

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-28>

УДК 004.9

КРИВЕНЧУК ЮРІЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-2504-5833>e-mail: Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua**ШАВАРСЬКИЙ МАКСИМ**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-1379-3244>e-mail: maksym.a.shavarskyi@lpnu.ua

ПОКРАЩЕННЯ ПОЧАТКОВОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У статті представлено новий підхід до локалізації мобільних роботів, що об'єднує Particle Filter та нейронну мережу, яка обробляє зображення з камер та 2D точки лідару. Використовуючи YOLOv8 як feature extractor та PointNet feature extractor, було досягнуто значного покращення точності початкової локалізації, зменшивши середню похибку на 15% порівняно з традиційним Particle Filter. Запропонована архітектура поєднує ознаки зображень та дані лідару в одному шарі, що дозволяє ефективно враховувати візуальну інформацію для корекції позиції робота. Результати симуляцій демонструють стійкість до шуму та здатність до генералізації на зашумлених та аугментованих наборах даних. Запропонований підхід забезпечує більш точну початкову локалізацію, проте потребує додаткових обчислювальних ресурсів. Висвітлено можливі напрямки подальших досліджень, зокрема оптимізацію архітектури моделі та інтеграцію з іншими методами локалізації.

Ключові слова – Particle Filter, YOLOv8, lidar, камера, PointNet.

KRYVENCHUK YURI, SHAVARSKYI MAKSYM

Lviv Polytechnic National University

IMPROVING THE INITIAL LOCALIZATION OF MOBILE ROBOT USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

This paper introduces an innovative approach to enhancing mobile robot localization by integrating the traditional Particle Filter with deep learning techniques. In many dynamic and cluttered environments, the performance of conventional Particle Filters is degraded by sensor noise, partial occlusions, and ambiguous features inherent in environments such as long corridors or uniformly arranged rooms. To overcome these limitations, the proposed method fuses visual data from cameras and 2D lidar point clouds to achieve a more robust initial localization. The methodology leverages YOLOv8 as a state-of-the-art feature extractor for camera images, complemented by PointNet, which processes lidar data. By merging the output of these networks into a unified layer, the system enhances the Particle Filter's estimation, reducing the mean localization error by approximately 15% compared to traditional methods. This hybrid framework not only improves accuracy but also demonstrates a notable reduction in convergence time, which is crucial for real-time applications. Despite the increased computational load incurred by integrating neural network processing, the improved performance and robustness to noise justify the trade-off, particularly in challenging and unpredictable environments. The study is motivated by the critical need for precise localization in autonomous navigation, as accurate position estimation is essential for effective path planning and obstacle avoidance. With the increasing complexity of operational environments, conventional methods often fall short when singular sensor data is affected by noise or when distinctive landmarks are scarce. The proposed approach addresses these challenges by capitalizing on the complementary strengths of visual and spatial sensor modalities. Simulation results confirm that the integrated system not only excels in noisy conditions but also generalizes well across diverse and augmented data scenarios. In summary, this work offers a significant contribution to the field of mobile robot localization by presenting a hybrid architecture that effectively combines classical probabilistic techniques with cutting-edge neural network technology. The successful integration of YOLOv8 and PointNet within the Particle Filter framework paves the way for future research into model optimization and the incorporation of additional localization strategies, ensuring that autonomous systems can perform reliably in a broad range of environmental conditions.

Keywords - Particle Filter YOLOv8, lidar, camera, PointNet.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми

Локалізація мобільних роботів є ключовим завданням у навігації та автономному управлінні. Традиційні методи, зокрема Particle Filter (PF), широко використовуються завдяки своїй гнучкості та здатності працювати в умовах невизначеності. Проте точність PF значною мірою залежить від якості даних, отриманих від сенсорів, таких як лідар, що робить його вразливим до шуму, часткових перешкод та неоднозначних відображень у складних середовищах, таких як громадські вбиральні з численними перешкодами та вузькими просторами. Використання візуальної інформації з камер може значно покращити точність початкової локалізації, але ефективна обробка та інтеграція цих даних з лідарами вимагає застосування складних алгоритмів. Останні досягнення в галузі глибокого навчання, зокрема архітектура YOLOv8, демонструють високу ефективність у витягуванні ознак зображень, але їх застосування в контексті локалізації залишається зовсім не дослідженим. Таким чином, постає проблема: як підвищити точність початкової локалізації мобільних роботів в умовах складних оточень шляхом об'єднання Particle Filter з нейронною мережею, яка обробляє візуальні ознаки зображень та 2D точки лідару, зберігаючи прийнятну обчислювальну ефективність?

