш базової моделі без морфінгу,  $TM_m$  — вхідний меш (морф) для блендингу (blending). Результатом операції є лінійна комбінація мешів моделі та мімік.

Метод сегментного морфінгу дає змогу: формувати декілька виразів обличчя на основі невеликої кількості морфів та змінювати стан обличчя при анімації промовляння. Додатковою перевагою сегментного морфінгу є те, що можна анімувати щелепу незалежно від губ та очей (кліпання), незалежно від емоційного прояву на обличчі.

## СИНТЕЗ ПРОМІЖНИХ ТРАЄКТОРІЙ-ПЕРЕХОДІВ МІЖ ЖЕСТАМИ

Лексичною одиницею у звичайній мові є слово, стале словосполучення або інша конструкція, що спроможна означати предмети, явища, їх ознаки тощо. У жестовій мові такою лексичною одиницею є жест. Він має вигляд знака або завершеного руху. У запропонованій моделі жесту-знака буде відповідати один стан спрощеного скелета людини  $H$  із відносно сталим значенням кутів  $M$ , а жесту-руху — послідовна зміна значення кутів та 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 їх прості поєднання шляхом аглютинації (склеювання) у відомому порядку:

- дійова особа, предмет – дія ([Я] – [ПРАЦЮВАТИ]),
- дія – заперечення ([ХОТИТИ] – [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 жеста досить відносно поняття — для групи жестів з однією локалізацією не можливо точно зафіксувати стан спрощеного скелета.

Виходячи з цього, сформульована така *постановка задачі*: потрібно, в межах 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 (з відомого значення трьохвимірних координат точки-цілі визначити значення узагальнених координат маніпуляційної системи) є задачею мінімізації функціонала в просторі з обмеженнями (оскільки таких значень узагальнених координат — множина та потрібно знайти оптимальне значення) і вона не має загального аналітичного розв'язку [3]. Існуючі чисельні підходи [4] пропонують оптимальний пошук траєкторії із множини можливих. У межах моделі, яка використовується, потрібно знайти функціональний перехід від кінцевого стану спрощеного скелета (вектор узагальнених координат — значення кутів обертання навколо відповідних вісей при кож-



ній ланці (кістці)) одного жесту до початкового стану (інший вектор узагальнених координат) іншого жесту. При цьому цей функціональний перехід має 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 й прийняття рішень виконання маніпуляцій і локомоцій вищих організмів [5]. Можна сказати, що вищі організми для переміщення використовують таке керування, для здійснення якого потрібно зробити найменшу роботу, тобто найменшу кількість рухів. У нашому випадку найменшою кількістю рухів буде лінійна зміна кутів для переведення одного стану скелета в інший. Для формалізації жесту, а також з метою подальшого використання механізму аглютинації (для створення жестових конструкцій типу речень) використаємо таку множину:

$$G = \{G_i : G_i = \{f_i^{\text{beg}}, f_i^{\text{end}}, S_i^{\text{beg}}, S_i^{\text{end}}, \theta_i\}\}, \quad (3)$$

де  $G_i$  — конкретний жест ( $i = 0, \dots, \infty$ ), який відповідає послідовності зміни станів спрощеного скелета з дискретним (з відповідною частотою) плином часу (1)–(2);  $f_i^{\text{beg}}$  — номер стану, що відповідає початку жесту;  $f_i^{\text{end}}$  — номер стану, що відповідає кінцю жесту;  $S_i^{\text{beg}} = \{(x, y, z)\}$  — координати кінців кісток спрощеного скелета для стану  $f_i^{\text{beg}}$  (у системі координат, пов'язаній з корневою кісткою спрощеного скелета);  $S_i^{\text{end}}$  — аналогічно для стану  $f_i^{\text{end}}$ ;  $\theta_i$  — множина змін кутів Ейлера (із (2)).

Для розрахунку траєкторії ( $\theta$ ) між жестами  $G_l$  та  $G_m$  пропонується розрахувати значення узагальнених координат таким чином:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \theta_{\text{end}}(G_l), \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + (\theta_{\text{beg}}(G_m) - \theta_{\text{end}}(G_l))/k, \quad i = 1, \dots, k-1, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\theta_{\text{end}}(G_l)$  — значення узагальнених координат для останнього стану ( $f_i^{\text{end}}$ ) жесту  $G_l$ ;  $\theta_{\text{beg}}(G_m)$  — значення узагальнених координат для першого стану ( $f_i^{\text{beg}}$ ) 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:

$$\text{coef} = \frac{K}{L}, \quad (5)$$

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

Виходячи з того, що оцифрування жестів  $G$  проводилось в одному (середньому) темпі, розрахувавши коефіцієнт (5) для різних жестів, можливо отримати його середнє значення та 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 ( $K$ ):

$$K = coef L_{max}, \quad (6)$$

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 скелета ( $i = 0, \dots, N - 1$ ,  $N$  — кількість кісток у скелеті) між станами  $f_i^{end}$  (для жесту  $G_l$ ) та  $f_m^{beg}$  (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 траєкторія (4) приведе до колізії при відтворенні просторовою моделлю (неприродні перетини рук, занурення однієї руки в іншу тощо). Для подолання таких ситуацій пропонується обраховувати траєкторії з використанням проміжних станів. Тобто, для таких складних рухів вводиться додаткові проміжні стани, розрахунок траєкторії через які не приводить до колізій.

## ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ПРОЦЕСУ АНІМАЦІЇ

Для відтворення процесу анімації жестів та міміки трьохвимірною моделлю людини створено комплекс програм, який реалізує скелетну (для відтворення жесту) та морфемну (для відтворення міміки промовляння та емоцій) анімацію. Реалізована відповідна програмна функціональність, яка, використовуючи трьохвимірне API OpenGL, відтворює по означеним атрибутам модель людини (рис. 2), та з використанням алгоритмів скінінгу та морфінгу відтворює анімацію (рис. 3).

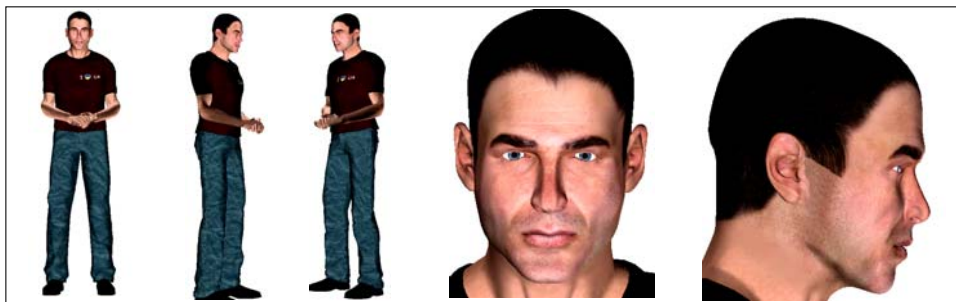


Рис. 2. Відтворення трьохвимірної моделі людини

Для реалізації української жестової мови було створено програму (рис. 4), яка відтворює методику викладання жестової мови в спеціальних

загальноосвітніх школах для нечуючих дітей. За основу було взято рекомендовану Міністерством освіти програму [6] для початкових класів.

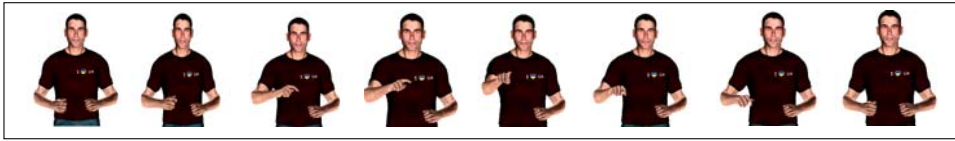


Рис. 3. Кадри анімації жесту «Ти»

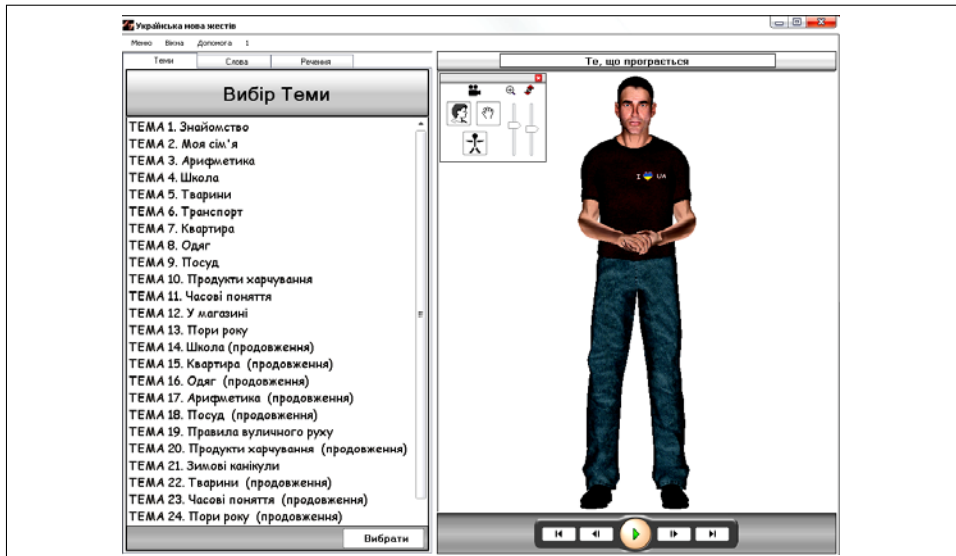


Рис. 4. Програма «Українська жестова мова»

Функціонально програма складається з трьох інформаційних блоків «Теми», «Слова» та «Речення» і блока відтворення жесту віртуальною моделлю. Основним блоком є блок «Теми». У ньому сконцентровано основні методичні відомості, які розглядаються на уроці: що потрібно у цій темі сформулювати в учнів; які навички потрібно засвоїти, які особливості морфології жестової мови та, які види синтаксичних конструкцій містить матеріал. Наведено список нових жестів з теми, що розглядається, та речення з цими словами, які містять граматичні та синтаксичні конструкції (рис. 5).

