

# 확장형 칼만필터와 슬라이딩 모드 제어기법을 이용한 자율항법 알고리즘 개발

## Autonomous Navigation Algorithm Development with Extended Kalman Filter and Sliding Mode Control

윤득선\*, 유환신\*\*

Duk-Sun Yun\*, Hwan-Shin Yu\*\*

### 요 약

본 논문은 무인자동차의 자율주행 성능을 향상시키기 위한 알고리즘을 개발하고 이를 검증하여 정밀한 차량의 주행궤적을 수립할 수 있는 방법을 제시하였다. 무인자동차의 주행은 목표지점은 가지고 있으나 목표방향은 지정되지 않으므로 미래의 주행방향은 스스로 찾아야 한다. 따라서 확장형 칼만필터를 이용하여 주행 방향을 GPS와 INS로 연동함으로써 목표방향의 접근을 할 수 있으며 무인 주행 시에 발생할 수 있는 슬립과 횡방향의 이동에 취약한 기존의 무인 자율주행의 성능을 개선하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 이를 극복하는 알고리즘을 개발하였다.

### Abstract

In this paper, Authors develop and verify the algorithm for enhancing the performance of Unmanned vehicle's Autonomous navigation, and also propose the method of establishing much more precise Navigation locus.

Unmanned vehicle has a destination, however orientation is not notified, which make it find the future orientation itself. Extended Kalman Filter make it access to the desirable direction, which coupled with INS and GPS is proposed in this paper. Sliding mode control could overcome the side slip and lateral minor movement of the vehicle. The test result would shows the effectiveness of Extended kalman filter and Slide mode control for the navigation.

Key words : unmanned vehicle, extended kalman filter, sliding mode control, autonomous navigation

### Nomenclature

$\psi$  : yaw

$\theta$  : pitch

$\phi$  : roll

$\Phi_k$  : relationship matrix of  $X_k$  and  $X_{k+1}$

$\Phi$  : thickness of boundary layer

$\delta w_x, \delta w_y, \delta w_z$  : bias of the gyro sensor

$x_p, x_f$  : receiver clock's phase and frequency bias

$x_k$  : state variable vector at  $t_k$ ,  $[n \times 1]$

\* 인제대학교 자동차기계공학부(School of Mechanical and Automotive Eng., Inje University)

\*\* 호원대학교 자동차기계공학부(Division of Automotive Mechanical Eng., Howon University)

· 제1저자 (First Author) : 윤득선

· 교신저자(Corresponding Author) : 유환신

· 접수일자 : 2007년 10월 9일

- $u_k$  : given white noise of process,  $[n \times 1]$
- $u$  : controller input
- $v_k$  : given white noise of measurement,  $[n \times 1]$
- $H_k$  : relationship matrix of the state and measurement at  $t_k$ ,  $[m \times n]$
- $P_k$  : measurement noise covariance
- $Q_k$  : process noise covariance

I. 서 론

무인자동차의 성능을 향상시키고 항법의 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 무인자동차의 하드웨어적인 발달은 거의 완숙단계에 이르렀으나 소프트웨어적인 수준은 아직 미흡한 것이 실정이다 [1-3].

무인자동차의 항법에는 하드웨어의 성능도 중요하지만 하드웨어의 성능을 최적화시키고 출력된 데이터를 적절히 가공하여 최적의 주행궤적을 생성하는 알고리즘의 개발이 시급하다 할 수 있다.

주행성능의 발달을 위해서 다방면으로 연구가 진행되어 오고 있으나 차량의 횡방향 운동의 영향은 아직까지는 무시되고 있다. 횡방향 운동은 차량의 동적인 측면에서는 급회전이나 슬라럼 통과와 같은 경우에 발생하기 쉬운 운동이지만 험로를 통과하는 경우에는 빈번하게 발생할 수 있다. 즉, 차량의 주행안정성은 횡방향 운동의 영향을 많이 받는다.

본 논문에서는 무인자동차의 자율항법의 최적화를 위하여 확장형 칼만필터를 설계하고 GPS와 INS의 데이터를 융합하여 확장형 칼만필터에서 항법에 적합한 정보를 추출하고 장애물의 검출 시 회피하여 최적으로 복귀하는 것을 목표로 하였으며 슬라이딩 모드 컨트롤러를 이용하여 슬립이 발생하는 차량의 궤적을 보완하고 이를 시뮬레이션 함으로써 필터의 성능을 검증하고 성능의 향상을 확인하였다.

II. 무인자동차의 시스템 구성

2-1 무인자동차의 구조

본 논문의 무인자동차는 그림 1에서 보이듯이 100cc 출력을 가진 ATV(all terrain vehicle)을 개조하였다. 횡방향 제어는 조향축에 직류모터를 직접 연결하고 동축회전 엔코더를 이용하여 조향각을 제어하였다. 종방향은 텐던방식으로 되어있는 기존 시스템에 RC서보모터로 제어하였다.

