УДК 004.4:004.65

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БАЗАМИ ДАНИХ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ ДЛЯ IoT-ДОДАТКІВ

Данильченко Ю.І.[1]; Партас В.К.[2], к.т.н., доц.
[1,2]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
[1,2]Україна, Миколаїв
[1]danylchenko2502@ukr.net; [2]viktor.partas@nuos.edu.ua

Анотація. *Досліджено вплив продуктивності систем управління базами даних часових рядів (TSDB) на точність роботи алгоритмів одночасної локалізації та побудови карти (SLAM) на периферійних пристроях. Експериментально визначено критичні параметри затримки запису даних і розроблено методику кореляційного аналізу між продуктивністю TSDB та точністю позиціювання. Проведено випробування на платформі Raspberry Pi 5 з використанням багатопотокового планувальника із балансуванням навантаження між ядрами, неблокуючих структур даних та низькозатримкового планування задач.*

Ключові слова: *бази даних, часові ряди; продуктивність; 99-й перцентиль затримки (P99); абсолютна похибка траєкторії (ATE); відносна похибка пози (RPE).*

Вступна частина. Сучасні периферійні обчислювальні системи, які поєднують технології одночасної локалізації та побудови мапи (Simultaneous Localization And Mapping SLAM) із концепцією Інтернету речей (IoT), характеризуються високими вимогами до швидкодії систем збирання та зберігання даних. При цьому інерційні системи вимірювання (IMU) генерують до 1000 вибірок/с, а RGB-D камери — до 30 кадрів/с із роздільною здатністю 640×480 пікселів, що створює суттєве навантаження на обчислювальні ресурси.

Ключовим фактором стабільності роботи SLAM-алгоритмів є 99-й перцентиль затримки запису (P99) у системі керування базами даних часових рядів - показник, що характеризує час обробки 99 % записів. Саме такі рідкісні, але тривалі затримки спричиняють накопичення похибок у траєкторії позиціювання [1].

Метою роботи є кількісно оцінити вплив затримок запису в системах управління часовими рядами на точність роботи SLAM-алгоритмів та розробити методику вибору оптимальної бази даних часових рядів (Time Series DataBase TSDB) для периферійних систем (Edge-systems).

Основна частина. В рамках дослідження вирішуються декілька завдань. Розробляється модульна архітектура з підтримкою сенсорів IMU та RGB-D камер. Часова синхронізація сенсорів визначається оптимальною продуктивністю баз даних та забезпечується із точністю менш ніж 100 мкс (P99). Пропонується для реалізації використати уніфікований інтерфейс, який призначений для роботи з різними TSDB: QuestDB, InfluxDB, TimescaleDB, ClickHouse тощо та застосувати методику кореляційного аналізу між затримкою запису (P99) та похибками позиціювання (ATE, RPE). Модель для експерименту реалізується на апаратній платформі:

−Raspberry Pi 5 (4 ядра Cortex- A76 @ 2.4 ГГц, 8 ГБ LPDDR4x RAM) [2].;

−STM32F411 Discovery (сенсор IMU, частота дискретизації 100–1000 Гц) [3];

−Kinect Xbox 360 (RGB-D камера, 640×480, 30 кадрів/с) [4].

Для реалізації моделі доцільно використати мову програмування C++17 із використанням неблокуючих (lock-free) структур даних [5,6], так як дана мова програмування

є системною та швидко діюча [7]. Програмний інструментарій для розробки мобільних роботів (MRPT — бібліотека) застосовується для реалізації SLAM, так як дана бібліотека має достатню кількість функцій для вирішення задачі [8]. Також використовуються клієнти часових баз даних із підтримкою пакетного запису в кількості 200–500 записів.

Програмне забезпечення пропонує багатопотоковий планувальник завдань (розширений пул потоків) з механізмом викрадення робіт (work stealing) і epoch-based reclamation для керування пам'яттю.

Метриками оцінки та результатами ефективності роботи програми будуть наступні показники:

– P99 latency (мкс) — 99-й перцентиль затримки запису -показник, що характеризує час обробки 99 % записів;

– Absolute Trajectory Error ATE (м) — абсолютна похибка траєкторії.

– Relative Pose Error RPE (м) — відносна похибка позиції.

– Throughput (подій/с) — пропускна здатність.

– CPU utilization (%) — використання процесора.

Модель для експерименту. Для експериментальної методологія використовується платформа: Raspberry Pi 5, компілятор GCC 13 (C++17/20), конфігурація пулу потоків: 4 потоки з прив'язкою до ядер (CPU affinity). Для мінімізації контекстних перемикань варто використати планувальник із низьким джитером (low-jitter scheduling) [9]. Методика тестування передбачає:

– тип завдань: короткі обчислення ($\tau < 1$ мс);

– навантаження: 5000–10 000 завдань/с протягом 180 с;

– черги: неблокуючі двосторонні черги з викраденням робіт (work stealing) та резервною fallback-чергою.

