

GPS 반송파 기반의 정밀 상대 항법에서 운동 모델 적용을 통한 사이클 슬립 대응 기법

System Kinetic Model based Cycle Slip Free Technique for GPS Carrier Phase Precise Positioning

천세범*, 허문범*, 남기욱*

Se-Bum Chun*, Moon-Beom Heo* and Gi-Wook Nam*

요 약

GPS 반송파를 이용한 정밀 항법 수행 시 미지 정수 결정이 필수적이다. 한번 결정된 미지 정수는 사이클 슬립이 발생하지 않는 한 변하지 않는다. 그러나 전파 관측 환경의 변화에 따라 사이클 슬립이 발생하게 되며, 이러한 상황에서 연속적인 항법 정보 제공을 위한 적절한 대응 조치를 취해 주어야 한다. 그러나 이러한 조치들은 매우 번거로우며, 소프트웨어적인 복잡성을 야기 한다는 문제가 있다. 본 논문에서는 미지 정수 유지 및 재검색 과정을 단순화하기 위해 시스템 운동 모델을 이용하여 사이클 슬립에 무관한 위치 제공 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 고의적으로 사이클 슬립을 발생시켜 대응 성능을 확인하였으며, 이 결과 사이클 슬립과 무관하게 항법 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

It is necessary to resolve integer ambiguity in GPS carrier based precise positioning. If there is no signal blockage or cycle slip, the integer ambiguity does not changed. however, signal blockage and cycle slip occur frequently under real operational environment. under this situation, integer ambiguity maintenance is indispensable for continuity of navigation information. In this paper, a cycle slip free technique is proposed for simplifying integer ambiguity maintenance procedure. this technique tested with simulated carrier phase signal with cycle slip aided intentionally. As a result, the proposed technique can give navigation information continuously even if cycle slip is occurred.

Key words : GPS, Cycle Slip, Kinetic model

I. 서 론

GPS (Global Positioning System) 반송파 정보를 이용하면 GPS 코드 정보를 이용한 경우에 비해 향상된 정확도의 항법 정보를 얻어 낼 수 있다. 그러나 GPS

에서 제공하는 반송파 정보는 신호 추적이 시작된 순간 이후의 증분만을 제공하기 때문에 그 이전의 정수 값은 제공할 수 없다는 한계가 있다. 그러므로 GPS 반송파 정보를 이용한 위치 결정을 위해서는 반송파 미지 정수(Integer ambiguity)가 결정되어야 한다.

* 한국항공우주연구원 (Korea Aerospace Research Institute)

· 제1저자 (First Author) : 천세범

· 투고일자 : 2011년 7월 25일

· 심사(수정)일자 : 2011년 7월 25일 (수정일자 : 2011년 8월 25일)

· 게재일자 : 2011년 8월 30일

반송파 미지 정수는 이름 그대로 정수의 성질을 가지고 있기 때문에 실수 영역에서 최적의 해를 제공하는 최소 자승법 등의 방법의 적용이 불가능하며, 막대한 양의 연산을 필요로 하는 검색의 방법으로 최적해를 결정하여야 한다.

그러나 이러한 과정을 거쳐 결정된 미지 정수라고 하더라도 사이클 슬립(Cycle slip)이 발생하면 미지 정수가 변화하기 때문에 다른 위성의 측정치를 기반으로 재결정하거나 심할 경우 다시 검색을 수행하여야 한다. 이러한 과정은 매우 번거롭고 복잡한 과정으로 소프트웨어의 복잡성을 높이는 원인 중 하나이다.

사이클 슬립 대응 관련 연구는 주로 측정치 단계에서의 대응에 집중해 있다. 측정치 영역에서의 대응 방법으로는 반송파-코드 비교 방법, 이온층 잔차 방법, 도플러 적분 방법, 위상 차분 방법 등이 있으나 사이클 슬립을 검출하고 추가적인 조치를 취해 주어야 한다는 점에서는 모두 동일한 단점을 가지고 있다 [1].

