

УДК 681.7: 616-71

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, С.М. ЖИВОТІВСЬКИЙ

ОГЛЯД ПРОМИСЛОВИХ БЕЗКОНТАКТНИХ 3D-СКАНЕРІВ ДЛЯ БІОМЕДИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця, Україна, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com; zhyvotivskyi.s@gmail.com

Анотація. В статті проведено огляд ключових засобів створення 3D моделей об'єктів і контролю їх геометричних параметрів шляхом використання 3D сканерів. Проведено на основі використанням найперспективніший 3D сканерів порівняльний аналіз.

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

Abstract. The article reviews the key means of creating 3D models of objects and controlling their geometric parameters by using 3D scanners. A comparative analysis was conducted based on the use of the most promising 3D scanners.

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

DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-82-92

ВСТУП

3D-сканування є одним із способів побудови 3D-моделі та визначення геометричних параметрів об'єктів, що досліджуються. За допомогою 3D-сканера можна швидко і якісно відтворити максимально точно відтворити 3D-моделі об'єкта. 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.

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 обробки зображень все частіше використовуються в багатьох сферах, таких як нові технології 3D-сканування як в промисловій, так і в медичній сфері. Розрахунок тривимірних моделей представляє досить трудомістку обчислювальну задачу, оскільки потрібно враховувати такі властивості модельованого об'єкта, як координати, об'ємність і інші. Чим реалістичніша модель, тим більше обчислень необхідно для її формування. Тому зазвичай процес формування розбивають на менш затратні завдання. Наявні методи потребують складних перетворень, при складній 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 [2, 3].

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Існують контактні та безконтактні 3D-сканери. Для сканування контактними пристроєм потрібно перебувати в безпосередньому контакті з об'єктом сканування;

Безконтактному 3D-сканеру необхідно контактувати з об'єктом, що дозволяє проводити 3D-сканування для важкодоступних об'єктів, пам'яток культури та архітектури, а також ювелірних виробів. Вже навіть існує промисловий 3D-сканер, який сканує будинки, насипи й інші великі об'єкти.

Метою роботи є аналіз існуючих засобів 3D-сканування об'єктів, що дає змогу виконати вибір методу та засобу сканування під конкретно поставлені задачі.

1. МЕТОДИ СКАНУВАННЯ 3D ОБ'ЄКТІВ

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

На сьогодні існують дві великі групи безконтактних сканерів – активні та пасивні. Активні безконтактні 3D-сканери (для вивчення об'єкту використовують структурований світловий або лазерний промінь, який, потрапляючи на об'єкт, відбивається і на основі цього відображення 3D-сканер будує 3D-модель). Пасивні безконтактні 3D-сканери (даний вид використовує вже існуюче відбиття від об'єкта, в основному – сонячне світло).

Системи проєкційного сканування зазвичай працюють з білим кольором структурованого світла, де світловий візерунок проєктується 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 є портативними в порівнянні з контактними системами. Системи оптичного сканування, такі як лазерна або проєкційна, 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 — крок сканування, який обчислюється як:

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

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.

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 проєктування, віртуально-го створення прототипів, інженерного аналізу, перевірки якості 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 для цього не потрібний додатковий випромінювач, що значно зменшує складність і вартість приладу.

Пасивні сканери самі по собі не дають жодного випромінювання, а натомість, як було сказано вище, 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

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

методи можуть бути дуже дешевими, оскільки в більшості випадків вони не потребують спеціального обладнання, а потребують лише простих цифрових камер.

Поширені пасивні безконтактні 3D-сканери - це стереоскопічні відеосканери, фотометричні сканери, сканери силуетів і сканери моделювання зображень [1].

Стереоскопічні системи зазвичай використовують дві відеокамери, дещо розставлені між собою, які дивляться на той самий об'єкт (рис. 1). Аналізуючи незначні відмінності між зображеннями, які бачить кожна камера, визначається відстань у кожній точці зображення. Цей метод заснований на тих же принципах, які керують людським стереоскопічним баченням. Фотометричні системи зазвичай використовують одну камеру, але кілька знімків виконують-ся за різних умов освітлення.

