

저비용 센서 융합을 통한 도시 멀티패스 환경에서의 실시간 경로 계획

김 종 빈¹⁾ · 이 범 연²⁾ · 최 정 현¹⁾

계명대학교 자동차공학과¹⁾, 계명대학교 기계공학과²⁾

Implementation of Real-time Path Planning Algorithms in Urban Multipath Environments using Low-Cost Sensor Fusion

Jongbin Kim¹⁾ · Bumyeon Lee²⁾ · Junghyun Choi¹⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

Abstract : A robust path planning and tracking system for autonomous vehicles in urban multipath environments where GNSS signals are compromised is proposed in this study. The Dynamic Weight Correction Algorithm (DWCA) was implemented utilizing adaptive Kalman filtering to dynamically evaluate GPS signal quality parameters and optimize sensor fusion with IMU data. For path tracking, steering angles were calculated based on look-ahead points along predefined trajectories. Vehicle velocity control strategies considering path curvature and terrain gradient were further incorporated into the system architecture. Experimental validation demonstrated significant reduction in position estimation errors compared to conventional RTK-GPS methods in urban environments. Continuous navigation capabilities were maintained during signal instability without dependence on expensive sensor arrays.

Key words : Path Planning(경로 계획), Sensor Fusion(센서 융합), Real-time Localization(실시간 위치 추정), Multipath(멀티패스), Frequency Filtering(주파수 필터링)

1. 서 론

자율주행 차량의 경로 계획은 도심 환경에서 GPS 신호의 다중 경로 간섭으로 인해 위치 추정 오류가 발생하는 문제가 발생한다. 이러한 위성 신호 반사와 간섭으로 인한 센서 데이터의 급격한 변동은 생성된 경로의 불안정성을 초래한다. 또한 이는 차량의 정확한 위치 추정과 경로 계획의 신뢰도를 저하시켜 실시간 주행 성능에 부정적인 영향을 미친다. 기존 연구들은 고가의 정밀 센서나 사전 구축된 정밀지도에 의존하여 이러한 문제를 해결하고자 했으나, 비용 효율성과 실시간 대응 측면에서 한계를 보였다.

본 연구에서는 적응형 칼만필터(Adaptive Kalman Filter)를 통해 신호 품질 기반의 위치 보정을 적용하였다. 이는 도시 멀티패스 환경에 적절한 경로 계획을 제안한다. 제안한 경로 계획은 저비용 센서들에 의해 수집된 데이터를 실시간 융합을 통해 신호 불안정성을 효과적으로 필터링한다. 이를 통해 차량의 정확한 위치 추정이 가능해지며, 도심 환경에서도 안정적인 경로 계획이 가능한 실시간 자율주행시스템을 제안한다.

2. 시스템 구조

본 연구에서는 ublox C099-F9P GPS 모듈과 저가형 IMU 센서 시스템을 구현하였다. GPS는 RTK-GPS로 정확한 위치와 속도를 제공한다. 하지만 고층 건물 주변에서는 신호 반사로 인한 다중 경

* 교신저자, E-mail: jh.choi@kmu.ac.kr

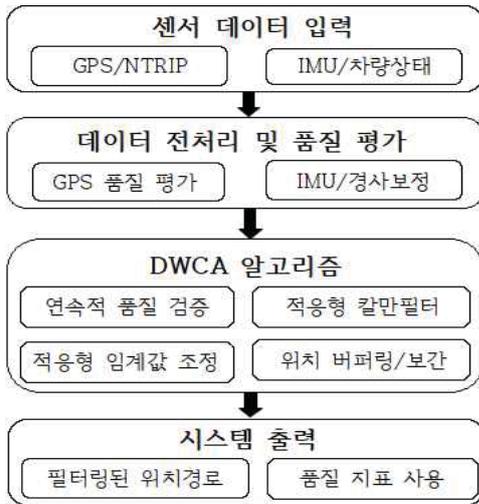


Fig.1 DWCA 알고리즘 흐름도

로 오차와 일시적인 신호 손실 문제가 있다. IMU 센서는 가속도와 방향(roll, pitch, yaw) 정보를 제공한다. 하지만 장시간 사용 시 누적 오차(drift)가 발생한다. 각 센서들의 상호보완적 특성을 활용하여 단점을 보완하고 도심 지역에서의 정확한 위치 추정이 가능하도록 설계하였다.

