

저비용 GNSS 수신기를 이용한 반송파 위상 시각간 차분 측정치 기반의 정밀 상대위치 결정 기법

박귀우*, 이동선*, 박찬식^o

A Precise Relative Positioning Method Based on Time-Differenced Carrier Phase Measurements from Low-Cost GNSS Receiver

Kwi-Woo Park*, DongSun Lee*, Chansik Park^o

요 약

본 논문에서는 저비용 단일 GNSS(Global Navigation Satellite System) 수신기를 이용하여 정밀한 위치를 추정하는 방법으로 반송파 위상 TD(Time Differenced) 측정치를 이용한 상대위치 결정기법을 제안하고 성능을 분석하였다. 제안하는 상대위치 결정기법은 반송파 위상 측정치를 활용하지만 시각 간 차분을 사용하므로 하나의 GNSS 수신기로 동작하며, 미지정수 결정 문제를 고려하지 않아도 된다. 또한 차분 간격이 짧은 시간일 경우 공간적 공통오차 및 위성시계 오차를 효율적으로 제거할 수 있다. 제안하는 위치결정 알고리즘은 오차해석을 통해 코드측정치를 이용한 절대위치 결정기법보다 성능이 우수함을 증명하고 실차 실험으로 구현된 알고리즘 및 오차해석 결과를 검증하였다. 그 결과, 위치추정 성능은 약 10분 동안 3m이내에 수렴하여 코드기반의 절대위치기법에 비하여 약 4배 이상 향상된 정확도 및 정밀도를 확인할 수 있었다.

Key Words : single-GNSS, relative positioning, time-differenced, error analysis

ABSTRACT

In this paper, a precise relative positioning with TD(time differenced) carrier phase measurements from a low-cost GNSS(Global Navigation Satellite System) receiver is proposed and analysed. The proposed method is using carrier phase measurement from a single GNSS receiver that reference receiver is not required and stand alone positioning is possible. TD operation removes the troublesome integer ambiguity resolution problem, and if the time interval is short, other error, such as, ionospheric, tropospheric delay and ephemeris error are effectively eliminated. The error analysis of the proposed method shows that a precise and positioning with carrier phase is possible. The implemented system is evaluated using a real car experiments. The results show that the horizontal positioning error was less than 3m during 10 minutes experiments, which is 4 times more precise than the results of normal code based absolute positioning.

* 이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

• First Author : Chungbuk National University Department of Control and Robotics Engineering, zumbox@cbnu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Chungbuk National University Department of Electronics Engineering/Research Institute for Computer and Information Communication, chansp@cbnu.ac.kr, 정회원

* Chungbuk National University Department of Control and Robotics Engineering

논문번호 : KICS2015-07-222, Received July 15, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 25, 2015

I. 서 론

위성을 이용하여 절대위치를 추정할 수 있는 GNSS(Global Navigation Satellite System)는 자율주행 자동차, 운전자 보조 시스템, 위치기반 서비스 등의 활발한 연구로 민간의 수요가 급격히 증가하고 있다. 해양에서는 선박의 위치와 정밀한 자세를 추정하기 위하여 GNSS를 활용한다^{1,2)}. 최근 많이 연구되고 있는 드론(Drone)이나 로봇의 자율이동도 절대위치를 제공하는 GNSS를 활용하고 있다^{3,4)}. 다양한 분야에서 GNSS의 수요가 높아짐에 따라서 각각의 분야에서 요구하는 GNSS의 정확도 및 정밀도 역시 높아지고 있다. 특히, 자율주행 자동차 및 운전자 보조시스템과 같은 자동차 분야에서는 차선을 구분할 수 있는 1.5m의 정확도를 요구한다⁴⁾. 그러나 하나의 GNSS 수신기를 활용하여 다양한 분야에서 요구하는 성능의 위치정보를 제공하기는 어렵다^{5,6)}.

GNSS의 성능을 보완하기 위하여 다양한 센서와 융합하거나 하나 이상의 GNSS 수신기를 이용한다. 대표적으로 GNSS와 IMU(Inertial Measurement Unit)를 융합한 사례가 있다⁷⁾. GNSS와 IMU를 융합하면 GNSS의 느린 출력속도(1~20Hz)를 IMU(100Hz)로 보완하고, IMU의 단점인 누적오차를 GNSS로 보완 할 수 있다. 그러나 두 센서를 융합할 경우 정밀도는 증가하지만 정확도는 GNSS에 의존적이다. 정확도를 향상시키기 위하여 카메라, LIDAR⁸⁾, 무선 네트워크⁹⁾, 실내 Wireless AP(Access Point)의 RSSI(Received Signal Strength indication)¹⁴⁾ 등을 활용한다.

GNSS를 이용하여 정확도 및 정밀도를 향상시키는 또 다른 방법은 DGPS(Differential Global Positioning System)를 구축하는 것이다. 위치를 알고 있는 지점에 수신기를 설치하면 전리층 및 대류층 지연오차를 추정할 수 있다. 추정된 오차를 위치계산이 필요한 수신기에 전달하면 의사오차를 보정하고 위치정확도를 향상시킬 수 있다. 또한 반송파 위상 측정치를 활용한 RTK(Real-time Kinematic)는 cm단위의 오차를 갖는 정밀한 위치정보를 추정한다²⁾. 그러나 DGPS는 수신기의 비용이 증가하고 10km이내에 오차 보정치를 추정하는 기준국을 필요⁶⁾로 하며 수신기간의 별도의 통신채널이 요구된다. 뿐만 아니라 반송파 측정치를 활용하기 위해서는 미지정수 문제^{7,10)}를 해결해야 한다. 이와 같은 문제로 인하여 DGPS는 적용될 수 있는 분야가 매우 제한적이다. 다양한 분야에 GNSS가 적용되기 위해서는 한 대의 수신기를 이용한 정밀한 위치

를 추정방법 연구가 필요하다.

