

ОГЛЯД МЕТОДІВ 3D-КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ДЕТАЛЕЙ

¹Вінницький національний технічний університет

Проведено огляд методів контролю геометричних розмірів деталей та суб'єктів, що дозволило оцінити недоліки методів, та вибрати найперспективніший метод для подальшого удосконалення. З розвитком технологій 3D-виробництва стало потрібне 3D-сканування об'єктів, зокрема медико-біологічних, які можуть бути передані в комп'ютерне середовище за короткий час за допомогою оптичних 3D-сканерів замість 3D-моделювання. 3D-сканування дозволяє оцифровувати 3D-об'єкти і передати їх в цифровий формат, а також визначити його геометричні розміри. В оцифрованій моделі можуть бути внесені виправлення, а за потреби до моделі можна додати й нові форми. Сучасні потужності оброблення зображень все частіше використовуються в багатьох сферах, таких як нові технології 3D-сканування як в промисловій, так і в медичній сфері. Не варто забувати і про те, що збір 3D-даних важливий і для інших застосувань. Так, вони необхідні в індустрії розваг для створення фільмів та відеоігор. Також ця технологія затребувана у промисловому дизайні, ортопедії та протезуванні, реверс-інжинірингу, розробці прототипів, а також для контролю якості, огляду та документуванню культурних артефактів. Розрахунок тривимірних моделей є досить трудомісткою обчислювальною задачею, оскільки потрібно враховувати такі властивості модельованого об'єкта, як координати, об'ємність тощо. Чим реалістичніша модель, тим більше обчислень необхідно для її формування. Тому зазвичай процес формування розбивають на менш затратні завдання. Наявні методи потребують складних перетворень, у разі складної геометрії сканованого об'єкта, тривалість сканування відомих методів і формування полігональної сітки мають низьку швидкість, що не завжди задовольняє поставленим задачам. Тому залишається актуальною задача розробки нових методів і засобів на їх основі, які б забезпечили високу швидкість 3D-сканування об'єктів.

Ключові слова: 3D-сканування, полігональна сітка, лазер, обробка зображення.

Вступ

3D-моделі містять дуже великі набори даних, отриманих в процесі сканування. Вони включають геометричні та зовнішні атрибути, які дають змогу генерувати складні полігональні сітки для представлення їх у віртуальному просторі. 3D-моделі можна створювати за допомогою інтерактивного програмного забезпечення (наприклад: 3D Max, Maya), але вони також створюють складнощі в дизайні та розробці програмного забезпечення. Створення та виготовлення 3D-моделей, що містять занадто багато деталей для практичного використання, насамперед залежить від роздільної здатності 3D-сканування, отриманого за допомогою спеціалізованих засобів і програмного забезпечення. Тому важливо виконувати аналіз, а в подальшому — розробку спеціалізованих систем 3D-сканування.

Метою роботи є аналіз існуючих методів 3D-сканування та безпосереднє моделювання об'єктів, висновки за результатами моделювання та ефективності використання цих методів [1].

Основна частина. Огляд методів

На сьогодні існують два методи отримання координат форми предмета.

Перший метод — це механічний контактний метод, де для предмета, закріпленого на столі, вимірюються координати вибраних точок та за допомогою щупів, і вони передаються в комп'ютер. За цим методом вимірювання формуються на великих поверхнях, нанесення на які може становити години або навіть дні, залежно від деталей об'єкта. Це необхідно для отримання певної заданої точності вимірювання, до прикладу, можна отримати рівень точності до 1 мкм. Рівень чутливості

залежить від типу використовуваного обладнання.

Другий підхід передбачає безконтактні методи сканування, які можуть бути поділені на три основні категорії: оптичні, акустичні та магнітні.

Системи оптичного сканування засновані на таких техніках, як: лазерне сканування, проекція променів на об'єкт і фотограмметрія. Ці системи успішно застосовуються для 3D-вимірювань і віртуальної реконструкції поверхонь об'єктів графіки у багатьох областях.

Системи проекційного сканування зазвичай працюють з білим кольором структурованого світла, де світловий візерунок проектується на об'єкт, а одна або дві камери фіксують відображене світло, тоді як системи лазерного сканування можуть отримувати дані шляхом надсилання лазерного світла на об'єкт та подальшої коректної обробки отриманих даних.

Переваги цих сканерів в тому, що вони портативніші в порівнянні з контактними системами. Системи оптичного сканування, такі як лазерна або проекційна, можуть отримати велику кількість точкових даних за короткий проміжок часу і точність лазерних систем зазвичай варіюється від 1 мкм до 20 мкм, тоді як профілометричні системи мають діапазон від 10 мкм до 60 мкм.

Оскільки точність безконтактних систем постійно вдосконалюється, то наразі вони застосовуються у промисловості. Оптична технологія зазвичай є кращим методом, оскільки це дає змогу більш гнучко оцифровувати поверхні, забезпечує вищу роздільну здатність і точність порівняно з механічною технологією і має значну швидкодію вимірювання. Перевага контактних пристроїв полягає в тому, що вони не залежать від кольору і мають гарні відбиваючі характеристики світла.

