

Ю. В. Крак¹, О. В. Лозинська², В. В. Пасічник², А. С. Тернов³, Д. В. Шкільнюк⁴¹Київський національний університет ім. Т. Шевченка,
кафедра теоретичної кібернетики,²Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж³Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова,
відділ інтелектуальних інформаційних технологій,⁴Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
кафедра математичних проблем управління і кібернетики

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ТА ПРИКЛАДНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ, ПЕРЕКЛАДУ ТА НАВЧАННЯ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОЇ ЖЕСТОВОЇ МОВИ

© Крак Ю. В., Лозинська О. В., Пасічник В. В., Тернов А. С., Шкільнюк Д. В., 2016

Розв'язано низку важливих наукових та науково-прикладних задач, пов'язаних із розробленням математичних методів та формуванням комплексу прикладних інформаційних технологій моделювання, опрацювання та перекладу української жестової мови. Проаналізовано та запропоновано нові методи розпізнавання та ідентифікації дактилем жестової абетки, методи комп'ютерного перекладу анотованої української жестової мови. Виконано оригінальні дослідження лінгвістичних особливостей української жестової мови та розроблено граматично доповнену онтологію української словесної та української жестової мов. Розроблено мультимедійну технологію аналізу візуальних образів звуків і емоційних мімік обличчя людини, що дало змогу реалізувати анімацію емоційно-артикуляційного каналу носія жестової мови.

Ключові слова: українська жестова мова, інформаційна технологія, розпізнавання жестів, дактильна абетка жестової мови, синтез та розпізнавання міміки губ, візема, реалістична тривимірна анімація жестової мови, модель синтезу анімації мовленнєвої інформації, система комп'ютерного перекладу, граматично доповнена онтологія, дерево синтаксичного розбору, афіксна ймовірнісна контекстно-вільна граматики.

In the scientific paper a number of important scientific and applied tasks related to the development of mathematical methods and the formation of a complex of applied information technologies of modeling, processing and translation of the Ukrainian sign language are solved. New methods of recognition and dactyl identification of the sign alphabet, methods of computer translation of the annotated Ukrainian sign language are analyzed and proposed. It is performed the original research of the linguistic peculiarities of the Ukrainian sign language and developed the grammatically augmented ontology of the Ukrainian verbal and Ukrainian sign language. The multimedia technology of the analysis of the visual sound images and the emotional facial gesture, allowing to implement the animation of the emotional speech channel of the sign language speaker is developed.

Key words: Ukrainian sign language, information technology, recognition of gestures, finger alphabet sign language, visual-speech synthesis and lips reading, visemes, realistic three-dimensional animation of sign language, model of visual-speech animation synthesis, computer translation system, grammatically augmented ontology, parsing tree, affix probabilistic context free grammar.

Вступ

Надзвичайно великий обсяг інформації, яка є доступною нині користувачам комп'ютерів, унеможливує повний переклад усіх текстових і мультимедійних ресурсів жестовою мовою. Одним із ефективних технологічних підходів до вирішення цієї проблеми є розроблення комп'ютеризованої системи перекладу української словесної мови українською жестовою мовою та

навпаки. Жестова мова (ЖМ) – це комунікативна система, висловлювання якої побудовані не на звуковій, а на жестикуляційно-мімічній основі (жести рук, артикуляція губ, міміка та емоції). Українська жестова мова (УЖМ) є природною візуально-просторовою мовою, яка використовується при комунікації в спільнотах, в яких є нечуючі та слабкочуючі.

Процес перекладу жестової мови словесною можна поділити на дві окремі задачі: задачу розпізнавання і анотування жестів та задачу перекладу анотованих жестів. У роботі для анотування української жестової мови обрано систему запису жестів у вигляді глосів, оскільки ця система є доволі зручною для комп'ютерного подання жестів та часто використовується у системах комп'ютерного перекладу, розроблених для іноземних жестових мов.

У жестових мовах інформація кодується рухами рук, тіла, мімікою обличчя і сприймається зорово. Це зумовлює спроможність жестової мови виражати емоції і почуття нечуючої людини за допомогою різноманітних мовних засобів емотивної лексики через експресію руху та емоційну міміку на обличчі носія жестової мови. З огляду на особливості відтворення жестової мови, які вимагають відвертого і виразнішого прояву емоційно-артикуляційного процесу на обличчі та в жестах, аналіз міміки емоції і артикуляції при відтворенні жестової мови, є доволі важливим фактором розуміння семантики інформації, яка передається з подальшим її елементним синтезом.

Розглянуто інформаційні технології моделювання, опрацювання та перекладу української жестової мови. Розроблення такого комплексу інформаційних технологій моделювання та перекладу української жестової мови для користувачів з вадами слуху дає змогу реалізувати їх право на безбар'єрне отримання інформації та забезпечує їх повноцінну соціальну інтеграцію в сучасному інформаційному суспільстві.

Постановка проблеми

В освітньо-науковому та технологічному контекстах актуальним завданням є розроблення програмних засобів, які допомагають під час вивчення та перекладу української жестової мови.

Проблема розроблення мультимедійних систем розпізнавання елементів дактильної мови як одного із засобів комунікації між людьми з вадами слуху є доволі актуальною для вітчизняної науки та світової спільноти.

Значущість названої проблематики посилюється також у зв'язку з необхідністю створення систем, які забезпечать рівні умови для спілкування, сприйняття та оволодіння інформацією людьми із вадами слуху в соціальних процесах.

Застосування сучасних інформаційних технологій для надання інформації особам з вадами слуху є актуальною науково-прикладною проблемою, для вирішення якої активно шукаються нові підходи [1, 2], створюються нові методи та засоби [3–5].

Проблемою розпізнавання і анотування жестів займалися вчені Т. Гіп і Д. Хогг (Т. Hear and D. Hogg), Дж. Ліхтенауер та Г. Гольт (J.F. Lichtenauer and G.A. ten Holt), К. Майерс та Л. Ребінер (C. S. Myers and L. R. Rabiner), М. Захеді (M. Zahedi) та ін., для її вирішення розроблені спеціалізовані апаратно-програмні комплекси, такі як Microsoft Kinect, Acer Aspire One, Intel IntelliSense та ін. З іншого боку, задача комп'ютерного перекладу анотованої української жестової мови ще є не повністю розв'язаною. Запропоновані в роботі авторів математичні моделі і методи доведені до практичної реалізації у рамках відповідних програмних засобів: програмно-алгоритмічного комплексу перекладу анотованої УЖМ, програмних засобів для вирішення проблеми моделювання та розпізнавання емоційної та артикуляційної складової мовленнєвого процесу на обличчі людини для відтворення та розпізнавання жестової мови, прикладної програми для ідентифікації та розпізнавання елементів дактильної абетки.

Результати наукового дослідження впроваджені та використовуються для підготовки та створення навчальних матеріалів, поданих анотованою українською жестовою мовою, у Львівській спеціальній загальноосвітній школі-інтернаті Марії Покрови для глухих дітей, впроваджені в навчальний процес у Кам'янець-Подільському багатопрофільному навчально-реабілітаційному центрі, у Тернопільській спеціалізованій загальноосвітній школі-інтернаті I–III ступенів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В Україні розроблення з розпізнавання мови за рухами губ ведуть у межах досліджень з розпізнавання облич людей у Кібернетичному центрі НАН України (м. Київ), Інституті проблем штучного інтелекту МОН України та НАН України (м. Донецьк), Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Національному університеті “Львівська політехніка” та інших наукових і навчальних закладах.

У світі проблемам мовотворення і, відповідно, візуальної складової мовленнєвого процесу в контексті задачі комп’ютерної обробки, аналізу і синтезу присвячено багато досліджень [6, 7]. Що стосується анімації мовленнєвого процесу, то дослідження проводять як у загальному випадку [8, 9], так і для спеціальних систем, орієнтованих зокрема на інтеграцію людей з вадами слуху у суспільство. Розвиток такого напрямку досліджень (розуміння, правильне сприймання і синтез артикуляції) є необхідним не тільки для людей з вадами слуху, але і для людей, що працюють за наявності певних шумових перешкод або на далекій відстані [10], для навчання правильній артикуляції людей, які цього потребують (логопедія) тощо.

Базовим для вивчення жестової мови вважається український тематичний відеословник жестової мови, який розробили Н. Іванюшева та Є. Зуєва. Словник містить 1800 жестів різної тематики, відеозаписи розмов жестовою мовою. Словник доступний на DVD та на касетах формату VHS.

Найбільш поширені програмні засоби, які використовують для перекладу іноземних жестових мов – це програма iCommunicator [11], програма ViSiCAST [12], програма TEAM Project [13] (для англійської жестової мови), проект SASL-MT [14] (для південноафриканської жестової мови), програма THETOS [15] (для польської жестової мови). Проте зазначені програмно-алгоритмічні засоби не можуть бути використані для перекладу УЖМ.

Серед методів машинного перекладу, які можна використати для перекладу жестових мов, методи перекладу на основі правил [16, 17], методи перекладу на основі даних [18], методи перекладу на основі онтологій [19] та статистичні методи перекладу [20–22]. Значний внесок у дослідження проблеми перекладу жестових мов зробили С. Моррісей та Е. Вей (S. Morrissey and A. Way), Д. Стайн, Ф. Дрю, Г. Ней (D. Stein, P. Dreuw, H. Ney) (для англійської жестової мови), Р. Сан-Сегундо, А. Перез, Д. Ортіз, Л.Д. Д’Таро, М.І. Торез, Ф. Касакуберта (R. San-Segundo, A. Pérez, D. Ortiz, L.F. D’Haro, M. I. Torres, F. Casacuberta) (для іспанської жестової мови), Я. Банджерот (J. Bungeroth) (для німецької жестової мови).

