

6. Kinoshenko, D. Metrical Properties of Nested Partitions for Image Retrieval [Text] / D. Kinoshenko, V. Mashtalir, E. Yegorova, V. Shlyakhov; C.-H. Wei, Y. Li (Ed.) // Machine Learning Techniques for Adaptive Multimedia Retrieval: Technologies Applications and Perspectives, 2010. – P. 18–49.
7. Кондратьев, А. А. Использование графических вычислителей в процессах обработки и распознавания изображений [Текст]: V Всер. науч.-тех. конф. / А. А. Кондратьев, И. П. Тищенко // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». – М.: Радиотехника, 2012. – С. 92.
8. Старенький, В. П. Применение методов контурной сегментации томограмм для усовершенствования топометрической подготовки конформной лучевой терапии [Текст] / В. П. Старенький, Л. А. Аверьянова, Л. Л. Васильев // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Информатика и моделирование. – 2012. – № 62 (968). – С. 194–199.
9. Абакумов, В. Г. Базовые методы обработки биомедицинских изображений [Текст] / В. Г. Абакумов, С. Г. Антошук, В. Н. Крылов // Электроника и связь. 2008. – Ч. 2. – С. 53–58.
10. Удовик, И. М. Самоорганизующийся интерференционный метод сегментации слабоконтрастных изображений [Текст] / И. М. Удовик, Л. Г. Ахметшина, А. М. Ахметшин // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 427–431.
11. Ахметшина, Л. Г. Фазовая сегментация мультиспектральных слабоконтрастных изображений [Текст] / Л. Г. Ахметшина, И. М. Удовик // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 200–206.
12. Удовик, И. М. Самоорганизующийся интерференционный метод фазовой сегментации мультиспектральных изображений [Текст]: межд. науч.-практ. конф. / И. М. Удовик // Информационные технологии и безопасность в науке, технике и образовании ИНФОТЕХ-2011. – Севастополь, 2011. – С. 164.

*Розглянуто принципи побудови систем дистанційного тренування людини шляхом аналізу відеопотоку рухів, які виконує користувач системи та рухів, виконаних інструктором. Система базується на двохвимірній проективній точковій моделі руху людини. Для моделі обчислюються кінематичні параметри руху: координати характерних точок, їх миттєві швидкості та прискорення. Вірність закладених принципів перевірена шляхом програмної реалізації системи*

*Ключові слова: дистанційне тренування, модель рухів людини, характерні точки, скелетизація, міри близькості рухів*

*Рассмотрены принципы построения систем дистанционной тренировки человека путем анализа видеопотока движений, которые выполняет пользователь системы и движений, выполненных инструктором. Система базируется на двумерной проективной точечной модели движения человека. Для модели вычисляются кинематические параметры движения: координаты характерных точек, их мгновенные скорости и ускорения. Правильность заложенных принципов проверена путем программной реализации системы*

*Ключевые слова: дистанционная тренировка, модель движений человека, характерные точки, скелетизация, степень близости движений*

УДК 004.942: 519.711.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28555

# ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ТРЕНУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІДЕОПОТОКУ

**Нгуєн Гуї Кіонг**  
Аспірант\*

E-mail: cuongmits@gmail.com

**В. О. Болтьонков**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: vaboltenev@mail.ru

**Д. В. Малявін\***

E-mail: dima\_91@ukr.net

\*Кафедра інформаційних систем

Одеський національний

політехнічний університет

пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

## 1. Вступ

Стрімкий розвиток систем комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу зображень у відеопотоці визначив ряд нових напрямків практичного застосування таких систем. Зокрема таким напрямком є створення на впровадження систем дистанційного

тренування (СДТ), що керують рухами людей, які виконують різноманітні тренувальні вправи [1]. Одним з напрямків сучасної медичної практики є застосування СДТ при реабілітації пацієнтів з тривалим періодом відновлення. Особливо перспективний цей напрямок в системах реабілітації хворих з хворобами опорно-рухового апарату (наслідки важких будь-яких травм,

судинних катастроф, дитячий церебральний параліч) [2, 3]. При цьому пацієнту демонструються рухи, які він повинен багатократно повторювати, а СДТ відстежує ці повторювані рухи і вказує на недоліки. Не менш актуальні подібні технології в дистанційних системах спортивного тренування і підвищення спортивної майстерності [4]. Ефективність СДТ полягає в тому, що людині-користувачу такої системи надається можливість самостійно працювати під досвідченого керівництвом тренера або інструктора, який вилучений на достатню відстань, але втручається в процес тренування тільки після оволодіння користувачем необхідного рухового комплексу.

Загальні принципи побудови СДТ в силу своєї новизни як нової інформаційної технології досліджені недостатньо. Відсутні також практичні матеріали щодо побудови СДТ на простих побутових комп'ютерах, доступні широкому колу користувачів.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відомі СДТ засновані, в основному, на двох технологіях відстеження рухів людини-користувача – маркерній та безмаркерній. У маркерних системах відстеження руху людина повинна одягати спеціальний костюм з позначеними різними кольорами частинами тіла і суглобами (маркерами) [5]. Система контролю за рухами захоплює різні частини тіла за їх маркерами і таким чином контролює рухи. Спеціальні костюми не завжди доступні і досить дорогі – це є недоліком подібних систем. Безмаркерні системи можна поділити на два класи – системи з використанням спеціальної 3-D камери Microsoft Kinect [5–7] та мультикамерні системи [8–11], де рух людини фіксується кількома відеокамерами, далі на процесор передаються синхронізовані відеопотоки, що далі обробляються. Суттєвим недоліком систем із застосуванням Kinect технологій є висока вартість як самої камери, так і програмного забезпечення для обробки відеопотоку. Мультикамерні системи потребують складного обладнання для передачі та обробки даних, крім того вони розміщені декількох камер в приміщенні, де відбувається тренування, що не завжди можливе. Однією з головних вимог до СДТ є її працездатність в реальному масштабі часу. Однак аналіз даних, наведених в [12,13], показує, що алгоритми обробки руху тіла в відеопотоці, які застосовуються у відомих системах, є досить ресурсоемними, зокрема в роботах [14–16] використовується такий складний алгоритм як триангуляція Делоне). Програмні реалізації таких алгоритмів мають продуктивність на межі реального часу (15-30 кадрів в секунду) навіть на суперпотужних комп'ютерах. В той же час самим доступним для рядових користувачів вирішенням задачі побудови СДТ є побутова веб-камера і комп'ютер середньої продуктивності. В цьому плані дослідження шляхів побудови простої і якісної СДТ, що є доступною широкому колу користувачів, – актуальна наукова та практична проблема.

