

Скорик М.А., аспірант, 3 курс, PhD-184-23-2,
Факультет гірничої справи, природокористування та будівництва
Котенко В.В. к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ХМАРИ ТОЧОК БЛОКУ ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

Актуальність теми. В умовах переходу гірничодобувної промисловості до концепції Індустрії 4.0, створення цифрових двійників складів готової продукції стає необхідною умовою ефективного менеджменту. Для каменєобробних підприємств критично важливим є точний облік гранітних блоків, геометричні параметри яких безпосередньо впливають на вихід корисної продукції (слябів). Традиційні методи обмірів є суб'єктивними та трудомісткими. На ринку з'являються доступні рішення на базі споживчих пристроїв (смартфонів з LiDAR), портативних SLAM-сканерів та БПЛА. Однак, питання меж застосування цих технологій, особливо при масштабуванні від одиничних об'єктів до реальних промислових майданчиків, залишається недостатньо вивченим.

Постановка задачі. Метою роботи є експериментальне порівняння трьох методів отримання щільних хмар точок: аерофотограмметрії (UAV), мобільного лазерного сканування (SLAM) та наземної фотограмметрії за допомогою смартфона. Ключовим завданням є визначення ефективності кожного методу при скануванні майданчика середніх розмірів (22×17 м) з великою кількістю об'єктів (57 блоків) та виявлення причин виникнення геометричних артефактів при використанні не професійного обладнання.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися на відкритому складі блочної сировини. Еталонна геодезична мережа складалася з 26 контрольних марок (5×5 см), закріплених на гранітних блоках. Їх координати визначено електронним тахеометром SOUTH NTS-355R. Для геопросторового вирівнювання всіх трьох моделей використовувалася єдина система з 5 наземних опорних точок (GCP).

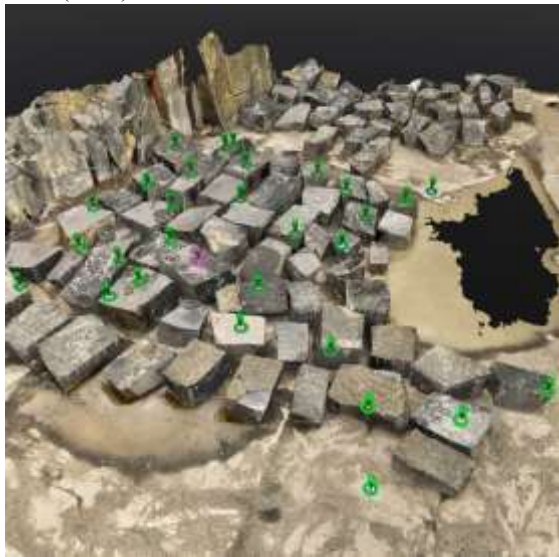


Рис. 1. Схема розміщення опорних та контрольних точок на дослідному майданчику

Методологія збору даних включала наступні сценарії:

Метод UAV (DJI Mavic 3 Enterprise). Політ виконувався в ручному режимі на наднизькій висоті — 6,5 м. Для якісного відображення вертикальних граней блоків та мінімізації «мертвих зон» у вузьких проходах між блоками, камера була нахилена під кутом 45°.

Метод SLAM (Xgrid L1 / Alfageo R100). Сканування виконувалося шляхом обходу периметра та міжряддя блоків. Час збору даних склав рекордні 6 хвилин.

Метод Smartphone (iPhone 13 Pro + Pix4Dcatch). Знімання проводилося в режимі наземної фотограмметрії з використанням програмного забезпечення Pix4Dcatch.

Опрацювання даних фотограмметрії виконувалось в програмному забезпеченні Pix4DMatic, дані SLAM опрацьовувались в Lixel Studio. За результатами камеральної обробки було проаналізовано часову ефективність та якість хмари

точок. Метод UAV (DJI Mavic 3 Enterprise) показав найвищу стабільність результату (RMSE ~6 мм), але вимагав 77 хвилин на обробку 488 знімків. SLAM-метод продемонстрував найкращу оперативність: 40 хвилин на обробку, при RMSE в плані 19 мм та RMSE по висоті 5 мм.

Особливу увагу було приділено методу використання смартфона. На попередніх етапах досліджень, на малому майданчику (7×13 м, 9 блоків), цей метод забезпечив високу точність без артефактів. Однак, при масштабуванні на поточний об'єкт (площа збільшилась у 4 рази, кількість блоків — у 6 разів), виникли критичні помилки. Камери смартфонів обладнанні ковзним затвором, який вносять мікроспотворення в кожен кадр під час руху, що додатково погіршує якість вирівнювання на великих наборах даних. Програмне забезпечення не змогло коректно вирівняти масив з 2196 фотографій, що призвело до ефекту «подвоєння площин» та збільшення шумів. Це вимагає проведення додаткових досліджень

Узагальнені дані щодо часових витрат та обсягів інформації наведені у таблиці:

Параметр	SLAM (Xgrid L1)	БПЛА (Mavic 3E)	Смартфон (iPhone 13 Pro)
Час польових робіт	6 хв	8 хв	9 хв
Час камеральної обробки	40 хв	77 хв	359 хв
Кількість вихідних файлів	1 файл (хмара)	488 фото	2196 фото
Масштаб обробки зображень	-	1/2 (оптимально)	1 (повнорозмірні фото)
RMSE (План)	19 мм	7 мм	42мм
RMSE (Висота)	5 мм	6 мм	12 мм

Для детального аналізу геометричних деформацій виконано порівняння хмар точок у середовищі CloudCompare (алгоритм Cloud-to-Cloud), де за еталон прийнято модель з БПЛА. Обрано два характерні блоки.