Сьогодні багато провідних наукових установ займаються питанням розроблення систем розпізнавання елементів дактильної та жестової мови. Запропоновані системи поділяють на такі групи:

- системи розпізнавання жестів з використанням рукавичок з різними типами давачів;
- системи розпізнавання жестів з використанням 3D-камер та камер стереозображення;
- системи розпізнавання жестів з використанням відео камер.

Проаналізувавши запропоновані системи, можна зробити висновок, що важливою проблемою є ідентифікація та розпізнавання елементу дактильної мови, яку відтворюють люди з різними розмірами руки на різних фокусних відстанях.

Цю проблему пропонується вирішити шляхом аналізу відеопотоку, виділення області точок, які належать до руки, та визначення ефективних ознак для подальшого розпізнавання елементів дактильної мови.

Одним із ефективних підходів до розпізнавання елементів дактильної мови є використання механічних рукавичок. Користувач одягає на руку спеціальну рукавицю з давачами, які збирають інформацію про положення суглобів пальців та орієнтацію руки. За отриманою інформацією досягають високого рівня розпізнавання для створення бази жестів. Недоліками таких систем є висока ціна механічних рукавичок, а також незручність відтворення жестів за їх допомогою, що робить такі системи обмежено придатними для спілкування та широкого використання глухими людьми.

За допомогою використання механічної рукавички DataGlove [23] було розроблено систему розпізнавання американської дактильної абетки. Серед недоліків системи розпізнавання слід назвати її залежність від користувача, тобто хороші результати розпізнавання були з користувачем,

на жестах якої система була навчена. Тому в роботі [24] було розширено систему з використанням механічної рукавички для декількох користувачів. У тестових експериментах для восьми користувачів було досягнуто правильності розпізнавання на рівні 95 % завдяки використанню прихованих марковських моделей і бази даних, яка містила декілька прикладів кожного жесту. Ще один підхід до розпізнавання жестів полягає у використанні як засобів отримання інформації не механічних рукавичок з різними давачами, а кольорових рукавичок [25–27]. Зазначимо, що за таким підходом використовують інформацію з кольорової відеокамери. Запропонований у роботі [250] метод дає змогу за допомогою однієї відеокамери у режимі реального часу розпізнавати конфігурацію руки і відстежувати рухи долоні в просторі.

3D-камери – це камери, які, крім зображення, отримують інформацію про віддалі до об'єкта. Використання таких технічних засобів зі збільшенням роздільної здатності й частоти кадрів для розпізнавання елементів ЖМ [28] показало ефективність такого підходу. У роботі [29] запропоновано метод розпізнавання жестів на основі виявлення руху за парою зображень і різниці дальності та використання 3D-форми, узгодженої з 3D-контекстною формою.

Важливим засобом, який дає змогу отримати тривимірне положення тіла людини у реальному часі, є обладнання Kinect [30] компанії Microsoft, яке використовує дві кольорові камери, тривимірний сенсор глибини, CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) сенсор та мікрофонну решітку. Методи, які використовують такі сенсори, дають змогу у реальному часі розпізнавати ключові точки тіла людини і є незалежними від зміни освітлення. До недоліків належить невисока точність розпізнавання конфігурацій та динамічних жестів руки людини [31]. Так, у роботі [32] за цими методами отримано якість розпізнавання, не більшу за 75 %, а у роботі [33] методи розпізнавання дактилем російської та американської абетки із застосуванням технології Kinect дозволили вийти на рівень розпізнавання понад 85 %, що свідчить про перспективність такого підходу.

Важливим засобом отримання просторової інформації є використання стереокамер – систем, що складаються з двох камер, які напрямлені на об'єкти під різними кутами та одночасно отримують зображення. У роботі [340] досліджено можливість створення тренажера ЖМ з можливостями розпізнавати жести і контролювати правильність їхнього виконання. Для роботи системи користувач одягав кольорові рукавички. Дані 4 людей використовували для тренування, інших – для перевірки. Якість правильного розпізнавання становила близько 87 %.

Використання стереокамери для відтворення тривимірної форми кисті руки досліджено у роботі [35]. Було використано метод гнучких об'єктів для створення тривимірної моделі кисті руки. Основна ідея методу полягала в знаходженні гранично-скелетної моделі кисті та використання цієї моделі для побудови тривимірного об'єкта.

Системи розпізнавання дактильної та жестової інформації на основі відеоданих побудовано переважно за такої послідовності кроків [7, 36, 37]: 1) отримання вхідного зображення; 2) знаходження на зображенні обличчя і кистей рук; 3) виділення значимих характеристик (ознак); 4) зменшення кількості характеристик; 5) пошук у базі даних; 6) побудова послідовності жестів, що були розпізнані (букви, слова).

Для знаходження обличчя і рук на зображенні використовуються методи пошуку областей за кольором шкіри (гауссівська модель шкіри або досконаліша модель суміші гауссівських розподілів [38]).

Як суттєві ознаки для траєкторій руху використовують різноманітні числові значення: а) вхідні зображення у градаціях сірого; б) положення обличчя і рук на зображенні; в) напрямок руху долонь на зображенні; г) опис долонь у вигляді еліпсів тощо.

У роботі [39] наведено систему розпізнавання жестів, в якій використано сегментацію зображення, відстеження обличчя і рук. Для найдостовірнішого відстеження обличчя і рук використовують алгоритми виявлення кольору шкіри, особливостей руху, позицій рук і обличчя.

Дві камери використано у роботі [40] для розпізнавання жестів. Для ідентифікації жестів використовують приховану марківську модель та марківську модель, яка залежить від вхідних даних. Результати дослідження показали: розпізнавання на основі марківської моделі, яка залежить

від вхідних даних, становить 74 %, тоді як для звичайної моделі якість розпізнавання становить 64 %. Систему з двома відеокамерами (одна камера була фронтальна, а друга – профільна) для розпізнавання підмножини американської жестової мови, яка складається з 10 жестів, було запропоновано у роботі [41]. Також пропонується як варіант ефективного розпізнавання розмістити камеру над столом і відслідковувати рухи руки на фоні стола [42]. Після отримання зображення з камери здійснюється сегментація зображення і визначаються області, колір яких належить до кольору шкіри. Для розпізнавання жесту руки використовують багатошаровий перцептрон, котрий складається з трьох шарів і 39 нейронів.

Методи та засоби дослідження мімічних проявів на обличчі людини для відтворення і розпізнавання жестової мови

Запропоновано об'єктно-елементну модель синтезу анімації мовленнєвого процесу для відтворення жестової мови з використанням морфем візем української мови і емоцій. Авторами створено алгоритми реалізації морфемної анімації для відтворення процесу анімації міміки тривимірною моделлю людини. Побудовано інформаційну та математичну модель для реалізації можливості генерації анімації процесу мовлення за допомогою жестової мови з використанням віртуальних моделей людини. Розроблено принципи синхронізації анімаційних процесів жестикуляції та артикуляції для відтворення української жестової мови.

Для задачі синхронізації артикуляції з жестом у роботі авторами пропонується модифікація комбінованого текстово-мовного підходу, яка використовує текстові дані, а також додаткову інформацію про часову тривалість звучання фонем та їх часові границі для конкретного слова. Цю додаткову інформацію отримано за даними голосового синтезатора, який використовує результати досліджень в області лінгвістики української мови, та структури подання синтезатором слова. Інформацію, яку використовують для синхронізації, формують на етапі опрацювання текстового подання нормальної словоформи відповідно до жесту. Схему процесу опрацювання показано на рис. 1.

Приклад роботи віземізатора для вхідної нормальної словоформи “багато” наведено такою схемою:

БАГАТО → ⟨ПБМ(7)А(7)|КГХГк(4)А(7)|Т'Д'Н'(5)О(9)⟩ ,

де “ПБМ”, “А” та інші – назви візем; “|” – границі сегментів; “(7)” – кількість кадрів анімації без синхронізації для кожної віземи.



Рис. 1. Вхідні дані для різних методів

Автори синтезували на основі неоднорідних раціональних В-сплайнів (NURBS-кривих) загальну математичну модель станів губ, враховуючи їх будову у певної людини. Цю модель станів губ використано для створення системи навчання правильній артикуляції під час промовляння слів українською мовою, що дало змогу проаналізувати віземну структуру візуально-мовленнєвого потоку даних на основі побудованої характеристичної множини візем мови. Для створення інформаційної технології запропоновано синтезовану математичну модель станів губ конкретної людини, а також побудована база морфем візем і емоційних станів для української жестової мови. Розроблено структури подання даних та реалізовано алгоритми тривимірної морфемної анімації з використанням функції розподілу за кадрами.

Для створення інформаційної технології синтезовано математичну модель станів губ конкретної людини. Схему технології розпізнавання міміки під час промовляння слів українською мовою показано на рис. 2.

