

무인차량의 강인한 조향제어 시스템 설계에 관한 연구

Development of Steering System for Unmanned Vehicle by Using Robust Control

정 승 권, 김 인 수, 박 기 선, 이 종 년, 이 만 형

(Seung-Gweon Jeong, In-Soo Kim, Kie-Seon Park, Jong-Nyun Lee and Man-Hyung Lee)

Abstract : The automatic steering system for unmanned vehicle was developed. The magnet and MR (Magnetoresistive) sensors are used for the lane detecting system. The lateral distance between sensor and the center line of the road is determined by the linearization of the distance according to the output. The PD control theory is used for the design of the controller to compare with H_{∞} control theory. The H_{∞} control theory is used for the design of the controller to reduce the disturbance. The performance of the PD controller and H_{∞} controller is compared in simulations and tests. The PD controller is easy to tune in the test site. The H_{∞} controller is robust for the disturbances in the test results.

Keywords : unmanned vehicle, steering control, MR(Magnetoresistive) sensor, H_{∞} control

I. 서론

오늘날 우리나라는 무역 교역량이 세계 11위를 차지하는 무역 대국임에도 불구하고 수출입 화물량의 증가 속도에 비해 항만·도로를 비롯한 사회 간접 자본인 물류시설의 처리능력은 크게 부족한 실정이다. 항만에서 수출입 화물의 취급을 자동화하여 시간과 비용을 절감함으로써, 물류비가 차지하는 비율을 낮추어 국가 경쟁력을 극대화시키는 것이 국가적인 과제로 대두되고 있다. 이를 위하여 네덜란드 로테르담의 ECT 터미널, 일본의 카와사키 터미널, 영국의 템즈 터미널 등에서는 자동화 또는 반자동화가 많이 이루어져 있는 상태이고, 현재도 이에 관련된 연구를 지속적으로 추진하고 있다. 따라서, 우리나라에서도 항만 자동화를 국가 최우선 과제중의 하나로 지정하여 수행해야 할 필요성이 있다. 항만 자동화에 사용되는 무인 컨테이너 운반차량(Unmanned Container Transporter, 이하 UCT)에 대한 연구는 기계부 설계, 운항 시스템, 도킹 시스템, 장애물 감지 시스템, 교통 통제 등으로 나눌 수 있다[1]. UCT의 운항은 무인 주행으로 이루어지며, UCT의 운항 시스템의 개발에 있어 기본적으로 무인 주행에 대한 연구가 수행되어야 한다. UCT의 무인 주행에는 속도 제어, 조향 제어, 충돌 회피 등의 연구가 필요하다.

도로상에서 차량의 무인 주행을 위해서는 차량의 종방향 제어 및 횡방향 제어가 수행되어야 한다. 종방향 제어는 차량의 속도를 조정하여 차량간의 간격이 적절하도록 조절하는 것이다. 자동으로 차량의 가감속 운동을 제어함으로써 자동순항주행, 차간거리 유지, 충돌방지 등이 가능하다. 종

방향 제어를 위한 제어알고리즘으로는 PID기법, 피드백 선형화 기법, 적응제어기법, 퍼지-슬라이딩모드 제어기법 등을 적용한 연구들이 있다. 횡방향 제어는 운전자가 편안한 승차감을 느끼면서 도로의 차선을 따라 주행을 하도록 하는 자동 조향을 말한다. 횡방향 제어는 차선의 유지 및 차선변경 등의 기동 시에 필요하며 센서를 통해 기준선 및 차선을 인식하고 이로부터 측정된 횡방향 거리오차를 제어에 사용하게 된다. 차선 유지를 위해서는 기준선과 횡방향 거리오차를 영으로 수렴하도록 하는 조향각을 제어입력으로 인가하여 제어가 가능하며, 차선변경을 위해서는 이동하고자 하는 차선까지의 거리만큼 횡방향 거리오차를 발생시켜 이를 영으로 수렴하도록 조향각 입력을 인가하여 제어한다[2]-[4].

