

Подальші наукові дослідження в цьому напрямі полягають у розробленні засобів агрегації даних, отриманих з інших мережевих ресурсів, і автоматичному додаванні контенту з довільних ресурсів Інтернету за допомогою визначених селекторів і атрибутів.

1. Берко А.Ю. Системи електронної контент-комерції / А. Ю. Берко, В. А. Висоцька, В. В. Пасічник // Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2009. – 612 с. 2. Content Management Interoperability Services. Version 0.5. [Електронний ресурс] // Part I – Introduction, General Concepts, Data Model, and Services. EMC Corporation, IBM Corporation, Microsoft Corporation. – 8/28/2008. – CMIS Part I – Domain Model v0.5.pdf. – 76 р. – Назв. з екрана.
3. Ларман К. Применение UML и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ и проектирование. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2001.
4. Регулярные выражения (Regular Expressions – RegExp) в Ruby [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://rubydev.ru/2011/05/rubydev-ruby-tutorial-6-regexp>. – Назва з екрана.
5. Регулярні вирази і спеціальні символи [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://uk.shram.kiev.ua/hacker/regular.shtml>. – Назва з екрана.
6. Берко А.Ю. Застосування маркетингових методів для аналізу життєвого циклу комерційного web-контенту / А. Ю. Берко, В. А. Висоцька / Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів, 2011. – № 699. – С. 3–12.

УДК 004.93'1+004.021

О. Вербич, М. Давидов, Ю. Нікольський, В. Пасічник
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра інформаційних систем та мереж

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ТІЛА ЛЮДИНИ У КОМП'ЮТЕРНОМУ ТРЕНАЖЕРІ УКРАЇНСЬКОЇ ЖЕСТОВОЇ МОВИ

© Вербич О., Давидов М., Нікольський Ю., Пасічник В., 2011

Розглянуто задачу визначення положення тіла людини з відеопотоку для програмного забезпечення «Тренажера української жестової мови». Досліджено алгоритми побудови полігональної моделі для розв'язання цієї задачі.

Ключові слова: скелет бінарного растрового зображення, скелет "зірка", хвильовий алгоритм побудови скелета, порівняння скелетів.

This paper is devoted to problem of human body position reconstruction from video sequence for Ukrainian Sign Language Trainer software. The polygonal model extraction algorithms were investigated to solve this problem.

Key words: a binary bitmap image skeleton, "star" skeleton, wave algorithm of skeletonization, skeleton comparison.

Вступ. Загальна постановка проблеми

Люди з пониженим слухом спілкуються жестовою мовою – комунікативною системою, висловлювання якої побудовані не на звуковій, а на жестикуляційно-мімічній основі. Зміст жесту визначає зміна форми долонь, взаємне розташування та траєкторія їх руху, місце виконання жесту відносно обличчя та тулуба. Допоміжними елементами є артикуляція слів губами.

Оскільки положення рук відносно обличчя й тулуба доповнює інформацію про жест, що виконується, то задача визначення взаємного розташування цих частин тіла є складовою задачею розпізнавання жестів.

У статті наведено результати побудови та дослідження модифікацій відомих методів для знаходження положення голови та кінцівок відносно тулуба на послідовності кадрів (відеопотоці) із

зображенням людини, яка жестикулює, для використання у комп'ютерному тренажері української жестової мови [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Побудова та дослідження методів визначення положення людського тіла у відеопотоці ведеться за кордоном протягом тривалого часу.

У 1998 р. в роботі [2] вперше введено поняття скелета «зірка» як спрощеного зображення людського тіла у вигляді зірки з п'ятьма променями, які відповідають чотирьом кінцівкам та голові. Це надало можливість замість зображення людини опрацьовувати лише крайні точки цього зображення. Також розроблено алгоритм знаходження кінцівок на зображенні. Програмна реалізація цього алгоритму будувала скелет людини, яка крокує.

У 2006 р. автори статті [3] розробили алгоритм ідентифікації рухів людини за скелетом «зірка». Алгоритм розпізнавав 10 рухів: ходьбу, стрибання, стрибання з витягнутими руками, стрибання з присіданням, сидання на стілець, присідання навпочіпки, поворот з витягнутими руками, лягання, сидання на землю, повзання. Кількість неправильно розпізнаних положень в експериментах авторів була меншою за 2 %.

Альтернативою скелета «зірка» є внутрішній скелет замкненої двовимірної області, побудованої за зображенням людини. Ту частину скелета, яка належить області, названо внутрішнім скелетом, а яка не належить – зовнішнім [4]. У 2005 р. в роботі [5] запропоновано алгоритм побудови скелета замкненої двовимірної області із зображенням певного об'єкта та його порівняння з еталонним скелетом зображення людини. Автори стверджують, що їх алгоритм у 97 % випадків розпізнавав зображення людини серед інших об'єктів.

Цілі досліджень

У статті наведено результати дослідження методів побудови скелета зображення та їх застосування для порівняння положення тіла людини на двох кадрах за допомогою порівняння скелетів їх зображень. Розв'язання цієї задачі надало можливість доповнити засоби розпізнання жестів української жестової мови, такі як розпізнання положення долонь та артикуляції.

Для розв'язання задачі порівняння положення тіла використовуємо два відеопотоки. На кадрах першого з них людина правильно виконує жест. Цю людину назовемо вчителем. На іншому відеопотоці зображено людину, яка намагається виконати той самий жест. Цю людину назовемо учнем. Дослідження допомагають визначити, чи правильно учень виконує жест, який показує вчитель.

Для визначення ідентичності жестів розроблено спеціальний метод порівняння зображення людей у кадрах двох відеопотоків на основі порівняння їх скелетів.

Основний матеріал

Положення рук відносно голови та тулуба доповнює інформацію про жест, який виконує людина. Тому, порівнюючи положення рук на зображеннях двох людей під час виконання жесту, можна зробити висновок про те, чи ці люди виконують той самий жест.

Для порівняння використано дві послідовності кадрів. Кожен кадр – це растрове зображення в RGB-форматі розмірів $w \times h$. На цих кадрах зображено людину, що жестикулює. Людину зображено на певному тлі. Щоб визначити положення тіла, треба спочатку відділити зображення людини від тла. Це зроблено порівнянням інтенсивності кольорів кожного пікселя кадру з усередненим значенням інтенсивності кольорів цього пікселя для тла.

Для цього на N кадрах виділено тло, інтенсивність пікселів якого P_z , $z \in \{r, g, b\}$ обчислена за формулою

$$P_z(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{kz}(x, y), \quad z \in \{r, g, b\}, \quad (1)$$

де $P(x, y) = (P_r(x, y), P_g(x, y), P_b(x, y))^T$, $P_r(x, y) \in [0, M]$, $P_g(x, y) \in [0, M]$, $P_b(x, y) \in [0, M]$ – вектор значень інтенсивностей кольорів пікселя з координатами (x, y) на зображенні, а $P_{kz}(x, y)$ – значення компоненти z пікселя з координатами (x, y) k -го кадру зображення.

Кадр з усередненими значеннями інтенсивності кольорів пікселів тла обчислюється один раз і використовується для всієї послідовності кадрів з людиною. Також визначимо вектор $\Delta P = (\Delta P_r, \Delta P_g, \Delta P_b)^T$ похибки зображення тла, компоненти якого знайдемо за формулою

$$\Delta P_z = \max_{\substack{x \in \{1, 2, \dots, w\} \\ y \in \{1, 2, \dots, h\}}} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |P_z(x, y) - P_{kz}(x, y)| \right), z \in \{r, g, b\}.$$

Для порівняння положень тіл учня та вчителя на зображеннях з кожним кадром треба виконати такі дії.

1. Виділити зображення людини на кадрі відеопотоку.
2. Побудувати контур зображення людини.
3. Спростити контур зображення.
4. Побудувати скелет зображення.
5. Ввести функцію порівняння скелетів та порівняти скелетти зображень учня та вчителя.

Виділення зображення людини на кадрі відеопотоку складатиметься з таких кроків.

1. Перетворення кадру на монохромний.
2. Очищення кадру від шумів.

Для перетворення кадру на монохромний замінимо колір пікселів, які належать зображенню людського тіла, на чорний, а які належать тлу – на білий. Для цього кадр із зображенням людини попіксельно порівнюємо із зображенням тла. Обчислимо різницю середніх значень інтенсивності RGB-компонент пікселів тла та кадру із зображенням людини за формулою

$$\Delta P_z(x, y) = |P_{sz}(x, y) - P_z(x, y)|, z \in \{r, g, b\},$$

де $P_{sz}(x, y)$ – значення інтенсивності кольору компоненти z пікселя з координатами (x, y) на кадрі з людиною; $P_z(x, y)$ – значення інтенсивності компоненти z пікселя тла, знайдене за формулою (1).