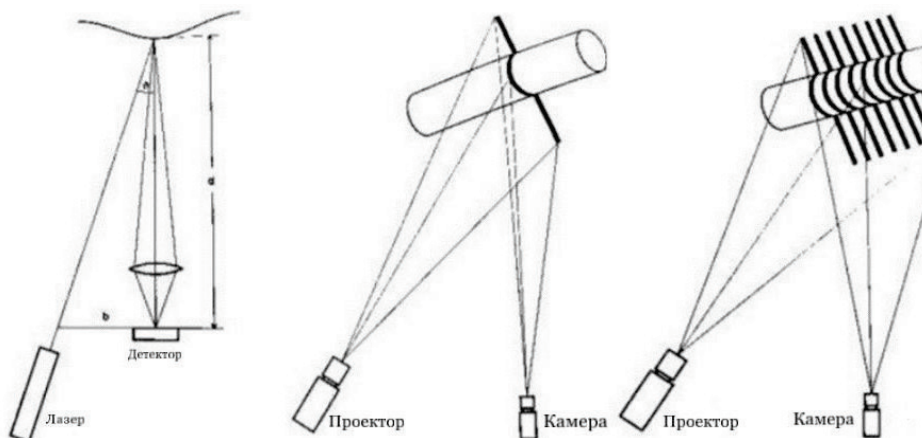


Рисунок 1 – Сканування об'єктів

Варто врахувати і той факт, що під час сканування в одному положенні протягом тривалого часу невелике зсунення сканера може статися через зміну температури. Якщо сканер встановлений на штативі і одна зі 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 руху 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 не-можливо виявити деякі увігнутості об'єкта (наприклад, внутрішня частина чаші).

Слід відмітити що даний тип сканерів, які використовують пасивну технологію сканування, майже не використовуються. Активні сканери мають суттєву перевагу в точності завдяки використанню додаткового джерела світла з певною довжиною хвилі. Тому при аналізі при-строїв, ми зосередимось виключно на активних сканерах.

2. 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

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

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.

Тривимірне зображення 3D-сканер зберігає переважно у форматах STL, OBJ, PLY і WRL.

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 10 000 точок за секунду сканери з низькою роздільною здатністю впораються із завданням протягом декількох секунд. А ось для сканерів з високою роздільною здатністю потрібно зробити кілька мільйонів операцій, на що підуть хвилини. Варто враховувати, 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 перемістяться 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. У цій техніці за допомогою оптичного детектора в площині тривимірного профіля отримують лінію на об'єктах. Техніка проекції 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].

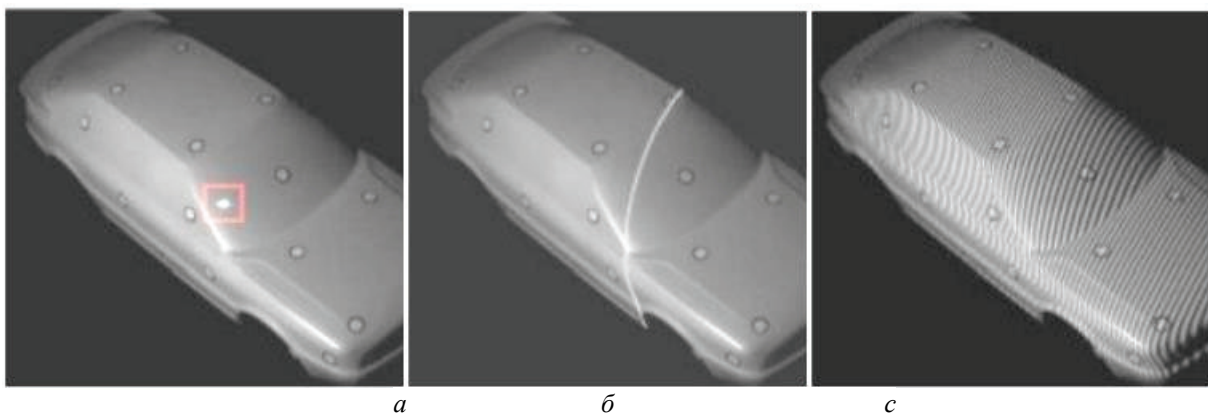


Рисунок 2: *a* — оптична триангуляція; *b* — техніка світлового зрізу; *c* — техніка проекції бахромою

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

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИБЛАДИ

межі, ці межі можуть бути представлені каркасом або трикутником. На дному етапі потрібно з'єднати трикутники (або плити), щоб сформувати поверхню, це може бути зроблено за допомогою триангуляції Делоне [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].

Даний 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 техніка схильна до помилок вибірки та накладання через дискретну природу розміщення трикутної сітки [14].

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

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. 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 — Δx , Δy . Для їхньої оцінки використовують відповідні диференціали. У такому разі, граничні значення похибок Δx , Δy 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 .

