

차량 속도 추정을 위한 중력 벡터 분석 기반의 스마트폰 좌표계 동적 보정 알고리즘

이규열, 김승구*

*충북대학교,

siro_____@chungbuk.ac.kr, kimsk@cbnu.ac.kr*

Dynamic Coordinate Correction Algorithm based on Gravity Vector Analysis for Vehicle Speed Estimation

Lee Kyu Yeol, Kim Seung Ku*

*Chungbuk National University

요약

본 논문은 스마트폰 IMU의 중력 벡터 분석을 이용한 실시간 좌표계 동적 보정 및 차량 속도 추정 기법을 제안한다. 제안 알고리즘은 주행 중 기기 이탈 시 0.2초 이내에 좌표계를 재정렬하여, 중력 성분의 주행 축 누수를 차단하고 가속도 데이터를 차량 운동 좌표계로 정밀하게 투영한다. 차량 고정형 기준 기기와의 비교 실험 결과, GNSS 음영 지역인 실내 주차장에서 기기 위치가 급변하는 상황에서도 가속도 오차를 최소화하여 안정적인 속도 추정이 가능함을 입증하였다.

I. 서론

최근 자율주행 기술과 지능형 교통 시스템이 고도화됨에 따라, 차량의 실시간 위치와 주행 속도를 끊김 없이 정밀하게 추정하는 기술이 필수적인 요소로 대두되고 있다. 현재 가장 보편적으로 사용되는 GNSS(Global Navigation Satellite System)은 개방된 환경에서는 우수한 성능을 보이지만, 도심의 고층 빌딩 숲이나 지하 터널과 같은 전파 음영 구역에서는 신호의 다중 경로 및 비가시선 문제로 인해 위치 오차가 급격히 증가하거나 서비스가 완전히 중단되는 한계가 명확하다 [1-4]. 이러한 GNSS의 취약점을 보완하기 위한 대안으로, 스마트폰에 내장된 IMU(Inertial Measurement Unit)를 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 스마트폰 기반의 항법 기술은 별도의 고가 장비나 외부 인프라 설치 없이도 누구나 소지하고 있는 모바일 기기를 활용할 수 있다는 점에서 비용 효율성과 접근성이 매우 뛰어나다. 또한, 최신 스마트폰에 탑재된 고성능 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 센서를 통해 자체적인 움직임 감지가 가능하므로, 외부 신호가 차단된 환경에서도 독립적이고 연속적인 항법 서비스를 제공할 수 있다는 강력한 이점을 가진다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고, 스마트폰 기반 방식은 차량에 견고하게 고정된 전용 센서와 달리 탑승자의 사용 패턴에 따라 거치 위치와 방향이 수시로 변한다는 치명적인 불확실성을 내포하고 있다. 실제 주행 환경에서 스마트폰은 컵 훌더, 대시보드, 혹은 조수석 시트 등 다양한 위치에 임의의 각도로 놓이게 되는데, 이때 스마트폰의 로컬 좌표계와 차량의 전 행 좌표계(Vehicle Frame)가 일치하지 않으면 중력 가속도 성분이 주행 가속도 축으로 잘못 투영되는 현상이 발생한다. 이러한 중력 성분의 누수는 적분 과정에서 속도 추정값에 심각한 드리프트 오차를 유발하여 항법의 신뢰도를 크게 떨어뜨리는 주된 원인이 된다 [5].

기존 연구들은 초기 정렬 단계에서 스마트폰이 수평으로 고정되어 있다고 가정하거나, 주행 중에는 기기의 자세가 변하지 않는다는 정적 상황을 전제로 하고 있어 실제 동적 환경에 적용하기에는 한계가 따른다. 이에 본

연구에서는 스마트폰 가속도 센서에서 측정된 중력 벡터를 실시간으로 분석하여, 기기의 자세 변화에 강건하게 대응하는 동적 좌표계 보정 시스템을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 주행 중 발생하는 진동이나 급격한 움직임(기기 낙하, 조작 등)을 임계값 기반으로 감지하고 회전 행렬을 재계산하여 좌표계를 차량 진행 방향으로 신속하게 정렬한다. 이를 통해 GNSS 신호가 차단된 환경이나 기기의 거치 상태가 불안정한 상황에서도, 추가적인 외부 센서 없이 스마트폰 단독으로 안정적인 차량 속도 추정이 가능함을 실험적으로 입증하고자 한다.

