



## МОДЕЛЬ ТА ЗАСОБИ СИНТЕЗУ ТРИВИМІРНОГО ЗОБРАЖЕННЯ КОРИСТУВАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ

Досліджено проблему автоматизованого синтезу тривимірних зображень користувача на основі набору стандартних двовимірних зображень фотографій. Встановлено, що складністю у цьому процесі є втрата просторової інформації під час фіксації об'єкта на плоскому знімку, що потребує залучення математичних інструментів для відновлення геометрії. Розроблено та наведено ефективний метод генерування просторових структур, що поєднує сучасні алгоритми комп'ютерного зору з передовими підходами математичної інтерполяції даних. Проаналізовано етапи попереднього оброблення зображень та з'ясовано критичну необхідність безпомилкового визначення антропометричних маркерів на обличчі людини. Для надійного розпізнавання обличчя та точного виділення його 68 ключових точок застосовано функціонал бібліотеки OpenCV спільно з алгоритмом машинного навчання DLIB (англ. *Dlib C++ Library*). Проведено перетворення багатовимірних наборів даних у лінійну форму для удосконалення їх подальшого аналізу. Застосовано алгоритм локальних лінійних відображень LLE (англ. *Low-Level Emulation* – емуляція низького рівня), що дав змогу істотно знизити розмірність простору ознак, гарантовано зберігши локальну топологічну структуру вхідних даних та мінімізувавши загальні обчислювальні витрати. Запропоновано новий спосіб корекції базової тривимірної моделі обличчя шляхом інтеграції індивідуальних параметрів користувача. Для цього застосовано метод просторової інтерполяції – тривимірний кригінг. З'ясовано, що цей геостатистичний спосіб просторової інтерполяції з високою точністю інтерполює значення просторової відстані для невідомих точок поверхні на основі виявлених маркерів та обчислює масив тривимірних зміщень для кожної вершини сітки. Фінальну побудову неперервної полігональної тривимірної поверхні реалізовано за допомогою алгоритму кульового обертання BPA (англ. *Ball Pivoting Algorithm*), який забезпечив створення якісної 3D-моделі без топологічних дефектів. Розроблено спеціалізований мобільний застосунок, який реалізує створений алгоритмічний конвеєр та автоматично генерує готові 3D-моделі. Досліджено придатність отриманих результатів для їх прямої інтеграції у сучасні цифрові екосистеми. Встановлено ефективність використання згенерованих об'єктів у середовищах віртуальної реальності, системах комп'ютерної анімації та різноманітних завданнях цифрового моделювання.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір; розпізнавання обличчя; метод кригінгу; локальні лінійні відображення (LLE); віртуальна реальність.

### Вступ / Introduction

У сучасному світі оброблення та аналіз даних мають велике значення в різних галузях, враховуючи комп'ютерну графіку та оброблення зображень. Зокрема, синтез тривимірних зображень користувача став актуальним завданням у контексті віртуальної реальності (VR), анімації, медичного моделювання та інших областей.

Одним з підходів до вирішення цього завдання є використання лінійної регресії, яка дає змогу аналізувати залежності між різними атрибутами обличчя та створювати тривимірні моделі на основі цих даних. Ця технологія не тільки відкриває нові горизонти для інтеракції та візуалізації, але й перетворює спосіб, яким люди взаємодіють з цифровими образами, зробивши їх більш індивідуальними, інтерактивними і реалістичними.

Тема оброблення зображень дедалі більше привертає увагу учених, розробників, дизайнерів та всіх, хто

цікавиться віртуальною реальністю та комп'ютерною графікою. Вона пропонує можливість подорожувати у світ тривимірних образів, де користувачі можуть створювати свої унікальні цифрові аватари та взаємодіяти з віртуальними об'єктами та середовищами. Важливість цієї теми надає поштовх інноваціям та дає змогу змінити спосіб, яким ми сприймаємо та взаємодіємо з цифровим світом.

Синтез тривимірних моделей на основі фотографій активно використовується та розвивається на мобільних пристроях. Для цього здебільшого використовують моделі штучного інтелекту. Головною перешкодою є складність цих моделей, що вимагають значних обчислювальних ресурсів, на які часто не розрахована потужність мобільних пристроїв.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення методів високоякісної 3D-реконструкції, адаптованих до обмежених ресурсів мобільних платформ.

© Copyright 2026 by the author(s)

Яцків Богдан-Юрій Володимирович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: bohdan-yurii.yatskiv.asp.2025@lpnu.ua; <https://orcid.org/0009-0006-6703-3431>

Островка Дмитро Васильович, доктор філософії, асистент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: dmytro.v.ostrovka@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-4818-3822>

Цитування за ДСТУ: Б.-Яцків Ю. В., Островка Д. В. Модель та засоби синтезу тривимірного зображення користувача з використанням лінійної регресії. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 3. С. 139–145.

