

Іван БРУСАК^{1А}, Кшиштоф БАКУЛА², Наталія САВЧУК^{1Б}

¹ Інститут геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

^{1А} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931> ^{1Б} <https://orcid.org/0000-0002-8210-5919>

² Факультет геодезії та картографії, Варшавський технологічний університет, площа Політехніки, 1, Варшава, 00-661, Польща, <https://orcid.org/0000-0001-7137-1667>

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.015>

ПОРІВНЯННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ 3D ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ СУДНОБУДІВНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У роботі розглянуто використання сучасних технологій 3D-вимірювань у виробництві суднобудівних деталей. Для дослідження виготовлено спеціальний шаблон ділянки кіля. Вимірювання шаблону виконано за допомогою лазерного трекера, лазерного сканування, промислової фотограмметрії та ручного сканування. У дослідженні для 3D-вимірювань використано таке обладнання: лазерний трекер Leica Absolute Tracker AT960-LR, лазерний сканер Z+F Imager 5010, фотокамеру Nikon D2Xs для промислової фотограмметрії, ручний сканер DPI-7 від DotProduct. Усі зібрані дані було імпортовано в програмне забезпечення 3DReshaper для порівняння. Виконано порівняння точності для конкретного використаного у дослідженні обладнання. Також у дослідженні надано рекомендації щодо оптимального використання обладнання та програмного забезпечення. Здійснили оцінювання витрат і часу, витраченого на вимірювання. Результати дослідження дадуть змогу ефективно приймати рішення щодо вибору оптичного обладнання та методів 3D вимірювання у суднобудівній промисловості.

Ключові слова: 3D вимірювання; лазерний трекер; лазерне сканування; промислова фотограмметрія; ручне сканування.

Вступ

Визначення 3D координат точок поверхонь деталей важливе у сучасному виробництві суден. Цифрові копії інженерних об'єктів нині також мають велике значення для суднобудування [Hoffman et al., 2023]. Для таких цілей використовують фотограмметричні та лідарні технології, щоб отримати детальні 3D моделі поверхні об'єктів [Martorelli et al., 2014; Burdziakowski & Tysiąc, 2019; Goldan & Kroon 2003]. Розміри деталей суден можуть варіюватися від декількох до десятків метрів завдовжки. Сучасні технології 3D вимірювань забезпечують точне та швидке визначення координат поверхневих точок об'єктів у такому діапазоні розмірів. Серед використовуваних сьогодні методів часто застосовують лазерне сканування, ручне сканування, промислову фотограмметрію та вимірювання лазерним трекером. Сучасні технології 3D вимірювань характеризуються точністю на рівні субміліметра, доступністю, опрацюванням у реальному чи майже реальному часі та портативністю обладнання. У разі удосконалення поточних методів та появи нових важливо здійснювати порівняльний аналіз для визначення найоптимальнішого рішення для конкретних завдань.

Для оцінювання сучасних методів 3D вимірювань у суднобудівній промисловості виконано вимірювання за допомогою чотирьох оптичних методів: лазерного сканування, ручного сканування, промислової фотограмметрії та вимірювань лазерним трекером. Спеціальний шаблон деталі кіля судна був створений для дослідження (рис. 1). Розміри цієї деталі: довжина 2,027 м, ширина 1,950 м, висота 1,045 м. Частина деталі була фрезерована та містила спеціальну кишеню. Практичну частину дослідження виконано на заводі Ostseestaal у місті Штральзунд, Німеччина [Brusak, 2018]. Матеріал, використаний у дослідженні, повністю зібрани та проаналізували автори статті.