단일 수신기를 이용하여 정밀한 위치를 추정하는 방법으로 측정치의 시각 간 차분(TD, Time Differenced)을 활용하는 방법이 있다. 일반적으로 시각 간 차분을 할 경우 반송파 위상 측정치의 미지정수를 쉽게 제거할 수 있지만 위성변화에 민감하다는 단점이 있어 많이 활용되지 않았다¹¹⁾. 그러나 최근 몇 가지 사례를 보면 반송파 위상 시각 간 차분 측정치를 활용하면 매우 정밀한 결과를 하나의 수신기를 이용하여 얻을 수 있음을 알 수 있다. 독일의 뮌헨 대학에서는 반송파 위상의 시각 간 차분을 통해 항공기의 정밀한 비행궤적을 추정하였다^{6,12)}. 이 연구에서는 제안하는 알고리즘은 최소자승법을 통해 계산한 위치 변화량이 최소가 될 때까지 반복하는 방법을 제안하였다. 영국의 노팅엄 대학에서도 반송파 위상의 시각 간 차분을 이용하여 선박의 고도변화량을 정밀하게 추정하였다¹¹⁾. 이 사례는 반송파 위상 측정치를 이용하여 시각 간 차분과 위성 간 차분을 통해 선박의 3차원 위치변화를 추정한다. 수신기의 시계오차를 보정하기 위하여 위성 간 차분이 추가되며 특히 선박의 고도 변화량 추정을 목표로 한다.

본 논문에서는 하나의 수신기를 이용한 정밀한 위치추정 방법으로 반송파 위상 시각 간 차분 측정치 기반의 상대위치 결정기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 앞서 소개한 독일의 뮌헨대학의 방법과 달리 반복계산을 하지 않는 장점이 있다. 또한 노팅엄 대학의 사례와 달리 시각 간 차분만으로 위치추정치와 수신기 시계오차 변화량을 추정하기 때문에 연산이 단순하다. 제안하는 방법이 단일 수신기에서 일반적으로 사용되는 코드측정치를 이용한 절대위치 추정기법 보다 우수함을 확인하기 위하여 오차해석과 실험을 통한 오차를 분석을 수행하였다. 실제 데이터는 차량에 RTK GPS 시스템, 저비용 GNSS 수신기를 설치하여 정지 및 주행상황에서 취득하였다. 취득한 데이터에 제안하는 알고리즘을 적용하여 결과를 확인 및 분석하였다.

본 논문은 총 4개의 절로 구성하였다. 1절에서는 반송파 위상 TD 측정치 모델을 정의하였다. 2절에서는 측정치 모델을 이용하여 위성의 위치변화량과 시계오차 변화량을 추정하는 알고리즘을 서술하였다. 3절에서는 제안하는 상대위치 결정방법의 오차를 이론적으로 해석하고 4절에서는 자율주행자동차를 이용한 실험결과를 오차해석 결과와 함께 분석하였다.

II. 본 론

2.1 반송파 위상 TD 측정치

반송파 위상 측정치는 일반적으로 식(1)과 같이 표현된다^[6,11].

$$\Phi^i(t) = r^i(t) - c(B(t) - B^i(t)) + \lambda N^i(t) + I^i(t) + T^i(t) + v^i(t) \quad (1)$$

임의의 시각 t 에 위성 i 와 수신기간의 반송파 위상의 측정치 Φ^i 는 실제 거리 r 에 오차가 포함된 형태이다. 반송파 위상 측정치의 오차 성분은 수신기시계 오차 B , 위성의 시계오차 B^i , 미지정수 N , 전리층 지연 오차 I , 대류층 지연오차 T 그리고 잡음 v 로 구성된다. 여기서 λ 는 GNSS 신호의 파장을 의미한다. 시각 간 차분은 현재시각 t_2 와 이전시각 t_1 에서 얻은 반송파 측정치의 차이 $\Phi^i(t_1, t_2) = \Phi^i(t_2) - \Phi^i(t_1)$ 로 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Phi^i(t_1, t_2) &= r^i(t_1, t_2) - c(B(t_1, t_2) \\ &- B^i(t_1, t_2)) + \lambda N^i(t_1, t_2) + I^i(t_1, t_2) \\ &+ T^i(t_1, t_2) + v^i(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로 DGPS에서는 기준국과 수신기간 차분으로 전리층 및 대류층 오차를 제거하고 미지정수를 추정한다. 미지정수 추정방법은 LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorelation Adjustment)^[7,10] 기법이 대표적이다. LAMBDA는 정수의 제약조건으로 검색을 통해 미지정수를 결정하여 계산량이 많다.^[7] 그러나 반송파 위상 TD 측정치에서는 사이클 슬립이 발생하지 않는다면 미지정수는 $N^i(t_1, t_2) = 0$ 이 되어 쉽게 제거할 수 있다.^[6,7] 또한 현재시각과 이전시각의 차이가 크지 않다면 전리층, 대류층, 위성시계 오차의 차분도 0에 가깝다^[7]. 따라서 시각 간 차분의 측정치는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi^i(t_1, t_2) = r^i(t_1, t_2) - cB(t_1, t_2) + v^i(t_1, t_2) + \gamma^i \quad (3)$$

식(3)은 미지정수가 제거되고 전리층, 대류층, 위성시계 오차의 시각 간 차분 후 남은 잔류오차 γ^i 로 구성된다. 잔류오차는 일반적으로 잡음 v 에 포함되지만

해석을 위하여 별도로 표기하였다. 본 논문에서 잔류오차는 상대위치 결정방법 유도과정에서 0으로 가정한다. 그리고 잔류오차에 의한 영향은 실제 데이터를 이용한 실험결과 통해 확인한다.