Citation APA: Yatskiv, B.-Yu. V., & Ostrovka, D. V. (2026). Model and means of three-dimensional user image synthesis using linear regression. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(3), 139–145. <https://doi.org/10.36930/40360315>

Запропонований спосіб тривимірної реконструкції зображення дає змогу досягти високої точності моделювання без використання енергозатратних нейромереж, спираючись на ефективні статистичні алгоритми.

*Об'єкт дослідження* – процес автоматизованого синтезу тривимірних структур обличчя людини на основі двовимірних цифрових зображень.

*Предмет дослідження* – методи і засоби комп'ютерного зору, лінійної регресії та геостатистичної інтерполяції, що використовують для відновлення просторової геометрії обличчя.

*Мета роботи* – розробити систему, яка здатна автоматично аналізувати двовимірні фотографії користувача та створювати їхні тривимірні візуальні аналоги, придатні ідентифікувати ключові риси обличчя та деталі структури тіла людини на фотографіях без потреби втручання користувача, що забезпечить легкість використання мобільного застосунку та широкий спектр його застосувань у різних галузях, таких як віртуальна реальність, анімація, медичне моделювання, ігри та багато інших.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати наявні методи та програмні засоби автоматизованої побудови тривимірних моделей обличчя на основі антропометричних даних, виявивши їхні обмеження щодо використання на мобільних обчислювальних платформах, що дасть змогу визначити придатні напрями удосконалення алгоритмів для роботи за умов обмежених ресурсів портативних пристроїв;
- обґрунтувати вибір системи із 68 ключових антропометричних маркерів та алгоритмів їх ідентифікації для забезпечення високої точності позиціонування елементів обличчя на вхідному 2D-зображенні, що забезпечить надійну геометричну основу для подальшої безпомилкової корекції базової сітки;
- розробити алгоритмічну процедуру зниження розмірності простору ознак із застосуванням методу локальних лінійних відображень (LLE) для ефективного перетворення координат маркерів у вхідні параметри моделі лінійної регресії, що дасть змогу зменшити обчислювальне навантаження на мобільний пристрій із збереженням локальної топологічної структури вхідних даних;
- адаптувати математичний апарат тривимірного кригінгу для проведення просторової інтерполяції векторів зміщення вершин базової 3D-моделі, забезпечивши плавність деформації полігональної сітки, що уможливить точне і реалістичне відтворення анатомічних особливостей користувача без появи артефактів;
- реалізувати синтез фінальної полігональної поверхні за допомогою алгоритму кульового обертання та провести експериментальне оцінювання точності отриманої моделі, що підтвердить ефективність запропонованого методу та його безпосередню придатність для інтеграції у сучасні мобільні екосистеми.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Технології тривимірної реконструкції об'єктів за фотографіями наразі проходять етап активного впровадження та вдосконалення. У дослідженні [6] автори запропонували спосіб оцінювання пози голови на основі 2D-зображень за допомогою модифікації 3D-моделей з використанням параметрів глибини. З'ясовано, що хоча цей метод демонструє високу точність відтворення просторових характеристик, він потребує значних обчислювальних ресурсів. Це істотно ускладнює його практичне впровадження у мобільні додатки, які мають працювати

в реальному часі за умов обмежених потужностей портативних пристроїв.

У публікації [7] автори дослідили стрімкий розвиток технологій доповненої та віртуальної реальності в контексті взаємодії з користувачами. Встановлено, що сучасні мобільні пристрої стають ключовою платформою та важливою складовою напрямку використання тривимірного генерування зображень, що вимагає створення досконалих алгоритмів для швидкого моделювання персоналізованих цифрових аватарів без залучення важких серверних обчислень.

Отож, мобільні пристрої – важлива складова напрямку використання тривимірного генерування зображень. У роботі [12] дослідники проаналізували процес розроблення спеціалізованих моделей синтезу 3D-зображень безпосередньо для мобільних платформ під управлінням ОС iOS. Досліджено використання вбудованого ігрового рушія SceneKit та відкритого формату USDZ для відображення тривимірної графіки, що підтверджує актуальність створення легковагових методів полігонального моделювання, які можуть безперебійно працювати в сучасних мобільних екосистемах.

У роботі [8] автори здійснили ґрунтовний огляд сучасних підходів до 3D-реконструкції обличчя на базі некаліброваних двовимірних зображень. З'ясовано, що цей напрям має величезний потенціал і потребує постійного вдосконалення алгоритмів, зокрема для забезпечення стабільної роботи систем за умов змінного освітлення та різної якості вхідних знімків, що є типовим для мобільної фотографії.

