

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ 3D-СКАНІВ

Мета. Метою цього дослідження є практичне визначення достовірності одержаних результатів з використанням повністю автоматичного методу орієнтування сканів. Одержані результати визначають у двох різних програмних засобах. Одержані результати порівнюють з результатами орієнтування сканів методом суміщення спільних точок з використанням спеціальних марок – 3D-сфер. **Методика.** Запропоновано методику, яка ґрунтується на створенні декількох станцій сканування на короткій відстані та однієї на порівняно більшій відстані. Одна з дальних від об'єкта сканування станцій визначатиметься базисною. Ця станція має охопити усі опорні точки та об'єкти, по яких проводитиметься реєстрація сканів, а також більшу частину сканованого об'єкта. Контроль одержаних результатів проводитиметься шляхом моделювання поверхні 3D-сфер та їхнім порівнянням. **Результати.** У 2015 році під час археологічних розкопок на розі вулиць Краківська–Вірменська виникла потреба зафіксувати залишки історичної забудови. Ці залишки становили стіну протяжністю приблизно 24 м. Для забезпечення повноти відомостей використано наземне лазерне сканування як оптимальний метод 3D-знімання протяжних складних у будові об'єктів. Для мінімального впливу помилки орієнтування сканів та зменшення підготовчих робіт зі сканування використано методику базисного скану з високим рівнем перекриття та досліджено результати орієнтування сканів. **Наукова новизна.** Запропонована методика проведення наземного лазерного сканування забезпечує виконання ітеративного методу пошуку найближчої точки. Спосіб контролю одержаних результатів є найдостовірнішим з практичного погляду, адже ґрунтується на порівнянні розміщення груп точок та 3D-моделювання. **Практична значущість.** Використання застосованих методів дає змогу значно скоротити час на проведення польових робіт з наземного лазерного сканування, одержати дані з мінімальним впливом помилки реєстрації сканів.

Ключові слова: наземне лазерне сканування; методи реєстрації 3D-сканів; ітеративний метод пошуку найближчої точки; помилка реєстрації сканів.

Вступ

У більшості випадків 3D сканування вимагає проведення вимірювань з багатьох станцій стояння приладу. Це забезпечує повноту зібраних даних для моделювання поверхні. Внаслідок цього, на початковому етапі опрацювання 3D сканів виникає проблема трансформації вимірів з різних станцій сканування в єдину систему координат. Даний процес прийнято називати реєстрацією або взаємним орієнтуванням [Дорожинський, 2014]. Метою реєстрації є знаходження взаємного розташування і орієнтації одного скану сцени щодо іншого з найбільш точним сполученням областей перекриття [Цапко, Омелянюк, 2014]. В процесі орієнтування сканів виникає помилка реєстрації хмар точок в єдину точкову модель, яку слід віднести до методологічних помилок [Середович, 2009]. Тому, процес реєстрації сканів є дуже важливим етапом сканування, адже він забезпечує правильність вихідних даних зі сканування для подальшого опрацювання.

Для реєстрації сканів можна виділити 2 групи методів реєстрації сканів: польова та камеральна (рис. 1). Польова реєстрація сканів визначає, що хмари точок орієнтуються під час роботи сканера на станції сканування, а камеральна – після опрацювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Основні недоліки та переваги цих методів реєстрації, наведені у [Шульц, 2009] та [Ismail Abd El Hamid Mohamed el Khrachy, 2008].

Польові методи реєстрації сканів доступні при використанні лише певних моделей сканерів, в яких передбачено можливості центрування приладу, встановлення початкового напрямку. Камеральні методи реєстрації сканів є більш універсальними, їх можна використовувати для орієнтування будь-яких 3D сканів.

