

차량 환경에서 GPS 반송파 기반 위치 결정을 위한 반송파 불연속 측정치 검출에 대한 연구

A Study on the Cycle-slip Detection for GPS Carrier-phase based Positioning of Land Vehicle

김연실*, 송준솔*, 윤호*, 기창돈*

Youn-Sil Kim*, Jun-Ssol Song*, Ho Yun*, and Chang-Don Kee*

요 약

본 논문은 차량 환경에서 GPS 반송파 기반 위치 결정을 위한 반송파 불연속 측정치 검출에 대한 내용을 다룬다. 반송파 기반 위치 결정 방식에 있어서 위치 정확도의 신뢰도를 확보하기 위해서는 반송파 불연속 측정치를 검출해야 한다. 반송파 불연속 측정치를 검출하는 방식에는 여러 연구가 있지만 본 연구에서는 차분된 반송파 측정치와 저가의 관성센서를 이용해 추정된 차분된 반송파의 차이를 모니터링 값으로 설정함으로써 GPS 불연속 측정치를 검출한다. 저가의 불연속 측정치 검출 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 설계된 불연속 측정치 검출 성능 만족을 위한 관성센서 성능 범위를 도출한다. 이를 통해 적절한 가격과 성능의 관성센서 선택이 가능하다. 선정된 관성센서가 설계치를 만족하는지를 검증하기 위하여 회전 테이블 실험을 진행하였다. 결과적으로 실험치가 설계된 불연속 측정치 검출 성능을 보수적으로 만족하는 검출 성능을 보였다.

Abstract

In this paper, the GPS cycle-slip detection for carrier-phase based positioning of land vehicle is presented. For the carrier phase based positioning, cycle-slip detection is necessary to get the reliability of positioning result. There exists many cycle-slip detection algorithms, but we detect the cycle-slip by using the monitoring value which is defined as residual between the carrier phase measurement and estimated value from low-cost inertial sensor. To achieve goal of paper, low-cost cycle-slip detection system, permissible specification region of inertial sensor is derived. By using the result of permissible region, appropriate inertial sensor of cycle-slip detection can be decided, proper cost and proper specification. To verify the result of this paper, we conduct the rate table test. As a result, required cycle-slip detection performance is satisfied conservatively.

Key words : GPS Cycle-slip Detection, GPS/INS Integration, Low-cost IMU

I. 서 론

현재 우리나라는 세계 7위의 화학 물질 생산 국가

이며, 산업의 발전에 따라 화합물 및 화학제품 제조업이 증가함으로써 화학 물질의 취급 량이 꾸준한 증가 추세에 있다. 이에 따라 화학물질의 이동 량 및 매

* 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University)

· 제1저자 (First Author) : 김연실(Youn-Sil Kim)

0 교신저자 (Corresponding Author) : 기창돈(Chang-Don Kee, tel : +82-2-880-1912, email : kee@snu.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 10월 7일 · 심사(수정)일자 : 2013년 10월 7일 (수정일자 : 2013년 12월 13일) · 게재일자 : 2013년 12월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.6.593>

립 량 또한 증가하고 있으며 관련사고 빈도수도 증가하는 추세이다.

위험물 운송 사고는 차량의 1차적인 피해뿐만 아니라 불특정다수, 환경에 직접적인 영향을 미치는 2차적인 사고를 내재하고 있기 때문에 위험물 운반 차량 사고의 경우 사고의 사후 수습보다는 능동적인 사전 예방이 필요하다.

이를 위하여 국내에서는 고속도로 상의 위험물 운반 차량의 차선 감시를 위한 R&D 프로젝트가 진행되고 있다. 국내 고속도로의 폭을 고려하였을 때 차선 구분을 위하여서는 서브 미터 급의 위치 정확도가 필요하다. 일반적으로 차량 내비게이션에는 코드 기반의 GPS 위치 결정 방식이 널리 사용된다. 그러나 코드 기반 방식은 서브 미터 급의 위치 정확도를 가지지 못하기 때문에 본 연구에서는 더욱 높은 정확도를 가지는 반송파 기반 위치 결정 방식 RTK (Real Time Kinematic)에 대하여 다룬다.