## 3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження мали за мету формулювання основних принципів обробки відеопотоку в доступ-

ній системі дистанційного тренування та їх практичну перевірку шляхом програмної реалізації системи.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі задачі:

- розробити двовимірну кінематичну модель руху тіла людини,
- розробити та перевірити шляхом програмної реалізації системи алгоритми послідовної покадрової обробки відеопотоку для кількісної оцінки параметрів руху,
- розробити та перевірити методику кількісної оцінки відхилення рухів користувача від еталонних для корегування тренувальних рухів.

## 4. Матеріали і методи дослідження принципів побудови СДТ

### 4. 1. Двовимірна проективна кінематична модель руху тіла людини

В двовимірній проекції, якою є кожен кадр відеопотоку, будь-яке положення тіла людини може бути повністю описано набором характерних точок (ХТ) [17]. Для фронтальної проекції цей набір точок може бути введений так, як це показано на рис. 1. Далі будемо позначати характерні точки їх номерами.

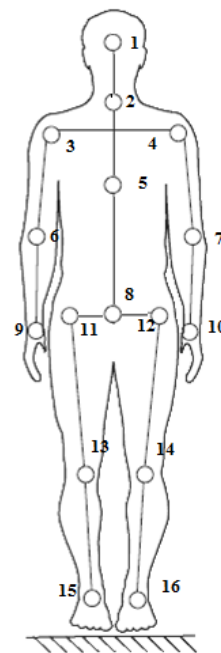


Рис. 1. Набір характерних точок, що описують положення тіла людини: 1 – проекція центру мас голови; 2 – С7 – проекція останнього шийного хребця (центр обертання голови); 3 – правий плечовий суглоб; 4 – лівий плечовий суглоб; 5 – Th5 – 5-ий грудний хребець (приблизна проекція центру мас людини); 6 – правий ліктьовий суглоб; 7 – лівий ліктьовий суглоб; 8 – L1 – проекція 1-го поперекового хребця (центр обертання тіла навколо ножної опори); 9 правий кистьовий суглоб; 10 – лівий кистьовий суглоб; 11 – правий стегновий суглоб; 12 – лівий стегновий суглоб; 13 – правий колінний суглоб; 14 – лівий колінний суглоб; 15 правий гомілковостопний суглоб; 16 – лівий гомілковостопний суглоб

Для відмінної від нормальної ракурсної проекції (з кутом зору камери, відмінним від нуля) на зображенні тіла можуть бути видні не всі точки, але тої сукупності, що спостерігається, практично завжди достатньо для вирішення задачі порівняння конкретних рухів.

Розглянемо принцип побудови системи дистанційного тренування на підставі викладеної моделі. Інструктор (тренер) виконує правильні рухи, які реєструються відеокамерою в вигляді навчального відеопотоку. На підставі пофрагментного аналізу для кожного обов'язкового руху інструктора будується матриця кінематичних параметрів руху, яку назвемо еталонною  $M_{ет}$ . Далі при тому ж ракурсі і на тій же відстані від камери на підставі навчальною відеозапису необхідні рухи пропонується виконати користувачеві системи дистанційного тренування. Сталість ракурсу і координат «камера-користувач» легко досягаються шляхом розмітки тренувального приміщення. Синхронізація руху досягається подачею звукового стартового сигналу. Завдання користувача системи – повторити рухи інструктора максимально точно – за амплітудою (координатами ХТ), темпом (їх швидкістю) і різкістю рухів (прискоренням ХТ). В процесі відеозапису рухів, повторюваних користувачем, будується матриця кінематичних параметрів руху користувача  $M_{кор}$ . Матриці  $M_{ет}$  і  $M_{кор}$  мають однаковий розмір. Результатом функціонування системи дистанційного тренування є рекомендації користувачеві по корекції рухів, що відрізняються від еталонних.

Будь-який рух тіла з достатньою точністю може бути представлено послідовністю набору ХТ, зареєстрованих на послідовних кадрах відеопослідовності. Для побудови рухової (кінематичної) моделі розглянемо фрагмент з  $N$  послідовних кадрів відеопотоку з частотою повторення кадрів  $f$  (міжкадровий період  $\tau=1/f$ ). Припускаючи, що частота кадрів досить велика, будемо вважати, що кожна з ХТ, яка бере участь в складному русі тіла протягом трьох послідовних кадрів, робить обертовий рух. В цьому випадку траєкторія кожної характерної точки в межах трьох кадрів являє собою дугу окружності. Для кожного фрагмента траєкторії може бути знайдений миттєвий центр обертання і радіус дуги окружності (рис. 2). (Відзначимо, що на рис. 2 для ясності викладу показані проріджені послідовні кадри руху тіла, тобто рис. 2 реально відповідає малій частоті повторення кадрів).

Для даного трикадрового фрагменту з номером  $j$  ( $j=1, \dots, N-2$ ) може бути розраховано положення центру миттєвого обертання  $O_j$  за координатами трьох послідовних положень характерної точки в кадри  $n_i$  ( $i=1,2,3$ ) –  $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}), (x_{i+2}, y_{i+2})$  та радіус обертання  $R_j$  (зокрема, на рис.2 такі побудови наведені для точки 9 – права кисть). Розрахунок радіусу  $R_j$  за трьома точками дуги окружності є відомою задачею аналітичної геометрії [18].