У дослідженні [14] автори представили комплексну архітектуру для автоматизованого генерування тривимірних карикатур. Проаналізовано застосування алгоритму локальних лінійних відображень (LLE) для машинного навчання та виявлення зв'язків між антропометричними маркерами обличчя. На завершальному етапі роботи автори використали метод просторової інтерполяції кригінгу для фінального коректування вершин базової 3D-моделі обличчя відповідно до виявлених ключових точок.

У науковій праці [3] автори ґрунтовно дослідили тематичні особливості та варіанти застосування алгоритму локальних лінійних відображень (LLE) для завдань зменшення розмірності. Встановлено, що застосування цього алгоритму дає змогу ефективно вбудувати ключові точки обличчя у простір меншої розмірності за допомогою локальних лінійних перетворень. Це гарантовано зберігає локальну топологічну структуру вхідних даних та істотно мінімізує загальні обчислювальні витрати.

Підсумовуючи наведене вище, варто зазначити, що незважаючи на значну кількість праць у сфері 3D-реконструкції обличчя людини, існує потреба у розробленні ефективних методів, які були б адаптовані до обмежених ресурсів мобільних платформ. Ми вперше пропонуємо застосувати додатковий крок з використанням детектора на основі алгоритму DLIB одночасно як до базової моделі обличчя, так і до вхідного 2D-зображення фотографії. Такий спосіб виявлення ключових точок у поєднанні з просторовою інтерполяцією методом тривимірного кригінгу дає змогу істотно підвищити точність зіставлення ключових точок обох моделей і робить проведення нашого дослідження доцільним.

**Матеріали та методи дослідження.** Методологія дослідження базується на комплексному поєднанні ал-

горитмів комп'ютерного зору та методів математичної інтерполяції для автоматизованої 3D-реконструкції обличчя людини за 2D-зображеннями фотографій. Для ідентифікації 68 антропометричних маркерів обличчя використано функціонал бібліотеки OpenCV та алгоритм машинного навчання DLIB. Зниження розмірності простору ознак реалізовано за допомогою методу локальних лінійних відображень (LLE), а просторову корекцію вершин базової полігональної сітки проведено методом тривимірної кригінгу. Фінальний синтез неперервної поверхні тривимірної моделі обличчя здійснено із застосуванням алгоритму кульового обертання (BPA).

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для розпізнавання обличчя було використано бібліотеку OpenCV, оскільки вона містить потрібні засоби для розпізнавання обличчя та визначення ключових точок. Бібліотека також є простою для інтеграції та дає змогу обирати різні вбудовані алгоритми та моделі визначення обличчя та експериментувати з їх результатами, що підходить для вирішення завдань даної роботи. Один із найпопулярніших алгоритмів для цього – алгоритм DLIB, який дає змогу визначити 68 ключових точок обличчя. Під час проведення дослідження розглядалися алгоритми з іншими кількостями ключових точок, але після огляду наявних вирішено зупинитись на dlib. Як показує робота [4], 68 точок – це достатній і найпопулярніший спосіб виділення антропометричних маркерів, і хоч більша кількість ключових точок може забезпечити вищу точність і деталізацію, наразі не існує достатньої кількості якісних наборів даних для тренування моделей з більшою деталізацією. Також популярність використання саме 68 ключових точок дає змогу простіше проводити тестування та порівнювати результати з більшою кількістю інших досліджень.

Для завдання перетворення багатовимірних даних в лінійну форму використано алгоритм локальних лінійних відображень. Алгоритм LLE спочатку знаходить  $k$ -найближчих сусідів для точок. Потім він апроксимує кожний вектор даних як зважену лінійну комбінацію його  $k$ -найближчих сусідів. Нарешті, він обчислює вагомості, які найкраще відтворюють вектори зі своїх сусідів, а потім створює низькорозмірні вектори, які найкраще відтворюються цими вагами.

Однією з переваг алгоритму LLE є те, що він має тільки один налаштовуваний параметр – значення  $K$ , або кількість найближчих сусідів, які розглядаються як частина кластера. Якщо  $K$  вибрано занадто малим або занадто великим, він не зможе врахувати геометрію вихідних даних. Для кожної наявної точки даних, обчислюються  $K$  найближчих сусідів.

Потім проводиться зважена агрегація сусідів кожної точки, щоб створити нову точку, а саме:

$$E(W) = \sum_{i=1}^M \left| X_i - \sum_{j=1}^N W_{ij} X_j \right|^2; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_{ij} = 1. \quad (2)$$

Формула (1) показує процес мінімізації функції вартості, де  $j$ -ий найближчий сусід для точки  $X_i$ . Сума всіх вартостей дорівнює 1, як показано у формулі (2).

