

CDGPS를 이용한 도깨비 도로의 정밀 측위

Precise Survey of Dokaebi Road Using CDGPS

기창돈*, 김정한*

Chang-Don Kee* and Jeong-Han Kim*

요 약

미지 정수가 올바르게 결정된 GPS 반송파 위상을 사용하면 cm 수준의 높은 위치 정확도가 요구되는 정밀 측위를 수행할 수 있다. 제주도 도깨비 도로는 착시 현상으로 인해 육안으로는 올바른 경사도를 파악할 수 없다. 본 논문에서는 반송파 보정 위성 항법 시스템의 높은 위치 정확도를 이용하여 제주도 도깨비 도로의 정확한 경사도를 계산하기 위해 동적 측위 실험을 수행하였다. 반송파 보정 위성 항법 시스템을 사용하여 실험 데이터를 후처리한 결과, cm 수준의 정확도로 도깨비 도로 노면의 정확한 형태를 알 수 있었다.

Abstract

Using GPS carrier phase whose cycle ambiguities are resolved, it is possible to perform precise survey requiring centimeter-level positioning accuracy. Because of an optical illusion, we cannot recognize the exact slope of Dokaebi Road. In this paper, we performed kinematic survey experiments in order to calculate the exact slope of Dokaebi Road with high positioning accuracy of CDGPS. By post-processing experimental data using CDGPS, it was possible to generate the exact vertical trajectory of Dokaebi Road with centimeter-level accuracy.

I. 서 론

위성 항법 시스템을 사용하여 일반적인 항법을 위한 항체의 위치를 계산하기 위해 일반적으로 코드에 의한 의사 거리 측정치를 사용한다. 그러나, 코드에 의한 의사 거리의 정밀도는 m 수준이므로 cm 수준의 높은 위치 정확도가 요구되는 정밀 측위를 수행하기 위해 일반적으로 초기 미지 정수가 정확히 결정된 반송파 위상 측정치를 사용하는 반송파 보정 위성 항법 시스템이 필요하다[4].

본 논문에서는 위와 같은 반송파 보정 위성 항법 시스템을 사용하여 제주도 도깨비 도로를 정밀 측위

하였다. 도깨비 도로는 실제 눈으로 보이는 것과는 반대의 경사 방향을 지니는 신비의 도로로 알려져 있다. 즉, 오르막길처럼 보이는 방향에서 차량의 시동을 끈 상태로 브레이크를 풀면 차량이 앞으로 미끄러져 내려간다. 이러한 도깨비 도로면의 형태를 알아보기 위한 정밀 측위 실험을 위해 3대의 GPS 수신기를 사용하였다. 즉, 서울대학교 신공학과 301동, 도깨비 도로변 기준점, 그리고 도깨비 도로상을 이동하는 차량에 GPS 수신기를 탑재하여 일정 시간 동안 데이터를 수신하였다. 이동하는 차량은 오르막길처럼 보이는 방향에서 시동을 끄고 저절로 미끄러져 내려가도록 하였다. 3대의 GPS 수신기에서 수신한 데이터를 후처리하여 cm 수준의 정확도로

* 서울대학교 항공우주공학과(Dept. of Aerospace Eng., Seoul National Univ.)

· 논문번호 : 99-1-2

· 접수일자 : 1999년 6월 21일

차량의 위치를 계산하였다. 본 논문에서는 이러한 실험을 통해 도깨비 도로의 궤적을 생성하여 도깨비 도로의 실제 표면 형태를 확인하기로 한다.

