

다중 GPS 수신기에 의한 농업용 차량의 정밀 위치 계측(I) - 오차추정 시뮬레이션 및 고정위치계측 -

김상철 조성인 이승기 이운용 홍영기 김국환 조희제 강지원

Precise Positioning of Farm Vehicle Using Plural GPS Receivers - Error Estimation Simulation and Positioning Fixed Point -

S. C. Kim S. I. Cho S. G. Lee W. Y. Lee Y. G. Hong G. H. Kim H. J. Cho G. W. Gang

Abstract

This study was conducted to develop a robust navigator which could be in positioning for precision farming through developing a plural GPS receiver with 4 sets of GPS antenna. In order to improve positioning accuracy by integrating GPS signals received simultaneously, the algorithm for processing plural GPS signal effectively was designed. Performance of the algorithm was tested using a simulation program and a fixed point on WGS 84 coordinates. Results of this study are summarized as followings.

1. 4 sets of lower grade GPS receiver and signals were integrated by kalman filter algorithm and geometric algorithm to increase positioning accuracy of the data.
2. Prototype was composed of 4 sets of GPS receiver and INS components. All Star which manufactured by CMC, gyro compass made by KVH, ground speed sensor and integration S/W based on RTOS(Real Time Operating System) were used.
3. Integration algorithm was simulated by developed program which could generate random position error less than 10 m and tested with the prototype at a fixed position.
4. When navigation data was integrated by geometrical correction and kalman filter algorithm, estimated positioning errors were less than 0.6 m and 1.0 m respectively in simulation and fixed position tests.

Keywords : Precision farming, Navigation system, Positioning, Plural GPS receiver

1. 서론

GPS(Global Positioning System)을 항법장치로 사용할 경우 오차의 누적 없이 차량의 위치를 일정한 오차범위 내에서 직접 얻을 수 있을 뿐 아니라 주행시간이나 거리가 증가해도 일정한 항법성능을 유지하는 등 매우 많은 이점에도 불구하고

고 측위신호의 오차는 장애물에 매우 민감하게 반응하며, 더우기 수 cm의 오차를 갖는 항법용 GPS는 USD10,000 \$ 이상으로 가격이 매우 비싸기 때문에 자율주행 시스템을 실용화 하는데 큰 제약이 되고 있다. Han(2000) 및 Kim 등(1999)은 이러한 문제 해소를 위해 칼만 필터를 이용하여 GPS와 INS(Inertial Navigation System)의 신호를 융합하여 보다 저

This study was supported by Technology Development Program for Agricultural and Forestry, Ministry for Agricultural, Forestry and Fisheries, Republic of Korea (S-2008-1317-100). The article was submitted for publication on 2011-03-10, reviewed on 2011-03-29, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2011-04-13. The authors are Sang Cheol Kim, Senior Researcher, KSAM member, Young Gi Hong, Researcher, KSAM member, National Agriculture Academy Science, Sung In Cho, Professor, KSAM member, Seoul National University, Seunggi Lee Professor, KSAM member, Kongju National University, Gook Hwan Kim, post-doctor Researcher, National Agriculture Academy Science, Hee Je Cho, Researcher, KSAM member, Chungcheongnam-do Agricultural Research & Extension Services, Chi Won Kang, Researcher, KSAM member, Rural Development administration. Corresponding author: Sang Cheol Kim, Research Engineer, National Agriculture Academy Science, RDA, Suwon, 441-707, Korea; Tel: +82-31-290-1851; Fax: +82-31-290-1860; E-mail: <sckim@rda.go.kr>.

림하고 안정된 측위신호를 제공하고자 했으나 측위정밀도를 향상시키는 못하였다.

더욱이 과수나 작물사이에서 작업해야하는 정밀농업의 경우 정밀한 측위신호와 차량의 자세에 관한 정보를 필요로 하며, 낮은 가격과 안정성을 충족해야 한다. 이 연구에서는 이러한 목적에 적합한 항법장치의 개발을 위해 농업에 실용적으로 사용될 수 있도록 USD 98 \$ 정도인 저가형 GPS를 복수개 결합하여 차량의 자세를 추정하고, 측위정밀도의 향상을 이루고자 한다.