그러나 RTK는 신호 단절이나 신호 방해 요소에 의해 발생하는 반송파 불연속 측정치에 매우 민감하다. 특히 반송파 측정치에 불연속이 발생하게 되면 위치 정확도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 RTK 위치 결정에 있어서 반송파의 불연속 측정치 검출은 선 처리 과정으로 반드시 이루어져야 한다.

본 논문에서는 반송파의 불연속 측정치 검출을 위하여 저가의 시스템을 구축하는데 그 목표를 둔다. 반송파 불연속 측정치 검출 방식에는 반송파-코드 비교 방식, 반송파-반송파 이온층 지연 잔여오차 검사 방식, 도플러 적분 방식, 반송파 차분 방식 등이 있다 [1]. 먼저 코드나 도플러가 사용된 방식은 그 측정치 자체의 잡음 때문에 고해상도의 불연속 측정치 검출이 어렵다. 이에 반해 반송파-반송파 이온층 지연 검사 방식은 최소 1사이클까지 불연속 측정치를 검출할 수 있지만 고가의 이중주파수 수신기가 필요하다는 단점이 있다[2, 3, 4]. 따라서 본 연구에서는 관성 센서를 이용한 반송파 차분 방식의 불연속 측정치 검출에 대해 다룬다.

관성센서를 이용한 불연속 측정치 검출 알고리즘은 Colombo, Takasu, Altmayer, Du. S 등의 연구자들에 의해 연구된 바 있지만 이들의 알고리즘은 이중주파수 수신기를 사용하거나 고가의 관성센서를 사용

한다[5, 6, 7, 8]. 본 연구의 목적은 저가의 시스템을 구축하는 것이기 때문에 먼저 단일주파수 수신기를 사용하고 원하는 성능의 불연속 측정치 검출 성능을 만족시키기 위해 필요한 관성센서 성능의 하한을 도출해낸다.

이를 위하여 모니터링 값을 설정하고 관성센서 오차와의 관계를 유도해낸다. 원하는 성능의 불연속 측정치 검출 성능 만족을 위한 관성센서 오차 범위를 유도하여 저가 시스템 구축을 위한 관성센서를 선택한다. 선택된 관성센서가 원하는 불연속 측정치 검출 성능을 만족하는 지를 확인하기 위하여 테이블 실험을 실시하였다. 결과적으로 설계된 불연속 측정치 검출 성능을 보수적으로 만족하는 검출 성능을 보였다.

II. 불연속 측정치 검출 알고리즘

본 연구에서는 불연속 측정치를 검출하기 위하여 수신된 반송파 측정치와 관성센서를 이용하여 추정된 측정치를 비교한다. 측정된 값과 추정된 값의 차이를 모니터링 값으로 정의하여 이 값을 모니터링 함으로써 불연속 측정치를 검출한다.

모니터링 값은 다음과 같이 유도된다. 먼저 수신된 GPS 반송파는 일반적으로 다음과 같이 모델링된다.

$$\phi(k) = d(k) + B(k) - b(k) - I(k) + T(k) + \nu \quad (1)$$

위 식에서 $d(k)$ 항은 위성과 사용자간의 실제 거리를 나타내고 $B(k)$ 항은 수신기 시계 오차, $b(k)$ 항은 위성 시계 오차, $I(k)$ 항은 전리층 지연, $T(k)$ 항은 대류층 지연, ν 는 기타 잡음을 나타낸다.

식 (1)의 반송파 측정치를 시간에 대해 차분하면 다음의 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\delta\phi(k) = \delta d(k) + \delta B(k) - \delta b(k) - \delta I(k) + \delta T(k) + \delta\nu \quad (2)$$

식 (2)에서 δ 는 시간 차분 연산자이다. 식 (2)의 각 항들을 살펴보면 $-\delta b(k) - \delta I(k) + \delta T(k)$ 항은 반파장 이내로 무시 가능하다. 이 값들은 시간에 대한 변화량이 매우 작기 때문이다[9].