Введемо функцію кольору пікселя з координатами (x, y) , яку обчислюємо за формулою

$$C(x, y) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } (\Delta P_r(x, y) > \Delta P_r) \vee (\Delta P_g(x, y) > \Delta P_g) \vee (\Delta P_b(x, y) > \Delta P_b), \\ 1 \text{ у всіх інших випадках.} \end{cases}$$

Замінивши колір кожного пікселя на колір, визначений функцією $C(x, y)$, отримаємо монохромне зображення. Для цього колір пікселя з координатами (x, y) замінюємо на чорний, якщо $C(x, y) = 0$, та на білий, якщо $C(x, y) = 1$.

Для очищення кадру від шумів використано алгоритми згладжування та поляризації, які програмно реалізовані в бібліотеці OpenCV. Згладжене значення $P_{az}(x, y)$ інтенсивності компоненти z пікселя з координатами (x, y) визначене за формулою

$$P_{az}(x, y) = \frac{1}{9} \left(0.55 P_z(x, y) + \sum_{i=x-1}^{x+1} \left(\sum_{j=y-1}^{y+1} 0.05 P_z(i, j) \right) \right), z \in \{r, g, b\}. \quad (2)$$

В результаті обчислень за формулою (2) білий піксел, в околі якого є чорні, стане темним, а чорний, в околі якого є білі, – світлішим. Введемо функцію $C(x, y)$, яку для кожного пікселя з координатами (x, y) розраховуємо за формулою

$$C(x, y) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } P_r(x, y) + P_g(x, y) + P_b(x, y) > 1.5M, \\ 1 \text{ у всіх інших випадках,} \end{cases}$$

Якщо $C(x, y) = 0$, то пікселю надаємо чорний колір, якщо $C(x, y) = 1$ – білий.

В результаті застосування алгоритмів згладжування та поляризації отримано зображення, яке позбавлене шумів. На рис. 1 показано результат виділення зображення людини на кадрі відеопотоку, на рис. 1, б – результат опрацювання цього кадру після перетворення його на монохромний, а на рис 1, в – цей самий кадр, очищений від шумів.

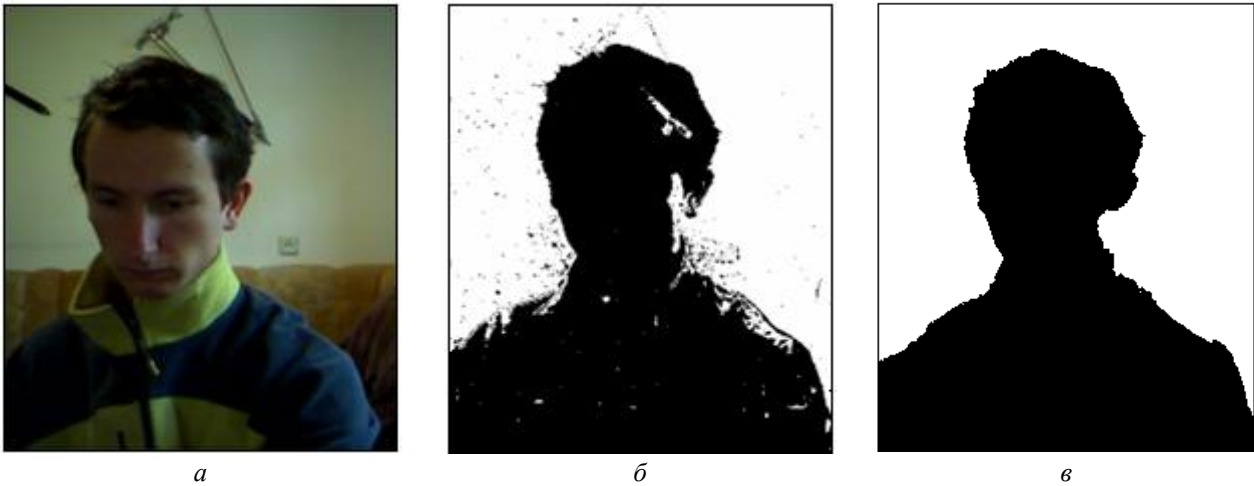


Рис. 1. Виділення зображення на кадрі: а – кадр, отриманий з відеокамери; б – монохромне зображення людини; в – монохромне зображення, очищене від шумів

Контуром зображення є багатокутник, який апроксимує це зображення на кадрі, очищеному від шумів. Для побудови контуру треба сформувати два багатокутники, які є наближеннями контуру. Внутрішній багатокутник побудовано так, що всі його вершини є пікселями чорного кольору та належать зображенню, а вершини зовнішнього – білі й не належать зображенню.

Для побудови контуру зображення використовують алгоритм [4], який складається з таких кроків.

1. Побудова внутрішнього і зовнішнього багатокутників.
2. Побудова контуру з внутрішнього та зовнішнього багатокутників.

Довжина кожного ребра знайдених багатокутників дорівнює відстані між двома сусідніми пікселями, які розташовані горизонтально або вертикально. Зовнішній багатокутник зображаємо впорядкованою множиною його вершин $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, а внутрішній – впорядкованою множиною $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$.

Тут пропонується модифікація методу [4], яка дає змогу зменшити кількість вершин контуру. Модифікація алгоритму мінімізує кількість вершин багатокутників, побудованих за алгоритмом [4], з урахуванням того, що всі ребра багатокутників P та Q паралельні до осей координат.

Ця модифікація виконується як така послідовність кроків.

1. Побудова внутрішнього та зовнішнього багатокутників.
2. Мінімізація кількості ребер багатокутників.
3. Побудова контуру зображення людини за модифікованим методом.
4. Мінімізація кількості вершин.

На рис. 2 проілюстровано роботу алгоритму [4] для кадру розміром 20x20 пікселів. На рис. 2, а є зображення, яке отримане з відеословника, а на рис. 2, б – внутрішній і зовнішній багатокутники.

Позначимо через $p_i = p_i(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, де (x_i, y_i) – координати вершини p_i . Модифікація алгоритму видаляє з множини P вершину $p_i = p_i(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ якщо $x_{i-1} = x_i = x_{i+1}$ або $y_{i-1} = y_i = y_{i+1}$. Аналогічно видаляємо вершини з множини Q . В результаті видалення вершин отримуємо множини P^* та Q^* , в яких кожній вершині p_i , $p_i \in P^*$ $i = 1, 2, \dots, s$ внутрішнього багатокутника відповідає точно одна вершина q_i , $q_i \in Q^*$, $i = 1, 2, \dots, s$ зовнішнього та $|P^*| = |Q^*|$.

На рис. 3 показано частину кадру з рис. 2, б, яка ілюструє мінімізацію вершин внутрішнього та зовнішнього багатокутників. На рис. 3, а показано багатокутники, отримані за алгоритмом [4], а на рис. 3, б – внутрішній і зовнішній багатокутники, одержані мінімізацією кількості вершин за модифікованим алгоритмом.

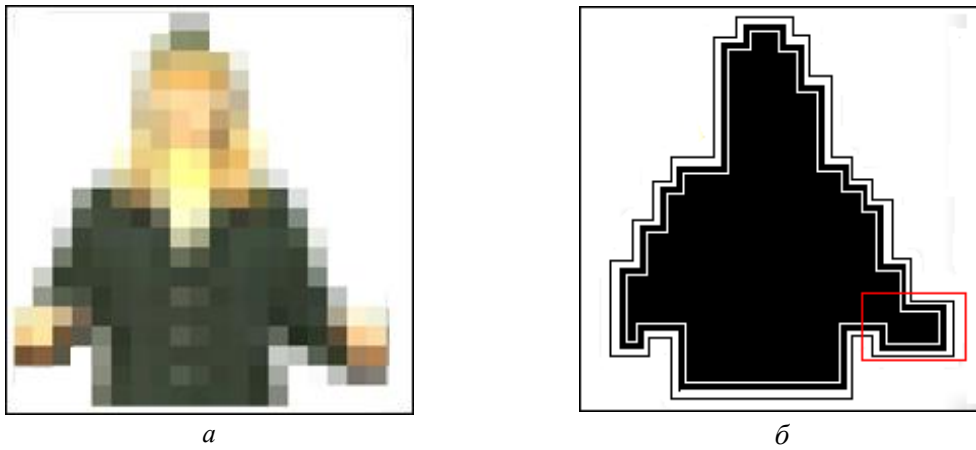


Рис. 2. Внутрішній та зовнішній багатокутник: а – кадр розмірів 20x20 пікселів; б – внутрішній і зовнішній багатокутники