Розрахунок одного з головних показників — кроку сканування, який обчислюється за такою формулою:

$$S = \frac{r \cdot m}{t \cdot p}, \quad (1)$$

де r — роздільна здатність двигуна; m — дроблення кроку двигуна; t — кількість зубців шківу; p — крок зубців.

Підставляємо значення у формулу та отримуємо: $S = 200 \cdot 32/20 \cdot 2 = 160$ кроків/мм. Ці дані дають нам розуміння ефективності в роботі 3D-принтера та повне розуміння того, який з методів має більшу швидкодію.

Одним із прикладів такого 3D-сканера є Mephisto Ex-PRO — оптичний сканер. Mephisto Extreme — це вже 3D-оптичний сканер, що забезпечує високу швидкість, точність та високу якість. 3D-сканування з мінімальним часом оброблення та взаємодією з користувачем може використовуватися для різноманітних завдань для сканування великих динамічних, а також статичних об'єктів. Система має глибоке сканування, режим вертушки, HDTV, машинний зір (1920×1080 точок) з високою роздільною здатністю, якісний датчик CCD Kodak, високоякісний об'єктив Nikon, висококонтрастний проектор з високою роздільною здатністю.

Mephisto Extreme дає результати, сумісні з будь-яким найточнішим сканером, даючи при цьому доступні і надзвичайно гнучкі рішення. 3D-сканування використовує проектори типу DLP для бінарного та бахромного візерунка в проекціях. Проектори DLP мають багато переваг, коли порівняно з іншими проекційними технологіями забезпечують відмінності для структурованих систем освітлення. Технологію DLP засновано на мікродзеркальному пристрої, де кожен піксель є крихітним дзеркалом, який можна вмикати і вимикати або відбивати світло.

Негативно на точність роботи сканерів впливає дослідження краю об'єкта. Лазерний імпульс посилюється один, а відбивається з двох місць. Координати розраховуються, з позиції самого сканера, де береться середнє значення двох відбитків променя з лазера. Це призводить до того, що точка буде визначена у неправильному місці. За використання сканерів з високою роздільною здатністю шанси на те, що лазерний промінь потрапить точно на край об'єкта зростають, але при цьому за краєм об'єкта з'явиться шум, що негативно позначиться на результатах сканування. Сканери з невеликим променем можуть вирішити проблему сканування краю, але мають обмежений діапазон дії, тому ширина променя може перевищити відстань. Існує також спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє сканеру сприймати лише перше відображення променя, ігноруючи при цьому друге [3]. Тому DLP-проектори є цифровими пристроями, які дуже швидкі в роботі, забезпечують високу яскравість та високу контрастність зображення. Це важливі фактори для структурованого світла в 3D-скануванні.

Яскравість і контрастність — два основні фактори, що впливають на якість та надійність сканування.

Як прольотні, так і тріангуляційні сканери мають свої сильні і слабкі сторони, що визначає їх

вибір для кожної конкретної ситуації. Перевага прольотних пристроїв в тому, що вони оптимально підходять для роботи на дуже великих відстанях, аж до декількох кілометрів [8]. Вони ідеальні для сканування будівель чи географічних об'єктів [9]. У той самий час, до недоліків можна віднести точність вимірювання. Адже швидкість світла досить висока, тому в підрахунок часу, який потрібний променю, щоб подолати відстань до та від об'єкта, можливі деякі погрішності (до 1 мм), що робить результати сканування приблизними.

Що ж до триангуляційних далекомірів, то у них ситуація з точністю до навпаки. Діапазон їхньої дії становить лише кілька метрів, а ось точність відносно висока. Такі пристрої можуть вимірювати відстань з точністю до десятків мікрометрів [12].

Більшість сучасних DLP-проекторів здатні виробляти 2000...3000 Люмен ANSI із коефіцієнтом контрастності 2000:1. Мефісто — Система Extreme сумісна з Infocus, Acer, Benq і іншими мультимедійними проекторами з широкоформатним екраном 1280×768. Всі компоненти синхронізовані і з'єднані між собою простим кабелем і мають програмне забезпечення. Складання та підключення системи не вимагає особливих навичок або інструментів і становить менше п'яти хвилин. Індивідуальні компоненти легкі та компактні, тобто зручні для упакування та розпакування в подорожах та скануванні поза межами лабораторії.

Таким чином, Mephisto Extreme є дійсно мобільним рішенням і може використовуватися в самих екстремальних умовах і місцях. Механізм 3D-сканування Mephisto базується на трьох компонентних ядрах — калібрування, обробка та інтерфейс Ю. Калібрування є дуже простим, але потужним рішенням, де для геометричної системи воно виконується за допомогою плоскої калібрувальної дошки з шашечкою.

П'ять—шість пострілів з різних кутів орієнтовані для калібрувальної плати обчислювальної системи та виконують надійне калібрування, що буде використовувати пакетне налаштування для оптимізації рішень по досягненню якомога точніших результатів. Використання робочого процесу системи Mephisto Extreme є проектом на основі «Майстра проекту», щоби допомогти користувачеві виконати сканування, вибираємо камери, які будуть використовуватися для сканування з високою роздільною здатністю, перевірки проекційних екранів та інших властивостей.