또한 센서 시스템은 초음파 센서, 자이로 센서 그리고 가속도 센서 등이다. 초음파 센서는 근거리의 장애물을 검출하여 회피하도록 정보를 제공하며 자이로 센서는 선회방향의 각속도를 생성하고 가속도계는 각 축방향의 가속도를 생성하여 정보를 제공한다.



그림 1. 관성항법 시스템이 장착된 측면모습  
Fig. 1. Side view of inertial navigation system installation

2-2 무인자동차의 항법 시스템

2-2-1 확장형 칼만필터

확장형 칼만필터(EKF: extended kalman filter)는 무인자동차의 주행궤적을 추적함에 있어서 간접적으로 계수를 추정하여 접근하는 방식으로서 추가된 상태 변수와 같은 미지의 계수들을 인위적으로 범위를 한정하고 시스템의 모델을 테일러 급수로써 선형화하여 단순한 상태추정 문제로 변형하는 방법이다.

2-3 INS와 GPS를 융합한 확장형 칼만필터

EKF 알고리즘을 이용한 센서의 바이어스 추정은 아래의 시스템 모델과 관측모델을 이용하였다 [7].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F_k x_k + G_k u_k \\ z &= H_k x_k + v_k \end{aligned} \quad (1)$$

위의 시스템 모델을 이산화하면 아래와 같으며 각 이산시점에서 센서로부터 데이터를 검출한다.

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + u_k \quad (2)$$

상태변수의 설정은 아래와 같이 할 수 있다.

$$E[u_k \cdot u_k^T] = \begin{cases} P_k, & i = k \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

일반적으로  $k$ 까지 정보가 주어진 경우, 시간  $k+1$ 에서의 상태추정은  $\hat{x}_{k-}$ 라 정의하면 이때의 추정오차는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$e_{k-} = x_{k-} - \hat{x}_{k-} \quad (6)$$

그리고 잡음을 가진 측정값  $z_k$ 와 초기 추정치  $\hat{x}_{k-}$ 를 선형적으로 융합하면 상태추정변수를 갱신할 수 있는 식으로 유도할 수 있다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_{k-}) \quad (7)$$

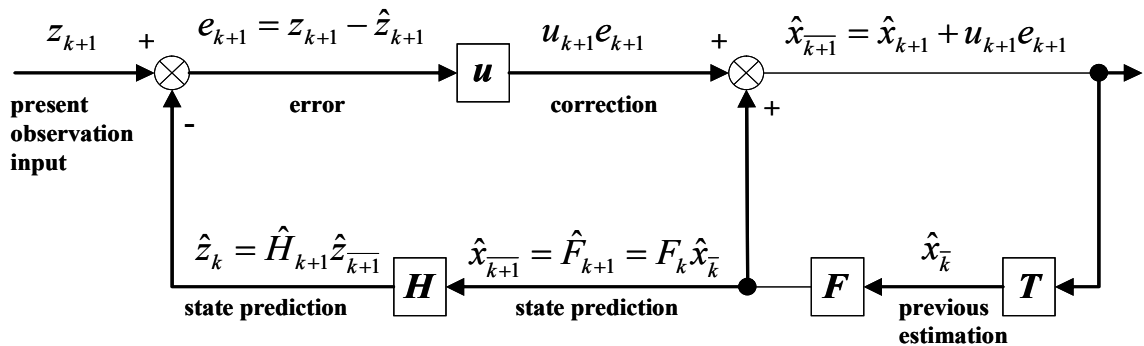


그림 2. 무인자동차의 상태 관측 모델의 신호흐름도  
Fig. 2. Information flow of state and observation model for the unmanned vehicle

$$x = [\psi \ \theta \ \phi \ \delta\omega_z \ \delta\omega_y \ \delta\omega_x \ \ddot{x}_b \ \ddot{y}_b \ \ddot{z}_b]^T \quad (3)$$

또한, 공정잡음  $u_k$ 과 측정잡음  $v_k$ 는 아래와 같으며  $E[u_k \cdot v_k^T] = 0$ 이 되므로 서로 무관한 변수임을 알 수 있다.

공정잡음 공분산 행렬:

$$E[u_k \cdot u_k^T] = \begin{cases} Q_k, & i = k \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

측정잡음 공분산 행렬:

위의  $\hat{x}_k$ 는 갱신된 상태추정변수이며  $K_k$ 는 미정의 칼만이득이다. 칼만이득을 상태오차추정 공분산 행렬  $P_k$ 에 대하여 정리하면 아래의 식과 같다.

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

칼만이득을 이용하여 상태추정변수의 평균제곱오차(MSE)를 최소화할 수 있으며 이로써 시스템의 다음 상태를 예측하고 실제 모델과 측정된 데이터 간의 오류를 최소화할 수 있다[4].

그러므로 그림 2에 보이듯이 예측과 실측에 의한 데이터의 수정을 반복함으로써 필터링의 효과를 얻을 수 있게 된다. 칼만이득을 상태오차추정 공분산

행렬  $P_k$  과의 관계식을 유도하면 아래와 같다.