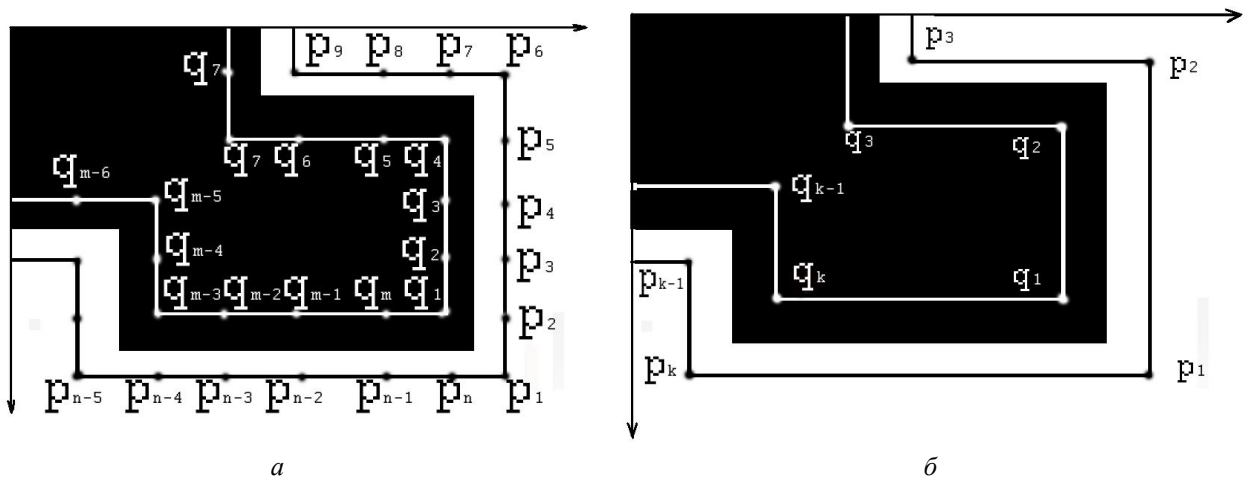


Рис. 3. Мінімізація кількості вершин внутрішнього й зовнішнього багатокутників: а – багатокутники, отримані за алгоритмом [4]; б – багатокутники після мінімізації кількості вершин за модифікованим методом

Для побудови контуру зображення людини R з точок множин P^* та Q^* створено модифікацію алгоритму [4]. Побудова контуру в алгоритмі [4] виконується у такий спосіб. Нехай через S_{in} позначено частину кадру, яка міститься між багатокутниками, заданими множинами P^* та Q^* , а $S_{out} = S \setminus S_{in}$ – решту площі поза багатокутниками. Для довільної точки p_i побудуємо усі напрямлені відрізки $p_i x_j$, де $x_j \in P^* \cup Q^*$, $j > i$, які починаються у точці p_i та закінчуються у точці x_j . Знайдемо відрізки s_j як множини точок

$$s_j = p_i x_j \cap S_{out} = \emptyset. \quad (3)$$

Серед цих відрізків визначимо відрізок найбільшої довжини та точку r з умови $r = \arg \max_j |s_j|$, яку додамо до множини точок контуру, тобто $R := R \cup \{r\}$. Пошук наступної точки контуру продовжимо від точки r та закінчимо при $j = s$. Модифікація методу [4] пошуку контуру R^* полягає у тому, що замість формули (3) побудуємо множину точок за правилом $s_j = p_i x_j \cap S_{out} \neq \emptyset$, $x_j \in P^* \cup Q^*$, $j > i$, кожна з яких є множиною відрізків прямих, що починаються у точці p_i та закінчуються у точці x_j . Сумарна довжина цих відрізків дорівнює $|s_j|$. Серед цих відрізків знайдемо відрізок та точку r з умови $r = \arg \max_{j, |s_j| < e} |s_j|$, яку додамо до множини точок

контур, тобто $R^* := R^* \cup \{r\}$. У формулі для обчислення значення r введено параметр e , значення якого підбираємо експериментально. Пошук наступної точки контуру продовжимо від точки r та закінчимо при $j = s$.

Для мінімізації кількості вершин, які утворюють впорядковану множину вершин R^* виконаємо такі перетворення. Нехай кожна точка контуру $r_i = r(x_i, y_i)$ задана її координатами (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, k$. Побудуємо пари векторів $s_{i-1} = (x_{i-1} - x_i, y_{i-1} - y_i)$ та $s_i = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$ для $i = 2, \dots, k-1$; $s_0 = (x_k - x_1, y_k - y_1)$ та $s_1 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ для $i = 1$; $s_{k-1} = (x_{k-1} - x_k, y_{k-1} - y_k)$ та $s_k = (x_1 - x_k, y_1 - y_k)$ для $i = k$, після чого знайдемо j_i – кут між ними. Точку r_i видаляємо з множини R^* при $|180^\circ - j_i| < a$. Числа a та e визначаються експериментально та є параметрами модифікованого методу. Для $a = 0$ отримано метод [4]. На рис. 4 показано результати побудови контуру зображення людини зі словника жестової мови (див. рис. 4, а) за алгоритмом [4] при $a = 0$ (див. рис. 4, б) та модифікованим алгоритмом для $a = 20^\circ$ (див. рис. 4, в).

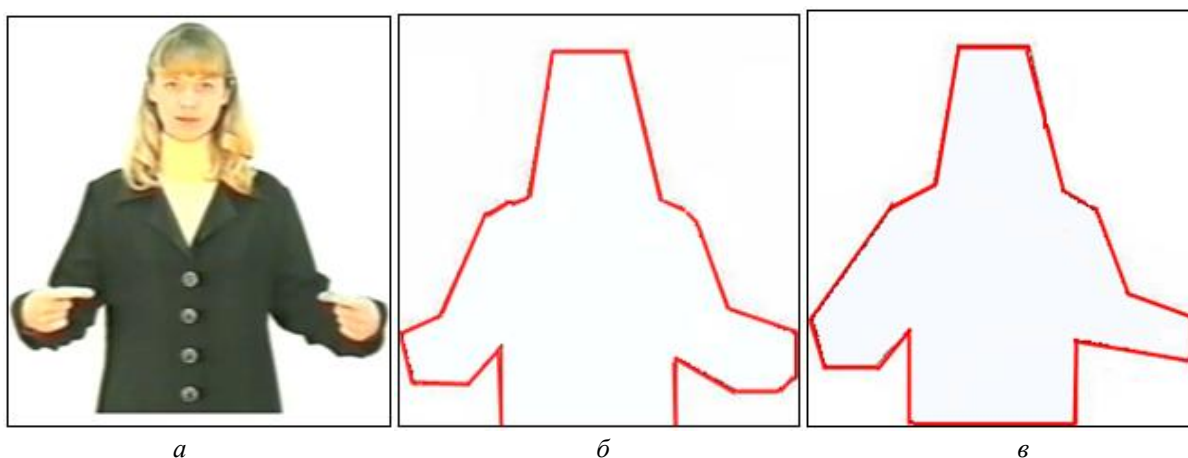


Рис. 4. Побудова контуру зображення: а – кадр зі словника жестової мови; б – контур зображення для $a = 0^\circ$; в – контур зображення для $a = 20^\circ$

Для опису зображення людини на кадрі та розв'язування задачі порівняння зображень та розпізнавання рухів людини використовуватимемо спеціальні графи, параметри яких застосуємо для опису положення людини. Такі графи називатимемо скелетами. У дослідженнях використано два типи скелетів – скелет "зірка" та скелет замкненої двовимірної області. Метод розпізнавання людських рухів за допомогою скелета «зірка» описано в роботі [3]. Скелет "зірка" є зірчастим графом $K_{1,5}$ або $K_{1,4}$ [5], вершини якого лежать в центрі та у крайніх точках зображення тіла людини, як показано на рис.5.

Характеристиками такого скелета є довжини ребер зірки та величини кутів між ними. Для пошуку скелета "зірка" використано всі точки $r_i = r(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$ контуру R^* зображення. Вершину графа $K_{1,5}$ чи $K_{1,4}$ скелета "зірка", яка має одиничний ступінь, розташовують у центрі ваги $r = r(x, y)$ зображення, координати якого обчислюють за формулами

$$x = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}. \quad (4)$$

Вершини "зірки", які суміжні центральній, обчислюють як локальні максимуми функції, значення якої у точках $r_i = r(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$ обчислюють за формулою $d(r, r_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$. Враховуємо лише такі локальні максимуми, між якими містяться локальні мінімуми цієї функції зі

значенням, меншим за середнє значення цієї функції, знайдене у всіх точках $r_i = r(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$. Таких локальних мінімумів може бути чотири або п'ять. На рис. 5, б показано скелет "зірка" типу $K_{1,5}$ для зображення людини з рис. 5, а, а на рис. 5, г – скелет "зірка" типу $K_{1,4}$ для зображення людини з рис. 5, в.