Для відомого радіусу обертального руху можна оцінити тангенціальну швидкість  $v_{\tau j}$  і тангенціальне прискорення  $a_{\tau j}$ :

$$v_{\tau j} = \omega_j R_j, \tag{1}$$

$$a_{\tau j} = \epsilon_j R_j, \tag{2}$$

де  $\omega_j$  і  $\epsilon_j$  – кутова швидкість і кутове прискорення точки відповідно для  $j$ -го кадрового фрагменту.

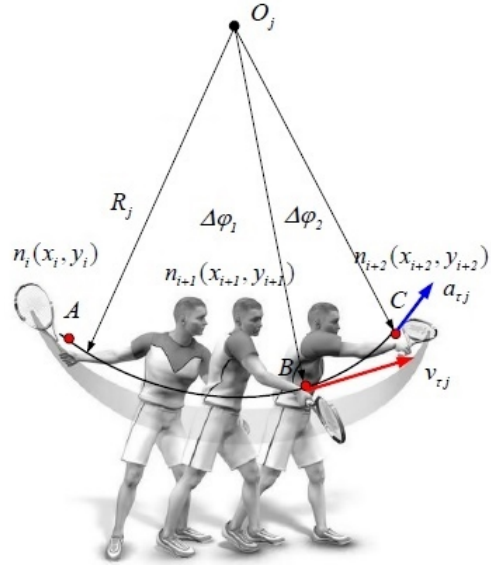


Рис. 2. Побудова фрагменту траєкторії і оцінка кінематичних параметрів для характерної точки

Кутову швидкість можна оцінити на ділянці траєкторії АВ як

$$\omega_{j1} = \frac{\Delta\phi_1}{\tau}, \tag{3}$$

на ділянці траєкторії ВС як

$$\omega_{j2} = \frac{\Delta\phi_2}{\tau}, \tag{4}$$

де  $\Delta\phi_1$  та  $\Delta\phi_2$  – кутові приращення положення точки  $n$  від кадру до кадру;  $\tau$  – період повторення кадрів.  $\Delta\phi_1$  і  $\Delta\phi_2$  знаходяться як кути між векторами  $O_jA$ ,  $O_jB$  та  $O_jB$ ,  $O_jC$  з відомими координатами [18]. Кутова швидкість  $\omega_j$  для фрагменту  $j$  оцінюється як середнє арифметичне  $\omega_{j1}$  і  $\omega_{j2}$ . Кутове прискорення  $\epsilon_j$  для фрагменту  $j$  розраховується як

$$\epsilon_j = \frac{\Delta\epsilon_j}{\Delta t} = \frac{\omega_{j2} - \omega_{j1}}{\tau}, \tag{5}$$

а лінійне прискорення як

$$a_{\tau j} = \epsilon_j R_j. \tag{6}$$

Таким чином для послідовності  $N$  кадрів з відеопотоку для кожної точки  $n$ , що спостерігається в  $N$  кадрах, можна побудувати  $(N-2)$  стовпців, які описують рух тіла в двовимірній проекції та представляють собою набір координат точки, її тангенціальну швидкість і тангенціальне прискорення.

Відзначимо, що при малій кривизні фрагменту траєкторії характерної точки координати миттєвого центру обертання  $(x_{oj}, y_{oj})$  і величина радіуса обертання  $R_j$  можуть виходити за межі кадру в кадрових піксельних координатах в будь-який квадрант, суміжний з кадром. Тим не менш, таке «розширення кадру» не впливає на результати розрахунків миттєвих кінематичних параметрів.

Отже модель руху тіла в рамках фрагмента відеопослідовності з кадрів можна представити у вигляді наступної матриці:

$$\left. \begin{array}{l}
 1 \quad 1,2,3 \quad x_1^1, y_1^1 \quad v_{t1}^1 \quad a_{t1}^1 \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 2 \quad 2,3,4 \quad x_2^1, y_2^1 \quad v_{t2}^1 \quad a_{t2}^1 \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 j \quad i, i+1, i+2 \quad x_j^1, y_j^1 \quad v_{tj}^1 \quad a_{tj}^1 \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 K \quad N-2, N-1, N \quad x_K^1, y_K^1 \quad v_{tK}^1 \quad a_{tK}^1 \quad \dots \quad \rightarrow \dots \\
 \\
 \rightarrow \dots x_1^n, y_1^n \quad v_{t1}^n \quad a_{t1}^n \quad \dots \quad x_1^{16}, y_1^{16} \quad v_{t1}^{16} \quad a_{t1}^{16} \\
 \rightarrow \dots x_2^n, y_2^n \quad v_{t2}^n \quad a_{t2}^n \quad \dots \quad x_2^{16}, y_2^{16} \quad v_{t2}^{16} \quad a_{t2}^{16} \\
 \rightarrow \dots \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 \rightarrow \dots x_j^n, y_j^n \quad v_{tj}^n \quad a_{tj}^n \quad \dots \quad x_j^{16}, y_j^{16} \quad v_{tj}^{16} \quad a_{tj}^{16} \\
 \rightarrow \dots \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 \rightarrow \dots x_K^n, y_K^n \quad v_{tK}^n \quad a_{tK}^n \quad \dots \quad x_K^{16}, y_K^{16} \quad v_{tK}^{16} \quad a_{tK}^{16}
 \end{array} \right\} \quad (7)$$

Ще раз опишемо структуру побудови матриці. Перший елемент рядка  $j$  ( $j=1,2,\dots,K=N-2$ ) – номер трикадрового фрагменту (оскільки для побудови першого фрагмента використовуються три кадри). Другий елемент рядка ( $i, i+1, i+2$ ) – номери кадрів, оброблюваних в  $j$ -му фрагменті ( $i=1,2,\dots,N$ ). Наступні елементи рядка пов'язані з координатами, швидкостями і прискореннями характерних точок, тому в якості верхнього індексу вони містять номер характерної точки  $n$  ( $n=1,\dots,16$ ). Зокрема,  $x_j^n, y_j^n$  – координати точки  $n$  в середині фрагменту  $j, v_{tj}^n, a_{tj}^n$  – тангенціальні швидкість і прискорення точки  $n$ , розраховані для фрагменту відеопотоку з номером  $j$ .