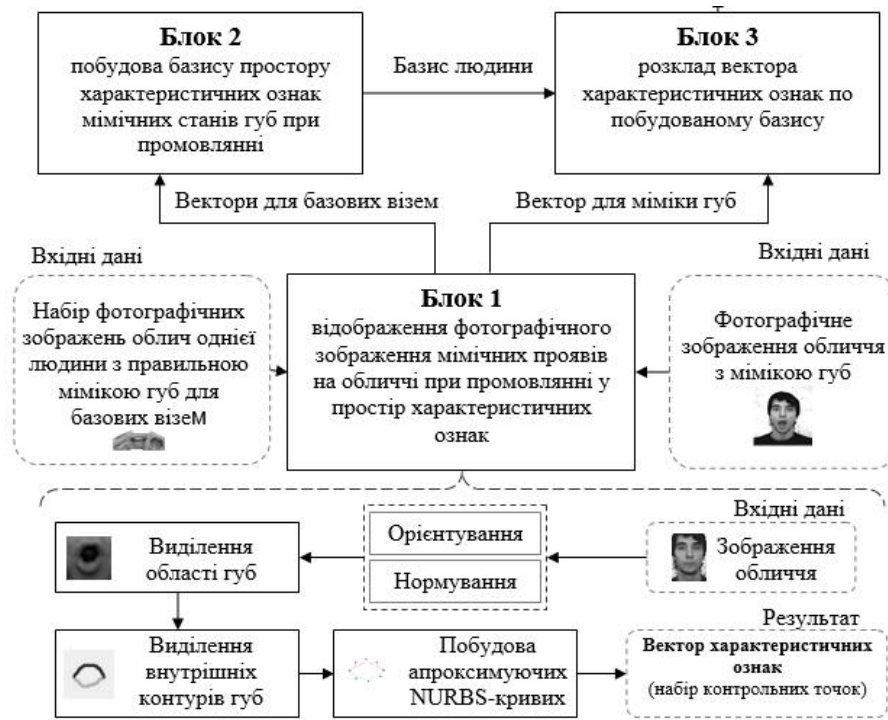


Рис. 2. Схema розпізнавання міміки при промовлянні українською мовою

Блок 1 на рис. 2 відповідає за попередню обробку вхідної візуальної інформації та перетворення її на простір характеристичних ознак (5).

Блок 2 містить алгоритми побудови базису простору характеристичних ознак та оцінки його якості. На виході будується базисна матриця A розмірністю $M \times L$ простору характеристичних ознак P . У цьому випадку під базисом простору P розуміють набір характеристичних векторів базових мімік або базових візем з $\text{Im}L$. Загалом в українській мові таких візем шістнадцять, враховуючи стан спокою.

У третьому блоці відбувається розклад вектора характеристичних ознак b , побудованого для вхідного зображення, яке розпізнається, за отриманим базисом. Задача розкладу зводиться до задачі знаходження усіх векторів x , для яких виконується рівність $Ax = b$. Розв'язок задачі отримують методом найменших квадратів у вигляді опуклої комбінації: $x = (A^T A)^{-1} A^T b$, де A^T – транспонована матриця A .

Результатом роботи технології є вектор розкладу, на основі якого приймається рішення про відповідність вхідного вектора конкретним базовим мімікам при промовлянні українською мовою.

Методи та засоби комп'ютерного перекладу української жестової мови з використанням граматично доповненої онтології

Під час дослідження автори встановили, що процес перекладу анотованої української жестової мови є складною науково-прикладною проблемою, вирішення якої вимагає розв'язання низки задач, пов'язаних з усуненням неоднозначності слів, синтаксичним розбором жестових та словесних речень, збереженням та використанням знань експерта-перекладача.

Автори розробили інфологічну модель словника концептів “Українська словесна мова – Українська жестова мова” для перекладу анотованої української жестової мови. Інфологічну модель словника концептів “Українська словесна мова – Українська жестова мова” подано діаграмою “сутність-зв'язок” на рис. 3.

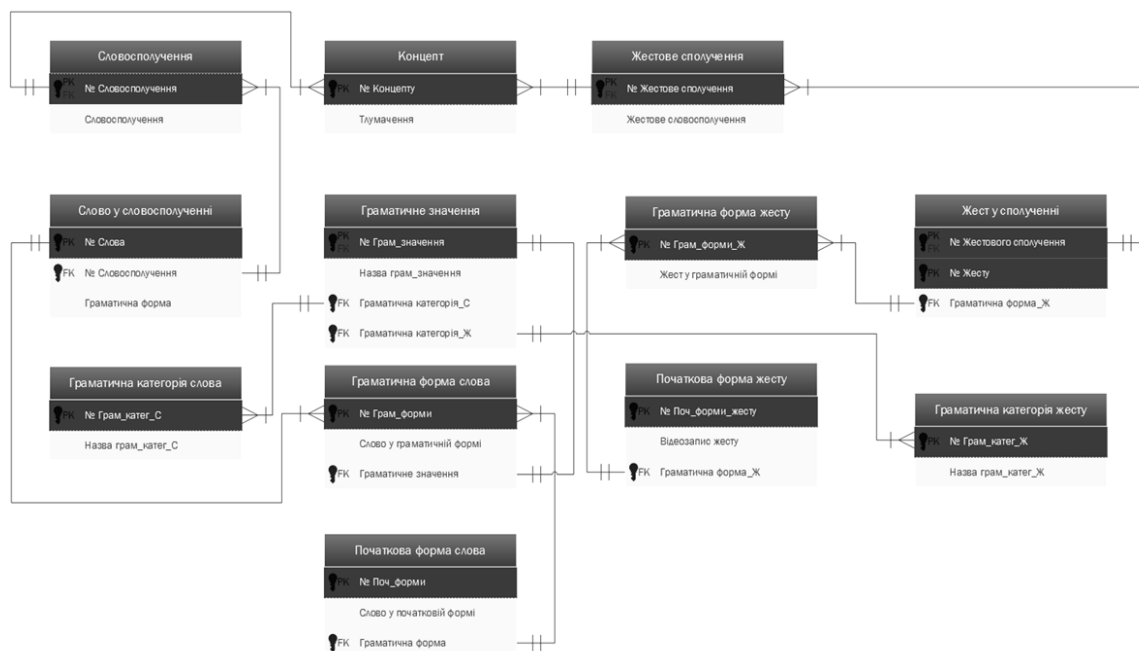


Рис. 3. Діаграма “сутність-зв’язок” словника концептів української словесної та жестової мов

Удосконалено метод перекладу на основі правил з використанням словника концептів “Українська словесна мова – Українська жестова мова”. Експериментально показано ефективність запропонованого методу (відсоток неправильно перекладених тестових речень зменшився на 8,25 %).

У процесі наукового дослідження вперше розроблено граматично доповнену онтологію української словесної мови та анотованої української жестової мови, в якій онтологічні поняття доповнені граматичними атрибутами. Граматично доповнена онтологія розроблена для 11 предметних галузей, таких як: “Навчання”, “Природа”, “Подорож”, “Держава”, “Сім’я”, “Виробництво”, “Професія”, “Військо”, “Театр”, “Культура”, “Лікарня”. Для цього зібрано 1200 слів, які пов’язані з цими областями та пояснено кожне слово з використанням тлумачного словника української мови та словника жестів.

Для практичного втілення розробленої математичної моделі граматично доповненої онтології автори створили методи та засоби, які дають змогу описувати цю онтологію, а також перетворюють її на форму, придатну для використання у системах машинного перекладу. На основі розробленої математичної моделі граматично доповненої онтології української словесної та жестової мов розроблено предметно-орієнтовану мову (ПОМ) опису для наповнення цієї граматично доповненої онтології. Предметно-орієнтовану мову UkrNet розроблено з врахуванням граматики цієї мови в Xtext. Потім, використовуючи засоби Xtext, створено синтаксичний аналізатор і текстовий редактор для мови UkrNet. Вікно текстового редактора для мови UkrNet зображено на рис. 4.

На основі граматично доповненої онтології автори запропонували правила семантично-синтаксичного розбору речень для української словесної та анотованої української жестової мов, що дало змогу здійснити семантичний аналіз речень для обох мов. Для тестування семантично-синтаксичного розбору розроблено спеціальний парсер. Відсоток правильно синтаксично розібраних речень української словесної мови становить 90 %, української жестової мови – 91 %. Це пов’язано з тим, що грамика української словесної мови має гнучкий порядок слів, а порядок слів у жестовій мові є строго визначеним та фіксується в більшості висловлювань.

За допомогою відношень між поняттями у граматично доповненій онтології на місця параметризованих змінних можна поставити лише правильні за змістом поняття. Відповідно до наведеної граматично доповненої онтології для речення “Я розповідаю столу казку” дерево синтаксичного розбору відповідає звичайному синтаксису речення (вага правила дорівнює 1) та зображено на рис. 5, б.