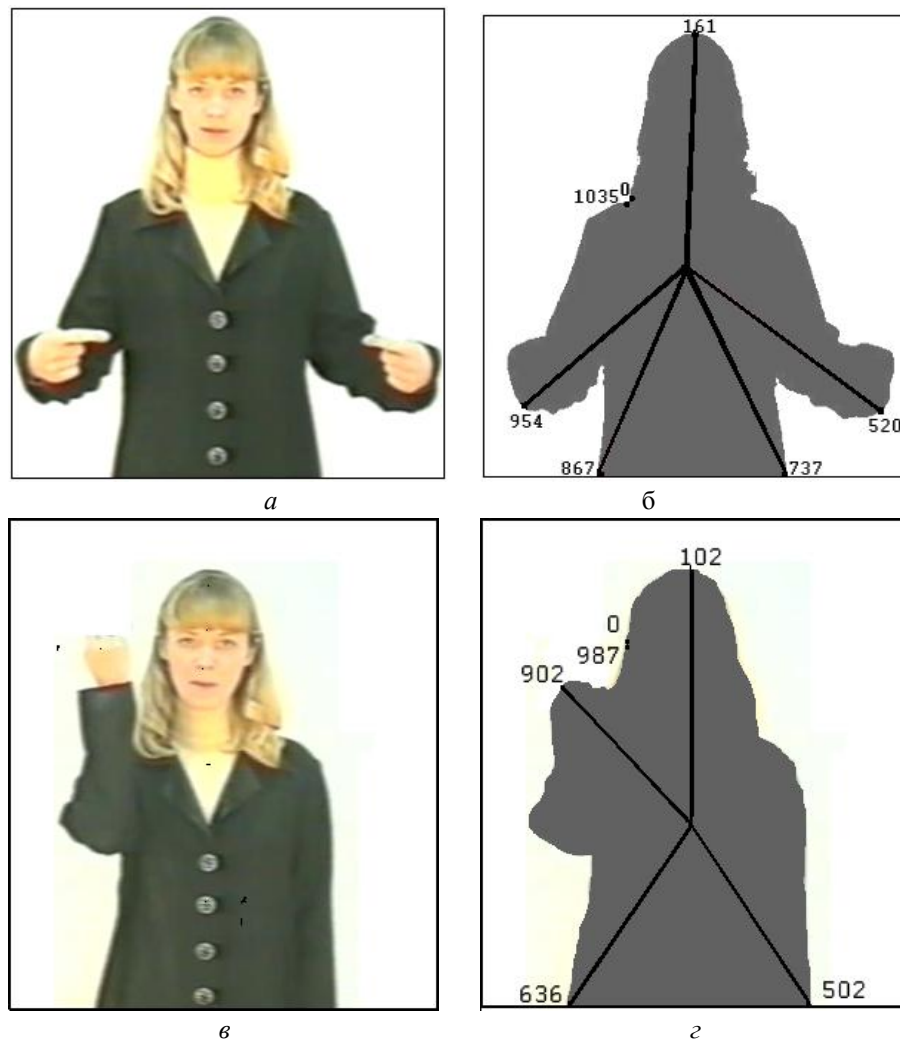
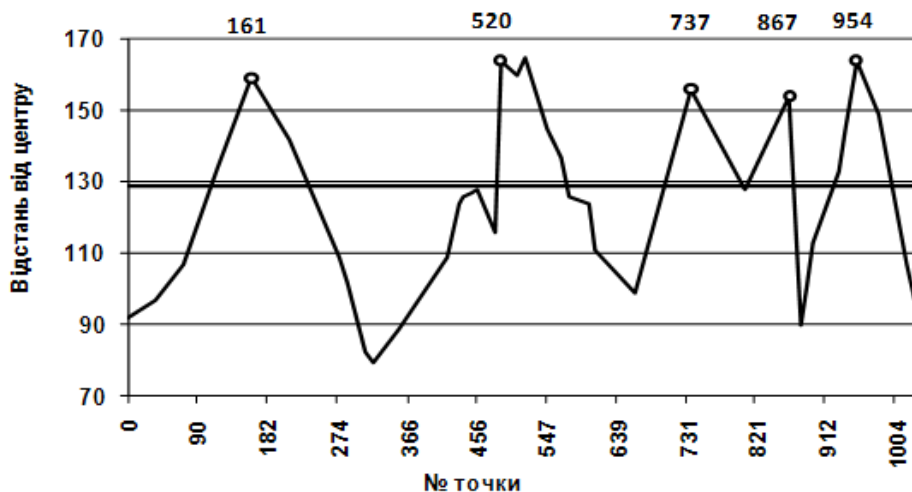


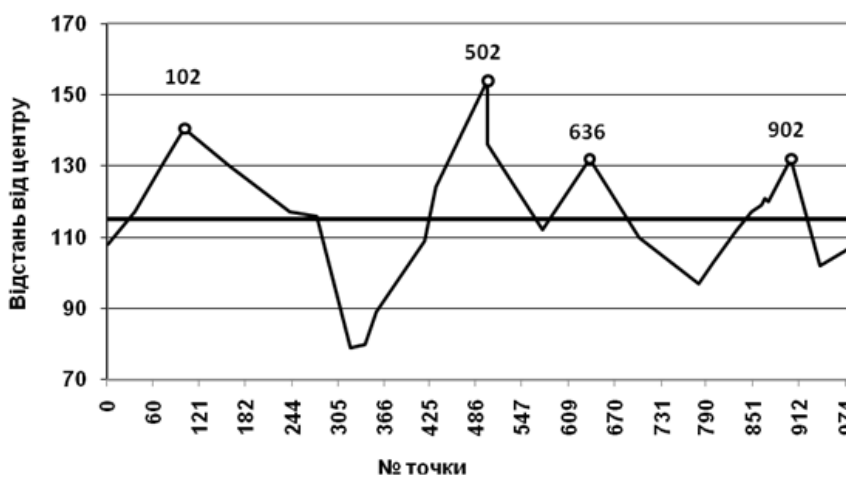
Рис. 5. Скелет "зірка" зображення людини: а – кадр зі словника із зображенням людини та скелетом типу $K_{1,5}$; б – скелет "зірка" типу $K_{1,5}$ для зображення з рис. 5, а; в – кадр зі словника із зображенням людини та скелетом типу $K_{1,4}$; г – скелет "зірка" типу $K_{1,4}$ для зображення з рис. 5, в

Графіки, які показано на рис. 6, отримано застосуванням алгоритму побудови скелетів "зірка" на основі аналізу залежності відстані точки контуру від центра фігури. Зокрема, на рис. 6, а показано утворення скелета типу $K_{1,5}$, а на рис. 6, б – типу $K_{1,4}$. Середні значення відстаней, які визначають вибір максимумів, показані грубою горизонтальною лінією на рівні 130 на рис. 6, а та на рівні 115 на рис. 6, б.

Порівняння двох фігур за скелетами "зірка" виконуємо у такій послідовності. Спочатку порівнюємо кількості променів зірки для кожної з фігур. Якщо їх кількості однакові, то скелети розміщуємо так, щоб збіглися їх центри, які вважаємо полюсом полярної системи координат, в якій відбувається порівняння побудованих "зірок". Вершини "зірок" задаємо парою координат – радіальною координатою r_i^j та кутовою координатою j_i^j , $i = \overline{1, i_{\max}}$, $j = 1, 2$, де j – номер фігури, а $i_{\max} = 4$ або $i_{\max} = 5$. Якщо $\max |r_i^1 - r_i^2| \leq r^*$ та $\max |j_i^1 - j_i^2| \leq j^*$, де r^* та j^* – задані значення, то вважаємо, що положення людських фігур однакові.



a



b

Рис.6. Відстань точок контуру від центра фігури: а – для кадру з рис. 5, а; б – для кадру з рис. 5, в

Скелетом замкненої двовимірної області [7] є така множина точок S , що для кожної точки $s \in S$ існують принаймні такі дві найближчі точки r_1 та r_2 контуру R^* ($r_1 \in R^*$, $r_2 \in R^*$), що $|sr_1| > |sr_2|$. Частина скелета, точки якого належать області, називають внутрішнім скелетом, решту – зовнішнім.

Для зменшення кількості точок скелета замкненої двовимірної області запропоновано використовувати його підмножину, яку називатимемо *базовим скелетом*. Основна відмінність базового скелета від звичайного полягає в тому, що базовий скелет складається з таких точок звичайного скелета, які задовольняють додаткові умови.

Для побудови скелета замкненої двовимірної області її контур апроксимовано замкненою лінією, яка складається з відрізків прямих та частин кіл різних діаметрів. Частина контуру утворюють базові елементи. Із урахуванням особливостей вказаного подання контуру зображення можна отримати такі фрагменти скелета та базових елементів контуру:

- якщо задано два паралельні відрізки, то відповідним фрагментом скелета є відрізок прямої, який паралельний до них та лежить посередині між ними, а базовими елементами – частини заданих відрізків;
- якщо задано два відрізки, які лежать на прямих, що перетинаються, то фрагментом скелета є відрізок на бісектрисі кута, утвореного цими прямими, а базовими елементами – частини заданих відрізків;

- якщо задано дугу кола, то фрагментом скелета є центр кола, а базовим елементом – вся дуга цього кола.

