

УДК 62-932:62.532

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ МАШИН НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

Кудінов Є.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

У сучасних умовах цифровізації будівельної галузі та розвитку концепції «розумного будівництва» (Smart Construction) дуже актуальним стає високоточне просторово-часове позиціонування будівельно-дорожніх машин (БДМ). Точне визначення положення, орієнтації та траєкторії руху БДМ є передумовою автоматичного виконання технологічних процесів, що забезпечить зниження витрат, підвищення безпеки та якості виконання робіт. У зв'язку з цим спостерігається підвищений інтерес до методів локалізації, що ґрунтуються на використанні супутникових, інерціальних, радіочастотних та оптико-лазерних технологій. Серед найбільш поширених та перспективних підходів сьогодні виділяють три — GNSS-RTK (Real-Time Kinematic), UWB (Ultra-Wideband) та LiDAR-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), які забезпечують різний рівень точності, стійкості до завад та вимоги до інфраструктури. Саме їхнє порівняння дозволяє визначити оптимальні рішення для конкретних умов експлуатації будівельно-дорожніх машин.

Метод GNSS-RTK базується на використанні фазових вимірювань сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GPS, Galileo, BeiDou) з урахуванням диференційних поправок у режимі реального часу. Завдяки цьому досягається сантиметрова точність позиціонування за умови стабільного прийому сигналів та короткої базової лінії між приймачем і референтною станцією. Такий підхід широко застосовується у дорожньому та інженерному будівництві, де забезпечує надійну глобальну прив'язку БДМ до координатної системи об'єкта. Водночас варто підкреслити, що точність GNSS-RTK значною мірою залежить від видимості супутників, атмосферних умов і мультипасових ефектів, які часто мають місце поблизу мостів, будівель

чи при роботі в глибоких виїмках. Таким чином, GNSS-RTK демонструє найкращі результати у відкритому просторі, але зазнає обмежень у складних радіогеометричних умовах [1].

На відміну від цього, технологія UWB ґрунтується на передачі коротких імпульсів у надширокому частотному діапазоні (3,1–10,6 ГГц), що дозволяє точно вимірювати час проходження сигналу між приймачем і передавачем. Технологія забезпечує високу (до сотень Гц) частоту оновлення даних, низьку затримку передачі й відносну нечутливість до відбиттів сигналів, що робить її особливо ефективною в обмежених просторах, наприклад у кар'єрах, тунелях або на закритих будівельних майданчиках. UWB-технологія забезпечує точність на рівні 5–10 см навіть у складному радіочастотному середовищі. Проте її застосування потребує розгортання інфраструктури анкерних вузлів, які утворюють опорну координатну сітку. Це створює додаткові вимоги до монтажу, калібрування та синхронізації системи, особливо при переміщенні техніки на великі відстані. Незважаючи на це, UWB вирізняється високою стабільністю, стійкістю до погодних умов і можливістю точного вимірювання взаємних відстаней між машинами, що є важливим для кооперативних сценаріїв будівництва [2, 3].

Ще одним підходом до локалізації БДМ є метод LiDAR-SLAM, який поєднує лазерне сканування з алгоритмами одночасної локалізації та побудови тривимірної карти середовища. У цій технології LiDAR-датчик генерує тривимірну хмару точок, що описує навколишнє середовище, тоді як алгоритм SLAM оцінює положення машини на основі взаємного вирівнювання послідовних сканів. Такий підхід забезпечує автономну локалізацію навіть у відсутності супутникового сигналу, що робить його незамінним для робіт у тунелях, під мостами або в міських умовах. Разом із тим, метод LiDAR-SLAM вимагає значних обчислювальних ресурсів і складного калібрування датчиків. Крім того, точність результатів може знижуватися через пил, туман або вібрації, які спотворюють лазерне відображення. У середньому, точність локалізації за допомогою LiDAR-

SLAM становить 2–5 см, що дозволяє ефективно використовувати його для фінішного позиціонування або уточнення траєкторій [4].

Таким чином, кожен із розглянутих методів має свої фізичні, технічні та алгоритмічні обмеження (таблиця 1). GNSS-RTK переважає у глобальній прив'язці та високій метрологічній точності, але потребує безперервного прийому сигналів. UWB характеризується високою частотою оновлення даних і стабільністю в локальних просторах, проте обмежена радіусом дії анкерів. LiDAR-SLAM забезпечує автономність і незалежність від зовнішніх джерел сигналу, але вимагає високих обчислювальних потужностей. Таким чином, вибір конкретного методу має ґрунтуватися на умовах експлуатації, структурі будівельного майданчика, вимогах до точності та доступності інфраструктури.