2.2 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법

이번 장에서는 앞 장에서 유도한 반송파 위상의 시각 간 차분 측정치를 이용하여 상대위치 결정방법에 대하여 서술한다. n 개의 위성이 존재할 때 취득한 반송파 위상의 시각 간 차분 측정치는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{TD} = \begin{bmatrix} \Phi^1(t_1, t_2) \\ \Phi^2(t_1, t_2) \\ \vdots \\ \Phi^n(t_1, t_2) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Phi^1(t_1) \\ \Phi^1(t_2) \\ \Phi^2(t_1) \\ \Phi^2(t_2) \\ \vdots \\ \Phi^n(t_1) \\ \Phi^n(t_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 S 는 차분연산자로 식(5)와 같다.

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

각 위성의 시각 간 차분 측정치는 다시 식(6)으로 나타낸다.

$$\Phi_{TD} = S \begin{bmatrix} r^1(t_1) \\ r^1(t_2) \\ r^2(t_1) \\ r^2(t_2) \\ \vdots \\ r^n(t_1) \\ r^n(t_2) \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} B(t_1, t_2) \\ B(t_1, t_2) \\ \vdots \\ B(t_1, t_2) \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} v^1(t_1) \\ v^1(t_2) \\ v^2(t_1) \\ v^2(t_2) \\ \vdots \\ v^n(t_1) \\ v^n(t_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

현재시각 t_2 에서 수신기의 위치를 추정하기 위해서는 t_2 에서의 위성과 수신기간의 거리가 필요하다. 측정치는 시각 간 차분 값이므로 t_2 에서의 위성과 수신기간 거리는 t_1 에서의 위치 $u(t_1) = [x(t_1) \ y(t_1) \ z(t_1)]$ 을 기준점으로 선형화함으로써 식(7)로 유도할 수 있다. 여

기서 $h_i = \left[\frac{\partial r^i}{\partial x} \quad \frac{\partial r^i}{\partial y} \quad \frac{\partial r^i}{\partial z} \right]$, $\delta u = [\delta x \quad \delta y \quad \delta z]$ 이다.

$$r^i(t_2) = r^i(t_1) + h_i \delta u \quad (7)$$

h_i 를 t_2 의 위성위치 $[X(t_2) \ Y(t_2) \ Z(t_2)]$ 와 t_1 의 수신기 위치로 표현 하면 식(8)과 같다.

$$h_i = \left[\frac{X(t_2) - x(t_1)}{\hat{r}(t_1)} \quad \frac{Y(t_2) - y(t_1)}{\hat{r}(t_1)} \quad \frac{Z(t_2) - z(t_1)}{\hat{r}(t_1)} \right] \quad (8)$$

식(8)에서 $\hat{r}(t_1)$ 은 현재시각 t_2 의 위성위치와 이전 시각 t_1 의 수신기 위치간의 거리를 의미한다. t_1 에서 계산된 위치정보를 이용하여 t_2 의 거리를 구할 수 있지만 초기에는 위치정보 $u(t_0) = [x(t_0) \ y(t_0) \ z(t_0)]$ 가 주어져야한다. 미지수에 수신기의 시계오차 변화량 $cB(t_1, t_2)$ 를 추가하여 h_i 함께 표현하면 n 개의 위성이 존재할 때 반송파 위상 TD 측정치는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{TD} &= \begin{bmatrix} h_1 & 1 \\ h_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ h_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ cB(t_1, t_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(t_1, t_2) \\ v(t_1, t_2) \\ \vdots \\ v(t_1, t_2) \end{bmatrix} \\ &= G \begin{bmatrix} \delta u \\ cB(t_1, t_2) \end{bmatrix} + V_{TD} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 추정해야할 값은 δu 와 $cB(t_1, t_2)$ 로 총 4개의 미지수로 구성된다. 4개 이상의 측정치가 존재할 때 식(10)의 가중최소자승법(Weighted Least-Square)을 이용하면 위성위치의 변화량과 수신기 시계오차 변화량을 추정할 수 있다. 노팅엄 대학에서는 수신기 시계오차 변화량 $cB(t_1, t_2)$ 을 위성 간 차분을 통해 제거하지만 제안하는 방법에서는 최소자승법을 통해 추정함으로써 연산을 단순화 하였다. 여기서 4개의 측정치는 두 에폭(epoch)이상 연속적으로 존재하여 TD 측정치를 제공할 수 있는 위성이 4개 이상임을 의미한다. 만약 신호수신 채널의 상태가 좋지 않아 가시위성의 배치가 쉽게 변하는 환경이라면 위치를 추정하지 못할 확률이 높아진다. 이와 같은 단점으로 시각 간 차분을 할 경우 일반적인 절대위치 방법보다 위성상태에 민감한 방법으로 알려져 있다.^[11]

$$\begin{bmatrix} \delta u \\ cB(t_1, t_2) \end{bmatrix} = (G^T Q_{TD}^{-1} G)^{-1} G^T Q_{TD}^{-1} \Phi_{TD} \quad (10)$$

식(10)에서 Q_{TD}^{-1} 은 각 측정치의 가중치에 해당되며 그 결정과정은 오차해석에서 서술한다. 최종 위치 결과는 초기위치와 매 시각 추정된 위치의 변화량 δu 를 누적하여 계산할 수 있다.