Удосконалений метод реконструкції тривимірної форми на основі знаходження координат вузлових точок дозволяє отримати третю координату глибини. Для отримання координат точок глибини об'єкта необхідно, у першу чергу, визначити координати точок зображення об'єкта в двовимірному просторі. На точність такої системи переважно впливають параметри камери та її позиціонування, а також точність виділення підсвіченої лінії або точок на зображенні об'єкта. Якщо вважати, що параметри оптичної системи камери відомі, то головним завданням є точне визначення координат виділених ліній і вузлових точок (рис 3).

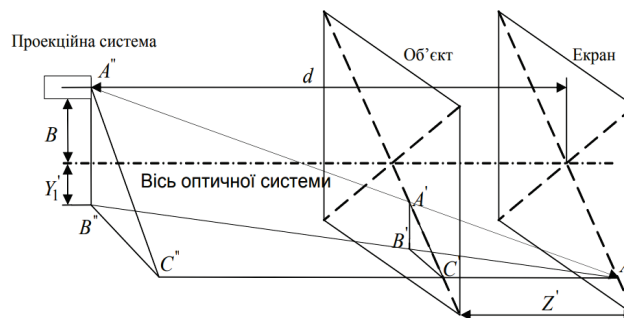


Рисунок 3 - Проходження променів у проекційній системі

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

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 визначення реальних значень координат необхідно врахувати коефіцієнти збільшення оптичної системи для положення реєстрації точок A і A' , які з урахуванням дисторсії відповідають k і $k1$.

У такому випадку вираз (5) можна записати у вигляді

$$Z' = d \sqrt{\frac{(x'_1 k - x'_2 k_1)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}{(x'_1 k)^2 + (y_1'^2 - B)^2}}. \quad (6)$$

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, $k = 30 \cdot 10^{-5}$, $k1 = 40 \cdot 10^{-5}$. Для оцінки чутливості математичної моделі перетворимо вираз (6)

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

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 , 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 [16].

3. ОГЛЯД ЗАСОБІВ 3D СКАНУВАННЯ

Оптичні сканери мають суттєву похибку при аналізі країв об'єктів. Лазерний імпульс посилається один, а відбивається з двох місць. Координати розраховуються, з позиції самого сканера, де береться середнє значення двох відбитків променю з лазера. Це призводить до того, що точка буде визначена у неправильному місці. При використанні 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 променю може перевищити відстань. Існує також спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє сканеру сприймати лише перше відображення променю, ігноруючи при цьому друге [3]. Тому DLP-проектори є цифровими пристроями, які дуже швидкі в роботі, забезпечують високу яскравість та високу контрастність

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

зображення. Це важливі фактори для структурованого світла в 3D-скануванні.

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

Як прольотні, так і триангуляційні 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. 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 [11].

Попередньо ми розглянули принцип роботи сканерів оптичної триангуляції. Одним із прикладів такого 3D-сканера є Mephisto Ex-PRO - це 3D-оптичний сканер, що забезпечує високу швидкість, точність та 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, високо контрастний 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 бахромого 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 [4].

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 [13].

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 ІО. Калібрування є дуже простим, але потужним рішенням, де для геометричної системи воно виконується за допомогою плоскої калібрувальної дошки з шашечкою.

Визначаються габаритні розміри по границі зображення на опорній площині як і периметри перетинів по фотографії, а також висоти перетинів за формулою [14]:

$$H_{ij} = H_0 \left(1 - \frac{L_{ij}}{L_{i0}} \right), \quad (8)$$

i — номер променю; 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.

3D сканер для великих об'єктів Surphaser 100HSX-SR. має досить велику роздільну здатність і точність серед 3D-сканерів великого радіусу дії. Це найточніший 3D-сканер короткої дальності від 1 до 7 м. Обертаючись у двох площинах (горизонтально на 360° і вертикально на 270°), сканер проектує лазерний промінь на дзеркало, встановлене під кутом 45 градусів, яке спрямовує промінь у простір. На кут 1° сканер 100HSX-SR здатний проектувати до 90 променів. Віддзеркалюючись від поверхні сканованого предмета, промінь повертається і фіксується сенсором сканера, що вимірює відстань до об'єкта за зміщенням фази. Дані зчитуються зі швидкістю 208 000 пікселів за секунду і точністю до 0,025 мм. Є опція кольорового сканування. Лазер Class 3R.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Серія SILVER серед HandySCAN 3D оптимізована для задоволення потреб новаторів у галузі технологій та інженерів-професіоналів, які шукають потужний, доступний та надійний спосіб покращити розробку продукту, скоротити час виходу на ринок та знизити витрати на розробку.