차량의 횡방향 제어에 관련한 연구는 선형과 비선형 제어 이론을 함께 사용하여 왔다. 선형 이론으로는 궤환 조향 제어 설계를 위해 근궤적을 사용한 방법이 있으나, 조향제어를 위해서 곡률 같은 전방 제어 정보를 사용하지 못하였다. 또한 횡방향의 동역학은 차량의 중량, 관성모멘트, 종방향 속도, 타이어의 강성 및 노면과의 마찰 등의 영향을 받으며, 이러한 파라미터는 실제 주행상황에서 시간에 따른 변화가 심하다. 이는 결국 횡방향 제어시스템에 있어서 커다란 불확실성으로 작용하게 되고 이러한 불확실성을 보상할 수 있는 견실한 성능을 보장하는 견실 제어기법이 요구된다. 무인 주행 차량의 횡방향 안내를 위한 참조/탐지 시스템은 크게 두 가지로 앞 보기(look-ahead) 시스템과 아래 보기(look-down) 시스템으로 나눌 수 있다. 앞 보기 시스템은 비전 시스템과 같이 차량의 앞부분에서 횡방향으로 떨어진 거리를 측정함으로써 인간의 행동을 모방하는 시스템이다. 이 시스템은 일반적으로 속도가 증가하면 사람의 행동양식과 비슷하게 측정하는 거리가 앞으로 증가하게 된다. 여러 연구기관에서 비전 시스템을 이용한 실험이 성공적으

논문접수 : 2001. 12. 28., 채택확정 : 2002. 6. 26.
정승권 : 부산대학교 지능기계공학과(captinjs@chollian.net)
김인수 : 국방과학연구소(kis171@hanmir.com)
박기선 : 부산대학교 지능기계공학과(amorlei@hyowon.pusan.ac.kr)
김인수 : 국방과학연구소(captinjs@chollian.net)
이만형 : 부산대학교 기계공학부(mahlee@hyowon.pusan.ac.kr)

로 수행되었으나 비전 시스템이 기후조건이나 빛에 대하여 민감하다는 것이 문제점이다[5][6]. 아래 보기 시스템은 길 중앙에 전선, 자석 등을 설치하여 중앙으로부터 떨어진 거리를 측정하는 시스템으로, 센서를 앞 범퍼에 부착하여 사용한다. 이 시스템은 PATH에 의해 개발 및 시험되었지만 몇 가지 문제점이 있다. 예를 들자면, 센서에 의한 횡방향 측정 범위가 비전 시스템에 비하여 제한적이고 도로 표면에 자석을 부착하면 정확한 위치에 설치하지 못하였을 경우에 발생하는 확률 오차가 존재한다[7]. 무인 차량에 사용되는 제어기에 있어서, Peng과 Tomizuka는 전방 정보와 FSLQ(Frequency Shaped Linear Quadratic) 제어기를 사용하였다. 선형 FSLQ 제어기의 주요관점은 승객의 승차감과 차선 추종성간의 성능 교환을 정량적으로 표현하는데 있으며, 모델링 오차에 대하여 강인하다는데 있다. 비선형 이론으로는 SMC(Sliding Mode Control)에 기반을 둔 조향제어 이론이 개발되었는데, SMC는 명시적으로 설계에 있어서 매개변수 오차를 설명하기 때문에 제어기는 매개변수의 불확실성에 대하여 강인하다. 이 이론을 적용한 논문의 단점은 승차감이 고려되지 않았고 차량의 요 동력학의 안정성이 보장되지 못하다는 것이다[6].

본 논문은 무인 차량용 조향 시스템에 관한 연구이며, 이를 위해 유도로 선정, 센서 선정에 대한 연구 및 조향제어에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서 설계된 제어기를 실제 차량에 적용하여 그 성능을 평가하였으며, 현재 UCT에 사용되는 차량이 개발되지 않았으므로, 현재 사용 가능한 일반 차량을 이용하였다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. II에서 차량의 스포링 위 절량에 대한 운동 방정식과 차량의 지배 방정식으로부터 단순 모델링을 유도하는 것에 대하여 서술하였고, III에서는 정형화된 H_{∞} 제어기 및 PD제어기를 설계하였고, 이에 대한 시뮬레이션에 대하여 서술하였다. IV에서는 자석의 특성 실험, MR(magnetostrictive, 이하 MR) 센서의 출력 특성 실험, 센서 및 조향 장치 부분을 차량에 치하여 실차실험을 실시한 후, 결과에 대하여 서술하였다. V에서는 본 연구에서 제안된 제어기를 실차에서 실시한 결과를 토대로 총체적인 결론을 서술하였고, 또한 연구 결과를 토대로 향후과제에 대해서 서술하였다.