Запропоновано модифікацію алгоритму, яка обрізає отриманий скелет фігури до базового. Базовий скелет утворимо з вже побудованого скелета фігури. Для цього на бісектрисі кута, утвореного відрізками, що перетинаються у точці b , треба видалити такі точки x , що відстані $|xz_1| > |xb|$ та $|xz_2| > |xb|$, де z_1 та ($z_2 \neq z_1, b \neq z_2$) – кінці вказаних відрізків. На рис. 7 показано два скелети прямокутника – звичайний, який показано на рис. 7, а всередині прямокутника тонкими лініями, та базовий, який є частиною звичайного та показаний на рис. 7, б всередині прямокутника грубшими лініями.

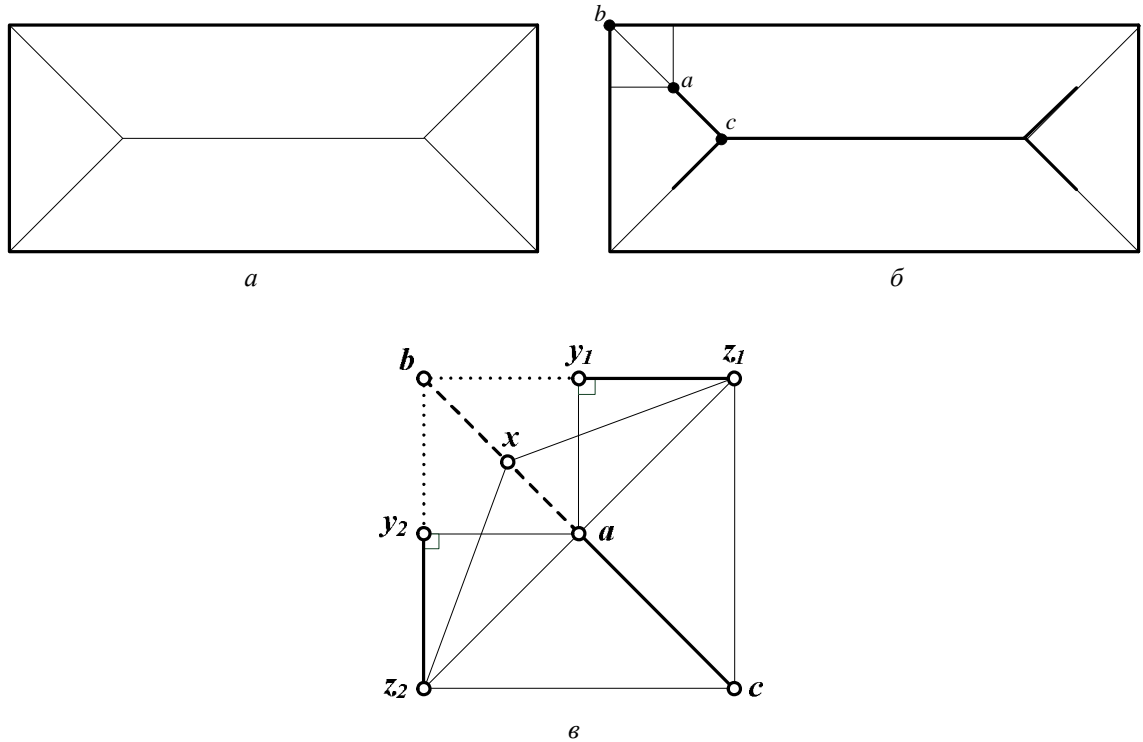


Рис. 7. Скелети прямокутника: а – звичайний скелет; б – базовий скелет; в – фрагмент базового скелета та базові елементи

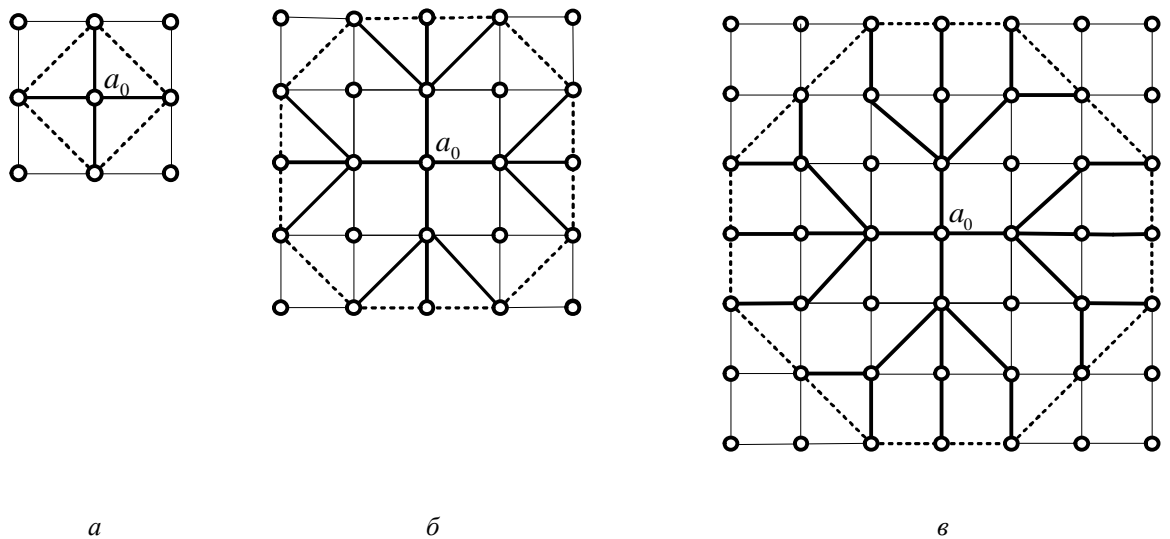


Рис. 8. Центри утворення хвилі: а – перше кільце хвилі; б – друге кільце хвилі; в – третє кільце хвилі

На рис. 7, в показано фрагмент рис. 7, б, на якому виконано побудову базового скелета та базових елементів контуру: y_1z_1 та y_2z_2 – базові елементи контуру, ac – фрагмент базового скелета, оскільки при $x \in ac$ виконується $|xz_1| < |xb|$ та $|xz_2| < |xb|$.

Розглянемо хвильовий метод, який використаємо для побудови скелета [8]. Цей метод оснований на імітації проходження кільцевої хвилі по поверхні рідини. На кожному кроці алгоритму використаємо нові центри виникнення хвилі, що формують наступне її кільце.

На рис. 8 показано побудову центрів утворення хвилі перших трьох її кілець (рис. 8, а–в).

На рис. 9, а–в зображено скелет, який побудовано хвильовим методом для послідовності квадратів, утворених з пікселів екрана.

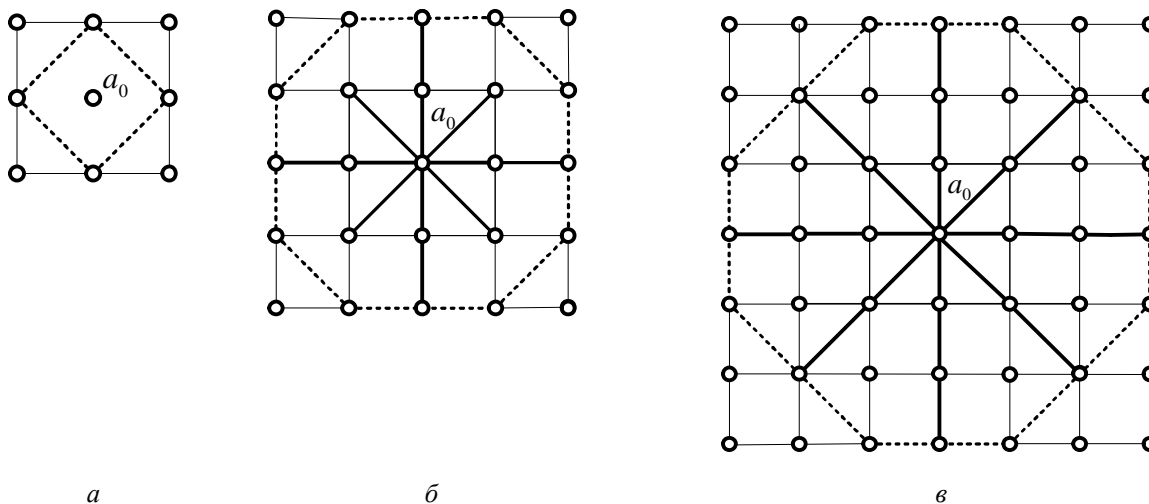


Рис.9. Скелет, побудований хвильовим методом: скелет для першого кільця (а); скелет для другого кільця (б); скелет для третього кільця (в)

На усіх рисунках кружечками показано піксели зображення. Множина центрів утворення хвилі, побудованих хвильовим методом, є кореневим графом з коренем у точці виникнення хвилі a_0 , центри поширення хвилі – пікселами зображення у вершинах дерева.