앞서 유도한 반송파 위상의 TD 측정치를 이용한 상대위치 추정방법을 구현하여 실제 데이터에 적용하기 위해서는 두 가지 사항을 고려해야 한다. 먼저 초기 위치정보가 주어져야 한다. 초기 위치정보에서 위치변화량을 누적하기 때문에 최종 위치의 정확도는 초기 위치정보의 성능에 의존한다. 본 논문에서 초기 위치는 다른 위치결정 시스템으로부터 제공받는다. 두 번째로 연산과정에서 반송파 위상 측정치를 차분하기 위하여 동일한 위성이 2번 이상 연속적으로 존재해야 한다. 만약 2번 이상의 측정치가 존재하는 위성이 4개 이상 존재하지 않는다면 위치추정은 불가능 하다. 두 가지 사항을 고려하여 구현한 반송파 위상 TD 기반의 상대위치 결정기법은 의사코드도 그림 1에 표시하였다.

상대위치 결정기법 과정을 보면 먼저 정밀한 다른 위치결정 방법으로부터 초기 위치를 얻는다. 별도의 초기위치 추정방법이 없다면 코드기반의 절대위치 추정기법을 통해 초기위치를 추정한다. 그 다음 GNSS 수신기로부터 각 위성의 위치정보와 의사거리를 취득한다. 만약 이전시각의 위성배치와 현재 시각의 위성배치가 동일하다면 반송파 위상 TD 측정치를 생성하고 위치변화량을 추정한다. 이전 시각에 결정된 위치에 현재 시각에서 추정된 위치변화량을 적용하여 현재 시각의 위치를 계산한다. 만약 위성배치가 동일하지 않다면 두 시각에 동시에 존재하는 위성을 탐색한다. 탐색된 위성이 4개 이상이라면 반송파 위상 TD

Algorithm 1 A relative positioning algorithm using TD

- 1: *top*;
- 2: Initialize position from RTK or other system
- 3: *loop*;
- 4: Acquire GPS raw data; range and SV position
- 5: **if** PRN list of 2 epoch are same **then**
- 6: **goto** positioning
- 7: **else**
- 8: Find common SV between 2epoch
- 9: **if** number of SV >= 4 **then**
- 10: **goto** positioning
- 11: **else**
- 12: **goto** top
- 13: **end if**
- 14: **end if**
- 15: *positioning*;
- 16: Build TD measurement as in eq(6)
- 17: Build measurements eq(9)
- 18: Find position using WLSQ, eq(10) and eq(12)
- 19: **goto** loop

그림 1. TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법 알고리즘
Fig. 1. A relative positioning algorithm using TD

측정치를 생성하여 위치변화량 추정이 가능하다. 그러나 동시에 존재하는 위성이 4개 이하라면 위치추정은 어렵다. 이 경우에는 다시 다른 시스템으로부터 위치 정보를 제공받아야 한다.

2.3 오차해석

반송파 위상 측정치를 이용한 상대위치 결정법의 오차특성을 확인하기 위하여 오차해석을 수행하였다. 앞서 2절의 식(10)의 가중치 행렬 Q_{TD} 는 각 반송파 위상 TD 측정치의 공분산으로 결정된다. 만약 각 위성의 반송파 위상 측정치의 잡음이 평균0, 공분산이 σ_ϕ^2 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이라면 TD 측정치의 평균도 0, 공분산은 식(11)로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} cov(V_{TD}) &= Scov(v)S^T \\ &= \sigma_\phi^2 SS^T = Q_{TD} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $v = [v^1(t) \ v^2(t) \ \dots \ v^n(t)]$ 는 차분되지 않은 반송파 위상 측정치의 오차를 의미하며 수신기의 각 위성에 대한 채널 특성이 같다면 공분산은 $cov(v) = \sigma_\phi^2 I_{n \times n}$ 임을 이용하였다. 이때 TD 측정치의 공분산에서 SS^T 는 단위행렬임을 알 수 있다. 이 사실을 이용하면 위치변화량 및 수신기 시계변화량의 공분산은 식(12)로 나타난다.

$$\begin{aligned} cov\left(\begin{bmatrix} \delta u \\ cB(t_1, t_2) \end{bmatrix}\right) &= (G^T Q_{TD}^{-1} G)^{-1} \\ &= 2\sigma_\phi^2 (G^T G)^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)를 보면 반송파 위상 측정치의 오차 공분산 σ_ϕ^2 가 2배로 증가함을 알 수 있다. 코드 측정치를 이용한 절대위치 결정방법의 오차공분산은 식(13)과 같다. 이때 G_ψ 는 코드측정치를 이용한 절대위치 결정방법에서 잘 알려진 위성과 수신기사이의 시선 각 벡터로 이루어진 행렬이다.

$$cov\left(\begin{bmatrix} \delta u \\ cB \end{bmatrix}\right) = \sigma_\psi^2 (G_\psi^T G_\psi)^{-1} \quad (13)$$