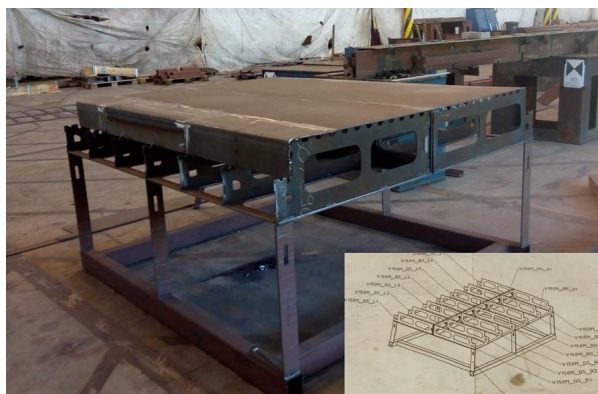


Рис. 1. Шаблон ділянки кіля, використаний для експериментального дослідження

В інженерії для побудови тривимірних моделей природних об'єктів можна застосовувати різноманітні оптичні методи. Важливо визначити найоптимальніший метод дослідження з економічного та інженерного аспектів. Основна проблема з інженерного погляду для завдань суднобудування полягає у забезпеченні точності вимірювань, яка може становити від 0,1 до 0,3 мм. Економічний аспект передбачає використання оптимального за вартістю обладнання, мінімізацію часу роботи та зменшення потреби в людських ресурсах. З урахуванням цих факторів порівняння сучасних методів 3D вимірювань є важливим промисловим завданням.

До сьогодні вже здійснено деякі дослідження щодо порівняння оптичних методів вимірювання.

Результати вимірювань лазерного трекара та лазерного сканера порівнювали за допомогою експериментальних випробувань щодо перевірки розмірів модулів круїзних суден [Maisano et al., 2022]. Автори дійшли висновку, що лазерний трекаер переважає за метрологічною продуктивністю, але його великий розмір дещо обмежує портативність. Використання лазерного трекаера також потребує певного рівня кваліфікації оператора і доволі значного часу для налаштування. Лазерний сканер особливо підходить для вимірювання об'єктів складної форми для повної тривимірної реконструкції. Найважливішою особливістю цього інструмента є необхідність передавання та аналізу (офлайн) отриманих даних без надання результатів вимірювань у реальному часі.

Здійснено подібне дослідження [Ahmed et al., 2011], в якому автори порівнювали отримання хмари точок із лазерного сканування та промислової фотограмметрії. Зроблено такі висновки: вибір між лазерним скануванням та фотограмметрією повинен залежати від конкретних вимог проекту. Коли головними є економічні міркування, фотограмметрію можна вибрати як технологію для отримання хмари точок. Натомість, якщо важливі проблеми, пов'язані із тривалістю навчання та експертизою, технологія лазерного сканування є доцільнішим варіантом [Ford et al., 2016]. Геометричні параметри вимірювали за допомогою промислової фотограмметрії та технології лазерного сканування, а опрацювання даних здійснювали за допомогою програмного забезпечення MATLAB [González-Jorge et al.,

2012]. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів з вихідними геометричними характеристиками виробника, з урахуванням порогів допуску та інтервалів невизначеності, встановлених стандартами галузі. Автори стверджують, що обидва методи є метрологічно задовільними щодо встановлених допусків.

Стосовно ручних сканерів: Kersten та ін. [2016] порівнювали DotProduct DPI-7, Artec Spider, Mantis Vision F5 Short rank, Kinect v1 та v2, Structure Sensor та Google Tango. Спостереження упроваджували у процес коригування пакетного блока, зокрема дані із трьох каліброваних шкал. Ця інтеграція забезпечила досягнення точності в межах від 0,1 до 0,6 мм. Результати для портативних сканерів DPI-7 є однорідними для всіх систем і коливаються у випадку помилки зондування приблизно на 10 мм. У разі використання даних DPI-7 виникає проблема рестрації окремих сканів як об'єднаних із розтягнутими об'єктами. З урахуванням отриманих результатів можна зробити висновок, що DotProduct DPI-7 можна використовувати для виконання завдань у суднобудівній галузі.

Основне завдання цього дослідження – визначення придатності чотирьох сучасних технологій 3D вимірювань для сучасної суднобудівельної промисловості. Дослідження охоплює оцінювання точності хмари точок 3D, створених цими методами, часових витрат та фінансів для їх використання. Досі у суднобудівній галузі не здійснювали порівняльного аналізу, який би охоплював вимірювання за допомогою лазерного трекаера, лазерного сканування, промислової фотограмметрії та ручного сканування.

Методика дослідження

Використані в дослідженні дані

У дослідженні використано чотири сучасних оптичні методи: наземне лазерне сканування, ручне сканування, інженерну фотограмметрію та вимірювання лазерним трекаером. Використане обладнання (рис. 2) докладно описано у підрозділах нижче. Вимірювання за допомогою лазерного трекаера вибрано як базовий метод, оскільки вони забезпечують найвищу точність вимірювань та широко використовуються у суднобудівній промисловості [Монюк, 2012; Maisano et al., 2022].



