

의사위성과 GPS를 이용한 정밀 위치 결정

*윤희학¹, 강동연¹, 신미영², 박찬식¹, 이상정²

1 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부

2 충남대학교 전자공학과

Precise Positioning using GPS and Pseudolite

*Hee Hak Yun¹, Dong Youn Kang¹, Mi Young Shin², Chansik Park¹, Sang Jeong Lee²

1 School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University

2 Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract - GPS를 사용할 경우 반송파 위상 측정치를 이용한 정밀한 위치 측정이 가능하다. 그러나 GPS만을 사용할 경우, 미지정수 결정 성공률이 낮으며, 도심과 같은 곳에서 신호를 수신하지 못하는 경우가 발생한다. 이 문제는 의사위성을 추가하여 해결할 수 있다. 본 논문에서는 GPS에 의사위성을 추가하여 미지정수의 결정 성공률이 향상되고 가용성을 향상시킬 수 있으며 정확도가 향상됨을 보였다.

1. 서 론

GPS(Global Positioning System)의 반송파 위상을 이용하면 정밀한 위치를 구할 수 있다. 항법분야를 비롯하여 경계측량, 구조물 변형측량, 지도제작 등의 응용에서는 정밀한 위치를 필요로 한다. 반송파 위상을 이용하면 대부분의 응용에서 요구하는 mm 정도의 정밀도로 정확한 위치를 구할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 반송파 위상에 포함된 미지정수가 결정되어야 한다. 미지정수 결정은 Delft University에서 개발된 LAMBDA(Least squares Ambiguity Decorrelation Adjustment)[1]의 방법을 필두로 ARCE(Ambiguity Resolution with Constraint Equation)[3] LSAST(Least Squares Ambiguity Search Technique)등 다양한 방법들이 있으며, 이중 가장 대표적인 방법인 LAMBDA이다.

GPS의 L1신호만을 사용할 경우 미지정수의 검색 성공률이 낮다. 또한 고층건물이 많은 도심에서는 신호를 수신하지 못하는 경우가 발생한다. 이 문제는 의사위성을 추가로 설치하여 해결할 수 있다. 의사위성이란 GPS 위성 과 비슷한 신호를 송출하는 진파 송출 장치이다. 수신기는 의사위성을 마치 GPS 위성이 있는 것으로 인식한다. 따라서 의사위성을 실외에서 사용할 경우에는 위성 배치의 기하학적 성질을 개선하여 정확도를 높일 수 있으며, GPS 신호를 수신하지 못하는 실내나 도심에서 사용할 경우에는 위성항법 시스템의 문제점인 위성 신호 차단을 극복할 수 있다[2].

본 논문에서는 정밀한 위치를 구하기 위하여 GPS와 의사위성의 코드와 반송파 위상 측정치를 동시에 사용하는 경우, GPS만을 사용하는 경우와 비하여 미지정수 결정 성공률과 위치 정확도가 향상됨을 보인다.

2. 미지정수 결정

정밀한 위치를 구하기 위해서는 GPS반송파 위상 측정치를 이용해야 한다. 파장이 약 19cm인 GPS의 L1 반송파 위상신호를 이용하면 수 mm의 정밀도를 가지므로, 두 안테나 사이의 거리가 가까운 경우 수 mm정도의 정확도로 위치를 구할 수 있음이 알려져 있다[3][5]. 이를 위해서는 이중 차분된 코드와 반송파 위상 측정치를 사용하며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho &= H\delta x + v \\ l &= H\delta x + \lambda N + w \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 이중 차분된 코드 측정치, l 은 이중 차분된 반송파 위상 측정치, H 는 단일 차분된 시선각벡터, δx 는 WGS-84 좌표계에서 기저선 벡터, λ 는 반송파 위상의 파장, N 은 이중 차분된 미지정수, $v \sim (0, \Phi_w)$ $= (0, DD \cdot Q_p \cdot DD^T)$, $w \sim N(0, Q_D)$ $= (DD \cdot Q_p \cdot DD^T)$ 로 측정 잡음을 나타내며, DD 는 이중차분 연산자, Q_p 와 Q_D 는 차분되지 않은 코드와 반송파 위상 측정치의 공분산을 나타낸다.

