

¹ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, e-mail: maksim.o.biliavskiy@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-9270-5142>

² Кафедра вищої геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, e-mail: nazarii.v.danyliv@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2025.101.005>

ЦИФРОВЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ SLAM: АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У статті розглянуто питання цифрового картографування територій із застосуванням сучасного обладнання та інноваційних методів виконання топографо-геодезичних робіт. *Мета.* Дослідження сучасних методів картографування територій, а також обґрунтування підходів до виконання робіт із картографування за допомогою технології SLAM. *Методика та основні результати.* У дослідженні використано методику картографування територій за допомогою ручних лазерних сканерів із технологією SLAM. Здійснено рекогносцювання місцевості, закладено контрольні геодезичні пункти, виконано польові роботи сканером Stonex X120GO. Отримані хмари точок зіставлено із результатами тахеометричного знімання. Аналіз середніх квадратичних похибок підтвердив відповідність точності нормативним вимогам. *Наукова новизна та практична значущість.* Дослідження дало змогу оцінити ефективність застосування технології SLAM в наземних ручних лазерних сканерах як альтернативу традиційним видам топографічного знімання. Похибки під час застосування обладнання такого типу за умови правильного використання повною мірою задовольняють вимоги до точності виготовлення топографічних планів у масштабі 1:500, а в окремих випадках навіть 1:200, що уможливує ширше впровадження SLAM у практику топографо-геодезичних робіт. Застосування технології SLAM та сучасних ручних лазерних сканерів для виконання топографо-геодезичних та картографічних завдань може істотно знизити витрати коштів, ресурсів та сил із задіянням меншої кількості працівників та одиниць обладнання. У дослідженні оцінено можливості застосування технології SLAM та її точність. У статті доведено, що технологія SLAM та ручні 3D-сканери є точними та надійними інструментами виконання робіт у сучасних реаліях.

Ключові слова. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), ПЗ Digitals, картографування територій, лазерне сканування, програмний продукт, лідар (LIDAR), топографічний план, інтегрування сучасних підходів, GNSS-приймач, хмара точок, ручний сканер, топографо-геодезичні роботи.

Вступ

У наш час визначальну роль відіграє автоматизація виконання завдань, застосування нових передових технологій, методів та засобів. Автоматизацію активно впроваджують також у класичну геодезію та картографування. У традиційному розумінні картографування територій є трудомістким процесом, який зазвичай передбачає участь двох геодезистів і використання геодезичного обладнання, як правило, комбінації GNSS-приймачів та електронного тахеометра.

Цей процес потребує створення тимчасової геодезичної мережі для виконання тахеометричного знімання, а наступні етапи – коригувань вимірювань. У роботі беруть участь щонайменше двоє осіб: один оператор керує тахеометром, інший – утримує відбивач, забезпечуючи надійне знімання елементів місцевості [Khairuddin та ін., 2015].

Одним із найсучасніших та найефективніших підходів, який забезпечує істотне зменшення тривалості польових робіт, є застосування наземних лазерних сканерів у класичній геодезії. Для кращого розуміння принципу їхньої роботи необхідно проаналізувати відповідну технологію та методи збирання даних. Існує багато типів наземних лазерних сканерів різних виробників. Більшість сучасних лазерних 3D-сканерів є статичними: їх монтують на тринозі й вони працюють як фіксовані станції під час сканування. Останнім часом все більшої популярності набувають ручні лазерні сканери. Технологія застосування ручних лазерних сканерів виникла нещодавно і, на відміну від статичних, вони не потребують фіксованої позиції та можуть використовуватись безпосередньо у русі.

Лазерні 3D-сканери є потужними інструментами для збирання великих обсягів просторових

даних навколишнього середовища із використанням технології LiDAR [Shan & Toth, 2018]. Активний сенсор випромінює лазерні промені, які відбиваються від поверхонь і повертаються до сенсора. Система визначає просторове положення точок у 3D-просторі та об'єднує їх у детальну хмару точок. Для покращення результатів до хмари додається інформація про колір із знімків місцевості [Palomeg та ін., 2019], які зазвичай отримують панорамними камерами. Під час опрацювання та експорту RGB-компоненти додаються до хмари точок. Таку хмару із кольором називають текстурованою, а хмару, одержану в польових умовах у градаціях сірого, – інтенсивною.

3D-сканери застосовують у цифровому картографуванні [Alsadik & Karam, 2021] та моделюванні для таких завдань, як моніторинг деформацій, архітектурне моделювання та інші топографічні й інженерні проекти. Локалізація та орієнтація сканера під час роботи ґрунтуються на інтеграції даних GNSS й інерційної навігаційної системи (IMU). Точність сканування, відповідно, залежить від характеристик лазерного сенсора сканера, якості IMU [Chen та ін., 2017], а також точності GNSS-спостережень у контрольних точках. Ці точки використовують для зведення хмари точок до необхідної координатної та висотної систем [Taheri & Xia, 2021].

Фінальна координатна система визначається вибором користувача, завдяки чому методику зручно використовувати у різних країнах світу. Проте для забезпечення максимальної точності необхідно враховувати вибір системи координат та низку зовнішніх чинників.

Навіть наземні лазерні сканери не є бездоганними – точність знімання може залежати як від технічних характеристик обладнання, так і від зовнішніх умов. Одним із важливих чинників є кут нахилу сканера відносно поверхні землі. Оптимальний кут становить близько 180° , тобто основа сканера має бути якнайближче до горизонтальної площини. На результат також впливає здатність поверхні відбивати лазерне випромінювання. Дзеркальні або темні об'єкти поглинають більше енергії та гірше відбивають сигнал. Отже, колір, текстура, глянець або прозорість матеріалу істотно впливають на інтенсивність зворотного сигналу.