Останні версії програмних засобів для зшиття 3D сканів почали підтримувати функцію суміщення хмар точок (cloud to cloud) ітеративним методом пошуку найближчої точки (iterative closest point)

[Darion Shawn Grant, 2013], . Під час проведення практичних робіт із застосуванням ітеративного методу пошуку найближчої точки, виявлено, що використання різних версій одного й того ж програмного продукту дає різні показники з реєстрації тих же сканів. Враховуючи різні налаштування та зміну кількості ітерацій при орієнтуванні сканів, можна зробити висновок, що обчислені показники зшиття сканів не є надійними.



Рис. 1. Точкова модель 3D сфери.

Мета

Актуальним залишається методика проведення контролю результатів реєстрації сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки [Печенин. 2015]. Метою даного дослідження є практичне визначення достовірності одержаних результатів з використанням повністю автоматичного методу орієнтування сканів. Одержані результати визначаються в двох розповсюджених програмних засобах і порівнюються з результатами реєстрації сканів методом суміщення спільних точок з використанням спеціальних марок – 3D сфер.

Методика

Для одержання високих результатів зшиття сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки мають бути дотримані дві умови:

- високий рівень перекриття між сканами (згідно [Chow, Ebeling, Teskey, 2010] не менше 30%)
- високий рівень складності поверхні сканування, що забезпечує пошук характерних контурів [Autodesk knowledge network].

Для реалізації поставленого завдання пропонується методика, яка базується на створенні декількох станцій сканування на короткій відстані та однієї на відносно більшій відстані. Одна з дальніх від об'єкту сканування станцій визначатиметься базисною. Ця станція має охопити усі опорні точки та об'єкти, за якими проводитиметься реєстрація сканів, а також більшу частину сканованого об'єкту. До даної станції будуть підв'язуватися решта сканів, в результаті чого буде одержано точкову модель в системі координат базисного скану. Це дозволить провести реєстрацію сканів без накопичення помилки визначення центру опорних точок та об'єктів двома методами:

- метод суміщення спільних точок (об'єктів) за допомогою визначених спільних характерних точок та/або марок;
- ітеративний метод пошуку найближчої точки.

Сканування з базисної станції слід проводити з такими параметрами, які забезпечать точне

розпізнання усіх опорних точок та об'єктів. Решта станцій сканування повинні забезпечити детальне знімання об'єкту. Для цього сканер встановлюється на такій відстані від сканованої поверхні, яка зможе забезпечити малий крок сканування з мінімальними часовими затратами.

Для забезпечення високих показників реєстрації сканів методом суміщення спільних точок (об'єктів), зі станції стояння приладу на короткодистанційних сканах, має бути чітко видимі як мінімум три опорні сфери [Vjörn, Quintero, Lerma, 2008]. Кількість короткодистанційних станцій знімання залежить від протяжності об'єкту. Використання плоских марок ускладнюватиметься гострим кутом падіння лазерного променя із суміжних сканів – з цих причин виникатиме додаткова похибка у визначенні центру марки. Тому, оптимальним є використання об'ємних 3D сфер, які мають однакову видимість з різних кутів огляду [Lei Fan, 2015], [Mengmi Zhang, 2015] (рис. 2).



Рис. 2. Точкова модель 3D сфери.

Для визначення параметрів трансформації сканів, вишуковуються точки поверхні марок. За цими точками будується модель кулі вказаного розміру. При цьому слід знайти мінімальні значення функції [Franaszek, 2009], [Scene 6.2 User Manual, September 2016]:

$$E(x_c, y_c, z_c) = \arg \min \sum_{i=1}^m (R_i - r)$$

де x_c, y_c, z_c – координати центру сфери;

m – загальна кількість точок, по якій визначається розташування сфери;

r – вказаний радіус сфери;

R – відстань від центру сфери до точки [Van Genechten Vjörn, 2008].

Отже, точність реєстрації сканів залежить від точності розпізнання самих сфер. Точність розпізнання сфер залежить від кількості та якості промірів поверхні марки. Відповідно, саме від режиму сканування (роздільна здатність та точність вимірювання) залежить точність зшиття сканів.