그러면 식 (2)는 다음과 같이 주요한 영향을 주는

항들로 다시 쓸 수 있다.

$$\delta\phi(k) = \delta d(k) + \delta B(k) + \delta\nu \quad (3)$$

식 (3)에서 수신기 시계 오차 변화량은 이전 에폭의 RTK 위치를 통해 충분한 정확도로 추정할 수 있다고 가정한다. 여기에서 에폭은 불연속한 데이터 샘플링 시간에서 각 시간에 대응하는 정수를 세는 단위이다. 그리고 위성과 사용자간 거리 항은 관성센서를 이용한 사용자 위치 추정을 통해 제거할 수 있다. 따라서 아래의 식과 같이 모니터링 값을 설정하면, 반송파 측정치에 불연속 측정치가 발생했을 때 잡음 항과 불연속 측정치에 대한 항만 남게 되기 때문에 잡음 항이 충분히 작을 경우 이 값을 모니터링 함으로써 불연속 측정치에 대한 항을 검출해 낼 수 있게 된다. 본 연구에서는 모니터링 값을 다음과 같이 정의한다.

$$MV = \delta\phi(k) - \delta\hat{d}(k) \quad (4)$$

식 (4)에서 $\hat{d}(k)$ 항은 위성과 사용자간 거리의 추정치로 관성센서를 이용하여 추정한다.

불연속 측정치 검출은 그림 1과 같은 과정으로 검출된다. (k)에폭의 불연속 측정치를 검출하기 위해 (k-1)에폭의 RTK 위치와 (k)에폭 전까지의 관성센서 출력을 이용한다. 이를 통해 추정된 위성-사용자간 거리와 수신된 반송파를 차분하여 그 잔여오차를 확인함으로써 불연속 측정치를 검출한다.

III. 불연속 측정치 검출을 위한 관성센서 선택

본 연구에서는 저가의 불연속 측정치 검출 알고리즘을 개발하기 위하여 단일주파수 수신기와 저가 관성센서를 이용한다. 관성센서는 항법 급, 전술 급, MEMS 급의 세 가지로 분류할 수 있는데 본 연구에서는 MEMS 급의 비교적 저가인 관성센서를 사용한다. MEMS 관성센서 또한 가속도계와 자이로 성능에 따라 매우 많은 제품이 존재하고 가격 또한 달라진다. 때문에 불연속 측정치 검출 성능을 만족하면서도 저가의 제품을 선택할 수 있도록 관성센서 오차에 의한 모니터링 값 잔여오차 영향을 분석하였다. 모니터

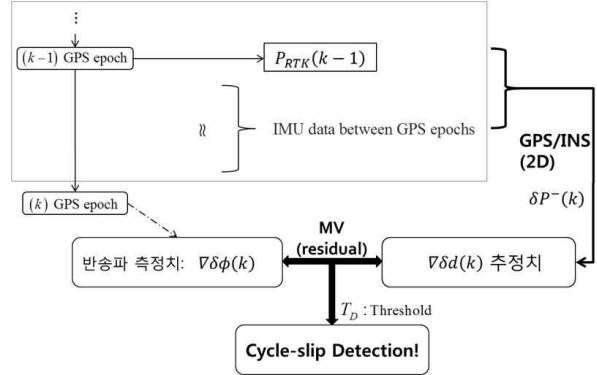


그림 1. 불연속 측정치 검출 프로세스
Fig. 1. GPS Cycle-slip Detection Process

링 값의 분산을 수식적으로 유도한 결과는 다음과 같다. 자세한 유도과정은 이전 연구 내용에 포함되어 있다[10].

$$RMS(MV) \leq \sqrt{2\sigma_\phi^2 + |I_{\max}^{\cdot}|^2 \delta t^2 + \{\delta s \epsilon(\psi) + \epsilon(\delta s)\}^2} \quad (5)$$