3. GNSS 다중 경로 문제

대학 캠퍼스와 같은 고층 건물이 밀집된 환경에서 발생하는 GNSS 다중 경로 문제를 해결하기 위해 적응형 Kalman 필터와 IMU 센서 융합 기반의 동적 가중치 보정 알고리즘(DWCA: Dynamic Weight Correction Algorithm)를 제안한다. 이 알고리즘의 전체적인 흐름도는 Fig.1과 같다. 기존 RTK-GPS 시스템은 개방된 환경에서는 높은 정확도를 보이지만, 건물 간섭이 심한 도심 환경에서는 반사파로 인한 다중 경로 오차와 GPS 보정데이터의 불안정한 수신으로 인해 위치 정확도가 크게 저하된다. [1]

3.1 신호 품질 기반 적응형 필터링

제안된 DWCA 알고리즘은 GPS 신호의 품질(SNR), 위성 수(SAT), 정밀도의 희석(GDOP), 위치 분산(VAR)을 실시간으로 평가하여 신뢰도 계수(α)를 0.1에서 1.0 사이로 식(1)과 같이 산출한다.

$$\alpha = 0.3 \cdot sat + 0.3 \cdot snr + 0.2 \cdot gdop + 0.2 \cdot var \quad (1)$$

$$\hat{x}_k^- = F \cdot \hat{x}_{k-1} \quad (2)$$

$$P_k^- = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q$$

$$R_k = R_o \cdot \frac{10.0}{\max(0.01, \alpha_k)}$$

$$K_k = P_k^- \cdot H^T (H \cdot P_k^- \cdot H^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^-$$

이를 상태 추정 과정에 반영하는 6차원 상태 벡터(위치, 속도, 가속도) 기반 적응형 칼만필터를 식(2)과 같이 구현하였다. 추가적으로 GPS 측정값과 IMU 기반 추정값 사이의 가중치를 신호 품질에 따라 동적으로 조정하였다. 예측 단계에서 상태와 공분산을 예측하고 GPS 신호 품질에 따라 측정 노이즈를 조정된 후 칼만 게인 계산과 상태 공분산 업데이트를 계산한다. 또한 급격한 위치 변화 감지 시 이상치 필터링 메커니즘을 적용하여 반사파에 의한 오차를 효과적으로 제거하였다. 이 알고리즘은 ROS 기반 자율주행 시스템에 구현되어 10ms 주기의 실시간 처리가 가능하다. 또한 GPS 신호 손실 시에도 적응형 필터링을 통해 실시간 위치 추정이 가능하다. [2]

4. 경로 추종

도시 멀티패스 환경에 적합한 경로 계획 시스템을 개발하였다. 추가적으로 경로 추종을 위한 Pure Pursuit 알고리즘을 구성한다. GPS 데이터가 UTM 좌표계로 변환된다. 이 알고리즘은 다양한 장애물이 존재하는 도심 환경에서도 안정적인 주행을 가능하게 한다.

4.1 Pure Pursuit

생성된 경로를 안정적으로 추종하기 위한 제어 알고리즘이다. 본 알고리즘의 기본 원리는 차량의 후륜 차축의 기준점으로 사전에 정의된 경로상의 전방 지점을 추종하도록 조향각을 계산하는 것이다. 전방의 거리는 차량 현재 위치에서 목표점의 경

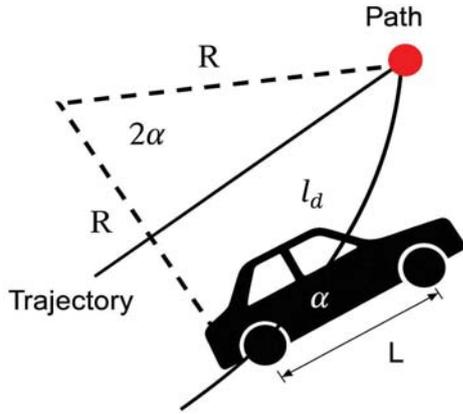


Fig.2 pure pursuit 흐름도

로상의 거리를 의미한다. 이 거리는 고정값이거나 차량 속도에 비례하여 조정될 수 있다.

