УДК 528.721

В. ГЛОТОВ¹, Б. ЛАДАНІВСЬКИЙ², З. КУЗИК¹, А. БАБУШКА¹, І. ПЕТРИШИН¹¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. (032)-258-2639, ел.пошта: volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua² Кафедра інженерної геодезії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. (032)-258-2387, ел.пошта: borys.t.ladanivskyu@lpnu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ АЕРОЗНІМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ БПЛА ОКТОКОПТЕРА DJI S1000

Мета. Мета роботи – розроблення аерознімального комплексу на основі БПЛА гелікоптерного типу DJI S1000 для виконання аерознімальних робіт, до складу якого входять лазерний сканер (ЛС) та цифрова знімальна камера (ЦЗК). **Методика.** Аерознімання протягом кількох десятиліть є ефективним інструментом для виконання геодезичних робіт, геофізичних досліджень та проведення різних видів моніторингу. З іншого боку, застосування не тільки цифрового знімання, а й лазерного сканування об'єктів дає змогу максимально підвищити точність отримання координат точок на місцевості та обійтись без такого процесу, як планово-висотна прив'язка на місцевості, що становить понад 80 % польових робіт, тобто набагато здешевити створення картографічних матеріалів. Окрім цього, застосування лазерних сканерів на борту безпілотних літальних апаратів допомагає вирішити низку науково-прикладних завдань у різних галузях, таких як інженерні вишукування, екологічний моніторинг, дослідження ландшафтів та моделювання територій, в будівництві, архітектурі, археології тощо. Всебічне вивчення, дослідження та моніторинг навколишнього середовища передбачають наявність та використання високоефективних сучасних технологій, спеціального програмного забезпечення для опрацювання та аналізу даних та кваліфікованих людських ресурсів. Аерознімальні лазерні сканери є новітньою високоточною технологією отримання даних про об'єкт безконтактним методом, їхнє призначення багаточільове. Їх активно використовують у світі від початку 2000-х років завдяки перевагам порівняно із традиційним аерофотозніманням. ЛС виготовляють провідні компанії світу, вони доступні на ринку і попит на них серед іноземних фахівців значний. На жаль, в Україні аерознімальні лазерні сканери застосовують обмежено, для виконання особливих завдань із залученням іноземних фахівців. У цій галузі наша країна істотно відстає порівняно з іншими європейськими країнами. Тому придбання та застосування такого програмно-технологічного комплексу та БПЛА допоможе вирішити та прискорити вирішення багатьох важливих науково-прикладних завдань в Україні, а також збільшить потенціал, можливості та престиж у вітчизняній і світовій науці та практиці. **Результати.** Розроблено макетний зразок встановлення і реалізації ЛС Velodyne VLP-16 на БПЛА гелікоптерного типу DJI S1000. Автори проаналізували відомі системи та створили оптимальний варіант під'єднання та сполучення елементів, завдяки чому вдалося максимально спростити схему розташування пристроїв, а це дало можливість зменшити собівартість запропонованого комплексу. **Наукова новизна та практична значущість.** Вперше в Україні розроблено та запропоновано спосіб встановлення ЛС на БПЛА гелікоптерного типу. За допомогою аерознімальної лазерної сканувальної системи, встановленої на борту безпілотного літального апарата гелікоптерного типу, можливо вирішувати важливі науково-прикладні завдання, як-от: моніторинг за технічним станом великогабаритних та важкодоступних конструкцій – атомних, гідро- і теплових електростанцій, ліній електропередач, газопроводів тощо; спостереження за станом автомобільних доріг, виявлення місць пошкоджень поверхні та інших небезпечних місць з метою запобігання автокатастрофам; виявлення пошкоджень лісових масивів та сільськогосподарських угідь; спостереження та недопущення зсувів ґрунтів у горах і на промислових кар'єрах, місць виникнення ґрунтових ерозій; моніторинг водних ресурсів, зміни контурів і висот берегової смуги; виявлення дефектів покрівель, деформацій, настінних тріщин на висотних будівлях для проведення архітектурних обмірів, 3D-моделювання, документування та збереження об'єктів культурної спадщини; сприяння в археологічній розвідці з метою виявлення археологічних об'єктів та дослідження артефактів. Окрім цього ЛЗ із периферією можна встановлювати на інших рухомих об'єктах (автомобілях, залізничних дрезинах, човнах тощо) та сканування зі сталих базисів у стаціонарних умовах.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат гелікоптерного типу; лазерний сканер; цифрова знімальна камера; електронні пристрої.

Вступ

Сучасні технології створення топографічних та кадастрових планів ґрунтуються саме на застосуванні матеріалів цифрового аерознімання. Однак собівартість

застосування літаків та гелікоптерів для локального великомасштабного знімання на порядок вища. Тому альтернативним рішенням є використання для вищевказаних цілей безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Застосування безпілотних літальних апаратів дає змогу знімати важкодоступні території, забезпечуючи високу точність визначення просторових координат точок об'єктів із незначними витратами. А застосовуючи цифровий метод, реально оперативно скласти великомасштабні топографічні плани в камеральних умовах. Для глибшого розуміння поставлених завдань проаналізуємо основні сучасні публікації стосовно вибраної тематики.

Майже десять років тому запропонована система Lidar IbeoLux, встановлена на міні-гвинтокрилі T-Rex 600 E, стала однією із перших розробок, призначених для великомасштабного картографування, вдосконалення моделей місцевості з погляду уточнення висот дерев та стану доріг [Lin Y., Нуурра J., 2011].

Лазерне сканування із легкого гелікоптера за методом SfM (Strukture from Motion), здійснене з метою морфологічних досліджень та вивчення флювіальних процесів ріки Джон-Дей у штаті Орегон (США) із подальшим фотограмметричним опрацюванням даних, дало змогу отримати ортофото із розрізненням 10 см, а цифрову модель рельєфу із точністю до субметра [Dietrich J., 2016].