II. 본론

본 장에서는 제안하는 중력 성분 분석을 이용한 스마트폰 좌표계 동적 보정 및 차량 속도 추정 시스템의 단계별 처리 과정을 설명한다. 먼저 기기 경사각 산출 및 회전 행렬 구성은 스마트폰의 거치 방향과 관계없이 일관된 데이터를 획득하기 위한 첫 번째 단계이다. 먼저 스마트폰 IMU 센서로부터 측정된 3축 가속도 데이터에서 저역 통과 필터를 활용해 중력 가속도 성분을 분리하고 실시간 중력 벡터 $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]^T$ 를 획득한다. 추출된 중력 벡터의 각 성분을 기반으로 기기의 전후 기울임 ($Pitch, \theta$)과 좌우 기울임 ($Roll, \phi$)을 수식 (1)과 같이 산출한다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{-g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}}\right), \phi = \arctan\left(\frac{g_y}{g_z}\right) \quad (1)$$

이와 같이 산출된 각도는 스마트폰 내부 좌표계를 세계 표준인 ENU(East-North-Up) 좌표계와 일치시키기 위한 회전 행렬 R 구성의 기초가 된다. 본 시스템에서는 롤(R_x)과 피치(R_y) 변환을 순차적으로 결합하여 수식 (2)와 같은 최종 회전 행렬을 도출하며, 이를 통해 기기가

차량 내 대시보드나 캡홀더 등 임의의 위치에 배치되더라도 항상 중력 방향을 기준으로 정렬된 가속도 데이터를 얻을 수 있도록 한다.

$$R = R_y(\theta)R_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \sin\phi & \sin\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\theta \cos\phi & \sin\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

임계값 기반 좌표계 동적 갱신은 주행 중 발생하는 기기의 자세 변화를 실시간으로 감지하고 보정하는 과정이다. 주행 중 급제동이나 노면 충격으로 인해 기기가 미끄러지는 상황에 대응하기 위해, 임의의 시간 내에서 롤과 피치 값의 변화폭을 지속적으로 분석한다. 각 구간의 최대값과 최소값의 차이($\Delta\phi$, $\Delta\theta$)가 실험적으로 도출한 임계치를 초과할 경우, 이를 거치 방향 변화 이벤트로 식별한다. 이벤트가 확정되면 직전 일정 시간 동안 수집된 데이터의 평균치를 활용해 회전 행렬 R 을 새롭게 갱신한다. 이러한 이벤트 기반 갱신 방식은 단순 진동에 의한 불필요한 좌표계 회전을 억제하고, 실제 기기 위치가 변했을 때만 신속하게 기준점을 재설정함으로써 속도 추정의 연속성을 보장한다.

선형 가속도 투영 및 속도 산출은 보정된 좌표계를 바탕으로 실제 차량의 주행 속도를 도출하는 최종 단계이다. 중력 성분이 제거된 실시간 선형 가속도 데이터 a_{linear} 에 앞서 갱신된 회전 행렬 R 을 적용하여 차량의 실제 운동 축(Vehicle Axis)으로 가속도 성분을 투영한다. 투영된 가속도 $a_{vehicle} = R \cdot a_{linear}$ 중 차량의 전진 방향 성분(a_v)만을 추출하고, 이를 시간 간격 Δt 에 따라 적분하여 차량의 속도 추정치 $v(t)$ 를 산출한다.

$$v(t) = v(t - \Delta t) + a_v(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