Критичними є й погодні умови, які можуть помітно впливати на результати й навіть унемож-

ливити використання даних. Сильний дощ або сніг спричиняють перешкоди та шуми у хмарі точок, спотворюючи її точність [Ridao & Ribas, 2019]. Тому вибір часу для виконання польових робіт є надзвичайно важливим.

Застосування ручних сканерів із технологією SLAM [Taheri & Xia, 2021] забезпечує комплексне відображення структури місцевості. На відміну від електронного тахеометра, який фіксує лише окремі точки, SLAM-сканери формують хмару точок усієї зони знімання вздовж маршруту оператора.

У результаті отримують деталізовану модель місцевості із геометрією, координатами та відмітками висоти. Оператор може повернутись до хмари точок на будь-якому етапі створення плану та одержати інформацію про розміри або конфігурацію об'єкта [Zhang та ін., 2021]. Це неможливо за традиційних методів і не потребує додаткових витрат, що істотно підвищує ефективність [Kazerouni та ін., 2022; Zhang et al., 2024].

Отже, картографування територій на основі SLAM – швидкий, ресурсоощадний і точний метод. Воно повністю відповідає вимогам до топографічного знімання у відповідних масштабах. Його точність співмірна із точністю традиційного геодезичного обладнання та методів знімання [Kim та ін., 2018; Yue та ін., 2024].

Методи та методика

Під час дослідження було реалізовано послідовність робіт, спрямованих на збирання та аналізування просторових даних для створення картографічної основи території дослідження. Попереднє аналізування технічного завдання дало змогу визначити основні вимоги до картографування та сформулювати план дій, у [Zhang et al., 2024] докладно описано підхід до попереднього етапу підготовки знімання. Після цього було здійснено рекогносціювання території, під час якого ідентифіковано найпридатніші ділянки для розміщення тимчасових геодезичних пунктів. Їх координування виконували відповідно до сучасних методик, аналогічно до підходів, описаних у роботі Huang [Huang, 2021].

Далі було виконано такі технічні етапи: закріплення контрольних пунктів на місцевості, на основі яких здійснено розрахунок середньоквадратичних похибок (СКП) вимірювань; збирання

просторових даних мобільним лазерним сканером із застосуванням SLAM-технології, ефективність якої у складних умовах доведено, як показано в дослідженні Alsadik & Karam (2021); опрацювання та аналіз результатів SLAM-картографування, зокрема розрахунок СКП отриманих даних відповідно до методик, запропонованих у праці Jia et al. [Jia et al., 2021]; порівняння новостворених картографічних матеріалів із даними попередніх топографічних знімків, що дало змогу оцінити відхилення у висотних і планових координатах (схожий підхід продемонстровано у роботі Droeschel & Behnke [Droeschel & Behnke, 2018]); визначення факторів, що впливають на точність SLAM-картографування, серед яких якість сенсорів, параметри обладнання та, особливо, умови знімання [Pierzchała et al., 2018].

Виконання переліку зазначених технічних етапів дає змогу створити цілісну картину об'єкта дослідження та гарантує формування якісних картографічних матеріалів для подальшого ефективного аналізу запропонованих методик на підходів, а також уможливорює якісний аналіз ходу робіт.

Виконання робіт та отримані результати

Для досягнення мети дослідження на визначеному інженерно-технічному об'єкті виконано низку польових досліджень. Перед початком робіт ми проаналізували технічне завдання на виготовлення топографічного плану місцевості об'єкта критичної інфраструктури, а саме однієї силової підстанції ПС 330 кВ Львівської області. Завдання передбачало здійснення геодезичних вишукувань у межах двох зон: РУ 35 кВ та РУ 110 кВ. Топографо-геодезичні вишукування у межах РУ 35 кВ виконувала бригада із двох геодезистів – авторів статті. А у зоні РУ 110 кВ геодезичні вишукування уже здійснювались раніше та були наявні картографічні матеріали у вигляді топографічного плану місцевості у масштабі 1:500. Тому завдання передбачало рекогносрування та перевірку зони з метою визначення наявності або відсутності фактичних змін місцевості. Надалі ці картографічні матеріали були використані як додатковий інструмент порівняння точності картографування на основі хмари точок, отриманої за допомогою технології SLAM.



Рис. 1. Маркування контрольних точок фарбою



Рис. 2. Фіксація координат контрольних точок – пункт

Насамперед було здійснено рекогносрування території та визначено місця тимчасового закладення контрольних геодезичних пунктів, а також виконано огляд зони РУ 110 кВ та встановлено, що візуальних змін місцевості не відбулось. Детальніше територію ми проаналізували після отримання результатів польових робіт. Для закладення тимчасових опорних пунктів було використано ідею маркування точок фарбою та фіксацію координат таких пунктів за допомогою GNSS-приймача Stonex S700A у режимі real time kinematic (RTK) з фіксованим рішенням, який забезпечував точність (8 мм + 1 ppm) у плані та (15 мм + 1 ppm) по висоті (рис. 1–3).



*Рис. 3. Фіксація координат
контрольних пунктів – пункт 2*



Рис. 4. Контрольна точка 5



Рис. 5 Фіксація точки сканером



Рис. 6. Встановлення сканера на контрольну точку



Рис. 7. Контрольна точка 13 на місцевості

Після закріплення пунктів на місцевості ці самі пункти зафіксували лазерним сканером Stonex X120GO. Для цього було використано центраційну платформу-підставку сканера із нанесеним на ній центром для встановлення на потрібні пункти, як показано на рис. 4–7. Після встановлення підставки зі сканером на пункт у контролері додавали контрольний пункт із відповідним номером точки. Це потрібно для подальшого врівноваження хмари точок та встановлення для неї відповідної системи координат

та висот. Ми використовували систему координат СК-63 та Балтійську систему висот, оскільки в такій планово-висотній системі координат було виконано знімання в зоні РУ 110 кВ, результати якого нам передали у електронному вигляді.