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-1} \quad (9)$$

### 2-4 시스템 바이어스 오차 모델링 알고리즘 개발

#### 2-4-1 GPS 오차 모델링

GPS의 상태변수는 수신기의 동적모델과 시계모델을 고려해야만 한다. 또한  $x, y, z$  축의 위치, 속도, 시계 바이어스, 부유(drift) 오차를 포함하고 있어야 하므로 아래의 식 (10)과 같이 기술할 수 있다 [7].

$$\dot{x}_{GPS} = F_{GPS} x_{GPS} + w_{GPS} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} \\ O_{2 \times 2} & F_y & O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} \\ O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} & F_z & O_{2 \times 2} \\ O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} & F_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \\ w_c \end{bmatrix}$$

$$F_x = F_y = F_z = F_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x_c = \begin{bmatrix} x_p \\ x_f \end{bmatrix}$$

여기서, 부유오차는 수신기 시계의 위상과 주파수의 오차이며 식 (11)의 상태변수모델로 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_c = F_c x_c + w_c \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_p \\ w_f \end{bmatrix}$$

식 (11)을 이산화 시키면 식 (12)와 같다.

$$x_{k(GPS)} = \Phi_{\Delta t(GPS)} x_{k+1(GPS)} + w_{k+1(GPS)} \quad (12)$$

여기서,  $x_{GPS} = [x \dot{x} y \dot{y} z \dot{z} x_p x_f]$  이며 측정식  $z_{GPS}$  는 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$z_{GPS} = \Delta \rho = \hat{\rho} - \rho = H_{GPS} x_{GPS} + v_{GPS} \quad (13)$$

여기서, 행렬  $H$  는 GPS 위성과 수신기의 연결을 나타내므로 측정연결행렬(measurement connection matrix)라 한다. 만약, 가시위성이 4개 이하가 되면 해를 구할 수 없으므로 본 논문에서는 가시위성이 4개 이상 확보된 것을 가정하여 식 (14)와 같이 정의하였다.

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} s_{x1} & s_{y1} & s_{z1} & 1 \\ s_{x2} & s_{y2} & s_{z2} & 1 \\ s_{x3} & s_{y3} & s_{z3} & 1 \\ s_{x4} & s_{y4} & s_{z4} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

#### 2-4-2 INS 오차 모델링

관성항법에서 고려할 오차는 위치오차  $\delta P$ , 속도 오차  $\delta V$ , 자세오차  $\delta A$  등이 있으며 가속도 센서의 바이어스 오차  $\delta f^b$ , 자이로 센서의 바이어스 오차  $\delta w_b$  도 고려해야만 한다. INS 오차모델의 시스템방정식과 성분은 식 (15)와 같다.

$$x_{INS} = [\delta P^{nT} \delta V^{nT} \delta A^{nT} \delta f^{nT} \delta w^{nT}]^T \quad (15)$$

$$\delta P^n = [\delta P_N \delta P_E \delta P_D]^T$$

$$\delta V^n = [\delta V_N \delta V_E \delta V_D]^T$$

$$\delta A^n = [\delta A_N \delta A_E \delta A_D]^T$$

$$\delta f^n = [\delta f_N \delta f_E \delta f_D]^T$$

$$\delta w_{ib}^n = [\delta w_{ibN}^n \delta w_{ibE}^n \delta w_{ibD}^n]^T$$

여기서, 무인자동차에 정의된 좌표계 상의 가속도 센서와 자이로센서에서의 데이터는 각각  $\delta f^b, \delta w_b$  으로 표현할 수 있으며 항법 좌표계로 변환이 되어야 한다. 따라서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta f^n = C_b^m \delta f^b \quad (16)$$

$$\delta w_{ib}^n = C_b^m \delta w_{ib}^b$$

따라서 위치, 속도, 자세에 대한 방정식 오차모델을 표현하면 식 (17)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}^n &= -(2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times \delta V^n \quad (17) \\ &\quad + f^n \times \delta A^n + \delta G^n + C_b^m \delta f^b \\ \delta \dot{P}^n &= -w_{ie}^n \times \delta P^n + \delta V^n \\ \delta \dot{A}^n &= -w_{ie}^n \times \delta A^n + w_{\epsilon}^n + C_b^m \delta w_{ib}^b \end{aligned}$$

그러므로 INS의 측정치는 무인자동차의 위치값  $P_{INS}$ 와 GPS의 위치값  $P_{GPS}$ 의 차이값으로 표현할 수 있으며 아래와 식 (18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{INS} &= P_{INS} - P_{GPS} = H_{INS} x_{INS} + v_{INS} \\ H_{INS} &= [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] \quad (18) \end{aligned}$$

2-5 통합필터 설계

GPS와 INS를 통합하는 필터를 설계하는 방식은 GPS와 INS의 자체의 필터를 통과한 데이터를 통합하는 것이므로 이중필터의 효과를 누릴 수 있다.