본 논문에서는 사이클 슬립 발생 시 대응을 위해 필요한 복잡한 처리 절차를 단순화하기 위해 사이클 슬립에 무관한 GPS 반송파 기반 정밀 위치 추정 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 미지 정수가 대상 시스템의 상태 변수에 종속이며, 상태 변수는 사이클 슬립에 영향을 받지 않는다는 점을 이용한다. 대신 사이클 슬립이 발생하지 않은 경우 미지 정수가 불변이라는 점을 이용하지 않으므로 상태 변수의 시간 갱신을 위해 대상 시스템의 운동 모델 (Kinetic model) 을 이용한다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 이 결과 사이클 슬립 발생과는 상관없이 안정적인 항법 정보를 제공함을 확인 할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기본적인 반송파 기반 위치 추정 방법에 대해 언급하고, 3장에서는 사이클 슬립과 이에 대한 기존의 대응 방법을 언급한다. 4장에서는 운동 모델 기반의 사이클 슬립 무관 기법을 제안하고, 5장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 유효성을 검증한다.

II. GPS 반송파 기반 정밀 위치 추정

2-1 GPS 반송파 측정 정보

반송파 측정치는 수신기에서 생성된 반송파와 수신된 반송파의 위상 차이이다. 반송파가 수신되면 생성된 반송파의 위상을 조절하여 수신된 반송파의 위상을 추적하게 된다. 이러한 원리로 생성되는 반송파 측정치는 송신기와 수신기 안테나 사이에 존재하는 위상 개수에 대한 정보를 제공하는 것이 불가능하다.

2-2 GPS 반송파 미지 정수의 결정

미지 정수는 정수의 특성을 지니기 때문에 실수 영역에서 최적의 추정값을 제공하는 최소 자승법 등의 방법으로는 추정이 불가능하다. 미지 정수의 결정을 위해 다양한 알고리즘이 개발되어 왔으며, 4가지 카테고리로 분류하는 것이 가능하다[2].

- 정적 초기화 방법

미지 정수 결정을 위해 정적인 초기화 과정이 필요한 방법이다.

- 반송파-코드 조합 방법

반송파와 코드의 조합으로 미지 정수를 결정하는 방법으로 최종 단계에서 검색 과정을 필요로 한다.

- 미지 함수 (Ambiguity function) 방법

위치 영역에서 검색을 수행하는 방법으로 최적의 미지 함수 값을 갖는 위치를 검색하는 방법이다.

- 미지 정수 영역 검색 최적화 방식

미지 정수 영역에서 검색을 수행하는 방법으로 검색 공간을 최소화하기 위한 기법 등을 포함하고 있다.

III. GPS 반송파 사이클 슬립

3-1 사이클 슬립의 원인과 특징

사이클 슬립은 반송파 측정치에서 발생하는 정수 배의 점프를 말한다. 사이클 슬립은 PLL (Phase Lock Loop)에서 위상 추적을 실패할때 발생하며, 이러한 현상은 관측 환경 변화에 따라 위성 신호가 안테나에 도달하지 못할 때 발생한다. 만약 수신기 내부적으로 사이클 슬립을 보상하지 않는다면, 사이클 슬립 발생

이후 모든 측정치는 정수배로 편향되어진다.

그림 1은 사이클 슬립 발생에 의해 반송파 측정치가 받는 영향을 나타낸 것이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 사이클 슬립의 발생으로 인해 이 이후의 모든 측정치에 정수 배 만큼의 편향이 발생하는 것을 확인할 수 있다. [3]

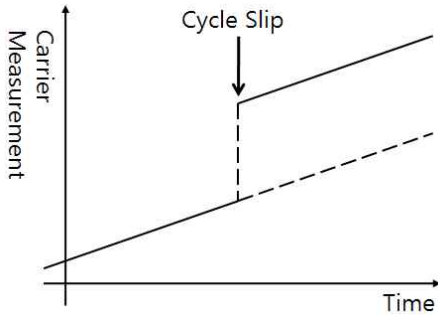


그림 1. 사이클 슬립
Fig. 1 Cycle slip

3-2 사이클 슬립의 검출

사이클 슬립 검출에는 다양한 방법이 알려져 있으나 다음과 같이 4가지 방법으로 요약할 수 있다. [2, 4]