II. Unmanned Vehicle 모델링

차량의 6 자유도 비선형 운동 방정식[8][9]은 너무 복잡해서 제어기설계에 사용하기 어려우므로 6 자유도의 복합 모델을 선형화 함으로써, 횡방향 운동 및 요 운동만 남는 단순 모델을 유도하도록 한다.

차량 운동방정식에 대한 단순 모델은 복합 모델을 단순화함으로 얻어진다. 조향제어가 관심 대상이므로 차량의 수직, 롤, 피치 운동을 무시하고, 요각차가 비교적 작고 차량의 종방향 속도가 일정하다고 가정하면, 복합 모델은 선형적인 모델로 단순화 될 수 있다. 상태 변수는 횡방향과 요 방향으로 각각 2개씩 총 4개이다. 그림 1은 차량의 단순 모델 그림이다. 횡방향 거리(y_r), 요각차($\epsilon - \epsilon_d$), 요각속도

$\dot{\epsilon}$ 가 작다고 가정하면, 다음 식을 유도 할 수 있다.

$$m(\ddot{y}_r + \frac{V^2}{\rho}) = F_{wy} + \sum_{i=1}^4 F_{Bi} \tag{1}$$

$$I_z \dot{\epsilon} = M_{z\omega} \tag{2}$$

코너링강성 C_s 의 정의는 다음과 같다[10].

$$C_s = \frac{\partial F_y(\alpha)}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=0} \tag{3}$$

여기서 $F_y(\alpha)$ 는 횡방향력이고, α 는 타이어 슬립각이다. 단순 모델에서 타이어로부터 만들어지는 횡방향력은 타이어 슬립각에 비례한다고 가정한다. 따라서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$F_y = C_s \alpha \tag{4}$$

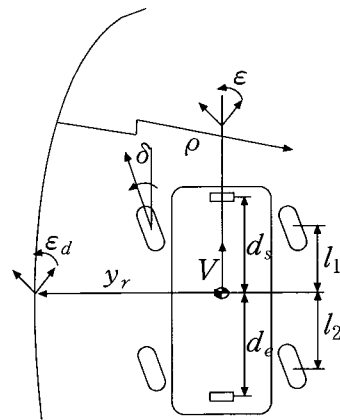


그림 1. 차량 모델 개략도.

Fig. 1. Scope of the simple vehicle model.

(4)는 슬립각 α 가 적을 때 대체적으로 정확한 근사값으로 사용할 수 있다. 도로 표면의 중심과 차량의 무게 중심 사이의 횡방향 거리는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{y}_r \approx V_y + V(\epsilon - \epsilon_d) \tag{5}$$

(4)와 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{yi} \approx C_{si}(\delta_i - \frac{\dot{y}_r + l_1 \dot{\epsilon}}{V} + \epsilon - \epsilon_d) \quad i=1, 2 \tag{6}$$

$$F_{yi} \approx C_{si}(\delta_i - \frac{\dot{y}_r + l_2 \dot{\epsilon}}{V} + \epsilon - \epsilon_d) \quad i=3, 4 \tag{7}$$

여기서 C_{si} 는 i 번째 타이어의 코너링 강성이다. 차량이 전륜 조향 및 전륜 구동이라고 가정하면, $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, $\delta_3 = \delta_4 = 0$, $F_{x3} = F_{x4} = 0$ 이다. δ_i 가 비교적 작다고 가정하고, $F_{A1} \approx F_{A2}$, $F_{A3} \approx F_{A4}$ 이라고 두면 다음과 같은