최근까지도 다중 센서의 정보를 효율적으로 통합(integration) 하는 문제는 큰 관심사로 남아 있다. 다중 센서를 이용하는 경우 하나의 센서만을 이용하는 경우에 비해 여러 가지 장점을 가질 수 있기 때문이다(Sukkarieh and Nebot, 1999). 여분의 정보(redundant information)를 이용하여 시스템의 불확실성(uncertainty)을 감소시키고 정확도(accuracy) 및 안정도(reliability)를 증가시킬 수 있다(Brown and Jwang, 1992; Gre지, 1992). 그리고 여러 센서들의 상호 보완(complementary) 작용으로 인하여 얻을 수 있는 정보량의 합이 증가하므로 저가의 여러 센서를 통합하여 고가의 센서와 같은 성능을 보일 수 있다(Martin, 1998). 따라서 다중 센서 정보의 통합은 이용 가능한 정보량이 증가한다는 점 외에도 효과적인 이용 방법에 따라 정보의 총합을 증가하는 시너지 효과(synergistic effect)를 얻을 수 있다는 장점이 있으며, 특히 GPS와 같은 항법시스템정보의 효율적인 통합 방법으로는 칸만필터가 주로 사용되고 있다.

이 연구는 칸만필터 알고리즘을 이용하여 복수개의 GPS 수신정보를 융합하고 수신 안테나와 위성간의 기하학적인 해석을 통해 차량의 측위정밀도 향상을 이루고자 하며 구체적 목적은 다음과 같다

- (1) 복수개 GPS를 이용한 측위시스템의 오차 개선 모델
- (2) 확장 칸만필터를 통한 다중 GPS의 신호융합 알고리즘 개발
- (3) GPS 안테나의 기하학적 배열을 이용한 차량의 자세추정과 측위 정밀도 향상 가능성 구명

2. 재료 및 방법

가. 다중 GPS수신 신호처리 알고리즘

아래 그림 1과 같이 다중 수신한 GPS의 신호융합 알고리

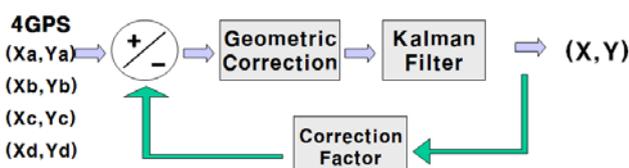


Fig. 1 Block diagram for integration of positioning data.

즘은 크게 두 단계로 나누어 설명할 수 있다. 첫 번째 단계는 안테나 상호간의 기하학적 관계를 만족하는 범위로 위치오차를 줄이는 과정이고 두 번째 단계는 칼만 필터를 이용하여 오차의 공분산을 최소화하는 과정이다.

1) 안테나의 기하학적 관계를 이용한 측위오차의 보정

안테나는 기하학적으로 네변의 길이가 같은 정사각형의 꼭지점에 위치하고 있으며 고정된 대각선의 길이로부터 안테나와 안테나 사이의 거리를 계산할 수 있다. 따라서 안테나의 위치를 나타내는 실시간 GPS 좌표를 연결하여 만들어진 기하학적 도형의 모양은 좌표가 갖는 오차 때문에 매우 불규칙한 모습을 나타낼 것이다. 이러한 좌표를 기하학적 구속조건에 따라 정렬하면 오차의 크기는 줄어들고 오차의 방향도 본래의 참값에 가까워 진다고 가정하였다. 이러한 가정의 타당성을 검증하기 위해 아래와 같은 알고리즘을 사용하였다. 우선 초기화 기간 동안 4개 GPS 수신기 좌표 평균으로부터 수신기가 이루는 기하학적 도형의 평균좌표를 구하고 이 평균좌표를 중점좌표로 가정하여 중점좌표로부터 각 수신기의 오차를 연산한 다음 새로운 좌표가 입력되면 이 오차 값만큼 보정하여 주는 순환적 연산과정을 반복하고 기하보정된 좌표값은 칼만필터 알고리즘으로 전달된다. 4개의 안테나를 사용한 이유는 3축방향의 자세 측정치를 보정하기 위해서는 3개의 미지정수가 발생하므로 동시에 3 개 이상의 안테나로부터 GPS신호를 수신하면 되지만 4개의 안테나로부터 수신할 경우 보정알고리즘이 단순화됨으로 신호처리의 연산부하가 줄어들어 속도를 증가시킬 수 있는 이점이 있다. 4개 GPS의 중점좌표는 단순히 측정된 4개 좌표의 산술 평균으로 식 (1)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_m(k) &= \frac{zx_a(k) + zx_b(k) + zx_c(k) + zx_d(k)}{4} \\
 y_m(k) &= \frac{zy_a(k) + zy_b(k) + zy_c(k) + zy_d(k)}{4}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