Перевага лазерного сканування з низьких висот полягає у більшій деталізації, максимальному і швидкому виявленні та розпізнаванні топографічних елементів [Thiel C., Schmullius C., 2017]. На експериментальній тестовій ділянці розміром 4 га біля м. Єна (Німеччина) виконано лазерне знімання із гелікоптера та БПЛА. Порівняння двох методів показало, що ентропія за даними з гелікоптера вища, ніж із БПЛА, а саме: не визначено 45 дерев із 205 та 14 із 205 відповідно. Перевага застосування лазерного сканування із БПЛА у лісівництві цілком очевидна. Цієї тематики також стосується стаття [Sadeera J., Toshiaki O., 2018], в якій описано дослідження спектрального аналізу лісу в поєднанні із генерованою ЦМР. Методику моніторингу відкритих лісових масивів у Ірані із застосуванням БПЛА та цифрових знімальних систем на основі об'єктно-орієнтованої класифікації об'єктів запропоновано у статті [Chenari A., Erfanifard Y., 2017]. Експериментальні роботи засвідчили добрі результати розмежування крон фісташкових та мигдалевих дерев, із точністю 90–92 %. Важливою проблемою для планування польотів БПЛА, оснащених дорогою знімальною технікою, залишається виявлення та уникнення перешкод. Для її вирішення запропоновано мультисенсорний метод та синтезування даних [Gianni C., Balsi M., Esposito S., 2017], причому розглянуто цілі із різною відбивною здатністю та індексом форм.

Незамінну роль відіграють БПЛА, коли йдеться про точне позиціонування, оцінювання стану та документування екстрених або небезпечних ситуацій у зонах стихійного лиха. Так, після землетрусу в Торіно в Італії у 2016 р. кількість та ступінь пошкоджень

будівель визначено за допомогою БПЛА, оснащеного фотокамерою та лазерним сканером. За методом SLAM (simultaneous localization and mapping) виконано 3D-модельовання руїн [Chiabrando F., Sammartano G., Spano A., 2017].

У 2017 р. у Федеральному інституті гідрології Німеччини започатковано науково-дослідний проєкт із метою визначення деформацій суден за допомогою БПЛА та Lidar. У публікації [Cramer M., Naala N., 2018] подано результати виконання першого етапу робіт, а саме: геодезичні обміри виконано із міліметровою точністю та описано алгоритм сумісного опрацювання даних, одержаних різними знімальними системами.

Цифрове знімання об'єктів із мобільних платформ різними сенсорами передбачає вирівнювання 3D хмар точок. Це доволі складне завдання, вирішити яке можливо за допомогою наближеного і точного вирівнювання із врахуванням семи параметрів трансформації – масштабного коефіцієнта, трьох кутів повороту і трьох зміщень. У дослідженні [Persad R., Armenakis C., 2017] наведено методику узгодження 3D-хмар точок об'єкта, одержаних лазерними сканерами із БПЛА та наземної мобільної платформи, в різних системах координат, з невідомими сімома елементами орієнтування.

Наступні технологічні розробки стосуються удосконалення та модернізації повітряного лазерного знімального комплексу, полегшення бортових компонентів і підвищення точності. Зокрема, система DLS (Dron Lidar Scanning) – це надлегка система, що складається із безпілотною Varor 35, сканера YellowScan, GNSS-антени, батареї, здатної забезпечити 60 хв польоту, та бортового комп'ютера для самостійного збирання даних [Resop J., Lehmann L., 2019]. Експериментальні польоти здійснено з метою дослідження річкової долини у штаті Вірджинія – берегової лінії, рельєфу та рослинності, вони засвідчили високу точність результатів.

Питання точності знімання із БПЛА, оснащених ЛС, приймачем GNSS та інерційним вимірювальним блоком (IMU), стосується стаття [Leroux B., Cali J. та ін., 2017]. Запропонований метод оцінювання точності маршрутизації БПЛА автори назвали візуальною одометрією. Замість лазерного сканера на БПЛА встановлено електронний тахеометр, яким раніше було виміряно опорні точки (GCP). Відмінність у вимірюванні координат становила 2–3 см.

Суміщення різних знімальних систем на платформі БПЛА, створення нових високоточних технологічних комплексів та розроблення модулів опрацювання великих масивів гібридних даних – це завдання, які ставлять перед собою провідні фірми, інженери-винахідники, науковці та програмісти.

Можливість інтеграції двох різних знімальних систем, пасивної та активної – перспективної фотокамери та лазерного сканера на платформі БПЛА з метою

урбаністичного топографічного картографування розглянуто у статті [Toschi I., Remondino F. та ін., 2018]. Аерознімання виконували знімальною системою LeicaCityMapper над двома містами у Німеччині та Франції із різною щільністю забудови. У результаті досліджень запропоновано методику інтегрованого опрацювання гібридних даних.

Мобільну систему картографування, до складу якої входять мультиспектральна камера Sony у видимій та близькій до інфрачервоної ділянці спектра, лазерний сканер Riegl miniVUX-1, інтегрований із системою позиціонування GNSS/INS на платформі БПЛА NEO3 із фіксованим крилом, розробили інженери з Польщі [Bakula K., Ostrovski W. та ін., 2018]. Дані повітряного сканування порівнювали зі щільною хмарою точок, одержаною наземним лазерним сканером. Експериментальні роботи засвідчили, що точність побудови цифрової моделі місцевості значною мірою залежить від точності траєкторії БПЛА, а помилка висоти становить 20 см під час руху і 10 см у час фіксованого стояння.

У публікації [Cortes C., Shahbazi M. та ін., 2018] описано технологію дистанційного зондування на платформі БПЛА, яка, завдяки новим технічним рішенням, дає змогу істотно здешевити процеси великомасштабного картографування, моделювання та моніторингу навколишнього середовища. Система передбачає дворівневий підхід, а саме: самокалібрування мультисенсорної камери Li-Cam та інтегрований метод орієнтації давача, оснований на недиференційованій фільтрації частинок, який компенсує часові помилки IMU та виключає необхідність вимірювань GNSS.

Лазерне сканування із БПЛА з метою ефективного картографування у складних гірських місцевостях відрізняється від рівнинних територій та потребує ретельного планування місій. В умовах високих гір дозволено реалізовувати більшу швидкість польотів на більших висотах, більші відстані між паралельними маршрутами. Існують інші вимоги щодо перекриття та щільності хмар точок. У статті австрійських авторів [Bremer M., Wichmann V., Rutzinger M., 2019] описано можливості та характеристики симулятивної знімальної системи ULS для лазерного сканера Riegl VUX-1LR та RieglRiCopter. Симулятор прогнозує рух БПЛА з урахуванням аеродинаміки польоту та моделює хмари точок із віртуального лазера на сітчасту модель рельєфу із високим розрізненням. Експеримент дає добрі результати, однак у реальних умовах потрібно враховувати граничну похибку та коригування керування польотом.