여기서, 통합필터의 측정방정식과 구성행렬  $H$ 는 식 (19)과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{INS} &= H_{INS} x_{INS} + v_{INS} \quad (19) \\ &= [H \quad 0_{6 \times 9}] \begin{bmatrix} x_{GPS} \\ x_{INS} \end{bmatrix} + v_{INS} \\ H &= \begin{bmatrix} \frac{1}{R_m+h} & 0 & 0000 \\ 0 & \frac{1}{R_t+h} & 0100 \\ 0 & 0 & 1001 \\ 0 & 0 & 0100 \\ 0 & 0 & 0010 \\ 0 & 0 & 0001 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그림 3에서는 필터 시스템의 내부 구성도를 보이고 있으며 확장형 칼만필터에서의 최종출력은 항법의 구현에 필요한 정보이다.

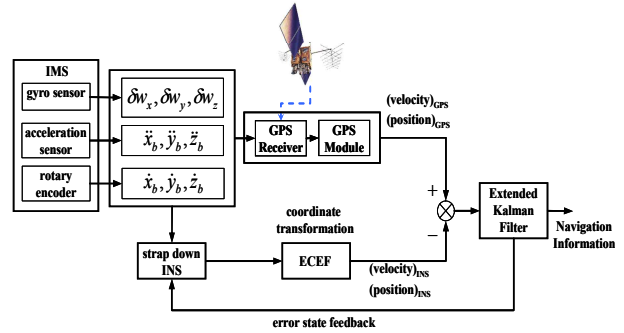


그림 3. 항법 시스템의 내부 구조도  
Fig. 3. Internal block diagram of navigation system

2-6 슬라이딩 모드 제어기

무인자동차가 선회하는 경우에는 차량의 횡방향 운동이 제어되지 못하면 무인자동차의 연산된 궤도와는 상관없이 급격한 스핀이 발생할 수 있다. 이러한 차량에 제동력과 구동력을 가하여 줌으로써 요 모멘트를 발생시켜주면 무인자동차의 조향입력이 없어도 횡방향의 거동을 제어할 수 있다.

슬라이딩 모드 제어기는 상태공간상에서 특정 슬라이딩 평면을 규정하고 상태벡터를 이 평면에 도달하도록 제어하여 수렴토록 하는 기법이다. 일반적인 슬라이딩 모드 제어에서 단일입력 시스템을 고려하면 아래와 같다 [6].

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (20)$$

여기서, 스칼라  $x$ 는 플랜트의 출력,  $u$ 는 제어,  $x = [x \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터이다. 제어의 목적은 상태  $x$ 가 궤적  $x_d = [x_d \dot{x}_d \dots x_d^{(n-1)}]^T$ 을 추종하도록 하는 것이며 추종오차는 아래와 같다.

$$x = [x \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T \quad (21)$$

상태공간  $R^{(n)}$ 에서의 슬라이딩 평면은 아래와 같다.

$$s(x;t) = S(t)\hat{x} = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(n-1)} \hat{x} \quad (22)$$

여기서,  $\lambda$ 는 양의 상수,  $n$ 은 차수이며 초기상태

$x_d(0) = x(0)$ 에서  $x \equiv x_d$ 는 시스템의 상태가 슬라이딩 평면  $S(t)$  위에 존재하거나 수렴해야 한다. 따라서 아래의 수식을 만족해야만 한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = s \dot{s} \leq -\eta |s| \quad (23)$$

여기서,  $\eta$ 는 양의 상수이며 시스템의 거동이 평면 위에 존재하려면 평면  $S(t)$ 와  $s$ 의 거리가 감소해야 한다. 시스템을 2차로 가정하면 식 (24)와 같이 쓸 수 있으며 따라서 식 (21)과 (22)는 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\ddot{x} = f + u \quad (24)$$

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right) \hat{x} = \dot{\hat{x}} + \lambda \hat{x} \quad (25)$$

$$\dot{s} = \ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda \dot{\hat{x}} = f + u - \ddot{x}_d + \lambda \dot{\hat{x}} \quad (26)$$

여기서,  $u$ 는  $\dot{s} = 0$ 을 만족시키기 위한 제어입력의 추정된 근사값으로서 아래와 같다.

$$\hat{u} = -\dot{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{\hat{x}} \quad (27)$$

여기서, 식 (24)를 만족하기 위하여 추정된 입력  $\hat{u}$ 에 불연속 항을 추가하여 제어입력  $u$ 를 아래의 수식으로 구할 수 있다.

$$u = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (28)$$

여기서,  $\operatorname{sgn}$ 은 부호함수이며 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(s) &= +1 \text{ if } s > 0 \\ \operatorname{sgn}(s) &= -1 \text{ if } s < 0 \end{aligned} \quad (29)$$

정리하면,

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = [f - \dot{f} - k \operatorname{sgn}(s)]s = (f - \dot{f})s - k|s| \quad (30)$$