위 수식 (5)에서 σ_ϕ 항은 GPS L1 주파수 반송파 잡음을 나타내고 보수적으로 3 mm 정도로 설정하였다. $|I_{\max}^{\cdot}|$ 항은 전리층 지연 변화율의 절대 값을 나타내고 기존 연구에 명시된 값으로 수치를 대입하였다 [9]. δs 는 GPS 에폭 간 진행한 평균적인 거리를 나타낸다. 위험물 운반차량의 경우 최고속도 25m/s에 의해 보수적으로 25 m라 설정할 수 있다. $\epsilon(\psi)$ 는 GPS 에폭 간 자이로에 의한 헤딩추정오차, $\epsilon(\delta s)$ 는 GPS 에폭 간 가속도계에 의한 거리 추정오차이다.

식 (5)의 모니터링 값의 RMS 값은 다음과 같이 설정하였다. 식 (6)에서 λ_{L1} 은 GPS L1 주파수의 반송파의 파장 길이이다.

$$2RMS(MV) \leq \frac{\lambda_{L1}}{2} \quad (6)$$

그러면 수식 (5)와 (6)을 통해 불연속 측정치 검출 목표 성능 달성을 위한 거리 추정 오차, 각도 추정 오차 허용 영역을 그림 2와 같이 구할 수 있다. GPS 에폭 간의 각도, 거리 추정 오차는 대부분 관성센서에 의한 위치 추정 오차에 의한 것이다. 따라서 이를 각각 자이로 오차와 가속도 오차로 나타내기 위해 관성센서 오차를 다음과 같이 모델링하였다.

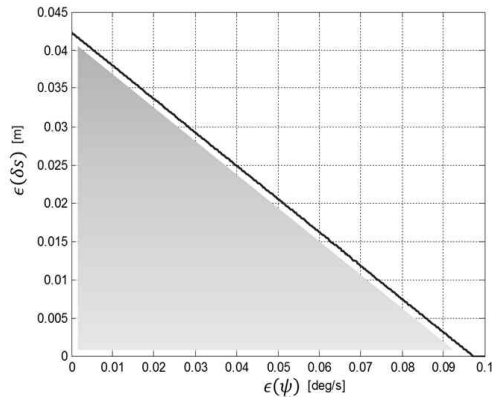


그림 2. 1 cycle의 불연속 측정치 검출을 위한 최대 허용 가능 각도오차, 거리오차
 Fig. 2. Permissible angle error and distance error for 1 cycle-slip detection

$$x = x_t + b + w \quad (7)$$

수식 (7)에서 x 는 관성센서 측정치이다. b 는 바이어스 w 는 센서 노이즈이다. 이들 관성센서 오차에 의한 각도 오차와 거리 오차는 다음과 같이 수식적으로 나타낼 수 있다[11].

$$\begin{aligned} \epsilon(\psi) &\sim N\left(b_{gyro}\delta t, \frac{\delta t}{Hz} \sigma_{gyro}^2\right) \\ \epsilon(\delta s) &\sim N\left(\frac{1}{2}b_{acc}\delta t^2, \frac{\delta t(\delta t + 1/Hz)(2\delta t + 1/Hz)}{6Hz} \sigma_{acc}^2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서와 같이 $\epsilon(\psi)$ 와 $\epsilon(\delta s)$ 는 가우시안 분포를 갖는 랜덤 변수이다. 따라서 그림 2에서 특정한 점으로 허용 가능 거리오차와 각도오차가 정해졌을 때 그 점에 해당하는 값의 오차를 만족한다는 의미를 확률적으로 접근해야한다.