Рис. 2. Використані в дослідженні прилади: Leica Absolute Tracker AT960-LR (a); Z+F Imager 5010 (b); фотоапарат Nikon D2Xs (c); ручний сканер DPI-7 (d)

Вимірювання лазерним трекером

Лазерний трекер – мобільний пристрій для координатного вимірювання, який працює на основі відстеження спеціального відбивача за допомогою лазерного променя. Прилад вимірює кут та відстань до сферичної мітки. Вимірні параметри використовують для визначення 3D координат центра сферичного відбивача у системі координат лазерного трекера.

Трекери використовують для контролю геометричних параметрів великогабаритних виробів, таких як літаки, судна, вагони, автомобілі, верстати, преси, а також великі металеві конструкції [Монюк, 2012]. Вони можуть ефективно контролювати складні криволінійні поверхні, порівнюючи їх із CAD-моделлю. Унікальна можливість відстеження положення сферичного відбивача в реальному часі дає змогу ефективно використовувати трекери для збирання виробів, таких як з'єднання окремих секцій судна. Використання лазерного трекера дає можливість уникнути виготовлення спеціальних шаблонів вимірювання.

У цьому дослідженні показано результати використання лазерного трекера Leica Absolute Tracker AT960-LR [Hexagon ..., 2022]. AT960-LR є системою лазерного відстеження, яка використовує інтерферометр для точного визначення відстані між трекером та цільовим об'єктом. Лазерний трекер дає змогу виконувати 3D вимірювання до 160 м у діаметрі та об'єм 6DoF вимірювання до 40 м у діаметрі, зі швидкістю збирання даних до 1000 точок за секунду. Є можливість використання спеціального відбивача під назвою Leica T-Probe. Середньоквадратична помилка (MSE) для інтерферометра та кутової точності становить відповідно $\pm 0,4$ мкм + $0,3$ мкм/м, \pm

15 мкм + 6 мкм/м. AT960-LR оснащений інтегрованою метеостанцією, яка постійно відстежує параметри довкілля, такі як температура, тиск та вологість.

Збирання та оброблення даних виконується за допомогою програмного забезпечення Leica Tracker Pilot. Для моделювання шаблону кіля у цьому дослідженні виконано орієнтацію трекера, вимірювання верхньої та бічної частин деталі та експорт даних у форматі .txt. У результаті було виміряно 1043 точки деталі. Далі у програмному забезпеченні 3DReshaper побудували сітчасту модель.

Лазерне сканування

Наземне лазерне сканування (англ. TLS – Terrestrial Laser Scanning) – це технологія отримання точкових даних про поверхню об'єкта за допомогою лазерного променя. Лазер встановлений на обертовій основі. Під час сканування лазерний промінь розсіюється на поверхні об'єкта, і лазерний сканер реєструє його відображення. Результати вимірювання – хмара точок на поверхні через випромінювання, відбите від поверхні об'єкта. Точкові дані створюють тривимірне зображення поверхні об'єкта з високою точністю та деталізацією [Abbas et al., 2017].

TLS передбачає захоплення багатьох хмар точок із різних точок стояння приладу для охоплення всієї досліджуваної області. Цей метод не залежить від освітлення досліджуваного об'єкта. Висока продуктивність лазерного сканування характеризується отриманням великого обсягу даних швидко з точністю, достатньою для виконання більшості інженерних завдань [Housel et al., 2015].

У цьому дослідженні висвітлено результати роботи Z+F Imager 5010. Z+F Imager 5010 є точним і надійним інструментом для лазерного сканування на близьких і віддалених відстанях. Він може сканувати об'єкти 0,3–187 м розміром до 1 млн пікселів/с. Поле зору цього пристрою широкіше – вертикально 320° і горизонтально 360° . Виконано сканування шаблону кіля з чотирьох точок стояння із “високою” роздільністю та “звичайною” якістю. Опрацювання виконано у програмних продуктах Scantra та Z+F LaserControl. Хмару точок експортували у форматі .pts (рис. 3) для подальшого оброблення у програмному забезпеченні 3DReshaper.



