

## 농업기계 내비게이션을 위한 INS/GPS 통합 연구

노광모 박준걸 장영창

### Study on INS/GPS Sensor Fusion for Agricultural Vehicle Navigation System

K. M. Noh J. G. Park Y. C. Chang

#### Abstract

This study was performed to investigate the effects of inertial navigation system (INS) / global positioning system (GPS) sensor fusion for agricultural vehicle navigation. An extended Kalman filter algorithm was adopted for INS/GPS sensor fusion in an integrated mode, and the vehicle dynamic model was used instead of the navigation state error model. The INS/GPS system was consisted of a low-cost gyroscope, an odometer and a GPS receiver, and its performance was tested through computer simulations. When measurement noises of GPS receiver were 10, 1.0, 0.5, and 0.2 m ( $1\sigma$ ), RMS position and heading errors of INS/GPS system at 5 m/s straight path were remarkably reduced with 10%, 35%, 40%, and 60% of those obtained from the GPS receiver, respectively. The decrease of position and heading errors by using INS/GPS rather than stand-alone GPS can provide more stable steering of agricultural equipments. Therefore, the low-cost INS/GPS system using the extended Kalman filter algorithm may enable the self-autonomous navigation to meet required performance like stable steering or more less position errors even in slow-speed operation.

**Keywords :** Sensor fusion, GPS (Global Positioning System), INS (Inertial Navigation System), EKF (Extended Kalman Filter)

#### 1. 서론

최근 GPS(Global Positioning System)는 정밀농업을 구현 하는데 이용할 수가 있어 농업 분야에서 각광을 받고 있다. 농업기계와 결합된 GPS는 포장 내 위치에 따른 생산량의 기록 및 이를 바탕으로 시비량의 조절을 가능하게 하여 포장의 생산성을 극대화시킬 수 있고, 나아가 무인 작업을 가능하게 한다.

GPS는 안정된 위치 및 속도 정보를 연속적으로 제공하여 상업용으로 많이 이용하고 있으나 농업 분야에의 응용은 cm 단위의 정확도를 요구한다. Devlin(2007)은 단일 GPS를 사용하여 트레일러 트럭의 위치오차를 조사한 결과, RMS 오차가 3.2~6.9 m의 범위라고 보고하였다. Kim(2002)은 20 m 정도의 수신오차를 가진 4개의 저가 GPS로 1.5 m 이내로 유지

할 수 있다고 하였다. Bell(2000)은 GPS를 이용하여 농업용 트랙터를 무인 주행할 경우 위치오차의 평균이 5 cm 이내, 표준편차는 10 cm 이내여야 한다고 제시하였으며, 고가의 반송과 보정 GPS를 이용하여 평균 0 cm, 4~6 cm( $1\sigma$ )의 정확도로 트랙터를 무인 주행할 수 있었다고 보고하였다. Han(2001)은 위성의 가시성이 좋은 포장에서는 정도 높게 농업기계를 제어할 수 있으나, 지형이 협소한 한국에서는 cm 수준의 정확도와 가용성이 요구되며, 단일 GPS로는 저속에서의 방향 선정 및 항법해의 가용성 문제가 큰 제약 요인이라고 하였다.

GPS는 오차가 한정되어 장시간 사용해도 안정성이 있지만 산악지형 및 나무숲 등과 같은 환경의 영향을 많이 받으며 단일 수신기로는 위치와 속도만을 제공한다. INS는 위치, 속도 및 자세 정보를 외부환경의 영향을 받지 않고 빠르게 제공하지만 적분기법으로 해를 구하므로 장시간 사용할 경우 오차

This work was supported by the Konkuk University. The article was submitted for publication on 2008-10-23, reviewed on 2008-11-10, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-11-20. The authors are Kwangmo Noh, Jungul Park, and Youngchang Chang, Professors, KSAM members, Konkuk University, Chungju. Corresponding author: Y. C. Chang, Professor, Dept. of Bio-systems Engineering, Konkuk University, Chungju, Chungbuk, 380-701, Korea; E-mail: <ycchang@kku.ac.kr>.