Далі визначається новий векторний простір  $Y$  так, щоб мінімізувати вартість для  $Y$  як для нових точок, а саме:

$$C(Y) = \sum_{i=1}^M \left| Y_i - \sum_{j=1}^N W_{ij} Y_j \right|^2. \quad (3)$$

Рис. 1 показує приклад роботи алгоритму LLE з використанням методу KNN. Алгоритм LLE (англ. *Locally Linear Embedding* – локально лінійне вкладення) – це метод зниження розмірності даних, який зберігає локальні зв'язки між точками. Метод KNN ( $k$ -найближчих сусідів) використовується на першому кроці LLE, щоб знайти для кожної точки її найближче оточення. Після виконання алгоритму тривимірна "стрічка", яка була закручена у формі літери S, акуратно розгортається у плоский двовимірний прямокутник. При цьому точки, які були сусідами у 3D-просторі, залишаються сусідами і на 2D-площині.

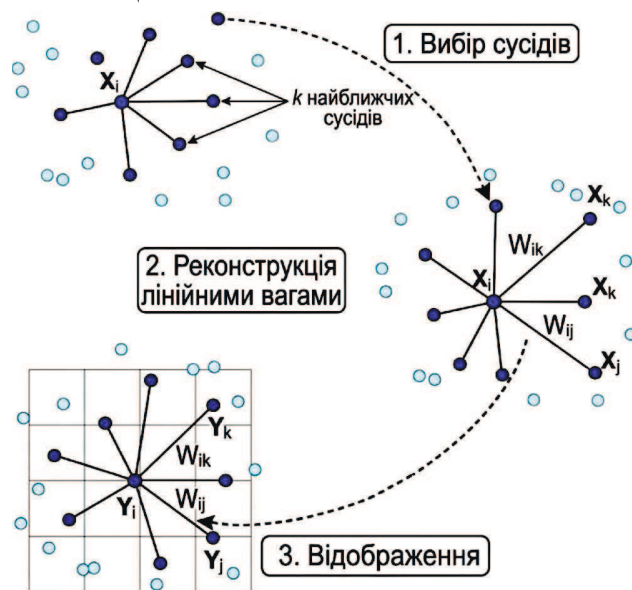


Рис. 1. Приклад роботи алгоритму LLE / Example of the LLE algorithm operation

Для перенесення отриманих точок обличчя на тривимірну модель часто застосовують такий популярний та поширений метод в ШІ, як лінійна регресія. Лінійна регресія є одним із найвідоміших і найефективніших методів у штучному інтелекті (ШІ) для перенесення точок обличчя на тривимірну (3D) модель. Цей спосіб допомагає комп'ютеру швидко з'єднати пласке двовимірне зображення з об'ємною фігурою.

Кригінг [9] – специфічна форма лінійної регресії, що базується на статистичних параметрах для досягнення оптимальної оцінки з точки зору мінімізації середнього відхилення за створення поверхонь, кубів та карт. Цей метод інтерполяції, що використовують у геостатистиці, отримав свою назву на честь Деніела Крига, гірського інженера з Південної Африки, який використовував його для створення геологічних карт за обмеженими даними в певній області. Основна ідея методу полягає в забезпеченні незміщеності середнього значення, тобто усі вибрані значення на карті повинні мати правильне середнє значення. Глобальна незміщеність досягається збільшенням найнижчих значень і зменшенням найвищих.

З погляду загальної статистики, кригінг спрямований на мінімізацію дисперсії похибки вимірювання, яка залежить від вагомості вимірюваних точок. Це зменшення дисперсії призводить до зменшення середньоквадратичної похибки оцінки відхилення виміряних значень від можливих. Це досягається шляхом встановлення похідної похибки щодо кожної невідомої ваго-

мости на нуль. Це призводить до системи рівнянь, розв'язок якої – це вектор ваг. На рис. 2 показано приклад використання кригінгу для одновимірних даних.

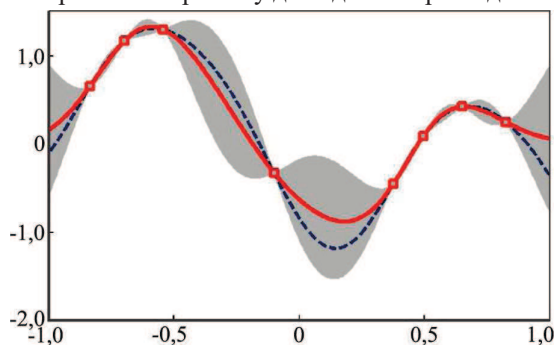


Рис. 2. Приклад інтерполяції кригінгом одновимірних даних, із довірчими інтервалами / Example of Kriging interpolation of one-dimensional data with confidence intervals

Квадрати вказують положення даних. Кригінгова інтерполяція, показана червоним кольором, проходить уздовж середин нормально розподілених довірчих інтервалів, показаних сірим. Пунктирна крива показує сплайн, який є плавним, але значно відхиляється від очікуваних проміжних значень, заданих цими серединами.