Завдяки розвитку портативних вимірювальних приладів у метрології, контроль став доступним безпосередньо на виробничій лінії, у “польових” умовах. Це значно скорочує час очікування результатів перевірки та підвищує якість продукту. У той же час, перенесення місця проведення контролю з лабораторії безпосередньо на виробничий майданчик, кидає виклик у вигляді вібрацій від працюючого виробничого обладнання, вимог до жорсткого налаштування вимірювального обладнання, змін рівнів температури та вологості, а також різноманітний досвід та рівень навичок операторів.

3D сканер Creaform HandySCAN 307 забезпечує точні та відтворювані 3D-виміри незалежно від налаштувань та досвіду користувача. Завдяки технології динамічної прив'язки TRUaccuracy, більш точні системи тривимірної оптичної метрології.

Creaform пропонує такі інноваційні концепції, як автоматичне позиціонування або динамічна переміщення 3D сканера або вібрації деталі під час сканування, не впливають на точність і високу якість сканування. TRUaccuracy є частиною технологічних основ Creaform, що дозволяють створювати прив'язка. Вони дозволяють постійно прив'язувати 3D сканер до деталі за допомогою оптичного зв'язку.

Кишеньковий 3D-сканер Revopoint POP 2 – це доступний 3D-скануючий прилад супер-маленьких розмірів, який можна скрізь взяти з собою та сканувати, підключивши до смартфона. Поєднання 3D-сканування професійного рівня зі справжньою доступністю [12].

Revopoint POP 2 застосовує технології як бінокулярного, так і мікροструктурованого світла. Завдяки цьому, а також запатентованому Revopoint чіпу мікропроекції, 3D-сканер швидко створює високоточну тривимірну хмару крапок. При цьому, точність одного кадру досягає 0,05 мм, що є відмінним професійним результатом. Інтелектуальні алгоритми вбудованого в POP 2 високопродуктивного чіпа для 3D-розрахунків ефективно забезпечують швидкість і продуктивність під час 3D-сканування [16].

3D-сканер Artec Eva = це швидкий професійний 3D сканер на основі безпечної технології структурованого підсвічування. Сканер здатний створити точну 3D-модель з високою роздільною здатністю об'єкта середньої величини. Це відмінне універсальне рішення для зйомки практично будь-яких об'єктів, включаючи об'єкти з чорними та блискучими поверхнями.

Сфера застосування Eva дуже широка: комп'ютерна графіка, контроль якості, криміналістика, охорона здоров'я, протезування, судова експертиза, освіта, наука, автомобільна та аерокосмічна промисловість і багато іншого. На сьогоднішній день, 3D-сканер Artec Eva є лідером на ринку портативних 3D-сканерів.

Сканер знімає і одночасно обробляє до 2 млн точок на секунду з високою точністю до 0,1 мм у яскравих кольорах. Відстежує і чудово передає геометрію і текстуру одночасно. Також сканер дозволяє відстежувати процес зйомки на моніторі безпосередньо в момент сканування. Ви можете оцінювати результат сканування і коректувати положення сканера щодо об'єкта прямо під час його роботи.

3D-сканер Dental DT300 – це професійний сканер третього покоління, розроблений і запрограмований китайським виробником Thunk 3D спеціально для використання в стоматологічній сфері. Цей сканер Ви можете застосовувати для швидкого і високоякісного сканування зліпків, зубних протезів, дрібних виробів і деталей, ювелірних виробів, монет і т.д. Здатний сканувати з точністю в 0.08 мм і з високою швидкістю близько 12-15 секунд [15].

Один з найкращих пристроїв на ринку є сканер Peel 3D Peel 2. Використовуючи джерелом світла біле світлодіодне світло, Peel 2 отримує дані про геометрію поверхні з об'ємною точністю до 0,500 мм/м. У нього досить велике поле захоплення 380 x 380 мм і швидкість отримання даних у 550 000 пікселів в секунду, які дають можливість швидко зняти геометричні дані та зберегти їх у будь-якому з більшості популярних форматів [17].