Після закріплення пунктів на місцевості було проведено фіксацію цих же пунктів лазерним сканером Stonex X120GO. Для цього було використано центраційну платформу-підставку сканера із нанесеним на ній центром для встановлення на потрібні пункти, як це показано на Рис. 4-7. Після встановлення підставки зі сканером на пункт додаємо у контролері контрольний пункт із відповідним номером точки. Такі процеси виконуються для подальшого врівноваження хмари точок та встановлення для неї відповідної системи координат та висот. У нашому випадку використовувалась система коор-

динат СК-63 та Балтійська система висот - це пов'язано з тим, що в такій планово-висотній системі координат виконане знімання в зоні РУ 110 кВ і передане нам у електронному вигляді.

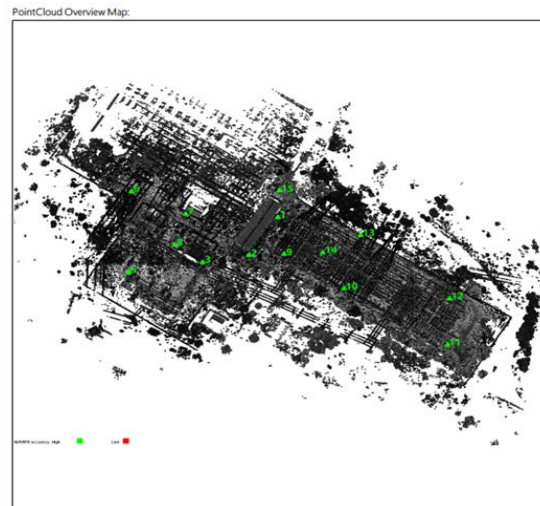


Рис. 8. Схема розміщення контрольних точок треку №1 на хмарі точок

Звіт із визначення СКП вимірювань для треку № 1

№	East X	North Y	Up Z	Measure x	Measure y	Measure z	DX	DY	DXY	DZ
5	1 321 473,628	5 518 000,262	282,586	1 321 473,591	5 518 000,289	282,585	0,037	-0,027	0,046	0,001
3	1 321 534,263	5 518 009,339	283,81	1 321 534,232	5 518 009,335	283,824	0,031	0,004	0,031	-0,014
8	1 321 511,17	5 518 025,398	283,698	1 321 511,124	5 518 025,397	283,713	0,046	0,001	0,046	-0,015
6	1 321 474,737	5 518 075,238	282,996	1 321 474,775	5 518 075,189	283,01	-0,038	0,049	0,062	-0,014
7	1 321 520,31	5 518 054,248	284,277	1 321 520,271	5 518 054,251	284,302	0,039	-0,003	0,039	-0,025
8	1 321 511,166	5 518 025,398	283,728	1 321 511,124	5 518 025,357	283,723	0,042	0,041	0,059	0,005
3	1 321 534,223	5 518 009,339	283,81	1 321 534,232	5 518 009,335	283,834	-0,009	0,004	0,01	-0,024
2	1 321 572,577	5 518 015,923	284,599	1 321 572,546	5 518 015,981	284,555	0,031	-0,058	0,066	0,044
10	1 321 650,699	5 517 984,79	284,934	1 321 650,732	5 517 984,765	284,916	-0,033	0,025	0,041	0,018
11	1 321 766,046	5 517 927,488	284,691	1 321 766,085	5 517 927,482	284,706	-0,039	0,006	0,039	-0,015
9	1 321 601,303	5 518 016,991	284,914	1 321 601,351	5 518 016,959	284,898	-0,048	0,032	0,058	0,016
14	1 321 633,192	5 518 018,399	284,934	1 321 633,245	5 518 018,401	284,92	-0,053	-0,002	0,053	0,014
12	1 321 737,688	5 517 975,466	284,696	1 321 737,704	5 517 975,452	284,711	-0,016	0,014	0,021	-0,015
13	1 321 664,488	5 518 034,511	284,372	1 321 664,435	5 518 034,518	284,363	0,053	-0,007	0,053	0,009
15	1 321 697,281	5 518 075,365	284,705	1 321 697,297	5 518 075,335	284,716	-0,016	0,03	0,034	-0,011
1	1 321 596,149	5 518 051,169	285,034	1321596 161	5 518 051,239	285,016	-0,012	-0,07	0,071	0,018
2	1 321 572,577	5 518 015,929	284,559	1 321 572,546	5 518 015,918	284,555	0,031	0,011	0,033	0,004
9	1 321 601,303	5 518 016,891	284,904	1 321 601,351	5 518 016,939	284,898	-0,048	-0,048	0,068	0,006
	Mean	Error					-0,002	0,002	0,044	0,002
	RMSE	(m.)					0,037	0,039	0,047	0,018

Під час ув'язування хмари точок закладено та використано 15 пунктів. Для виконання робіт було створено трек (маршрут), який охоплював усю зону робіт. Також ми визначили середню квадратичну похибку визначення координат з хмари точок для треку, наведену в табл. 1. На рис. 8 показано місце розташування контрольних точок у межах треку (в межах окремої хмари точок). Середні квадратичні похибки визначення планово-висотного положення з хмари точок становлять: $DX = 0,037$ м, $DY = -0,039$ м, $DXY = 0,047$ м, $DZ = 0,018$ м. У цьому контексті значення DZ відображає відхилення висоти в Балтійській системі висот відносно контрольних точок. Це позначення вибрано для збереження оригінальної структури звіту, згенерованого програмним забезпеченням, та забезпечення цілісності даних. Програмне забезпечення, використовуване зі сканером, – нова розробка, в якій значення DZ застосовують для позначення відхилень висоти незалежно від використовуваної системи відліку висоти.