Це дослідження спрямоване на розв'язання цієї проблеми шляхом розробки та оцінювання нової архітектури, яка використовує YOLOv8 як feature extractor для візуальних даних та об'єднує їх з інформацією від лідарів, оптимізуючи процес початкової локалізації у складних середовищах.

Аналіз досліджень та публікацій

У дослідженнях [1, 3, 7, 10] автори розглядають використання нейронних мереж для комбінування даних лідару та камери, зокрема застосовують кілька архітектур CNN для покращення точності локалізації в умовах шуму. Ці дослідження акцентують увагу на високій точності, досягнутій завдяки комбінуванню двох джерел даних, але не розглядається застосування Particle Filter для корекції локалізації в реальному часі, що є важливим аспектом для мобільних роботів. В роботах [2,4,6,8] використано відомі підходи до комбінування сенсорних даних (лідар і камера) з використанням нейронних мереж, однак більшість з них зосереджена на статичних умовах або використанні моделей SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Це дослідження пропонує розширене застосування нейронних мереж, але не враховує специфіку алгоритмів, таких як Particle Filter, для динамічної адаптації локалізації в реальному часі. В роботах [5,9,11] реалізовані дослідження найближче до запропонованого підходу, оскільки воно поєднує традиційний Particle Filter з ознаками, отриманими від нейронних мереж. Однак автори використовують CNN, тоді як ми застосовуємо YOLOv8, що дозволяє ефективно витягувати ознаки за допомогою глибоких мереж, спеціалізованих на обробці зображень. Крім того, наша модель інтегрує 2D точки лідару в архітектуру, що забезпечує додаткову точність.

Формулювання цілей статті

Метою цієї статті є розробка та оцінка нової архітектури для покращення точності початкової локалізації мобільних роботів в складних середовищах, зокрема в умовах шуму та перешкод. У статті пропонується інтеграція класичного методу Particle Filter з нейронною мережею, що обробляє візуальні дані (зображення) з камер та 2D точки лідару. Основною метою є підвищення точності початкової локалізації за допомогою YOLOv8 як feature extractor, а також покращення швидкодії та стійкості до шуму і аугментацій даних. Стаття також спрямована на порівняння ефективності запропонованого підходу з традиційними методами, такими як Particle Filter, з урахуванням обчислювальних ресурсів та точності результатів. Нижче приклади, коли роботу необхідно зрозуміти де він є на мапі, особливо, коли він опиняється у середовищі без чітких особливих ознак для Particle Filter, тобто коридори, кімнати зі схожим рельєфом. Процес локалізації може зайняти багато часу, адже алгоритм Particle Filter не здатен за розумний час знайти себе на великій мапі. З допомогою візуальної інформації задачу можна вирішити дуже швидко (враховуючи те, що даних є достатньо для тренування нейромережі).

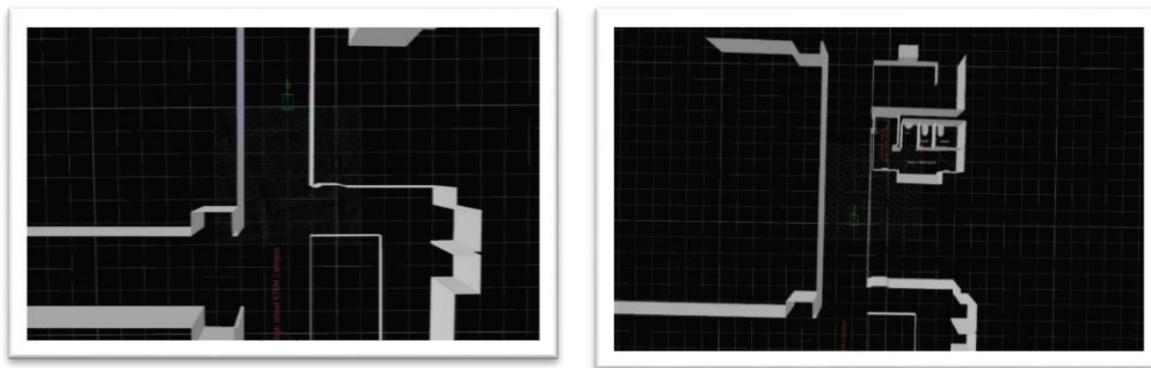


Рис 1. Particle Filter намагається локалізувати робота на великій мапі у коридорі