Відзначимо, що матриця не завжди буде мати повний розмір за  $n$ , оскільки всі характерні точки будуть спостерігатися тільки при русі всього тіла в повному фронтальному ракурсі. За будь-яких кутів ракурсів і об'ємних рухах спостерігається тільки частина характерних точок, тобто при таких ракурсах в матриці, починаючи з третього стовпця, будуть брати участь тільки елементи з верхніми індексами, що відповідають реально виявленим в кадрі точкам.

#### 4. 2. Етапи покадрової обробки відеопотоку в системі

Задача, що вирішується системою, складається з чотирьох етапів обробки відеопотоку:

- 1) визначення фону і віднімання його з вихідного зображення,
- 2) скелетизація зображення тіла,
- 3) визначення характерних точок і відстеження траєкторій їхнього руху,
- 4) кількісне порівняння реальних траєкторій руху частин тіла користувача з необхідними і видача зауважень до корекції рухів.

Оскільки основною вимогою до системи є її функціонування в реальному масштабі часу, потрібно застосування алгоритмів, які поєднують в собі високу якість обробки з обчислювальною простотою.

Існує досить багато алгоритмів для здійснення цієї операції, але в проекті системи успішно застосований метод «усереднення фону» за кількома кадрами з подальшим відніманням результату із зображення [19]. Для виключення залежності результатів від яскравості застосована колірна модель HSL.

Наступним досить складним етапом обробки є скелетизація зображення тіла. Не зупиняючись на об'ємних формалізованих визначеннях скелета бінарного зображення [20], в даному дослідженні під скелетом фігури на зображенні будемо розуміти множину пікселів, рівновіддалених від границь (контуру) фігури. З точки зору побудови системи дистанційної тренування важлива задача вибору ефективної процедури скелетизації (побудови скелета). Під ефективністю в даному випадку будемо розуміти як швидкодню процедури скелетизації, так і якість отриманого скелету.

Проведено експериментальне порівняння різних алгоритмів скелетизації. Дослідження проводилося для вибору ефективного алгоритму, придатного для застосування в системах дистанційного тренування. Для таких систем з точки зору працездатності в реальному масштабі часу критичним параметром є швидкодня процедури скелетизації. При цьому отриманий скелет повинен мати достатню якість для подальшої обробки.

В результаті попереднього аналізу були відібрані для практичного дослідження шляхом програмної реалізації п'ять наступних алгоритмів скелетизації.

- 1) Алгоритм морфологічної скелетизації Серра, заснований на послідовному застосуванні морфологічних операцій ерозії і дилатації [21].
- 2) Алгоритм Розенфельда або хвильовий алгоритм, заснований на імітації «пожежі трави в прерії» шляхом послідовного перефарбування граничних точок об'єкта [22].
- 3) Алгоритм Жанга-Суена, який є паралельним алгоритмом із застосуванням ковзної витончуючої маски розміром  $3 \times 3$  пікселя, яке здійснюється в 2 послідовні ітерації [23].
- 4) Паралельний алгоритм Гуо-Холла, що також складається з 2-х ітерацій [24].
- 5) Алгоритм Стентіфорда, що відноситься до ітераційних алгоритмів з послідовним застосуванням 4-х витончуючих шаблонів розміром  $3 \times 3$  пікселя [25].

Для досліджень була розроблена програма на мові C++ з використанням бібліотеки OpenCV, в якій було реалізовано зазначені алгоритми скелетизації. В якості вихідного зображення для обробки були використані зображення рухів людини розміром  $640 \times 512$  пікселів, отримані за допомогою побутової відеокамери. Скелетизація зображень за допомогою програми проводилась на комп'ютері з характеристиками: операційна система – Ubuntu 12.04, процесор Intel (R) Core (TM) 2 CPU 4400 @ 2.00GHz, ОЗУ – 2 Гб, відеокарта: ATI Radeon HD 2600 XT. Результати практичних досліджень алгоритмів скелетизації наведені нижче.

Для визначення характерних точок запропоновано та досліджено такий алгоритм. Визначаються кінцеві точки отриманого на попередньому етапі скелета (голова, кисті рук і т. д.). Далі відбувається ініціалізація маркерів контрольних точок – в першому кадрі людина приймає спеціальну позицію (наприклад, піднімає руки і згинає їх у ліктях). У заданих областях знаходяться кінцеві точки гілок скелета (наприклад, центри кистей рук) і їм присвоюються відповідні маркери. Далі в заданих областях



визначаються позиції ліктів, як найближчих точок зламу скелета. Ці точки також отримують відповідні маркери. Далі обчислюється відстань в пікселях від кистей рук до відповідних ліктів. На наступних кадрах йде пошук помічених маркерами контрольних точок – наприклад, кистей рук (щодо їх позиції на попередньому кадрі). Потім відбувається «переміщення» від кистей по скелету на кількість пікселів, обчислену на етапі ініціалізації. Отримані таким чином точки будуть наступними позиціями ліктів. На підставі послідовностей координат контрольних точок можуть бути побудовані траєкторії кистей і ліктів.