Багато останніх публікацій, які стосуються теми лазерного сканування з БПЛА, стосуються методів опрацювання хмар точок та вирішення проблеми автоматичної класифікації даних. Зокрема, у дослідженні

[Martinez L., Jabato M. та ін., 2019] запропоновано методологію класифікації мостів і континентальних водних об'єктів на основі радіометричних та геометричних змінних та показників NDVI, NDWI або NFC, що дає змогу значно поліпшити якість створеної цифрової моделі поверхні. Тест-об'єкт розташований у провінції Торуюель (Іспанія). Іншу методологію класифікації даних та виділення (екстракції) розміток на автомобільних дорогах пропонують китайські автори [Pan Y., Yang B. та ін., 2019]. За основу взято методи цифрового опрацювання зображень, а знаки дорожньої розмітки векторизують як замкнені та незамкнені полілінії. Отже, в результаті автоматичної класифікації даних точність визначення шосе становила 95 %, автомобільних доріг у місті – 85 %.

У зв'язку із упровадженням новітніх технологій SinglePhoton (SP) та Gedar-Mode (GM), що спричинило революційні зміни у сфері повітряного лазерного сканування, деякі європейські національні картографічні та кадастрові системи (NMCA) вважають за необхідне перехід на нові технології, а інші розглядають можливість модернізації наявних лазерних систем на БПЛА [Bernard C., MillsJ., 2019]. У 2018 р. Комісія EuroSDR започаткувала ініціативу вивчення даних Leica SPL100 з метою інформування громад та проведення міжнародних семінарів щодо розвитку новітніх технологій SP та GM.

Огляд фахової літератури за темою науково-прикладних досліджень дає підстави стверджувати, що метод повітряного лазерного сканування із рухомих платформ БПЛА є найбільш сучасним, актуальним та широко використовуваним методом дистанційного збирання цифрових даних про об'єкти земної поверхні. Метод потребує комплексного підходу як щодо конструкторських рішень, так і стосовно методики опрацювання хмар точок у спеціальному програмному забезпеченні. Науковці та інженери різних країн світу працюють над оптимізацією та розширенням можливостей цієї технології.

Мета

Мета роботи – розроблення аерознімального комплексу на основі БПЛА гелікоптерного типу DJI S1000 для виконання аерознімальних робіт, до складу якого входять лазерний сканер (ЛС) та цифрова знімальна камера (ЦЗК).

Методика

Опис розробленого аерознімального комплексу
Аерознімальний комплекс побудовано на БПЛА DJI SpreadingWings S1000, на який встановлено лазерний сканер VLP-16 виробника Velodyne LiDAR, Inc. Для перерахунку зареєстрованих даних лазерного сканування

Таблиця 1

**Технічні характеристики
БПЛА DJI Spreading Wings S1000**

Злітна вага	6,0~11,0 кг
Загальна вага	4,4 кг
Батарея живлення	LiPo (6S, 10000 mAh ~20000 mAh, 15 C, хв)
Максимальна використувана потужність	4000 Вт
Потужність, використувана під час зависання	1500 Вт (для злітної ваги 9,5 кг)
Тривалість висіння	15 хв (із акумуляторами 15000 mAh для злітної ваги 9,5 кг)
Робочий діапазон температур	-10 °C ~ +40 °C
Чутливість для злітного контролера DJI A2	крен 120 %, нахил 120 %, рухомий стан 120 %; затримка: крен 170 %, нахил 170 %, вертикаль 120 %
Довжина	1,05 м
Ширина	1,05 м
Максимальна злітна маса	11 кг
Крейсерська швидкість польоту	40 км/год
Максимальна швидкість польоту	70 км/год
Максимальна дальність польоту	5 км
Максимальна висота польоту	500 м
Час польоту	25 хв
Тип авіадвигуна	електричний

із системи координат давача до системи, зв'язаної з об'єктом дослідження, до складу системи введено інерційний вимірювальний блок (Inertial Measurement Unit, який із системою позиціонування становить інерційну навігаційну систему – ІНС), а також мікрокомп'ютер, що забезпечує початкову ініціалізацію усієї системи та реєстрацію даних як давача VLP-16, так і IMU.

Коротко розглянемо основні складові комплексу.

БПЛА DJI Spreading Wings S1000. DJI Spreading Wings S1000 – багатоцільовий безпілотний повітряний апарат китайського виробництва “DJI”. Він призначений для цивільного використання, найчастіше – для аерознімання місцевості з метою здійснення спостережувальних, моніторингових та патрульних місій. Розроблений на базі моделі DJI Spreading Wings S8000, однак має багато конструктивних відмінностей. Завдяки порівняно невисокій вартості моделі фірми DJI успішно конкурують на ринку, на них є попит серед користувачів.

Багатофункціональний БПЛА DJI Spreading Wings S1000 має доволі масивну конструкцію, зокрема, розмір апарата по діагоналі становить 1 м 5 см, що деякою мірою ускладнює транспортування апарата до місця експлуатації. Однак сам прилад добре маневрує під час польоту, тому не виникає проблем з його використанням. БПЛА виконано у конфігурації октокоптера, тому він може здійснювати калібрування і глісаду на непередбачуваних місцях. Для силової тяги на БПЛА DJI S1000 використовують вісім безколекторних електричних двигунів, які здатні забезпечити максимальну швидкість цього апарата до 70 км/год.

DJI S1000 – важковаговик, за маси 4,4 кг може піднімати вантаж до 11 кг без втрати продуктивності. Апарат має можливість кріплення різних підвісів, зокрема сучасний DJI Z15-5D HD, який підходить для дзеркальних фотокамер. Основні технічні характеристики приладу подано у табл. 1.

Саме кріплення підвісу виконано незалежно від рами і двигунів. Завдяки подвійній вібророзтяжці коливання зведено до мінімуму, а завдяки низькій точці розташування підвісу та розкладним шасі можна робити знімки в усіх напрямках без зайвих предметів у кадрі. Така комплектація дає змогу отримувати чіткі, нерозмиті зображення.

DJI S1000 виконано із якісних матеріалів, які не бояться зіткнень і падінь. Він облаштований інтелектуальним контролером польоту DJI A2, що забезпечує стабільну роботу апарата, вирівнювання положення, убезпечення від падіння у разі втрати сигналу, дає змогу виконувати відповідні місії на запланованих точках і повідомляє про розташування.