여기서,  $k = F + \eta$  이므로

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = (f - \dot{f})s - (F + \eta)|s| \quad (31)$$

여기서,  $\operatorname{sgn}$  함수의 영향으로 평면을 지나치고 복귀하는 연산을 반복하게 되어 채터링이 발생하게 되므로 경계층을 아래의 포화함수로써 연속적으로 제어할 수 있다 [8].

$$\begin{aligned} \operatorname{sat}(s/\Phi) &= s/\Phi & \text{if } |s/\Phi| \leq 1 \\ \operatorname{sat}(s/\Phi) &= \operatorname{sgn}(s/\Phi) & \text{if } |s/\Phi| \geq 1 \end{aligned} \quad (32)$$

따라서 최종 제어 입력은 아래와 같다.

$$u = \hat{u} - k \cdot \operatorname{sat}(s/\Phi) \quad (33)$$

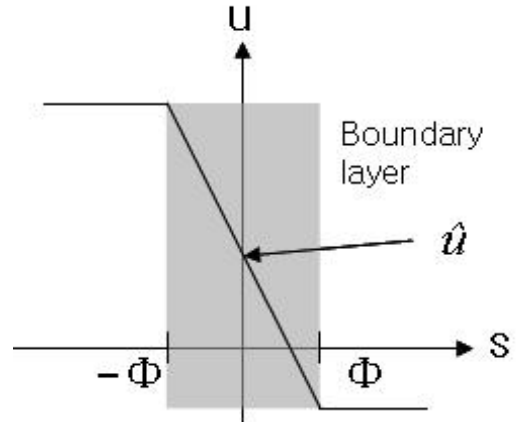


그림 4. 경계층의 제어 구조도  
Fig. 4. Control Interpolation in the Boundary Layer

본 논문에서 시뮬레이션하기 위하여 설정한 차량의 모델은 일반적인 2 자유도 모델로서 설정하였다. 2 자유도 차량모델인 자전거 모델에서 제어목적은 차량의 선회 시 발생하는 요우 모멘트를 제어하여 주행 안정성을 확보하는 것이다. 즉, 슬라이딩 모드 제어기에서 요우 모멘트를 슬라이딩 평면 위에 존재하도록 한다. 여기서 설정한 타이어에 작용하는 선회력을 비선형 함수로 하는 비선형 차량모델은 아래의 수식과 같다 [5].

$$\dot{x} = f(x, \delta_f) + bu \quad (34)$$

여기서 타이어 모델은 선회력과 제제동력의 조합력을 분해하여 나타내는 Pacejka의 Magic Formular를 사용하였고 타이어 모델의 계수는 일반 승용타이어의 실험데이터를 곡선적합하여 구하였다 [5].

제어입력인 식 (33)이 슬라이딩 평면상에 존재하도록 하기 위해서는  $s = \dot{s} = 0$ 이어야 하므로,

$$\begin{aligned} s &= S\dot{x} + \dot{S}\hat{x} = S(f + bu - \dot{x}_d) \\ &= S(\dot{x} - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x} = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

여기서, 등가제어입력과 상태식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{eq} &= -(Sb)^{-1}[S(f - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x}] \quad (36) \\ \hat{\dot{x}} &= \dot{x} - \dot{x}_d = f + bu_{eq} - \dot{x}_d \\ &= f - b(Sb)^{-1}[S(f - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x}] - \dot{x}_d \\ &= [I - b(Sb)^{-1}S](f - \dot{x}_d) - b(Sb)^{-1}\dot{S}\hat{x} \end{aligned}$$

비선형계에서는 경계층의 설정이 어려우므로 선형화하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\partial f}{\partial x}x + \frac{\partial f}{\partial \delta_f}\delta_f + \hat{b}u_{eq} \quad (37) \\ &= Ax + \hat{b}u_{eq} + L\delta_f \end{aligned}$$

여기서, 등가제어입력에 대한 추정치는

$$\hat{u} = -(S\hat{b})^{-1}[S(\hat{f} - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x}] \quad (38)$$

이며, 식 (36)의 상태식을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}} &= \dot{x} - \dot{x}_d \\ &= [I - \hat{b}(S\hat{b})^{-1}S](f - \dot{x}_d) - b(Sb)^{-1}\dot{S}\hat{x} \\ &= [I - \hat{b}(S\hat{b})^{-1}S]A\hat{x} - \hat{b}(S\hat{b})^{-1}\dot{S}\hat{x} \\ &= ([I - \hat{b}(S\hat{b})^{-1}S]A - \hat{b}(S\hat{b})^{-1}\dot{S})\hat{x} \\ &= A_{eq}\hat{x} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서, 제어입력이 슬라이딩 제어의 필요조건인

식 (23)을 만족해야 하므로 식 (35)를 전개하여 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= S\dot{x} + \dot{S}\hat{x} = S(f + bu - \dot{x}_d) \quad (40) \\ &= S(\dot{x} - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x} \\ &= S(f + b(-(S\hat{b})^{-1}[S(\hat{f} - \dot{x}_d) \\ &\quad + \dot{S}\hat{x} + k \operatorname{sgn}(s)]) - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x} \end{aligned}$$