**4.3. Методика кількісної оцінки параметрів рухів і видача рекомендацій користувачеві**

Для кількісної оцінки відмінності двох матриць кінематичних параметрів рухів інструктора і користувача запропоновано наступну методику. На першому етапі для вектор–стовпців координат ХТ  $x_j^n, y_j^n$  обох матриць знаходиться чебишевська міра близькості (тобто метрика максимального відхилення) [26]:

$$I_{\infty}^x = \max_{\substack{j=1, \dots, K \\ \text{для всіх } n}} |x_{j\text{ет}}^n - x_{j\text{кор}}^n|, \tag{8}$$

$$I_{\infty}^y = \max_{\substack{j=1, \dots, K \\ \text{для всіх } n}} |y_{j\text{ет}}^n - y_{j\text{кор}}^n|. \tag{9}$$

За максимальним чебишевським відхиленням визначаються множина характерних точок тіла  $N_{\infty}$ , координати яких відрізняються від необхідних. На підставі першого етапу оцінки видаються перші рекомендації користувачеві за амплітудою рухів (наприклад, “права рука – вище”, “нахил голови вправо – нижче”). Далі для встановленої множини характерних точок  $N_{\infty}$  з відхиленнями за координатами розраховується косинусна міра близькості по векторах швидкості і прискорення. Нагадаємо, що косинусна міра близькості векторів є відношення скалярного добутку векторів до добутку евклідових норм цих векторів [17]. Для співпадаючих векторів кут між ними дорівнює нулю і відповідно косинусна міра близькості дорівнює 1. Отже, косинусні міри близькості будемо оцінювати за формулами:

$$I_{\text{cos}}^v = \frac{v_{j\text{ет}}^n \times v_{j\text{кор}}^n}{|v_{j\text{ет}}^n| \times |v_{j\text{кор}}^n|}, \tag{10}$$

$$I_{\text{cos}}^a = \frac{a_{j\text{ет}}^n \times a_{j\text{кор}}^n}{|a_{j\text{ет}}^n| \times |a_{j\text{кор}}^n|}. \tag{11}$$

На підставі порівняння векторів швидкості і прискорення “точок, що суттєво відхиляються” формується другий рівень рекомендацій користувачеві: за швидкістю (наприклад, “права рука – швидше”, “нахил голови вправо – швидше”) і по прискоренню – (наприклад, “права рука – різкіше”, “нахил голови вправо – різкіше”).

**5. Результати дослідження принципів побудови СДТ**

**5.1. Результат попередньої обробки та дослідження алгоритмів скелетизації**

Вся система дистанційного тренування реалізована у виді програмно-апаратного комплексу. Програма на мові С++ з розроблена з використанням бібліотеки OpenCV. Всі результати, викладені нижче, отримані на апаратній платформі з характеристиками: операційна система – Ubuntu 12.04, процесор Intel (R) Core (TM) 2 CPU 4400 @ 2.00GHz, ОЗУ – 2 Гб, відеокарта: ATI Radeon HD 2600 XT. В якості вихідного зображення для обробки були використані зображення рухів людини розміром 640\*512 пікселів, отримані за допомогою побутової відеокамери.

На рис. 3 представлений результат першого етапу обробки (усереднення та віднімання фону). Зліва показано вихідне зображення, ліворуч – результат усереднення та віднімання фону.

Дослідження алгоритмів скелетизації наведено на рис. 4.



Рис.3. Результат усереднення та віднімання фону

Часові витрати на скелетизацію склали відповідно для варіантів: б) 124 мс, в) 232 мс, г) 1080 мс, д) 1493 мс, е) 526 мс. В інших експериментах часові витрати приблизно пропорційні наведеним. Результати досліджень алгоритмів скелетизації дозволили зробити наступні висновки. Швидкодіючі алгоритми (б, в) мають певні дефекти скелетизації, які виражаються в розривах зв'язності скелета і появі помилкових його гілок. Алгоритми високої якості (г, д) вимагають значно більших затрат обчислювального часу. Для застосування в системах обробки реального часу в якості компромісного, тобто такого, що поєднує достатню якість з швидкодією, може бути рекомендований алгоритм Стентіфорда.

Результат роботи етапу визначення характерних точок представлений на рис. 5.

Далі розглянемо результати застосування викладеної вище методики для порівняльного аналізу двох рухів. Рухи представлені на кадрозаписах (проріджених для зручності сприйняття накладених кадрах з зображенням вихідного положення тіла, послідовних положень спостережуваних характерних точок, позначених білими квадратами і згладжених траєкторій характерних точок) (рис. 6). На рис. 6, а зображено правильний рух, на рис. 6, б – неправильний рух.

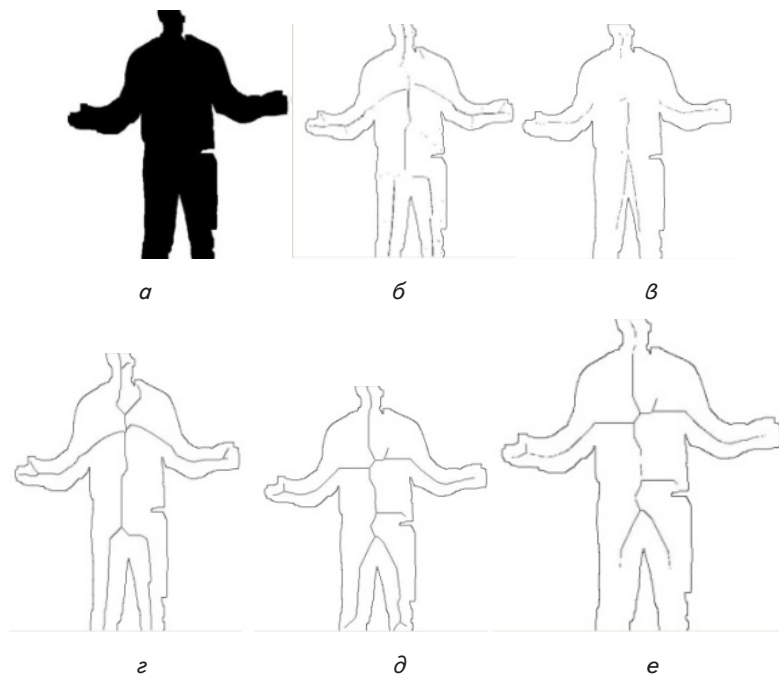


Рис. 4. Результати роботи алгоритмів скелетизації: а – зображення, що обробляється; б – скелет за морфологічним алгоритмом; в – скелет за алгоритмом Розенфельда; г – скелет за алгоритмом Жанга–Суена; д – скелет за алгоритмом Гуо–Холла; е – скелет за алгоритмом Стентіфорда