Рис. 3. Діаграма потоків даних системи / System data flow diagram

Вхідне зображення спочатку зазнає попереднього оброблення – пошуку обличчя людини на зображенні та вирівнювання зображення відносно знайденого обличчя. Наступним кроком є визначення ключових точок обличчя у вигляді координат  $(x, y, z)$ . Потім використовуючи метод кригінгу та беручи базову модель користувача (набір точок) [5], оцінюється значення параметрів в тих точках, де отримані після визначення ключових дані відсутні.

Базуючись на принципі, що значення в одній точці простору може бути оцінено на основі значень в інших точках з урахуванням ступеня взаємозв'язку між ними, модифіковані точки базової моделі перетворюються у вихідну тривимірну модель користувача.

Алгоритм кригінгу в контексті розпізнавання обличчя виглядає так:

1. *Збирання ключових точок обличчя.* Здійснюється збирання ключових точок обличчя на вхідному зображенні. Ці точки можуть містити такі параметри, як положення очей, носа, рота тощо.
2. *Створення сітки.* Зображення обличчя може бути розділене на сітку, де кожна клітина має свої координати.
3. *Оцінювання значень.* Для кожної клітини сітки, в якій немає зібраних ключових точок, використовуються значення з уже відомих точок для оцінювання параметрів об'єкта в цій області.

4. *Інтерполяція значень.* Значення параметрів (наприклад, координати ключових точок) для клітин, в яких немає прямих спостережень, інтерполюються на основі відомих значень найближчих точок.
5. *Отримання результату.* Після інтерполяції для всіх клітин сітки ми отримуємо карту значень параметрів для всього обличчя.
6. *Відображення результату.* Отримані значення можуть бути використані для побудови моделі обличчя або для подальшого аналізу.

Застосування кригінгу для інтерполяції ключових точок обличчя дає змогу отримати повніше уявлення про форму та структуру обличчя на основі обмеженої кількості точок.

Розглянемо детальніше процес інтерполяції даних за точками. Спочатку використовується алгоритм dlib для визначення у просторі 68 ключових точок вхідного зображення. Подальший алгоритм містить процес інтерполяції даних за точками базової тривимірної моделі обличчя. Для цього використовується алгоритм тривимірного кригінгу. Вхідними координатами є визначені ключові точки вхідного зображення, а даними – відстані у просторі між ключовими точками вхідного зображення та базової моделі. Під час роботи кригінгу значення відстані для невідомих точок базової моделі обличчя інтерполюються на основі відомих значень найближчих точок. У результаті повертається масив зміщень для усіх точок базової тривимірної моделі. Додавши це зміщення до координат точок базової моделі, отримуємо нові координати, які після цього використовуються для побудови фінальної скоректованої тривимірної моделі обличчя. Ефективність такого методу модифікації геометрії для мобільних систем візуалізації була раніше підтверджена під час роботи з високонавантаженими сітками [11]. Це дає змогу мінімізувати артефакти в разі зміни форми об'єктів.

На рис. 4 показано процес інтерполяції даних за точками моделі обличчя. Червоним кольором показано ключові точки базової моделі, рожевим – визначені ключові точки алгоритмом dlib. Синім кольором позначено усі точки базової моделі, тоді як зеленим показано скоректовані значення.

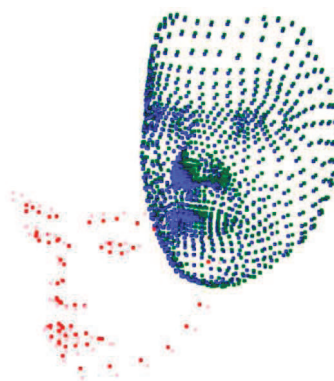


Рис. 4. Процес інтерполяції даних за точками обличчя методом кригінгу / The process of interpolating facial data using the kriging method

На рис. 5 показано повну послідовність процесу формування тривимірної моделі обличчя на основі фотографії. Першим кроком є визначення ключових точок у просторі для обличчя користувача. Наступним кроком є зіставлення ключових точок обличчя та базових ключових точок у просторі. Для цього обчислюється геометричний центр точок та проводиться додавання вектору

зміщення до матриці ключових точок. Далі для кожної точки та для кожної з трьох осей обчислюється різниця між координатами. Отримані вектори виступають в ролі даних у процесі інтерполяції методом кригінгу, водночас як вхідними вважаються координати ключових точок базової моделі. Після процесу інтерполяції отримуються три вектори зміщень для усіх точок базової моделі. Ці вектори додаються до точок базової моделі для отримання фінальних координат усіх точок.