가 누적되어 발산하는 문제점이 있다(Grewal et al., 2001). 따라서 cm 수준의 오차 범위에서 농업기계의 무인 주행을 위해서는 GPS와 INS의 병용이 불가피하다.

다양한 필터를 이용한 INS/GPS 통합 시스템은 두 시스템의 약점을 보완할 수 있어 연속적으로 적은 오차의 항법정보를 제공할 수 있으므로 비행기와 자동차 등의 무인 운전에서 적합하여 많이 연구되고 있다(Ryu and Gerdes, 2004; Bian et al., 2005). INS/GPS 통합에서 최적상태를 추정하는 대표적인 필터는 칼만필터이다.

칼만필터는 상태변수의 선형성, GPS의 정보이용 방법 및 통합기법에 따라 분류되는데, 상태변수의 선형/비선형에 따라 선형/확장 칼만필터, GPS 수신기 내의 알고리즘 이용 유무에 따라 약/강 결합방식, 사용 센서들의 정보를 처리하는 방식에 따라 중앙집중형, 분산형 및 연합형 칼만필터로 나눈다.

본 연구는 각 1개의 가속도 자이로스코프와 속도계로 저가의 INS를 구성하고 1개의 GPS와 약결합, 중앙집중형 방식의 확장 칼만필터를 이용하여 시스템 및 측정치 방정식을 통합한 후 시뮬레이션을 통하여 농업기계의 무인주행 시 INS/GPS 통합 시스템이 주행의 정확도와 스티어링의 안정성에 주는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 시스템 방정식

통합 항법시스템을 구축하기 위해서는 차량의 동적 모델이나 항법 상태오차 모델이 구축되어야 한다. 일반적으로 상태오차 모델은 INS와 같은 주 항법장치에서 상태오차가 궤환에 의해서 추정 또는 보정되는 경우에 널리 사용된다. GPS를 주 항법장치로 사용하는 경우에는 정확도가 높기 때문에 보정을 필요하지 않아서 상태오차 모델을 사용할 수도 있으나 신호를 수신하지 못할 경우에는 보정 자체도 의미가 없게 된다. 따라서 이런 경우에는 상태오차 모델보다 차량의 동적 모델을 상태방정식으로 사용하는 것이 좋다.

다음은 본 연구에서 선택된 상태 변수  $x$ 를 나타낸다.

$$x = [p_e, p_n, v_v, \alpha_v, \psi_v, \omega_v, \delta s_o, \delta s_g, g_b]^T \quad (1)$$

- 여기서,  $p_e$  = 동쪽 위치, m
- $p_n$  = 북쪽 위치, m
- $v_v$  = 차량의 속도, m/s
- $\alpha_v$  = 차량의 가속도, m/s<sup>2</sup>
- $\psi_v$  = 차량의 방위각, rad

- $\omega_v$  = 차량의 방위각 변화율, rad/s
- $\delta s_o$  = 속도계의 배율 오차, m/pulse
- $\delta s_g$  = 자이로스코프의 배율 오차,  $\mu\text{v}/\text{rad/s}$
- $g_b$  = 자이로스코프의 바이어스 드리프트, rad/s

시스템 방정식은 벡터 형식으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + w = \begin{bmatrix} v_v \sin \psi_v \\ v_v \cos \psi_v \\ \alpha_v \\ 0 \\ \omega_v \\ -\frac{1}{\tau_v} \omega_v \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{\tau_g} g_b \end{bmatrix} + w \quad (2)$$

여기서  $f(x(t), t)$ 는 비선형 함수이고,  $w = [w_1, \dots, w_9]^T$ 는 시스템 잡음,  $\tau_v$ 와  $\tau_g$ 는 각각 트랙터의 방위각 변화율과 자이로 바이어스 드리프트의 상관시간이다.