Після створення проекту та калібрування системи можна виконати зберігання і повторно завантажити систему відповідно до вимог. Це дає змогу зберігати відскановані дані, зображення та іншу інформацію в організованому порядку. Навіть коли користувач сканує найскладніший об'єкт із сотень різноманітних, то Mephisto організує дані всередині.

Визначаються габаритні розміри по границі зображення на опорній площині як і периметри перетинів по фотографії, а також висоти перетинів за формулою

$$H_{ij} = H_0 \left(1 - \frac{L_{ij}}{L_{i0}} \right), \quad (2)$$

i — номер променя; j — номер перетину; H_0 — висота джерела над опорною площиною; L_{i0} — відстань від сліду на опорній площині до проекції джерела на опорну площину; L_{ij} — відстань від j -го перетину до проекції джерела на опорну площину.

Безконтактні 3D-сканери, як зрозуміло з назви, під час їх використання не можуть здійснювати фізичний контакт з поверхнею об'єкта. Натомість безконтактні 3D-сканери покладаються на деякі активні або пасивні методи сканування об'єкта. Кінцевим результатом є високоточна хмара точок, яку можна використовувати для зворотного проектування, віртуального створення прототипів, інженерного аналізу, перевірки функцій поверхні або швидкого створення прототипів [7].

Пасивна безконтактна 3D-техніка не опромінює об'єкт енергією. Натомість пасивні 3D-сканери використовують відбите навколишнє випромінювання. Більшість сканерів цього типу розпізнають видиме світло, оскільки воно легкодоступне.

Пасивні сканери самі по собі не дають жодного випромінювання, а натомість використовують виявлене відбите зовнішнє випромінювання. Більшість сканерів цього типу виявляють видиме світло, оскільки воно є легкодоступним навколишнім випромінюванням. Можна також використовувати інші види випромінювання, наприклад, інфрачервоне випромінювання. Пасивні методи можуть бути дуже дешевими, оскільки в більшості випадків вони потребують не спеціального обладнання, а простих цифрових камер. Поширені пасивні безконтактні 3D-сканери включають стереоскопічні відеосканери, фотометричні сканери, сканери Silhouette і сканери моделювання зображень. Приклади безконтактних пасивних сканерів подані в роботі [8].

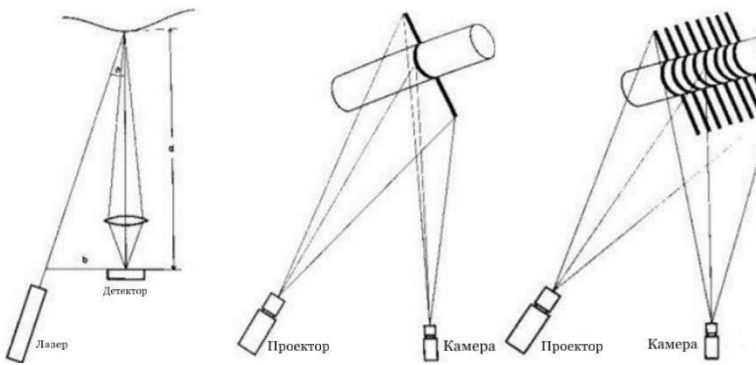


Рис. 1. Сканування об'єктів

Стереоскопічні системи зазвичай використовують дві відеокамери, які розміщені на певній відстані одна відносно одної і спрямовані на той самий об'єкт (рис. 1). Аналізуючи незначні відмінності між зображеннями, які бачить кожна камера, визначається відстань у кожній точці зображення. Цей метод базується на тих же принципах, які керують людським стереоскопічним баченням. Фотометричні системи зазвичай використовують одну камеру, але кілька

знімків виконуються за різних умов освітлення.

Варто врахувати і той факт, що під час сканування в одному положенні протягом тривалого часу невелике зміщення сканера може статися через зміну температури. Якщо сканер встановлений на штативі і одна із сторін сканера знаходиться під впливом сильного впливу сонячних променів, то в такому випадку зображення буде видозмінюватись, а дані сканування поступово спотворюватимуться. Разом з тим, деякі лазерні сканери мають вбудовані компенсатори, які протидіють будь-якому зміщенню сканера під час роботи [13].

Силуетні прийоми. Вони використовують контури, створені з послідовності фотографій — навколо тривимірного об'єкта на контрастному фоні. Ці силуети видавлюються і перетинаються, щоб утворити візуальне наближення корпусу об'єкта. За допомогою цих підходів неможливо виявити деякі увігнутості об'єкта (наприклад, внутрішня частина чаші).