Лазерний сканер Velodyne VLP-16. Просторові дані в розробленій системі отримують за допомогою лазерного сканера Velodyne VLP-16. Це компактний інфрачервоний лазерний сканер кругового огляду, що містить 16 пар лазер – детектор для вимірювання відстані до об'єктів та їхньої відбивної здатності (рис. 1).

Рис. 1. Загальний вигляд лазерного сканера
Velodyne VLP-16

Fig. 1. General view of Velodyne VLP-16 laser scanner

Прилад виготовлено в компактному, стійкому до погодних умов корпусі, в якому масив пар лазер – детектор швидко обертається для сканування навколишнього простору. Кожен лазер випромінює лазерний промінь приблизно 18000 разів за секунду, забезпечуючи щільну тривимірну хмару точок у реальному часі. Передова технологія опрацювання й аналізу цифрових сигналів забезпечує високу точність зондування на відстані до 70 м, а також інформацію про відбивну здатність об'єктів, що дає змогу виявляти світловідбивачі, вуличні знаки, номерні знаки транспортних засобів та маркування смуг руху. Вимірювання можна виконувати з частотою до 300000 точок за секунду.

Результат сканування у реальному часі передається по Ethernet інтерфейсу у формі UDP-пакетів. Основні технічні характеристики VLP-16 подано в табл. 2.

Таблиця 2

Основні технічні характеристики VLP-16

Вага	830 г
Канали	16
Дальність вимірювання	100 м
Швидкість вимірювання	300 000 т/с
Горизонтальний кут огляду	360 °
Вертикальний кут огляду	± 15°
Енергоспоживання	низьке – 12 В
Конструкція	захищена

Налаштування давача і вибір його режимів роботи здійснюють за допомогою вебінтерфейсу з під'єданого до нього комп'ютера через мережеве з'єднання Ethernet.

Встановлення лазерного сканера VLP-16 на каркас октокоптера DJI Spreading Wings S1000. Встановлення лазерного сканера на каркас октокоптера виконано так, щоб вісь сканувальної головки була паралельна до осі переміщення октокоптера (рис. 2, а). Це зроблено для того, щоб сканування відбувалося перпендикулярно до осі переміщення та забезпечення перекриття під час отримання хмари точок. Діапазон сканування по периметру лазерного сканера обмежується ніжками гелікоптера і становить приблизно 120°, що цілком достатньо для охоплення скануванням будь-якого об'єкта знімання на місцевості. З цією метою розроблено дві відповідні консолі, які з одного боку жорстко закріплюють на основі корпусу лазера гвинтом М6, а з іншого боку – на напрямних акумулятора октокоптера. Отже, жорстке кріплення лазера виконано у трикутнику із вершинами: центр корпусу лазерного сканера та дві вершини на напрямних акумулятора (рис. 2, б).

Для встановлення сканера і жорсткості його фіксації у вертикальній площині застосовано *n*-подібну стяжку, яку з одного кінця закріплено на одній з консолей, а з іншого – на напрямній акумуляторного блока. Окрім цього, передбачено переставляння лазерного

сканера для знімання у фронтальній проекції за допомогою куткового механізму. В цьому випадку максимальний азимут сканування може охоплювати 180°. Пересуваючи таку стяжку, можна регулювати положення сканера у вертикальній площині.

Розподільний електричний блок сканера закріплено на верхній пластині основи гелікоптера. Надлишок комутаційного кабелю “лазер – розподільний блок” закріплено аналогічно на цій самій верхній платі відповідними стяжками у вигляді бухти.

а

б

Рис. 2. Загальний вигляд аерознімального комплексу (а); лазерний сканер Velodyne Lidar на каркасі октокоптера DJISW-1000 (б)

Fig. 2. General view of the aerial photography complex (a); Velodyne Lidar laser scanner on the frame of the DJISW-1000 octocopter (b)

Збирання та реєстрація даних про розташування та орієнтування пристрою у просторі. Під час збирання даних змінюються як розташування лазерного сканера, так і кути його орієнтування у просторі. Для однозначного перерахунку зареєстрованих даних (хмари точок) із системи координат лазерного сканера до системи, зв'язаної із об'єктом дослідження (Землею), до складу системи повинна входити система позиціонування і орієнтування. З цією метою розроблено та створено інерційну навігаційну систему (ІНС).

До складу ІНС входять:

- GNSS приймач EPSKit-STAR на основі модуля NovAtel OEMStar із власним модулем реєстрації даних;

- GPS-приймач GN2630G;
- давач орієнтування WT931;
- барометр BMP280.

Для збирання та реєстрації усіх даних із ІНС та ЛС використано мікрокомп'ютер Raspberry Pi Model B.

GNSS-приймач EPSKit-STAR на основі модуля NovAtel OEMStar призначений для забезпечення аерофотознімання у режимі Post-Processing Kinematic (PPK). Пристрій приймає сигнали та реєструє виміри від супутників систем GPS та ГЛОНАСС в частотному діапазоні L1 із частотою 10 Гц. Має вхід для підключення цифрової камери з метою отримання та реєстрації моментів спрацьовування затвора камери. Цей приймач дає змогу отримати координати центрів знімків з похибкою, що не перевищує 1,5–2 см. Пристрій має вбудовану пам'ять (флеш-накопичувач) до 8 Гб, компактні габарити та малу вагу. Крім реєстрації даних про розташування БПЛА, цей приймач забезпечує лазерний сканер VLP-16 інформацією про розташування (один раз за секунду відправляє \$GPRMC речення за протоколом RS-232) та сигнал PPS (puls per second) для синхронізації його роботи.

GPS-приймач GN2630G є допоміжним пристроєм у системі. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi не має внутрішнього годинника реального часу. Решта давачів у системі теж не містять такого вузла. Для забезпечення перерахунку даних LiDAR із внутрішньої у зв'язану із землею систему координат необхідно, щоб дані орієнтування БПЛА, а також давача VLP-16 та дані просторового положення з GNSS приймача NovAtel OEMStar записувались синхронно. На GPS приймач GN2630G покладається завдання синхронізувати за часом з GPS: а) внутрішній програмний годинник Raspberry Pi під час старту операційної системи в мікрокомп'ютері; б) внутрішній годинник давача орієнтування WT931 під час його ініціалізації перед роботою. GPS-приймач GN2630G відправляє результат своєї роботи через UART інтерфейс з TTL рівнями. Проте для економії часу на розроблення використано зовнішній UART-USB перетворювач, від якого в майбутньому можна буде відмовитись.

