

Title: Algorithm Architecture Adequacy for real-time localization based on the data fusion of visual odometry and inertial measurements.

Keywords: Autonomous navigation, image pre-processing, real-time embedded localization, GPU-aware Software Design, FPGA-Hardware/Software Co-design.

Abstract:

Research on autonomous vehicle navigation is a major interest for the automotive industry and research organizations. Fully automating a vehicle's navigation requires devices or functions that help it perceive, analyze, and interpret its surroundings to locate itself precisely and identify all stationary or moving objects while predicting their movements over time. This automation relies on multiple sensors generating a large volume of data for processing and analysis. Therefore, the electronic system's size, the choice of an appropriate architecture, and the efficiency of the embedded software are crucial for the real-time implementation of such a system. We examined existing visual-inertial simultaneous localization and mapping (VI-SLAM) solutions for visual odometry perception and state estimation by inertial units.

This analysis led us to focus on the front-end of this type of system, specifically image pre-processing, as a critical part in terms of precision and extensive computation to match the sensor frequency as closely as possible. We developed a method for detecting and tracking corners and line segments using a proposed multi-level contour detector. We planned for parallel tasks and independent scheduling between different blocks at the design phase to achieve a suitable implementation in an embedded heterogeneous architecture, taking advantage of GPU and FPGA accelerators. Using the A3, we proposed an appropriate implementation on CPU-GPU and CPU-FPGA architectures, which showed promising improvements for SLAM applications. Additionally, we proposed an observer based on an extended Kalman filter (EKF) to merge visual and inertial data for estimating the vehicle's position.

Titre: Adéquation Algorithme Architecture pour la localisation temps réel basée sur la fusion de données issues de l'odométrie visuelle et des mesures inertielles.

Mots clés: Navigation autonome, prétraitement d'images, localisation embarquée en temps réel, conception logicielle basée sur le GPU, co-conception FPGA-matériel/logiciel.

Résumé:

La recherche sur la navigation autonome des véhicules est un intérêt majeur pour l'industrie automobile et les organismes de recherche. L'automatisation complète de la navigation d'un véhicule nécessite des dispositifs ou des fonctions qui l'aident à percevoir, analyser et interpréter son environnement pour se localiser précisément et identifier tous les objets stationnaires ou en mouvement tout en prédisant leurs mouvements dans le temps. Cette automatisation s'appuie sur de multiples capteurs générant un grand volume de données à traiter et à analyser. Par conséquent, la taille du système électronique, le choix d'une architecture appropriée et l'efficacité du logiciel embarqué sont cruciaux pour la mise en œuvre en temps réel d'un tel système. Nous avons examiné les solutions existantes de localisation et de cartographie simultanées visuo-inertielles (VI-SLAM) pour la perception visuelle de l'odométrie et l'estimation d'état par des centrales inertielles. Cette analyse nous a conduit à nous concen-

trer sur le front-end de ce type de système, en particulier le prétraitement d'images, comme une partie critique en termes de précision et de calcul extensif pour correspondre au plus près à la fréquence du capteur. Nous avons développé une méthode de détection et de suivi des coins et des segments de ligne à l'aide d'un détecteur de contours multi-niveaux proposé. Nous avons prévu des tâches parallèles et une planification indépendante entre différents blocs lors de la phase de conception pour obtenir une implémentation adaptée dans une architecture hétérogène embarquée, en tirant parti des accélérateurs GPU et FPGA. En utilisant l'A3, nous avons proposé une implémentation appropriée sur les architectures CPU-GPU et CPU-FPGA, qui ont montré des améliorations prometteuses pour les applications SLAM. De plus, nous avons proposé un observateur basé sur un filtre de Kalman étendu (EKF) pour fusionner les données visuelles et inertielles afin d'estimer la position du véhicule.

Publications

- Journal:

1. Ayoub Mamri, Abdelhafid El Hadri and Abdelaziz Benallegue. "Hardware/Software Co-Design of Multi-Level Edge Detector on Low-Cost FPGA-Based Embedded Heterogeneous Architecture". **IEEE Embedded Systems Letters**, 19 May 2025, doi: 10.1109/LES.2025.3571311.
2. Ayoub Mamri, Abdelhafid El Hadri and Abdelaziz Benallegue. "Feature-PLPD: Feature-Point and Line Points Detection for Real-Time Embedded Visual Odometry-based Systems". **IEEE Signal Processing Letters**, vol. 32, pp. 1890-1894, 21 April 2025, doi: 10.1109/LSP.2025.3562826.

- Conferences:

1. Ayoub Mamri, Abdelhafid El Hadri and Abdelaziz Benallegue. "Embedded Feature-Line Points Tracker for real-time Visual Odometry-based system". Paper accepted for presentation at the **IEEE 33rd Mediterranean Conference on Control and Automation**, 8 April 2025.
2. Ayoub Mamri, Mohamed Abouzahir, Mustapha Ramzi and Mohamed Sbihi. "High-level synthesis implementation of monocular SLAM on low-cost parallel platforms". **International Conference on Digital Technologies and Applications**, pp. 399-409, Cham: Springer International Publishing, 2021.
3. Ayoub Mamri, Mohamed Abouzahir, Mustapha Ramzi and Rachid Latif. "ORB-SLAM accelerated on heterogeneous parallel architectures". **E3S Web of Conferences**, vol. 229, p. 01055, 2021.