$$L_d = k \times v + L_{look-ahead} \quad (3)$$

목표점은 현재 위치에서 전방 지점의 거리를 반지름으로 하는 원과 경로의 교점으로 선정된다. 이후 조향각(δ)을 식(4)과 같이 계산한다.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{2 \times L \times \sin(\alpha)}{L_d} \right) \quad (4)$$

여기서 L은 차량의 축간거리, α 는 차량 heading과 목표점 방향 사이의 각도, L_d 는 전방 주시 지점 거리를 의미한다. 전체 pure pursuit 알고리즘의 흐름은 Fig.2 와 같다. [3]

4.2 속도 및 경사도 보정

속도 제어는 경로의 곡률과 IMU 센서에서 측정된 지형의 경사도를 고려하여 주행 속도를 결정한다. 속도는 경로의 곡률(K)에 따라 식(5)과 같은 수식으로 구현되었다.

$$v = \min \left(v_{max}, \sqrt{\frac{a_{max}}{K}} \right) \quad (5)$$

여기서 v_{max} 는 최대 허용 속도, a_{max} 는 최대 허용 측면 가속도를 의미한다. 곡률이 높은 구간에서는 원심력을 고려한 적절한 감속이 이루어진다. 또한 직선 구간에서는 최대 속도로 주행이 가능하다.

지형의 경사도는 IMU 센서의 피치각(θ)로 측정되었다. 경사 계수(s_f)는 내리막길($\theta < 0$)에서는

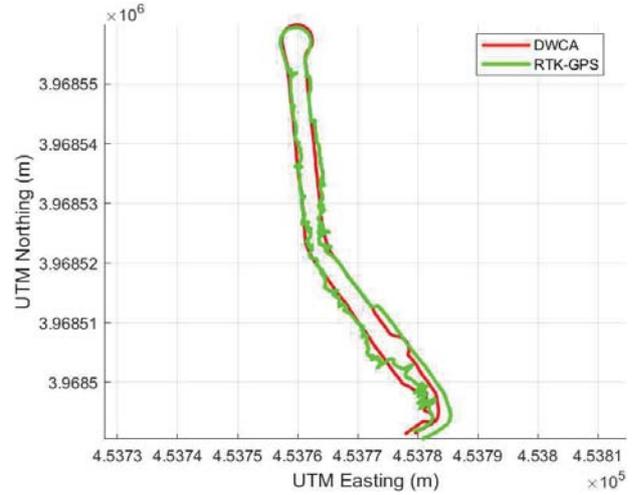


Fig.3 멀티패스 환경의 알고리즘별 경로

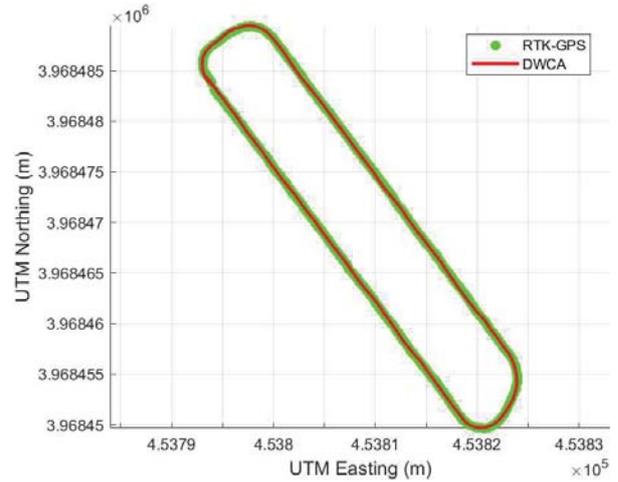


Fig.4 개활지 환경의 알고리즘별 경로

$$s_f = 1.0 + \left(\frac{|\theta|}{\theta_{max}} \right) \times (s_{max} - 1.0) \quad (6)$$

식(6)과 같은 수식으로 계산된다. 오르막길($\theta > 0$)에서는

$$s_f = 1.0 - \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \times (1.0 - s_{min}) \quad (7)$$

식(7)과 같이 계산된다.