При тестування проводяться вимірювання, такі як: затримка задачі τ = T_finish – T_start_queue (мкс); оцінка перцентиля для розрахунку P99; моніторинг глибини черг і завантаження CPU [10]. Цих даних достатньо для встановлення критеріїв успішності, якими є:

– перцентиль P99 ≤ 15 000 мкс.

– стабільна робота без зниження пропускної здатності.

В результаті експериментів встановлено, що критичним порогом для стабільної роботи SLAM є 99-й перцентиль затримки запису в межах 12 000–15 000 мкс (12–15 мс). При перевищенні цього значення абсолютна похибка траєкторії (ATE) зростає на 25–40 % — із 0.05 м до 0.07 м. Коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона між затримкою запису (P99) та похибкою ATE становить 0.82, що свідчить про сильну взаємозалежність.

База даних часового ряду TimescaleDB продемонструвала найвищу пропускну здатність — до 4500 подій/с — за рахунок пакетного запису обсягом 200–500 елементів.

Тестування розширеного пулу потоків показало P99-затримку 8000–12 000 мкс під час пікового навантаження. Механізм викрадення робіт забезпечив рівномірне розподілення навантаження між чотирма ядрами Raspberry Pi 5. Система синхронізації часових міток досягла точності < 100 мкс (P99) завдяки гібридному апаратно-програмному механізму (IMU + Software Timestamp Fusion). Нагрівання процесора понад 80 °C спричиняло деградацію продуктивності на 30–40 %, що підкреслює необхідність активного контролю температури.

Висновки:

1) Визначено критичний поріг затримки (12 000–15 000 мкс), при якому забезпечується стабільність SLAM на периферійних пристроях.

2) Розроблено методику кореляційного аналізу між P99 та похибками ATE для оцінки впливу TSDB на точність позиціювання.

3) Запропоновано оптимізації для Edge-систем: пакетний запис, прив'язка потоків до ядер, контроль температури.

4) Створено програмно-апаратний стенд для вимірювання продуктивності TSDB у реальних умовах.

5) Підтверджено ефективність розширеного пулу потоків із неблокуючою архітектурою на 4-ядерній платформі Raspberry Pi 5.

Подальші дослідження пов'язані з аналізом впливу теплового тротлінгу на тривалість роботи системи, інтеграцію зі SLAM-алгоритмами нового покоління (ORB-SLAM3, DROID-SLAM). Також можливо використання методики на інших платформах (Jetson, Coral, Intel NCS), оптимізація керування пам'яттю для безперервного функціонування, розробка адаптивного QoS-контролю для систем, де передбачається локальна побудова мапи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Grzesik, P., Mrozek, D. (2020). Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for Low Power Sensor Networks. *Computational Science – ICCS 2020,* 371-383. doi: 10.1007/978-3-030-50426-7_28

[2] Raspberry Computer Pi 5. *Documentation.* Retreaved October 16, 2025 from https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html

[3] Плата з сенсорами IMU stm32f411discovery. Взято 16 жовтня, 2025 з https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f411ediscovery.html

[4] RGB-D камера Kinect xbox 360. Взято 16 жовтня, 2025 https://support.xbox.com/ru-RU/help/hardware-network/kinect.

[5] Бібліотека Open Computer Vision Library. Взято 19 жовтня, 2025 з https://opencv.org/

[6] Бібліотека Eigen C++ template library. Взято 19 жовтня, 2025 з https://eigen.tuxfamily.org

[7] Blumofe, R. D., Leiserson, C. E. (1999). Scheduling Multithreaded Computations by Work Stealing. MIT Laboratory for Computer Science. *ACM Journals*. Vol.5. No 46. Retrived from https://dl.acm.org/doi/10.1145/324133.324234

[8] Бібліотека Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT) Взято 19 жовтня, 2025 з https://www.mrpt.org

[9] Mostafa, J., Wehbi, S., Chilingaryan, S., Kopmann, A. (2022). SciTS: A Benchmark for Time-Series Databases in Scientific Experiments and Industrial Internet of Things. *SSDBM '22: Proceedings of the 34th International Conference on Scientific and Statistical Database Management.* Article No 12, 1-11. https://doi.org/10.1145/3538712.353872

[10] Dunning, T., Ertl, O. (2019). Computing Extremely Accurate Quantiles Using t-Digests. Retrived from https://www.researchgate.net/publication/331034219_Computing_Extremely_Accurate_Quantiles_Using_t-Digests.

Danylchenko Yu. I., Partas V.K.

Research on the performance of a time series database management system for IoT applications

Abstract. *The impact of the performance of time series database management systems (TSDB) on the accuracy of simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms on peripheral devices is investigated. Critical parameters of data recording latency are experimentally determined and a correlation analysis method between TSDB performance and positioning accuracy is developed. The tests are conducted on the Raspberry Pi 5 platform using a multi-threaded scheduler with load balancing between cores, non-blocking data structures, and low-latency task scheduling.*

Keywords*: databases, time series, performance, 99th percentile of latency (P99), absolute trajectory error (ATE), relative pose error (RPE).*