II. 반송파 보정 위성 항법 시스템

반송파 위상은 mm정도의 잡음 수준을 지니므로 반송파 위상의 미지 정수를 정확하게 계산할 경우 매우 높은 정확도로 사용자의 위치를 구할 수 있다. 정밀 측위를 위해 주로 사용되는 측정치는 이중차분(Double Difference)된 반송파 위상으로서 측정치의 잡음이 증폭되지만 기준국과 사용자간의 거리가 매우 짧을 경우(10 km 미만) 공통 오차항이 거의 상쇄된다. 즉, 위성 및 수신기 시계 오차(clock error), 위성 궤도 오차, 고의 잡음과 전리층 지연 및 대류층 지연에 의한 오차는 모두 상쇄된다. 그러나 기준국과 사용자간의 고도(height)차가 크면(100 m 이상) 이중 차분을 하더라도 대류층 지연 오차항이 완전히 상쇄되지 않아 위치 오차를 유발시키는 주된 원인이 될 수 있다. 이러한 경우 반드시 적합한 대류층 지연 모델을 통하여 측정치를 보정해야 한다[5].

이중 차분된 반송파 위상을 사용하여 정밀 측위를 수행하기 위해 다음 조건을 만족하는 목적 함수(objective function)를 최소화(minimization) 해야 한다[7].

$$\Omega = [z - H_b b - H_N N]^T P_z^{-1} [z - H_b b - H_N N] \quad (1)$$

$$b \in \mathbb{R}^3 \quad N \in \mathbb{Z}^m \quad z \in \mathbb{R}^{m \times n}$$

여기서,

- m : 이중 차분 미지 정수의 개수
 - n : 주기수(epoch)
 - z : n 주기까지의 이중 차분 반송파 위상
 - b : 기저선 벡터
 - N : 이중 차분 미지 정수
 - H_b : 기저선 벡터에 관련된 관측 행렬
 - H_N : 이중 차분 미지 정수에 관련된 관측 행렬
- 위의 목적 함수로부터 구해야 할 미지수는 실수

(real number) 영역의 기저선 벡터 성분 및 정수 영역의 미지 정수이다. 먼저, 모든 미지수가 실수라고 가정하면 위와 같은 유형의 목적 함수를 최소화 하는 해는 최적 가중 최소 자승 추정기인 BLUE(Best Linear Unbiased Estimator)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$\hat{x} = P_z H^T P_z^{-1} z \quad (2)$$

여기서,

$$P_z = (H^T P_z^{-1} H)^{-1} \quad \hat{x} \text{의 오차 공분산 행렬:}$$

$$P_z : \text{이중 차분 반송파 위상의 오차 공분산}$$

$$\hat{x} = \text{row}(\hat{b}, \hat{N})$$

$$H = [H_b \quad H_N]$$

$$\hat{N} : \text{실수 영역에서 추정된 이중 차분 미지 정수}$$

그러나, BLUE에 의해 실수 영역에서 미지 정수를 추정할 경우 위성의 기하학적(geometrical) 배치가 충분히 변하여 관측 행렬(observation matrix)의 조건 계수(condition number)가 좋아질 만큼 충분한 시간 동안 모든 측정치를 사용해야만 실수 영역에서 추정된 미지 정수가 정수에 가까운 값을 지니므로 정수 제한 조건을 만족시킬 수 없다. 이와 같이 일반적인 BLUE만으로 미지 정수 추정 문제를 해결하는데 한계가 있으므로 위의 문제는 정수 최소 자승 추정(integer least-squares estimation)에 관한 문제로 귀결된다. 정수 최소 자승 추정 기법에 의한 미지 정수 추정을 위해 최소화 되어야 할 목적 함수는 다음과 같다.

$$\Omega = (\hat{N} - N)^T P_N^{-1} (\hat{N} - N) \quad (3)$$

이러한 미지 정수 오차 공분산 행렬을 토대로 일정한 신뢰도를 갖는 검색 공간(Search Space)를 형성하여 통계적인 검증(Statistical test)을 통과한 미지 정수 후보(Cycle Ambiguity Candidates) 가운데 여러 가지 검증 기법으로 최종적으로 참 미지 정수를 선택한다. 실시간에서는 일반적으로 1초 이내에 위와 같은 계산이 수행되어야 하므로 L1, L2 반송파

위상 조합에 의한 확장 파장(Widelane)을 사용하여 검색 속도를 증대시킨다.