이를 위해 다음의 그림 3과 같이 특정한 각도오차를 만족한다고 했을 때 가우시안 분포에서 2σ 에 해당하는 95.45%를 확률적으로 만족한다는 의미로 접근하였다. 가속도계의 경우 바이어스를 0부터 증가시켜가며 설정된 거리오차($\pm \delta_s$)안의 영역이 95.45%가 되게 하는 잡음의 표준편차를 찾는다. 그러면 찾아진 바이어스와 표준편차 쌍은 설정된 거리오차를 95.45%로 만족하도록 하는 관성센서 성능이 된다. 그림 2에서 최대 허용 가능한 각도오차, 거리오차 쌍을 경계선에 해당하는 직선의 중간점 ($\epsilon(\psi) = 0.05 \text{ deg}$,

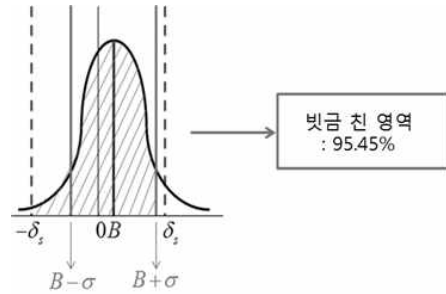


그림 3. 센서 바이어스, 잡음의 표준편차 쌍 (95.45%)
 Fig. 3. Sensor bias and noise standard deviation pair (95.45%)

$\epsilon(\delta s) = 0.02 \text{ m}$)으로 설계하면 그를 95.45%로 만족하게 하는 자이로 바이어스와 잡음 표준편차, 가속도계 바이어스와 잡음 표준편차를 그림 3에서 설명한 것과 같이 구할 수 있고 그 결과는 다음과 같다.

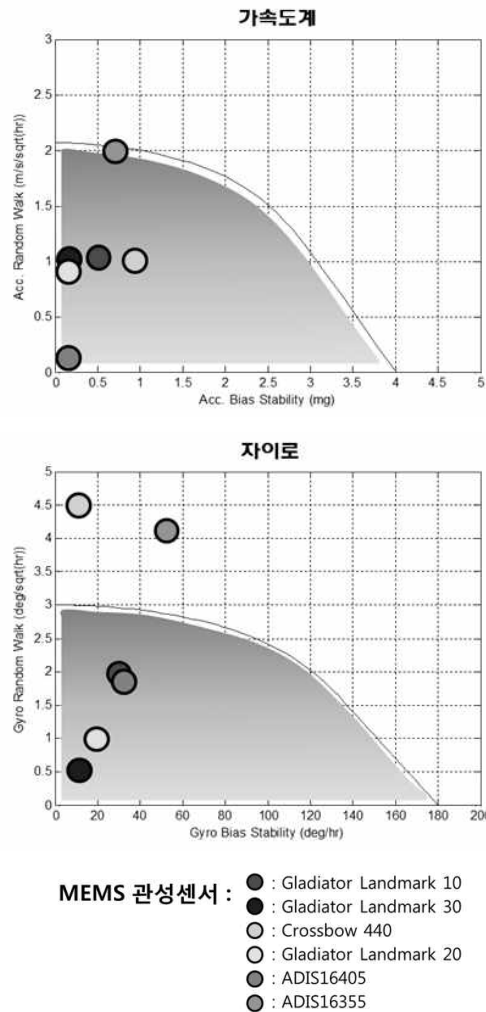


그림 4. 불연속 측정치 검출 성능 만족을 위한 관성센서 스펙
 Fig. 4. Inertial sensor specification for satisfy desired cycle-slip detection performance

이를 실제 실험으로 확인하기 위하여 위 그림 4의 MEMS 관성센서 중 ADIS16405 제품을 이용하여 테스트 하였다. 그림 4에서 ADIS16405 제품은 자이로와 가속도계 모두 허용 영역 내에 존재한다.

IV. 실험 환경 및 결과 분석

모니터링 값의 수식적인 오차분석을 통해 구한 관성센서 성능 상한에 대한 분석을 위하여 실제 상용 제품을 선택하여 실험을 진행하였다.