where,

$x_m(k)$: geometric center coordinate on x-axis of 4 GPS antenna

$y_m(k)$: geometric center coordinate on y-axis of 4 GPS antenna

$zx_a(k), zx_b(k), zx_c(k), zx_d(k)$: center coordinate of x-axis of each GPS antenna

$zy_a(k), zy_b(k), zy_c(k), zy_d(k)$: center coordinate of y-axis of each GPS antenna

계측된 중점 좌표로부터 기하보정을 위한 x, y축방향의 오차를 구하면 다음 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 E x_a &= x_m(k) + \frac{l \sin(0 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z x_a(k) \\
 E y_a &= y_m(k) + \frac{l \cos(0 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z y_a(k) \\
 E x_b &= x_m(k) + \frac{l \sin(3 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z x_b(k) \\
 E y_b &= y_m(k) + \frac{l \cos(3 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z y_b(k) \\
 E x_c &= x_m(k) + \frac{l \sin(2 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z x_c(k) \\
 E y_c &= y_m(k) + \frac{l \cos(2 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z y_c(k) \\
 E x_d &= x_m(k) + \frac{l \sin(1 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z x_d(k) \\
 E y_d &= y_m(k) + \frac{l \cos(1 * \frac{\pi}{2} + \varphi)}{2} - z y_d(k)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 E_x 와 E_y 는 각각의 측정된 좌표에서의 오차이며, 이 오차는 로컬 칼만필터로부터 연산된 새로운 좌표에 대하여 기하보정의 상수로 이용된다. 여기서 구해진 기하보정좌표를 이용하여 새로운 중점좌표가 계산되며, 계산된 중점좌표는 마스터 필터로 전달된다.

2) 칼만필터를 이용한 측위오차 보정

칼만 필터는 이산 시간선형 동적 시스템을 기반으로 동작하며, 각 시간에서의 상태 벡터는 이산 시간의 벡터들에 대해서만 관계된다는 마르코프 연쇄를 가정하고 있다. 특정 시간 k 에서의 상태 벡터를 X_k 라고 정의하고, 또한 그 시간에서의 사용자 입력을 u_k 라고 정의할 때, 칼만 필터에서는 다음과 같은 관계식을 가정하고 있다

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \tag{3}$$

Where,

F_k = matrix that relates X_{k-1} to X_k

B_k = constant matrix inputted by user,

W_k = Gaussian white noise

또한, 상태 벡터 X_k 와 그 벡터를 측정했을 때 실제로 얻어진 벡터 Z_k 는 다음과 같은 관계식을 가지고 있다.

$$Z_k = H_k x_k + V_k \tag{4}$$

Where,

H_k = ideal connection matrix between measurement and state update at time k

V_k = measurement error(assumed white noise)

칼만 필터에서는 기본적으로 모델의 선형성을 가정하고 있지만, 실제적으로는 많은 모델이 비선형 구조를 가지고 있다. 이런 경우 칼만 필터를 그대로 근사화해서 적용하면 그리 좋지 않은 결과를 얻는 경우가 많다. 이러한 경우, 칼만 필터를 수정해 비선형에도 사용할 수 있도록 한 확장 칼만필터(Extended Kalman Filter, EKF)가 사용된다. 확장 칼만 필터에서는 칼만 필터에서의 선형성 가정을 완화시켜, 더 일반적인 시스템에 대해서도 사용이 가능하도록 확장했다. 이 필터는 대부분의 네비게이션이나 GPS와 같은 비선형 상태 추정에 주로 사용되고 있다. 확장 칼만 필터에서는 모델의 선형성 가정 대신, 아래 식과 같이 상태 변화 함수의 미분가능성을 가정한다.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \tag{5}$$

$$z_k = h(x_k) + V_k \tag{6}$$

여기에서 f , h 는 미분가능한 함수여야 한다. 이들 함수에 대하여 예측과 업데이트 방정식을 적용하여 재귀순환적 연산을 반복한다.