Безконтактні 3D-сканери

Як випливає з назви, безконтактним 3D-сканерам не потрібен фізичний контакт для дослідження об'єкта. Зазвичай ці сканери кріпляться на підставці. Активні або пасивні методи використовуються ними для створення точної хмари точок. Хмара точок потім використовується в інженерному аналізі, швидкому створенні прототипів, віртуальній збірці та інших галузях [3]. Різними типами пасивних безконтактних 3D-сканерів є силуетні сканери, стереоскопічні відеосканери та фотометричні сканери. Ці пристрої є найекономічнішими з усіх сканерів. Навколишнє випромінювання біля об'єкта, використовується ними для визначення його форми [4]. Сканування здійснюються за допомогою вже наявного джерела світла, а не випромінювання. Що таке 3D-сканування? 3D-сканування — це процес передачі продуктів без комп'ютерних даних у комп'ютерне середовище.

Сучасна технологія виробництва здійснюється за допомогою комп'ютерної автоматизації методів виготовлення. З цієї причини вироби поки проектуються в комп'ютерному середовищі на стадії проектування, аналізу, віртуальної реальності, моделювання, проектування прес-форм, тощо. З ними використовуються комп'ютерні програми. Необхідним є створення даних 3D CAD продукту. Системи оцифрування в основному використовуються у виробничому секторі для створення даних CAD деталей без 3D-даних або для контролю якості

Під час 3D-сканування об'єкт сканується в двох вимірах за допомогою однієї або кількох камер. Після цього цей об'єкт переноситься в 3D-систему координат [5]. За допомогою комп'ютера можна вимірювати орієнтири об'єкта або поверхні та форми у вигляді хмари точок. Оптична метрологія відрізняється від активних і пасивних методів [6].

Зі швидкістю роботи в 10000 точок за секунду сканери з низькою роздільною здатністю впорядуються із завданням протягом декількох секунд. А ось для сканерів з високою роздільною здатністю потрібно зробити кілька мільйонів операцій, на що підуть хвилини. Варто врахувати, що дані можуть спотворитися, якщо об'єкт або сканер рухатимуться. Так, кожна точка фіксується у певний момент часу у певному місці. Якщо об'єкт або сканер переміститься в просторі, результати сканування будуть помилковими. Тому так важливо встановлювати і об'єкт, і сканер на фіксованій платформі, і звести можливість вібрації до мінімуму. Отже, сканування об'єктів у русі практично неможливе. Проте, останнім часом проводяться активні дослідження того, як можна компенсувати вплив вібрації на спотворення даних [7].

Активні методи: оптична триангуляція (1D); техніка світлового розрізу (2D); проекція точок на

3D-об'єкт (3D) (рис. 2). Оптична триангуляція — це вид сканування, де лазер та оптичний детектор розташовані у трикутній структурі, так, що відстань до точки, де промінь лазера випадає — визначається детектором, трикутною фокусною точкою [8]. Техніка світлого зрізу є покращеною версією оптичного трикутника [9]. У цій техніці за допомогою оптичного детектора в площині тривимірного профіля отримують лінію на об'єктах. Техніка проєкції бахромою (бахромна проєкція): [7]. Техніка проєкції бахроми є вдосконаленою версією техніки вилучення світла. У цьому методі тривимірну інформацію про поверхню отримують кількома світловими ділянками, іншими словами, візерунки чорно-білих смужок зводяться до поверхні об'єкта і передаються в комп'ютерне середовище за допомогою однієї або кількох камер високої роздільної здатності [10].

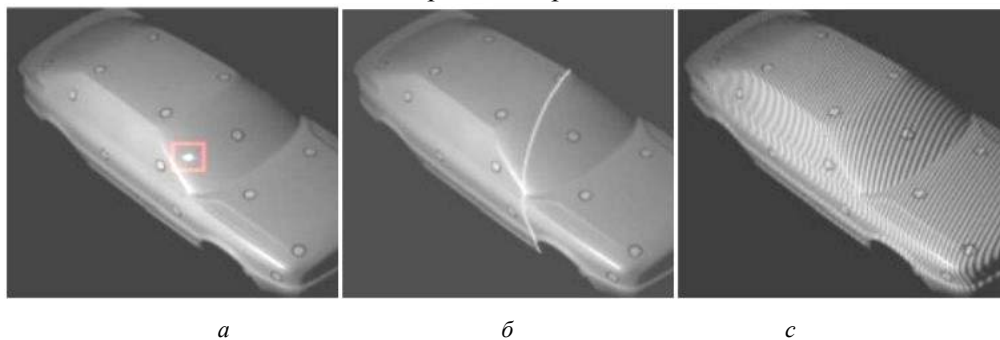


Рис. 2: *a* — оптична триангуляція; *b* — техніка світлого зрізу; *c* — техніка проєкції бахромою

Метод оптичної триангуляції зі змінною вимірювальною базою. За основу береться відомий метод оптичної триангуляції (метод трикутника) з постійною вимірювальною базою, рис. 3.