Вершини дерева однакового рівня утворюють кільця хвилі, а вершини кожного наступного рівня будуються на основі вершин попереднього, що імітує поширення хвилі. На рис. 8–9 кільця хвилі показано штриховою лінією.

Центр виникнення хвилі визначають у межах зображення за такими правилами:

- перше кільце хвилі має чотири піксели, які є вершинами першого рівня дерева;
- вершини кожного наступного рівня дерева складаються з пікселів наступного кільця хвилі;
- кожне наступне кільце хвилі, крім першого, має форму восьмикутника, кожний з яких має $4(n+1)$ пікселів, де n ($n > 1$) – рівень дерева або номер кільця хвилі;
- поширення хвилі полягає у включенні в дерево вершин наступного рівня, для чого можна використати певний алгоритм;
- якщо піксел розміщений за межами зображення, то в нього хвиля не поширюється.

На основі хвильового методу побудовано множину точок виникнення хвилі, що є кореневим деревом з коренем у точці a_0 – центрі виникнення хвилі та складається з восьми променів, які починаються у цьому центрі.

Будують скелет послідовним додаванням пікселів до променів у межах кілець хвилі. Кожному променю належать піксели, що містяться всередині відповідних восьмикутників.

На рис.10 показано центри утворення хвилі та скелет фігури, яка має форму багатокутника.

У дослідженні хвильовий метод застосований для побудови скелета зображення фігури людини.

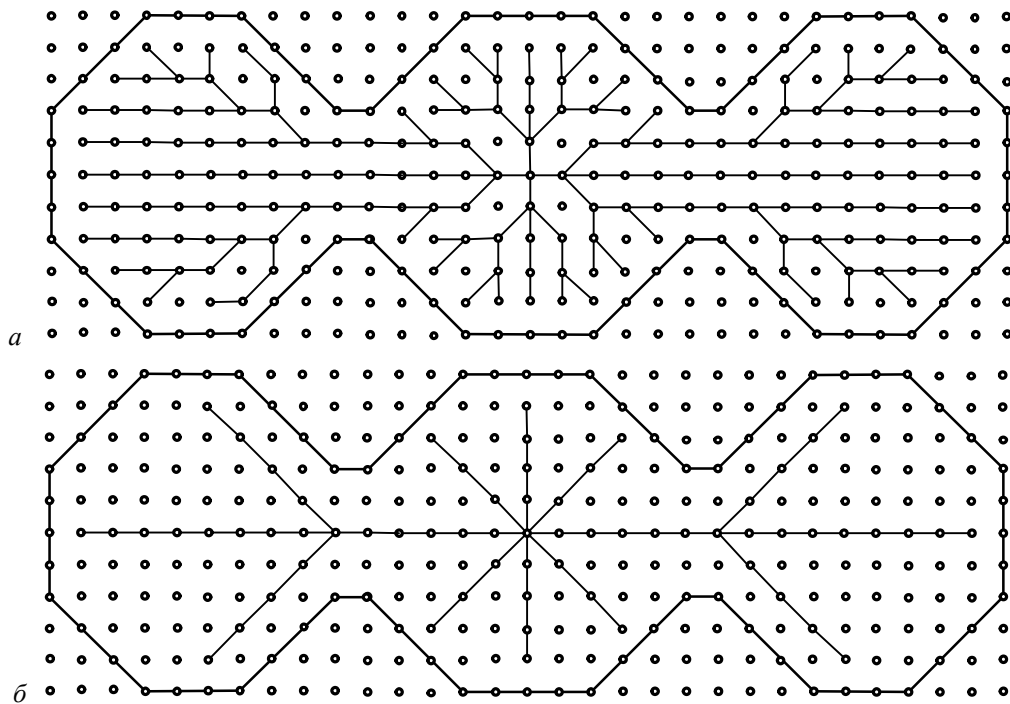


Рис. 10. Утворення центрів поширення хвилі та скелета для багатокутника:
 а – центри поширення хвилі в багатокутнику заданої форми; б – скелет, який побудовано хвильовим методом для багатокутника заданої форми

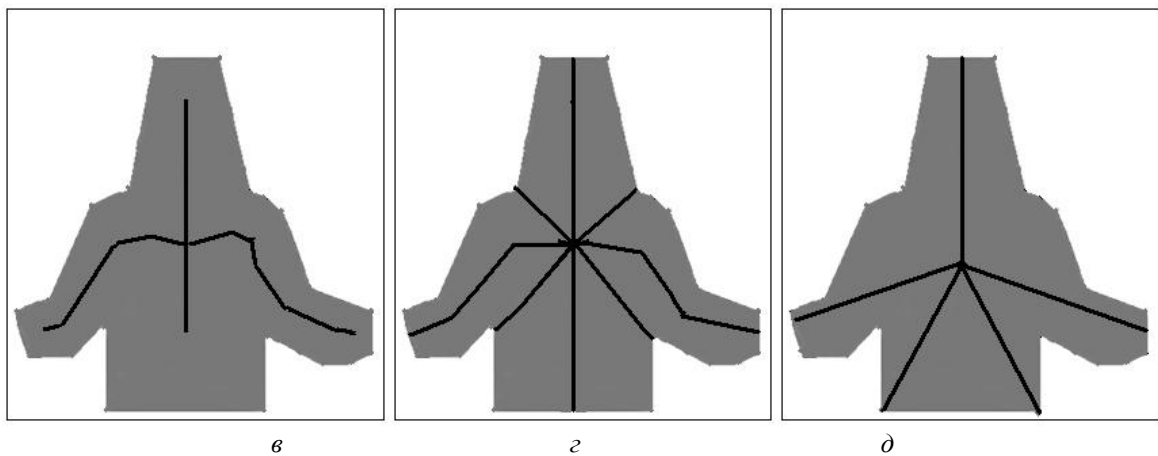
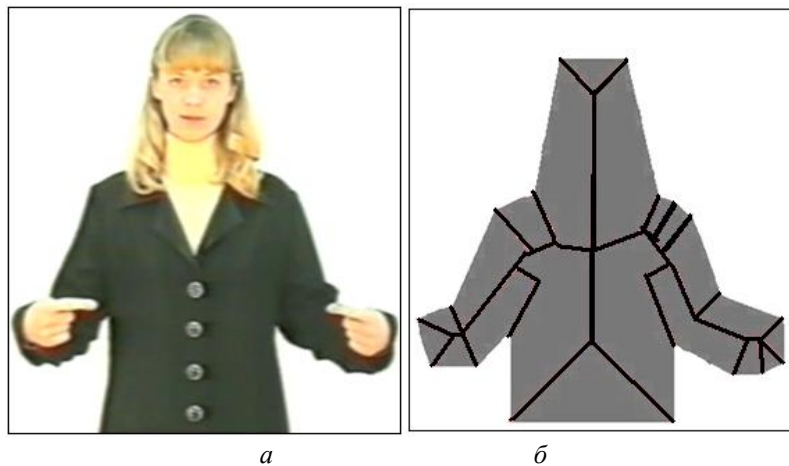


Рис. 11. Скелети зображення людини: а – кадр з людиною, отриманий зі словника; б – виділене зображення людини та його скелет як замкненої двовимірної області; в – виділене зображення людини та його базовий скелет; г – виділене зображення людини та його скелет, побудований хвильовим методом; д – виділене зображення людини та його скелет "зірка"

Недоліком алгоритму побудови скелетів за хвильовим методом є те, що для різних початкових точок виникнення хвилі отримують різні скелети. У разі використання хвильового методу також будуть одержані різні скелети при зміщеннях зображення людини.

В подальшому початкову точку виникнення хвилі вибираємо в центрі, який використано для побудови скелета "зірка".

На рис. 11 показано зображення людини зі словника жестової мови (рис. 11, а), скелет цього зображення як замкненої двовимірної області (рис. 11, б), скелет цього зображення, побудований хвильовим методом (рис. 11, в), та його скелет "зірка" (рис. 11, г).

Порівняння положень фігур за скелетами їх зображень виконують для пар фігур, скелети яких побудовано одним і тим самим методом як таку послідовність кроків.