### 나. 측정치 방정식

GPS 수신기로부터 측정할 수 있는 차량 정보는 위도( $\phi$ )와 경도( $\lambda$ ), 속도( $v$ ), 그리고 방위각( $\psi$ )이다. 또한 단위시간  $\Delta t$  동안 속도계의 펄스 수  $\Delta N_o$ 는 주행거리에, 자이로스코프의 출력 전압  $V_g$ 는 차량의 방위각 변화율에 비례하는 측정치이다. 따라서 관측치 벡터  $y$ 는 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$y = [\lambda, \phi, v, \psi, \Delta N_o, V_g]^T \quad (3)$$

측정치 방정식은 벡터 형식으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$y(t) = h(x(t), t) + v = \begin{bmatrix} \frac{p_e}{R_\lambda \cos \phi} \\ \frac{p_n}{R_\phi} \\ v_v \\ \psi_v \\ (v_v \Delta t + \frac{1}{2} a_v \Delta t^2 - \delta s_o \Delta N_o) / s_o \\ (s_g + \delta s_g)(\omega_v + g_b) \end{bmatrix} + v \quad (4)$$

여기서,  $h(x(t), t)$ 는 비선형 함수,  $v = [v_1, \dots, v_6]^T$ 는 측정치 잡음,  $R_\phi$ 와  $R_\lambda$ 는 각각 남북방향과 동서방향의 지구반경,  $s_o$

와  $s_g$ 는 속도계와 자이로스코프의 배율이다.

#### 다. 확장 칼만필터

확장 칼만필터는 선형 시스템에 사용하는 칼만필터를 비선형 시스템에 적용시킨 것으로 시스템 방정식과 측정 방정식으로 구성된다. 식 (5)과 (6)은 일반적인 비선형 시스템을 나타낸다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k) \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k) \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{f}(\cdot)$ 와  $\mathbf{h}(\cdot)$ 는 각각 비선형 형태의 천이 행렬과 측정치 행렬을 나타낸다. 또한 시간  $k$ 에서  $\mathbf{x}_k$ 는 상태 변수,  $z_k$ 는 측정치이고,  $\mathbf{w}_k$ 와  $\mathbf{v}_k$ 는 각각 시스템 잡음과 측정치 잡음을 나타내며 평균이 0이고 분산이 각각  $\mathbf{Q}_k$ 와  $\mathbf{R}_k$ 인 가우시안 분포를 갖는다.

비선형 형태의 천이 행렬과 측정치 행렬을 가지는 시스템의 상태 변수를 추정하려면 이들의 선형화가 요구된다. 다음 식들은 테일러 급수를 사용하여 식 (2)과 (4)를 추정된 상태  $\hat{\mathbf{x}}$  근방에서 이산화 하여 선형화한 시스템과 측정치 방정식이다(Gelb, 1974).

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k) \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k) \quad (8)$$

여기서,

$$\mathbf{F}_k(\hat{\mathbf{x}}_k) = \mathbf{I} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}_k(\mathbf{x}(t_k))}{\partial \mathbf{x}(t_k)} \right|_{\mathbf{x}(t_k) = \hat{\mathbf{x}}_k} \cdot \Delta t$$

$$= \begin{bmatrix} 10 \sin \psi_v \cdot \Delta t & 0 & v_c \cos \psi_v \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{\tau_r} \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_k) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_k(\mathbf{x}(t_k))}{\partial \mathbf{x}(t_k)} \right|_{\mathbf{x}(t_k) = \hat{\mathbf{x}}_k}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{R_A \cos \phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{s_o} & \frac{\Delta t^2}{2s_o} & 0 & 0 & -\frac{\Delta N_v}{s_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_g + \delta s_g & 0 & \omega_r + g_b s_g + \delta s_g & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\Delta \mathbf{y}_k = \mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k$$

확장 칼만필터도 선형 칼만필터와 같이 시간 및 측정치 갱신 과정을 반복적으로 수행하여 상태변수를 추정하나, 상태 공분산의 계산에 비선형 시스템을 선형화하는 과정이 포함되어 있는 점이 다르다. 확장 칼만필터의 계산식은 다음과 같다 (Gelb, 1974).