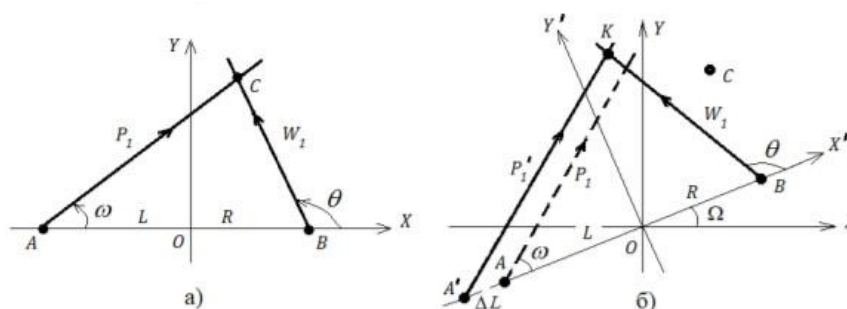


Рис. 3. Схеми вимірювань координат поверхні *a* — методом оптичної триангуляції; *b* — методом оптичної триангуляції зі змінною вимірювальною базою

Метод візуалізація поверхні

За допомогою методів обробки поверхні спочатку моделюються поверхні структур або органів. Для цього потрібен етап сегментації та класифікації, на якому класифікується кожен воксель відповідно до структури, до якої він належить. На етапі класифікації здійснюється пошук вокселів, які лежать на ребрах відповідного полігону. Після того, як структури класифіковані, та визначені їхні межі, ці межі можуть бути представлені каркасом або трикутником. На цьому етапі потрібно з'єднати трикутники (або плитки), щоб сформувати поверхню, це можна зробити за допомогою триангуляції Делоне. Наприклад, на рис. 4 плитка C2 буде вибрана замість C1 тому, що вона має меншу площу [12].

Перевага поверхневої візуалізації полягає в тому, що вона зазвичай має високу швидкість, оскільки на ній знаходяться лише точки поверхні, потрібні для перерахування, а не для кожного вокселя, А для випадку використання об'ємної візуалізації, поверхню на основі контуру дескриптора можна безпосередньо використовувати з середовищем 3D моделювання (САМ) для керування фрезеруванням машини, де створюються точні моделі попередніх конструкцій [13].

Цей метод візуалізації поверхні має кілька недоліків. Якість сканування поверхні залежить від поверхневих властивостей сканованого об'єкта, і для отримання чітких контурів глянцевої поверхні зазвичай не підходять. Ще одним недоліком є те, що за її використання можуть виникати помилки вибірки та накладання через дискретну природу розміщення трикутної сітки [14].

Стереометрія: на поверхню об'єкта, що вимірюється, не потрапляє світла смуга. Натомість 3D-поверхня об'єкта отримується шляхом розрахунку та накладенням зображень з двох камер [6].

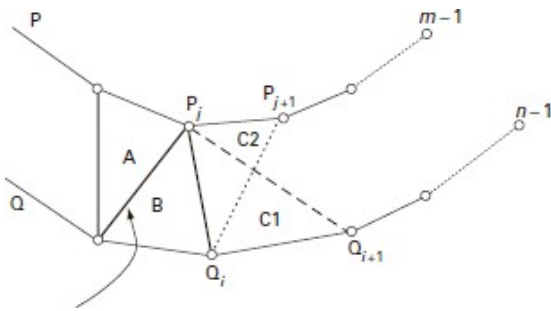


Рис. 4. Розкладка паралельних контурів

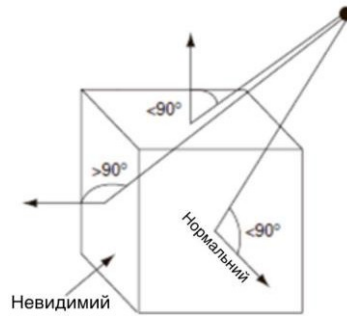


Рис. 5. Вибір задньої грані: якщо векторний добуток вектора та нормалі додатний, то багатокутник є видимий; інакше його не видно

Згідно з цим методом, для координатних вимірювань поверхні створюють два вузьких світлових пучки P1, W1, що виходять під кутами ω, θ з кінців деякої вимірювальної бази $AB = R + L$ і перетинаються в контрольованій точці поверхні дзеркала, наприклад, в точці C [15]. Для аналізу методу скористаємося його двомірним варіантом, коли точки A, B, C лежать в одній площині XOY. Нескладно довести, що координатам точки C відповідають вирази

$$x = \frac{R + L \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{cth} \theta}{1 - \operatorname{tg} \omega \cdot \operatorname{cth} \theta}; \quad y = \frac{R + L}{\operatorname{ctg} \omega \cdot \operatorname{cth} \theta}. \quad (3)$$

Як результат — похибки вимірювання кутів ω, θ та похибки обчислення координат — $\Delta x, \Delta y$. Для їхньої оцінки використовують відповідні диференціали. У такому разі, граничні значення похибок $\Delta x, \Delta y$ задовольняють нерівностям

$$|\nabla x| \leq \left| \frac{\partial x}{\partial \omega} \right| \cdot \nabla \omega + \left| \frac{\partial x}{\partial \theta} \right| \cdot \nabla \theta; \quad |\nabla y| \leq \left| \frac{\partial y}{\partial \omega} \right| \cdot \nabla \omega + \left| \frac{\partial y}{\partial \theta} \right| \cdot \nabla \theta, \quad (4)$$

де $\nabla \omega, \nabla \theta$ — гранично допустимі похибки експериментального обладнання у визначенні кутів ω, θ [16].