Блоки «Слова» та «Речення» (рис. 6, 7) мають допоміжну функцію. У них сконцентровано всі жести та приклади речень (які використовують розглянуті жести).

Блок відтворення жесту віртуальною моделлю у цій реалізації виконує особливу функцію. Саме за допомогою нього можливо демонструвати в навчальному процесі динаміку жесту. Беручи до уваги, що жести оцифровуються носіями жестової мови, вони, по суті, стають стандартами відтворення жесту. Реалізована у блоці можливість покадрового показу жесту слугує засобом, за допомогою якого стане можливим вивчення жесту без особливостей показу конкретним викладачем. Це стане основою того, що вивчені дітьми жести будуть однаковими для різних шкіл, регіонів. Фактично, жестова мова (в основній своїй множині) стане стандартом на території України.

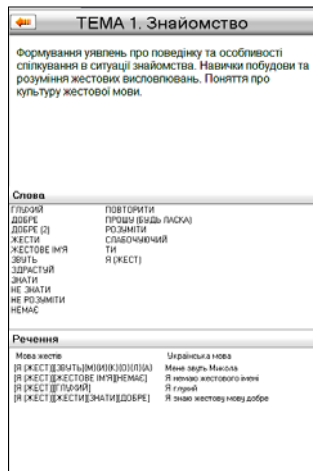


Рис. 5. Блок «Теми», тема «Знайомство»

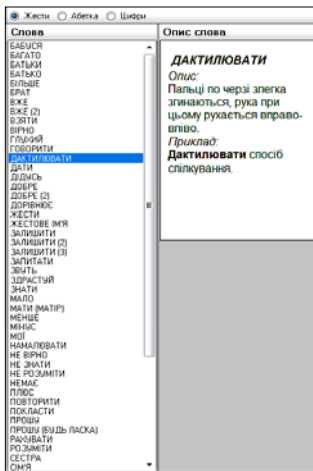


Рис. 6. Блок «Слова»



Рис. 7. Блок «Речення»

## ВИСНОВКИ

Використовуючи модель для фіксації рухів, які відтворюють українську жестову мову було оцифровано множини з 50 жестів. Відтворення жестів із цієї множини (за допомогою моделі для відтворення анімації) показало спроможність запропонованої технології досить реалістично відтворювати на трьохвимірній моделі рухи, що отримані з відеозображення конкретної людини — носія жестової мови.

Було реалізовано програмне забезпечення, яке відтворює декілька уроків української жестової мови. Було взято уроки із програми спеціальних загальноосвітніх шкіл для нечуючих дітей [6].

Розроблене програмне забезпечення є основою для розробки та реалізації певних стандартів жестової мови. Це дає можливість вирішити проблему відмінностей для одних і тих самих жестів, яка виникає через їх інтерпретацію конкретним викладачем.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення запропонованої технології:

- наповнення бази даних жестів основною множиною жестів української жестової мови — створення стандарту жестової мови;
- створення засобу для семантичного зв'язування речень українською мовою з реченнями на жестовій мові.

Відзначимо, що реалізація всього словника української жестової мови, використовуючи розроблений підхід і створену комп'ютерну технологію, займе невеликий проміжок часу (рік–два) і дозволить зробити впровадження такої системи в межах усієї держави.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В., Бармак О.В. та ін. Інформаційна технологія невербального спілкування людей з вадами слуху // Штучний інтелект. — 2008. — № 3. — С. 325–331.

2. *Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В., Бармак О.В.* та ін. Інформаційна технологія для моделювання української мови жестів // Штучний інтелект. — 2009. — № 3. — С. 186–198.
3. *Кириченко М.Ф., Крак Ю.В., Сорока Р.О.* Оптимізація маніпуляційних роботів. — Київ: Либідь, 1990. — 144 с.
4. *Бармак А.В.* Информационная компьютерная технология для моделирования и управления манипуляционными и виртуальными системами // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 5. — С. 143–154.
5. *Бернштейн Н.А.* Очерки по физиологии движений и физиологии активности. — М.: Медицина, 1966. — 350 с.
6. *Грищенко Є.С., Стьопкін В.В.* Українська жестова мова 1–4 класи. — Київ: Богдана, 2004. — 100 с.

*Надійшла 07.06.2010*