Рис. 3. Дані хмари точок на основі даних TLS

Промислова фотограмметрія

Промислова фотограмметрія ґрунтується на загальних принципах класичної фотограмметрії [Ackermann et al., 2008]. Розрахунок тривимірних координат об'єктів передбачає два основні кроки. По-перше, необхідно визначити параметри орієнтації зображень у стандартній тривимірній координатній системі. По-друге, виконати створення густої хмари точок.

Т. Luhmann [2010] поділяє сучасну промислову фотограмметрію на два типи систем: офлайн та онлайн. У цьому дослідженні ми використовували офлайн-систему, яка дає змогу досягти найвищих рівнів точності та відповідності реальному об'єкту. Точність вимірювання точок зображення може досягати $1/50$ пікселя, що забезпечує типову точність вимірювання на об'єкті в діапазоні від 1:100 000 до 1:200 000, що відповідає 0,1 мм для об'єкта розміром 10 м. Абсолютна точність поздовжніх вимірювань, як правило, у два – три рази менше [Rieke-Zapp et al., 2009].

У цьому дослідженні визначено результати використання фотоапарата Nikon D2Xs. Інтеграція 12,4-мегапіксельного КМОН-сенсора забез-

печує можливість отримати до п'яти кадрів за секунду в режимі безперервного знімання. Робота з 11-зонною системою автофокусування уможливорює створення JPEG або RAW зображень. Для Nikon D2Xs зафіксовано такі параметри для вимірювань, як ISO 300, діафрагма – $f 8.0$, і спалах синхронізації 1:250. Параметр ISO регулює рівень чутливості камери до наявного світла. Під час вимірювань можлива реалізація онлайн-передавання даних із використанням бездротового передавача WT-2/2A, підключеного до Nikon D2Xs на комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням Camera Control Pro.

У цьому дослідженні використано шкали та спеціальні марки AICON, що є необхідно для досягнення точних результатів і автоматичних обчислень у програмних продуктах. Спеціальні марки мають восьмирозрядний код. Калібрування камери та спеціальних шкал здійснено за допомогою спеціального горизонтального компаратора. Загалом фотоапарат Nikon D2Xs та калібровані шкали придатні для точного сканування.

Для дослідження зроблено близько 300 фотографій. Фокусна відстань для цієї камери становить 24,188 мм. СКП положення точок дорівнює 0,054 пікселя. Вигляд густої хмари точок показано на рис. 4. Фільтрацію даних виконано вручну. Результати експортуються у форматі ASTM E57. Формування сітчастої моделі виконано далі у програмному забезпеченні 3DReshaper.



Рис. 4. Згенерована щільна хмара точок на основі результатів промислової фотограмметрії

Ручне сканування

Ручні сканери зазвичай містять проектор і вимірювальні блоки. Принцип вимірювання складається із двох етапів. По-перше, інфрачервоний давач проектує псевдовипадковий шаблон на об'єкт. По-друге, цей шаблон та зміни форми

вимірюються за допомогою камер NIR (близько-інфрачервоний діапазон) та RGB (червоний, зелений, синій). Хмара точок перетворюється з областей дальності. Координати компенсуються відносно гравітації за допомогою внутрішніх акселерометра і гіроскопа планшета [Jahraus et al., 2015].

Обладнання DPI-7 складається із планшетного комп'ютера на платформі Android з кріпленням для руки, ліцензії програмного забезпечення DotProduct Phi.3D, 3D-сенсора, який складається з NIR проектора, камери NIR та RGB-камери, а також 3 USB-конекторів для підключення камери до планшета.

Jahraus et al. (2015) перевірили роботу DPI-7 з цим сенсором та стверджують, що помилки у глибинному розмірі сканера пропорційні до квадрата глибини. Найпотужніша частина ручного обладнання DotProducts – програмне забезпечення Phi.3D на планшеті, яке дає змогу реєструвати та обробляти детальні хмари точок на льоту [Ahern та Spring, 2015]. Спеціально використовуваний алгоритм для шести ступенів свободи передбачає процедуру знаходження найближчої точки на геометричній сутності до заданої точки. Цей алгоритм завжди монотонно збігається з найближчим локальним мінімумом метрики середньоквадратичної відстані, а швидкість збіжності висока протягом перших кількох ітерацій. Реєстрація оптимізується за допомогою автоматичного вилучення неправильних точок. Під час вимірювання важливою перевагою є також надання зворотного зв'язку в реальному часі на планшеті за допомогою програмного забезпечення Phi.3D.