Peel 2 підходить для зняття 3D копій дрібних і великих об'єктів розміром від 30 см до 3 м. Оскільки він автоматично розпізнає форму об'єктів і здатний позиціонуватися не тільки за мітками та геометрією, а й за текстурами, йому доступні ширші можливості сканування об'єктів, ніж його

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИБЛАДИ

попереднику. Таким чином, на деяких об'єктах Peel 2 зможе знімати геометрію навіть без попереднього нанесення спеціальних міток [18]. Як і для більшості інших 3D сканерів, для Peel 2 завдання сканування плоских та тонкостінних об'єктів, а також волосся або хутра може бути проблемою. В таблиці наведено основні характеристики сучасних безконтактних промислових 3D-сканерів.

Таблиця 1

Порівняння промислових безконтактних 3D-сканерів.

Прилад	Площина поля захоплення (мм)	Робоча відстань (мм)	Діапазон розмірів деталей (м)	Точність сканування (мм)	Швидкість сканування (точок/с)	Відстань між точками (мм)
 Mephisto Ex-PRO	150 x 400	500 - 2000	0.2 – 0.7	0.5	400 000	0.5
 Surphaser 100HSX-SR	300 x 600	500 - 5000	0.5 – 5.0	0.15	1.2 млн	0.8
 Creaform HandySCAN 307	225 x 250	300	0,1 – 4,0	0,04	480 000	0,2
 Revopoint POP 2	210 × 130	150 - 400	0.005 - 0.02	0,05	200 000	0,15
 Artec Eva	536 × 371	400 – 1000	0.2 – 2.5	0,1	2 млн	0.2
 Dental DT300	10-150	100-200	0.01 - 0.04	0.08	180 000	0.1
 Peel 3D Peel 2	380 x 380	100-400	0,3 – 3,0	0,1	550 000	0,5

ВИСНОВКИ

В роботі описані сучасні методи 3D-реконструкції, які можуть бути використані як для створення 3D моделей, так і для контролю геометричних розмірів об'єктів. Наведено математичний апарат, що дає змогу виконати високоточну корекцію для побудови полігональної сітки об'єкта. Також проведено огляд засобів сканування 3D об'єктів, з даного огляду, можна прийти до висновку що на ринку присутня велика кількість різного типу 3D сканерів, які працюють на різних фізичних процесах, мають різну точність, та відповідають різним цілям.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соїфер В. А. «Методи комп'ютерної обробки зображень», М.: ФІЗМАТЛІТ, 2003, с. 784.
2. Р. Тоблер, і С. Майерхофер, «Сітчаста структура даних для візуалізації та підрозділ», в Хорхе Дж., Скала В. (ред.), 14- а Міжнародна конференція у Центральній Європі з комп'ютерної графіки, візуалізації та комп'ютерного зору (WSCG'2006) Short Communication Papers Proceedings, 2011, с. 157-162.
3. Б. Пуччі, і А. Марамбіо, «Печера Олердоли, Каталонія: віртуальна реальність реконструкція з наземного лазерного сканера та даних ГІС», в: 3D віртуальний реконструкція та візуалізація складних архітектур, Труды ім ISPRS International Workshop 3D-ARCH , 2009.
4. П. Чиньоні, М. Кальєрі, М. Корсіні, М. Деллепіане, Ф. Гановеллі, і Дж. Ранцуля, « Meshlab: інструмент обробки сітки з відкритим кодом» в: В. Скарано, Р. Де К'яра і У. Ерра, Ред .) Італійська секційна конференція Eurographics, 2008, с. 129-136.
5. Б. Раду, Р. Казинс, і С. Казинс, «3D тут: бібліотека хмар точок (PCL),» Міжнародна конференція IEEE з робототехніки та автоматизації (ICRA), Шанхай, Китай, 2011.
6. 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 .
7. Т. Ма, Г. Гонг, Дж. Ян, «Алгоритм спрощення 3D-моделі на основі edge-collapse,» на Міжнародна конференція IEEE з промислової інформатики (ІНДІН) , 2012.
8. Д. Атталі, А. Льєтьє, і Д. Салінас, «Колапсуючі комплекси рипсів», на 29-е Європейський семінар з обчислювальної геометрії (EuroCG), 2013.
9. Д. Шодек, М. Бехтольд, К. Грігс, К. М. Као, і М. Стейнберг, Застосування CAD/CAM в архітектурі та дизайні. John Wiley & Sons, Inc ; Нью-Йорк, 2005. Цифровий дизайн і виробництво.
10. Т. Вараді, Р. Мартін, і Дж. Кокст, «Зворотне проектування геометричних моделей – вступ,» Дез. об. 29, с. 255-268, 1997.
11. J. Peire, H. J. Przybilla, «Модельовання Золотої Мадонни,» Сіра 2005, XX Міжнародний симпозиум , Турін, Італія. 26 вересня – 1 жовтня 2005 р.
12. S. Seokbae, P. Hyunpung, і H. L. Kwan, «Implementation of 3D Optical Scanning Technology for Automotive Applications,» Int. J. Mach, с. 889-897, 2002.
13. G. Tognola, M. Parazzinia, C. Sveltob, P. Ravazzania, і 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.
14. S. V. Kozlov, V. V. Vyun, G. B. Aleksin, [Electronic resource]. Available: <https://repo.dma.dp.ua/4073/1>
15. Й. Й. Білинський, С.М. Животівський, «Огляд методів 3D контролю геометричних розмірів деталей» Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2022, № 2.
16. Й. Й. Білинський, С. В. Юкиш, «Апаратно-програмна реконструкція тривимірного рельєфу поверхні спини людини» Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. Наукові праці ВНТУ, 2010, № 1, 2002.