Виклад основного матеріалу

Локалізація мобільних роботів є фундаментальною проблемою в робототехніці, що полягає у визначенні точного положення та орієнтації робота в навколишньому середовищі. Це завдання ускладнюється через невизначеності, пов'язані з сенсорними вимірюваннями та динамічними змінами оточення. Одним із найефективніших підходів для розв'язання цієї проблеми є використання Particle Filter (PF) — методів Монте-Карло, які застосовуються для оцінки стану нелінійних динамічних систем. PF дозволяє представляти розподіл ймовірностей положення робота за допомогою набору випадкових зразків (частинок), що забезпечує гнучкість та точність у моделюванні складних систем. Particle Filter працює шляхом представлення ймовірнісного розподілу стану системи набором частинок, де кожна частинка описує можливий стан робота. Алгоритм зазвичай починається з ініціалізації великої кількості частинок, після чого на етапі прогнозування кожна частинка переміщується згідно з динамічною моделлю. На наступному етапі відбувається оновлення ваг частинок на основі нових сенсорних даних, що дозволяє оцінити, наскільки кожна гіпотеза відповідає дійсності. В завершальному етапі виконується ресемплінг, де частинки з вищими вагами дублюються, а менш ймовірні — відкидаються, що допомагає зосередити розподіл ймовірностей на найбільш перспективних гіпотезах. Однак, незважаючи на свою ефективність, Particle Filter має деякі обмеження. Збільшення

кількості частинок може призвести до високих обчислювальних витрат, що ускладнює застосування алгоритму в режимі реального часу. Крім того, точність методу залежить від якості початкової ініціалізації та моделі руху, а також від надійності сенсорних даних, які можуть містити шум. Для покращення роботи алгоритму дослідники розглядають можливість адаптивного керування кількістю частинок, інтеграцію даних з додаткових сенсорів (наприклад, камер та 2D лідарів) та використання методів машинного навчання для оптимізації процесів прогнозування та оновлення ваг, що відкриває перспективи для підвищення точності локалізації в складних умовах.

Процес збору даних для тренування

Процес збирання даних виглядає наступним чином: колісна база робота оснащена сенсорами, що дозволяють одночасно записувати зображення, 2D точки з лідару та інформацію про поточну позицію відносно початку мапи. Мапа представляється як набір лінків та джоїнтів, які описують основні елементи середовища (стіни, двері, туалети, пісюари). Формат мапи схожий на URDF, але модифікований для задоволення специфічних потреб дослідження. Записані дані завантажуються з робота та трансформуються, щоб створити єдиний структурований датасет для тестування. Першим кроком є ручна фільтрація даних, що допомагає уникнути помилок та виключити некоректні записи. Для порівняльного аналізу використовуються як оригінальний датасет, та дані, які були зашумлені та аугментовані, що сприяє підвищенню генералізації розробленої системи локалізації. На скріншотах нижче показано 6 відеострімів з камер (права частина зображення) розташованих на роботі та точки LiDAR (ліва частина зображення), які повторюють геометрію навколишнього середовища.