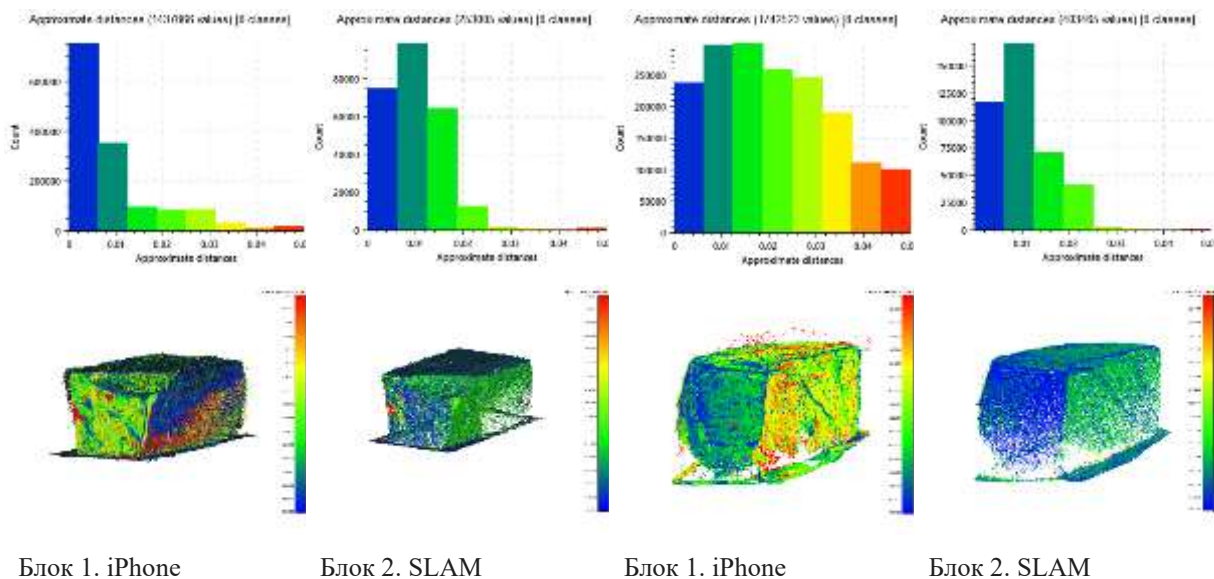


Рис. 2. Розподілу відхилень (C2C distance) для Блоку №1 та Блоку №2

При порівнянні хмари створеної за допомогою iPhone на Блоці №1 основний масив точок мають відхилення в межах 0-10 мм. Проте на Блоці №2 спостерігається рівномірний розподіл помилок у діапазонах 0-30 мм та 30-50 мм. Це підтверджує наявність геометричного шуму та розшарування поверхонь, викликаного дрейфом навігаційної системи телефону на великій дистанції.

У хмарі точок створеного методом SLAM присутній систематичний зсув на 0.5-1.5 см, що є допустимим для задач складського обліку і пояснюється меншою роздільною здатністю лазера порівняно з фотограмметрією.

Висновки. Метод аерофотограмметрії (БПЛА) залишається найбільш точним інструментом для інвентаризації складів блочної сировини. Знімання під кутом нахилу (35°-45°) з малої висоти (6,5 м) дозволяє отримувати повні моделі з мінімальними «сліпими» зонами. Головним недоліком є залежність від погодних умов та необхідність отримання дозволів на польоти, присутність рослинності на площадці.

Метод SLAM є оптимальним для оперативного моніторингу. Він не вимагає складної підготовки, а процес збору та обробки даних займає менше години (46 хв сумарно). Отримана точність (1-2 см) є достатньою для ідентифікації блоків та підрахунку об'ємів.

Метод використання смартфона (iPhone) має чіткі обмеження щодо масштабування. Він є ефективним інструментом для сканування малих об'єктів (до 10-15 блоків або площі до 100 м²), де його може використовувати не спеціаліст. Однак на площах понад 300 м² з однотипною текстурою (граніт) виникає ефект накопичення помилки навігації, що призводить до руйнування цілісності моделі та появи подвійних стінок.

Для кожного з методів відстань між блоками має бути не менше 50-60 см, що забезпечить якісну побудову хмари точок.