Рис. 5. Блок-схема послідовності застосування алгоритмів / Flowchart of the sequence of algorithm application

Наступним кроком є процес побудови тривимірної поверхні на основі отриманих скоректованих точок. Для цього було використано алгоритм кульового обертання. Алгоритм кульового обертання ВРА (англ. *Ball Pivoting Algorithm*) призначений для побудови тривимірної поверхні на основі оброблення областей обличчя та кульових обертань точок. Алгоритм розглядає набір точок у просторі, представляючи поверхню об'єкта. Кожна точка вважається вершиною трикутника в мережі обличчя. Для кожної точки визначається сфера, яка охоплює всі точки у певному радіусі навколо даної точки. Ця сфера визначає область кульового обертання для точки. Алгоритм рухається по набору точок, шукаючи можливі трикутники між точками в області кульового обертання. Якщо можливий трикутник знаходиться, він додається до поверхні. Для визначення трикутника в області кульового обертання використовуються умови, такі як взаємне розташування точок та величина кутів між ними. Ці умови гарантують, що отримані трикутники добре апроксимують поверхню об'єкта. Процес кульового обертання повторюється для кожної точки в наборі. Поступово додаються нові трикутники, утворюючи поверхню об'єкта. Алгоритм може охоплювати удосконалення для поліпшення ефективності та здатність обробляти області зі складними деталями. Після завершення роботи алгоритму можна отримати тривимірну поверхню, яка візуалізує об'єкт на основі вихідних точок та їхніх областей кульового обертання.

На рис. 6 зображено один з прикладів практичної реалізації алгоритму LLE з використанням методу KNN у вигляді мобільного застосунку, який дає змогу отримати тривимірну модель на основі фотографії. Додаток використовує описаний у цій статті процес визначення ключових точок, інтерполяції даних за точками методом кригінгу та подальше перетворення їх у тривимірну модель з допомогою алгоритму кульового обертання.

Отже, розроблений алгоритмічний конвеєр успішно реалізований у вигляді спеціалізованого мобільного застосунку, наочно підтверджує можливість швидкого та якісного генерування 3D-моделей обличчя людини безпосередньо на портативних пристроях. Використання досконалих математичних методів просторової інтерполяції дало змогу досягти високої точності відтворення геометрії обличчя, обійшовши апаратні обмеження мобільних платформ, що відкриває широкі перспективи для практичного впровадження системи.

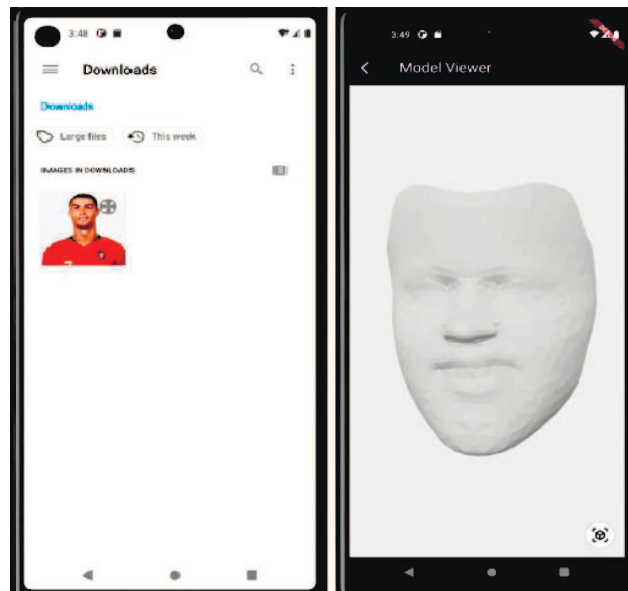


Рис. 6. Приклад практичної реалізації алгоритму / Example of practical implementation of the algorithm

**Обговорення результатів дослідження.** Унаслідок виконаної роботи було розроблено ефективний алгоритмічний конвеєр для автоматизованого синтезу 3D-моделей обличчя на основі 2D-зображень, який дає змогу уникнути використання ресурсомістких нейромереж завдяки поєднанню методів комп'ютерного зору зі статистичними алгоритмами просторової інтерполяції.

У дослідженні [2] автори здійснили ґрунтовний огляд сучасних методів 3D-реконструкції обличчя з одного зображення та довели, що перехід від двовимірних координат до тривимірного простору найефективніше реалізується саме через комбінацію виявлення маркерів і регресійних алгоритмів, що повністю підтверджує правильність нашого концептуального підходу.

У публікації [16] дослідники проаналізували комплексні архітектури (на прикладі 3D-CarriGAN) для автоматичного генерування просторових моделей безпосередньо з нормальних фотографій та з'ясували, що попереднє виділення ключових геометричних ознак (антропометричних точок) є критично потрібним кроком для точного деформування базової полігональної сітки.

У науковій праці [13] автори дослідили алгоритми зменшення розмірності простору і встановили, що методи, засновані на збереженні топології, такі як локальні лінійні відображення (LLE), демонструють найвищу стабільність за проєктування геометричних характеристик об'єктів порівняно з лінійними аналогами (наприклад, PCA).