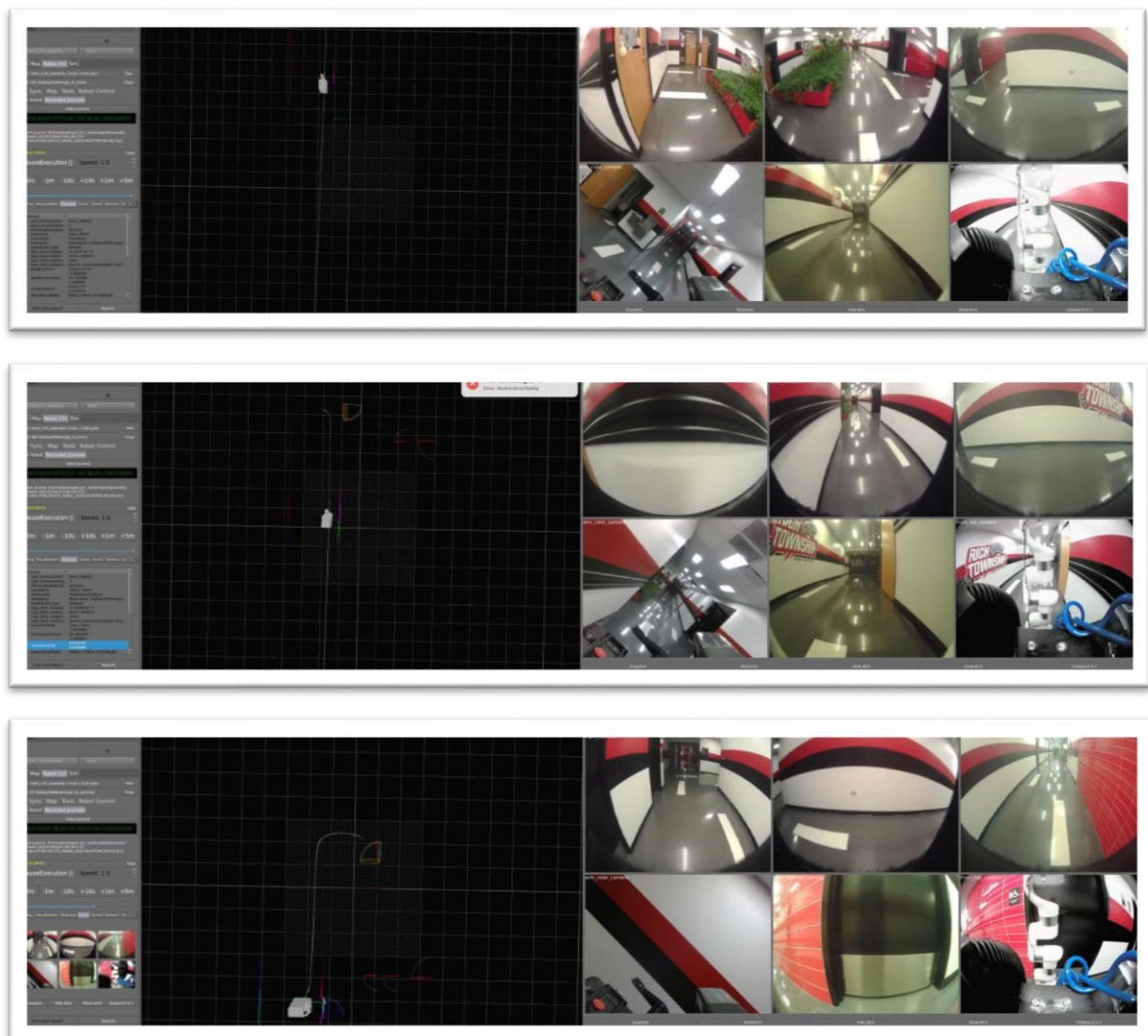


Рис 2. Процес нагромадження даних з відео потоку

Для кращого розуміння точки LiDAR візуалізовано в 3D. У нейронну мережу вони потраплятимуть у 2D вигляді.

Архітектура нейронної мережі

Основна ідея дослідження полягає у підвищенні точності початкової локалізації мобільного робота шляхом інтеграції даних з камер та 2D лідарів через нейронну мережу в існуючий алгоритм Particle Filter. Використовуючи YOLOv8 як feature extractor для зображень та додаткові лінійні шари

для обробки лідар-даних, ми об'єднуємо інформацію з різних сенсорів в єдине представлення, що дозволяє більш точно оцінювати позицію та орієнтацію робота. Такий підхід спрямований на створення більш стабільної та адаптивної системи локалізації в умовах невизначеності та змін середовища.

YOLO (You Only Look Once) працює за наступним алгоритмом:

- Обробка зображення: Вхідне зображення передається через єдину CNN, яка екстрагує ознаки з використанням згорткових шарів.
- Розбиття на сітку: Зображення ділиться на сітку клітин, де кожна клітинка відповідає за виявлення об'єктів, що знаходяться в її межах.
- Прогнозування: Для кожної клітинки мережа одночасно прогнозує кілька обмежувальних рамок (bounding boxes), їх довірчі оцінки (confidence scores) та класифікаційні ймовірності для різних класів об'єктів.
- Підсумкове визначення: За допомогою алгоритму неперекритого пригнічення (Non-Maximum Suppression) видаляються надлишкові рамки, залишаючи лише найбільш релевантні прогнозовані об'єкти.

Таким чином, YOLO здійснює детекцію об'єктів за один прохід через мережу, що забезпечує високу швидкість і ефективність роботи в режимі реального часу.