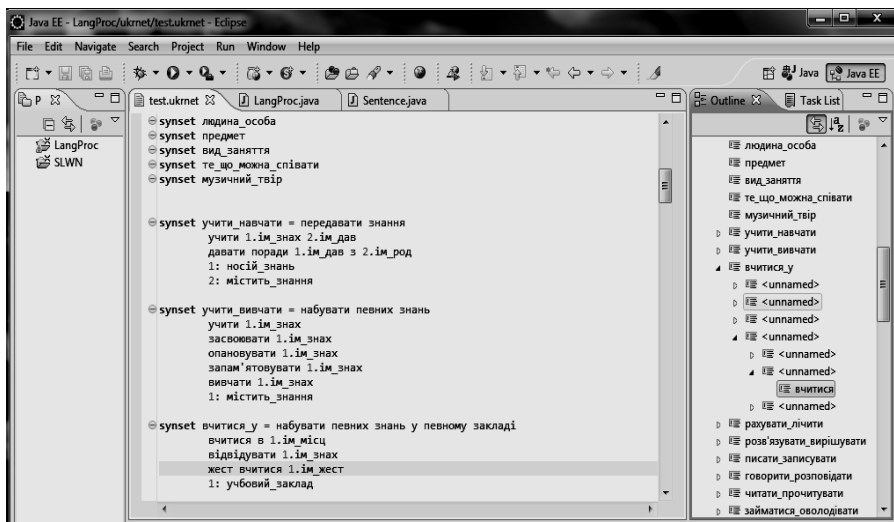


Рис. 4. Мова для опису граматично доповненої онтології UkrNet

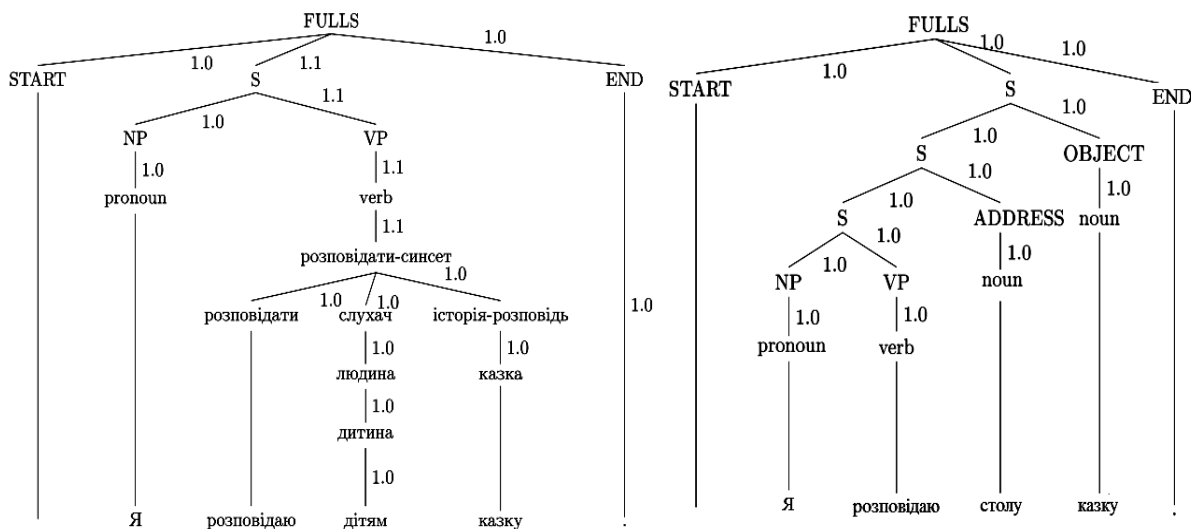


Рис. 5. Дерева семантично-синтаксичного розбору для речень:
а – “Я розповідаю дітям казку”; б – “Я розповідаю столу казку”

У роботі наведено оригінальний метод перекладу анотованої української жестової з використанням граматично доповненої онтології. Для цього побудовано спеціальну систему правил перекладу, яка містить 281 правило афіксної ймовірнісної контекстно-вільної граматики (154 правила для УСМ та 127 правил для УЖМ). Використання цього методу перекладу дало змогу підвищити відсоток правильно перекладених речень української словесної мови українською жестовою до 93,2 % порівняно зі статистичним методом перекладу (57,2 %) та методом перекладу на основі правил (75,3 %). Тестували розроблені методи на 220 реченнях корпусу паралельних текстів “Українська словесна мова – Українська жестова мова”, який пройшов попередню фахову апробацію у Львівській спеціальній загальноосвітній школі-інтернаті Марії Покрови для глухих дітей. Створені авторами програмно-алгоритмічні засоби перекладу анотованої української жестової мови на основі граматично доповненої онтології суттєво полегшують спілкування осіб з вадами слуху з особами без цих вад, зручні для підготовки навчальних матеріалів, поданих анотованою українською жестовою мовою.

Методи та засоби визначення ефективних ознак для розпізнавання елементів дактильно-жестової мови

Авторами роботи для вирішення задачі розпізнавання дактильної абетки жестової мови з потокового відеозображення запропоновано використовувати геометричні ознаки букв дактильної

абетки (дактилем), інваріантні відносно анатомічних особливостей руки та фокусної відстані відеофіксації дактилем. Це дало змогу однозначно розпізнати окремі дактилеми за цими ознаками та визначити класи дактилем незалежно від відтворювача дактильної мови. Запропоновано оригінальний метод визначення ефективних ознак розпізнавання дактилеми, які відтворюються людьми з різними розмірами та формою руки й на різній відстані відеофіксації. Експериментально показано ефективність методів контурного аналізу, аналізу зв'язних областей, методів скелетизації, аналізу кутових параметрів, аналізу траєкторії руху руки для класифікації та ідентифікації дактильної абетки. Для аналізу та отримання таких перетворень класифіковано елементи дактильної абетки та отримано такі групи ознак:

1) кут між векторами, що проведені з центру до крайніх точок (x_2, x_3, x_4, x_5) :

$$x_2 = \arccos(\cos(\overline{nw}/|\overline{n}||\overline{w}|)), \quad x_3 = \arccos(\cos(\overline{ws}/|\overline{w}||\overline{s}|)),$$

$$x_4 = \arccos(\cos(\overline{se}/|\overline{s}||\overline{e}|)), \quad x_5 = \arccos(\cos(\overline{en}/|\overline{e}||\overline{n}|)),$$

де n, w, s, e – вектори, проведені з центра мас у крайні точки (рис. 1);

2) нормована довжина вектора, який проведено з центру до крайніх точок (x_6, x_7, x_8, x_9) :

$$x_6 = a_1/(a_1 + a_2 + a_3 + a_4), \quad x_7 = a_2/(a_1 + a_2 + a_3 + a_4), \quad x_8 = a_3/(a_1 + a_2 + a_3 + a_4), \quad x_9 = a_4/(a_1 + a_2 + a_3 + a_4),$$

де a_1, a_2, a_3, a_4 довжини векторів n, w, s, e , проведених з центра мас у крайні точки (рис. 6).

3) компактність, направленість, видовженість, відношення ширини до висоти $(x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_1)$:

$$x_{10} = \frac{P^2}{S}, \quad x_{11} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}} \right), \quad x_{12} = \frac{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}}{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}}, \quad x_1 = \frac{w_{hand}}{h_{hand}}, \quad (1)$$

де w_{hand} – ширина області руки, h_{hand} – висота області руки (рис. 7), m_{ij} – дискретні центральні моменти:

$$m_{ij} = \sum_{(x,y) \in Reg} (x - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in Reg} x; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in Reg} y, \quad (2)$$

де n – кількість пікселів, що належать області Reg .

4) горизонтальне сканування (розбиття на 11 рядків)

$$(x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}):$$

$$x_{13} = bl_{13}/al_{13}, \dots, x_{23} = bl_{23}/al_{23}, \quad (3)$$

де bl_i – кількість точок руки в одній полосі, al_i – загальна кількість точок полоси, $i = (13, \dots, 23)$;

5) відношення кількості чорних точок до загальної кількості (розбиття зображення на 25 клітин, рис. 8) (x_{24}, x_{48}) :

$$x_{24} = bl_{24}/al_{24}, \dots, x_{48} = bl_{48}/al_{48}, \quad (4)$$

де bl_{ij} – кількість точок руки в клітині, al_{ij} – загальна кількість точок клітини;



Рис. 6. Вектори n, w, s, e



Рис. 7. Висота та ширина



Рис. 8. Розбиття на клітини

б) дескриптори контурного аналізу $(x_{49}, x_{50}, x_{51}, x_{52})$:

$$fltr = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{vmatrix}, \quad desc = \left[100 * fltr * \begin{vmatrix} |v(1)| \\ |v(2)| \\ |v(3)| \\ |v(4)| \end{vmatrix} / k \right], \quad \begin{matrix} x_{i+48} = desc(i), \\ i = (1, \dots, 4) \end{matrix}, \quad (5)$$

де $|v(i)|$ – норма автокореляційної функції;

7) ознака динамічності дактилеми (x_0) .

У результаті аналізу отримано, що ознака x_1 дає змогу стійко ідентифікувати підмножину дактилем $\{Б, Ш, К, Ц\}$. Ознака x_{10} дає змогу визначити дактилему Т, а ознака x_{12} – дактилему Г.

Розроблено методику визначення характеристичних ознак для дактилем з амплітудою руху. Для динамічних дактилем ознаками слугують траєкторії переміщення координат центру мас руки. В результаті отримано стійку ідентифікацію дактилем Д, З та Б. Дактилеми Й, К, Ц, Щ, Ї, Є запропоновано ідентифікувати як нерухомі, але при цьому враховувати наявність траєкторії (це дає змогу відрізнити однакові за конфігурацією руки дактилеми: І(Ї), И(Й), Ш(Щ)).