Досягнутий рівень точності повністю відповідає вимогам до створення картографічної продукції, визначеним чинним законодавством України та правилами виконання топографічних знімків. Зокрема, для топографічного плану території в масштабі 1:500 допустима похибка не повинна перевищувати 0,1 мм на плані, що відповідає 5 см на місцевості згідно із масштабом топографічного плану. Результати розрахунку СКП наведено в табл. 1.

Під час аналізу табл. 1 може скластись враження про можливу наявність системного зсуву, що пов'язано з деякими значеннями таблиці, а саме: візуально таблиця містить по DY 11 різниць зі знаком “+” з 15 поданих значень. Отже, щоб перевірити результати, необхідно виконати перевірку гіпотези на нормальний розподіл випадкової величини. Щоб перевірити статистичний розподіл відхилень координат, ми використали тест Шапіро – Вілка до наборів залишків у напрямках X , Y та Z (DX , DY , DZ) із треку. Отримано такі результати: для DX (p -value = 0,0226), для DY (p -value = 0,1977), для DZ (p -value = 0,1739). Вони вказують на нормальний розподіл цих компонентів ($p > 0,05$), тільки

p -значення для DX становило 0,0226, що свідчить про відхилення від норми ($p < 0,05$). Це відхилення в DX , ймовірно, спричинено геометричними особливостями траєкторії сканування. Зокрема, трек має більшу ширину, ніж довжину, що робило X -компонент чутливішим до локалізованого дрейфу та ефектів замикання циклу, притаманних скануванню на основі SLAM. Незважаючи на це, середньоквадратична похибка DX (RMSE = 0,037 м) залишається в допустимих межах для топографічного плану масштабу 1:500, що підтверджує надійність вимірювань. Для додаткової перевірки на можливий зсув у роботі виконано порівняння картографічних продуктів, які є результатами польових робіт, здійснених різним обладнанням та різними методами на тому самому об'єкті.

Особливістю SLAM-технології у ручних електронних сканерах є те, що безпосереднє зшивання хмари точок відбувається у режимі реального часу. На рис. 9 можна побачити, як на контролері відображаються сектори набору даних, у межах яких в певний момент часу (у певну секунду) фіксується положення об'єктів місцевості (позначені білими конусоподібними контурами на контролері). А на рис. 10 зображено, як відбувається фіксація маршруту слідування у середовищі точок, а також як саме хмара точок наповнюється елементами місцевості.

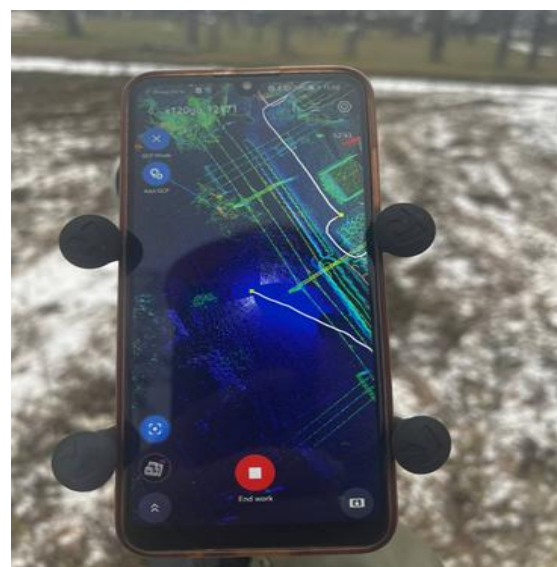


Рис. 9. Відображення сектору набору даних на контролері

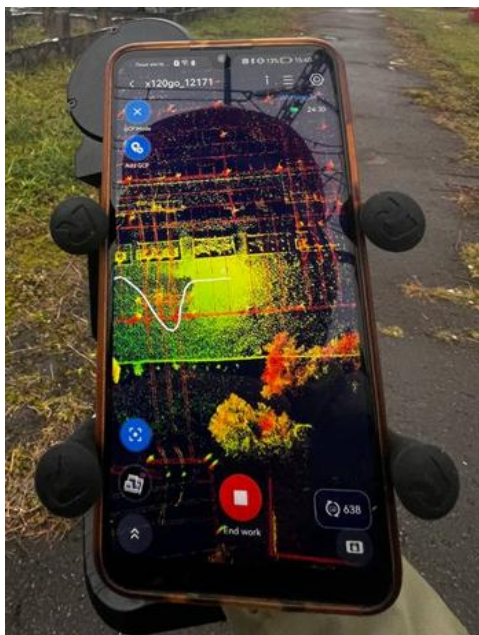


Рис. 10. Фіксація маршруту у середовищі хмари точок на контролері

Відзначимо надзвичайно позитивний аспект цього процесу, адже він не потребує залучення додаткових дороговартісних програмних пакетів, які використовують у роботі із деякими видами сканерів для зшивання хмари точок, а також дає змогу уникнути помилок, які користувач може допустити у разі ручного зшивання хмари точок, як це відбувається під час роботи з даними зіф стаціонарних наземних лазерних сканерів. Після завершення польових робіт ми отримали готову хмару точок, яку імпортуємо з контролера на комп'ютер та завантажуємо у програмне середовище SLAM GOpost, як показано на рис. 11. Тепер можна додатково надати хмарі точок кольору, об'єднавши сам набір точок зі знімками, що синхронно, в автоматичному режимі, виконували камерами ручного сканера. У програмному середовищі SLAM GOpost можна поєднати хмару точок із даними, отриманими за допомогою Lidar, та із фото з об'єкта місцевості, за допомогою яких можна надати хмарі точок кольорового забарвлення, яке відповідатиме природним кольорам. Візуалізацію хмари точок після опрацювання результатів у програмному середовищі SLAM GOpost наведено на рис. 12, 13. У градієнтному кольорі висот місцевості на ній також можна побачити маршрут руху оператора під час виконання польових робіт – візуально він позначений безперервною лінією білого кольору.