일반적인 수신기에서 반송파 위상의 표준편차는 $\sigma_\phi \approx 2mm$ 이고 코드측정치의 표준편차는 $\sigma_\psi \approx 1.5m$ 이다.^[13] 이 사실을 고려하면 반송파 위상의 시각 간

차분을 이용한 방법이 코드측정치를 이용한 절대위치 결정법과 비교하여 매우 정밀한 위치결정 방법임을 알 수 있다. 그러나 정확도 관점에서는 초기위치에 의해 큰 영향을 받기 때문에 만약 코드측정치 기반의 위치결정법으로 초기위치를 결정한다면 정확도는 큰 차이가 없다. 오차해석 결과를 검증하기 위하여 다음 절에서는 실제데이터 취득 및 후처리를 통해 제안하는 상대위치 결정기법을 적용하고 그 결과를 분석한다.

2.4 실험 및 분석

2.4.1 실험환경 및 실험방법

제안하는 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정방법의 실제 성능을 확인하기 위하여 실제 차량에 RTK를 구축하고 저비용 수신기를 설치하였다. 데이터 취득환경은 그림 2와 같다. RTK는 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정방법의 오차를 계산하기 위한 용도와 초기위치를 제공하는 용도로 활용하였다. RTK를 구축하기 위하여 NovAtel ProPak-V3 수신기를 이용하여 충북대학교 교육관(E10)건물 옥상에 기준국을 설치하였다. 기준국에서 추정한 오차보정치를 차량으로 전달하기 위하여 별도의 RF 송수신기를 기준국과 차량에 각각 설치하였다. 차량에는 NovAtel FlexPak-V2 수신기를 설치하여 고정밀의 위치결정을 수행한다.

차량에는 저비용 수신기로 Ublox EVK-6T 두 개를



그림 2. 실험환경
Fig. 2. Experiments environment

설치하였다. 첫 번째 Ublox EVK-6T 수신기는 원시데이터를 취득한다. 원시데이터에는 위성의 궤도력 정보, 코드 측정치, 반송파 위상 측정치 등이 포함된다. 이 정보를 활용하여 후처리를 통해 제안하는 상대위치 결정법을 적용하였다. 다른 저비용 수신기를 이용하여 NMEA(National Marine Electronics Association)형식의 정보를 수집한다. Ublox EVK-6T는 내부의 알고리즘을 이용하여 코드측정치 기반의 절대위치를 추정 후 NMEA형태로 결과를 출력한다. 출력된 NMEA정보를 이용하여 일반적으로 사용되는 수신기의 절대위치 추정방법의 위치추정 결과를 수집하였다. 이 결과는 제안하는 상대위치 결정방법과 그 성능을 비교하는데 활용하였다. 실험에 사용되는 3가지 수신기의 측정치는 모두 1Hz의 출력속도로 데이터를 출력한다.

실험은 두 가지 방법으로 진행하였다. 먼저 첫 번째 실험은 정지 상태에서 약 10분간 GNSS 수신기를 이용하여 데이터를 수집하였다. 이 실험을 통해 제안하는 상대위치 결정 방법의 정밀도를 측정하고 코드기반의 절대위치 결정 방법과 그 성능을 비교하였다. 또한 정지상태의 위치결정 결과를 바탕으로 제안하는 상대위치 결정방법의 오차특성을 확인 및 분석하였다. 두 번째 실험은 약 2분간 8자 코스를 1회를 주행하면서 GNSS 수신기를 이용해 데이터를 수집하였다. 이 실험을 통해 주행계획의 정확도를 측정하였으며 코드기반의 절대위치 결정방법과 결과를 비교하였다. 두 가지 실험을 수행한 위성환경은 그림 3과 같이 6개의 위성이 배치되어 있었다.

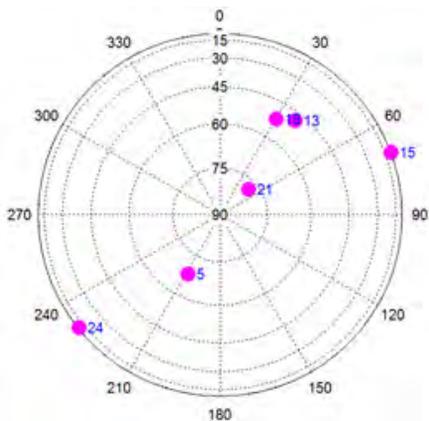


그림 3. 위치추정에 활용된 GPS 위성의 배치상태
Fig. 3. GPS satellite status

2.4.2 정지 상태 위치결정 결과 및 해석

그림 4는 정지 상태로 약 10분간 취득한 데이터를 이용하여 위치결정을 수행한 뒤 위치의 오차를 표시한 것이다. 오차는 RTK를 이용하여 추정된 결과를 참값으로 두고 계산하였다. 그림에서 파란색 원은 RTK를 이용해 추정된 위치를 기준으로 4m 반경을 표시한 것이다. 백색 점선은 제안하는 상대위치 결정기법을 이용하여 추정된 위치의 오차를 표시한 것이다. 검은색 점선은 저비용 수신기에서 계산한 코드측정치 기반의 절대위치 결정기법의 결과이다.