Таблиця 1

Кількісні кінематичні параметри руху для відеофрагменту (рис. 6)

Кількісні кінематичні характеристики	Кадрограма 1			Кадрограма 2		
	ХТ 3	ХТ 6	ХТ 9	ХТ 3	ХТ 6	ХТ 9
Максимальний радіус $R_j^{max}$ , пікс	17	42	61	12	40	58
Мінімальний радіус $R_j^{min}$ , пікс	15	38	57	10	35	53
Максимальна швидкість кисті $v_{\tau}^{max}$ , пікс/с	148	372	561	142	365	528
Мінімальна швидкість $v_{\tau}^{min}$ , пікс/с	140	365	532	135	358	507
Максимальне прискорення $\epsilon_{\tau}^{max}$ , пікс/с <sup>2</sup>	6	10	18	6	9	17
Мінімальне прискорення $\epsilon_{\tau}^{min}$ , пікс/с <sup>2</sup>	5	8	16	5	8	16

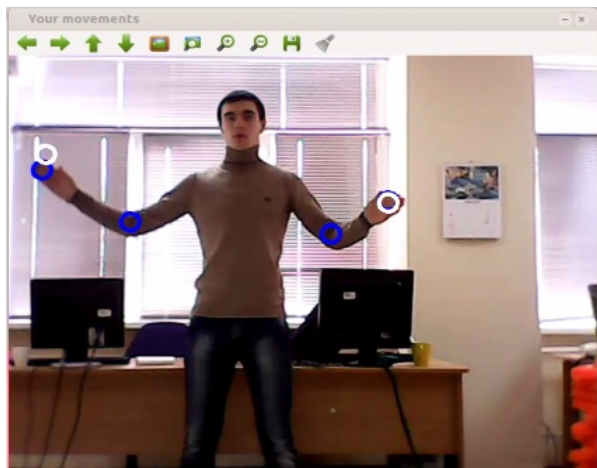


Рис. 5. Результат програмного виділення характерних точок

Таблиця 2

Кількісні міри близькості правильного і неправильного рухів для відеофрагменту (рис. 6)

Кількісні міри близькості	ХТ 3	ХТ 6	ХТ 9
Чебишевська міра близькості за координатою $x$ $I_{\infty}^x$	5	8	16
Чебишевська міра близькості за координатою $y$ $I_{\infty}^y$	6	9	11
Косинусна міра близькості за швидкістю $I_{\cos}^v$	0,911	0,812	0,678
Косинусна міра близькості за прискоренням $I_{\cos}^a$	0,945	0,886	0,853

На етапі тестування системи в якості інструктора і користувача виступала одна і та ж особа, що умисно повторювала рух інструктора з помітними відхиленнями. Конкретні кадрограми сформовані на підставі аналізу фрагменту відеопотоку тривалістю 2 с з частотою кадрів 25 1/с. В кадрограмах аналізується рух точок 3 (праве плече), 6 (правий ліктьовий суглоб), 9 (права кисть). Результати обробки фрагмента, зображеного на рис.6, представлені у табл. 1, 2. Кінематичні характеристики розраховані безпосередньо в піксельних координатних одиницях без переходу в метричні одиниці.

Аналіз результатів обробки фрагменту відеопотоку відповідно до запропонованої моделі дозволяє зробити наступні висновки.

1. Застосування чебишевської міри близькості дозволяє швидко встановити ХТ, траєкторії яких істотно відхиляються від еталонної.

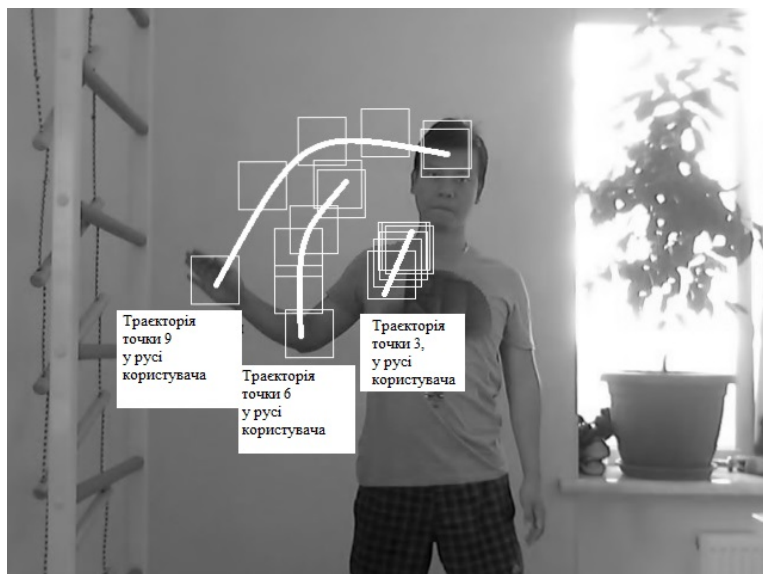
2. Застосування косинусної міри близькості досить адекватно описує відмінності кінематики еталонного і повторюваного рухів.

3. У розглянутому прикладі на підставі наведених мір відмінності векторів кінематичних параметрів руху можна винести конкретні рекомендації, зокрема – “рух правою рукою – вище, швидше”. Близька до одиниці косинусна близькості щодо прискорення дозво-

ляє встановити, що повторюваний тренувальний рух виконується досить правильно.



а



б

Рис. 6. Кадрограми рухів: а – правильного, б – неправильного

Аналіз результатів дозволяє також визначити шляхи вдосконалення методики застосування запропонованої моделі.

1. Як за чебишевською мірою, так і за косинусною мірою необхідно встановити пороги для винесення рішення, зокрема, якщо міри близькості не перевищують допустимого порогу відхилення ( $Thresh$ ):

$$I_{\infty}^x \leq Thresh(I_{\infty}^x), \tag{13}$$

$$I_{\infty}^y \leq Thresh(I_{\infty}^y), \tag{14}$$

$$I_{cos}^v \leq Thresh(I_{cos}^v), \tag{15}$$

$$I_{cos}^a \leq Thresh(I_{cos}^a), \tag{16}$$

то рух вважається повторенням правильно, рекомендації по корекції руху видаються тільки в разі перевищення встановлених порогів. Попередні оцінки показують, що пороги відхилення складають 8–12% від максимального розмаху відповідних кінематичних параметрів.