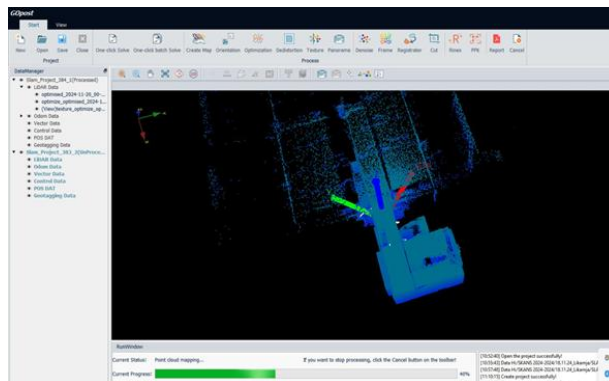


Рис. 11. Завантаження даних у програмне середовище SLAM GOpost

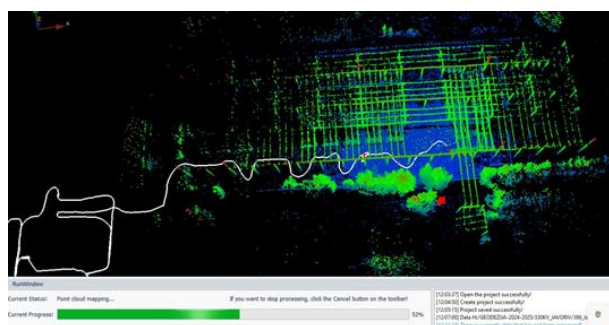


Рис. 12. Відображення маршруту в програмному середовищі SLAM GOpost

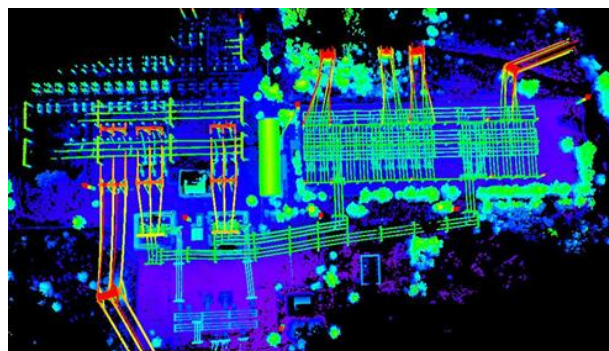


Рис. 13. Візуалізація хмари точок після опрацювання результатів у програмному середовищі SLAM GOpost

Електронні цифрові карти в Україні переважно створюють за допомогою програмного пакета Digitals. Ця програма на території нашої держави унікальна та надзвичайно зручна для вирішення питань, пов'язаних зі створенням електронних цифрових планів та карт завдяки зручному інтерфейсу, простоті застосування, економічній доступності та можливості інтегрувати різні набори умовних знаків, редагувати наявні набори умовних позначень. Крім цього, такий програмний продукт легко поєднується із

іншими програмами, тобто дає змогу імпортувати дані, отримані за допомогою інших програмних продуктів, такі як ортофотоплани, плани, зображення або хмари точок. Для того щоб інтегрувати нашу хмару точок у програмний пакет Digitals, можна використати декілька варіантів подальшого розвитку подій та методів імпорту даних, кожен із яких допустимий, проте детально ми розглянемо саме той метод, який ми використали для вирішення цього завдання.

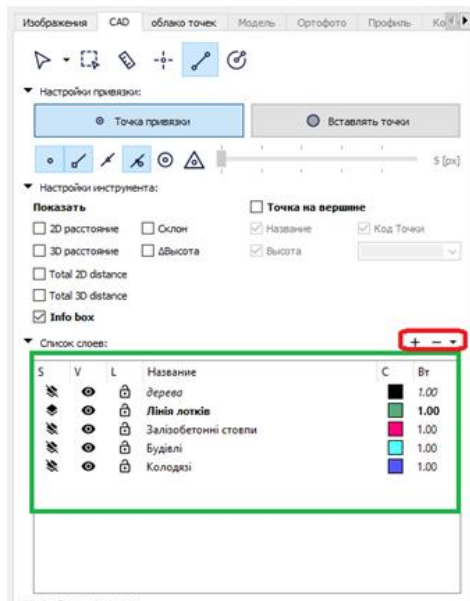


Рис. 14. Створення шарів у робочому середовищі програми

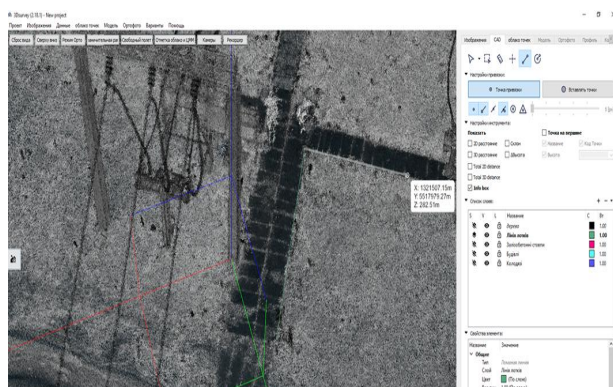


Рис. 15. Викреслення об'єктів місцевості на хмарі точок

Перший із можливих варіантів полягає безпосередньо в можливості імпортувати хмару точок із розширенням .las у робоче середовище за допомогою меню "Файл – Відкрити – LAS foemat – відкрити". Другий варіант, той, що використали ми, полягає у залученні додаткового програмного пакета, який дає змогу якісно оглядати, повертати та обтинати хмару точок у потрібних зонах та

формах – програмного продукту 3DSurvey. Ця програма чудово підходить для роботи із хмарами точок, крім того, у робочому середовищі одразу є можливість створення шарів (рис. 14) із вказанням назви шару умовних позначень та кольору лінійних елементів. Із недоліків програми важливо виділити те, що основними доступними елементами викреслення у цьому програмному пакеті є лінія та точка. Отже, ми опрацюємо матеріали, виділяючи основні елементи та контури місцевості безпосередньо з хмари точок, одразу вносячи їх у потрібний шар умовних позначень (рис. 15). Отримавши базовий інформативний набір даних, який, як вже зазначено вище, складатиметься переважно із лінійних та точкових елементів, виконуємо функцію експорту даних, що можна зробити за допомогою консолі, як показано на рис. 16.