Рис. 5. Результат сканування за допомогою DPI-7 від DotProduct

Діапазон вимірювання сканера DPI-7 – 0,6–3,3 м, вага приладу менше ніж 1 кг, розміри 20×24×6 см³. DPI-7 є задовільним обладнанням

для невеликих проектів внутрішнього сканування. Вимірювання шаблона кілю виконано під час руху довкола нього на відстані 1,5 м. Кольорову хмару точок зареєстровано на планшеті протягом кількох хвилин на місці знімання. Результати вимірювань (рис. 5) експортовано у форматі .ptx.

Порівняння даних та результати

Best-fit порівняння даних

Усі зібрані дані імпортовано в програмне забезпечення 3DReshaper. Для кожного випадку оптичних та лазерних вимірювань створено сіткову модель хмари точок. Для аналізу точності використано функцію найкращої збіжності (**Best-fit**) та реєстрації 3-2-1. Вимірювання лазерного трекера вибрано як основу для порівняння. У табл. 1 наведено результати **Best-fit** порівняння різних методів із даними лазерного трекера.

Таблиця 1

Результати Best-fit порівняння різних методів із даними лазерного трекера

Метод (обладнання), який порівняно з лазерним трекером	Лазерне сканування (Z+F Imager 5016)	Промисл. фотограм. (Nikon D2Xs)	Ручне сканування (DPI-7)	
Відсоток площі з відмінностями менше ніж	1 мм	80 %	60 %	40 %
	2 мм	89 %	80 %	60 %
	3 мм	96 %	93 %	80 %
Макс. додатна різниця, мм	+7	+16	+15	
Макс. від'ємна різниця, мм	-9	-21	-19	
Пошкоджені дані	опуклість на меншій стороні	усі точки меншої сторони	-	
Використане покращення даних	згладжування	фільтрація	-	

Сітчаста модель за даними лазерного трекера містить 1043 точки і 1967 трикутників. Модель з ручного сканера складається із 9564 точок і 18857 трикутників після фільтрації. Під час порі-

вняння встановлено, що відхилення 80,4 % поверхонь моделей менші за $\pm 0,003$ м. Максимальні відмінності становлять $+0,015$ та $-0,019$ м.

Сітчаста модель на основі даних лазерного сканування містить 10646 точок і 21022 трикутники. У результаті Best-fit порівняння встановлено, що 87 % поверхонь моделей мають відхилення менше за $\pm 0,0015$ м. Максимальні відмінності становлять $+0,007$ та $-0,009$ м. Результати верхньої частини шаблона кіля кращі, ніж бічних.

Сітчаста модель на основі даних промислової фотограмметрії містить 16297 точок і 31953 трикутники після фільтрації. Під час порівняння встановлено, що 93 % поверхонь моделей мають відхилення менше ніж $\pm 0,003$ м. Максимальні відмінності становлять $+0,016$ та $-0,021$ м.

Пошкоджені дані

Після вимірювань виявилось, що деякі дані були спотворені. Це пов'язано із поліруванням металом, який має додаткові відбивні властивості. Лазерне та фотограмметричне сканування характеризувалися відбитими даними.

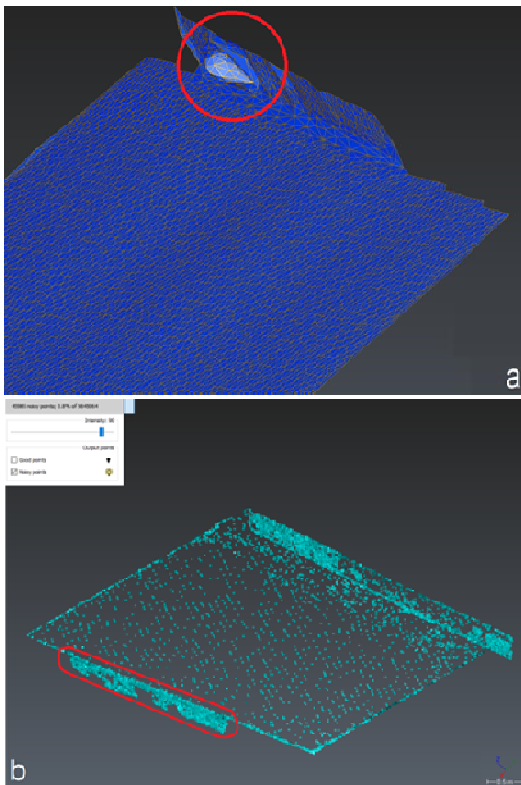


Рис. 6. Дефектні дані: опуклість на стороні для лазерного сканування (а), менша сторона для сканування на основі фотографії (б)