Точніше пороги відхилення мають бути встановлені на підставі статистичного аналізу достатньої кількості фрагментів повторюваних рухів для користувачів з різним рівнем підготовки.

2. Доцільно згрупувати ХТ для окремих розділів тіла людини (ліві і праві верхні і нижні кінцівки, корпус, голова+шия) і виносити коригувальні рекомендації з окремих розділів тіла в цілому.

## 6. Обговорення результатів дослідження

Запропонована двовимірною проєктивна кінематична модель руху людини для системи дистанційного тренування була реалізована програмно. Програмна реалізація розроблена для побутової веб-камери та комп'ютера середньої потужності. Досліджено алгоритми усереднення та віднімання фону. В результаті дослідження найбільш ресурсоемних алгоритмів скелетизації зображення тіла встановлено, що для СДТ слід застосовувати алгоритм Стентіфорда. Він забезпечує достатню якість скелету та забезпечує потрібну швидкість. Сформульовано та практично реалізовано алгоритм визначення характерних точок на базі отриманого скелету. Сформульована методика кількісної оцінки порівняння двох рухів – еталонного, який виконує користувач та того, що виконує користувач системи. Методика є двохетапною: спочатку визначається множина ХТ з максимальним відхиленням за чебишевською мірою, далі для цих точок обчислюється косинусна міра близькості векторів миттєвої швидкості та миттєвого прискорення характерних точок. Встановлено, що для формування корегуючих команд користувачеві за косинусною мірою слід використовувати пороги відхилення, які складають 8–12% від максимального розмаху відповідних кінематичних параметрів. Таким чином, практично перевірені всі викладені принципи побудови СДТ на основі запропонованої моделі руху та підтверджена адекватність моделі.

## 7. Висновки

Проведені дослідження дозволили сформулювати загальні принципи побудови систем дистанційного тренування, заснованих на аналізі відеопотоку рухів людини, що багаторазово повторюються. Основу системи складає розроблена двовимірною кінематична

модель руху тіла. На відміну від моделей, що існували раніше, така модель не потребує спеціальних відеосенсорів, застосування багатьох відеокамер та використання користувачем одягу зі спеціальними маркерами. Розроблено алгоритми послідовної покадрової обробки відеопотоку для кількісної оцінки параметрів руху людини. Перевагою розроблених алгоритмів є їх економічність – вони здатні працювати з достатньою якістю в реальному масштабі часу на побутових комп'ютерах з середньою продуктивністю. Розроблена методика кількісної оцінки відхилення дій користувача від еталонних для корегування тренування у порівнянні з існуючими дозволяє отримати кількісну міру подібності складних рухів інструктора та користувача, тоді як існуючі раніше методики дозволяли

отримати міру подібності на якісному рівні. Кількісна міра подібності є основою для формування інструкцій щодо корегування неправильних дій користувача за різними частинами його тіла, які рухаються.

Всі викладені принципи перевірені шляхом програмної реалізації системи. Запропонована система практично перевірена на обмеженій вибірці відеозаписів. Тому напрямком подальших досліджень є удосконалення системи на статистично представницькій бази даних відеозаписів тренувальних рухів з метою обчислення допустимих порогів відхилення для тренувань різного призначення. Проведені дослідження дають змогу для створення дешевої і доступної широкому колу користувачів системи дистанційного тренування.

### Література

1. Aggarwal, J. K. Human motion analysis: a review [Text] / J. K. Aggarwal, Q. Cai // *Comput. Vis. Image Underst.* – 1999. – Vol. 73, Issue 3. – P. 428–440. doi:10.1109/namw.1997.609859
2. Катаев, М. Ю. Определение и анализ двигательной активности постинсультного пациента из потока изображений [Текст] / М. Ю. Катаев, С. Г. Катаев, Н. Г. Катаева // *Медицинская информатика.* – 2012. – № 4(34). – С. 43–50.
3. Нгуен Г. К. Применение систем компьютерного зрения в задачах реабилитации пациентов с болезнями опорно-двигательного аппарата [Текст] : тр. МНПК / Г. К. Нгуен // *Современные информационные и электронные технологии СИЭТ-2013.* – Одесса, Политехперіодика. – 2013. – Т. 1. – С. 53–54.
4. Shingade, A. Animation of 3D human model using markerless motion capture applied to sports [Text] / A. Shingade, A. Ghotkar // *International Journal of Computer Graphics & Animation.* – 2014. – Vol. 4, Issue 1. – P. 27–39. doi:10.5121/ijcga.2014.4103
5. Pawlik, P. Visual surveillance for movement rehabilitation [Text] / P. Pawlik, Z. Bublinski // *Image Processing & Communication.* – 2012. – Vol. 17, Issue 4. – P. 173–178. doi:10.2478/v10248-012-0044-9
6. Chang, Y.-J. A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities [Text] / Y.-J. Chang, S.-F. Chen, J.-D. Huang // *Research in Developmental Disabilities.* – 2011. – Vol. 32, Issue 6. – P. 2566–2570. doi:10.1016/j.ridd.2011.07.002
7. Kurakin, A. A real time system for dynamic hand gesture recognition with a depth sensor [Text] / A. Kurakin, Z. Zhang, Z. Liu // *EUSIPCO-2012: Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference, 2012.* – P. 1975–1979.
8. Zhang, Z. A markerless motion capture system with automatic subject-specific body model acquisition and robust pose tracking from 3D data [Text] / Z. Zhang, H. Seah, C. Quah, J. Sun // *Image Processing (ICIP) 2011– 18th IEEE International Conference on Image Processing, 2011.* – P. 525–528. doi:10.1109/icip.2011.6116397
9. Manikandan, K. Human object detection and tracking using background subtraction for sports applications [Text] / K. Manikandan, R. Ramakrishnan // *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering.* – 2013. – Vol. 2, Issue 10. – P. 4077–4080.
10. Kannan, P. Development of human pose models for sports dynamics analysis using video image processing techniques [Text] / P. Kannan, R. Ramakrishnan // *International Journal of Sports Science and Engineering.* – 2012. – Vol. 4. – P. 232–238.
11. Duchenne, O. Automatic annotation of human actions in video [Text] / O. Duchenne, I. Laptev, J. Sivic, F. Bach, J. Ponce // *Proc. International Conference on Computer Vision, 2009.* – P. 1491–1498. doi:10.1109/iccv.2009.5459279
12. Котюжанский, Л. А. Интерфейс бесконтактного управления [Текст] / Л. А. Котюжанский // *Фундаментальные исследования.* – 2013. – № 49 (1). – С. 44–48.
13. Manikandan, K. Human object detection and tracking using background subtraction for sports applications [Text] / K. Manikandan, R. Ramakrishnan // *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering.* – 2013. – Vol. 2, Issue 10. – P. 4077–4080.
14. Chuang, C.-H. Human action recognition using star templates and Delaunay triangulation [Text] / C.-H. Chuang, J.-W. Hsieh, L.-W. Tsai, K.-C. Fan // *International Conference on Intelligent Information, Hiding and Multimedia Signal Processing, 2008.* – P. 179–182. doi:10.1109/iilh-msp.2008.342
15. Hsieh, J.-W. Segmentation of human body parts using deformable triangulation [Text] / J.-W. Hsieh // *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics.* – 2010. – Vol. 40, Issue 3. – P. 596–610. doi:10.1109/tsmca.2010.2040272
16. Morrison, P. Triangle refinement in a constrained Delaunay triangulation skeleton [Text] / P. Morrison, J. J. Zou // *Pattern Recognition.* – 2007. – Vol. 40, Issue 10. – P. 2754–2765. doi:10.1016/j.patcog.2006.12.021
17. Зацюрский, В. М. Биомеханика двигательного аппарата человека [Текст] / В. М. Зацюрский. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.
18. Умнов, А. Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра [Текст] / А. Е. Умнов. – М.: МФТИ, 2011. – 544 с.