- 반송파-코드 비교

사이클 슬립이 발생하지 않았을 경우 식 (1)에서 미지 정수의 시간 차분이 '0'이라는 점을 이용한 검출 방법이다. 반송파 위상에 비해 코드 측정치의 잡음이 크기 때문에 상대적으로 큰 사이클 슬립의 검출에 이용된다.

$$\Delta R = \lambda \Delta \phi - \lambda \Delta N + \varepsilon \tag{1}$$

여기서,

- Δ : time difference operator
- R : code range
- λ : wave length
- ϕ : phase
- N : ambiguity
- ε : residual

- 이온층 잔차 방법

이온층 잔차가 사이클 슬립 발생 시 증가하는 특성을 이용하여 검출하는 방법으로, 이중 주파수 수신

기를 사용하는 경우 적용 가능하다. 이온층 잔차는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_1 \Delta \phi_1 - \lambda_2 \Delta \phi_2 = \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 - \Delta \delta_{ion} + \Delta \varepsilon \tag{2}$$

여기서,

- $\lambda_{1,2}$: wave length of frequency 1 or 2
- $\phi_{1,2}$: phase measurement of frequency 1 or 2
- $N_{1,2}$: ambiguity of frequency 1 or 2
- $\Delta \delta_{ion}$: ionospheric residual

- 도플러 적분 방법

반송파 측정 정보는 PLL에서 제공되는 위상 정보와 정수 계수 정보의 합으로 제공된다. 만약 사이클 슬립이 발생하면 정수 계산이 불가능하고, 이로 인해 도플러 적분 값과 차이를 갖게 되므로 사이클 슬립을 검출할 수 있다. 도플러 적분 방법은 식 (3)을 이용하여 검출을 수행한다.

$$\Delta N = \Delta \phi - \int_{t-1}^t D \cdot dt + \varepsilon \tag{3}$$

여기서,

- D : doppler observation

- 위상 차분 방법

위상 차분 방법은 커브 피팅 (Curve Fitting)을 통해 생성된 위상과 측정된 위상 차이를 비교하는 방법으로, 사이클 슬립이 발생할 경우 이 차이가 커지게 된다. 이러한 변화를 감지하여 사이클 슬립을 감지해 내는 방법이다.

이상 언급한 방법들로 사이클 슬립의 검출이 가능하며, 검출된 사이클 슬립은 보수 (Repair)하거나 미지 정수를 미지수로 놓고 다시 추정하는 방법이 있다.

사이클 슬립 보수 방법은 정확한 사이클 슬립 양을 알고 있어야 하며, 잘못된 보수의 경우 모든 측정치에 영향을 미쳐 잘못된 해를 계산하게 만드는 위험이 있다. 미지 정수를 재 추정하는 방법은 단순한 연산이나 사이클 슬립이 발생하지 않는 미지 정수를 기반으로 수행할 수 있으며, 이 경우 모든 미지 정수를 재검색 하는 것 보다 높은 성공률 (Success rate)를 제

공할 수 있다. [5]

IV. 운동 모델 기반 사이클 슬립 무관 기법

4-1 베이저안 추정 기법 기반의 위치 추정

베이저안 추정(Bayesian inference) 기법은 시스템의 상태 사이에 조건부 확률 분포를 이용해 추정 성능을 향상 시키는 기법이다.

GPS 반송과 미지 정수는 사이클 슬립이 발생하지 않는 한 불변이라는 특징을 가지고 있으므로 베이저안 추정 방법을 이용하여 추정 성능을 향상 시킬 수 있다. 미지 정수 추정을 위해 그림 2와 같은 베이저안 네트워크를 구성할 수 있다.