Перевагою автоматичного режиму реєстрації сканів ітеративним методом пошуку найближчої точки полягає у економії часу в польових та камеральних умовах. Це досягається завдяки тому, що реєстрація сканів відбувається без участі опорних елементів (марки, кулі), але за умови високого рівня перекриття сканів та різноманітної геометрії об'єктів сканування.

Результати

Під час сканування залишків історичної забудови на розі вулиць Краківська-Вірменська у м. Львові (рис. 3) створено одну базисну (скан № 022), чотири короткодистанційних станцій стояння приладу (скани № 24, 26, 28, 30, 32) (рис. 4). Із семи станцій відскановано стіну протяжністю 24,2 м та висотою від 1,5 до 3 метрів [Маліцький, 2016].



Рис. 3. Об'єкт робіт.



Рис. 4. Схема проведення робіт з наземного лазерного сканування.

Крок сканування короткодістанційних сканів складає 7,67 мм на відстані 10 м, а базисної – 6,14 мм (табл. 1). Враховуючи відстань до залишків стіни, мінімальний крок сканування стіни складає 2,6 мм на скані № 030, а найбільший – 3,8 мм на скані № 024».

Таблиця 1

Параметри сканування історичної забудови

№ скану	Крок сканування, мм/10м	Відстань від стіни, м	Крок сканування на стіні, мм	Параметр якості	Швидкість сканування, точ/сек	К-сть опорних елементів
022	6,14	5,7	3,50	4x	122000	6
024	7,67	5	3,84	4x	122000	6
026	7,67	3,6	2,76	4x	122000	5
028	7,67	4,2	3,22	4x	122000	5
030	7,67	3,4	2,61	4x	122000	4
032	6,14	-	-	4x	122000	3

Ці параметри сканування забезпечують:

- виявлення та фіксування на базисному скані шести опорних елементів, які використовуватимуться для реєстрації сканів методом суміщення опорних точок (об'єктів);
- високий рівень перекриття базисного скану з короткодістанційними сканами;
- відтворення усіх характерних елементів поверхні стіни, які використовуватимуться в якості опорних точок на короткодістанційних сканах при реєстрації сканів ітеративним методом пошуку найближчої точки.

Згідно використаної методики, базисний скан № 22 охопив майже всю область сканування. Це означає, що суміжні скани мають певне перекриття між собою, що дозволяє використати ітеративний метод пошуку найближчої точки. Слід зауважити, що для реєстрації скану № 32 використано 7 опорну марку, а сам скан № 32 не містить дані сканування досліджуваної частини залишків забудови.

При цьому базисний скан має низьку степінь перекриття зі сканом 32, а 7 марка є невизначеною на ньому.

Використання ітеративного методу у ПЗ Faro Scene 6.2.4.30 передувала реєстрація сканів за виділеними структурними лініями (top view based registration), а опісля – пошуком найближчої точки (cloud to cloud registration).

Результати реєстрації сканів з подані на рис. 5.

Cluster/Scan 1	Cluster/Scan 2	Mean [mm]	< 4 mm [%]	Overlap [%]	Used Points	Details
Scan_uy030	Scan_uy028	3.862	51.7	85.2	53651	
Scan_uy030	Scan_uy026	3.781	52.9	70.3	43543	
Scan_uy028	Scan_uy024	3.146	60.6	63.4	43461	
Scan_uy028	Scan_uy022	3.082	61.5	70.3	46680	
Scan_uy032	Scan_uy022	2.943	62.2	49.6	35370	
Scan_uy026	Scan_uy024	2.896	65.3	75.6	46675	

Overall Statistics	
Mean:	2.5763 [mm]
< 4 mm:	67.8 [%]

Рис. 5. Результати реєстрації сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки (Faro Scene)

При використанні ПЗ Autodesk Recap 3.1, результати орієнтування сканів дещо інші (рис. 6).

scan name	overlap	balance	points < 6mm
scan_uy032	36.7%	1.2%	99.5%
scan_uy030	60.4%	1.8%	99.9%
scan_uy028	37.5%	1.9%	99.4%
scan_uy026	49.2%	6.5%	95.4%
scan_uy024	42.1%	5.4%	99.5%
scan_uy022	28.1%	9.1%	98.8%

Рис. 6. Результати реєстрації сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки (Autodesk Recap)

Незважаючи на невисокі показники балансу, при візуальному обстеженні результатів сканування не було виявлено явних помилок реєстрації.