두 방법 모두 RTK로 추정된 정확한 초기위치를 이용함으로써 동일한 조건에서 정밀도를 분석하였다. 그 결과를 표 1에 수치로 나타내었다. 반송파 위상 TD 측정치를 이용하여 상대위치 결정기법으로 위치를 추정할 때 약 1.5m의 평균오차가 나타나며 표준편차는 0.87m로 나타난다. 반면 코드기반의 절대위치 결정기법은 평균오차는 약 5.3m이며 표준편차는 2.79m이다. 4절에서 서술한 오차해석결과와 같이 코드기반의 위

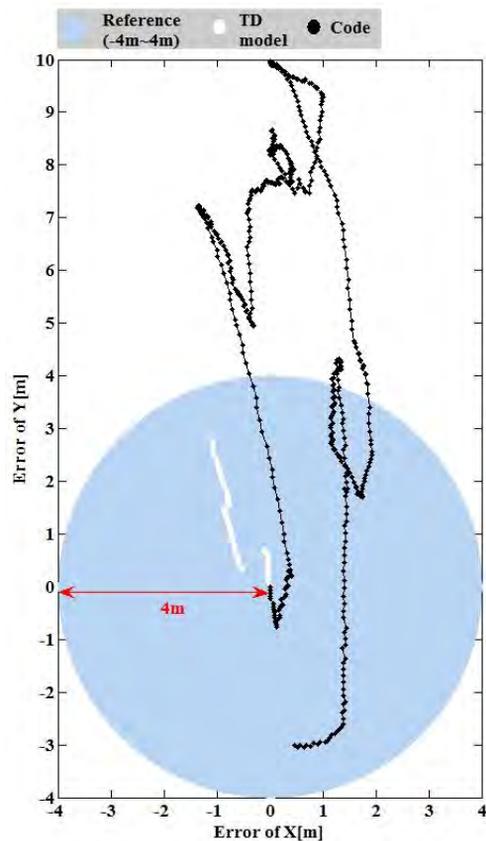


그림 4. 정지 상태에서 추정된 위치의 오차
Fig. 4. Error of estimated position when vehicle is stopped

표 1. 제안하는 방법과 절대위치결정 기법의 위치 정밀도
Table 1. The precision of position comparison between TD and code model.

	TD based relative positioning	Code based absolute positioning
Mean error[m]	1.51	5.37
standard deviation[m]	0.87	2.79
Maximum error[m]	3.07	9.97

치결정법 보다 TD를 이용한 방법이 4배 이상 정밀한 방법임을 확인할 수 있다. 그러나 오차공분산이 2mm의 2배로 나타나는 오차해석 결과와 달리 m단위의 큰 오차가 나타난다.

실험결과를 분석하여 추가적인 오차요인을 확인하였다. 그림 4를 보면 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법의 오차형태가 크게 두 가지 형태로 나타남을 확인할 수 있다. 첫 번째 오차형태는 편류오차(Drift error)로 초기위치에서 같은 방향으로 오차가 일정하게 증가한다. 두 번째 오차형태는 갑자기 오차증가방향이 바뀌는 부분에서 나타난다. 이와 같은 형태의 오차는 반송파 위상 측정치를 사용하는 위치결정 시스템에서 사이클 슬립(cycle slip)이 발생할 경우 나타난다. 사이클 슬립 발생여부를 확인하기 위하여 해당지점(150~170 epoch)에서 반송파 위상의 변화량을 확인하였다.

그림 5를 보면 159번째 에폭에서 두 위성의 반송파 위상 변화량이 일정하지 않음을 확인할 수 있다. 이 값이 약 19.03cm일 경우 사이클 슬립이다. 사이클 슬립의 경우 반송파 위상의 측정치가 L1 반송파 주파수의 한 파장만큼 오차가 발생한다. 그림 5의 위성13번

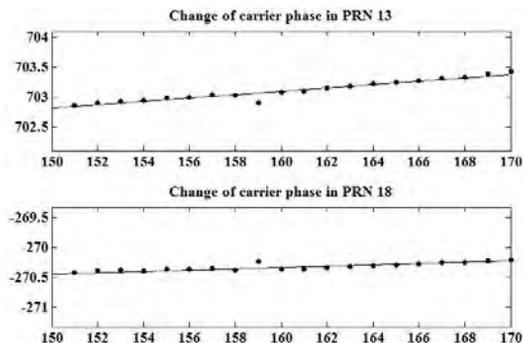


그림 5. 슬립이 발생한 두 위성의 반송파 위상 변화량
Fig. 5. Carrier phase of satellites with cycle slip

과 18번은 19.03cm에 가까운 값만큼 변화했으며 사이클 슬립이 발생함을 확인할 수 있다. 앞서 반송파 위상 TD 측정치 모델을 정의할 때 사이클 슬립을 고려하지 않았기 때문에 오차해석에서 분석한 오차보다 큰 오차가 발생하였다. 사이클 슬립은 반송파의 변화량이 일정하지 않은 부분(Outlier)을 감지함으로써 제거할 수 있다^[2]. 사이클 슬립이 발견된 159번 에폭의 측정치를 제거한 후 위치추정 결과를 다시 확인하였다. 그림 6의 결과를 보면 위치가 급격하게 변화하는 구간이 제거된 것을 확인할 수 있다.

사이클 슬립에 의한 오차를 보상해도 편류 오차가 그림 7과 같이 나타난다. 그림 7은 위치오차의 크기를 RMS(Root mean square)로 나타낸 것이다. 오차가 약 10분 동안 일정한 기울기로 증가함을 알 수 있다. 증가량을 분석해 보면 약 1초당 0.005m씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 약 10분이 지나면 3m정도의 누적 오차가 발생한다. 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정방법의 경우 이전 위치결과의 현재 위치변화량 추정치를 더하기 때문에 발생한 오차는 계속 누적되는 형태로 나타난다.