4-1 실험 환경

실제 관성센서 데이터를 이용한 불연속 측정치 검출 성능을 분석하기 위하여 관성센서 실측데이터와 GPS 반송파 시뮬레이션 데이터를 이용하여 성능 검증을 실시하였다. 관성센서 실측데이터는 회전 테이블을 제작하여 회전 테이블 실험을 통해 동적 실험 데이터를 수집하였다. 회전 테이블은 약 120 deg/sec의 속도로 회전시켰다. GPS 데이터는 시뮬레이션으로 생성한 데이터를 이용하고 관성센서 실측데이터를 이용하여 모니터링 값을 계산하였다.



그림 5. 제작된 회전 테이블
Fig. 5. Manufactured rate table



그림 6. ADIS16405 관성센서 모듈
Fig. 6. ADIS16405 inertial sensor module

4-2 실험 결과 및 분석

그림 7은 회전 테이블을 이용하여 얻은 관성센서 실측데이터를 이용한 모니터링 값 결과이다. 그림 7에서 영점을 중심으로 가장자리 위, 아래 끝 쪽에 위치하는 실선은 반송파 파장의 반 파장 라인이고 점선은 사분의 파장 길이(0.0476 m) 라인이다.

식 (6)에서 모니터링 값의 RMS 값은 0.0476 m보다 작도록 설계되었다. 그림 7의 계산된 모니터링 값의 RMS 값은 0.02 m 이하이다. 즉 실험치의 오차가 설계치의 1/2 수준이다. 따라서 모니터링 값 오차 성능이 설계치를 만족함을 알 수 있다. ADIS16405 IMU를 사용하였을 때 실험 결과가 설계된 모니터링 값의 RMS 값보다 작은 값의 오차가 생긴 것은 그림 4의 허용 가능 관성센서 영역에서 ADIS16405가 경계선보다 안쪽 영역에 존재하기 때문이다. 모니터링 값의 RMS 오차가 작을수록 불연속 측정치 검출 성능은 향상되기 때문에 선택된 관성센서를 사용하였을 때 불연속 측정치 검출 성능 또한 설계치보다 향상 될 것으로 예상할 수 있다. 따라서 회전 테이블 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 방법으로 선정된 관성센서가 설계된 불연속 측정치 검출 성능을 만족함을 실험적으로 확인하였다.

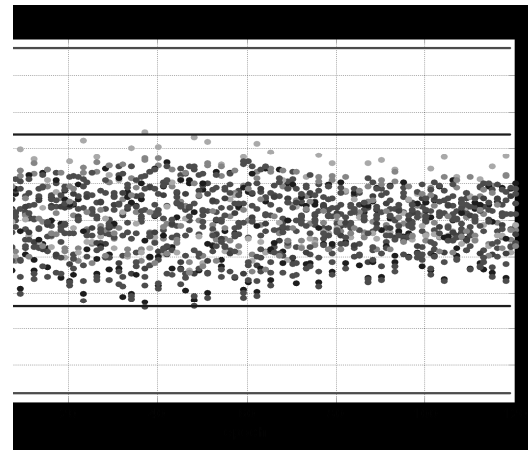


그림 7. 불연속 측정치 검출 모니터링 값 (m)
Fig. 7. Cycle-slip detection monitoring value

V. 결 론

본 논문은 고속도로 환경에서 위험물 운반 차량의

GPS 반송파 기반 positioning을 위한 반송파 불연속 측정치 검출에 대한 연구를 진행하였다. 저가의 불연속 측정치 검출 시스템 구성을 목표로 단일 주파수의 수신기를 이용하여 불연속 측정치 검출이 가능한 알고리즘을 연구하였다. 저가의 관성센서를 이용하여 목표 검출 성능을 만족할 수 있도록 모니터링 값 오차 수식 유도를 통하여 불연속 측정치 검출 성능 만족을 위한 관성센서 성능 범위를 도출하였다.

이를 검증하기 위하여 관성센서 성능 범위 내에 존재하는 상용 제품을 선택하여 실측데이터를 수집하였다. 회전 테이블 실험을 통하여 관성센서 데이터를 수집하였으며 이를 이용하여 GPS 에폭 간 상대위치를 추정하였다. 최종적으로 추정된 상대위치를 이용하여 불연속 측정치 검출 모니터링 값을 계산하였다. 실험 결과 목표 성능을 보수적으로 만족하는 불연속 측정치 검출 성능을 보였다.