Архітектура нейромережі має дві основні гілки обробки даних:

- Гілка зображення: Використовуємо YOLOv8 як feature extractor, відкинувши останні класифікаційні шари. Це дозволяє отримати високорівневий вектор ознак із зображення.
- Гілка 2D точок лідарів: Використовуємо PointNet як feature extractor, відкинувши останні класифікаційні шари. Це дозволяє отримати високорівневий вектор ознак із LiDAR точок.

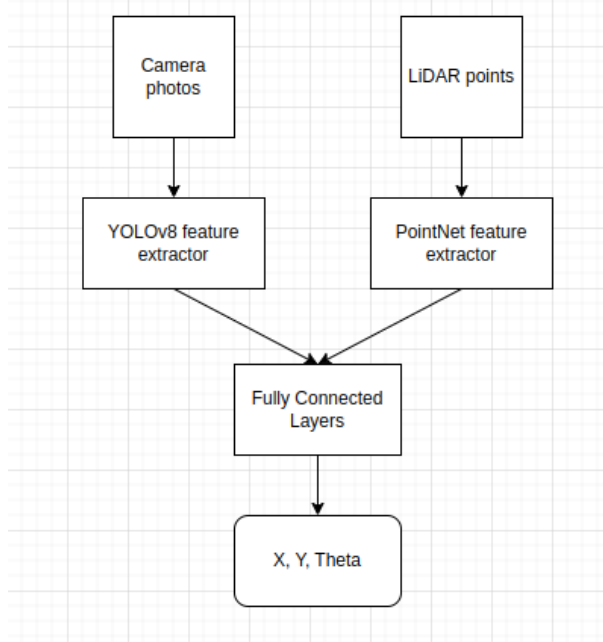


Рис 3. Архітектура нейронної мережі

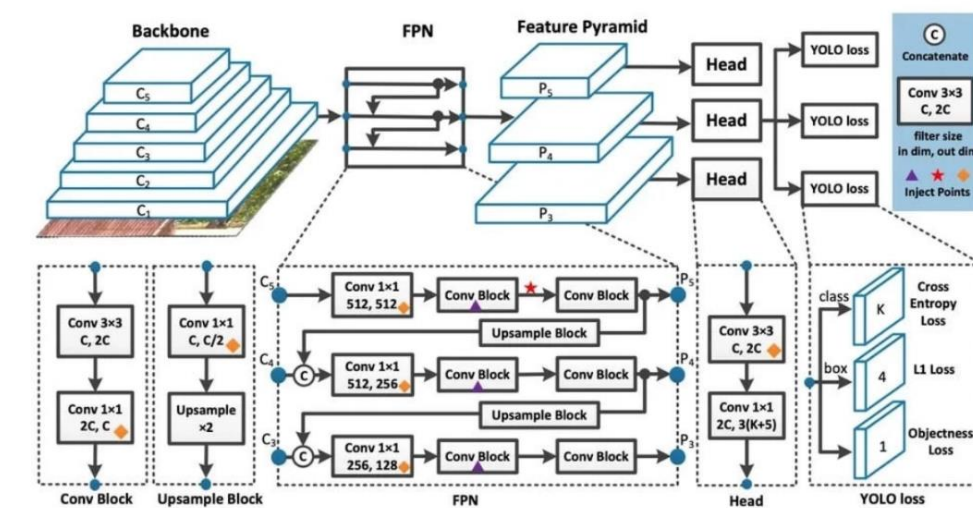


Рис 4. YOLOv8 архітектура FPN – YOLOv8 feature extractor

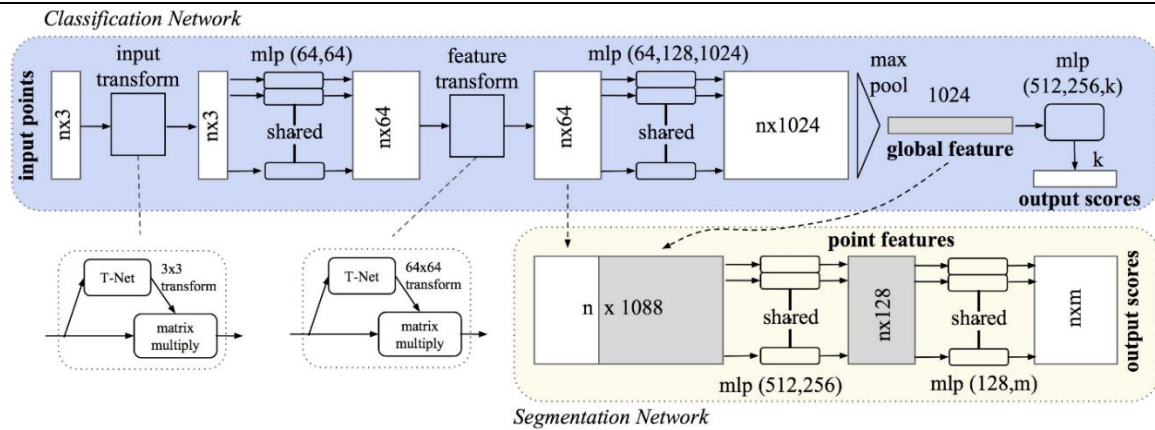


Рис 5. PointNet архітектура

Після цього ознаки з обох гілок об'єднуються та проходять через додаткові лінійні шари. На виході отримуємо три числа: два значення для позиції робота (x, y) та одне значення для кута повороту (θ).

Щодо функції втрат (loss function), оскільки задача є регресійною, логічно використати комбінацію втрат для позиції та кута. Оскільки кут є періодичним значенням, для нього можна застосувати $\cos$ функцію, що дозволяє коректно враховувати перехід від 2π до 0. Пропоную таку функцію втрат:

$$L = \lambda_{pos} \cdot [(X_{pred} - X_{true})^2 + (Y_{pred} - Y_{true})^2] + \lambda_{theta} \cdot [1 - \cos(\theta_{pred} - \theta_{true})] \quad (1)$$