Для оцінки результатів реєстрації, сфери, побудовані на базисному скані № 22 вважатимуться опорними. Моделі сфер, побудовані на решті сканів трансформуватимуть систему координат цих сканів у систему координат базисного скану. Для визначення помилок з орієнтування сканів, а точніше – відхилення від базисного скану, використовується наступна методика, в такій послідовності:

1. Після орієнтування сканів, точки суміжних сканів, при правильному орієнтуванні, мають утворювати поверхню сфери з незначними відхиленнями у межах точності роботи сканера. По одержаній хмарі точок виділено області, які належать поверхні сфер. За цими точками побудовано моделі сфер. При цьому радіус сфери не задається. За результатами побудови сфер, визначено розмір марок та положення їх центрів у двох програмних засобах (табл. 2, 3).

Під час побудови моделей сфер вибірка точок проводилася вручну. На якість вибірки вказує показник зовнішнього ухилу – максимальне відхилення точки від побудованої сфери. Показник внутрішнього ухилу, в основному, вказує на шуми серед точок сканування, тому він зазвичай є значно менший за зовнішній ухил. На якість зшиття сканів вказує показник середнього ухилу. Цей показник відображає типове зміщення (без залежності напрямку) серед точок сканування відносно

побудованої моделі марки. Згідно поданих результатів, середній ухил вкладається в межі точності роботи лазерного сканера, яким проводилися вимірювання – фазовий наземний сканер Faro Focus 3D 120. Це визначає правильність орієнтування сканів.

Таблиця 2

Центри опорних марок, реєстрації ітеративним методом (Faro Scene)

№	Координати центру сфер			п точ.	R сфери, м	Внутр. ухил, мм	Зовн. ухил, мм	Сер. ухил, мм
	X, м	Y, м	Z, м					
1	-1.261	-7.103	-2.277	1716	0.144	-7.2	4.0	0.9
2	1.500	-5.586	-0.904	1943	0.142	-5.6	25.9	2.0
3	-7.396	-9.419	-0.780	2493	0.146	-4.0	7.0	1.1
4	-10.182	-9.510	-1.842	4045	0.145	-4.2	8.2	0.9
5	-3.911	-7.897	-0.813	2188	0.145	-4.9	13.4	0.9
6	-4.255	-6.468	-2.670	2972	0.145	-3.6	4.8	0.9
7	-12.713	-11.662	-2.061	5049	0.146	-5.5	8.9	1.6

Таблиця 3

Центри опорних марок, реєстрації ітеративним методом (Autodesk ReCap)

№	Координати			N точок	R сфери, м	Внутр. ухил, мм	Зовн. ухил, мм	Сер. ухил, мм
	X, м	Y, м	Z, м					
1	-1.260	-7.104	-2.278	1750	0.144	-6.5	22.6	2.6
2	1.501	-5.587	-0.904	1918	0.144	-6.6	6.0	1.0
3	-7.397	-9.419	-0.784	2493	0.145	-6.4	6.7	1.2
4	-10.183	-9.510	-1.846	4051	0.145	-7.2	9.7	1.4
5	-3.912	-7.897	-0.816	2216	0.146	-7.6	16.0	1.7
6	-4.254	-6.470	-2.674	3047	0.147	-7.3	8.0	1.8
7	-12.714	-11.662	-2.064	5014	0.145	-7.3	5.5	1.6

Вибірка точок впливала на побудову моделі сфери. Втім, зважаючи на одноманітність відсіювання точок у двох випадках, коливання у розмірах відповідних сфер при реєстрації сканів за допомогою ПЗ Faro Scene та Autodesk ReCap коливається в межах 2 мм. Максимальне відхилення у положенні центру сфер спостерігається в координаті Z та досягає 4 мм.