이렇게 계산된 경사 보정 계수는 최종 제어 속도에

$$v_{control} = v_{target} \times s_f \quad (8)$$

식(8)의 수식으로 적용되며 급격한 변화를 방지하기 위해 저역통과필터를 통해 억제되었다.

5. 실험 결과

제안된 DWCA(Dynamic Weight Correction Algorithm)시스템의 성능을 평가하기 위해 두 가지 환경에서 실험을 진행하였다. 첫째 고층 건물로 둘러싸이며 나무들로 인해 하늘이 가려진 멀티패스 환경과 둘째 개활지 도로 환경에서 각각 실험을 진행하였다.

멀티패스 환경에서는 건물과 주변 환경의 반사로 인한 GPS 신호 왜곡이 발생하는 환경이었다. Fig.3 에서 기존의 RTK-GPS 방식은 신호 반사로 인한 위치 추정 오차가 크게 나타났다. 특히 코너 구간에서 경로 이탈 현상이 더욱 크게 관찰되었다. 반면 제안된 DWCA 알고리즘은 GPS와 IMU 센서 융합을 통해 위치 추정의 안정성을 크게 향상했다. 특히 GPS 신호 품질, 위성 수, GDOP, 위치 분산을 동적으로 평가하여 가중치를 조정함으로써 급격한 위치 변화를 효과적으로 필터링 하였다.

개활지 도로 환경 Fig.4 에서는 두 방식 모두 안정적인 성능을 보였다. 하지만 DWCA 알고리즘이 좀 더 부드러운 경로 생성과 정밀한 위치 추정을 제공하였다. 직선 구간과 완만한 곡선 구간에서 DWCA와 RTK-GPS의 위치 결과가 유사하였으나 DWCA의 경우 위치 데이터의 연속성이 더 우수하게 나타났다.

6. 결론

본 논문에서는 GNSS 다중 경로 문제를 해결하기 위한 적응형 필터링(DWCA) 기법과 경로 추종 알고리즘(Pure Pursuit)을 구현하였다. 저가형 GPS 및 IMU 센서를 활용하여 신호 품질 기반 알고리즘을 구현함으로써 건물 밀집 지역에서도 정확한 위치 추정이 가능해졌다. Pure Pursuit 알고리즘은 차량의 조향각 계산을 통해 생성된 경로를 부드럽게 추종하였다. 또한 경로의 곡률과 지형의 경사도를 고려하여 속도 보정은 여러 가지의 주행 환경에서 부드러운 주행을 가능하게 했다.

실험 결과 DWCA알고리즘을 제안함으로써 기존 RTK-GPS 기반 도심 환경에서 신호 손실을 최소화하며 안정적인 경로를 계획하였다. 이로써 고가의 정밀 센서 없이도 도심 환경에서 상대적으로 높은 신뢰성

의 경로 계획이 가능함을 보여주었다.

Acknowledgement

This work was supported by the Smart transport and logistics autonomous driving robot industry fostering platform establishment program (P0024419) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

References

- [1]ByungWoon-Park, JuneSol-Song, ChangDon-Kee, ChulSoo-Yang, DekKie-Tcha “Study on the time-delay compensation of RTK correction message for improvement of continuous position surveying performance under unexpected temporal datalink loss/cut-off” Journal of the Korean Society of Navigation, Vol. 14, No. 5 (2010) 625-631
- [2]TaekKwon-Nam, HongJae-Kim, JuWan-Park, SangHyun-Ahn, MinChan-Kim, TaeGu-Kang “Research on DNN-Based Dead Reckoning Technology for GPS Error Correction” Journal of the Korean Institute of Control, Robotics and Systems (2024) 992-993
- [3] MinSeong-Yoon, KeeCheon-Kim “Research on Pure-Pursuit Algorithm of platooning vehicles in CARLA Simulator ” Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, (2024-11-20) 33-34