де:

- X_{pred} , Y_{pred} : передбачені координати положення робота
- X_{true} , Y_{true} : істинні координати положення робота
- θ_{pred} : передбачений кут орієнтації
- θ_{true} : істинний кут орієнтації
- λ_{pos} : ваговий коефіцієнт для позиційної частини втрат
- λ_{theta} : ваговий коефіцієнт для кутової частини втрат

Такий підхід дозволяє точно вимірювати похибку позиції через квадратичну втрату, а для кута – врахувати його періодичну природу через $1 - \cos(\Delta\theta)$, що є гладкою та диференційованою функцією.

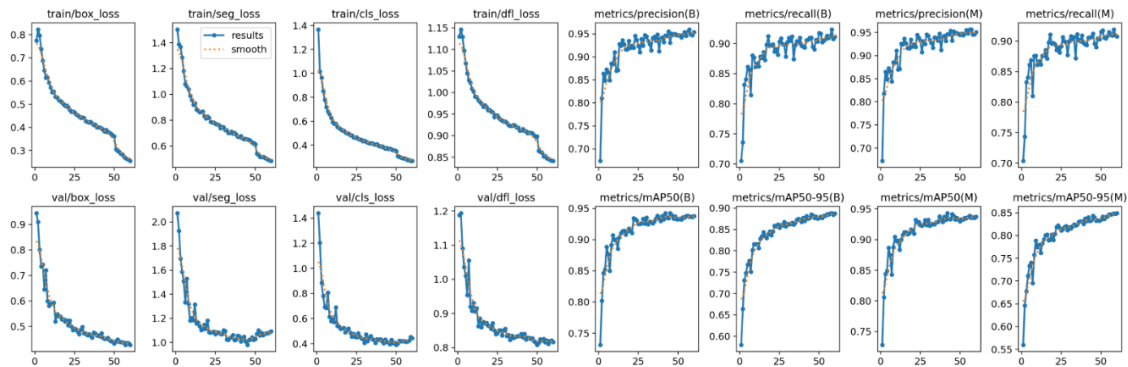


Рис 6. Результати тренування нейронної мережі.

Таблиця 1

Порівняння результатів роботи Particle Filter та PF + CNN

Метод	Середній час розрахунку початкової позиції (с)	Навантаження CPU (%)	Середня похибка локалізації (м)
PF(базова система)	2-inf	~50	1.05-3.1
PF+YOLOv8+ PointNet(пропонований підхід)	0.1-0.2	~65	0.243-0.371

Висновок

У цьому дослідженні запропоновано підхід до покращення локалізації мобільних роботів шляхом об'єднання Particle Filter з нейронною мережею, що обробляє візуальні дані (зображення) та 2D точки лідару. Використання YOLOv8 як feature extractor дозволило ефективно витягувати візуальні ознаки, що суттєво покращило точність початкової локалізації на ~15% у порівнянні з базовою