Опуклість на боці шаблона (рис. 6, а) пов'язана із високим відбиттям у цьому місці. На основі промислової фотограмметрії всі точки на меншому боці незадовільної якості, тому необхідна більша кількість фотографій цього меншого боку (рис. 6, б).

Порівняння часу вимірювання

Час, необхідний для вимірювань, оброблення та отримання точкових даних хмари, є важливим параметром. У цьому випадку час для вимірювання шаблона кіля мінімальний, якщо користувач один і знає обладнання. Найшвидший метод – ручне сканування (20 хв). Для підключення DPI-7 та ввімкнення Phi.3D потрібно 10 хв, 5 хв на вимірювання, урахувавши час попереднього нагрівання сенсора, і 5 хв на збереження та експорт хмари точок.

Робота із лазерним сканером Z+F Imager 5016 та Z+F Laser Control на ноутбучі в полі потребує 15 хв для підключення обладнання та закріплення спеціальних маркерів у залі, 30 хв для вимірювань (чотири станції, 6 хв на станцію та встановлення на станції) з високою точністю і стандартною якістю, 5 хв на експорт даних. Якщо необхідно змінити систему координат сканувань на систему координат у залі, можна використати тахеометр. Для цього потрібно близько 20 хв на вимірювання та ще 20 хв на експорт та перерахунок хмари точок у Z+F Laser Control. Загалом, для отримання даних лазерного сканера потрібно 50 хв, а для зміни системи координат – ще 40 хв.

Вимірювання лазерним трекером із використанням AT960 потребує 20–30 хв для підключення апаратного забезпечення системи та часу попереднього нагрівання лазера, 10 хв для перевірки поля та позиціонування до системи координат у залі, 15 хв для динамічних вимірювань (1000 точок із інтервалом 5 см) і 5 хв на експорт даних. Отже, процес займає близько 50–60 хв робочого часу.

Найбільше часу, 6,5 год, витрачено на промислово фотограмметрію: 15 хв на закріплення спеціальних фотограмметричних маркерів, 40 хв на знімання 300 фотографій, 10 хв на експорт, 30 хв на вирівнювання фотографій та 5 год на побудову густої хмари точок.

У табл. 2 подано час роботи та ціну обладнання, використаного в дослідженні.

Таблиця 2

Час роботи та ціна обладнання, використаного в дослідженні

Метод і обладнання		Лазер. трекер (Leica AT960LR + T-probe + Spatial Analyzer)	Лазерне сканування (Z+F Imager 5016)	Промислова фотограмметрія (Nikon D2Xs)	Ручне сканування (DPI-7)
Час, хв	підготовка	30–40	15	15	10
	вимірювання	15	30	40	5
	експорт і обробка	5	5	330	5
	разом	50–60	50	385	20
Орієнтовна ціна на обладнання, \$		250 000	85 000	5 000	5 000

Витрати на обладнання

Ціна використаного у дослідженні обладнання істотно варіюється. Найдорожче обладнання – для вимірювань лазерним трекером. Leica Absolute Tracker AT960-LR разом зі спеціальним штативом, ліцензією Spatial Analyzer та T-probe коштує приблизно 250 000 \$. Ціна на лазерний сканер Z+F Imager 5016, Z+F LaserControl та програмне забезпечення Scantra приблизно 85 000 \$. Ручний сканер DPI-7 із програмним забезпеченням Phi.3D та фотокамера Nikon D2Xs з Agisoft Photoscan значно дешевші. Обладнання для ручного сканування та промислової фотограмметрії коштує близько 5 000 \$ за комплект для вимірювання.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження мають декілька ключових аспектів для вдосконалення і розвитку методів 3D вимірювань у суднобудівній галузі.

Точність і надійність методів вимірювань. Один із важливих напрямів – пошук способів підвищення точності та надійності сучасних ме-

тодів вимірювань. Це може передбачати вдосконалення алгоритмів обробки даних, технічного забезпечення та розроблення нових методів калібрування обладнання.