본 논문에서 사용한 미지 정수 결정 기법은 LAMBDA(Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment)이다. LAMBDA는 정수 최소 자승 추정 기법에 근거한 미지 정수 검색 기법의 일종이다. 일반적으로 이중 차분 미지 정수는 3개만이 독립(independent)이므로 5개 이상의 위성이 보일 경우 미지 정수간의 상관 관계가 매우 크고 관측 행렬의 조건 계수가 크기 때문에 이러한 검색 공간에서 미지 정수 검색을 수행하면 불필요한 검색이 많으므로 매우 비효율적이다. LAMBDA의 가장 큰 장점은 적절한 정수 변환 행렬을 이용하여 미지 정수의 상호 독립성을 높임으로써 불필요한 검색을 줄이는 데 있다.

어떤 변환 행렬 Z 에 의하여 변형된 목적 함수와 원래의 목적 함수와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [N - \hat{N}]^T P_{\hat{N}}^{-1} [N - \hat{N}] \\ &= [N - \hat{N}]^T Z^T Z^{-T} P_{\hat{N}}^{-1} Z^{-1} Z [N - \hat{N}] \\ &= [ZN - Z\hat{N}]^T (Z P_{\hat{N}} Z^T)^{-1} [ZN - Z\hat{N}] \\ &= [N_z - \hat{N}_z]^T P_{\hat{N}_z}^{-1} [N_z - \hat{N}_z] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

- Z : 비상관화 정수 변환 행렬
- P_Z : 행렬 Z 에 의해 변환된 이중 차분 반송파 위상의 오차 공분산
- N_z : 행렬 Z 에 의해 변환된 이중 차분 반송파 위상의 미지 정수

위와 같은 변환을 수행하더라도 일대일 정수 변환 관계가 성립하고 검색 공간의 체적이 보존되기 위해 검색 공간 변환 행렬 Z 의 모든 원소가 정수이고 행렬식(determinant)이 1이어야 한다. 이러한 제한 조건을 지닌 행렬 Z 에 의해 완벽한 비상관화(de-correlation)는 이루어질 수 없지만 부분적인 비상관화는 이루어지므로 불필요한 검색을 줄일 수 있게 된다.

위와 같은 비상관화 변환 행렬 Z 를 통하여 구한 새로운 미지 정수 검색 공간은 다음과 같다.

$$[N_z - \hat{N}_z]^T P_{\hat{N}_z}^{-1} [N_z - \hat{N}_z] < \chi_{1-\alpha, m}^2 \quad (5)$$

여기서,

$\chi_{1-\alpha, m}^2$: 유의 수준이 α 일 때의 χ^2 분포 함수값

위와 같이 설정된 검색 공간에서 각 미지 정수를 검색한 후 목적 함수를 최소화 하면서 통계적 검증을 통과한 최종 미지 정수를 사용하여 순차적인 최소 자승법으로 최종적인 기저선 벡터를 다음과 같이 구한다.

$$b = \hat{b} + P_{\hat{b}\hat{N}_z} P_{\hat{N}_z}^{-1} (N_z - \hat{N}_z) \quad (6)$$

여기서,

- b : 고정된 미지 정수에 의한 기저선 벡터
- \hat{b} : BLUE에 의해 실수 영역의 미지 정수와 함께 추정된 기저선 벡터
- $P_{\hat{b}\hat{N}_z}$: 기저선과 실수 영역의 미지 정수간의 오차 공분산

LAMBDA는 원래 단시간 동안의 데이터를 사용하여 미지 정수를 결정하기 위해 개발된 알고리즘이지만 수십 cm 수준의 정확도를 지니는 초기 위치해를 구할 수 있을 경우 동적 측위에도 적용할 수 있다[2].