본 연구를 이용하여 단일 주파수 수신기와 저가 관성센서를 이용한 불연속 측정치 검출 알고리즘의 개발에 적극 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통해 계약된 기초기술연구회의 "재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구" 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

Reference

- [1] Xu, G. "GPS: Theory, Algorithms, and Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [2] Bisnath & B., S. "Efficient, Automated Cycle-slip Correction of Dual-frequency Kinematic GPS Data," *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City, UT. 145-154, 2000.
- [3] Gao, Y. & Mclellan, J. F. "An Analysis of GPS Positioning Accuracy and Reliability with Dual-frequency Data," *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, Kansas City, MO, September 1996. 945 - 951, 1996.
- [4] Li, Y. G., Zuofa, "Cycle slip Detection and Ambiguity Resolution Algorithms for Dual-frequency GPS Data Processing," *Marine Geodesy*, 22, 169-181, 1999.
- [5] Altmayer, C., "Enhancing the Integrity of Integrated GPS/INS Systems by Cycle slip Detection and Correction," *Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings of the IEEE*, 174-179, 2000.
- [6] Colombo, O. L., Bhapkar, U. V. & Evans, A. G., "Inertial-aided Cycle-slip Detection/Correction for Precise, Long-baseline Kinematic GPS," *Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999)*, Nashville, TN. 1915-1922, 1999.
- [7] Du, S. & Gao, Y., "Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification for Integrated PPP GPS and INS," *Sensors*, 12, 14344-14362, 2012.
- [8] Takasu, Tomoil, Yasuda & Akio, "Cycle Slip Detection and Fixing by MEMS-IMU/GPS Integration for Mobile Environment RTK-GPS," *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, 2008 Savannah, GA, 64-71, September 2008.
- [9] Park, B., Kim, J., Kee, C., Cleveland, A., Parsons, M., Wolfe, D. & Kalafus, R. "RRC Unnecessary for DGPS Messages," *Ieee Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42, 1149-1160, 2009.
- [10] Song, J., Kim, Y., Park, B., Yun, H. & Kee, C., "Cycle Slip Detection Algorithm by Integrating Vehicle and Inertial Sensors for Land Vehicle Users," *Proceedings of the International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium, Sydney, Australia*, November 15-17, 2011.
- [11] Woodman, O. J., "An Introduction to Inertial Navigation," *University of Cambridge, Computer Laboratory, Tech. Rep. UCAMCL-TR-696*, 2007.

김 연 실 (Youn-Sil Kim)

결정 시스템, 항공기/우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템



2009년 2월 : 세종대학교 기계항공 우주공학부(공학사)
2011년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부(공학석사)
2011년 3월~현재 : 서울대학교 기계항공 공학부 박사 과정
관심분야: Land vehicle navigation, GPS carrier-phase based navigation, GPS&INS integration

송 준 솔 (Jun-Ssol Song)



2008년 8월 : 서울대학교 기계항공 공학부(공학사)
2008년 9월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사 통합과정
관심분야: Network RTK, Carrier-phase based algorithms

윤 호 (Ho Yun)



2006년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부(공학사)
2013년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부(공학박사)
2013년 3월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 선임연구원
관심분야: 무결성 감시, 광역보강시스템

기 창 돈 (Chang-Don Kee)



1984년 2월 : 서울대학교 항공 공학과(공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 항공 공학과(공학석사)
1994년 1월 : Stanford Univ. 항공 우주공학과(공학박사)
1996년 9월 ~ 2000년 9월 : 서울대학교

기계항공공학부 조교수

2000년 10월~2006년 9월 : 서울대학교 기계항공공학부 부교수

2006년 10월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수

관심분야: 위성항법시스템, 실시간 보정위성항법시스템, 실시간 광역보정위성항법시스템, 실시간 초정밀 위치