У роботі [15] автори застосували метод звичайного кригінгу (англ. *Ordinary Kriging*) для оцінювання полів просторової деформації та довели, що цей геостатистичний спосіб інтерполяції значно перевершує класичні детерміновані методи, оскільки математично враховує просторову кореляцію між контрольними (відомими) та невідомими точками поверхні, що робить його ідеальним інструментом для нашого завдання зсуву вершин базової моделі обличчя. Використання цього математичного апарату в нашому дослідженні дало змогу з високою точністю обчислити вектори зміщення для кожної вершини базової моделі обличчя, забезпечивши плавні та анатомічно правильні переходи між скоректованими маркерами без різких геометричних артефактів.

У роботі [1] автори проаналізували ефективність класичного алгоритму кульового обертання (BPA) для реконструкції тривимірних зображень складних поверхонь із масивів хмар точок та підтвердили його лінійну швидкодію та здатність створювати неперервні трикутні полігональні сітки (англ. *Triangle Mesh*) з мінімальними вимогами до оперативної пам'яті пристрою.

У роботі [10] автори проаналізували можливості зміни властивостей поверхонь тривимірного аватара, що корелює з нашими висновками про необхідність подальшої інтеграції методів реалістичного відтворення матеріалів шкіри та освітлення.

Унаслідок обговорення результатів дослідження було підтверджено доцільність проведення саме вашого дослідження, позаяк в аналізованій літературі автори для 3D-генерування здебільшого зосереджуються на використанні ресурсомістких нейронних мереж генеративно-змагального типу GAN (англ. *Generative Adversarial Network*), тоді як ми досягли високої точності шляхом нестандартної інтеграції алгоритмів DLIB, LLE, тривимірного кригінгу та BPA. Це дає змогу створювати якісні цифрові двійники користувача на мобільних пристроях без залучення надлишкових обчислень, чого раніше не було реалізовано в подібному форматі.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – удосконалено метод автоматизованого синтезу тривимірної моделі обличчя людини, який, на відміну від наявних, поєднує алгоритм розпізнавання 68 ключових точок DLIB із методом просторової інтерполяції тривимірного кригінгу, що сукупно дає змогу здійснити точну корекцію базової полігональної сітки за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

*Практична значущість результатів дослідження* – можна використати для створення спеціалізованого мобільного застосунку, який автоматично генерує індивідуалізовані 3D-моделі на основі стандартних фотографій для подальшої інтеграції у середовища віртуальної реальності та системи цифрової анімації.

## Висновки / Conclusions

Розроблено систему, яка здатна автоматично аналізувати двовимірні фотографії користувача та створювати їхні тривимірні візуальні аналоги, придатні ідентифікувати ключові риси обличчя та деталі структури тіла людини без потреби втручання користувача, що забезпечило легкість використання мобільного застосунку та широкий спектр застосувань в різних галузях, таких як віртуальна реальність, анімація, медичне моделювання, ігри та багато інших. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано сучасні методи тривимірної реконструкції обличчя людини та з'ясовано, що основними обмеженнями для їх використання на мобільних пристроях є висока обчислювальна складність нейромережових підходів до розпізнавання зображення, яка унеможливає їх ефективне використання та роботу в режимі реального часу на портативних пристроях із обмеженою апаратною потужністю.
2. Застосовано алгоритм машинного навчання DLIB для ідентифікації 68 антропометричних маркерів, що забезпечило оптимальний баланс між точністю позиціонування рис обличчя та швидкістю оброблення даних.

3. Розроблено процедуру зниження розмірності простору ознак із використанням методу локальних лінійних відображень (LLE), що дало змогу зберегти локальну топологію вхідних даних за істотного зменшення обчислювальних витрат.
4. Встановлено, що адаптація математичного апарату тривимірного кригінгу дає змогу з високою точністю інтерполювати вектори зміщення вершин базової моделі, забезпечуючи плавну деформацію полігональної сітки під індивідуальні параметри користувача.
5. Наведено практичну реалізацію розробленого методу у вигляді мобільного застосунку, де побудову фінальної неперервної поверхні реалізовано за допомогою алгоритму кульового обертання (BPA), що дасть змогу автоматично генерувати якісні 3D-моделі без топологічних дефектів та візуальних артефактів безпосередньо на смартфоні.
6. Досліджено перспективи розвитку методу та введено концепцію інтеграції алгоритмів динамічної зміни властивостей поверхонь для створення повного циклу генерування реалістичних цифрових двійників, що дасть змогу безперешкодно інтегрувати отримані моделі у сучасні екосистеми віртуальної реальності, ігрові рушії та метавсесвіти.