III. 실험 구성 및 방법

그림 1은 반송파 보정 위성 항법 시스템을 사용한 제주도 도깨비 도로의 정밀 측위 실험 구성도이다. 사용된 GPS 수신기는 도깨비 도로 기준점 및 이동 차량에 각각 1대, 도깨비 도로 기준점 측위를 위해 서울대학교 신공학관에 장치된 수신기까지 포함하여 모두 3대이며 사용된 기종은 모두 Trimble 4000SSi이다. 그림 2와 그림 3은 각각 제주도 도깨

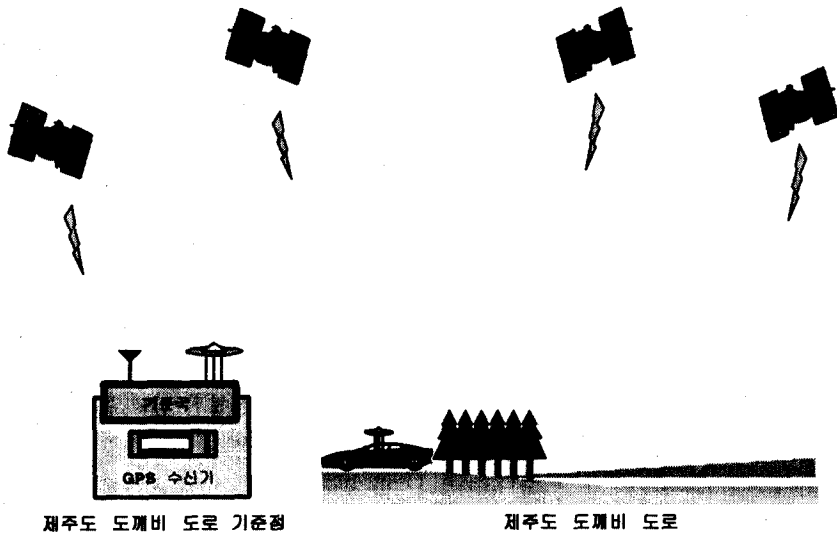


그림 1. 실험 구성도

Fig. 1. Construct of experiment.



그림 2. 도깨비 도로 기준점

Fig. 2. Reference station of Dokaebi road.



그림 3. 이동 차량

Fig. 3. Moving vehicle.

1초 간격으로 3대의 GPS 수신기에서 동시에 데이터를 수신하였다. 제주도 도깨비 도로 기준점의 정확한 위치를 구하기 위해 서울대학교 신공학관 301동 및 기준점에서 동시에 수신된 데이터를 Trimble사에서 제공하는 상용 소프트웨어 GPSurvey로 처리하여 기준점의 위치를 계산하였다.

IV. 실험 결과

비 도로의 기준점 및 이동 차량을 보이고 있다. 사용된 GPS 안테나는 반사된 전파를 차단하기 위한 접시형 안테나이다.

실험 시간은 1998년 8월 29일이고 약 1시간 동안

그림 4와 그림 5는 도깨비 도로를 따라 이동하는 차량의 수평 궤적 및 수직 궤적을 보이고 있다. 차량 궤적을 생성하기 위해 우선 정확하게 측지된 도깨비

도로 기준점을 바탕으로 하여 ECEF 좌표계에 대해서 차량의 위치를 계산한 후 좌표 변환하여 ENU 좌표계에 대한 위치를 계산하였다. 그 다음, ENU 좌표계와 도깨비 도로의 양 끝점을 축으로 하는 좌표계와의 변환 관계를 구하여 ENU 좌표계에 대해 계산된 위치를 재변환하였다. 그림 4에서 X축은 도깨비 도로의 길이 방향, Y축은 너비 방향을 나타낸다. 이동 횟수에 따라 서로 다른 궤적 형태를 보이고 있는데 이는 횟수에 따라 서로 다른 형태로 차량이 이동했기 때문이다. 그림 5는 길이 방향에 대한 차량의 수직 궤적을 보이고 있다. 도깨비 도로의 높이는 너비 방향에 거의 무관하고 길이 방향에 대해서만 변하기 때문에 각 실험에 의해 생성된 수직 궤적