Prediction

State Prediction $\hat{X}_{k|k-1} = f(\hat{X}_{k-1|k-1}, u_{k-1})$

Covariance Prediction $P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}$ (7)

Update

Computation of optimal $K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$

Kalman gain state update $\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k$

Covariance update $P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$ (8)

이와 같은 확장 칼만필터 모형을 적용하여 다음 그림 2에서 보여진 바와 같이 신호융합을 위한 알고리즘을 구성하였다.

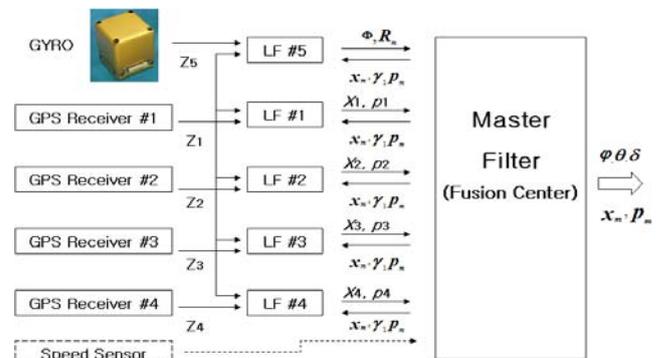


Fig. 2 The schematic diagram of the signal integrating for the plural GPS receiver.

알고리즘의 특징은 4개의 GPS 수신기로부터 출력되는 위치 신호(\mathbf{z}_m)는 각각의 로컬 칼만 필터에 의해 자이로 신호와 결합하여 위치해를 추정한 다음 마스터 필터로 전달하면 안테나 기하학적인 배열로부터 1차 보정된 4개의 GPS 신호와 자이로 및 속도신호를 다시 융합하여 새로운 위치해(x_m, P_m)와 Roll(ϕ), Pitch(θ), Yaw(δ)를 계산하여 제어시스템으로 전달하고 최적 추정 위치(x_m)와 그때의 공분산(P_m)을 로컬 필터로 전달(propagation)되도록 한다. GPS와 INS 또는 다수의 GPS 신호를 통합하는 시스템은 데이터의 이용방식에 따라 강결합 방식과 약결합(loosely coupled) 방식으로 분류된다. 농업용 항법장치로서 약결합과 강결합은 구현과 성능면에서 큰 차이는 없으며, 강결합의 경우 항체의 실시간성과 dynamic 특성을 좀더 반영해 줄 수 있다는 특징이 있으나 연산량이 크게 증가하는 단점이 있다. 이 연구에서는 약결합 구조를 이용하여 4개의 GPS 정보와 자이로 정보 및 속도 정보를 통합하고자 했다. 통합 알고리즘은 그림 3과 같은 구조이며, 4개의 GPS 수신기로부터 얻어진 좌표 정보로부터 기하학적 보정을 위한 오차를 계산하고, INS 출력 정보인 속도, 각속도, 가속도 정보로부터 얻어진 항체의 동적정보와 결합해 측위정보를 보정토록 함으로, 결국 2개의 필터가 연속적으로 배치되는 형태를 취하게 된다. 따라서 이 방식은 cascaded approach 또는 two-filter approach라고도 불린다. 약결합 방식의 장점으로는 기존의 수신기 내에 장착된 알고리즘을 이용하므로 계산 시간이 감소하며 INS 필터의 측정 모델이 단순해진다는 점을 들 수 있다.

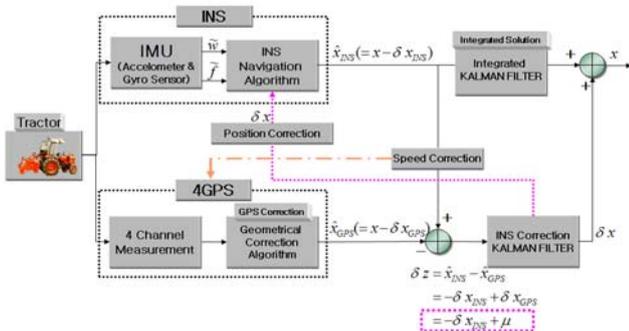


Fig. 3 Block diagram for integration of loosened couple method.