2. Для визначення вихідного положення сфер, проведено реєстрацію сканів методом суміщення спільних точок програмним засобом Faro Scene 6.2.4.30. При цьому діаметр усіх сфер вказувався однаковий і рівний 0,144м. Враховуючи, що центри сфер використовуються в якості опорних точок, точність реєстрації сканів залежить від розходження координат центрів сфер суміжних сканів. У табл. 4. виділено координати центрів сфер базисного скану та координати тих самих сфер, які визначені при максимальній кількості точок на інших сканах. Розходження в координатах лежать в межах 1 мм.

Згідно поданих результатів, найбільші коливання в результатах реєстрації сканів спостерігаються по висоті (табл. 5).

При порівнянні центрів сфер, одержаних за результатами ітеративного пошуку найближчої точки та суміщення спільних точок, то найменші відхилення спостерігаються при орієнтуванні сканів за допомогою ПЗ Faro Scene (табл. 6).

Таблиця 4

Координати центрів сфер

№	22 базисний скан				24 скан				26 скан			
	X	Y	Z	п точ.	X	Y	Z	п точ.	X	Y	Z	п точ.
1	-1.261	-7.102	-2.277	376	-1.261	-7.102	-2.276	753	-1.261	-7.102	-2.275	178
2	1.501	-5.586	-0.904	691	1.501	-5.586	-0.904	550	1.501	-5.586	-0.902	460
3	-7.395	-9.417	-0.780	148	-7.395	-9.417	-0.780	334	-7.395	-9.417	-0.779	33
4	-10.182	-9.508	-1.842	105	-10.182	-9.508	-1.843	257	-	-	-	
5	-3.911	-7.896	-0.813	291	-3.911	-7.896	-0.813	717	-3.912	-7.896	-0.816	71
6	-4.255	-6.466	-2.670	359	-4.255	-6.467	-2.669	1253	-4.255	-6.467	-2.669	104
7	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
№	28 скан				30 скан				32 скан			
	X	Y	Z	п точ.	X	Y	Z	п точ.	X	Y	Z	п точ.
1	-1.262	-7.102	-2.277	347	-	-	-		-	-	-	
2	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
3	-7.395	-9.417	-0.780	822	-7.396	-9.417	-0.781	469	-7.396	-9.418	-0.780	705
4	-10.182	-9.508	-1.843	1038	-10.182	-9.508	-1.843	1553	-10.183	-9.507	-1.844	1060
5	-3.911	-7.896	-0.813	584	-3.911	-7.896	-0.813	219	-3.911	-7.896	-0.813	304
6	-4.255	-6.467	-2.669	955	-4.255	-6.467	-2.670	175	-	-	-	
7	-12.717	-11.659	-2.062	388	-12.716	-11.659	-2.061	1615	-12.712	-11.658	-2.062	3134

Таблиця 5

Різниця координат

№ марки	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм
1	-1.1	-0.8	-1.6
2	-0.2	-0.1	-2.4
3	-1.4	-1.0	-1.5
4	-0.9	-0.9	-1.4
5	-1.4	-0.9	-3.3
6	-0.6	-0.8	-0.9
7	-4.7	-1.0	-1.0

Таблиця 6

Середня квадратична помилка

№ марки	M_{Rescap} , мм	M_{Scenes} , мм
1	2.5	0.2
2	0.6	0.9
3	4.6	2.0
4	4.5	2.5
5	3.4	1.0
6	5.1	2.0
7	4.4	3.9

Наукова новизна і практична значущість

Запропоновано та апробовано особливості проведення польових робіт з наземного лазерного сканування з метою забезпечення орієнтування сканів автоматичним методом ітеративного пошуку

найближчої точки. Використання базисного скану з визначеними координатами опорних марок на ньому дає можливість зменшити помилку орієнтування сканів.

