

Abstract

Autonomous robots depend on precise localization and an accurate environmental model for efficient operation. This is why Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) is a crucial area of research in robotics, enabling autonomous systems to navigate and understand their environments without prior knowledge. This dissertation focuses on LiDAR-based SLAM, emphasizing the role of different map representations and their impact on localization accuracy.

It introduces two distinct approaches, resulting in a scalable mapping solution that also enhances the robustness of SLAM in diverse environments. The first one is based on a feature-based structure with planar and linear features, while the second utilizes surfels that are optimized through bundle adjustment along with the poses. The outcomes of the research demonstrate how these representations influence the SLAM performance by improving data association, reducing redundancy, and enhancing long-term map consistency. It also investigates the role of map structure in SLAM efficiency, analyzing how feature selection impacts computational requirements.

Moreover, the dissertation presents a method for incorporating data from the Global Navigation Satellite System (GNSS) into the SLAM framework using a factor graph optimization approach. Although LiDAR-based SLAM achieves high local accuracy, integrating GNSS data improves overall reliability and reduce drift, especially in large-scale environments where long trajectories are involved. The proposed GNSS-augmented SLAM system incorporates raw pseudorange and Doppler shift measurements, effectively reducing accumulated errors and enhancing global positioning accuracy.

Beyond theoretical contributions, this research validates its findings through real-world tests. Experimental evaluations demonstrate that the proposed map representations contribute to more accurate and reliable localization, particularly in structure-rich environments. In addition, optimized map structure significantly improves its quality in terms of both qualitative and quantitative metrics. The scalability of the developed systems is validated on publicly available, large-scale datasets, highlighting its effectiveness in processing long sequences. Furthermore, conducted evaluation confirms that the fusion of GNSS and LiDAR data improves trajectory estimation, providing robust localization in various environments where LiDAR-based methods alone may face difficulties due to feature sparsity.

Moreover, two real-world experiments were conducted in urban transportation and agricultural applications. The deployment of a GNSS-based localization system for electric buses demonstrates its effectiveness in the metropolitan area, highlighting the feasibility of integrating advanced localization into public transportation. Agricultural field tests show that the combination of GNSS with visual odometry enhances localization reliability, particularly in environments with inconsistent availability of the satellite signal. These practical implementations reinforce the importance of multi-sensor fusion in addressing real-world challenges.

In conclusion, the results presented in this dissertation underscore the importance of LiDAR-based SLAM, the impact of map representations on localization accuracy, and the benefits of integrating GNSS data for large-scale mapping. By advancing SLAM methodologies through multi-sensor fusion and optimization techniques, this research establishes the basis for more reliable and efficient autonomous systems across a wide range of applications. The dissertation also explores potential future advances in SLAM methodologies that can be implemented to further refine its performance.

Streszczenie

Autonomiczne roboty wymagają precyzyjnej lokalizacji oraz dokładnego modelu środowiska aby działać efektywnie. Z tego względu systemy Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) stanowią kluczowy obszar badań w robotyce, umożliwiając autonomiczną nawigację oraz zrozumienie otoczenia bez wcześniejszej wiedzy na jego temat. Niniejsza rozprawa koncentruje się na systemach SLAM wykorzystujących dane z sensora LiDAR, podkreślając rolę różnych reprezentacji map oraz ich wpływ na dokładność dostarczanej lokalizacji.

W pracy zaprezentowano dwa różne podejścia do budowania mapy, prowadzące do opracowania skalowalnego rozwiązania zwiększającego dokładność systemu SLAM w różnorodnych środowiskach. Pierwsze z nich bazuje na strukturze cech z wykorzystaniem elementów płaszczyznowych i liniowych, natomiast drugie oparte jest na reprezentacjach surfelowych, optymalizowanych razem z trajektorią za pomocą metody bundle adjustment. Przeprowadzone badania pokazują jak wykorzystane reprezentacje wpływają na działanie systemu SLAM poprzez poprawę dopasowania danych, redukcję liczby punktów oraz zwiększenie spójności mapy. Rozpatrzony został również wpływ doboru cech w strukturze mapy na wydajność obliczeniową i efektywność systemu.

Dodatkowo rozprawa prezentuje metodę integracji danych z globalnego systemu nawigacji satelitarnej (GNSS) z systemem SLAM przy użyciu optymalizacji grafu ograniczeń. Mimo że systemy LiDAR SLAM zapewniają wysoką dokładność w lokalnym otoczeniu, integracja danych GNSS pomaga zwiększyć niezawodność oraz ograniczyć dryf w przypadku długich trajektorii. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje surowe pomiary pseudoodległości i przesunięcia Dopplera, skutecznie poprawiając globalną dokładność lokalizacji.

Skuteczność opracowanych metod została zweryfikowana w rzeczywistych eksperymentach, które pokazują, że zaproponowane reprezentacje map przyczyniają się do dokładniejszej i bardziej niezawodnej lokalizacji. Ponadto optymalizacja struktury mapy znacząco poprawia jej jakość zarówno pod względem wizualnym, jak i numerycznej wartości błędu. Skalowalność opracowanych systemów została zweryfikowana na publicznie dostępnych zbiorach danych. Dodatkowo, przeprowadzona ewaluacja potwierdza, że fuzja danych GNSS oraz LiDAR zapewnia poprawę lokalizacji w środowiskach, gdzie metody korzystające wyłącznie z sensora LiDAR mają trudności.

W pracy przedstawiono również wyniki eksperymentów dotyczących systemów lokalizacji dla elektrycznych autobusów w transporcie miejskim oraz maszyn w rolnictwie, przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach oraz w kontekście ich praktycznego zastosowania. Implementacja metody lokalizacji autobusu wykazała jego skuteczność w zurbanizowanym środowisku, podkreślając tym samym możliwość jego integracji z infrastrukturą transportu publicznego. Dodatkowo, testy lokalizacji maszyny rolniczej w warunkach polowych pokazały, że połączenie danych GNSS z odometrią wizyjną poprawia niezawodność lokalizacji, szczególnie w środowiskach w których występują zakłócenia sygnału satelitarnego. Testy te podkreślają znaczenie fuzji danych z wielu sensorów w przypadku systemów, których zadaniem jest praca w rzeczywistych warunkach.

Podsumowując, wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie podkreślają znaczenie systemów SLAM, wpływ reprezentacji mapy na dokładność lokalizacji oraz korzyści płynące z integracji danych GNSS, które poprawiają dokładność estymowanej trajektorii. Opracowane rozwiązania wykorzystują fuzję wielosensoryczną realizowaną poprzez optymalizację grafu ograniczeń oraz stanowią podstawę do dalszego rozwoju bardziej efektywnych metod. W rozprawie zawarto również potencjalne przyszłe prace, mające na celu dalszą poprawę skuteczności systemów SLAM.