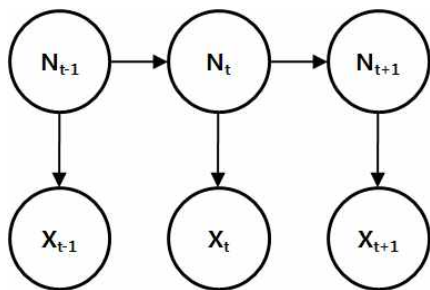


그림 2. 미지 정수 결정을 위한 베이저안 네트워크
Fig 2. Bayesian network for integer ambiguity fix

그림 2에서 볼 수 있듯이 미지 정수가 불변이라는 가정을 이용하고 있으며, 반면 상태 변수는 미지 정수와 측정치 기반으로 측정치가 제공되는 매 순간마다 스냅샷 (Snap shot) 방식으로 만들어 지고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 방식은 운동 모델이 없이도 미지 정수 추정을 할 수 있다는 장점이 있으나 사이클 슬립 발생 시 모델 오차가 발생하므로 적절한 대응 조치가 요구된다는 문제가 있다.

4-2 운동 모델을 이용한 위치 추정 방식

GPS 반송과 미지 정수는 위치 정보에 종속적인 변수이다. 만약 위치 정보가 완벽하게 알려져 있고 측정치 잡음이 매우 적다면 단순 연산으로 미지 정수를

계산해 낼 수 있다.

실제 상황에서는 알아낼 수 있는 위치 정보의 정확도에 한계가 있고 측정 잡음도 존재하기 때문에 이러한 단순한 연산으로 미지 정수를 결정하는 것이 곤란하다. 그러나 위치 정보의 정확도와 측정 잡음에 대한 확실적인 정보를 가지고 있으면 미지 정수 결정 확률을 계산해 낼 수 있다.

미지 정수와 위치 해 사이의 관계를 이용하면 그림 3과 같은 베이저안 네트워크를 구성할 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 미지 정수는 상태 변수에 종속 변수이므로 측정치가 들어오는 순간에 상태 변수 정보를 이용하여 미지 정수의 존재 범위를 계산하게 된다. 운동 모델을 사용하는 경우 예측된 상태 변수에는 미지 정수를 재생성 하기 위한 모든 정보를 포함하고 있기 때문에 미지 정수의 시간 갱신을 위한 모델이 필요하지 않게 된다.

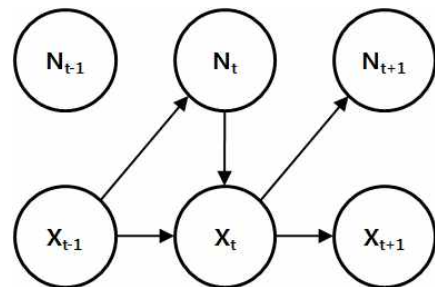


그림 3. 수정된 베이저안 네트워크 구성
Fig 3. Modified Bayesian network

그러나 이러한 방법은 모델 불확정성에 의해 생성된 미지 정수의 정확성이 영향을 받기 때문에 모델 불확정성이 높은 경우에는 사용이 불가능하다.

V. 성능 평가

5-1 대상 시스템 구성

본 논문에서는 굴절형 차량(Articulated vehicle)의 전방 및 후방 차량에 장착된 GPS 안테나에서 얻어진 상대 위치 정보를 기반으로 차량의 상대 위치를 추정하는 경우 제안된 방법의 적용을 통한 사이클 슬립 대응 성능을 파악하였다. 그림 4는 굴절형 차량의 구

조와 GPS 안테나의 배치를 나타낸 것이다.



그림 4. 굴절형 차량과 GPS 안테나 배치
Fig 4. Articulated vehicle and GPS antenna configuration

5-2 상태 추정 필터 구성

5-2-1 시스템/관측 모델 구성

베이지안 추정 방식을 적용하기 위해서는 상태 변수의 시간 갱신을 위한 시스템 모델과 관측 모델이 요구된다. 시스템 모델과 관측 모델은 식 (4), (5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_{0,t+1} &= x_{0,t} + \frac{v_t \cdot dt}{l} \cdot \tan(u_t) \\ x_{1,t+1} &= x_{1,t} + \frac{v_t \cdot dt}{l} \cdot \tan(x_{0,t} - x_{1,t}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_{trailer} &= X_{tractor} + C_1 \vec{l} + C_2 \vec{L} \\ R_0 &= DD \cdot \begin{bmatrix} norm(X_{sat\#1} - X_{tractor}) \\ \vdots \\ norm(X_{sat\#1} - X_{trailer}) \\ \vdots \end{bmatrix} \\ N &= round\left(\frac{\lambda\Phi - R_0}{\lambda}\right) \\ y &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda\Phi - \lambda N \\ \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 + H \cdot dx + v_1 \\ R_0 + H \cdot dx + v_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