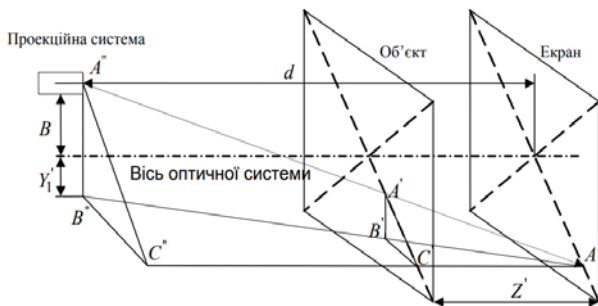


Рис. 6. Проходження променів у проекційній системі
Якщо вважати, що параметри оптичної системи камери відомі, то головним завданням є точне визначення координат виділених ліній і вузлових точок. Розглянемо проходження променів у деякій оптичній системі, показаний на рис. 6.

Проекційна система знаходиться на відстані d від площини екрану й на відстані B від оптичної осі пристрою, що реєструє. Проекційна система створює на екрані точку A, що має координати X'_1, Y'_1 . При внесенні в систему об'єкта на відстані Z' від екрана, точка A з координатами X'_1, Y'_1 трансформується в точку A' з координатами X'_2, Y'_2 . Залежно від того, на якій відстані знаходиться об'єкт, світлова точка на пристрої реєстрації буде змінювати своє розташування. Враховуючи координати точок A, A', відстань d та геометрію проходження променів у оптичній системі, отримаємо вираз для визначення координати глибини Z'

$$Z' = d \sqrt{\frac{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{x_1'^2 (y_1'^2 - B)^2}}. \quad (5)$$

Оскільки зображення на пристрої реєстрації отримується в зменшеному вигляді, то для визна-

чення реальних значень координат необхідно врахувати коефіцієнти збільшення оптичної системи для положення реєстрації точок A і A' , які з урахуванням дисторсії відповідають k і k_1 .

У такому випадку вираз (5) можна записати у вигляді

$$Z' = d \sqrt{\frac{(x_1'k - x_2'k_1)^2 + (y_1'' - y_2'')^2}{(x_1'k)^2 + (y_1'' - B)^2}}. \quad (6)$$

Вираз (6) є рівнянням перетворення 2D координат в координату глибини. Статична характеристика функції перетворення за заданих значень $x_1' = 0$, $y_1' = 0$, $d = 1,8$ м, $B = 0,9$ м, $k = 30 \cdot 10^{-5}$, $k_1 = 40 \cdot 10^{-5}$ показана на рис. 7а.

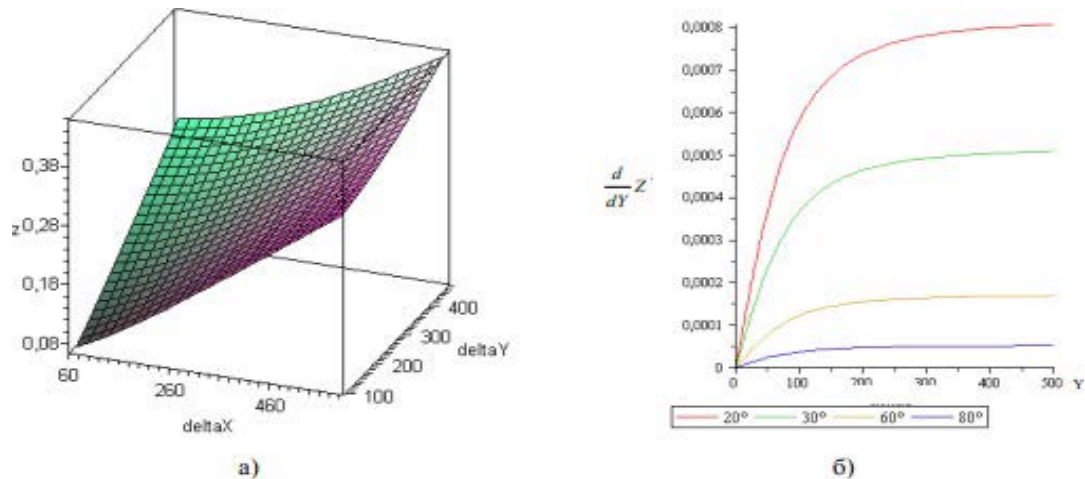


Рис. 7. Графічні характеристики функції перетворення: а — статична характеристика; б — чутливість за різних значень кута α

Для оцінки чутливості математичної моделі перетворимо вираз (6)

$$\frac{dZ'}{dY} = \frac{Yk^2}{\sqrt{\frac{X^2k + Y^2k^2}{\frac{X_1'^2}{d^2} + \text{tg}^2(\alpha)} \left(\frac{X_1'^2k^2}{d^2} + \text{tg}^2(\alpha) \right)}}, \quad (7)$$

де X , Y — різниця координат точок по горизонталі і вертикалі, α — кут між оптичною віссю камери та напрямком падіння променя пристрою проектування. Графічне зображення чутливості за різних значень кута α подано на рис. 7б, аналізуючи який можна зробити висновок, що вища чутливість забезпечується за менших значень кута α . Під час вибору оптимального значення кута α слід також враховувати кут розходження променів пристрою проектування [17].