Таблиця 1 – Порівняння методів локалізації БДМ

Критерій	GNSS-RTK	UWB	LiDAR-SLAM
Середня точність	1–3 см (у відкритому просторі)	5–10 см	2–5 см
Стійкість до перешкод	Низька (залежить від супутників)	Висока	Середня (залежить від середовища)
Частота оновлення	1–20 Гц	до 100 Гц	10–20 Гц
Залежність від інфраструктури	Потрібна базова станція	Потрібні якорі	Не потребує
Вартість системи	Висока (GNSS-обладнання)	Середня	Висока (LiDAR-модуль)
Придатність для важкої техніки	Висока на відкритій місцевості	Висока у закритих зонах	Висока при наявності карти
Типові сценарії застосування	Дороги, відкриті майданчики	Закриті території, склади	Складні умови, автономія

Результати використання за останні роки демонструють, що найбільш ефективним підходом для позиціонування БДМ є інтеграція декількох технологій у межах єдиної системи (Sensor Fusion). Наприклад, GNSS-RTK може забезпечувати глобальну прив'язку координат, UWB – підтримку високої частоти локальних вимірювань, а LiDAR-SLAM – уточнення позиції

у складних умовах або при втраті супутникових сигналів. Застосування розширеного фільтра Калмана, фактор-графових оптимізаторів або адаптивних алгоритмів машинного навчання дозволяє об'єднати ці джерела даних в єдиний узгоджений простір, мінімізуючи похибки та компенсуючи недоліки окремих сенсорів.

З практичного погляду, гібридна система GNSS-RTK + UWB + LiDAR-SLAM здатна забезпечити стабільну точність позиціонування на рівні 2–3 см навіть у динамічних умовах [5]. Вона може адаптивно перемикатися між джерелами залежно від наявності сигналів, що особливо важливо для будівельних майданчиків зі змінними умовами рельєфу, перешкодами та металевими конструкціями. Такий підхід створює основу для побудови інтелектуальних навігаційних систем машинного керування, де локалізація виступає не лише як допоміжна функція, а як центральний елемент цифрового двійника будівельного процесу.

Отже, проведений порівняльний аналіз засвідчує, що кожен із методів локалізації має свою функціональну нішу: GNSS-RTK ефективний на відкритих просторах та трасових робіт, UWB краще підходить для використання у локальних зонах із обмеженою видимістю, LiDAR-SLAM – для автономного високоточного позиціонування у складному середовищі. Поєднання цих методів у межах адаптивної мультисенсорної системи дозволяє досягти найвищої ефективності позиціонування БДМ. Така система здатна працювати стабільно навіть за відсутності окремих сигналів і гарантувати безперервність керування БДМ в умовах реального часу.

Література:

1. Liu, J., Qin, F., Chi, C., Zhang, X., Zhang, Z., Sun, Y., & Zhan, X. (2025). Tightly coupled GNSS RTK-LiDAR-inertial system for consistent urban navigation. *Measurement*, 117671.
2. Chen, Z., Xu, A., Sui, X., Wang, C., Wang, S., Gao, J., & Shi, Z. (2022). Improved-UWB/LiDAR-SLAM Tightly Coupled Positioning System with

- NLOS Identification Using a LiDAR Point Cloud in GNSS-Denied Environments. *Remote Sensing*, 14(6), 1380. <https://doi.org/10.3390/rs14061380>
3. Xu, N., Guan, M., & Wen, C. (2025). A survey on Ultra Wide Band based localization for mobile autonomous machines. *Journal of Automation and Intelligence*.
 4. Sier, H., Li, Q., Yu, X., Peña Queralta, J., Zou, Z., & Westerlund, T. (2023). A Benchmark for Multi-Modal LiDAR SLAM with Ground Truth in GNSS-Denied Environments. *Remote Sensing*, 15(13), 3314. <https://doi.org/10.3390/rs15133314>
 5. Lee, D., Jung, M., Yang, W., & Kim, A. (2024). Lidar odometry survey: recent advancements and remaining challenges. *Intelligent Service Robotics*, 17(2), 95-118.