Розширення сфери застосування. Дослідження розглядати можливість розширення сфер застосування методів 3D вимірювань. Наприклад, їх адаптація для контролю деформацій інших типів конструкцій або розроблення нових технік і методик для забезпечення вимірювань на більших відстанях із вищою точністю.

Вдосконалення технологій збирання та оброблення даних. Подальший розвиток програмного забезпечення для збирання, аналізу та візуалізації даних може істотно полегшити вимірювання. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання також допомагатиме в автоматизації оброблення даних та підвищенні точності результатів.

Оптимізація витрат часу та ресурсів. Важливим аспектом є оптимізація часу, необхідного для виконання вимірювань та ефективного використання ресурсів. Розроблення ефективніших методів підготовки обладнання до роботи, скорочення процесу вимірювань та прискорення обробки результатів сприятиме збільшенню продуктивності.

Стандартизація та інтеграція з іншими технологіями. Розроблення стандартів для методів 3D вимірювань у суднобудівній галузі та їх інтегрування з іншими технологіями розширить можливості для вдосконалення усіх робочих процесів та взаємодії між ними в цій галузі.

Ці напрями досліджень сприятимуть подальшому розвитку та впровадженню методів 3D вимірювань у суднобудівній галузі, забезпечуючи точніші, ефективніші та інноваційніші рішення для вирішення різноманітних інженерних завдань.

Висновки

Моделі порівняно у програмному забезпеченні 3dReshaper на основі хмар точок та точкових даних від лазерного трекера Leica AT960LR, вибраного базовим методом. У статті також наведено оцінки часових затрат та вартості для чотирьох методів 3D обстеження. Лазерне сканування з використанням Z+F Imager 5016 є точнішим, ніж промислова фотограмметрія та ручне

сканування. Максимальні відмінності між сітковими моделями, основаними на лазерному скануванні та вимірюваннях лазерного трекара, становлять +7 мм та –9 мм. Довжина 87 % векторів менша за 1,5 мм.

Найшвидший метод (приблизно 20 хв) для сканування шаблону – ручне сканування за допомогою DPI-7 та Phi.3D від компанії DotProduct. Ручне сканування з використанням DPI-7 та фотографічне сканування з використанням камери Nikon D2Xs можна застосовувати для невеликих проектів з урахуванням економії робочого часу та нижчих цін. Результати дослідження дадуть змогу ефективно приймати рішення щодо вибору оптичного обладнання та методів 3D вимірювання у суднобудівній промисловості.

Подяки

Автори висловлюють подяку компанії Ostseestaal із м. Штральзунд, Німеччина (де здійснені вимірювання), компанії Ingenieur Team Nord, університетам прикладних наук у Нойбранденбурзі та Бохумі, Німеччина (за допомогу їхніх співробітників-геодезистів та надане обладнання). Внесок авторів: І. Б. – 70 %, К. Б. – 5 %, Н. С. – 25 %.