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$$

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \Delta \mathbf{x}_k + \mathbf{K}_k (\Delta \mathbf{y} - \mathbf{H}_k \Delta \mathbf{x}_k) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{F}_k (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k$$

여기서 행렬  $\mathbf{K}$ 는 칼만이득이며, 시간 갱신 시에 실제 측정치와 추정된 추정치의 차이인 측정오차를 줄이는 방향으로 크기가 결정된다. 시간 갱신에 상태 공분산  $\mathbf{P}$ 는 시스템 행렬  $\mathbf{F}$ 와 상태 잡음의 공분산  $\mathbf{Q}$ 의 영향을 받는다.

그림 1은 확장 칼만필터를 사용하는 약결합 방식의 INS/GPS 통합시스템을 보여주고 있으며, GPS에서 제공하는 위치 및 속도 정보를 자이로스코프와 속도계로부터 얻는 정보와 비교하여 오차를 보정한다.

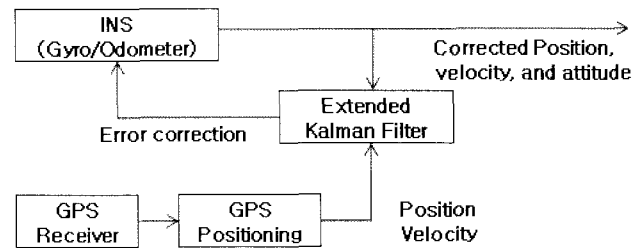


Fig. 1 Schematic diagram of a loosely coupled INS/GPS system.

#### 라. 시뮬레이션 방법

확장 칼만필터를 이용한 INS/GPS 통합 시스템의 특성을 연구하기 위하여 동쪽에서 반시계 방향으로 45° 각도를 가진 직선 테스트 경로를 설정하였다. 차량의 속도는 1, 3, 5 m/s로 고정하여 속도의 변화에 따른 필터의 성능을 비교하고자 하였다.

외란에 의한 시스템 잡음과 측정 시의 측정치 잡음은 정규 분포를 따르고 평균이 0, 분산이 각각  $\mathbf{Q}$ 와  $\mathbf{R}$ 인 백색잡음으로 표준편차로 나타내었다. 차량의 위치, 속도, 가속도 및 방위각의 시스템 잡음은 각각 0.5 m, 0.01 m/s, 0.0001 m/s<sup>2</sup>, 0.001 rad인 오차로 가정하였다, 이들은 샘플링 시간을 고려

하면 충분히 큰 값이다. 방위각 변화율의 잡음은 0.001 rad/s, 속도계 배율오차의 잡음은 속도계의 배율오차를 0.2 m/pulse로 가정하여 5%인 0.01 m/pulse, 저가의 가속도 자이로스코프(ARS-C122-1A, Watson Industries, Inc., U.S.A.)을 기준으로 자이로스코프의 드리프트 잡음은 1% 수준인 0.0001 rad/s로 가정하였다.

GPS 수신기의 위치, 속도 및 방위각에 대한 측정치 잡음은 각각 10 m, 0.5 m/s, 0.001 rad, 속도계의 측정치 잡음은 시스템 잡음과 같이 0.01 m/pulse, 자이로스코프 출력은 0.5 rad/s로 가정하였다. 또한 자이로스코프의 상관시간은 차량시스템 급에서는 100 s, 항법시스템급에서는 1 hr 정도이기 때문에 500 s로, GPS와 자이로스코프의 샘플링 주파수는 각각 1 Hz

와 10 Hz로 가정하여 1,000 s 동안 Matlab을 사용하여 시뮬레이션하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 위치 및 속도 오차

그림 2와 3은 1,000초 동안 5 m/s의 속도로 직선경로를 주행했을 때 초기 30초간의 GPS의 위치 오차와 확장 칼만필터를 사용한 INS/GPS 통합 시스템의 추정된 위치 오차를 나타낸다. 또 표 1은 같은 시뮬레이션 시간 동안 GPS와 INS/GPS의 절대 위치 오차에 대한 최대, 평균 및 RMS 오차를 보여주고 있다.