식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 F_{Bi} &= \sum_{i=1}^4 F_{yi} + \sum_{i=1}^4 F_{xi} \delta_i \\ &= \delta(C_{s1} + C_{s2} + F_{x1} + F_{x2}) \\ &\quad - \frac{\dot{y}_r}{V}(C_{s1} + C_{s2} + C_{s3} + C_{s4}) \\ &\quad + \frac{\dot{\epsilon}}{V}[l_2(C_{s3} + C_{s4}) - l_1(C_{s1} + C_{s2})] \\ &\quad + (\epsilon - \epsilon_d)(C_{s1} + C_{s2} + C_{s3} + C_{s4}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{zu} &= l_1(F_{B1} + F_{B2}) - l_2(F_{B3} + F_{B4}) \\ &\quad - \frac{s_{b1}}{2}(F_{A1} - F_{A2}) - \frac{s_{b2}}{2}(F_{A3} - F_{A4}) \\ &= \delta l_1(C_{s1} + C_{s2} + F_{x1} + F_{x2}) \\ &\quad - \frac{\dot{y}_r}{V}[l_1(C_{s1} + C_{s2}) - l_2(C_{s3} + C_{s4})] \\ &\quad - \frac{\dot{\epsilon}}{V}[l_1^2(C_{s1} + C_{s2}) + l_2^2(C_{s3} + C_{s4})] \\ &\quad + (\epsilon - \epsilon_d)[l_1(C_{s1} + C_{s2}) - l_2(C_{s3} + C_{s4})] \end{aligned} \quad (9)$$

일반적으로 F_{xi} 는 C_{si} 보다 매우 작아 무시할 수 있다. $C_{s3} = C_{s4} = C_{sv}$, $C_{s1} = C_{s2} = C_{sf}$ 라 두고, (8)을 (1)에, (9)를 (2)에 각각 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{y}_r = \frac{A_1}{V} \dot{y}_r - A_1(\epsilon - \epsilon_d) + \frac{A_2}{V}(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d) + B_1\delta + d_1 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d &= \frac{A_3}{V} \dot{y}_r - A_3(\epsilon - \epsilon_d) \\ &\quad + \frac{A_4}{V}(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d) + B_2\delta + d_2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{-2(C_{sf} + C_{sv})}{m} & A_2 &= \frac{2(C_{sv}l_2 - C_{sf}l_1)}{m} \\ A_3 &= \frac{2(C_{sv}l_2 - C_{sf}l_1)}{I_z} & A_4 &= \frac{-2(C_{sf}l_1^2 + C_{sv}l_2^2)}{I_z} \\ B_1 &= \frac{2C_{sf}}{m} & B_2 &= \frac{2l_1C_{sf}}{I_z} \\ d_1 &= \frac{F_{wy}}{m} - \frac{V^2}{\rho} + \frac{A_2}{V} & \dot{\epsilon}_d &= \frac{A_2 - V^2}{\rho} \\ d_2 &= \frac{A_4}{V} & \dot{\epsilon}_d &= \frac{A_4}{\rho} \end{aligned} \quad (12)$$

(1)과 (2)를 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \epsilon - \epsilon_d \\ \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1}{V} & -A_1 & \frac{A_2}{V} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{A_3}{V} & -A_3 & \frac{A_4}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \epsilon - \epsilon_d \\ \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_d \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ A_2 - V^2 \\ 0 \\ A_4 \end{bmatrix} \frac{1}{\rho} \end{aligned} \quad (13)$$

차량의 질량 중심으로부터 d_s 만큼 전방으로 떨어져 있는 센서로부터의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_s(t) = y_r + d_s(\epsilon - \epsilon_d) = [1 \ 0 \ d_s \ 0]x(t) \quad (14)$$

실험시 차량의 요각을 구하기 위해서 다음과 같은 가정을 한다. 실험의 편의를 위해서 도로가 직선으로 시작하고, 그 시작하는 도로를 X축으로 한다면 다음과 같은 식으로 요각을 구할 수 있다.

$$\epsilon - \epsilon_d \approx \tan^{-1} \left(\frac{y_s - y_e}{d_s + d_e} \right) \quad (15)$$

여기서, y_e 는 차량의 뒤쪽 범퍼에 장착된 센서와 도로 중심선 사이의 거리이며, d_e 는 질량 중심으로부터 차량의 뒤쪽 범퍼에 장착된 센서사이의 거리이다. $\epsilon - \epsilon_d$ 의 물리적 의미는 차량이 진행할 시 요구되는 차의 적절한 진행 방향을 말한다. 본 논문에서는 (15)에서 구하여진 값을 $\epsilon - \epsilon_d$ 로 가정하여 사용한다.