다. 시스템 평가

1) 오차보정 시뮬레이션

신호융합 알고리즘을 검증하기 위하여 Test Point를 설정하고 Test Point의 좌표에 10 m의 랜덤 노이즈를 부가한 데이터를 생성하여 융합 알고리즘의 입력자료로 활용하였다. Test Point는 추후 실제 검증실험을 고려하여 농업공학부 바이오메카트로닉스 연구동 옥상에 설치되어 있는 GPS 실험용 실좌표(37.27416610N, 126.98194901E, Height: 67.510 m)를

사용하였다. 아래 그림 4는 랜덤 노이즈를 부가한 GPS경도 좌표로 생성된 데이터이다.

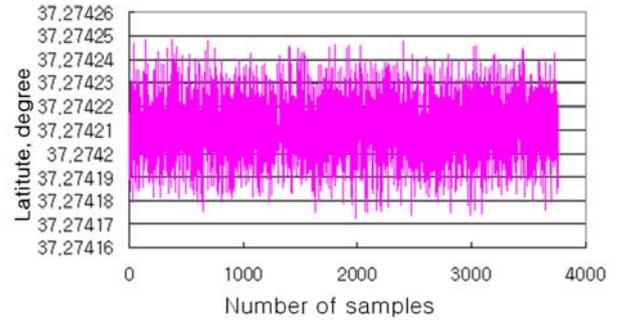


Fig. 4 Figure of GPS signal generated by random function.

2) 고정위치 실험

CMC(Canadian Marconi Company)의 GPS Pre-Amplifier AT575-70 RevB를 그림 5와 같이 4채널 동시 수신 할 수 있는 GPS 수신장치를 제작하고, 안테나는 아래 그림 6에서와 같이 서로 직각이 되도록 방사형으로 배치했으며 안테나 간의 거리는 30 cm로 고정하였다. 4개의 안테나를 꼭지점으로 하는 사각형의 중점에는 DGPS로서 rms오차가 2 cm인 NoVatel사의 RT-2 안테나를 설치하였다. 통합 GPS수신 박스는 실내에 설치하여 데스크탑 컴퓨터와 연결하여 신호를 분석하였다.



Fig. 5 View of receiving GPS signal by Integrator.



Fig. 6 View of GPS antenna installed at test point.

3. 결과 및 고찰

가. 다중 GPS의 알고리즘 시뮬레이션 결과

아래 그림 7은 random 함수에 의해서 생성된 true position 에 대한 ± 10 m 이내의 오차를 가진 위도(Latitude) 데이터의 집합이다. 전형적인 white noise의 특성을 나타내고 있으며 true position인 37.2741661N에 대하여 평균이 약 1 cm의 오차를 나타내었다. 채널마다 하나의 데이터에 대해 1분간의 데이터를 평균한 4000개의 데이터를 각각 생성하여 비교하였으나 채널마다 그 특성에는 큰 차이가 없었으나 동일 시점에 있어서의 각 채널의 데이터는 그 차이가 매우 크고 불규칙하여 랜덤한 특성을 잘 나타내고 있었다.

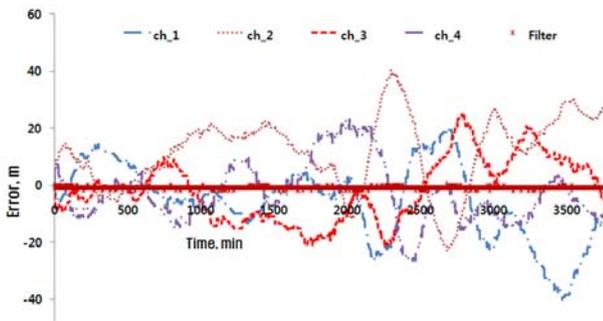


Fig. 7 Distribution of position error of GPS receiver which is single and corrected by Kalman filter.