REFERENCES

1. Soifer V. A. "Methods of computer image processing," M.: FIZMATLYT, 2003, p. 784.
2. R. Tobler, and S. Mayerhofer, "A mesh data structure for visualization and subdivision," in Jorge J., Scala V. (eds.), 14th Central European International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computing of Computer Vision (WSCG'2006) Short Communication Papers Proceedings, 2011, p. 157-162.

3. B. Pucci, and A. Marambio, "Olerdola Cave, Catalonia: virtual reality reconstruction from terrestrial laser scanner and GIS data," in: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Proceedings of the ISPRS International Workshop 3D-ARCH, 2009.
4. P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, and J. Ranzuglia, "Meshlab: an open source mesh processing tool" in: V. Scarano, R. De Chiara, and U. Erra, Ed.) Eurographics Italian Sectional Conference, 2008, p. 129-136.
5. B. Radu, R. Cousins, and S. Cousins, "3D is Here: The Point Cloud Library (PCL)," IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011.
6. R. Zhang, "Edge Collapse Improved 3D Model-Based Surface Model Data Compression Algorithm," Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2014. [Electronic resource]. Access mode: www.jocpr.com.
7. T. Ma, H. Gong, J. Yang, "A 3D model simplification algorithm based on edge-collapse," in IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2012.
8. D. Attali, A. Létier, and D. Salinas, "Collapsing Rips Complexes", in 29th European Workshop on Computational Geometry (EuroCG), 2013.
9. Schodeck, D., Bechtold, M., Griggs, C., Kao, K. M., and Steinberg, M., Applications of CAD/CAM in Architecture and Design. John Wiley & Sons, Inc.; New York, 2005. Digital Design and Manufacturing.
10. T. Varady, R. Martin, and J. Coxt, "Inverse Design of Geometric Models - An Introduction," Des. about. 29, p. 255-268, 1997.
11. J. Peipe, HJ Przybilla, "The Modeling of the Golden Madonna," Cipa 2005, XX International Symposium, Turin, Italy. September 26 - October 1, 2005
12. S. Seokbae, P. Hyunpung, and HL Kwan, "Implementation of 3D Optical Scanning Technology for Automotive Applications," Int. J. Mach, p. 889-897, 2002.
13. 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, p. 295-305, 2003.
14. SV Kozlov, VV Vyun, GB Aleksin, [Electronic resource]. Available: <https://repo.dma.dp.ua/4073/1>
15. Y.Y. Bilinskyi, S.M. Zhivotivskyi, "Review of methods of 3D control of geometric dimensions of parts" Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 2022, No. 2.
16. Y. Y. Bilinskyi, S. V. Yukysh, "Hardware and software reconstruction of the three-dimensional relief of the surface of the human back" Information technologies and computer technology. Scientific works of VNTU, 2010, No. 1, 2002.

Надійшла до редакції 20.11.2022р.

БЛИНСЬКИЙ ЙОСИП ЙОСИПОВИЧ — д-р техн. наук, професор кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри комп'ютерних наук і економічної кібернетики, Вінницький національний аграрний університет Вінниця, Україна,
[e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com](mailto:yosyp.bilynsky@gmail.com)

ЖИВОТІВСЬКИЙ СТЕПАН МИХАЙЛОВИЧ — аспірант факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
[e-mail: zhivotivskyi.s@gmail.com](mailto:zhivotivskyi.s@gmail.com)