미지정수를 결정하는 문제는 해석적인 해가 존재하지 않으며, 주어진 범위 내의 모든 가능한 미지정수를 검색하는 방법을 사용한다. 주어진 범위내의 모든 가능한 미지정수를 목적함수에 대입하여, 목적함수의 값 중 최소의 값을 갖는 미지정수를 찾는 과정이다. 반송파 위상에 포함된 미지정수를 결정하는 방법은 많은 방법이 알려져 있으나, 본 연구에서는 가장 대표적인 LAMBDA를 사용하였다. LAMBDA는 정수 최소 자승 기법에 근거한 미지정수 검색기법으로, 상관되어 있는 공분산 행렬과 미지정수들을 비상관화하여 검색 공간을 줄여 미지정수를 효과적으로 검색할 수 있는 방법이다. 식 (1)과 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{L1} = B_{L1}b + A_{L1}a_{L1} + e_{L1} \quad (3)$$

여기서 $y_{L1} = [\rho \ l]^T$, $B_{L1} = [H \ H]^T$, $A_{L1} = [0 \ \lambda]^T$, $a_{L1} = N$, $b = \delta x$, $e_{L1} = [v \ w]^T$ 이다. 측정된 y_{L1} 의 공분산 행렬은 $Q_{y_{L1}} = \begin{bmatrix} Q_{Dp} & 0 \\ 0 & Q_{Dw} \end{bmatrix}$ 로 나타낸다.

LAMBDA는 식(3)의 GNSS 모델을 통해 미지정수를 결정하기 위해 3단계의 절차를 거친다. 첫 번째로 미지정수가 정수제한이라는 조건을 무시하고 $a \in Z^n$ 로 하여 최소자승법을 통해 미지정수를 결정한다. 그 결과 실수로 추정된 \hat{a} 와 \hat{b} , 그리고 공분산 행렬을 함께 얻는다. 이것을 '실수해'이라고 한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{a}\hat{b}} & Q_{\hat{b}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

두 번째로 실수해에서 추정된 실수영역에서의 \hat{a} 는 정수영역의 \tilde{a} 를 계산하는데 사용되어 진다. 이것은 $S: R^n \rightarrow Z^n$ 로, 실수의 n 차원의 공간에서 정수의 n 차원의 공간으로 사상시키는 것이다. 이는 식 (5)와같이 나타낼 수 있다. 이 단계에서 정수 최소 자승 기법이 사용된다.

$$\tilde{a} = S(\hat{a}) \quad (5)$$

일단 미지정수가 계산되면, 세 번째로 실수해에서 추정된 \hat{b} 을 정수해 \tilde{b} 을 이용하여 식 (6)을 통해 정수해 \tilde{b} 를 구할 수 있다.

$$\tilde{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \tilde{a}) \quad (6)$$

여기서 공분산 행렬은 $Q_{\tilde{b}} = Q_{\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} Q_{\hat{a}\hat{b}}$ 이다. 미지정수 결정 성공률은 정확한 미지정수 추정의 확률이기 때문에, 실수영역에서 추정된 \hat{a} 가 정확히 미지정수 \tilde{a} 로 나타날 확률과 같다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\hat{z} = z) \geq \prod_{i=1}^n \left(2\Phi \left(\frac{1}{2\sigma_{z_i}} \exp(-\frac{1}{2}z^2) dz \right) \right) \quad (7)$$

여기서 $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}z^2) dz$ 이며, $\hat{z} = Z^T \hat{a}$, Z 는 가우스 변환 행렬이다[1].

3. GPS와 의사위성을 이용한 위치결정

의사위성은 GPS 위성의 신호를 모사하여 송출하는 장치이다. 의사위성의 코드와 반송파 위상 측정치 모델은 GPS와 비슷하다. 의사위성의 오차 성분은 의사위성 위치 바이어스, 다중경로 오차, 대류권 지연, 의사위성 시계오차이다. 그러나 이중 차분을 거치면 식 (3)과 비슷한 방법으로 식(8)을 나타낼 수 있다.

$$y_{PL} = B_{PL}b + A_{PL}a_{PL} + e_{PL} \quad (8)$$

의사위성만이 존재하는 영역은 식(8)을 GPS만이 존재하는 영역에서는 식 (3)을 LAMBDA방법을 통해 미지정수를 결정하고 위치를 구할 수 있다. 의사위성과 GPS가 함께 존재하는 경우에는 측정된 신호를 동시에 이용할 수 있다. 이때는 이중 차분된 측정치를 식 (9)와 같이 식을 확장하여 나타낼 수 있다. 식 (9)을 LAMBDA에 적용하면 의사위성과 GPS를 동시에 이용하는 경우의 미지정수와 정밀한 위치를 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_{L1} \\ y_{PL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{L1} \\ B_{PL} \end{bmatrix} b + \begin{bmatrix} A_{L1} & 0 \\ 0 & A_{PL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{L1} \\ a_{PL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{PL} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경