이때 센서의 노이즈 및 가속도 바이어스로 인해 발생하는 속도 드리프트 현상을 억제하기 위해, 차량의 정지 상태를 감지하여 속도를 0으로 보정하는 ZUPT(Zero Velocity Update) 알고리즘을 결합한다. 이러한 일련의 과정을 통해 제안하는 시스템은 별도의 외부 센서 없이도 스마트폰의 다양한 거치 환경에서 안정적이고 물리적으로 일관된 차량 속도 프로파일을 확보할 수 있다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 청주 소재 5개 실내 주차장에서 스마트폰의 거치 위치를 대시보드, 캡홀더 등으로 가변하거나 주행 중 기기가 낙하하는 등 실제 상황을 모사한 다양한 동적 시나리오를 바탕으로 총 50회의 실험을 수행하였다. 특히 사용자의 의도적인 조작뿐만 아니라 노면 충격이나 차량의 급격한 거동으로 인해 발생하는 기기의 비정형적인 흔들림 및 위치 이탈 상황을 실험 범위에 포함하여 알고리즘의 강건성을 확인하였다. 실험 결과, 주행 중 기기의 거치 방향이 변경되는 급격한 동적 이벤트가 발생했을 때, 제안 알고리즘은 평균 0.2초 이내에 새로운 좌표계를 안정적으로 재정렬하는 성능을 보였다. 또한, 실제로 좌표계 재정렬이 되었는지 확인하기 위해 차량의 센터 콘솔에 견고하게 부착하여 차량 좌표계와 물리적으로 일치시킨 기준 기기의 가속도 데이터를 참값으로 설정하여 비교 분석하였다. 분석 결과, 기기 이탈로 인해 좌표계가 틀어진 구간에서 보정 전 데이터는 중력 가속도의 누수로 인해 기준값 대비 평균 3.5 m/s^2 의 큰 제곱근 평균 오차(RMSE)를 보였으나, 제안 알고리즘을 적용한 후에는 해당 오차가 0.2 m/s^2 수준으로 획기적으로 감소함을 확인하였다. 또한, 보정된 주행 가속도 성분은 기준 기기의 데이터와 0.97 이상의 높은 상관계수를 기록하였다. 이는 알고리즘이 중력 성분을 효과적으로 차단하고 차량의 순수 선형 가속도 성분만을 온전히 추출했음을 의미하며, 결과적으로 적분 과정에서 발생할 수 있는 속

도 발산 문제를 원천적으로 방지하여 참값을 안정적으로 추종하는 기반이 되었다.

III. 결론

본 논문에서는 GNSS 신호 수신이 불가능한 실내 환경에서도 스마트폰 단독으로 정밀한 차량 속도를 추정하기 위해, 중력 벡터 분석 기반의 실시간 좌표계 동적 보정 시스템을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 주행 중 기기 낙하와 같은 급격한 자세 변화 이벤트를 실시간으로 감지하고, 평균 0.2초 이내에 좌표계를 신속하게 재정렬하는 성능을 보였다. 특히, 차량에 고정된 기준 기기와의 비교 실험을 통해, 보정된 좌표계가 중력 가속도의 누수를 효과적으로 차단하고 차량의 실제 운동 축으로 가속도 성분을 정확하게 투영함을 정량적으로 입증하였다. 이는 단순한 좌표 변환을 넘어, 적분 오차의 주원인인 가속도 바이어스를 근본적으로 억제함으로써 다양한 거치 환경에서도 신뢰성 있는 속도 추정이 가능함을 시사한다. 향후 연구에서는 실험에서 식별된 완만한 자세 변화나 급격한 선회 시 발생하는 원심력의 영향을 보상하기 위해, 자이로스코프 센서 데이터를 융합하고 주행 상황에 따라 감지 민감도를 조절하는 적응형 임계값 알고리즘을 도입하여 시스템의 강건성을 더욱 고도화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A5A8026986).

본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0020536, 산업혁신 인재성장지원 사업).

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역 지능화혁신인재양성사업임 (IITP-2025-RS-2020-II201462).

참 고 문 헌

- [1] Chenxiang Lin, Yoan Shin, "스마트폰 관성 센서를 이용한 딥러닝 기반의 이동 방향 측정 기법", 한국통신학회논문지, 제47권 제6호, pp. 898-907, 2022.
- [2] S. Jiang, Q. Xu, W. Wang, J. Li, "Vehicle positioning systems in tunnel environments: a review", Complex & Intelligent Systems, Vol. 11, Art. No. 164, 2025.
- [3] A. Sukhenko, N. Meirambekuly, A. Syzdykov, A. Mukhamedgali, Y. Mellatova, "GNSS for High-Precision and Reliable Positioning: A Review of Correction Techniques and System Architectures", Applied Sciences, Vol. 15, No. 22, Art. No. 12304, 2025.
- [4] H. Zhang, Z. Wang, H. Vallery, "Learning-based NLOS Detection and Uncertainty Prediction of GNSS Observations", arXiv preprint arXiv:2309.00480, 2023.
- [5] J. Wang, Q. Wu, S. Yuan, L. Xie, "Sky-GVIO: An Enhanced GNSS/INS/Vision Navigation with Sky-Segmentation in Urban Canyon", arXiv preprint arXiv:2404.11070, 2024.