Для множини дактилем, що не ідентифікується наведеними способами, застосовано концепцію математичних методів класифікації інформації на основі використання лінійних структур як найпростіших характеристик близькості векторів ознак. Такими лінійними структурами є гіперплощини, а метод ґрунтується на результатах, які отримали М. Ф. Кириченко та його учні в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Для кожної дактилеми із множини $\{А, В, Е, Є, И, І, К, Л, М, Н, Р, С, У, Ф, Х, Ч, Ю, Я\}$ у межах кожної групи ознак отримано п'ять наборів значень (руки різної величини та на різній фокусній відстані).

Запропоновано технологію, суть якої полягає в побудові каскадного класифікатора, за допомогою якого множина дактилем розбивається на стало роздільні підмножини. Схему ІТ ідентифікації дактилем показано на рис. 9.

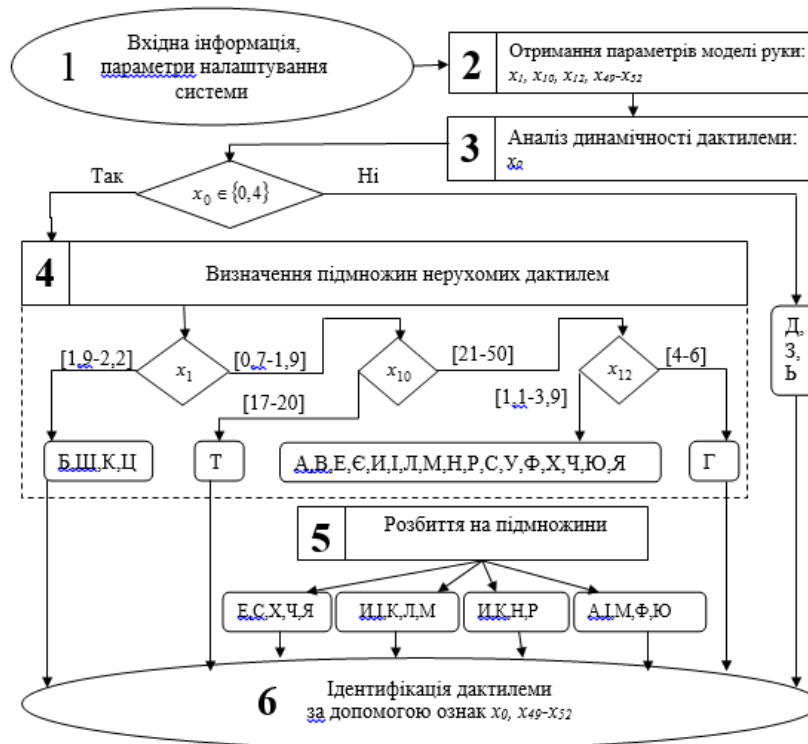


Рис. 9. Схема інформаційної технології класифікації та ідентифікації дактилем

У цих підмножинах дактилеми роздільні дещо менше, тому запропоновані інші підходи для їхньої ідентифікації. Розроблено схему інформаційної технології класифікації та ідентифікації дактилем, яка розбивається на такі блоки: блок 1 – забезпечення відеопотоку, що містить показ елементів дактильної абетки, виділення області кисті руки; блок 2 – отримання параметрів моделі руки; блок 3 – аналіз динамічності дактилеми; блок 4 – визначення підмножини, до якої належить дактилема; блок 5 – розбиття множини слабкороздільних дактилем за допомогою гіперплощинної класифікації; блок 6 – ідентифікація дактилеми з обмеженої підмножини.

Аналіз результатів

Для тестування запропонованих авторами алгоритмів було створено відповідне програмне забезпечення мовою С# (рис. 10), яке дає змогу дослідити вплив зміни параметрів моделі на зрозумілість та розбірливість синтезованої зовнішньої артикуляційної складової мовленнєвого процесу при відтворенні жестової мови.

Для тестових прикладів використано стандартну модель Симон з Poser 7 [4], яка дає змогу реалістично моделювати більшість емоційних проявів на обличчі людини та має функціональність для створення власних морфів з врахуванням рухів основних зовнішніх артикуляторів (щелеп, язика) і яку, на відміну від інших програмних засобів (Maya, 3D Studio Max), було розроблено безпосередньо для комп'ютерного моделювання людини. Усі базові віземи та емоційні стани отримано за допомогою функціональності Face Morph.

Для кодування та передавання інформації про мімічний стан моделі голови розроблено власний формат даних, до складу якого входить опис поверхні тривимірної моделі з відповідними морфами візем і емоцій, що винесені в окрему бібліотеку для їх незалежного редагування окремо від самої моделі людини.

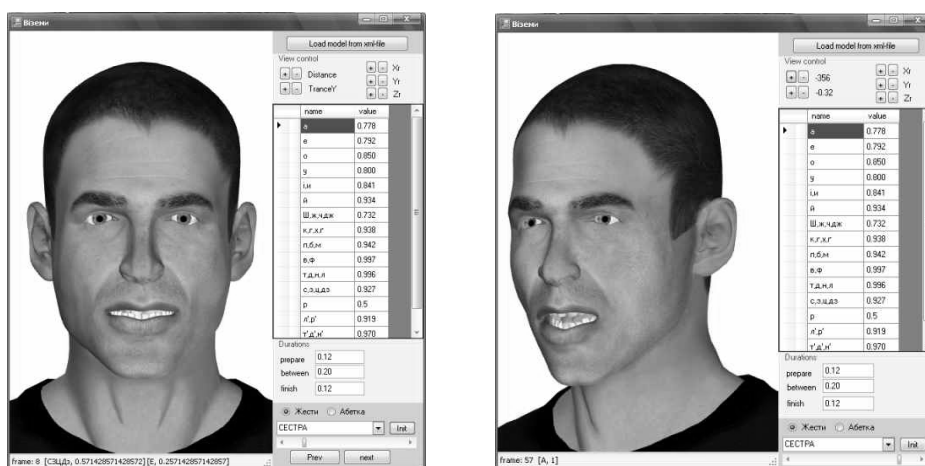


Рис. 10. Головне вікно програмної реалізації

Параметрами системи були тривалості переходів між віземами та складами візем, різні варіанти початку та кінця артикуляційного мовлення, різні підходи до синхронізації зовнішньої артикуляції з жестом (тривалості показу візем), але для спрощення переходу вибирали константою. Для кожного слова-образу через обмеження на кількість кадрів анімації, наведені параметри варіювали залежно від часових характеристик елементів його структури з метою максимізації кількості кадрів для плавної анімації переходу між складами візем без втрати правильності сприйняття. Для виконання вимоги синхронізації анімації на формулу обчислення кадрів накладаються відповідні обмеження: $T_{dif} > 0$.

Для деяких слів-образів величини параметрів моделі (1) наведено у табл. 1.

Параметри обирали так, щоби анімація за підготовкою та завершенням вимови була природною. При виконанні обмеження на невід'ємність за часом єдиним додатковим обмеженням параметрів за підготовкою і завершенням анімації артикуляції буде лише таке: щоби кадрів для їх

анімації було не менше ніж три. Це робиться для того, щоб досягти мінімальної плавності переходу від стану спокою до іншого анімаційного стану і навпаки. При великих значеннях цих параметрів тривимірний персонаж буде “втомлений” для початку “розмови”.

Таблиця 1

Часові параметри тривалості у мілісекундах

Час \ слово-образ	“ДАКТИЛЮВАТИ”	“ДАТИ”	“БАТЬКО”
Час початку анімації	0.091	0.15	0.12
Час анімації переходу	0.105	0.18	0.14
Час кінця анімації	0.091	0.15	0.12

На тестовій вибірці з 50-ти жестів поскладова синхронізація анімації слова-образу з жестом виявилась кращою порівняно з повіземною синхронізацією без врахування фонетичної структури. Це пояснюється тим, що вдалося врахувати пропорційність часу анімації складу в розмовній мові (точки початку анімації складів розташовуються відповідно до внутрішньої будови складу) та модифікації у способах анімації переходів у складі без зміни положень точок початку анімації складів.

Вагові коефіцієнти показу візем обчислюють з використанням функції розподілу за кадрами. Приклади вагових коефіцієнтів функції розподілу по кадрах показано графіками на рис. 11.

Для аналізу якості результату синтезу використовували суб’єктивну модель оцінювання сприйняття, в основу якої покладено оцінку (висновок), отриману від експерта в області сурдоперекладу та оцінку схожості графіків відхилення чотирьох точок, які відповідають за верхню T_{top} , нижню T_{bot} точки рота і кути рота T_{left} і T_{right} . Для побудови графіків відносної зміни точок спостереження аналізувались послідовності віднормованих і відорієнтованих зображень областей губ сурдоперекладача і моделі голови людини при відтворенні жестової мови.