이와 같이 발생된 random position data를 이용하여 다중 GPS 신호처리 알고리즘에 적용한 결과 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 그림 8의 그래프에서 True 궤적은 위도 37.274166N의 시분별 고정 좌표를 나타내며 ch1은 1번 채널의 random position data를, Mean은 4채널의 평균데이터 변화를, Process는 알고리즘에 의한 데이터의 처리결과를 각각 나타낸다. 그 그래프에서 보여진 바와 같이 약 30 Sample 이후에는 실제위치와의 오차는 약 60 cm 이내로 줄어들어 안정된 형태를 나타내고 있음을 알수있다. 따라서 측위신호의 오차가 실제위치에 대하여 Gaussian 분포를 이루고 누적 오차의 공분산이 0으로 접근하는 GPS 측위신호의 오차를 감소시키는데 유용한 알고리즘으로 판단되었다.

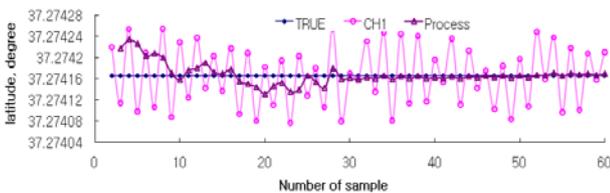


Fig. 8 Results of simulation by processing algorithm.

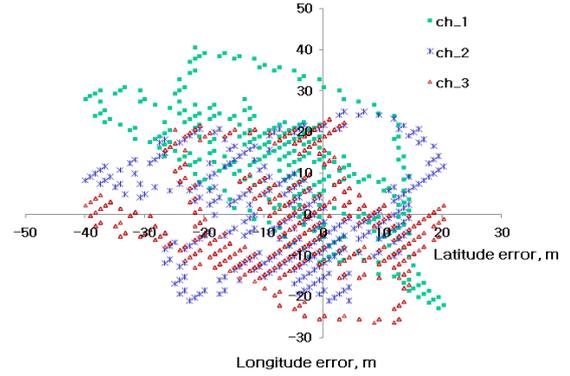


Fig. 9 Distribution of position error of Single GPS.

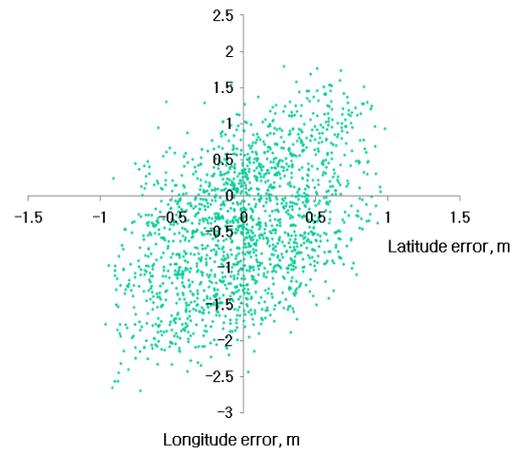


Fig. 10 Distribution of position error of GPS corrected by Kalman filter.

나. 고정위치 실험

이미 알고 있는 측지점인 GPS Test Point(37.27416610N, 126.98194901E)에 설치한 공시 GPS 안테나의 수신 신호의 분포를 위도(그림 9)에 나타 내었다. 이 신호는 공시 수신기가 26시간 동안 수신한 GPS 신호를 1분 간격으로 평균하여 한 점으로 표시한 측위 데이터의 분포이다. 4채널 모두 20~40 m 정도의 오차범위에서 true position을 중심으로 매 샘플링 마다 0.2~0.3 m의 거리만큼 랜덤한 벡터방향을 향해 연속적으로 움직이고 있다. 수신기 자체가 가지고 있는 필터링 알고리즘 때문에 수신기의 출력이 랜덤한 이산신호 형태로 나타나지 않았으며 신호의 평균도 경,위도 모두에 있어 3~5 m 정도 바이어스 되고 있음을 알 수 있었다.