여기서, 공칭 파라미터의 불확실성을 고려하면  $|f - \hat{f}| \leq F$  이고  $\xi = \frac{\hat{b}}{b} = S\hat{b}(Sb)^{-1}$  이므로 아래와 같은 수식을 만족해야 한다.

$$\xi(|SF| + \eta) + (1 - \xi)S\hat{b}|\hat{u}| \leq k \quad (41)$$

등가제어 입력값은 각각의 상태값들이 슬라이딩 평면에 도달한 경우 상태를 유지시켜주는 값이며 이 상태를 유지시키기 위하여 불연속 항들을 추가한 것이다. 또한 슬라이딩 제어의 단점인 채터링을 방지하기 위하여 포화함수를 적용하면 최종적인 제어입력은 아래와 같이 쓸 수 있다[6].

$$\begin{aligned} u &= -(S\hat{b})^{-1}[S(\hat{f} - \dot{x}_d) + \dot{S}\hat{x}] \quad (42) \\ &\quad + [\xi(|SF| + \eta) + (1 - \xi)|\hat{u}|] \operatorname{sat}(s/\Phi) \end{aligned}$$

### III. 실험 및 검증

#### 3-1 필터의 성능검증

필터의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 표 1에서는 시뮬레이션에 필요한 무인자 동차의 주행 시나리오를 나타내었다. 필터의 성능을 실험하는 단계에서는 목적지에 정확히 도달하는 성능을 관측하여 필터의 성능을 확인하였다.

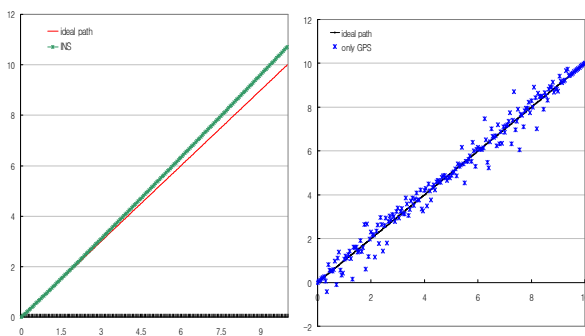
표 1. 무인자동차의 모의실험 주행 시나리오

Table 1. Scenario for the unmanned vehicle movement

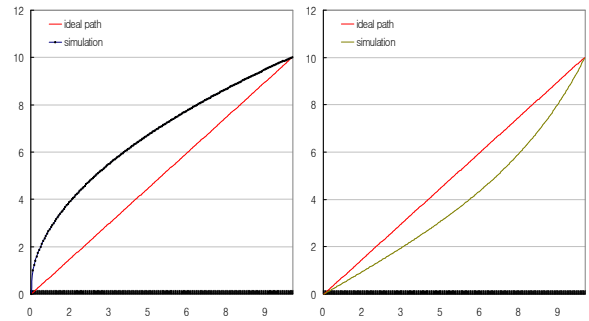
Time[sec.]	Movement	Velocity	Acceleration
0~10	stop	0 m/sec	0
10~20	acceleration	increase	0.1 m/sec <sup>2</sup>
20~120	uniform velocity	1 m/sec	0
120~130	deceleration	decrease	0.1 m/sec <sup>2</sup>
130~	stop	0 m/sec	0

그림 5에서는 시뮬레이션의 결과를 보이고 있다. (a)~(d)까지의 모든 결과에서  $x, y$ 축 모두 거리[m]를 나타내며 시간에 대한 차원은 표 1의 주행 시나리오에서 나타내었다.

그림 5의 (a)는 필터에서 INS의 성능만을 검증하여 본 결과이다. 출발지에 위치하고 자세는 목적지를 향하여 출발하였음에도 불구하고 오차를 누적하여 도착지는 목적지와 약 1m 정도 벗어나게 되었다. 그림 5의 (b)는 GPS의 정밀도에 대한 시뮬레이션 결과이다. 무인자동차가 지정된 경로를 주행하는 경우에 GPS에서 수신한 위치 데이터를 표현한 것이다. 그림 5의 (c)는 출발지와 목적지는 같으나 주행방향을  $y$ 축 방향으로  $45^\circ$  벗어나게 하고 그림 5의 (d)는  $x$ 축 방향으로  $20^\circ$  벗어나게 한 후의 시뮬레이션 결과이다. EKF의 역할로써 목적지에 정확하게 도달하는 것을 볼 수 있었으나 주행경로를 추종하지는 않고 있다.



(a) INS simulation result (b) GPS simulation result



(c)  $+45^\circ$  propensity(EKF) (d)  $-20^\circ$  propensity(EKF)  
그림 5. EKF의 성능평가

Fig. 5. EKF performance evaluation

### 3-2 실차실험

실차실험은 무인자동차가 최적으로 선정된 궤적을 주행 중에 장애물을 만나게 되어 회피동작을 수행한 후, 다시 최적의 주행경로로 회귀하는 시나리오를 구성하여 실시하였다. 직선도로에 설치된 장애물은 초음파 센서로 감지하여 회피동작을 수행하도록 프로그램 하였으며 회귀동작은 EKF를 이용한 알고리즘으로 수행하였다.