확장 칼만필터를 사용한 INS/GPS에서 RMS 위치 오차는 10 m 정도인 GPS 오차와 비교해 볼 때 10% 정도로 확장 칼만필터에 의해 GPS의 측정치가 단시간 정밀도가 높은 INS의 측정치에 의해 보완되어 오차가 감소하고 있음을 알 수 있다. 랜덤 잡음의 영향으로 매 시뮬레이션마다 약간의 차이를 보였으나 발산하는 경우는 없었다. 또한 1, 3, 5 m/s의 각 속도 별로 위치오차를 비교한 결과 유의성을 보이지 않았고, GPS 수신기의 샘플링 주파수를 높이면 위치오차는 감소하였다. 최대 오차는 주로 시뮬레이션 초기에 발생하였는데, 이는 초기 공분산 행렬  $P$ 를 단위행렬로 사용하였기 때문이다. 시간 전파에 따라 최적의 칼만이득이 정해지면 위치 오차는 감소하였다.

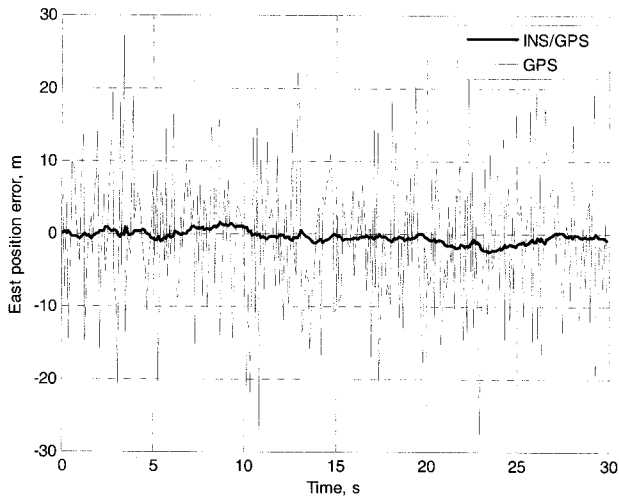


Fig. 2 East position errors of GPS and INS/GPS during the first 30 seconds of simulation when measurement noise of GPS position is 10 m ( $1\sigma$ ).

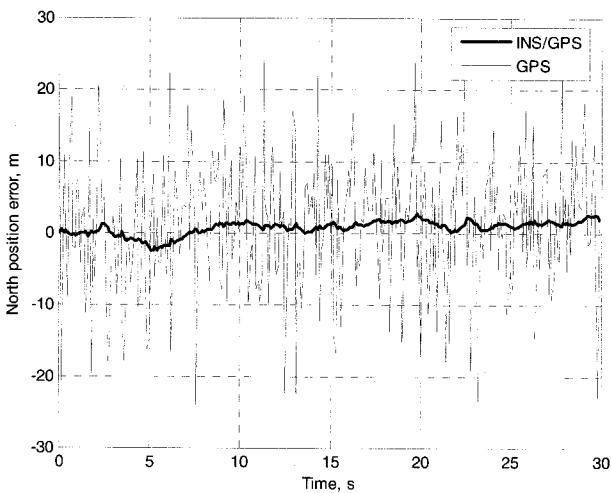


Fig. 3 North position errors of GPS and INS/GPS during the first 30 seconds of simulation when measurement noise of GPS position is 10 m ( $1\sigma$ ).