1. Розміщуємо фігури так, щоб їхні центри, обчислені за формулою (4), збіглися.
2. Для порівняння фігур за базовим або хвильовим скелетами знаходимо їх найдовший вертикальний відрізок, який надалі вважатимемо тулубом.
3. Для всіх типів скелетів (із "зіркою" включно) виконуємо порівняння довжин відповідних елементів скелетів. Якщо принаймні для однієї пари таких елементів довжин відрізнятимуться більше ніж на задану величину l пікселів, то відповідні фігури вважаємо різними. Якщо на скелеті однієї з порівнюваних фігур існують відрізки, яких немає в скелеті іншої фігури, а їх довжина перевищує l пікселів, то такі фігури теж вважаємо різними.

Результати числових експериментів

Для визначення положення тіла людини за її зображенням на кадрі розроблено низку модифікацій алгоритмів, які призначені для порівняння положень тіла людини на зображеннях. Програмне забезпечення, яке реалізує ці алгоритми, використаємо для розпізнавання жестів у програмному тренажері української жестової мови.

Метою експериментів є знаходження параметрів цих алгоритмів та визначення умов їх застосування для особливостей подання фігур на кадрах відеопотоку. Для досягнення цієї мети виконано такі експерименти.

1. Досліджено особливості вибору параметрів a та e для модифікації методу побудови контуру фігури.
2. Запропоновано спосіб вибору параметра l при порівнянні скелетів.
3. Здійснено порівняння різних алгоритмів побудови скелетів за швидкодією.
4. Проаналізовано середню кількість помилок під час порівняння зображень за їх скелетами, побудованими різними алгоритмами.

Для експериментів використано п'ять кадрів із зображенням людини, яка виконує жест, отриманих з веб-камери, та п'ять кадрів з відеословника української жестової мови. Зображення на трьох кадрах з веб-камери повторює три кадри зі словника. Решта кадрів є різними.

На рис. 12 показано усі ці кадри. Тут кадри 1–3 відповідають кадрам 6–8. Для мінімізації ресурсів, необхідних для опрацювання тла і побудови скелетів, зображення людини розташоване у кадрі так, що займає до 85 % за його висотою. Для експериментів з порівняння кадрів використано усі можливі їх пари.

У першому експерименті знайдено залежність часу побудови контуру та відсотка помилок порівняння зображень за скелетом "зірка" від значень параметрів a та e для запропонованої у цьому дослідженні модифікації методу побудови контуру фігури.

Для зображень з рис. 12 побудовано скелети та знайдено залежності середнього часу побудови контуру та відсотка помилок порівняння зображень за скелетами від значення параметра a , які показано на рис. 12. Ці залежності дають змогу зробити висновок, що середній час побудови скелетів зменшується від 4 с до 2,2 с, якщо кут a зростає від 0° до 45° , а середня кількість помилок порівняння зображень за скелетом "зірка" різко зростає, коли $a > 25^\circ$. Тому оптимальним значенням кута a вважаємо $a = 25^\circ$.

Для знаходження оптимального значення параметра e , який використано під час побудови контуру фігури за модифікованим методом, значення e в експериментах оцінювалось для $a = 25^\circ$.



Рис. 12. Зображення, які використано для експериментів: кадри 1–5 є зображеннями з веб-камери, а кадри 6–10 є зображеннями зі словника мови жестів

На рис. 13 показано графіки залежностей часу побудови скелета "зірка" та середньої кількості помилок порівняння фігур за допомогою скелета "зірка" від значення параметра ϵ у модифікованому методі побудови контуру зображень.

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що час побудови скелета "зірка" є спадною функцією від значення ϵ , а кількість помилок різко зростає, якщо $\epsilon > 30$. Тому значення $\epsilon = 30$ використаємо в подальших експериментах.

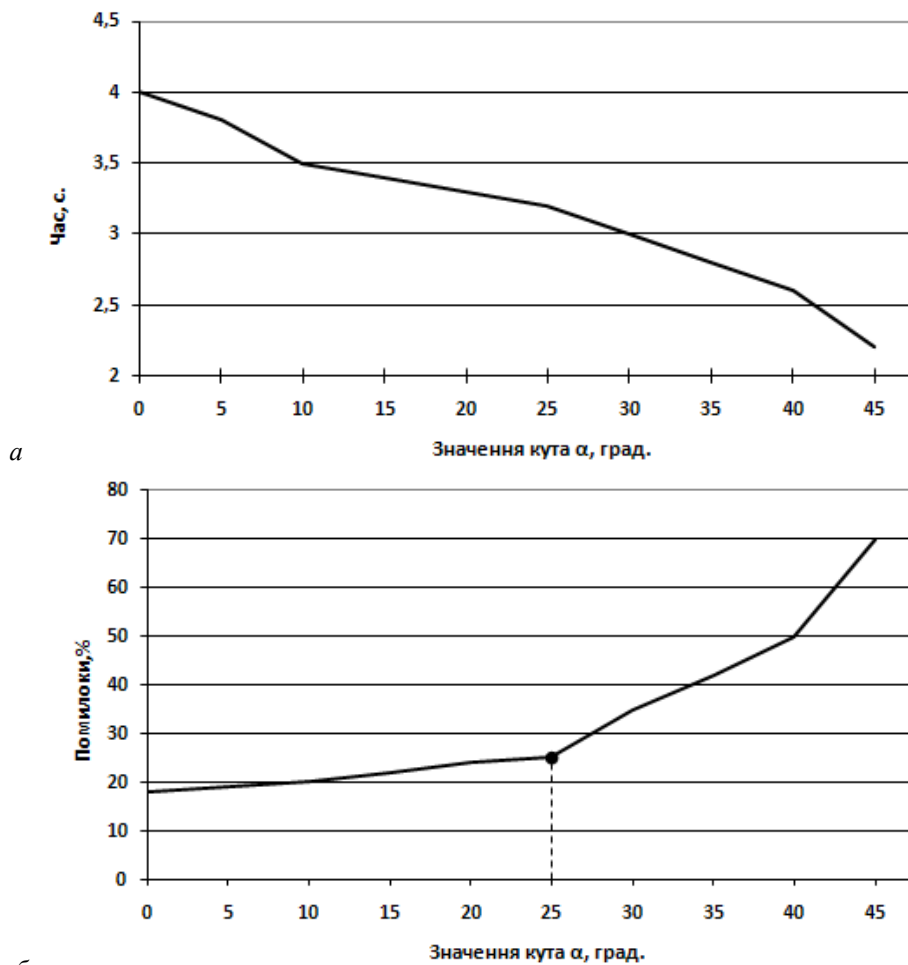


Рис. 13. Графіки залежностей: а – середнього часу побудови контуру від значення α ; б – відсоток помилок порівняння зображень за скелетом "зірка" від значення α

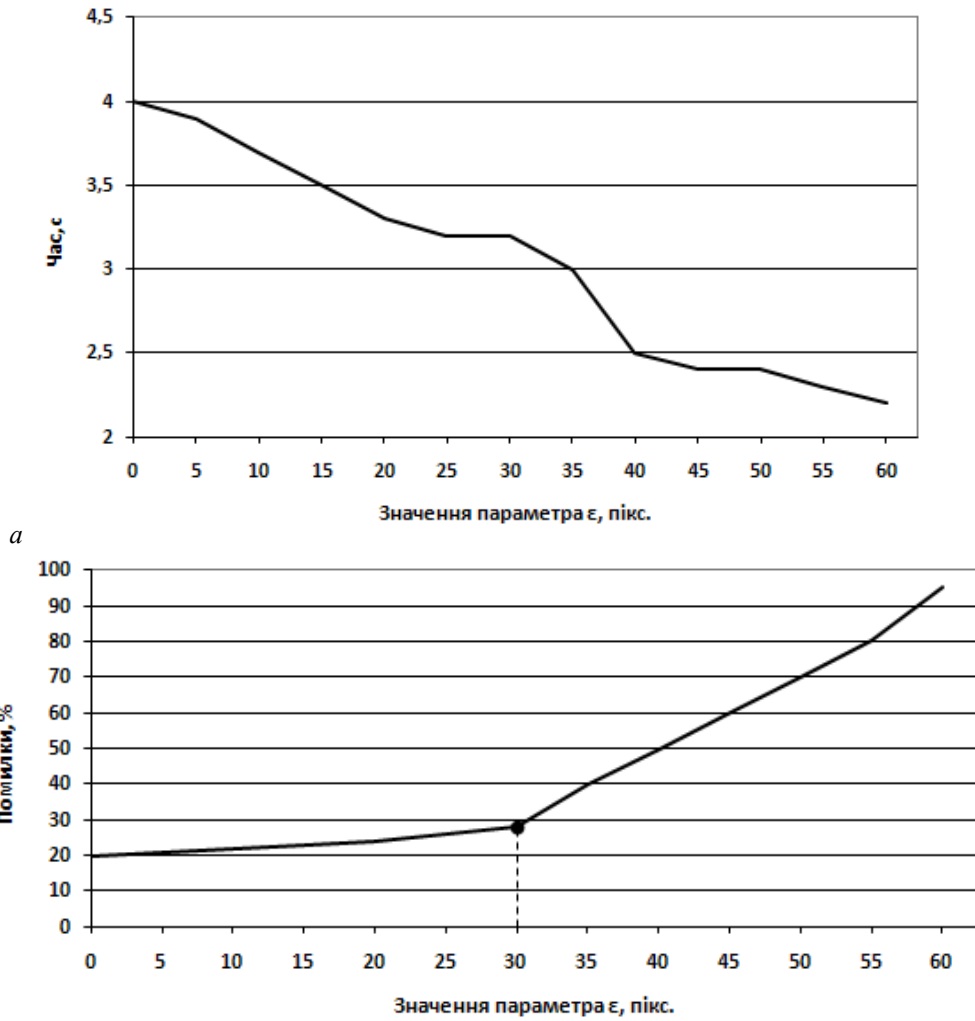


Рис. 14. Графіки залежностей: а – середнього часу побудови контуру за модифікованим методом від значення параметра ϵ ; б – середнього відсотка помилок при порівнянні зображень за скелетом "зірка" від значення параметра ϵ