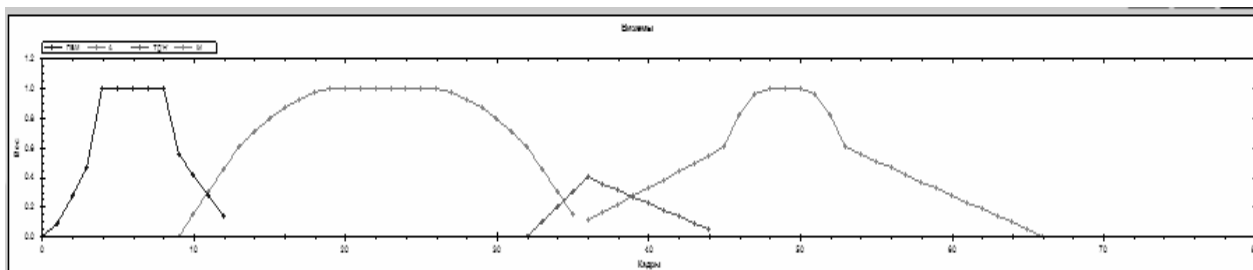


Рис. 11. Функції розподілу за кадрами для слова-образу “мати”

Для розроблення програмно-алгоритмічного комплексу перекладу анотованої української жестової мови на основі граматично доповненої онтології використано сучасні підходи до створення комп’ютерних систем перекладу жестових мов. У межах наукового дослідження автори спроектували структуру програмно-алгоритмічного комплексу, побудовано систему правил для перекладу анотованої української жестової мови з використанням граматично доповненої онтології, розроблено алгоритми на основі досліджуваних методів перекладу української жестової мови, проведено експериментальні дослідження та виконано порівняльний аналіз отриманих результатів. Інтерфейс програмно-алгоритмічного комплексу є зручним та доступним як для здорових, так і для глухих користувачів з навичками роботи на комп’ютері та дає змогу комфортно реалізувати двосторонній переклад УЖМ (рис. 12).

В основу архітектурних рішень при побудові програмно-алгоритмічного комплексу перекладу анотованої української жестової мови покладено модульну структуру, що дало змогу реалізувати його у вигляді окремих системно пов’язаних між собою функціональних модулів. Кожен модуль працює з певним вхідним набором даних. Розроблено такі функціональні програмно-алгоритмічні модулі:

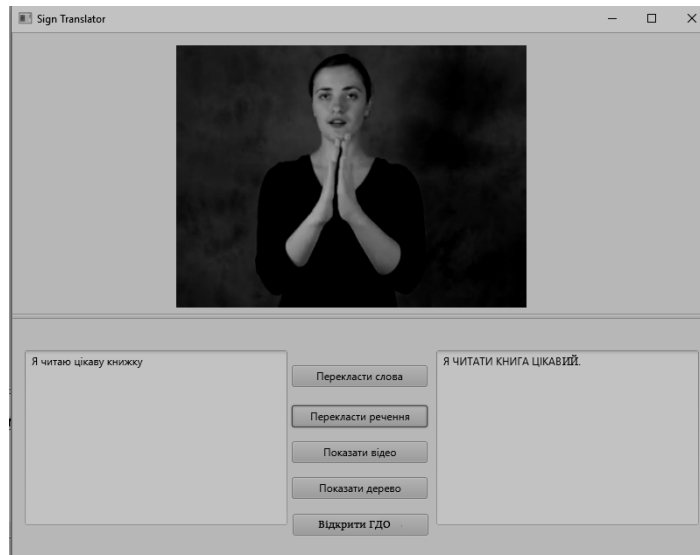


Рис. 12. Інтерфейс ПАК-перекладу анотованої української жестової мови

- модуль наповнення граматично доповненої онтології;
- модуль перекладу із застосуванням правил та онтології;
- модуль тестування перекладу.

Програмно-алгоритмічний комплекс реалізовано за допомогою програмного середовища Eclipse (модуль перекладу та модуль тестування). Модуль наповнення граматично доповненої онтології розроблено з використанням додатка XText.

Крім того, користувач має змогу переглянути процедуру семантично-синтаксичного аналізу речень, натиснувши кнопку “Показати дерево”. Семантично-синтаксичний аналіз речень подано у вигляді дерева складових, яке виводиться у програмі (рис. 13). Модуль наповнення граматично доповненої онтології реалізує такі процеси: оновлення середовища редагування та засобів розбору онтології, розбір онтології та її перетворення на базу даних, доповнення правил граматики APCFG [43] та правил перекладу. Модуль перекладу із застосуванням правил та онтології реалізує такі процеси: розбиття вхідного тексту на речення та визначення їх тематики, семантично-синтаксичний розбір речень та переклад анотованою українською жестовою мовою. Модуль тестування перекладу реалізує процеси оцінювання результату перекладу та доповнення бази тестових речень.

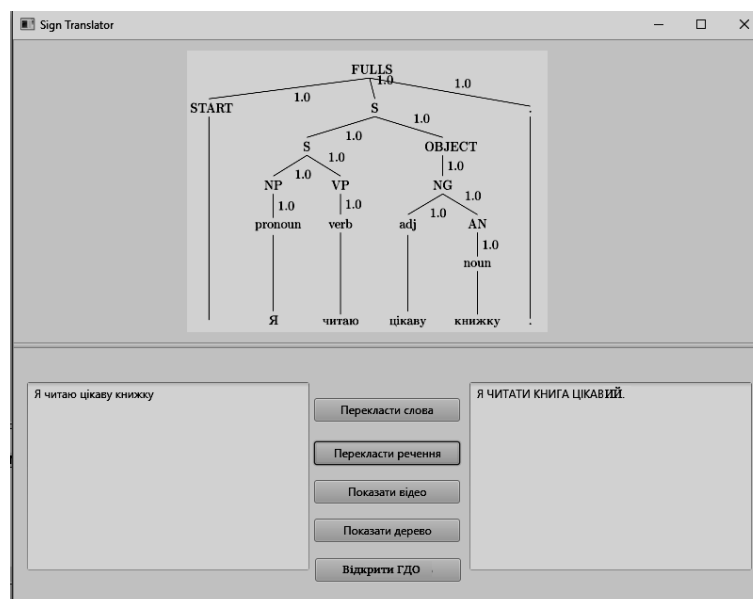


Рис. 13. Дерево семантично-синтаксичного розбору речення “Я читаю цікаву книжку”

Для аналізу ефективності розроблених методів запропоновано використовувати показник правильно перекладених речень:

$$C = \frac{N_{correct_trans}}{N_{general_trans}} \cdot 100 \% , \quad (6)$$

де $N_{correct_trans}$ – кількість правильно перекладених тестових речень; $N_{general_trans}$ – загальна кількість тестових речень.

Під час експерименту № 1 з використанням статистичного методу машинного перекладу оцінка якості перекладу речень української словесної мови у речення анотованої УЖМ становить 57,2 % та 50,5 % під час перекладу речень анотованої УЖМ на речення УСМ.

Таблиця 2

Оцінка якості перекладу (%)

	Експеримент № 1	Експеримент № 2	Експеримент № 3	Експеримент № 4
УСМ→УЖМ	57,2	75,3	85,4	93,2
УЖМ→УСМ	50,5	68,7	81,6	91,4

В експерименті № 2, який було реалізовано з використанням методу машинного перекладу на основі правил, оцінка якості перекладу речень української словесної мови у речення анотованої УЖМ становить 75,3 % та 68,7 % під час перекладу речень анотованої УЖМ на речення УСМ.

Для експерименту № 3 використано метод машинного перекладу на основі правил з використанням словника концептів, що дало змогу оцінити якість перекладу речень української словесної мови на речення анотованої УЖМ, яка становить 85,5 % та 81,6 % під час перекладу речень анотованої УЖМ на речення УСМ.

В експерименті № 4, який реалізовано з використанням граматично доповненої онтології, оцінка якості перекладу речень української словесної мови у речення анотованої УЖМ становить 93,2 % та 91,4 % під час перекладу речень анотованої УЖМ на речення УСМ.

На основі оцінювання результату перекладу помилки перекладу виникають у тих реченнях, для яких семантично-синтаксичний розбір здійснюється неправильно.

Авторами реалізована інформаційна технологія ідентифікації дактилем жестової абетки на основі комбінації методів отримання геометричних ознак, ієрархічного дихотомічного алгоритму та гіперплощинної класифікації слабозроздільних множин, що дало змогу реалізувати ефективну систему ідентифікації дактилем (точність ідентифікації дактилем становить 86–98 %).

Для підтвердження спроможності та ефективності запропонованої ІТ створено відповідне застосування (рис. 14).

Інтерфейс складається з таких елементів: інтерфейс для налаштування та калібрування системи для ідентифікації елементів дактильної мови (1); відображення відеопотоку – представлено три відеопотоки: вхідний – з виділеними областями точок, які належать до руки, і відеопотік із рукою (2); інтерфейс для налаштування еталонів для контурного аналізу (3); інтерфейс демонстрації характеристик вхідного зображення (4).

Для підтвердження ефективності наведених методів, ознак та для підтвердження ефективності ІТ за допомогою створеного комплексу програм проведено ряд експериментів. В експериментах брали участь люди з різними розмірами руки, які відтворювали жести на різних фокусних відстанях від відеокамери. За час розроблення та тестування системи в експериментах взяло участь понад 150 людей із різними розмірами рук, як поділили на експериментальні групи.

На рис. 15 показано результати розпізнавання відтворення дактилем на різних фокусних відстанях. Аналіз випадків, коли було не правильно розпізнано дактилему, показав такі групи причин неправильного розпізнавання: швидкий темп виконання дактилеми; виконання подібних жестів; особливості індивідуального відтворення дактилем.