- $x_{0,t}$: tractor heading at time t
- $x_{1,t}$: trailer heading at time t
- v_t : vehicle speed at time t
- l : tractor length (front wheel shaft to hitch axis)
- dt : sampling time
- u_t : steering input

- $X_{tractor, trailer}$: tractor and trailer position
- DD : cofactor matrix for double difference
- C_1 : rotational transformation matrix for tractor
- C_2 : rotational transformation matrix for trailer
- y : observation vector
- $\vec{l} = \begin{bmatrix} 0 \\ l \end{bmatrix}, \vec{L} = \begin{bmatrix} 0 \\ L \end{bmatrix}$
- l : tractor length
- L : trailer length

5-2-2 파티클 필터

무한의 자유도를 갖는 실제 확률 분포를 이용해 베이지안 추정을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 다양한 방법으로 단순화된 방법을 적용해 사용한다.

그중 대표적인 방법이 칼만 필터로써 시스템/관측 모델이 선형이고 잡음의 확률 분포가 화이트-가우시안(White-Gaussian)이라는 가정에서 적용 될 수 있다.

그러나 미지 정수는 이름 그대로 정수의 특성을 가지므로 실수 영역에서 추정을 수행하는 칼만 필터의 경우는 적용이 불가능하며, 특히 굴절형 차량의 시스템 모델이 비선형 특성을 지니기 때문에 일반적인 칼만 필터의 적용이 불가능하다.

이러한 경우 확장 칼만 필터 (Extended Kalman filter)등을 적용하여 추정을 수행할 수 있으나, 이 경우 선형화 기준점 등의 정확도가 떨어질 경우 필터 거동이 불안정해지는 문제가 있다.

비선형 시스템 모델에 대한 대안 다양한 방법들이 제안되어 왔으며, 그중 대표적인 방법으로는 시그마 포인트 칼만 필터나 파티클 필터 등이 있다.[5]

본 논문에서는 미지 정수의 정수 특성과 대상 시스템의 비선형성 문제를 해결하기 위해 파티클 필터를 적용하였다. 파티클 (Particle) 필터는 점밀도 확률 분포 (Point mass probability distribution) 방식에 기초한 순차적 몬테카를로 (Montecarlo) 기법을 이용한 준 최적 필터이다.(4) 이때 점밀도를 파티클이라고 한다. 파티클 필터는 비선형 모델과 백색-가우시안 잡음이 아닌 경우에도 상태를 추정 가능하다는 장점이 있으나 연산량이 칼만 필터 등에 비해 매우 크다는 문제가 있다. 본 논문에서 사용된 필터는 표 1과 같은 구성을 갖는다. [6, 7, 8]

표 1. 필터 구성

Table 1. Filter configuration

상태 변수	견인차량 헤딩, 히치 각
파티클 수	100개
연산 주기	10Hz
적용 방식	SIR 파티클 필터

5-2-3 성능 평가를 위한 시뮬레이션 구성

굴절형 차량의 상태 추정 시 사이클 슬립 대응 성능을 평가하기 위해 구성된 시뮬레이션은 그림 5와 같은 구성을 갖는다.

굴절형 차량의 조향(Steering) 입력을 이용해 생성된 기준 궤적은 GPS 시뮬레이터에 제공되며, 여기서 생성된 GPS 신호와 조향 입력을 이용하여 상태 추정을 수행한다.