Давач орієнтування WT931 є дев'ятикоординатним IMU – із дев'ятьма ступенями свободи (9 DOF – 9 degree of freedom). До його складу входять: акселерометр – забезпечує інформацію про прискорення уздовж трьох просторових осей; гіроскоп – кутові переміщення навколо трьох осей; тривісний магнітометр; високопродуктивний мікроконтролер, у якому реалізовано годинник та алгоритм фільтра Калмана. WT931 уможливорює гнучке налаштування швидкості передавання і кількості даних, які він відправляє по UART інтерфейсу. В комплекті з WT931 поставляється UART-USB перетворювач, який і використали для стикування із мікрокомп'ютером Raspberry Pi.

BMP280 – це барометричний давач для вимірювання атмосферного тиску. За допомогою цього давача можна визначати висоту польоту або глибину занурення носія, яку він розраховує за тиском. Результати вимірювань і розрахунків BMP280 передає по UART інтерфейсу. В розробленій системі цей давач використовується як незалежне джерело інформації про висоту польоту БПЛА.

Використаний мікрокомп'ютер Raspberry Pi Model B належить до першого покоління серії. Model B містить 512 мегабайт оперативної пам'яті, два USB порти та роз'єм Ethernet 10/100. Наявність перерахованих периферійних інтерфейсів спростила та значно пришвидшила розроблення прототипу системи. В нашій реалізації Raspberry Pi працює під управлінням операційної системи Arch Linux, а саме його порту (реалізації) Arch Linux ARMv6. До переваг цієї системи зарахуємо мінімалістичність (нічого зайвого), простоту та орієнтованість на користувача, націленість на компетентних користувачів Linux, із наданням їм повного контролю та відповідальності за систему.

Попри перелічені переваги, слід зазначити, що реалізація системи на основі Raspberry Pi не оптимальна. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi Model B споживає до 0,7 А струму по лінії 5 В. Для довідки: хоч Raspberry Pi 4 значно продуктивніший, проте потребує блока живлення, що може забезпечувати до 3 А по лінії 5 В. Оптимальнішою видається реалізація або лише ІНС, або всієї системи на мікроконтролері. Реалізація такої системи, звичайно, трудомістка, але дала би змогу вирішити проблеми з точним часом, а енергоспоживання зменшилось би орієнтовно на порядок (відповідно зросло б автономність і, можливо, надійність).

Структура системи. GNSS-приймач EPSKit-STAR потребує ініціалізації для отримання надійного розв'язку в разі увімкнення після тривалої перерви 3–7 хв. Він обладнаний власним автономним блоком живлення, повного заряду якого вистачає більше ніж на 10 год автономної роботи приймача.

Допоміжний GPS приймач GN2630G під час старту мікрокомп'ютера Raspberry Pi повинен бути підключений до одного із USB портів через зовнішній USB-UART перехідник і надавати інформацію про час і координати у RMC реченні. Через цей самий перехідник приймач отримує живлення під час польоту. Проте для ініціалізації після довгої перерви він теж потребує близько 3 хв для отримання розв'язку. Отже, під час передполітної підготовки БПЛА до автономного блока живлення під'єднують обидва GPS приймачі. Після отримання обома приймачами зв'язку роз'єднання допоміжного приймача повертається в USB роз'єднання мікрокомп'ютера, після чого одразу подається

живлення на сам мікрокомп'ютер. Для повторної ініціалізації (гарячого старту) приймач GN2630G потребує лише до 30 с. В мікрокомп'ютері Raspberry Pi під час старту операційної системи запрограмовано затримку на опитування приймача GN2630G тривалістю 50 с, що повинно забезпечити надійне отримання даних із приймача на момент старту.

Приймач EPSKit-STAR постійно живиться від свого автономного блока. Ємності акумулятора вистачить для роботи приймача навіть у тому випадку, коли доведеться виконувати декілька місій БПЛА, змінюючи і заряджаючи його силові (льотні) акумуляторні батареї. Окрім реєстрації даних, приймач EPSKit-STAR надає RMC речення та PPS сигнал для лазерного сканера, для його синхронізації та прив'язування даних у просторі.

Давач орієнтації WT931 через власний перехідник USB-UART під'єднаний до другого роз'ємця USB на мікрокомп'ютері Raspberry Pi.

Барометр BMP280 під'єднаний до вбудованого UART пристрою мікрокомп'ютера Raspberry Pi, доступ до якого здійснюється через роз'ємця периферії (піни GPIO, пін 8 → TX, пін 10 → RX). З пінів роз'ємця периферії барометр також отримує живлення.

За замовчуванням вбудований UART використовує операційна система для консольного доступу та налагодження ядра системи. Щоб використати цей вбудований UART для барометра, його потрібно відключити від консолі операційної системи. Це роблять за допомогою редагування системного файлу `/boot/cmdline.txt` та перезавантаження системи. Коли вбудований UART відключений від системної консолі операційної системи Arch Linux ARM, що встановлена на Raspberry Pi, системний файл пристрою доступу до нього `/dev/ttyAMA0` можна використати для своїх потреб, а саме для отримання потоку даних із барометра BMP280.

До периферійного роз'ємця GPIO 17, розміщеного на піні 11, під'єднаний червоний світлодіод для індикації успішної ініціалізації системи та факту реєстрації даних.

VLP-16 отримує RMC речення через інтерфейс RS232 та PPS сигнал із приймача EPSKit-STAR. Результат сканування у реальному часі передається через Ethernet інтерфейс до мікрокомп'ютера Raspberry Pi у формі UDP пакетів. Мережеве з'єднання мікрокомп'ютера налаштовано так, щоб логічно бути в одній підмережі із лазерним сканером VLP-16. Живлення як ЛС, так і Raspberry Pi отримують від бортового акумулятора БПЛА ~26 В через відповідні перетворювачі: VLP-16 живиться напругою 12 В, Raspberry Pi 5 В відповідно. Схему зв'язків усіх компонентів комплексу подано на рис. 3.

Рис. 3. Схема пристроїв та зв'язків знімального комплексу

Fig. 3. Scheme of devices and connections of the shooting complex

Функціонування системи. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi працює під управлінням операційної системи Arch Linux реалізації ARMv6 (<https://archlinuxarm.org/platforms/armv6/raspberry-pi>). Дані ІНС і ЛС збирають і реєструють незалежно через різні інтерфейси паралельними процесами.

Для збирання даних розроблено і створено програму, що виконує ініціалізацію всіх периферійних пристроїв ІНС, а далі в певній послідовності здійснює їх опитування і відправляє зібрані дані у файл.