누적되는 값은 반송파 측정치 잡음뿐만 아니라 전리층, 대류층, 위성시계 오차의 잔류오차 γ 에서도 나타날 수 있다. 앞서 반송파 위상 TD 측정치를 정의할 때 시각차가 짧다면 차분을 통해 전리층, 대류층 및 위성시계 오차가 제거된다고 가정하였고 식(3)의 γ 를 0으로 두고 오차를 해석하였다. 그러나 실제로는 미세한 잔류오차가 존재하며 이 값은 시간이 지날수록 누적되며 편류오차로 나타나게 된다.^[6] 또한 저비용 수신기는 수신기 내부의 시계가 매우 부정확하기 때문

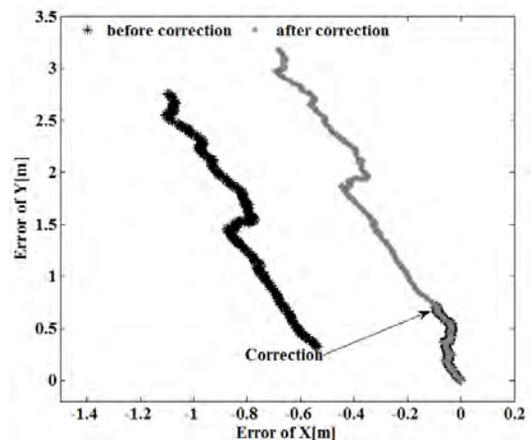


그림 6. 사이클 슬립 보정 후 위치추정 결과
Fig. 6. The estimated position after cycle slip correction

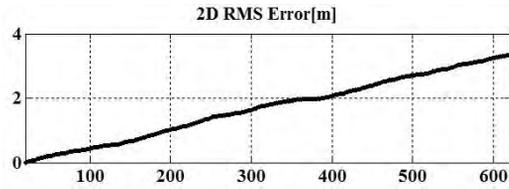


그림 7. 위치오차의 크기 변화
Fig. 7. RMS error

에 이 문제로 인해 오차가 더 크게 발생할 가능성이 있다. 정지 상태의 실험 결과를 요약하면 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정법은 사이클 슬립에 의한 오차와 차분 후 남은 잔류오차에 의한 편류오차가 발생함을 확인하였다.

2.4.3 주행 상태 위치결정 결과 및 분석

주행궤적의 정확도를 확인하기 위하여 약 2분 동안 8자 형태 코스를 주행하였다. 그림 8에서 파란색 영역은 주행코스를 기준으로 $\pm 2.5m$ 까지 표시한 것으로 만약 위치결과가 파란영역을 넘지 않을 경우 2.5m이내의 정확도로 측정됨을 알 수 있다. 백색 점선은 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법으로 위치를 추정한 결과이며 검은색 점선은 저비용 수신기에서 계산한 코드 측정치를 이용한 절대위치 결정기법의 결과이다. 그림 8에서 위치는 ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) 좌표계로 표시하였다.

실험결과를 분석해보면 출발지점의 초기위치정보는 RTK정보를 활용하였기 때문에 두 가지 방법 모두 동일하다. 백색 점선은 파란색 영역 중심 주변위치를 추정하는 반면 검은색 점선은 파란색 영역을 수시로 벗어나는 모습을 볼 수 있다. 최종 도착지점을 확인해

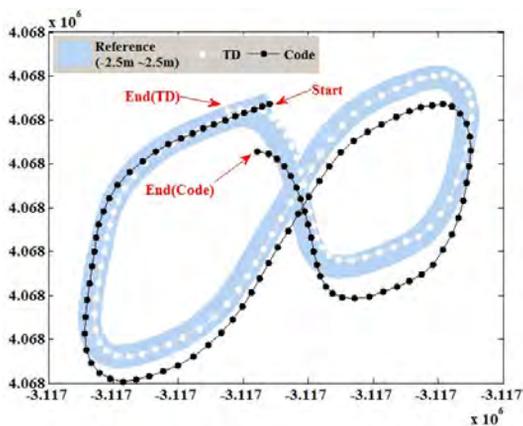


그림 8. 주행상태의 위치추정 결과
Fig. 8. Results of positioning when vehicle is driving

표 2. 제안하는 방법과 절대위치결정 기법의 주행 시 위치 정확도 비교

Table 2. The accuracy of position comparison when vehicle is driving

	TD based relative positioning	Code based absolute positioning
Mean error[m]	1.47	3.51
Maximum error[m]	2.49	6.31

보면 동일한 지점으로 다시 돌아오는 백색 점선과 달리 검은색 점선은 기준선을 많이 이탈한 것을 볼 수 있다. RTK를 이용해 추정된 위치결과를 참값으로 두고 두 가지 방법으로 결정된 위치결과를 표2에 수치로 정리하였다.