의사위성의 추가가 미지정수 결정 성공률 향상에 미치는 성능을 검증하였다. 실험을 위해 GPS의 L1측정치는 2대의 NovAtel사의 MiLLenium GPS 수신기를 이용한 실제 측정치를 수집하였으며, 의사위성은 PC 프로그램을 이용하여 의사위성의 오차 모델링을 통해 측정치를 생성하였다. 의사위성은 대류층과 이온층의 오차는 무시되며, 수신기 측정 잡음이 가장 큰 영향을 미치도록 하였으며, 생성된 오차의 크기는 이중 차분된 GPS L1 신호와 크기가 비슷한 수준이 되도록 코드에 20cm, 반송파 위상에 2mm의 오차를 포함하도록 하였다. 기준점과 사용자의 기저선 길이는 약 14.7m이며, 의사위성은 그림 1과 같이 6개를 배치하였다. 그림 1에 기준점을 중심((0,0))으로 하여 의사위성과 사용자의 위치를 나타내었다. 여기서 파란색 '○'점이 의사위성을 나타내며, 붉은색 '▽'점이 기준점과 사용자의 위치를 나타낸다. 의사위성의 고도는 모두 100m로 설정 하였다. 그림 2에 실험 동안 관측된 위성 개수와 PDOP(Position Dilution of Precision)을 나타내었다. 실험을 위한 데이터는 1Hz로 획득하였으며 총 200초 동안 실험 하였다.

4.2 실험 결과

의사위성과 GPS의 반송파 위상 측정치를 이용하여 정밀한 위치를 구하였다. 이때 의사위성만을 이용한 경우와 GPS의 L1신호만을 이용한 경우, 그리고 의사위성과 GPS의 L1신호를 동시에 이용한 경우로 나누어 실험하였다. 표 1에 세 가지의 경우에 대한 실험결과를 나타내었다. 표 1의 결과를 보면 의사위성만을 사용한 경우에는 성공률이 17.5%로 GPS L1의 성공률 63.5%보다 낮은 결과를 볼 수 있다. 이것은 위성의 수, 의사위성의 배치에 의한 영향으로 볼 수 있다. GPS의 실험 시간동안 평균 7~8개의 위성이 보였으며, 평균 PDOP은 2.57이며, 의사위성은 실험 시간동안 6개의 위성과 평균 PDOP 4.81의 결과를 통해 비교해 볼 수 있다.

세 가지 경우에 대한 미지정수 결정 결과를 이용하여 평면오차와 성공률을 그림으로 나타내었다. 그림 3에는 의사위성만을 사용한 경우, 그림 4에는 GPS의 L1신호만을 이용하였을 경우, 그림 5에는 의사위성과 GPS의 L1신호를 동시에 이용하였을 경우이다. 그림 3, 4, 5의 (a)에서 붉은색 '○'은 미리 알고 있는 미지정수를 이용하여 위치를 구한 경우이며, 녹색의 '▽'는 결정된 미지정수를 이용하여 위치를 구했을 경우를 나타낸다. 그림 (b)의 녹색 선은 식 (7)을 이용하여 계산한 이론적인 미지정수 결정 성공률이며, 붉은 점은 실제 미지정수 검색결과 실패 시에 표시하였다. 식 (7)을 이용하여 계산된 이론적 미지정수 검색 성공률과 측정치를 이용한 결과가 유사함을 알 수 있다.

표 2에서 GPS만 사용하는 경우 평면 오차가 0.97m에서 의사위성을 동시에 사용함으로써 1.44cm로 줄어들음을 볼 수 있다. 이는 미지정수 검색 성공률이 올라감에 따라 더 정확한 위치를 구할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 GPS와 의사위성의 코드와 반송파 위상을 동시에 이용하여 정밀한 위치를 구하는 방법을 보였다. 반송파 위상에 포함된 미지정수는 LAMBDA기법을 이용하여 결정하였다. 의사위성만을 이용할 경우 미지정수의 검색 성공률이 낮아 정밀한 위치를 구하기 어려우며, GPS만을 이용한 경우에도 63.5%로 낮은 성공률을 나타내었다. 그러나 의사위성과 GPS를 동시에 이용했을 경우의 검색 성공률이 100%로 향상되어 가능성이 향상되고, 수평면의 정확도도 1.44cm(2drms)로 향상됨을 확인하였다.

