

UAV의 RTK GPS와 VIO 통합 항법을 이용한 다수 UGV 전역 지도 초기화 및 병합 기술에 대한 연구

서정형, 신수용

국립금오공과대학교

jeonghyeongseo@kumoh.ac.kr, wdragon@kumoh.ac.kr

Research on Global Map Initialization and Merging for Multiple UGVs via UAV-based RTK GPS and VIO Integrated Navigation

Seo Jeong Hyeong, Shin Soo Young

Kumoh National Institute of Technology.

요약

본 논문은 다수의 UGV(Unmanned Ground Vehicle)가 실내와 실외에 동시에 다발적으로 분산 배치된 복합 환경에서, 외부 인프라나 사람의 개입 없이 이들의 전역 좌표를 자율적으로 초기화하는 기법을 제안한다. 광범위한 지역에 흩어져 있는 로봇들의 맵 병합을 위해서는 정확한 초기 위치 정보가 필수적이나, 이를 수동으로 측정하는 것은 현실적으로 불가능하며 시스템의 자율성을 저해한다. 기존의 연구는 UAV의 위치 정확도를 확보하기 위해 실내 모션 캡처 시스템(MoCap)과 같은 외부 보조 장치에 의존해야 하는 한계가 있었다. 본 연구에서는 UAV에 RTK-GPS와 시각 관성 주행 거리 측정(VIO)을 결합한 통합 항법을 적용하여, 실외의 정밀한 전역 좌표를 실내까지 단절 없이 유지한다. 이를 통해 UGV가 실내와 어느 곳에 위치하든 상관없이, UAV가 공중에서 마커를 탐지하는 것만으로 모든 UGV의 초기 포즈를 단일 전역 좌표계 상에 즉각적으로 산출하는 기술을 제안한다.

I. 서론

수색 및 구조(SAR)나 대규모 시설 감시와 같은 실제 작전 환경에서는 다수의 UGV가 실외 개방 구역과 실내 밀폐 구역에 동시에 투입되어 임무를 수행하는 상황이 빈번하다. 이처럼 다양한 공간에 흩어져 있는 로봇들이 획득한 데이터를 하나의 유의미한 전역 지도로 통합(Map Merging)하기 위해서는, 각 로봇이 공통된 좌표계 상에서 어디에 위치하는지 정확한 초기 포즈(Initial Pose)를 파악하는 것이 선결 과제이다.

그러나 실내외에 걸쳐 광범위하게 분산된 다수 로봇의 초기 위치를 사람이 일일이 수동으로 측정하는 것은 막대한 시간과 인력이 소요될 뿐만 아니라, 작전 현장에서는 사실상 불가능에 가깝다. 이는 멀티 로봇 시스템의 완전한 자율 운용을 가로막는 핵심적인 걸림돌이다. 이전 연구에서는 UAV가 하향 카메라로 UGV 상단의 시각 마커를 탐지하여 이 문제를 해결하려 했으나[1], 정작 UAV 자신의 위치를 파악하기 위해 실내에 고정된 외부 카메라 시스템(MoCap)을 설치해야 하는 제약 때문에 실제 복합 환경에는 적용할 수 없었다.

본 논문은 UGV가 실내에 있든 실외에 있든 상관없이, 외부 인프라의 도움 없이 단일 UAV 시스템만으로 이들의 초기 전역 좌표를 모두 알아내는 것을 목표로 한다. 이를 위해 UAV가 스스로 실외의 RTK-GPS 정밀도를 실내 비행 시에도 연속적으로 활용하게 하는 기법을 제안한다. UAV는 실외에서 확보한 전역 좌표 정보를 기반으로 실내 진입 후에도 VIO를 통해 좌표계의 연속성을 유지하며, 이를 공중 센서로 활용하여 분산된 UGV들의 시작점을 공통 맵 상에 즉각적으로 투영한다.