Алгоритм роботи програми такий:

- ініціалізація порту GPIO17 на піні 11 на вихід для роботи зі світлодіодом, для індикації стану і режиму роботи мікроконтролера і програмного забезпечення в ньому;
- короткий спалах світлодіодом тривалістю 300 мс повідомляє, що ініціалізація операційної системи відбулась успішно і почалась ініціалізація ІНС;
- ініціалізація вбудованого UART порту (GPIO пін 8 → TX, пін 10 → RX), що відповідає пристрою `/dev/ttyAMA0` для роботи барометра BMP280 (швидкість обміну 115200 бод, кількість бітів 8, перевірка парності – N, кількість стоп-бітів – 1);
- налагодження читання даних із барометра BMP280 та відправлення звіту про ініціалізацію і тестове зчитування у log файл;
- ініціалізація UART порту, що працює із давачем орієнтації WT931 через USB-UART перехідник, якому відповідає пристрій `/dev/ttyUSB1` (швидкість обміну 115200 бод, кількість бітів 8, перевірка парності – N, кількість стоп-бітів 1);
- ініціалізація UART порту, що працює з GPS приймачем GN2630G через USB-UART перехідник, якому відповідає пристрій `/dev/ttyUSB0`, (швидкість обміну 9600 бод, кількість бітів 8, перевірка парності – N, кількість стоп-бітів 1);
- налагодження читання даних із приймачем GN2630G, ініціалізація змінних, що відповідають за поточний час, та відправлення звіту про ініціалізацію і тестове зчитування у log файл, закриття обміну із приймачем. Він більше не потрібен у нашій поточній реалізації, хоча, якщо систему ускладнювати, його

можна використати для коригування дрейфу внутрішніх годинників WT931 та Raspberry Pi. У цьому випадку вважають, що за 20 хв польоту дрейфом годинників можна знехтувати;

- програма ініціює давач WT931, передусім його внутрішній годинник, із часом, отриманим від GPS-приймача GN2630G;
- для синхронізації потоків даних від давача WT931 та барометра BMP280 звільняються їхні буфери обміну із операційною системою Raspberry Pi;
- налагодження читання даних з давача WT931 – пошук в потоці мітки початку блока даних;
- далі запускається вічний цикл, під час якого:
- на основі даних часу із GPS-приймача GN2630G та поточної ітерації вічного циклу створюється ім'я файла, у який буде записуватись результат роботи INS;
- у файл записується шапка з підписами колонок даних;
- далі запускається внутрішній цикл, який виконує 6000 ітерацій; у кожній з них він виконує зчитування даних з WT931, переводить їх із бінарного в ASCII формат, після кожного 20-го відліку зчитує дані із барометра BMP280 (WT931 видає 20 відліків за секунду, а BMP280 – лише один) та змінює стан світлодіода. В результаті світлодіод світиться 1 с, а після 1 с – не світиться, що істотно відрізняється від спалаху 300 мс=0,3 с, тому перебіг ініціалізації можна відрізнити від нормальної реєстрації даних;
- після 6000 ітерацій (300 с) внутрішнього циклу відбувається повернення із нього, файл даних закривається, відкривається новий і процес повторюється нескінченно, доки подається живлення на Raspberry Pi;

Стан червоного світлодіода щосекунди змінюється на протилежний, що слугує ознакою правильної роботи системи збирання і реєстрації даних.

Реєстрацію даних лазерного сканера VLP-16 здійснюють за допомогою програми аналізатора мережеских пакетів tshark. Tshark – реалізація програми wireshark із вільним вихідним кодом, проте працює із командним рядком без графічного інтерфейсу, що в нашому випадку сприяє споживанню мінімуму системних ресурсів мікрокомп'ютера Raspberry Pi та швидкій ефективній роботі. Реєстрація пакетів від сканера VLP-16 теж налаштована так, щоб створювати новий файл даних кожні 300 с.

Ініціалізація всієї системи запрограмована так. Системний менеджер systemd операційної системи Linux поєднує у собі функції системи ініціалізації, механізм для контролю за виконанням фонових процесів, службу для ведення журналу подій і засоби для керування сервісами, сеансами користувачів і під'єднаними пристроями. Для нього створено два таймери та відповідно дві служби.

Перший таймер після ініціалізації операційної системи Arch Linux ARMv6 на мікрокомп'ютері Raspberry

Pi формує затримку тривалістю 50 с, після чого запускає службу реєстрації даних INS. Ця служба запускає описану вище програму збирання даних INS. Затримки 50 с достатньо для повторного (гарячого) старту GPS приймача GN2630G, який на час старту Raspberry Pi уже повинен надавати повноцінні дані. Другий таймер починає працювати одночасно із першим після ініціалізації операційної системи з тією відмінністю, що він формує затримку 60 с. Після відпрацювання затримки таймер запускає іншу службу, котра, своєю чергою, запускає tshark із відповідними налаштуваннями для реєстрації даних VLP-16. Вся система функціонує у такий спосіб до заповнення карти пам'яті або до відключення живлення.

Синхронізація та реєстрація даних лазерного сканування. Процес синхронізації. Синхронізацію даних лазерного сканування та даних положення/орієнтації сенсора виконано під час постопрацювання даних. Для цього використано часові позначки вимірювань даних просторового положення та даних сканування лазера.

Вхідними даними для синхронізації слугують файл орієнтації сенсора (текстовий формат) із виміряними кутами поздовжнього, поперечного нахилу та кутом розвороту і файл бібліотеки даних (формат *rcap*) з пакетами даних положення та даних лазерного сканування. В останні пакети входять виміряна нахилена відстань, горизонтальний та вертикальний кути, інтенсивність відбитого сигналу та часові позначки кожного пакета даних. Оскільки кожен пакет даних лазерного сканування містить інформацію про 384 точки, а кожен пакет даних положення – лише один набір просторових координат та відповідну одну часову позначку, то фактично процес синхронізації необхідно виконувати окремо з даними просторової орієнтації та даними просторового положення сенсора.

Для синхронізації цих файлів написано програму мовою C++ із використанням відповідних бібліотек для роботи з файлами формату *rcap*. Оскільки файл даних лазерного сканування містить інформацію про десятки мільйонів точок, то зчитування даних організовано окремими блоками по 10000 пакетів. Для поточного зберігання зчитаної інформації організовано динамічні масиви зберігання об'єктів відповідних структур даних (точок, даних із GPS, даних із IMU).