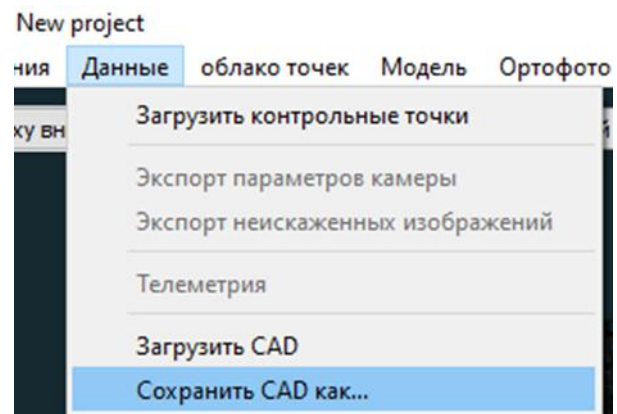


Рис. 16. Функція експорту даних

Після експорту даних виконуємо завантаження у середовище Digitals. Отриманий результат наведено на рис. 17. Подальше опрацювання даних полягає у комбінуванні доступних методів картографування для формування ефективного комплексу дій, який забезпечить швидке створення та опрацювання матеріалів польових робіт.

Саме тому пропонуємо поєднати класичні та некласичні методи – лінійно-точковий каркас даних (рис. 17) із ортофотопланами місцевості, у вигляді яких буде застосовано зображення хмари точок із різним градієнтним наповненням, різною щільністю точок, різними розмірами точки та різною контрастністю зображення. Комбінування цих методів забезпечує створення якісного зображення місцевості, приклад якого наведено на рис. 18, 19.

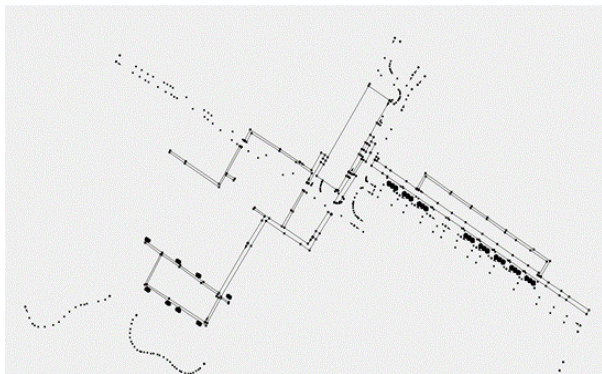


Рис. 17. Завантаження даних у середовище Digitals

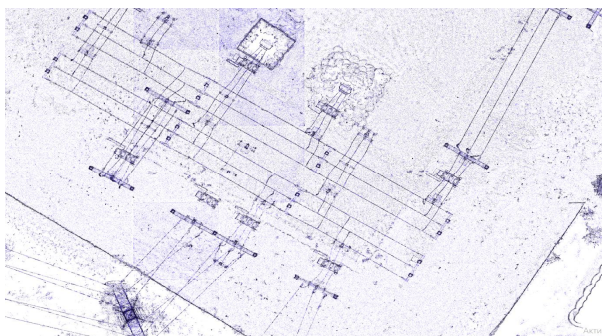


Рис. 18. Вигляд фрагмента ортофотоплану - скориговано розмір відображених точок та контрастність



Рис. 19. Вигляд фрагмента ортофотоплану - скориговано насиченість хмари точок та колір відображення

Інтегрування у сучасні інженерно-геодезичні та топографічні роботи комплексного підходу до цифрового картографування території із залученням комплексу різних програмних продуктів дає змогу швидко та якісно сформувати топографічний план місцевості у потрібному масштабі, а також гарантує зниження вартості робіт, а економічні показники можуть бути вирішальними у сучасних реаліях воєнного часу. Швидкість виконання робіт у польових умовах у наших реаліях

також може відігравати визначальну роль у безпеці працівників, що є пріоритетом у наш час.

Після завантаження матеріалів польових робіт та імпортування їх у програмне середовище Digitals відбувається класичний процес картографування із забезпеченням вимог до топографічних планів визначеного масштабу. За результатами такого опрацювання ми викреслили план території визначеного об'єкта у масштабі 1:500 (вибір масштабу плану зумовлений технічними умовами виконання робіт та технічним завданням на виконання робіт), фрагмент якого подано на рис. 20. Після формування топографічного плану ми додатково виконали аналітичне дослідження точності топографічного плану на основі порівняння положення просторових об'єктів місцевості на топографічному плані, сформованому за результатами цифрового картографування території із застосуванням технології SLAM, та матеріалах топографічного знімання, отриманих за результатами цифрового картографування із залученням класичного обладнання – електронного тахеометра та GNSS-приймача. Такий порівняльний аналіз суто інформативний та пізнавальний, оскільки застосування технології SLAM обґрунтоване визначенням СКП вимірювань, здійснених раніше. Для здійснення порівняльного аналізу було вибрано декілька випадкових елементів місцевості та визначено розбіжності у просторовому положенні за допомогою встановлення лінійного відхилення. За результатами такого аналізу, наведеними на рис. 21, 22, можна підсумувати, що лінійні відхилення між об'єктами, зображеними на топографічних планах, становлять 3–5 см, що є чудовим результатом, зважаючи на експериментальне застосування технології SLAM та інноваційне впровадження такої технології у сферу топографо-геодезичних та картографічних робіт.