II. 본론

2.1 전역 좌표계(ECEF) 설정 및 유지 기술

시스템은 비행 시작 시 수신된 첫 번째 정밀 GPS 데이터를 원점으로 설정하여 전역 지리 좌표계(W , Earth-centered, Earth-fixed)를 구축한다. UAV는 비행 중 GPS 신호가 간헐적으로 단절되는 구역에서도 최적화 프레임워크를 통해 상태 벡터를 지속적으로 업데이트하여 좌표계의 연속성을 유지한다

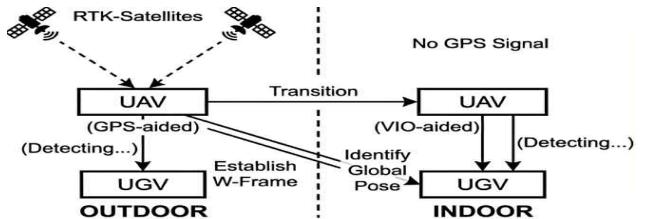


그림 1 제안하는 시스템의 운용 시나리오. UAV가 GPS가 가능한 실외 환경에서 RTK 기반으로 전역 좌표를 획득한 후, GPS가 단절된 실내 환경으로 진입하여 VIO를 통해 좌표를 유지하며 UGV를 탐지한다.

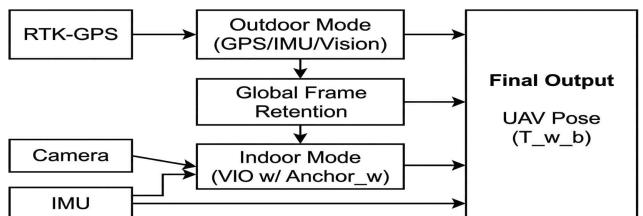


그림 2 RTK-GPS 신호의 수신 여부에 따라 실외 모드(GPS/VIO 통합)와 실내 모드(VIO+Anchor 보존)로 자동 전환되며 연속적인 UAV 전역 포즈를 추정한다.

GPS 수신 여부에 따른 UAV의 상태 추정 모델(T_{UAV}^w)은 다음과 같이 정의된다.

$$T_{UAV}^w = \begin{cases} f(GPS_{RTK}, IMU, Vision), & \text{if } GPS \text{ available (Outdoor)} \\ f(IMU, Vision | Anchor_w), & \text{if } GPS \text{ unavailable (Indoor)} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $Anchor_w$ 는 GPS 신호가 소실되기 직전의 최적화된 전역 좌표 정보를 의미한다. 이 과정을 통해 GPS 신호가 소실된 실내 상황에서도 VIO 데이터가 전역 좌표계 상의 위치를 보존하게 된다[2][3].

2.2 ArUco 마커 기반 UGV 전역 포즈 산출

UAV의 하향 텁스 카메라는 UGV 상단에 부착된 5x5 그리드 패턴의 아르코마커를 실시간으로 탐지한다. 마커 감지 시 계산되는 카메라 기준 상태 포즈(T_{Marker}^{Cam})는 UAV가 유지 중인 전역 포즈(T_{UAV}^w)와 결합되어 UGV의 전역 좌표(T_{UGV}^w)로 변환된다[1].

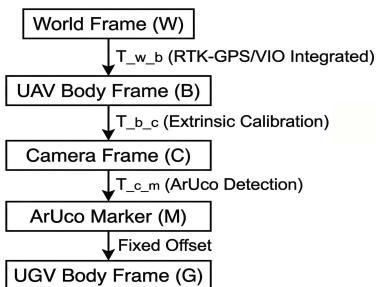


그림 3 전역 좌표계(World Frame)에서 UGV 바디 좌표계(UGV Body Frame)까지의 좌표 변환 트리. UAV의 통합 항법으로 유지되는 T_{UAV}^w 와 비전 센서로 측정된 상태 포즈 T_{Marker}^{UAV} 가 결합되는 관계를 보여준다.