Процес реєстрації. Реєстрацію даних (розрахунок просторових координат у зовнішній системі координат) виконано в тій самій програмі після синхронізації. Оскільки координати кожної точки лазерного сканування початково розраховують у локальній прямокутній системі лазерного сканера, то для внесення поправок і розрахунку в системі координат WGS84 використано геоцентричну систему координат. Система координат лазерного сканера динамічна, тобто положення всіх її осей змінюються під час знімання. Тому

для приведення цієї системи до геоцентричної необхідно виконати розвороти осей координат на відповідні кути відносно геоцентричної системи. Отримавши остаточні координати кожної точки лазерного сканування, можна розрахувати координати в будь-якій необхідній системі координат.

Остаточні координати кожної точки лазерного сканування записано в файл текстового формату для подальшої конвертації в будь-який необхідний формат (переважно *las* або *laz*).

Висновки

Аерознімальні лазерні сканери є новітньою високоточною технологією отримання даних про об'єкт безконтактним методом. Їх застосування багаточільове.

На кафедрі фотограмметрії та геоінформатики розроблено високотехнологічний інтегрований комплекс БПЛА гелікоптерного типу DJI Spreading Wings S1000 із повітряним лазерним сканером Velodyne Lidar VLP-16.

Створено конструкцію, яка за технічними характеристиками та вимогами щодо експлуатації відповідає точності визначення просторових координат точок об'єктів – до 10 см, що перевіряли, проводячи експериментальні аерознімальні польоти.

У результаті створення комплексу отримано цілком уніфіковану систему без додаткового виготовлення прецизійних деталей та вузлів.

Під час подальших досліджень заплановано виконати апробаційні роботи на тестовому полігоні з метою визначення кількісних параметрів стосовно встановлення координат точок об'єктів за допомогою сканування.

Література

- Bakula, K., Ostrowski, W., Pilarska, M., Szender, M., and Kurczyński, Z. Evaluation and calibration of fixed-wing uav mobile mapping system equipped with lidar and optical sensors, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 25–32. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-25-2018>, 2018.
- Bernard, C., Mills, J. P., Talaya, J., and Remondino, F.: Investigation into the potential of single photon airborne laser scanning technology, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 927–934. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-927-2019>, 2019.
- Bremer, M., Wichmann, V., Rutzinger, M., Zieher, T., and Pfeiffer, J.: Simulating unmanned-aerial-vehicle based laser scanning data for efficient mission planning in complex terrain, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 943–950. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-943-2019>, 2019.
- Cortes, C., Shahbazi, M., and Ménard, P.: UAV-licam system development: calibration and geo-referencing, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 107–114. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-107-2018>, 2018.
- Cramer, M., Haala, N., Laupheimer, D., Mandlbauer, G., and Havel, P.: Ultra-high precision uav-based lidar and dense image matching, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 115–120. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018>, 2018.
- Chenari, A., Erfanifard, Y., Dehghani, M., and Pourghasemi, H. R. (2017). Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of unmanned aerial vehicle (uav) images, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W4, pp. 43–49. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-43-2017>.
- Chiabrando, F., Sammartano, G., and Spanò, A. A Comparison among different optimization levels in 3d multi-sensor models. A test case in emergency context: 2016 italian earthquake, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, pp. 155–162. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-155-2017>, 2017.
- Dietrich, J. T. (2016). Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology*, 252, pp. 144–157.
- Gianni, C., Balsi, M., Esposito, S., and Fallavollita, P. (2017). Obstacle detection system involving fusion of multiple sensor technologies, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 127–134. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-127-2017>.
- Leroux, B., Cali, J., Verdun, J., Morel, L., and He, H. (2017). Assessing the reliability and the accuracy of attitude extracted from visual odometry for lidar data georeferencing, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 201–208. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-201-2017>.
- Lin, Y., Hyyppä, J., Jaakkola, A. (2011). Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 8, pp. 426–430.
- Martínez L., Moreno Jabato, J., Garrido Sáenz de Tejada, J. M., and Rodríguez-Cuenca, B. (2019). Automatic classification of bridges and continental water bodies from 3d point clouds (aerial lidar), *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 1047–1051. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1047-2019>.
- Pan, Y., Yang, B., Li, S., Yang, H., Dong, Z., and Yang, X. (2019). Automatic road markings extraction,

- classification and vectorization from mobile laser scanning data, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 1089–1096. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1089-2019>.
- Persad, R. A. and Armenakis, C. (2017). Comparison of 2d and 3d approaches for the alignment of uav and lidar point clouds, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 275–279. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-275-2017>.
- Resop J., Lehmann L., W. (2019). Cully Hession. Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: *Comparison with Traditional Aerial Lidar, Drones*, Vol. 3, No. 2 p. 35.
- Sadeepa Jayathunga, Toshiaki Owari, Satoshi Tsuyuki (2018). Evaluating the Performance of Photogrammetric Products Using Fixed-Wing UAV Imagery over a Mixed Conifer-Broadleaf Forest: Comparison with Airborne Laser Scanning, *Remote Sens.*, 10(2), p. 187. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10020187>.
- Thiel, C., Schmulius, C. (2017). Comparison of UAV photograph-based and airborne LiDAR-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *Int. J. Remote Sens.*, 38, pp. 2411–2426.
- Toschi, I., Remondino, F., Rothe, R., and Klimek, K. (2018). Combining airborne oblique camera and lidar sensors: investigation and new perspectives, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 437–444. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-437-2018>.

V. HLOTOV¹, B. LADANIVSKYI², Z. KUZYK¹, A. BABUSHKA¹, I. PETRYSHYN¹

¹ Department of photogrammetry and geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 6/622, Karpinskogo Str., Lviv, 79013, Ukraine, Phone: (032)-258-2639, e-mail: volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua;

² Department of engineering geodesy, Lviv Polytechnic National University, 6/301, Karpinskogo Str., Lviv, 79013, Ukraine, Phone: (032)-258-2387, e-mail: borys.t.ladanivskyi@lpnu.ua;