표 2를 보면 반송파 위상 TD 측정치를 활용한 방법은 1.47m의 평균오차를 보이면서 최대 2.5m까지 벗어난다. 반면 코드 측정치를 활용한 절대위치 추정 방법은 3.5m의 평균오차를 보이면서 최대 6m이상 벗어난다. 이 결과를 보면 반송파 위상 TD 측정치 이용한 상대위치 결정기법이 기존의 절대위치 결정기법보다 2배 이상 정확한 위치추정 결과를 도출함을 알 수 있다. 정확한 초기위치정보를 얻을 수 있는 환경이라면 하나의 수신기를 이용하여 높은 정밀도의 위치결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

III. 결 론

본 논문에서는 단일 GNSS 수신기를 이용하여 정밀한 위치를 추정하는 방법으로 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법을 제안하고 분석하였다. 제안하는 상대위치 결정기법은 반송파 위상 측정치를 활용하지만 시간 간 차분을 통해 미지정수를 쉽게 제거하였다. 뿐만 아니라 짧은 시간 내에서는 공간적 공통오차 및 위성계 오차가 크게 변하지 않는 특성을 활용하여 효과적으로 오차를 제거하였다. 제안하는 모델은 오차해석을 통해 코드측정치를 이용한 절대위치 결정기법보다 성능이 우수함을 증명하였다. 또한 차량과 RTK를 활용하여 위치결정 실험을 수행하고 오차해석 결과를 검증 하였다.

실제 실험에서는 이론적 오차해석과는 달리 사이클 슬립, 편류오차 등이 발생하여 기대했던 정밀도 및 정확도 보다 낮은 성능이 나타남을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 위치추정 성능은 약 10분 동안 3m이내에

수렴하여 코드기반의 절대위치기법에 비하여 약 4배 이상 향상된 정확도 및 정밀도를 확인할 수 있었다. 향후 차분 후 남은 잔류오차를 제거할 수 있다면 반송파 위상 TD 측정치를 이용한 상대위치 결정기법은 매우 정밀한 위치추정 방법이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] S. J. Blake, "Heave compensation using time-differenced carrier observations from low cost GPS receivers," Ph.D. eThesis, Dept. Civil Engineering, Univ. Nottingham, 2008.
- [2] J. Park and H. Kim, "A study of the location and shape of the ship using GPS," *J. IEEK, Syst. Control*, vol. 48, no. 4, pp. 86-93, 2011.
- [3] H. Bang, N. Kim, J. Keum, S. Park, and J. Cho, "Development of quadcopter drone for safety guide service at night," in *Proc. HCI 2015*, pp. 217-218, 2014.
- [4] C. Guo, W. Guo, G. Cao, and H. Dong, "A Lane-Level LBS system for vehicle network with High-Precision BDS/GPS positioning," *J. Computational Intell. Neurosci.*, vol. 2015, 2015.
- [5] S. Son, H. Choi, H. Cho, and Y. Baek, "Location information reliability-based precision locating system using NLOS condition estimation," *J. KICS*, vol. 38, no. 1, pp. 97-108, 2013.
- [6] J. Traugott, "Precise flight trajectory reconstruction based on time-differential GNSS carrier phase processing," Doctoral dissertation, Technische Universität München, 2011.
- [7] D. Han, H. Yun, and C. Park, "Integer ambiguity propagation method for a precise positioning using GNSS carrier phase measurements," *J. KSAS*, vol. 37, no. 7, pp. 678-684, 2009.
- [8] S. Godha and M. E. Cannon, "GPS/MEMS INS integrated system for navigation in urban areas," *Gps Solutions*, vol. 11, no. 3, pp. 193-203, 2007.
- [9] D. C. K. Yuen and B. Macdonald, "Vision-based localization algorithm based on landmark matching, triangulation, reconstruction, and comparison," *Gps Solutions*, vol. 11, no. 3, pp. 193-203, 2007.
- [10] C. Park and P. J. G. Teunissen, "A Baseline constrained LAMBDA method for an Integer ambiguity resolution of GNSS attitude determination systems," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 21, no. 2, pp. 217-226, 2005.
- [11] H. You, E. Lee, Y. J. Lee, G. I. Jee, G. W. Nam, and H. S. Jun, "Time difference characteristics of GPS carrier phase," *J. KSAS*, vol. 33, no. 9, pp. 66-72, 2005.
- [12] M. Kirkko-Jaakkola, J. Traugott, D. Odijk, J. Collin, G. Sachs, and F. Holzapfel, "A RAIM approach to GNSS outlier and cycle slip detection using L1 carrier phase time-differences," in *Proc. Signal Process. Syst. 2009*, pp. 273-278, Oct. 2009.
- [13] S. G. Park and D. J. Cho, "A performance improvement on navigation applying measurement estimation in urban weak signal environment," *J. KIICE*, vol. 18, no. 11, pp. 2745-2752, 2014.
- [14] J. Park, M. A. Jung, S. Yoon, and S. R. Lee, "System design for location determination inside the ship," *J. KIICE*, vol. 38, no. 2, pp. 181-188, 2013.

박 귀 우 (Kwi-Woo Park)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학부 졸업
2015년 2월 : 충북대학교 제어로봇공학과 석사
2015년 3월~현재 : 충북대학교 제어로봇공학과 박사과정

<관심분야> GNSS, 컴퓨터비전

박 찬 식 (Chansik Park)



1984년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업
1986년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 석사
1997년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 박사
1997년 3월~현재 : 충북대학교 전자정보대학 교수

<관심분야> GNSS, SDR, 미지정수결정, 오차해석

이 동 선 (DongSun Lee)



2014년 2월 : 충북대학교 전자공학부 졸업
2014년 3월~현재 : 충북대학교 제어로봇공학과 석사과정
<관심분야> GNSS, 자세추정