Отже, можна відзначити ефективність та очевидну доцільність застосування технології у сучасних реаліях зменшення кількості надзвичайно затребуваних професійних кадрів у сфері геодезичних послуг. Розроблення та інтегрування інноваційних підходів та сучасного обладнання у класичні геодезичні процеси є надзвичайно важливим та першочерговим завданням спеціалістів цієї галузі, адже нове бачення, нові підходи до класичних завдань дають змогу

оптимізувати витрати на такі роботи й істотно пришвидшити виконання завдань зі збереженням якості кінцевих матеріалів. Інтегрування сучасних підходів є критично важливим та визначаль-

ним показником, який дає змогу рухатись в ногу з часом, наслідуючи приклад прогресивних світових країн-лідерів та переймаючи досвід оптимізації та підвищення ефективності процесів.



Рис. 20. Фрагмент топографічного плану місцевості у масштабі 1:500

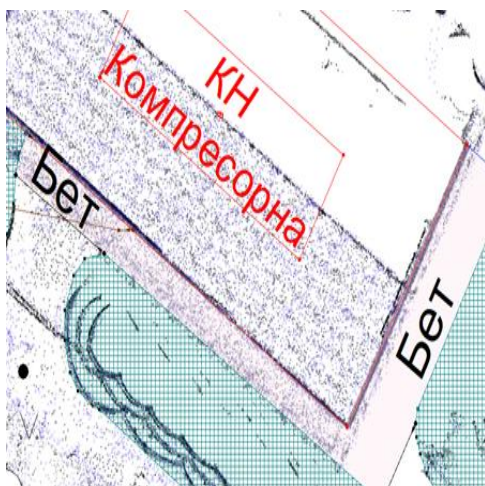


Рис. 21. Порівняння планового положення будівлі на наявному топографічному плані із положенням контурів будівлі на хмарі точок

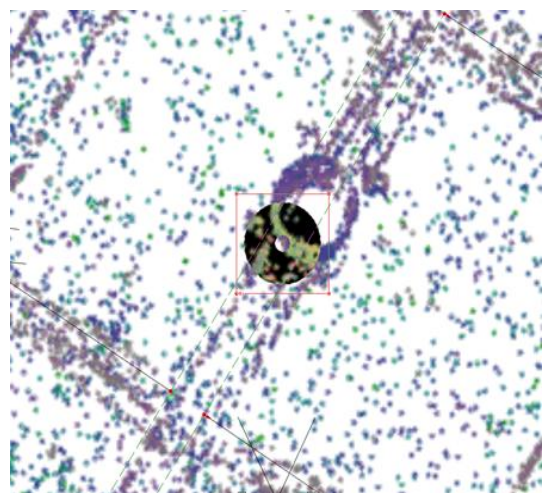


Рис. 22. Порівняння планового положення електричної опори на наявному топографічному плані із положенням опори на хмарі точок

Наукова новизна та практична значущість

Дослідження дає змогу оцінити ефективність застосування технології SLAM у наземних руч-

них лазерних сканерах як альтернативи традиційним видам топографічного знімання. Похибки у разі застосування такого типу обладнання за

умови правильного використання повною мірою задовольняють вимоги до точності виготовлення топографічних планів у масштабі 1:500, а в окремих випадках навіть 1:200, що уможливило ширше впровадження SLAM у практику топографо-геодезичних робіт. Застосування технології SLAM та сучасних ручних лазерних сканерів для виконання топографо-геодезичних та картографічних завдань може істотно знизити витрати коштів, ресурсів та сил із задіянням меншої кількості працівників та одиниць обладнання. У дослідженні оцінено можливості застосування технології SLAM та її точність. У статті доведено, що технологія SLAM та ручні 3D-сканери є точними та надійними інструментами виконання робіт у сучасних реаліях.

Висновки

Дослідження застосування технології SLAM для цифрового картографування територій з використанням ручних лазерних сканерів дало змогу отримати результати щодо точності та ефективності запропонованого методу. Польові роботи, виконані із використанням сканера Stonex X120GO, продемонстрували високий рівень точності отриманих даних, які в кінцевому вигляді відповідають нормативним та правовим вимогам щодо виготовлення топографічних планів у масштабі 1:500, а в окремих випадках навіть 1:200, що є надзвичайно високим показником. Також під час робіт було визначено та проаналізовано СКП вимірювань, які виникають у разі використання вибраного методу виконання польових робіт. Аналіз СКП доводить, що отримані значення в межах допустимих значень. Це вкотре доводить, що потенціал застосування технології SLAM-картографування як альтернативи традиційним геодезичним методам є надзвичайно високим, потребує пильної уваги та швидкої інтеграції у геодезичні процеси, оскільки забезпечує підвищення ефективності та зниження рівня витрат на високоякісні польові роботи у галузі цифрового картографування територій.

Роль дослідження полягає у тому, що воно доводить: використання технології SLAM у сучасних ручних лазерних сканерах істотно зменшує тривалість виконання польових робіт. Застосування такого сучасного обладнання дає змогу опрацювати великі площі за короткий проміжок часу, гарантуючи отримання якісного набору даних та створення детальних і точних

тривимірних моделей місцевості, на основі яких можна виконувати роботи із картографування територій.

Проте також потрібно відзначити певні особливості використання сучасних підходів у картографічних роботах. Хоча технологія SLAM і має вагомі переваги, такі як швидкість опрацювання та економія ресурсів, є також певні обмеження, зокрема, можливі впливи зовнішніх факторів на точність сканування. Це погодні умови (сніг та дощ можуть створювати додаткові шуми та перешкоди під час набору даних), типи поверхонь та інші технічні аспекти, що впливають на ефективність використання цієї технології. Для досягнення максимальної точності й достовірності результатів необхідно постійно урахувати ці фактори. Загалом результати дослідження дають достовірну інформацію про те, що технологія SLAM у поєднанні з лазерними сканерами надзвичайно перспективна – це, власне, новий напрям розвитку геодезичних та картографічних робіт у сучасних реаліях. Такі інновації дають змогу не тільки підвищити ефективність робочих процесів, але й істотно розширити можливості в умовах обмежених ресурсів або складних природних умов. Варто відзначити, що інтеграція SLAM у сучасну практику картографування в короткій перспективі може відіграти визначальну роль в оптимізації процесів виготовлення цифрових карт і моделей місцевості.