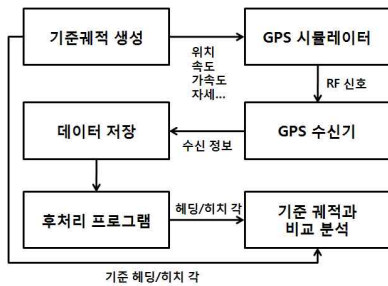


그림 5. 시뮬레이션 구성

Fig 5. Configuration of simulation

시뮬레이션에 적용된 기준 궤적은 적절한 조향 입력을 주어서 구성하였으며, 생성된 기준 궤적과 스티어링 입력은 그림 6과 같다.

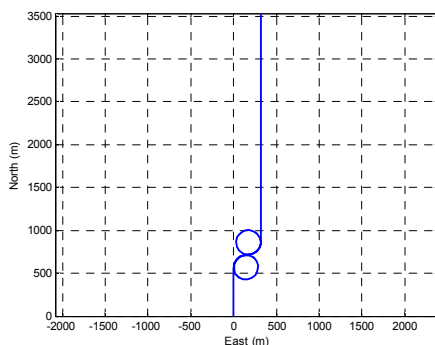


그림 6. 기준 궤적

Fig 6. Reference trajectory

5-2-4 사이클 슬립 생성

사이클 슬립 모사를 위해 특정 시간 이후로 특정 위성의 반송파 측정치에 오프셋을 더하였다. 사이클 슬립이 발생한 순간은 200/400초로 각각 100사이클의 사이클 슬립이 발생하였다. 사이클 슬립이 발생된 측정치와 그렇지 않은 측정치의 차이는 그림 7과 같다.

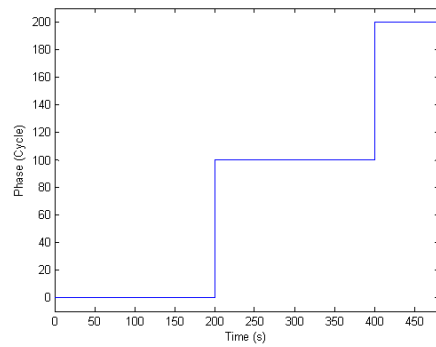


그림 7. 사이클 슬립이 발생한 반송파 측정치

Fig 7. Phase measurement with cycle slip

그림 7에서 발생한 사이클 슬립으로 인해 반송파 측정치에 오프셋(Offset)이 발생하였음을 확인할 수 있다.

5-2-5 사이클 슬립 대응 성능 평가

그림 8은 사이클 슬립이 발생한 상황에서의 추정된 미지 정수의 변화를 나타낸 것이다. 반송파 측정치에 사이클 슬립이 발생한 시점에서 추정된 미지 정수도 점프를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

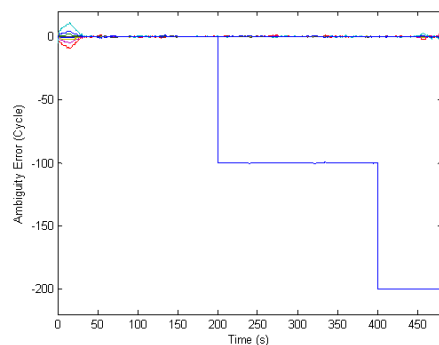


그림 8. 미지 정수 추정 결과

Fig 8. Integer ambiguity estimation result

그림 9, 10은 이때의 상태 추정 결과로써 사이클 슬립이 2회 (200초, 400초)에 걸쳐 발생하였음에도

불구하고 헤딩과 굴절각 추정치에 아무런 영향 없이 안정된 상태 추정 정보를 제공하고 있음을 확인 할 수 있다. 헤딩 및 굴절각의 오차는 각각 0.40도와 0.18도 (1 σ)이다.