## References

1. Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., & Taubin, G. (1999). The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4), 349–359. <https://doi.org/10.1109/2945.817351>
2. Diao, H., Jiang, X., Fan, Y., Li, M., & Wu, H. (2024). 3D Face Reconstruction Based on a Single Image: A Review, in *IEEE ACCESS*, vol. 12, 59450–59473. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3381975>
3. Ghogh, B., Ghodsi, A., Karray, F., & Crowley, M. (2020). Locally linear embedding and its variants: Tutorial and survey. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2011.10925>
4. Jabberi, M., Wali, A., Chaudhuri, B. B., & Alimi, A. M. (2023). 68 landmarks are efficient for 3D face alignment: what about more?: 3D face alignment method applied to face recognition. *Multi-media Tools and Applications*, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14770-x>
5. Jiang, D., Dong, Z., Li, X., et al. (2021). Sphere face model: A 3D morphable model with hypersphere manifold latent space. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.02238>
6. Kong, S. G., & Mbouna, R. O. (2015). Head pose estimation from a 2D face image using 3D face morphing with depth parameters. *IEEE Transactions on Image Processing*, 24(6), 1801–1808. <https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2405483>
7. McLean, G., & Wilson, A. (2019). Shopping in the digital world: Examining customer engagement through augmented reality mobile applications. *Computers in Human Behavior*, 101, 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.07.002>
8. Morales, A., Piella, G., & Sukno, F. M. (2021). Survey on 3D face reconstruction from uncalibrated images. *Computer Science Review*, 40, article ID 100400. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100400>
9. Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3), 313–332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
10. Ostrovka, D. V., & Tesliuk, V. M. (2023). Development of a method for changing surface properties of a three-dimensional user avatar. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(70), 38–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277933>
11. Ostrovka, D. V., & Tesliuk, V. M. (2023). Method for modifying the geometry of 3D surfaces in USDZ format with further implementation in the SceneKit game engine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(2), 52–56. <https://doi.org/10.36930/40330209>
12. Ostrovka, D. V., & Tesliuk, V. M. (2023). Synthesis model of a three-dimensional image of a user based on the SceneKit game

- engine and the USDZ format for iOS. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(1), 101–106. <https://doi.org/10.36930/40330112>
13. Roweis, S. T., & Saul, L. K. (2000). Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *Science*, 290(5500), 2323–2326. <https://doi.org/10.1126/science.290.5500.2323>
  14. Song, L., Su, S., Lin, J., Cai, G., & Sun, L. (2021). Deep 3D caricature face generation with identity and structure consistency. *Neurocomputing*, 454, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.05.014>
  15. Wang, C., & Zhang, Y. (2023). Ordinary Kriging interpolation method combined with FEM for arch dam deformation field estimation. *Mathematics*, 11(5), article ID 1106. <https://doi.org/10.3390/math11051106>
  16. Ye, Z., Xia, M., Sun, Y., Yi, R., Yu, M., Zhang, J., Lai, Y.-K., & Liu, Y.-J. (2023). 3D-CariGAN: An End-to-End Solution to 3D Caricature Generation From Normal Face Photos. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(4), 2203–2210. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2021.3126659>

**B.-Yu. V. Yatskiv, D. V. Ostrovka**

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## MODEL AND MEANS OF THREE-DIMENSIONAL USER IMAGE SYNTHESIS USING LINEAR REGRESSION

This study investigates the problem of automated synthesis of high-fidelity three-dimensional user images based on standard two-dimensional photographs. Consequently, the research addresses the loss of spatial information that occurs during flat image acquisition by utilizing advanced mathematical reconstruction tools. The authors develop and present an effective method for generating spatial structures that combines modern computer vision algorithms with sophisticated data interpolation approaches. Moreover, the analysis ascertains that error-free identification of anthropometric markers on the human face remains a critical necessity for model accuracy. To achieve this, the system utilizes the OpenCV library in conjunction with the DLIB machine learning algorithm for reliable face recognition and precise extraction of sixty-eight key landmarks. As a result, this 68-point approach provides a solid foundation for mapping facial features. To optimize further analysis, the proposed method conducts the transformation of multidimensional datasets into a linear form. Specifically, the system applies the Locally Linear Embedding (LLE) algorithm; consequently, it significantly reduces the dimensionality of the feature space while maintaining the local topological structure of the input data. Furthermore, the study proposes a new approach to correcting the base three-dimensional face model by integrating individual user parameters. The researchers employ three-dimensional kriging for this purpose; for example, this geostatistical approach accurately interpolates spatial distance values for unknown surface points and calculates an array of three-dimensional displacements for each mesh vertex. The final stage implements the Ball Pivoting Algorithm (BPA) to construct a continuous polygonal surface without topological defects. The benefits of this study include the creation of a specialized mobile application that encapsulates the entire algorithmic pipeline to generate ready-to-use 3D models automatically. Finally, the research establishes the high efficiency of using these generated objects in virtual reality environments, computer animation systems, and various digital modelling tasks.

**Keywords:** computer vision; face recognition; Kriging method; Locally Linear Embedding (LLE); virtual reality.