$$T_{UGV}^w = T_{UAV}^w \cdot T_{Cam}^{UAV} \cdot T_{Marker}^{Cam} \quad (2)$$

이 수식에서 T_{UAV}^w 는 시스템이 GPS/VIO 융합을 통해 유지하고 있는 현재 전역 위치이며, T_{Cam}^{UAV} 는 UAV와 UAV에 장착된 하향 카메라간의 상대적 포즈, T_{Marker}^{Cam} 는 하향 카메라가 인식한 마커와 카메라간의 상대적 포즈이다. 이 방식은 외부 모션 캡처 시스템 없이도 실내외 모든 로봇을 단일 전역 지도 상에 정렬시킨다.

2.3 하이브리드 비행 경로 및 맵 병합

완전 자율 탐사의 비효율성을 개선하기 위해, 사용자는 GCS를 통해 수색 방향 또는 특정 관심 좌표를 대략적으로 입력할 수 있다. UAV는 이 입력을 기반으로 (Hybrid-state A)* 검색을 수행하여 장애물을 회피하고 역학적으로 가능한 최적의 경로를 생성한다[4]. 이를 통해 UAV는 사용자가 지정한 구역 내에서 UGV를 신속하게 포착한다. 발견된 각 UGV의 전역 초기 위치는 ROS 서버를 통해 모든 로봇에게 공유되며, 이는 로봇들이 획득한 맵(MAP) 스캔 데이터를 즉시 병합하는 기준점이 된다.

2.4 기대 효과 및 분석

첫 번째 기대효과는 인프라 독립적 운용성이다. 외부 카메라 모듈 설치가 불가능한 실제 재난 현장에서도 다중 로봇 시스템을 즉시 전개할 수 있어 SAR 작전의 실전성이 극대화된다. 두 번째는 정밀도 및 드리프트

역제이다. RTK-GPS를 초기화 원점으로 사용하여 VIO의 고질적인 척도 드리프트(Scale Drift)를 억제함으로써, 실내외 분산 배치된 UGV들의 위치를 평균 5cm 이내의 오차로 정밀하게 산출할 수 있을 것으로 예상된다. 세 번째는 자율성 및 효율성이다. 수동 측정에 의한 인적 오차와 번거로움을 제거하여 전체 시스템의 자율성을 획기적으로 높이고 작전 시간을 단축한다.

III. 결론

본 연구는 아르코 마커를 이용한 기존의 멀티 로봇 초기화 기술의 인프라 의존성 문제를 RTK-GPS/VIO 통합 항법을 통해 해결하는 방법을 제안한다. 제안하는 시스템은 UAV가 스스로 전역 좌표를 유지하며 지상 로봇의 위치를 공중에서 파악함으로써, 실제 실내외 통합 환경에서의 멀티 로봇 운용 자율성을 향상 시킬 수 있다. 본 논문은 시스템을 구성하는 핵심 기술들과 구성방식에 대해서 서술하고 있다. 추후 실제로 제안하는 시스템을 구현하여 시뮬레이션과 실제 환경에서 검증을 통해 멀티 UXV 기반 시스템의 맵 병합 기술에 대한 발전에 기여하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2025-00553810, 50%). This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea Government under Grant (RS-2022-NR070834, 50%).

참 고 문 헌

- [1] N. Khabbaz and S. Nokleby, "ArUco-Based Global Map Initialization for Multi-Robot Exploration," in Proc. CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics, 2023.
- [2] M. Wicaksono and S. Y. Shin, "GO-SLAM: GPS-Aided Visual-Inertial SLAM for Adaptive UAV Navigation in Outdoor-Indoor Environments," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 74, 2025.
- [3] T. Qin, P. Li, and S. Shen, "VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator," IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 1004 - 1020, 2018.
- [4] D. Dolgov, S. Thrun, M. Montemerlo, and J. Diebel, "Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments," The International Journal of Robotics Research, vol. 29, no. 5, pp. 485 - 501, 2010.