Провівши реєстрацію сканів різними методами з використанням різних програмних засобів проведено аналіз одержаних результатів.

Перспектива подальших досліджень полягає у незалежному визначенні положення центрів сфер за допомогою використання спеціальних марок провівши вимірювання тахеометром.

Висновки

При аналізі якості реєстрації сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки орієнтуватися на показники реєстрації не можна, так як ці показники не є надійними. Вони можуть значно розрізнятися в залежності від використаного програмного продукту, кількості сканів для опрацювання, тощо.

Для оцінки результатів сканування проведено порівняння результатів реєстрації сканів методом ітеративного пошуку найближчої точки з методом суміщення спільних точок. Встановлено, що середня квадратична помилка відхилення координат з використанням базисного скану, згідно запропонованого порядку проведення польових робіт, становить 2,5 мм у Faro Scene та 4,6 мм у Autodesk ReCap. Останній скан реєструвався з недостатнім рівнем перекриття і одна з марок не була визначена на базисному скані. Це привело до найбільших коливань координат центру сфер, визначеного за різних умов орієнтування 3D сканів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Дорожинський Л. О. Наземне лазерне сканування в фотограмметрії [Текст] : навч. посіб. / О. Л. Дорожинський ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. - 95 с.
- Маліцький. А. Ю. Методика побудови фронтального фотоплану залишків історичної забудови у м. Львові / III Міжнародна наукова конференція "Пам'ятки Тустані", 2016, стор. 181-182.
- Печенин В. А. Метод повышения точности работы алгоритма наилучшего совмещения измеренных и эталонных поверхностей / В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, М.А. Болотово International Scientific Conference Proceedings, Volume 1 "Advanced Information Technologies and Scientific Computing" 2015, с.105-109
- Середович В. А. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А.Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
- Шульц Р. В. Преимущества и недостатки различных методов сшивки лазерных сканов / Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. Вип. 9(143), 2009 р., 211 с.
- Цапко І.В. Совмещение трехмерных изображений, полученных в результате ручного лазерного сканирования / И.В. Цапко, М.Ю. Омелянюк. Вестник науки Сибири. 2014. № 4 (14), с.112-116.
- Autodesk knowledge network. Available at: <https://knowledge.autodesk.com/support/recap>
- Chow J. Low Cost Artificial Planar Target Measurement Techniques for Terrestrial Laser Scanning Jacky Chow, Axel Ebeling, and Bill Teskey, FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia, 11–16 April 2010
- Cloud to Cloud Registration for 3d Point Data. Theses and Dissertations. A dissertation submitted to the Faculty of Purdue University by Darion Shawn Grant, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2013, 143 p.
- Franaszek. M., Geraldine S. Cheok, Christoph Witzgall. Fast automatic registration of range images from 3D imaging systems using sphere targets. Automation in Construction, Vol. 18, Issue 3, May 2009, pp. 265–274.
- Ismail Abd El Hamid Mohamed el Khrachy. Towards an Automatic Registration for Terrestrial Laser Scanner Data. Theses and dissertations, Fakultat Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universitat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2008, 113 p.
- Lei Fan, Joel A. Smethurst, Peter M. Atkinson, William Powrie. Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning. Computers & Geosciences, Vol. 83, October 2015, pp. 54–64
- Mengmi Zhang. Accurate Sphere Marker-Based Registration System of 3D Point Cloud Data in Applications of Shipbuilding Blocks, Journal of Industrial and Intelligent Information Vol. 3, No. 4, December 2015, pp.318–323.
- Van Genechten Björn, Santana Quintero, Jose Luis Lerma, Erwin Heine. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Training material based on practical applications. Prepared by the Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness project (3DriskMapping), Version 4 June 2008, 241 p.

Надійшла 30.03.2017 р.