Цей метод може бути застосований для відновлення тривимірного рельєфу різних об'єктів, зокрема медико-біологічних. На рис. 8 показано зображення патернів (горизонтальних і вертикальних масок), що проектується на об'єкт, в цьому випадку на спину людини, і дає результати попереднього оброблення отриманих зображень.

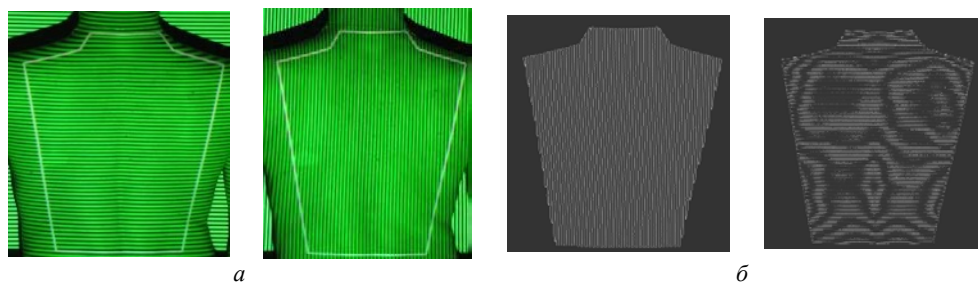


Рис. 8. Зображення патернів, що проектується на спину: а) початкове зображення; б) зображення після попередньої обробки

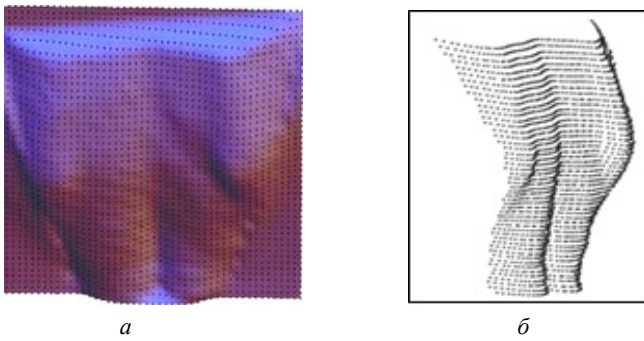


Рис. 9. Результати відновлення рельєфу поверхні
спини людини

На рис. 9а показано реконструкцію рельєфу спини людини після попередньої обробки. Шляхом ідентифікації вузлових точок в 3D-просторі, можна отримати профільний переріз для будь-якої точки досліджуваного об'єкта (рис. 4б).

Перевагою такого підходу є можливість виконати реконструкцію 3D-об'єктів з високою точністю.

Висновки

В роботі проаналізовані сучасні методи 3D-реконструкції об'єктів різної природи, які можуть бути використані для контролю їхніх геометричних розмірів. Наведено математичний апарат, що дає змогу виконати високоточну корекцію для побудови проєкційних моделей. Збір даних для створення текстурної карти в 3D-просторі, відбувається як з одною, так і з двома камерами. При цьому можуть бути використані і додаткові проєкційні засоби для формування патернів з різним кутом нахилу.