Література

- Монюк, Б. Є. (2012). Застосування лазерного трекара для вирішення інженерно-геодезичних задач. *Містобудування та територіальне планування*, (44), 359–365. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2012_44_50
- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z., Lau, C. L., ... & Ariff, M. F. M. (2017). Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner. *Measurement*, 100, 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.053>
- Ackermann, S., Menna, F., Scamardella, A., & Troisi, S. (2008, January). Digital photogrammetry for high precision 3D measurements in shipbuilding field. In *6th CIRP International Conference on ICME-Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*.
- Ahern, C., & Spring, R. (2015). Handheld 3D Capture. *Geoinformatics*, 18 (2), 18–19. <https://www.proquest.com/openview/d247ae7b800189b4d6edfd799b637679/1?pq-origsite=gscholar&cbl=178200>
- Ahmed, M., Guillemet, A., Shahi, A., Haas, C. T., West, J. S., & Haas, R. C. (2011, June). Comparison of point-cloud acquisition from laser-scanning and photogrammetry based on field experimentation. In *Proceedings of the CSCE 3rd International/9th Construction Specialty Conference*, 14–17, Ottawa, ON, Canada.
- Burdziakowski, P., & Tysiac, P. (2019). Combined close range photogrammetry and terrestrial laser scanning for ship hull modelling. *Geosciences*, 9(5), 242. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050242>
- Brusak, I. (2018). Geometric inspection of 3D production parts in shipbuilding-comparison and assessment of current optical measuring methods. *Master thesis, Neubrandenburg University of Applied Sciences*, 50. https://digibib.hs-nb.de/resolve/id/dbhsnb_thesis_0000001931
- Ford, D., Housel, T., Hom, S., & Mun, J. (2016). Benchmarking Naval Shipbuilding With 3D Laser Scanning, Additive Manufacturing, and Collaborative Product Lifecycle Management.
- Goldan, M., & Kroon, R. J. (2003). As-built product modeling and reverse engineering in shipbuilding through combined digital photogrammetry and CAD/CAM technology. *Journal of ship production*, 19(02), 98–104. <https://doi.org/10.5957/jsp.2003.19.2.98>
- González-Jorge, H., Riveiro, B., Arias, P., & Armesto, J. (2012). Photogrammetry and laser scanner technology applied to length measurements in car testing laboratories. *Measurement*, 45(3), 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.11.010>
- Housel, T., Ford, D., Mun, J., & Hom, S. (2015). Benchmarking naval shipbuilding with 3D laser scanning, additive manufacturing, and collaborative product lifecycle management. Acquisition Research Program.
- Hexagon Manufacturing Intelligence (2022) Leica Absolute Tracker AT960. <http://www.hexagonmi.com/en-GB/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>. Accessed: 25 Jun 2022
- Hoffman, R., Friedman, P., & Wetherbee, D. (2023). Digital Twins in Shipbuilding and Ship Operation. In *The Digital Twin*, 799–847. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_28
- Jahraus, A., Lichti, D., & Dawson, P. (2015, June). Self-calibration of a structured light based scanner for use in archeological applications. In *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII* (Vol. 9528, 116–126). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2184607>
- Kersten, T. P., Przybilla, H. J., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F., & Misgaiski-Hass, M. (2016). Comparative geometrical investigations of hand-held scanning systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 507–514. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-507-2016>
- Luhmann, T. (2010). Close-range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photo-*

- grammetry and Remote Sensing*, 65(6), 558–569. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003>
- Maisano, D. A., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F., Capizzi, S., Pischedda, G., Laurenza, D., ... & Manca, G. (2022). Dimensional measurements in the shipbuilding industry: on-site comparison of a state-of-the-art laser tracker, total station and laser scanner. *Production Engineering*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01170-7>
- Martorelli, M., Pensa, C., & Speranza, D. (2014). Digital photogrammetry for documentation of maritime heritage. *Journal of Maritime Archaeology*, 9, 81–93. <https://doi.org/10.1007/s11457-014-9124-x>
- Rieke-Zapp, D., Tecklenburg, W., Peipe, J., Hastedt, H., & Haig, C. (2009). Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras – Comparing mechanical stabilisation versus parameterisation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(3), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.010>

Ivan BRUSAK^{1A}, Krzysztof BAKUŁA², Nataliia SAVCHUK^{1B}

¹ Institute of Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine,

^{1A} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931> ^{1B} <https://orcid.org/0000-0002-8210-5919>

² Faculty of Geodesy and Cartography, Warsaw University of Technology, 1, Polytechnic Square, 00-661 Warsaw, Poland, <https://orcid.org/0000-0001-7137-1667>

COMPARISON OF MODERN 3D MEASUREMENT METHODS FOR SPECIAL TASKS OF SHIPBUILDING INDUSTRY

Research presents modern technologies of 3D measurements in shipbuilding production parts. Special template of the keel detail was made for the research. The detail measurements with a laser tracker, laser scanning, industrial photogrammetry and handheld scanning are performed. Leica Absolute Tracker AT960-LR was used for Laser tracker measurements. Laser scanning was performed with Z+F Imager 5010. Nikon D2Xs photo camera was used for Industrial photogrammetry. Handheld scanner DPI-7 from DotProduct was also used for 3D measurements of the details. All collected data were imported into 3DReshaper software for comparison. The accuracy comparison for the specific equipment used in the study is performed. The recommendations for optimal equipment use and software products in this research are also included. The authors also present the assessment of the cost and time spent on the measurements.

Key words: 3D measurements; laser tracker; laser scanning; industrial photogrammetry; handheld scanning.

Надійшла 15.09.2023 р.