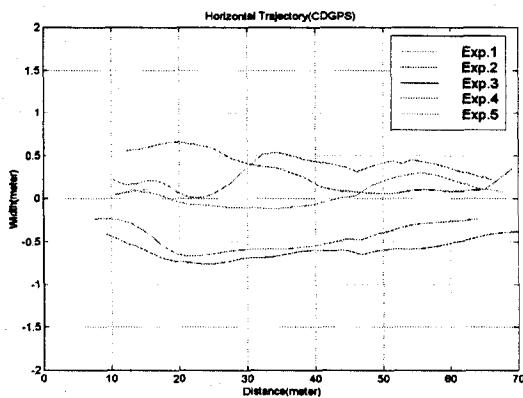


그림 4. 도깨비 도로 수평 궤적
Fig. 4. Horizontal trajectory of moving vehicle.

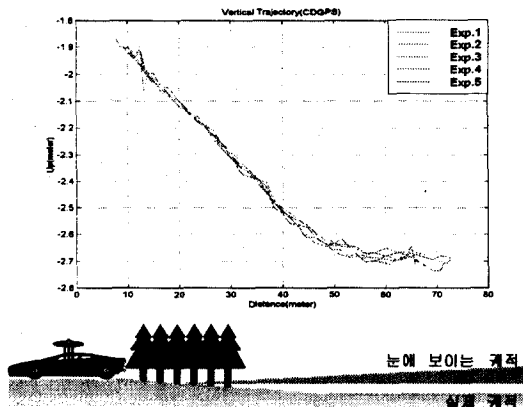


그림 5. 도깨비 도로 수직 궤적
Fig. 5. Vertical trajectory of Dokaebi road.

은 거의 같다.

그림 6과 그림 7은 각각 이동 차량 및 도깨비 도로 기준점에서 측정된 반송파 위상 데이터를 그린 것이다. 제주도 도깨비 도로변에는 가로수가 많기 때문에 이동 차량에 탑재된 안테나가 GPS 신호로부터 차단될 때마다 사이클 슬립이 발생하므로 그림 6에서는 불연속점이 많지만 기준점에 설치된 안테나는 이러한 영향을 받지 않아 사이클 슬립이 발생하지 않으므로 그림 7과 같은 연속적인 곡선이 생성된다[1].

그림 5에서의 아래 그림은 눈으로 보이는 궤적과 실제 궤적을 비교한 것이다. 그림 5에서 반송파 보정 위성 항법 시스템으로 계산한 수직 궤적은 내리막길 형태를 지님을 알 수 있으며 경사도는 약 0.9°

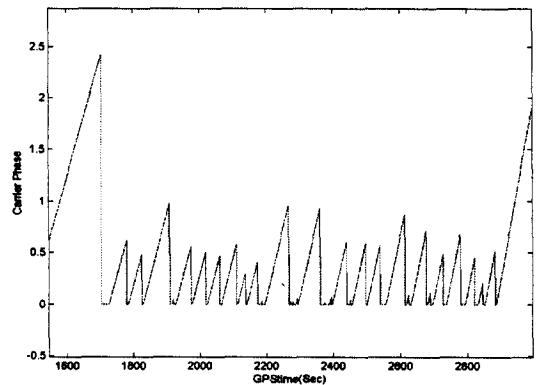


그림 6. 이동 차량에서 측정된 반송파 위상
Fig. 6. Carrier phase measurement of moving vehicle.

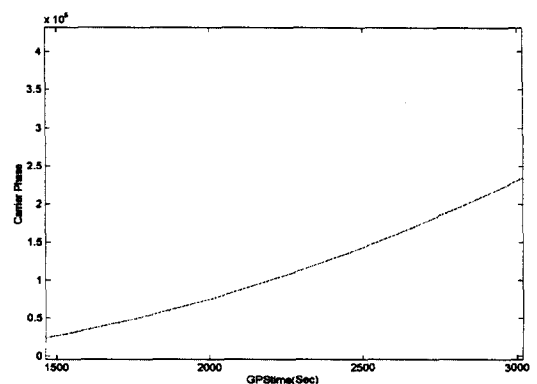


그림 7. 기준점에서 측정된 반송파 위상
Fig. 7. Carrier phase measurement of reference station.