Для зростаючих потреб промисловості продовжується пошук найкращих рішень 3D-сканування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. А. Соїфер, *Методи комп'ютерної обробки зображень*. М., РФ: ФИЗМАТЛИТ, 2003, 784 с.
- [2] А. Ронкат, Ю. Дублянський, Ч. Шпетл, і П. Дорнінгер, «3D зйомка печери : приклад із Märchenhöhle (Австрія)», з Marschallinger R. & Zobl Ф., *Математичні науки про Землю на стику теорії та практики*, в *Матеріали конференції IAMG2011*, 5-9 вересня, Зальцбург, Австрія, 2011, с. 1393-1403.
- [3] Р. Тоблер, і С. Майерхофер, «Сітчаста структура даних для візуалізації та підрозділ», в Дж. Хорхе, В. Скала, Ред., *14-та Міжнародна конференція у Центральній Європі з комп'ютерної графіки, візуалізації та комп'ютерного зору (WSCG'2006) Short Communication Papers Proceedings*, 2011, с. 157-162.
- [4] Б. Пуччі, і А. Марамбіо, «Печера Олердоли, Каталонія: віртуальна реальність реконструкція з наземного лазерного сканера та даних ГІС», *3D віртуальній реконструкція та візуалізація складних архітектур, Труды ім ISPRS International Workshop 3D-ARCH*, 2009.
- [5] П. Чиньоні, М. Кальєрі, М. Корсіні, М. Деллепіане, Ф. Гановеллі, і Дж. Ранцуля, «Meshlab: інструмент обробки сітки з відкритим кодом», В. Скарано, Р. Де К'яра і У. Ерра, Ред. *Італійська секційна конференція Eurographics*, 2008, с. 129-136.
- [6] Б. Радю, Р. Казинс, і С. Казинс, «3D тут: бібліотека хмар точок (PCL)», на *Міжнародна конференція IEEE з робототехніки та автоматизації (ICRA)*, Шанхай, Китай, 2011.
- [7] Р. Альварес, Ж.-В. Ногера, Л. Торгоса, і А. Самора, «Оптимізація сітки алгоритм на основі нейронних мереж», *Інформаційні науки, міжнар журнал*, т. 177, вип. 23, грудень 2007 року.
- [8] Р. Чжан, «Згортання краю покращило тривимірну модель на основі моделі Алгоритм стиснення даних моделі поверхні», *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.jocpr.com.
- [9] Т. Ма, Г. Гонг, і Дж. Ян, «Алгоритм спрощення 3D-моделі на основі edge-collapse», на *Міжнародна конференція IEEE з промислової інформатики (INDIH)*, 2012.
- [10] Д. Атталі, А. Л'єтє, і Д. Салінас, «Колапсуючі комплекси рипсів», на *29-е Європейський семінар з обчислювальної геометрії (EuroCG)*, 2013.
- [11] Д. Шодек, М. Бехтольд, К. Гріггс, К. М. Као, і М. Стейнберг, *Застосування CAD/CAM в архітектурі та дизайні*. John Wiley & Sons, Inc; Нью-Йорк, 2005. Цифровий дизайн і виробництво.
- [12] А. А. Бернгард, «Огляд найсучаснішої зворотної інженерії», на *Матеріали конференції TCT*, Ноттінгем, Великобританія, жовт. 1999, с. 177-188.
- [13] Т. Вараді, Р. Мартін, і Дж. Кокст, «Зворотне проєктування геометричних моделей – вступ», *Дез. об.* 29, с. 255-268, 1997.
- [14] J. Peire, and H. J. Przybilla, «Модельювання Золотої Мадонни», *Cira 2005, XX Міжнародний симпозіум*, Турін, Італія. 26 вересня – 1 жовтня 2005 р.
- [15] S. Seokbae, P. Hyunpung, and H. L. Kwan, "Implementation of 3D Optical Scanning Technology for Automotive Applications," *Int. J. Mach.*, с. 889-897, 2002.
- [16] G. Tognola, M. Parazzinia, C. Sveltob, P. Ravazzania, and F. Grandoria, "An Effective Approach to the Use of 3D Scanning Technology which Shortens the Development Time of 3D Models," *Image Vision Computing*, с. 295-305, 2003.
- [17] S. V. Kozlov, V. V. Vyun, and G. B. Aleksin, [Electronic resource]. Available: https://repo.dma.dp.ua/4073/1/sme_2018_1_78-81.pdf.
- [18] Й. Й. Білинський, і С. В. Юкиш, «Апаратно-програмна реконструкція тривимірного рельєфу поверхні спини

людини.» *Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. Наукові праці ВНТУ*, 2010, № 1. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/194>.

Рекомендована кафедрою загальної фізики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.04.2022

Білинський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор кафедри загальної фізики, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Животівський Степан Михайлович — студент факультету електроенергетики та електромеханіки, e-mail: zhivotivskyi.s@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskiy¹
S. M. Zhivotivskiy¹

Overview of 3D Geometric Control Methods Dimensions of Details

¹Vinnitsya National Technical University

A review of methods for controlling the geometric dimensions of parts and subjects, which allowed to assess the shortcomings of the methods, and select the most promising method for further improvement. With the development of 3D production technology, 3D scanning of objects has become necessary, including medical and biological ones, which can be transferred to a computer environment in a short time using optical 3D scanners instead of 3D modeling. 3D scanning allows you to digitize 3D objects and transfer them to digital format, as well as determine its geometric dimensions. Corrections can be made to the digitized model, and new forms can be added to the model as needed. Modern image processing facilities are increasingly used in many areas, such as new 3D scanning technologies in both industrial and medical fields. Do not forget that the collection of 3D data is important for other applications. Yes, they are needed in the entertainment industry to make movies and video games. This technology is also in demand in industrial design, orthopedics and prosthetics, reverse engineering, prototyping, as well as for quality control, inspection and documentation of cultural artifacts. To sync and connect with a simple cable and have software. Assembling and connecting the necessary skills or tools, however, takes less than five minutes to build a model. Individual components are light and compact, making them convenient to pack and unpack when traveling and scanning outside the lab. Production technology is carried out using computer automation of manufacturing methods. For this reason, the products are still designed in a computer environment at the stage of design, analysis, virtual reality, modeling, mold design and more. They use computer programs. It is necessary to create 3D CAD data of the product. Digitization systems are mainly used in the manufacturing sector to create CAD parts data without 3D data or for quality control, which is why the methods require more detailed consideration.

Keywords: 3D scanning, polygonal grid, laser, image processing.

Bilynskiy Yosyp Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of General Physics, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;
Zhyvotivskiy Stepan M. — Student of the Department of Power Engineering and Electromechanics, e-mail: zhivotivskyi.s@gmail.com