그림 9에서 보이는 바와 같이 single GPS의 경우 수십 m 이상의 측위오차를 나타내는 single GPS의 신호들을 제안된 기하보정과 칼만필터 알고리즘에 따라 처리하였을 때 수신기의 보정된 측위오차는 그림 10에 보이는 바와 같이 1.6m 정도의 1σ RMS오차를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 방법으로 저가의 GPS를 결합하여 보다 높은 정

밀도를 유지하는 것이 가능하였지만 20 cm 이하의 측위오차를 요구하는 농업용 자율주행 차량에 탑재하여 이용하기에는 오차 수준이 여전히 커 이후 반도체 기술의 발전에 따라 급속히 저가격화 및 소형화 되고 있는 반도체형 정밀 관성 센서를 융합하여 오차 10 cm 수준의 정밀 보정 방법에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 그러나 지리정보를 기반으로 센서로부터 정보를 수집하고 이를 통해 농자재를 가변처방하는 정밀농업 시스템에서는 우리나라의 경지 규모에서도 약 2~3 m 정도의 측위 오차는 허용되므로 현재의 시스템으로도 충분히 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 정밀농업의 측위 시스템에 사용할 수 있는 값싸고 안정된 항법장치의 개발을 위하여 수행되었으며 다중 GPS를 수신할 수 있는 hardware 개발과 4개 GPS 안테나의 기하학적 관계를 이용한 측위신호 보정알고리즘을 통해 다중 GPS 신호의 통합 알고리즘을 개발하고자 했으며 시뮬레이션과 필드시험을 통해 시스템의 성능을 시험하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 4개의 저급 GPS 수신기와 관성항법신호를 동시에 수신하여 안테나의 기하학적 배치와 칼만필터 알고리즘을 이용하여 측정 정보를 통합함으로써 위치정밀도와 측위 안정성을 향상하고자 했다.
- (2) 다중 GPS 신호 통합에 의한 측위 정밀도의 향상을 위해 고정된 한점에 대하여 10 m 오차범위를 갖는 4000개의 random 신호를 4채널에 대하여 각 채널마다 발생시키고 제안된 신호통합 알고리즘으로 시뮬레이션했을 때 측위오차의 범위는 약 0.6 m 이내까지 감소되었다.
- (3) CMC사의 OEM GPS수신 카드 ALLSTAR 4대와 KVH사의 자이로 및 속도센서를 이용하여 시험장치를 구성하고 실시간 OS(real time operation system)를 기반으로한 신호처리 S/W를 개발하여 고정위치와 이동 궤적에 대하여 시험했다.

- (4) 고정위치 시험은 이미 정밀하게 측정된 좌표를 가지고 있는 Test Point를 중심으로 4개의 GPS 안테나를 각각 직각을 이루도록 방사형으로 설치하고 single GPS의 위치신호를 수신했을 때 4채널 모두 20~40 m 정도의 오차를 나타냈다.
- (5) 다중 수신된 single GPS 신호를 기하보정 알고리즘과 칼만 필터를 이용해 통합 했을 때 수신기의 보정된 측위오차는 약 1.6 m 정도의 1σ RMS오차를 나타내었다.
- (6) 실험 결과로 나타난 정밀도 수준은 농기 계의 자율주행에 직접 이용하기는 어렵지만, 약 2~3 m 정도의 측위 오차가 허용되는 정밀농업의 포장 정보 측정 수단으로는 충분히 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

참고 문헌

1. Han, K. H. 2000. Study on Integration GPS & INS, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea. (In Korean)
2. Kim, C. W. 1999. Attitude estimation with complementary use of GPS carrier phase and INS, Doctoral Thesis. Seoul National University, Seoul, Korea. (In Korean)
3. Brown, R. G, Y. C. Jwang. 1992. Introduction to random Signal and Applied Kalman Filtering, 2nd ed. Wiley, New York, USA.
4. Farrell, J. A, M. Barth. 1999. The Global Positioning System and Inertial Navigation, McGraw-Hill, Springer-Verlag, New York, NY, USA.
5. Grewal, M. S, A. P. Andrews. 1993. Kalman Filtering : Theory and Practice, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
6. Martin, M. K. and D. A. Vause. 1998. New Low Cost Avionics with INS/GPS for a Variety of Vehicles, IEEE AES Systems Magazine 13(11):41-46.
7. Sukkarieh, S., E. M. Nebot, H. F. Durrant-Whyte. 1999. A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Application, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15(3):572-578.