системою. Хоча інтеграція нейронної мережі призвела до збільшення обчислювальних витрат, отримане підвищення точності виправдовує додаткові витрати ресурсів. Запропонований підхід демонструє стійкість до шуму та здатність до генералізації, що підтверджується результатами на зашумленому та аугментованому датасетах. До переваг запропонованого підходу можна віднести підвищену точність локалізації: Інтеграція нейронної мережі дозволяє точніше оцінювати положення та орієнтацію робота, що особливо корисно в умовах складного оточення або часткової відсутності лідар-даних. Та більшу стійкість до шуму: Завдяки обробці візуальної інформації модель краще працює в умовах зашумлених або неоднозначних даних від лідару. Щодо недоліків можна віднести необхідність великих обсягів даних для навчання: Для забезпечення високої точності локалізації потрібні великі та різноманітні датасети, що ускладнює процес збору даних.

Літератури

1. Kim S., Lee J. (2023). Robotics and Automation Letters: Multi-sensor Fusion for Robust Localization Using LiDAR and Camera Inputs.
2. Li Y., Huang Z. (2021). Transactions on Intelligent Transportation Systems: Robust Sensor Fusion Algorithms for Localization in Dynamic Urban Environments.
3. Zheng L., Zhou X. (2022). Journal of Field Robotics: Optimizing Particle Filters for Dynamic Environments in Mobile Robotics.
4. Xie L., Liu Y. (2022). Journal of Robotics Research: Integrating Object Detection for Localization with YOLO and Kalman Filters.
5. Yao X., Yang X. (2022). Mobile Robot Localization Using Multi-Modal Sensor Fusion with Deep Learning. Sensors Volume 24, Issue 1.
6. Tan J., Chen L. (2023) Advanced Robotics: Enhancing Particle Filters with YOLO-Based Object Detection for Robot Localization.
7. Bhat D., Dey R. A (2022) Journal of Robotics and Automation: Survey on Sensor Fusion for Mobile Robot Localization.
8. Chen H., Zhang S. (2021). YOLOv4 Robotics and Autonomous Systems: Visual Odometry for Mobile Robots in Dynamic Environments Using.
9. Moosavi M., Ota Y. (2022). Robotics and Autonomous Systems: Robust Localization for Autonomous Vehicles Using YOLO and LiDAR.
10. Wang J., Zeng S. (2021) Autonomous Robots: A Comparison of Visual and LiDAR-Based Localization Techniques for Mobile Robots.
11. Ultralytics. YOLOv8: State-of-the-art Object Detection and Segmentation – 2023.: <https://docs.ultralytics.com>.

References

1. Kim S., Lee J. (2023). Robotics and Automation Letters: Multi-sensor Fusion for Robust Localization Using LiDAR and Camera Inputs.
2. Li Y., Huang Z. (2021). Transactions on Intelligent Transportation Systems: Robust Sensor Fusion Algorithms for Localization in Dynamic Urban Environments.
3. Zheng L., Zhou X. (2022). Journal of Field Robotics: Optimizing Particle Filters for Dynamic Environments in Mobile Robotics.
4. Xie L., Liu Y. (2022). Journal of Robotics Research: Integrating Object Detection for Localization with YOLO and Kalman Filters.
5. Yao X., Yang X. (2022). Mobile Robot Localization Using Multi-Modal Sensor Fusion with Deep Learning. Sensors Volume 24, Issue 1.
6. Tan J., Chen L. (2023) Advanced Robotics: Enhancing Particle Filters with YOLO-Based Object Detection for Robot Localization.
7. Bhat D., Dey R. A (2022) Journal of Robotics and Automation: Survey on Sensor Fusion for Mobile Robot Localization.
8. Chen H., Zhang S. (2021). YOLOv4 Robotics and Autonomous Systems: Visual Odometry for Mobile Robots in Dynamic Environments Using.
9. Moosavi M., Ota Y. (2022). Robotics and Autonomous Systems: Robust Localization for Autonomous Vehicles Using YOLO and LiDAR.
10. Wang J., Zeng S. (2021) Autonomous Robots: A Comparison of Visual and LiDAR-Based Localization Techniques for Mobile Robots.
11. Ultralytics. YOLOv8: State-of-the-art Object Detection and Segmentation – 2023.: <https://docs.ultralytics.com>.