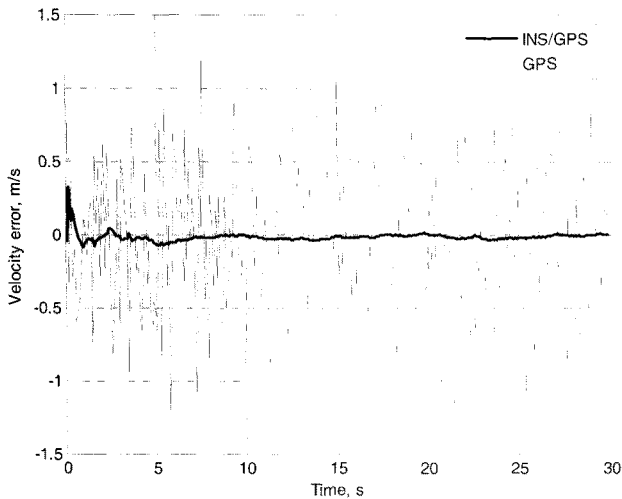
Table 1 Maximum, mean, and RMS errors for absolute position errors at speed 5 m/s during 1,000 second simulation when measurement noise of GPS position is 10 m ( $1\sigma$ )

System	Direction	Maximum error (m)	Mean error (m)	RMS error (m)
GPS	East	42.10	7.97	10.01
	North	35.75	7.93	9.97
INS/GPS	East	3.96	0.97	1.21
	North	4.53	0.99	1.24

그림 4는 GPS와 INS/GPS의 속도 오차를 보여주고 있다. 0.5 m/s인 GPS의 RMS 속도 오차에 비하여 INS/GPS의 RMS 속도 오차는 0.02 m/s로 속도 오차도 INS/GPS 통합 시스템에서 크게 감소함을 알 수 있다.

#### 나. 방위각 오차

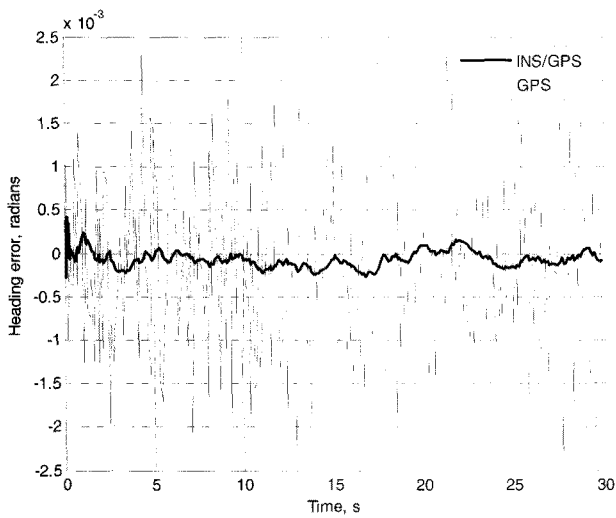
표 2와 그림 5는 GPS의 방위각 오차와 INS/GPS 통합 시스템의 방위각 오차를 보여주고 있다. GPS의 방위각은 위치



**Fig. 4** Velocity errors of GPS and INS/GPS during the first 30 seconds of simulation when measurement noise of GPS position is 10 m (1 $\sigma$ ).

**Table 2** Maximum, mean, and RMS errors for absolute heading errors at speed 5 m/s during 1,000 second simulation when measurement noise of GPS position is 10 m (1 $\sigma$ )

System	Maximum error (radians)	Mean error (radians)	RMS error (radians)
GPS	3.75E-3	0.80E-3	1.00E-3
INS/GPS	0.43E-3	0.10E-3	0.12E-3



**Fig. 5** Heading errors of GPS and INS/GPS during the first 30 seconds of simulation when measurement noise of GPS position is 10 m (1 $\sigma$ ).

와 속도 정보를 바탕으로 계산하는데 비하여 INS/GPS 통합 시스템의 방위각은 자이로스코프로부터 계산되고 GPS보다 자이로스코프의 샘플링 주파수가 높기 때문에 INS/GPS의 방위각 오차는 GPS 방위각 오차의 12%에 불과함을 알 수 있다.

본 시뮬레이션에서 사용한 자이로스코프 드리프트의 설정치는 상용 자이로스코프에 비교하면 크게 설정하였기 때문에 실제의 경우에는 방위각 오차가 더 작아질 것이다. 자이로스코프는 사용 환경특성으로 인하여 출력이 시간에 따라 변하고 오차가 누적되나, INS/GPS 통합 시스템은 GPS 수신기의 느린 샘플링에 의한 방위각 오차를 단시간 정확도를 가진 빠른 자이로스코프의 방위각 출력을 토대로 확장 칼만필터를 통하여 최적 상태로 추정하기 때문에 방위각 오차를 감소시킬 수 있다.