직름이 40cm인 원통형 장애물의 위치는 출발점으로부터 10m 경과된 곳 한 가운데에 설치하였고 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 무인자동차의 속도는 등속으로 1m/sec가 되도록 제한하였다.

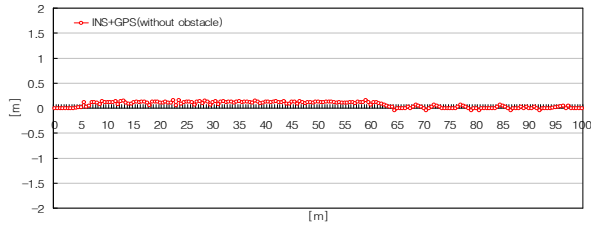
그림 6의 (a)는 무인자동차의 주행성능을 검증하기 위한 실험이다. 장애물을 설치하지 않은 주행조건에서 GPS와 INS만으로 최적의 주행경로로 지정된 직선도로를 추종하는 성능을 검증하였다. EKF를 적용하지 않은 결과는 20cm 정도의 오차를 보이며 경로에서 벗어났으나 보정이 되면서 수렴하였다.

그림 6의 (b)는 INS와 GPS만을 기반의 초음파 센서로 장애물을 회피하여 안정성을 높은 주행성능을 확인하였으나 25cm 정도 이탈하게 되었다.

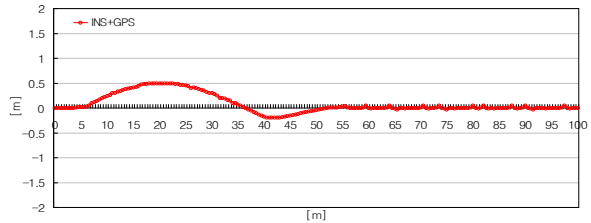
그림 6의 (c)는 INS와 GPS를 융합한 EKF를 이용한 최적화된 항법 시스템으로 주행성능을 검증한 결과이다. 장애물을 회피하고 다시 주행경로로 복귀하는 거리가 그림 6의 (b)의 경우는 출발점으로부터 37m이었으나 그림 6의 (c)의 경우는 31m로서 6m 감소하는 성능향상을 보이고 있다. 그림 6의 (b)의 경우는 최고속도로 설정된 1m/sec 보다 더 낮은 속도로 주행하여 목표속도에 미달하였으나 그림 6의 (c)와



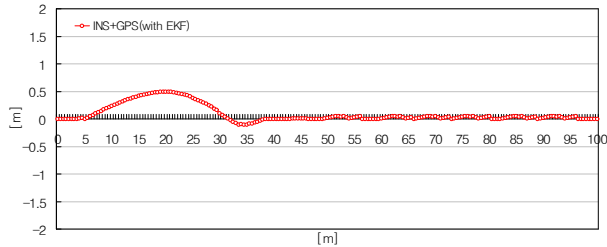
같이 EKF를 연동한 경우에는 최고속도도 1m/sec에 이르렀을 뿐 아니라 등속주행으로 인하여 데이터의 간격이 일정하게 획득되었다.



(a) case of INS+GPS without obstacle and EKF



(b) case of INS+GPS without EKF



(c) case of INS+GPS with EKF

그림 6. EKF로 인한 성능향상 결과 그래프  
Fig. 6. The improved navigation result of the EKF

표 2에서는 슬라이딩 모드 제어기에 사용되는 파라미터를 보이고 있다. 본 논문에서의 실험은 무인자동차가 선회하는 경우에만 제어기가 작동하도록 하

여 실차실험을 구성하였다. 즉, 조향입력이 없는 경우에는 제어기에 입력값이 0이 되어 발산하므로 실차실험에서는 사용할 수 없다. 따라서 조향이 발생하는 경우, 슬라이딩 모드 제어기에서 제어목적인 요우 모멘트가 0에 수렴하도록 제동력을 가하였다.

표 2. 슬라이딩 모드 제어기에 사용되는 파라미터  
Table 2 Nominal Vehicle parameters for controller

Symbol	Unit	Value	Description
m	kg	800	mass
Iz	kg-m <sup>2</sup>	1200	Inertia of Yaw
a	m	0.4	distance of front axle from c.g.
b	m	0.4	distance of front axle from c.g.
Symbol	Value	Symbol	Value
a1	-10.12	a5	0.028
a2	1260	a6	-0.05
a3	1040	a7	0.39
a4	1.987	a8	-0.44

그림 7에서는 무인자동차가 주행 중 선회하는 경우에 발생하는 요우 모멘트를 3축 가속도계를 사용하여 검출한 결과이다.