DEVELOPMENT OF THE AEROSURVEYING COMPLEX BASED ON THE DJI S1000 OCTOCOPTER UAV

Goal. The purpose of the work is to develop an aerial photography complex based on a DJI S1000 helicopter UAV for aerial photography, which includes a laser scanner (LS) and a digital camera (CPC). **Method.** For several decades, aerial photography has been an effective tool for geodetic works, geophysical surveys and various types of monitoring. On the other hand, the use of not only digital imaging, but also laser scanning of objects allows to maximize the accuracy of obtaining the coordinates of points on the ground and eliminate such a process as plan-height binding in the field, which occupies more than 80 % of field work that is, much cheaper the process of creating cartographic materials. In addition, the use of laser scanners on board unmanned aerial vehicles helps to solve a number of scientific and applied problems in various fields, such as engineering research, environmental monitoring, landscape research and modeling, construction, architecture, archeology and more. Comprehensive study, research and monitoring of the environment involves the availability and use of highly efficient modern technologies, special software for data processing and analysis and qualified human resources. Aerial laser scanners are the latest high-precision technology for obtaining data about the object by non-contact method and have a multi-purpose purpose. I have been actively using them in the world since the early 2000s. They have a number of advantages over traditional aerial photography. Drones are manufactured by the world's leading companies, they are available on the market and are in great demand among foreign specialists. Unfortunately, in Ukraine, airborne laser scanners are used in limited quantities to perform special tasks with the involvement of foreign experts. In this area we have a significant lag compared to other European countries. Therefore, the acquisition and application of such a software and technology complex and UAV will help solve and accelerate the solution of many important scientific and applied problems in Ukraine, as well as increase the potential, opportunities and prestige in domestic and world science and practice. **Results.** A mock-up model of installation and implementation of Velodyne VLP-16 on a DJI S1000 helicopter UAV has been developed. The authors analyzed the known systems and created the best option for connecting and connecting the elements, which made it possible to simplify the layout of the devices, which in turn made it possible to reduce the cost of the proposed complex. **Scientific novelty and practical significance.** For the first time in Ukraine, a method of installing a helicopter-type UAV was developed and proposed. With the help of an airborne laser scanning system installed on board an unmanned aerial vehicle of helicopter type it is possible to solve a number of important scientific and applied tasks, such as: monitoring the technical condition of large and hard-to-reach structures - nuclear, hydro and thermal power plants, power lines, etc. ; monitoring the condition of roads, detecting places of surface damage and other dangerous places in order to prevent car accidents; detection of damage to forests and agricultural lands;

observation and prevention of landslides in mountains and industrial quarries, places of soil erosion; monitoring of water resources, changes in contours and heights of the coastal strip; detection of roof defects, deformations, wall cracks on high-rise buildings for architectural measurements, 3D modeling, documentation and preservation of cultural heritage sites; assistance in archaeological exploration to identify archaeological sites and study artifacts. In addition, peripheral devices can be installed on other moving objects (cars, railcars, boats, etc.) and scanning from fixed bases in stationary conditions.

Key words: helicopter-type bodyless aircraft; laser scanner; digital camera; electronic devices.

References

- Bakula, K., Ostrowski, W., Pilarska, M., Szender, M., and Kurczyński, Z. (2018). Evaluation and calibration of fixed-wing uav mobile mapping system equipped with lidar and optical sensors, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 25–32. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-25-2018>.
- Bernard, C., Mills, J. P., Talaya, J., and Remondino, F. (2019). Investigation into the potential of single photon airborne laser scanning technology, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 927–934. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-927-2019>.
- Bremer, M., Wichmann, V., Rutzinger, M., Zieher, T., and Pfeiffer, J. (2019). Simulating unmanned-aerial-vehicle based laser scanning data for efficient mission planning in complex terrain, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 943–950. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-943-2019>.
- Cortes, C., Shahbazi, M., and Ménard, P. (2018). UAV-licam system development: calibration and geo-referencing, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 107–114, URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-107-2018>.
- Cramer, M., Haala, N., Laupheimer, D., Mandlbürger, G., and Havel, P. (2018). Ultra-high precision UAV-based lidar and dense image matching, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 115–120. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018>.
- Chenari, A., Erfanifard, Y., Dehghani, M., and Pourghasemi, H. R. (2017). Woodland mapping at single-tree levels using object-oriented classification of unmanned aerial vehicle (uav) images, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W4, pp. 43–49. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-43-2017>.
- Chiabrando, F., Sammartano, G., and Spanò, A. (2017). A Comparison among different optimization levels in 3d multi-sensor models. A test case in emergency context: 2016 italian earthquake, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, pp. 155–162. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-155-2017>.
- Dietrich, J. T. (2016). Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology*, 252, pp. 144–157.
- Gianni, C., Balsi, M., Esposito, S., and Fallavollita, P. (2017). Obstacle detection system involving fusion of multiple sensor technologies, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 127–134. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-127-2017>.
- Leroux, B., Cali, J., Verdun, J., Morel, L., and He, H. (2017). Assessing the reliability and the accuracy of attitude extracted from visual odometry for lidar data georeferencing, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 201–208. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-201-2017>.
- Lin, Y.; Hyypä, J.; Jaakkola, A. (2011). Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 8, pp. 426–430.
- Martínez L., Moreno Jabato, J., Garrido Sáenz de Tejada, J. M., and Rodríguez-Cuenca, B. (2019). Automatic classification of bridges and continental water bodies from 3d point clouds (aerial lidar), *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 1047–1051. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1047-2019>.
- Pan, Y., Yang, B., Li, S., Yang, H., Dong, Z., and Yang, X. (2019). Automatic road markings extraction, classification and vectorization from mobile laser scanning data, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, pp. 1089–1096. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1089-2019>.
- Persad, R. A. and Armenakis, C. (2017). Comparison of 2d and 3d approaches for the alignment of uav and lidar point clouds, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W6, pp. 275–279. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-275-2017>.
- Resop J., Lehmann L., W. Cully Hession (2019). Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: *Comparison with Traditional Aerial Lidar, Drones*, Vol. 3, No. 2, p. 35.
- Sadeepa Jayathunga, Toshiaki Owari, Satoshi Tsuyuki (2018). Evaluating the Performance of Photogrammetric Products Using Fixed-Wing UAV Imagery over a Mixed Conifer-Broadleaf Forest: Comparison with Airborne Laser Scanning. *Remote Sens.*, 10(2), p. 187. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10020187>.
- Thiel, C.; Schumliuss, C. (2017). Comparison of UAV photograph-based and airborne LiDAR-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *Int. J. Remote Sens.*, 38, pp. 2411–2426.
- Toschi, I., Remondino, F., Rothe, R., and Klimek, K. (2018). Combining airborne oblique camera and lidar sensors: investigation and new perspectives, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-1, pp. 437–444. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-437-2018>.