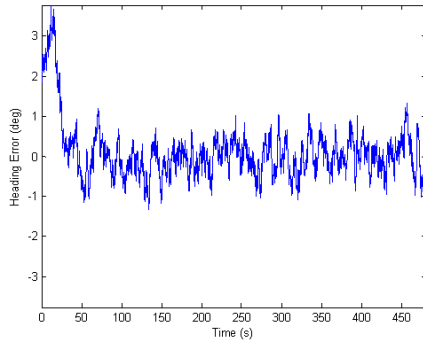


그림 9. 사이클 슬립 발생 시 헤딩 추정 오차
Fig 9. Estimated heading error with cycle slip

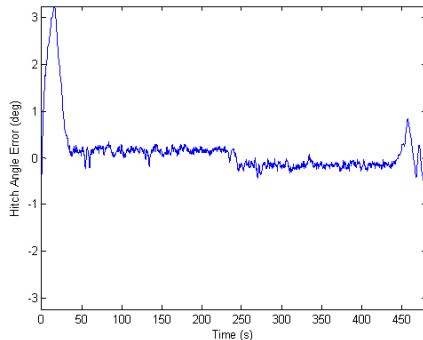


그림 10. 사이클 슬립 발생 시 굴절각 추정 오차
Fig 10. Estimated articulation angle error with cycle slip

VI. 결 론

본 논문은 GPS 반송파 기반의 정밀 위치 추정 수행 시 대상 시스템의 운동 모델을 이용하여 사이클 슬립에 대응할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 대상 시스템과 미지 정수 사이의 종속 관계를 이용하였으며, 이러한 관계가 존재하는 다양한 시스템에 적용 가능함을 보였다.

제안된 방법의 검증을 위해 굴절형 차량의 전후방 차체에 GPS 안테나를 설치하여 상태를 추정하는 방법에 적용하였으며, 이 결과 사이클 슬립의 발생과는 상관없이 안정적인 GPS 반송파 기반 위치 추정을 수행할 수 있음을 확인하였다

감사의 글

본 연구는 기초기술연구회의 “재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Tie-sheng Wang, Bing Zang and Shan-shan Li, "The Research of the Cycle Slips' Detection Method in GPS Navigation and Positioning," *Proceedings of International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, 2010
- [2] Guochang Xu, *GPS-Theory, algorithm and applications*, 2nd Ed., Springer, 2007
- [3] Alfred Leick, *GPS-Satellite surveying*, 3rd Ed., Wiley, 2007
- [4] Donghyun Kim and Richard B. Langley, "Instantaneous Real-time Cycle-slip Correction of Dual-frequency GPS Data," *Proceedings of The Institute of Navigation 2001 National Technical Meeting, Longbeach*, pp586~595, Jan 2001
- [5] P.J.G. Teunissen, A. Kleusberg (Eds), *GPS for Geodesy*, 2nd Ed., Springer, 1998
- [6] Blanko Ristic, *Beyond the Kalman Filter*, Artech house, 2004
- [7] Arnaud Doucet (Eds), *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, Springer, 2000
- [8] Sebum Chun, *Performance Improvement of INS/GPS Using Multiple Vision Sensors*, Ph.D Dissertation, Konkuk University, 2007

천 세 범 (千世範)



2000년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 (공학사)

2002년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 대학원(공학석사)

2008년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 대학원(공학박사)

2008년 1월 ~ 2010년 3월 : (주)마이크로인피니티 (책임연구원)

2010년 4월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 (선임연구원)

관심분야 : GNSS, 관성항법, 센서퓨전, 비선형 상태 추정

남 기 욱 (南基旭)



1983년 2월 : 한국항공대학교
항공운항학과(공학사)
1988년 2월 : 한국항공대학교
항공운항학과(공학석사)
1996년 6월 : Cranfield Univ.
항공공학과(공학박사)

1988년 7월 ~ 1989년 7월 : 한국과학기술연구원 연구원
1989년 8월 ~ 1992년 7월 : 한국항공우주연구원 선임연구원
1996년 12월 ~ 현재 : 항공우주연구원 책임연구원
관심분야: GNSS, 위성항법, 항행시스템 등

허 문 범 (許文範)



1992년 2월 : 경희대학교 기계공학과
(공학사)
1997년 12월 : Illinois Institute of
Technology 항공기계공학과(공학석사)
2004년 12월 : Illinois Institute of
Technology 항공기계공학과(공학박사)

2005년 10월 ~ 현재 : 항공우주연구원 선임연구원
관심분야: GNSS, 위성항법, 항행시스템 등