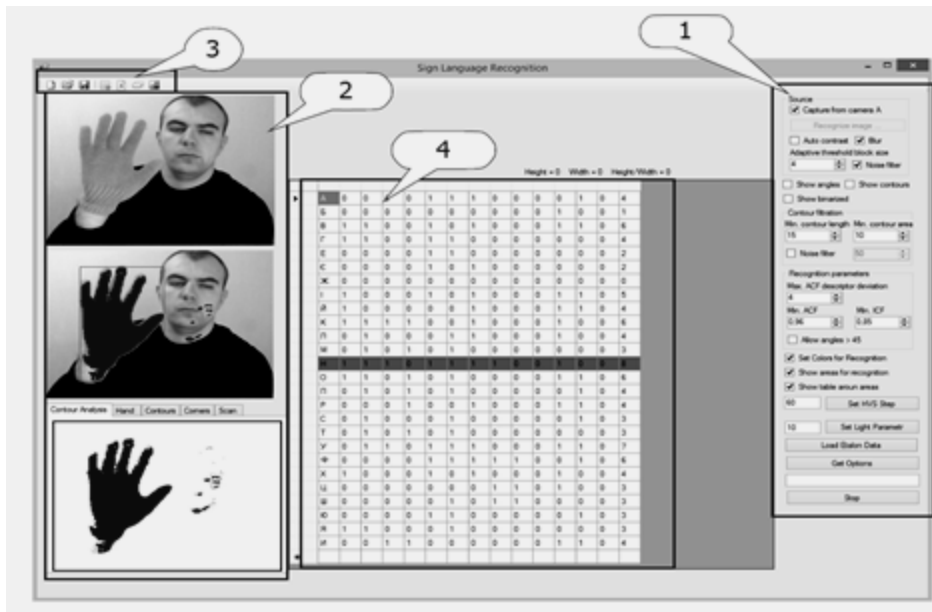


Рис. 14. Вікно програми для тестування інформаційної технології

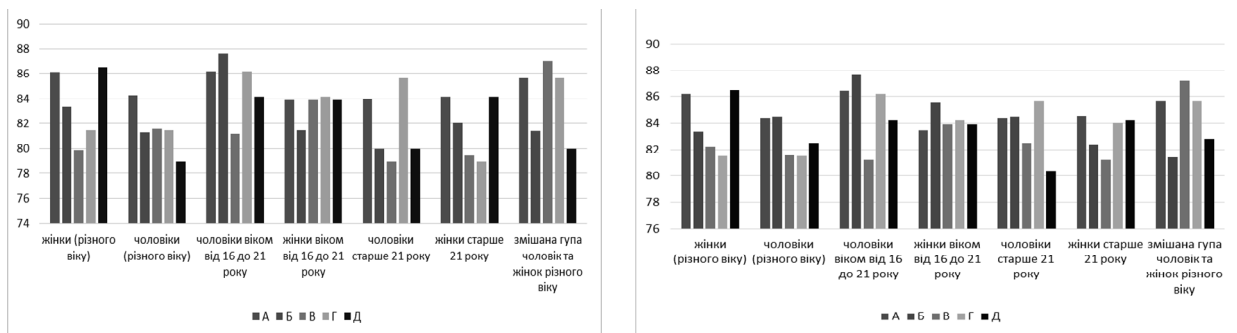


Рис. 15. Розпізнавання дактилем на фокусній відстані (30–50 см (зліва) та 50–80 см (справа)) (0.3–0.5) м (зліва) та (0.5–0.8) м (справа)

Система може помилково розпізнавати дактилему, якщо її швидко відтворили. Це пов'язано з тим, що зображення дактилеми вводиться через web-камеру. Web-камера реєструє 30 кадрів за секунду з роздільною здатністю одного кадру 320 на 240 пікселів. При швидкому відтворенні може порушуватись якість зображення (з'являються нечіткі області).

Проаналізувавши дактилеми, можна визначити групи подібних жестів. Якщо такі жести відтворювати швидко або не дотримуватися правил виконання дактилеми, то можливе неправильне розпізнавання жестів. На рис. 16 показано для прикладу декілька груп подібних дактилем.

При тестуванні з експериментальною групою, до якої входили викладачі жестової мови, що відтворювали дактилеми відповідно до правил, було досягнуто якості розпізнавання 96–98 % (рис. 17).



Рис. 16. Групи подібних дактилем

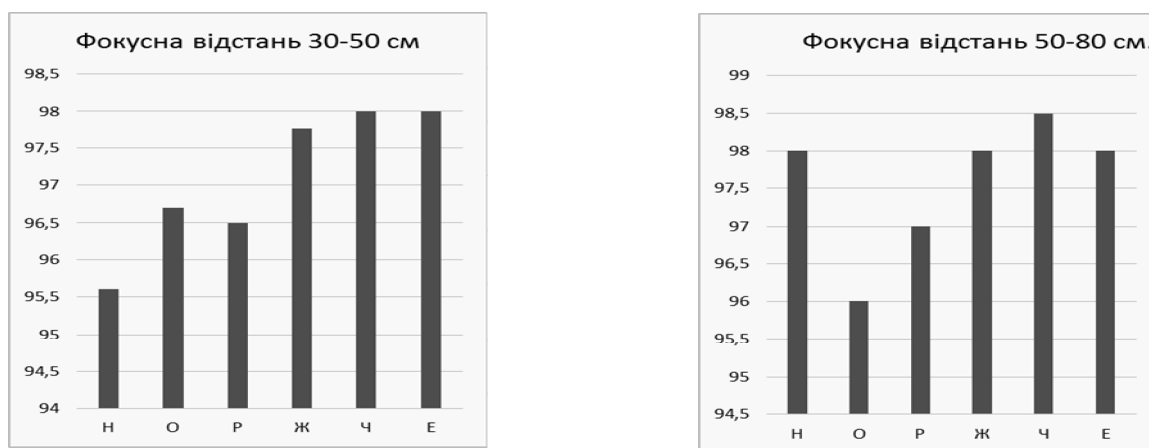


Рис. 13. Розпізнавання дактилем (%) у групі викладачів дактильної абетки

Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

У роботі розв'язано низку важливих наукових та науково-прикладних задач, пов'язаних із розробленням математичних методів та формуванням комплексу прикладних інформаційних технологій моделювання, опрацювання та перекладу української жестової мови. Проаналізовано та запропоновано нові методи розпізнавання та ідентифікації дактилем жестової абетки, методи комп'ютерного перекладу анотованої української жестової мови. Виконано оригінальні дослідження лінгвістичних особливостей української жестової мови та розроблено граматично доповнену онтологію української словесної та української жестової мов. Розроблено мультимедійну технологію аналізу візуальних образів звуків і емоційних мімік обличчя людини, що дало змогу реалізувати анімацію емоційно-артикуляційного каналу носія жестової мови.

Розроблені авторами роботи математичні методи та прикладні інформаційні технології використано для розроблення систем комп'ютерного синтезу та аналізу візуальної складової міміко-артикуляційного процесу для відтворення і розпізнавання української жестової мови, а також розроблення систем навчання правильній артикуляції, систем читання по губах, підготовки та створення навчальних матеріалів, поданих анотованою українською жестовою мовою.

Сформульовані в роботі теоретичні положення і рекомендації можуть бути використані: у науково-дослідній сфері, як підґрунтя для подальшого вдосконалення методів ідентифікації та розпізнавання елементів дактильної мови; у практичній діяльності – для розроблення мультимедійних систем комунікації між людьми з вадами слуху та людьми, які таких вад не мають.

Отримані результати досліджень покладено в основу експериментальних програмних застосувань, що ілюструють можливості розроблених інформаційних технологій. Експериментальне програмне забезпечення тестувалось у Кам'янець-Подільському багатопрофільному навчально-реабілітаційному центрі, у Тернопільській спеціалізованій загальноосвітній школі-інтернаті I–III ступенів, у Львівській спеціальній загальноосвітній школі-інтернаті Марії Покрови для глухих дітей, у спеціалізованій школі-інтернаті для дітей з вадами слуху міста Житомир.

1. Davydov M. Spoken and sign language processing using grammatically augmented ontology / M. Davydov, O. Lozynska // *Applied Computer Science. ACS journal*. – 2015. – Vol. 11, Number 2. – P. 29–42.
2. Lozynska O. Information technology for Ukrainian Sign Language translation based on ontologies / O. Lozynska, M. Davydov // *Econtechmod. An international quarterly journal*. – Lublin, 2015. – Vol. 04, Number 2. – P. 13–18.
3. Розпізнавання міміки губ при промовлянні слів українською мовою / Ю. Г. Кривонос, Ю. В. Крак, О. В. Бармак, А. С. Тернов // *Доп. НАН України*. – 2010. – № 5. – С. 41–44.
4. Інформаційна технологія для моделювання української мови жестів / Ю. Г. Кривонос, Ю. В. Крак, О. В. Бармак [та ін.] // *Штучний інтелект*. – 2009. – № 3. – С. 186–197.
5. Крак Ю. В.