차량의 속도가 자동차와 같이 빠르면 GPS의 방위각 오차가 줄어드나, 농업기계의 경우는 작업속도가 느려 GPS의 방위각 오차가 커진다. 농업기계의 무인 주행에서는 위치 및 방위각 오차를 토대로 스티어링 명령을 수행하므로 GPS만 사용할 경우에는 기계가 정지해 있음에도 불구하고 핸들이 크게 떨리는 현상이 일어난다. 따라서 INS/GPS의 통합은 GPS만 사용할 경우와 비교하면 보다 낮은 진폭과 작은 주파수를 가진 스티어링 신호를 제공함으로써 안정된 작업을 제공할 수 있다. 또한 단시간 GPS 수신에 불안정하거나 불가능한 경우에는 자이로스코프와 속도계의 출력에 의존하여 무인주행을 가능하게 할 수 있다.

**다. GPS 위치 측정치 오차별 INS/GPS 시스템 위치 오차**

농작업의 종류에 따라 투입되는 작업기의 종류가 다르고 작업의 정확도 또한 달라진다. 따라서 GPS 수신기의 위치 오차에 따른 INS/GPS 통합 시스템의 성능을 파악하기 위하여 위치 측정치 잡음을 1.0, 0.5, 0.2 m로 가정하여 각각 시뮬레이션 후 그 결과를 표 3에 나타내었다.

INS/GPS 시스템의 RMS 위치 오차는 측정치 잡음 1.0 m에서 단일 GPS 오차의 35%, 0.5 m에서 40%, 0.2 m에서 60%로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 GPS 수신기의 위치 오차가 상대적으로 클 때는 단시간 안정성이 있는 INS에 의해 크게 보정되지만 GPS 수신기의 오차가 작을 때는 그 보정 효과는 줄어들기 때문이다. 그러나 단일 GPS보다 INS/GPS 시스템을 사용했을 때가 스티어링 안정성에 미치는 영향이 크다.

트랙터를 10 cm의 오차 범위 내에서 무인 주행하려고 하는 경우에는 최소한 수신 오차가 20 cm 정도인 DGPS를 사용하여야 할 것으로 생각된다. 또한 INS/GPS 통합시스템의 경우라도 무인주행 대상의 특성, 환경요건 및 사용하는 필터의 종류에 따라 오차의 보정 정도가 달라지므로 최적의 설계와 튜닝이 필수라고 사료된다.

**Table 3** Maximum, mean, and RMS errors for absolute position errors at speed 5 m/s during 1,000 second simulation when measurement noise of GPS position is 1.0, 0.5, and 0.2 m(1σ)

GPS position noise (m)	System	Direction	Maximum error (m)	Mean error (m)	RMS error (m)
1.0	GPS	East	4.10	0.80	0.99
		North	3.94	0.80	1.01
	INS/GPS	East	1.31	0.27	0.34
		North	1.42	0.29	0.36
0.5	GPS	East	2.10	0.40	0.50
		North	1.82	0.40	0.50
	INS/GPS	East	0.75	0.16	0.20
		North	0.89	0.17	0.21
0.2	GPS	East	0.79	0.16	0.20
		North	0.79	0.16	0.20
	INS/GPS	East	0.48	0.10	0.12
		North	0.49	0.10	0.12

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 각 1개의 가속도 자이로스코프와 속도계로 저가의 INS를 구성하고 1개의 GPS와 약결합, 중앙집중형 방식의 확장 칼만필터를 이용하여 시스템 및 측정치 방정식을 통합한 후 시뮬레이션을 통하여 농업기계의 무인주행 시 INS/GPS 통합 시스템이 주행의 정확도와 스티어링의 안정성에 주는 영향을 분석하였다.