슬라이딩 모드 제어기를 사용하지 않은 경우에는 요우 모멘트가 최대 0.2g 까지 발생하였으나 제어기를 사용하여 제동력을 발생시켜 타이어의 슬립을 줄여주는 경우에는 요우 모멘트는 0.15g 까지 감소하는 특성을 보여주었다.

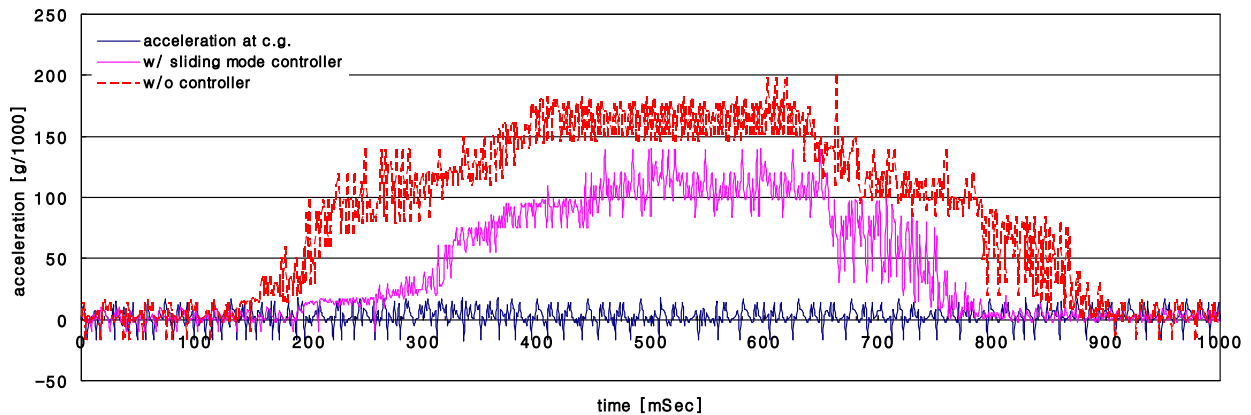


그림 7. 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 선회 시의 요우 모멘트  
Fig. 7. Yaw Moment while J-turn with Sliding Mode Controller

#### IV. 결 론

본 논문에서는 INS와 GPS를 융합하고 EKF를 이용하여 오차를 최소화하여 항법의 성능을 최적화하였다. 또한 차량의 선회 시에 발생하는 요우 모멘트를 제어하기 위한 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 타이어의 슬립을 최소화함으로써 항법의 정밀도를 향상시켰다.

슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 타이어의 슬립으로 인한 오차의 누적을 제거하는 알고리즘은 무인자동차의 주행속도가 느린 것을 고려하면 횡방향의 슬립에 의한 영향은 적으나 오차가 누적되는 관성항법에는 성능의 향상을 보임을 알 수 있었다. 추후에는 요우 모멘트를 직접입력이 가능하도록 HILS를 구축하여 두 개의 알고리즘의 융합에 대한 검증을 수행하고 개선된 알고리즘을 실차에 적용하는 연구가 수행되어야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2007년도 호원대학교 교내 학술연구비에 의해 조성된 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Borenstein, Y. Koren, "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, 1991.

[2] P. H. Winston, *Artificial Intelligence* 3th edition, Addison-Wesley, pp. 213-349, 1993. ISBN 0-291-53377-4

[3] A. Zelinsky, "A Mobile Robot Exploration Algorithm", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 6, pp. 707-717, 1992.

[4] 김명준, 김의선, 류영재, 임영철, "자기 센서 방식 자율 주행 차량의 경로 인식 성능 개선", *센서학회지*, 제12권, 제5호, pp. 211-217, 2003.

[5] D. S. Yun, H. Y. Lim, H. S. Yu, and J. H. Kim, "Collision Avoidance Algorithm and System Development for Unmanned Driving Safety of All Terrain Vehicle", *Jo*

*urnal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, No. 10, pp. 104-110, 2005.

[6] J.H. Song, H.S. Kim, B.S. Kim, "Vehicle Longitudinal and Lateral Stability Enhancement using a TCS and Yaw Motion Controller", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 49-57, 2007.

[7] 유환신, "GPS와 INS의 센서융합을 이용한 확장형 칼만필터 설계 및 자율항법용 회피알고리즘 개발", *한국항공학회지*, Vol. 2, No. 3, pp. 28-288, 2007.

[8] Y.S. Nam, H.Y. Jang, "Fault Detection System Design and HILS Evaluation for the Smart UAV FCS", *ICAS*, vol. 5, no. 1, pp. 104-109, 2007.

#### 윤 득 선 (尹得善)



1996년 2월: 국민대학교 자동차공학과(공학사)

1998년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학석사)

2002년 8월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학박사)

관심분야 : autonomous navigation

#### 유 환 신 (劉桓臣)



1993년 2월: 동국대학교 전자공학과(공학사)

2001년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학석사)

2006년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 (공학박사)

관심분야 : car electronics