Отже, застосування технології SLAM для картографування територій є надійним і високоефективним методом, що повністю відповідає вимогам сучасної геодезії та картографії, має високий потенціал для подальшого розвитку та впровадження у різноманітних геодезичних, інженерних та будівельних проєктах.

Список літератури

- Alsadik, B., & Karam, S. (2021). The simultaneous localization and mapping (SLAM): An overview. *Surveying and geospatial engineering journal*, 1(2), 1–12. <https://doi.org/10.38094/sgej1027>
- Chen, M., Yang, S., Yi, X., & Wu, D. (2017, July). Real-time 3D mapping using a 2D laser scanner and IMU-aided visual SLAM. In *2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)* (pp. 297–302). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311877>
- Chong, T. J., Tang, X. J., Leng, C. H., Yogeswaran, M., Ng, O. E., & Chong, Y. Z. (2015). Sensor technologies and simultaneous localization and mapping (SLAM). *Procedia Computer Science*, 76, 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.336>

- Droeschel, D., & Behnke, S. (2018, May). Efficient continuous-time SLAM for 3D lidar-based online mapping. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 5000–5007). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461000>
- Huang, L. (2021, November). Review on LiDAR-based SLAM techniques. In *2021 International conference on signal processing and machine learning (CONF-SPML)* (pp. 163–168). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONF-SPML54095.2021.00040>
- Jia, S., Liu, C., Wu, H., Zeng, D., & Ai, M. (2021). A cross-correction LiDAR SLAM method for high-accuracy 2D mapping of problematic scenario. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 367–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.004>
- Kazerouni, I. A., Fitzgerald, L., Dooly, G., & Toal, D. (2022). A survey of state-of-the-art on visual SLAM. *Expert Systems with Applications*, 205, 117734. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117734>
- Khairuddin, A. R., Talib, M. S., & Haron, H. (2015, November). Review on simultaneous localization and mapping (SLAM). In *2015 IEEE international conference on control system, computing and engineering (ICCSC)* (pp. 85–90). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSC.2015.7482163>
- Kim, P., Chen, J., & Cho, Y. K. (2018). SLAM-driven robotic mapping and registration of 3D point clouds. *Automation in Construction*, 89, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.009>
- Palomer, A., Ridao, P., & Ribas, D. (2019). Inspection of an underwater structure using point cloud SLAM with an AUV and a laser scanner. *Journal of field robotics*, 36(8), 1333–1344. <https://doi.org/10.1002/rob.21907>
- Pierzchała, M., Giguère, P., & Astrup, R. (2018). Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 217–225.
- Shan, J., & Toth, C.K. (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (2nd ed.). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.034>
- Taheri, H., & Xia, Z. C. (2021). SLAM; definition and evolution. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 97, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104032>
- Yue, X., Zhang, Y., Chen, J., Chen, J., Zhou, X., & He, M. (2024). LiDAR-based SLAM for robotic mapping: state of the art and new frontiers. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 51(2), 196–205. <https://doi.org/10.1108/IR-09-2023-0225>
- Zhang, S., Zheng, L., & Tao, W. (2021). Survey and evaluation of RGB-D SLAM. *IEEE Access*, 9, 21367–21387.
- Zhang, S., Zheng, L., & Tao, W. (2021). Survey and evaluation of RGB-D SLAM. *IEEE Access*, 9, 21367–21387.
- Zhang, Y., Shi, P., & Li, J. (2024). 3D lidar slam: A survey. *The Photogrammetric Record*, 39(186), 457–517. <https://doi.org/10.1111/phor.12497>

Maksim BILIAVSKYI¹*, Nazarii DANYLIV²*

¹ Department of Engineering Geodesy of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: maksim.o.biliavskiyi@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-9270-5142>

² Department of Higher Geodesy and Astronomy of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: nazarii.v.danyliv@lpnu.ua

DIGITAL MAPPING OF TERRITORIES USING SLAM TECHNOLOGY: ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE RESULTS OBTAINED

The article addresses the issues of digital mapping of territories using modern equipment and innovative methods for performing topographic and geodetic work. *Objective.* To study modern territorial mapping methods and justify mapping approaches using SLAM technology. *Methods and results.* The study employed a territorial mapping method using handheld laser scanners with SLAM technology. Terrain reconnaissance was conducted, control geodetic points were established, and fieldwork was performed using a Stonex X120GO scanner. The acquired point clouds were compared with the tacheometric survey results. Analysis of mean square errors confirmed that the accuracy met regulatory requirements. *Scientific novelty and practical significance.* This study enables the evaluation of SLAM technology in ground-based handheld laser scanners as an alternative to traditional topographic surveying methods. When used correctly, this type of equipment fully meets the accuracy requirements for topographic plans at a scale of 1:500 and, in some cases, even 1:200. This, in turn, creates opportunities for the broader implementation of SLAM in topographic and geodetic practices. Applying SLAM technology and modern handheld laser scanners for topographic, geodetic, and mapping tasks can significantly reduce costs, resource consumption, and labor efforts while requiring fewer personnel and pieces of equipment. The study evaluates the possibilities of using SLAM technology and its accuracy. The article proves that using SLAM technology and handheld 3D scanners is an accurate and reliable tool for performing work in modern realities.

Key words: SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), digitals software, territory mapping, laser scanning, software product, LIDAR, topographic plan, integration of modern approaches, GNSS receiver, point cloud, handheld scanner, topographic and geodetic works.

Надійшла 29.03.2025 р.