[참고 문헌]

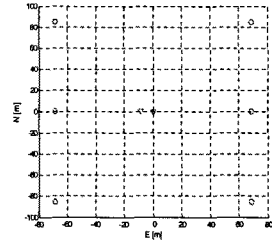
- [1] de Jonge, P.J. and Tiberius, C.C.J.M, The LMABDA Method for Integer Ambiguity Estimation: Implementation Aspects LGR Series No.12, De lft Geodetic Computing Centre,1996
- [2] Kaplan, E. D., "Understanding GPS Principles and Application," Artech House, 2006
- [3] P.J.G. Teunissen, "A new method for fast carrier phase ambiguity estimation," Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Lasvegas, Nevada, pp. 562-573. 1994
- [4] 박찬식, GPS반송파 위상신호를 이용한 자세결정, 공학박사 학위 논문 서울대학교 전기공학, 1997
- [5] 박찬식, 이장규, 지규인, 이영재, "GPS 반송파 위상을 이용한 정밀 자세 측정," 제어자동화시스템공학 논문지, 제3권, 제6호, pp. 602-612. 1997

<표 1> 미지정수 검색 결과

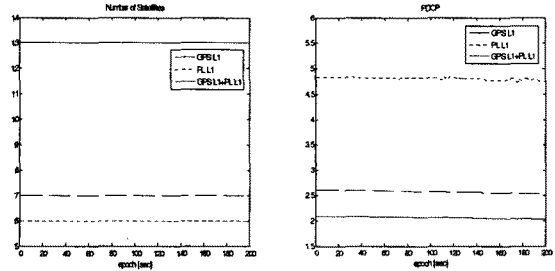
	총(epoch)	성공(epoch)	성공률(%)
PL	200	33	17.5
GPS L1	200	127	63.5
GPS L1 +PL	200	200	100

<표 2> 오차

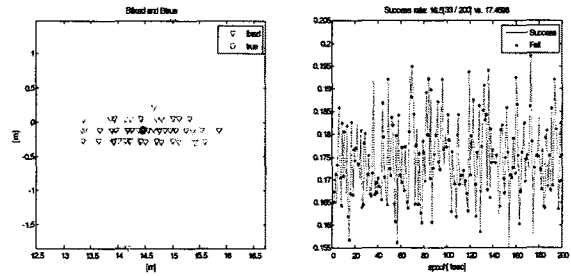
	PL	GPS L1	GPS L1 + PL
평면오차(2drms)	1.3876[m]	0.9702[m]	0.01445[m]
Z-축 오차(rms)	2.8034[m]	0.9957[m]	0.00888[m]



<그림 1> 의사위성의 배치도

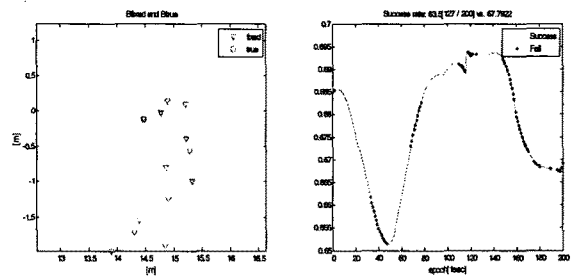


<그림 2> 가시위성 수와 PDOP



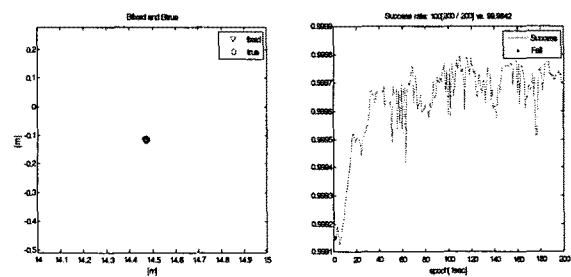
(a) 평면오차 (b) 성공률

<그림 3> 의사위성만을 사용한 경우



(a) 평면오차 (b) 성공률

<그림 4> GPS만을 사용한 경우



(a) 평면오차 (b) 성공률

<그림 5> 의사위성과 GPS를 동시에 사용한 경우