상태오차 모델 대신에 차량의 위치, 속도, 가속도, 방위각 및 방위각 변화율, 속도계의 배율 오차, 자이로스코프의 배율 오차 및 바이어스 드리프트를 상태 변수로 하는 동적 모델을 시스템 상태방정식으로 사용하였고, 측정치 방정식에서는 GPS로부터의 위치, 속도 및 방위각, 속도계의 펄스 수, 자이로스코프의 출력전압을 측정치 벡터로 설정하였다.

시뮬레이션에 필요한 가정을 통하여 INS/GPS 통합 시스템의 성능을 테스트한 결과는 다음과 같다.

- (1) 확장 칼만필터를 사용한 INS/GPS의 RMS 위치 오차는 5 m/s의 속도로 직선경로를 주행했을 때 동쪽 및 북쪽 방향으로 각각 1.21 m와 1.24 m로, GPS로부터의 위치오차 10.01 m와 9.97 m에 비해 약 90% 감소하였다. 속도 오차는 0.5 m/s에서 0.02 m/s로 감소하였다.
- (2) 1, 3, 5 m/s의 각 속도별 위치 오차를 비교한 결과 유의한 차이를 보이지 않았고, GPS의 샘플링 주파수를 높이면 위치 오차는 감소하였다.
- (3) 단일 GPS의 방위각 오차 1.00E-3 radians에 비교해서 INS/GPS의 방위각 오차는 0.12E-3 radians로 88% 감

소하였다. 이는 GPS 수신기의 느린 샘플링에 의한 방위각 오차를 단시간 정확도를 가진 자이로스코프의 방위각 출력과 함께 확장 칼만필터를 통하여 최적 상태로 추정하여 보정되었기 때문이다.

- (4) INS/GPS 시스템의 RMS 위치 오차는 측정치 잡음 1.0 m에서 단일 GPS 오차의 35%, 0.5 m에서 40%, 0.2 m에서 60%로 증가하였다. 이는 GPS 수신기의 오차가 클 때는 INS에 의해 크게 보정되지만 작을 때는 보정 효과가 줄어들기 때문이다.
- (5) 농업기계의 경우 작업속도가 느려 GPS의 방위각 오차가 커지고 위치 오차와 함께 스티어링 명령을 계산하므로 무인주행 시 불안정한 스티어링의 원인이 되고 있다. INS/GPS의 통합은 GPS만 사용할 경우와 비교하면 보다 낮은 진폭과 작은 주파수를 가진 스티어링 신호를 제공함으로써 안정된 작업이 가능하고, 또한 단시간 GPS 수신에 불안정하거나 불가능한 경우에도 자이로스코프와 속도계의 출력에 의존한 무인주행을 가능하게 한다.

본 연구의 결과는 향후 포장 실험을 통하여 트랙터의 무인주행을 실시하고 작업환경 및 필터의 종류에 따른 INS/GPS 통합 시스템의 특성을 파악하는데 기초가 될 것으로 판단되었다.

#### 참고 문헌

1. Bell, T. 2000. Automatic tractor guidance using carrier-phase

- differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 25:53-66.
2. Bian, H., Z. Jin and W. Tian. 2005. Study on GPS attitude determination system aided INS using adaptive Kalman filter. *Measurement Science and Technology* 16:2072-2079.
  3. Devlin, G. 2007. Performance accuracy of low-cost dynamic non-differential GPS on articulate trucks. *Applied Engineering in Agriculture* 23(3):273-279.
  4. Gelb, A. 1974. *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge.
  5. Grewal, M. S., L. R. Weill and A. P. Andrews. 2001. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley & Sons, New York.
  6. Han, S. 2001. On Integration of GPS/INS. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
  7. Kim, S. C. 2002. Precision Positioning of Farm Vehicles using a Multi-GPS Receiver. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
  8. Ryu, J. and J. C. Gerdes. 2004. Integrating inertial sensors with global positioning system (GPS) for vehicle dynamic control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 126(2):243-254.