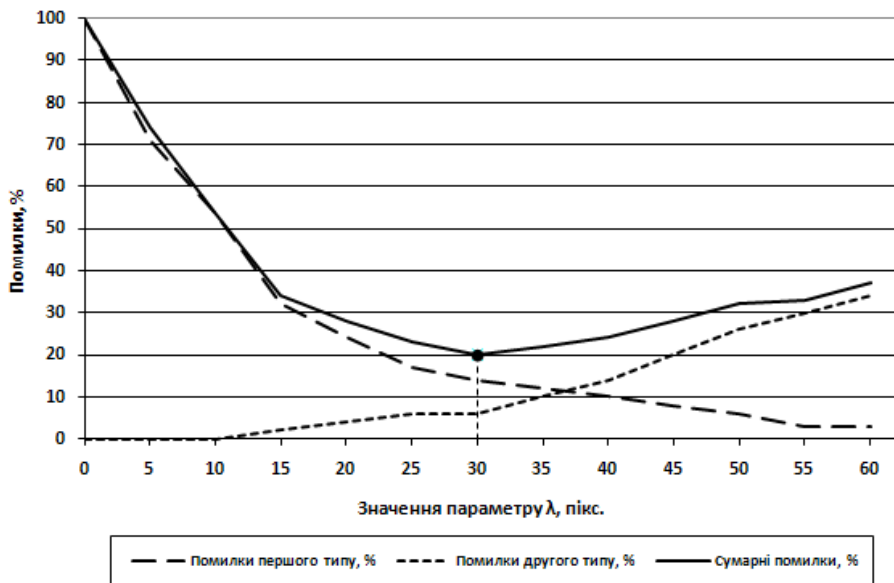


Рис. 15. Залежність середньої кількості помилок порівняння скелетів від заданого значення параметра λ

У другій групі експериментів оцінюється величина помилки під час порівняння зображень пар фігур за їх скелетами на основі заданого значення I – кількості пікселів між визначеними точками відповідних елементів скелетів. Вибір значення цього параметра може приводити до двох типів помилок порівняння: першого, коли однакові кадри вважаються різними, і другого, коли різні кадри – однаковими. Зі збільшенням значення I кількість помилок першого типу зростає, а помилок другого типу – зменшується (див. рис. 14). Оптимальним значенням I вважаємо таке значення, за якого сумарна кількість помилок обох типів буде мінімальною. На основі залежностей, показаних на рис. 14, таким значенням є $I = 30$.

У третій групі експериментів визначено залежність середнього часу побудови скелета від розмірів кадру із зображенням людини. Для цього програма будувала скелети за кожним методом упродовж 10 с для зображень фігури на кадрах, які надходили з веб-камери. У табл. 1 показано середній час побудови таких скелетів.

Таблиця 1

Середній час побудови скелетів, с

Розмір зображення	"Зірка"	Замкнена двовимірна область	Хвильовий метод
640×480	0.32	3.4	0.42
320×240	0.11	1.7	0.11

У четвертій групі експериментів досліджено залежність кількості помилок порівняння фігур з рис. 10 за їх скелетами, побудованими різними методами. Під час порівняння фігур спостерігались помилки як першого, так і другого типів. Найчастіше помилки першого типу траплялись під час порівняння фігур з 3 та 6 кадрів, а також з 5 та 9 кадрів. Середню кількість помилок порівнянь для різних методів побудови скелетів зображень різних розмірів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Середня кількість помилок під час порівняння зображень фігур за їх скелетами, %

Розмір зображення	"Зірка"	Замкнена двовимірна область	Хвильовий метод
640×480	20	16	24
320×240	32	20	32

В експериментах використано комп'ютер з процесором Intel Core Duo E5200 тактової частоти 2.5 ГГц, 3 Мб кеш та 2 Гб оперативної пам'яті. У налаштуваннях компілятора вказано максимальну оптимізацію з використанням SSE інструкцій.

Висновки

У статті наведено результати досліджень з побудови та порівняння на ефективність методів визначення положення тіла людини на зображеннях, які використовуватимуть для підвищення якості навчання жестам у тренажері української жестової мови.

Побудовано модифікації алгоритмів пошуку контуру фігури та скелетів зображення за методом двовимірної замкненої області та хвильового методу. Порівнянням базових методів та підбором параметрів побудованих модифікацій вдалося зменшити час побудови скелетів та порівняння зображень людини за побудованими скелетами. Отримано оптимальні значення параметрів побудови контуру, які забезпечують мінімальну кількість помилок порівняння зображень фігур за скелетом "зірка" у реальному часі.

У результаті експериментів виявлено, що найбільша кількість помилок виникає під час порівняння зображень фігур людини за допомогою скелетів, побудованих хвильовим методом. Це пов'язано з тим, що скелети можуть сильно відрізнятися у разі незначних зміщень початкової точки a_0 виникнення хвилі.

Найменший час побудови скелета "зірка", але кількість помилок порівнянь зображень фігури людини є доволі високою. Це можна пояснити тим, що цей скелет має меншу, ніж інші, кількість параметрів.

Для модифікації методу побудови скелета на основі замкненої двовимірної області, для якого отримана більша точність розпізнавання положення тіла, зроблено висновок, що час виконання ще не дає змоги використовувати його у реальному часу. Подальші дослідження націлені на підвищення ефективності виконання запропонованих алгоритмів у напрямі пошуку можливостей опрацювання зображень, отриманих з відеопотоку в режимі реального часу.

1. Пасічник В. В. Програмний тренажер для навчання мові жестів / В. В. Пасічник, Ю. В. Нікольський, М. В. Давидов // Спеціалізований тематичний додаток до загальногалузевого науково-виробничого журналу "Зв'язок". Праці міжнародної наукової конференції "Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та розбудова інформаційного суспільства в Україні": м.Ганновер, Німеччина, СеВІТ-2007, 15–21 бер. 2007 р. – К., 2007. – С. 98–106. 2. Fujiyoshi H. Real-Time Human Motion Analysis by Image Skeletonization / Hironobu Fujiyoshi Alan J. Lipton // Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, – 21, 1998. – С. 15. 3. Hsun-Sheng Chen. Human action recognition using start skeleton / Hsun-Sheng Chen, Hua-Tsung Chen, Yi-Wen Chen, Syh-Yin Lee // VSSN '06: Proceedings of the 4th ACM international workshop on Video surveillance and sensor networks. – 2006. – P. 171–178. 4. Местецкий Л. Скелет многосвязной многоугольной фигуры / Леонид Местецкий // Труды 15 междунар. конф. ГРАФИКОН-2005. – Новосибирск. – С. 242–249. 5. Нікольський Ю. В. Дискретна математика: підручн. / Нікольський Ю. В., Щербина Ю. М., Пасічник В. В. – К.: Видавнича група BHV, 2007. – 368 с. 6. Pushpa Rani M. An efficient gait recognition System for human identification using Modified ICA/ M. Pushpa Rani, G. Arumugan, Tamil Nadu // International Journal of Computer Science & Information Technology. – Year: 2010. – Vol. 2. – Issue: 1. – С. 55–67. 7. Kirkpatrick D.G. Efficient computation of continuous skeletons // Proc. of the 20th Annual IEEE Symposium on FOCS. – 1979.– С. 18–27. 8. Местецкий Л. Непрерывный скелет бинарного растрового изображения / Леонид Местецкий // Труды 8 междунар. конф. ГРАФИКОН-2005. – Новосибирск. – С. 242–249. 9. Клубков І.М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения / Иван Клубков // Вісник ДГТУ, 2001. – С. 126–133.