Технологія розпізнавання елементів дактильно-жестової мови / Ю. В. Крак, Д. В. Шкільнюк // Штучний інтелект. – 2009. – № 3. – С. 564–572. 6. Woodward M.F. Phoneme perception in lipreading / M. F. Woodward, C. G. Barber // *Journal of Speech and Hearing Research*. – Vol. 3. – 1960. – P. 212–222. 7. Давидов М. В. Методи та засоби опрацювання зображень реального часу для ідентифікації елементів жестової мови / М. В. Давидов, Ю. В. Нікольський // Штучний інтелект. – 2008 – № 1. – С. 131–138. 8. Дж. Лу Трехмерная графика и анимация / Лу Дж., Уер Б. – 2-е вид. – М.: Вільямс, 2002. – 640 с. 9. Kohnert C. J. Lip Synchronization Using Linear Predictive Analysis / C. J. Kohnert, Sudhanshu Kumar Semwal // *Proceedings of the IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications, SPPRA2006, Innsbruck, Austria, 15–17 February, 2006*. – Innsbruck, 2006. – P. 210–215. 10. Öhman T. An audio-visual speech database and automatic measurements of visual speech / T. Öhman // *Speech, Music and Hearing Quarterly Progress and Status Report (TMH-QPSR)*. –1998. – Vol. 1. – P. 61–76. 11. Проект “iCommunicator” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.icommunicator.com>. 12. Проект ViSiCAST [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.visicast.co.uk/>. 13. A Machine Translation System from English to American Sign Language / L. Zhao, K. Kipper, W. Schuler, C. Vogler, N. Badler, M. Palmer // *Envisioning Machine Translation in the Information Future: Proceedings of the Fourth Conference of the Association for Machine Translation (AMTA-00), Mexico, 2000*. – Cuernavaca, 2000. – P. 293–300. 14. Zijl V. L. A machine translation system for South African Sign Language/ D. Barker, V.L. Zijl // *Proceedings of Afrigraph 2003, ACM Siggraph Conference Proceedings Series, Cape Town, South Africa, 2003*. – Cape Town, 2003. – P. 49–52. 15. Suszczańska N. Continuous Text Translation using Text Modeling in the Thetos System / N. Suszczańska, P. Szmal, S. Kulików // *International Journal of Computational Intelligence*. – 2005. – № 4. – P. 255–258. 16. Evaluation of Alternatives on Speech to Sign Language Translation / R. San-Segundo, A. Pérez, D. Ortiz, L. F. D’Haro, M. I. Torres, F. Casacuberta // *Proc. of Interspeech 200, Antwerp, Belgium, 2007*. – Antwerp, 2007. – P. 2529–2532. 17. Dasgupta T. Prototype Machine Translation System From Text-To-Indian Sign Language / T. Dasgupta, S. Dandpat, A. Basu // *Proceedings of the IJCNLP-08 Workshop on NLP for Less Privileged Languages*. – 2008. – P. 19–26. 18. Morrissey S. Joining hands: developing a sign language machine translation system with and for the deaf community / S. Morrissey, A. Way // *Proceedings of the Conference and Workshop on Assistive Technologies for People with Vision and Hearing Impairments – Assistive Technology for All Ages (CVHI-07), Granada, Spain*. . – Granada, 2007. 19. Almasoud A. M. A Proposed Semantic Machine Translation System for translating Arabic text to Arabic sign language / A. M Almasoud., H. S. Al-Khalifa // *Journal of Software Engineering and Applications*. – 2012. – Vol. 5, № 8. – P. 604–612. 20. Kanis J. Automatic Czech – Sign Speech Translation / J. Kanis, L. Müller // *TSD 2007: Pilsen, Czech Republic*. – Pilsen, 2007. – P. 488–495. 21. Stein D. Hand in Hand: Automatic Sign Language to Speech Translation / D. Stein, P. Dreuw, H. Ney, S. Morrissey, A. Way // *Proceedings of Theoretical and Methodological Issues in Machine Translation (TMI-07), September 7-9, 2007, Skövde, Sweden*. – Skövde, 2007. – P. 214–220. 22. Bungeroth J. Statistical Sign Language Translation / J. Bungeroth, H. Ney // *Proc. LREC 2004, Workshop proceedings: Representation and Processing of Sign Languages, Lisbon, Portugal*. – Lisbon, 2004. – P. 105–108. 23. Liang R.-H. A real-time continuous gesture recognition system for sign language / R.-H. Liang, M. Ouhyoung // *Proceeding Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. April 14–16 1998, Nara, Japan. – Nara, 1998. – P. 558–567. 24. Wang H. American sign language recogniton using multi-dimensional hidden markov models / H. Wang, C. Leu, C. Oz // *Journal of Information Science And Engineering*. – 2006. – № 22. – P. 1109–1123. 25. Wang R. Y. Real-time hand-tracking with a color glove / Wang R. Y., Popovic J. // *ACM Trans. Graph*. – 2009. – Vol. 28, No 3. – P. 631 – 638. 26. Lamberti L. Real-Time Hand Gesture Recognition Using a Color Glove / Lamberti L., Camastra F. // *Image Analysis and Processing – ICIAP 2011, 16th International Conference, Ravenna, Italy, September 14–16, 2011, Proceedings, Part I*. Springer Berlin Heidelberg. – Ravenna, 2011. – P. 365–373. 27. Lathuiliere F. Visual tracking of hand posture with occlusion handling / Lathuiliere F., Herve J. Y. // *Pattern Recognition, Proceedings. 15th International Conference*. – 2000. – Vol. 3. –

P. 1129–1133. 28. Michael N. *Spatial and temporal pyramids for grammatical expression recognition of American sign language* / N. Michael, D. Metaxas, C. Neidle // *Assets'09: Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers an accessibility*, Oct 25 - 28, 2009, New York, NY, USA: ACM. – New York, 2009. – P. 75–82. 29. Holte M. B. *View invariant gesture recognition using the CSEM SwissRanger SR-2 camera* / M. B. Holte, Moeslund, T. B., P. Fihl // *Int. Journal of Intelligent Technologists and Applications*. – 2008. – Vol. 3. – No 3–4. – P. 295–303. 30. *Microsoft Kinect for Windows*. – Режим доступу: <http://www.microsoft.com/enus/kinectforwindows/>. 31. Lang S. *Sign language recognition Using Kinnect* / Lang S., Block M., Rojas R. // *Artificial Intelligence and Soft Computing. 11th International Conference, ICAISC 2012, April 29 - May 3, 2012, Zakopane, Poland. – Part I*. – Zakopane: Springer, 2012. – P. 394–402. 32. Pugeault N. *Spelling It Out: Real-Time ASL Fingerspelling Recognition* / Pugeault N., Bowden R. // *Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Consumer Depth Cameras for Computer Vision, jointly with ICCV 2011, Barcelona, Spain. – Barcelona, 2011. – P. 1114–1119*. 33. Нагапетян В. Э. *Автоматическое преобразование жестов русской ручной азбуки в текстовый вид* / В. Э. Нагапетян, В. М. Хачумов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2013. – № 3. – С. 59–66. 34. Aran O. *Sign language tutorial tool* / O. Aran, C. Keskin, L. Akarun // *Proceeding eNTERFACE'06, July 17th – August 11th, Dubrovnik, Croatia, 2006. – Dubrovnik: Presses univ. de Louvain, 2007. – P. 23–33*. 35. Местецкий Л. М. *Восстановлений в реальном времени пространственных характеристик гибкого объекта по стереопаре изображений* / Л. М. Местецкий, А. К. Цискаридзе // *Математические методы распознавания образов: сб. докладов 13-ой Всерос. конф. (30 сентября – 6 октября 2007 г., г. Зеленогорск)*. – М.: Макс Пресс, 2007. – С. 359–363. 36. *Українська жестова мова: комп'ютерно-лінгвістичний аспект* / О. В. Годич, М. В. Давидов, Ю. В. Нікольський, В. В. Пасічник, Ю. М. Щербина. – Л.: Піраміда, 2009. – 253 с. 37. *Комп'ютерне розпізнавання жестів: програмно-алгоритмічний підхід* / О. Годич, М. Давидов, Ю. Нікольський та ін. – Л.: ТОВ “Компанія “Манускрипт”, 2011. – 310 с. 38. Raja Y. *Tracking and segmentation people in varying lighting conditions using Colour* / Y. Raja, S. J. McKenna, S. Gong // *Proceedings of the 3rd International Conference on Face Gesture Recognition, 14-16 April 1998, Nara, Japan. – Nara, 1998. – P. 228–233*. 39. *Real time hand gesture recognition including hand segmentation and tracking* // Coogan T., Awad G. M., Han J., Sutherland A. / *ISVC 2006 – 2nd International Symposium on Visual Computing, 6-8 November 2006, Lake Tahoe, NV, USA. – Lake Tahoe, 2006. – P. 495–504*. 40. Just A. *HMM and IoHMM for the recognition of mono-and bi-manual 3-d hand gestures* / A. Just, O. Bernier, S. Marcel // *IDIAP Research Report 04-39, Valais, Switzerland, july 2004. – Valais, 2004. – P. 3–11*. 41. Zahedi M. *Appearance-based recognition of words in american sign language* / M. Zahedi, D. Keysers, H. Ney // *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis'05, June 7–9, 2005, Estoril, Portugal. – Estoril, 2005. – P. 511–518*. 42. *Visual recognition of hand postures for interacting with virtual environment* / R. D. Vatavu, S.-G. Pentiu, C. Chaillou, L. Crisoni, S. Degrande. // *8th International Conference on Development and Application Systems, May 25–27, 2006, Suceava, Romania. – Suceava, 2006. – P. 477–482*. 43. Проект “UkrParser” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/mdavydov/UkrParser>.