이다. 그림 5에서 후반부의 수직 궤적들간의 차이가 전반부보다 증가함을 알 수 있다. 이는 도깨비 도로의 전반부에는 가로수가 별로 없었지만 후반부에는 가로수가 많아서 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio : SNR)의 감소로 인한 위치 오차가 증가하였기 때문이다. 각 수직 궤적의 차이가 cm 수준이므로 cm 수준의 위치 정확도로 궤적이 생성되었음을 알 수 있다.

V. 결 론

지금까지 3대의 GPS 수신기를 사용하여 제주도 도깨비 도로의 정밀 측위를 수행하였다. 도깨비 도로를 따라 이동하는 차량의 시간에 따른 정밀 위치를 계산하여 궤적을 생성한 결과 cm 수준의 위치 정확도를 얻을 수 있었다. 차량의 출발점 부근에는 가로수가 적었기 때문에 각 실험에서의 수직 위치 차이가 거의 없지만 도로 중간부분부터 가로수가 많아져서 신호 강도 감소로 인한 잡음의 증가로 인해 각 수직 궤적간의 벌어지는 간격이 처음보다 증가하였다.

본 실험을 통해 도깨비 도로를 정밀 측위한 결과 눈에 보기에는 오르막길처럼 보이지만 실제로는 경사각 약 0.9°의 내리막길임을 알 수 있었고 이는 차량의 운동 방향과도 일치하였다. 이로부터 제주도 도깨비 도로는 신비의 도로가 아님을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Changdon Kee and etc., Quality Control Algorithms on WAAS Wide-Area Reference Stations, *Journal of The Institute of Navigation*, vol. 44, no. 1, Spring, 1997.
- [2] P. J. G. Teunissen, P. J. de Jonge and C. C. J. M. Tiberius, Performance of the LAMBDA Method for Fast GPS Ambiguity Resolution, *Journal of The Institute of Navigation*, vol. 44, no. 3, pp 373-383, 1997.
- [3] P. J. G. Teunissen, P. J. de Jonge and C. C. J. M. Tiberius, The least-squares ambiguity decorrelation adjustments: its performance on short GPS baselines and short observation spans, *Journal of Geodesy*, 1997.
- [4] Elliott D.Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, 1996.
- [5] Alfred Leick, *GPS Satellite Surveying*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1995.
- [6] 김정한, 기창돈, GPS 반송파 위상을 이용한 동적 정밀 측위, 98 GPS Workshop 논문집, pp. 735-739, 1998.
- [7] 김정한, GPS 반송파 위상을 이용한 정밀 측위, 서울대학교 공학석사학위논문, 1999.

기창돈(奇昌敦)



1984년 : 서울대학교 항공공학과
(공학사)
1986년 : 서울대학교 항공공학과
(공학석사)
1989년 : 미국 스탠포드 대학 항
공우주공학과(공학석사)
1994년 : 미국 스탠포드 대학 항

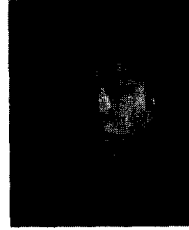
공우주공학과(공학박사)

1994년 : 미 연방 항공국(FAA)에서 광역 보정 위성 항
법 시스템에 관한 기술고문 담당

현재 : 서울대학교 항공우주공학과 조교수 및 한국 공항
공단 CNS/ATM 분야 기술 고문.

관심분야 : 광역 보정 위성 항법 시스템, 지역 보정 위
성 항법 시스템, 반송파 보정 위성 항법 시스템, GPS
를 이용한 항체의 자세 결정, 한국형 전리층 지연 모
델 개발

김정환(金柱翰)



1997년 : 서울대학교 항공우주공
학과(공학사)
1999년 : 서울대학교 항공우주공
학과(공학석사)
현재 : 서울대학교 항공우주공학
과 GPS 실험실 박사과정
관심분야 : CDGPS를 이용한 정

밀 측위