19. Сальников, И. И. Растровые пространственно–временные сигналы в системах анализа изображений [Текст] / И. И. Сальников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 248 с.
20. Местецкий, Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры [Текст] / Л. М. Местецкий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 286 с.
21. Serra, J. Image analysis and mathematical morphology [Text] / J. Serra. – London: Academic Press, 1982. – 605 p.
22. Pfalz, J. L. Computer representation of planar regions by their skeletons [Text] / J. L. Pfalz, A. Rosenfeld // Comm. of ACM. – 1967. – Vol.10, Issue 2. – P. 119–125. doi:10.1145/363067.363120
23. Zhang, T. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [Text] / T. Y. Zhang, C. Y. Suen // Comm. of ACM. – 1984. – Vol. 27, Issue 3. – P. 236–239. doi:10.1145/357994.358023
24. Guo, Z. Parallel thinning with two subiteration algorithms [Text] / Z. Guo, R.W. Hall // Comm. of the ACM. – 1989. – Vol. 32, Issue 3. – P. 359–373. doi:10.1145/62065.62074
25. Stentiford, F. W. Some New heuristics for hinning binary handprinted characters for OCR [Text] / F. W. M. Stentiford, R. G. Mortimer // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1983. – Vol. 13, Issue 1. – P. 81–84. doi:10.1109/tsmc.1983.6313034
26. Поспелов, Д. А. Искусственный интеллект. Модели и методы: Справочник. В 3–х кн. Кн. 2. [Текст] / Д. А. Поспелов. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

*Розроблено перетворення з узагальненими гребінчастими масштабними та вейвлет-функціями, що відрізняються від інших методів вейвлет-перетворення аналізуючими функціями. Ці функції характеризуються лінійчатим спектром, що призводить до низьких обчислювальних витрат при визначенні на зображенні границь області структурної текстури, необхідних для досягнення мети геометричних розмірів. Запропоновані перетворення застосовано для локалізації судин на ангиограмах, що дозволило скоротити час обробки цих зображень*

*Ключові слова: гребінчастий фільтр, структурна текстура, узагальнена функція, масштабна функція, вейвлет-функція*

*Разработаны преобразования с обобщенными гребенчатыми масштабными и вейвлет-функциями, отличающиеся от используемых методов вейвлет-преобразования анализирующими функциями. Эти функции характеризуются линейчатым спектром, что приводит к низким вычислительным затратам при определении на изображении границ области структурной текстуры, требуемых для достижения цели геометрических размеров. Предложенные преобразования применены для локализации сосудов на ангиограммах, что позволило сократить время обработки этих изображений*

*Ключевые слова: гребенчатый фильтр, структурная текстура, обобщенная функция, масштабная функция, вейвлет-функции*

УДК 681.004.32  
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27791

# РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ОБОБЩЕННЫМИ ГРЕБЕНЧАТЫМИ МАСШТАБНЫМИ И ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИЯМИ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**М. В. Полякова**

Доктор технических наук, доцент\*  
E-mail: marina\_polyakova@rambler.ru

**В. Н. Крылов**

Доктор технических наук, профессор\*  
E-mail: viktor\_krylov@inbox.ru

**А. В. Ищенко**

Ассистент\*

E-mail: alesya.ishchenko@gmail.com

\*Кафедра прикладной математики и  
информационных технологий

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

## 1. Введение

На современном этапе в таких задачах как обработка медицинских изображений или изображений отсканированных документов, контекстный поиск в базах данных, мониторинг развития транспортных

потоков и роста сельскохозяйственных угодий по аэрофотоснимкам применяются методы сегментации структурных текстур. Структурная текстура состоит из ограниченного числа непроеизводных элементов, под которыми понимаются связанные множества пикселей, характеризуемые некоторой совокупностью при-