III. 조향 제어기 설계 및 시뮬레이션

1. PD 제어기 설계

II에서 구하여진 차량의 운동방정식을 이용하여 실제 산업현장에서 널리 사용되고 있는 PD 제어기를 설계하였다. 그림 2는 시뮬레이션 구성을 나타내는 블록 선도이다. 기준 입력 r 을 0으로 하면, 차량이 유도선을 따라서 움직이게 하기 위해서는 오차 e 가 0이 되도록 하는 것이 주행 제어의 목표가 된다. 설계 사양은 정상 상태 오차가 0.1, 오버슈트가 10%이내이고, 정착시간이 2초이다. PD제어기는 고주파수에서 잡음을 두드러지게 하는 수가 있지만, 감쇠를 개선하여 최대오버슈트를 감소시킨다. 실제 현장에서도 많이 사용하고 있으며, 실제 실험시 용이하게 현장에서 이득값을 조정하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

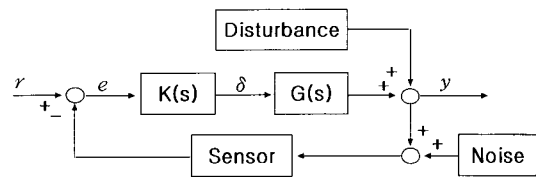


그림 2. Unmanned vehicle의 PD 제어기.

Fig. 2. PD controller for unmanned vehicle.

2. H_∞ 제어기 설계

H_∞ 제어기 설계를 위한 일반화 플랜트를 구성하기 위하여 (13)을 (16)과 같이 상태방정식과 두 개의 출력 방정식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 외란을 w_y (y_r 에 대한 외란), w_ϵ (ϵ 에 대한 외란), w_{sy} (y_r 측정 센서의 외란), $w_{s\epsilon}$ (ϵ 측정 센서의 외란)이라 두면, 아래와 같은 시스템 방정식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1}{V} & -A_1 & \frac{A_2}{V} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{A_3}{V} & -A_3 & \frac{A_4}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 - V^2 & b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4 & 0 & b_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho} \\ w_y \\ w_\varepsilon \\ w_{sy} \\ w_{se} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \delta \quad (17)$$

$$z = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_{12} \end{bmatrix} \delta \quad (18)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \varepsilon - \varepsilon_d \\ \dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho} \\ w_y \\ w_\varepsilon \\ w_{sy} \\ w_{se} \end{bmatrix} \quad (19)$$

블록선도로 나타내면 그림 3과 같다.

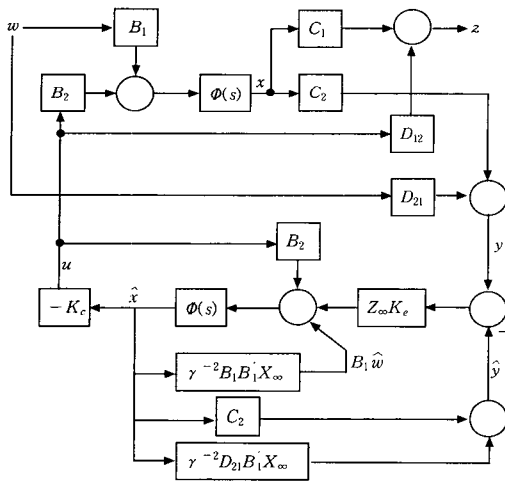


그림 3. Unmanned vehicle의 H_∞ 제어기.
Fig. 3. H_∞ controller for unmanned vehicle.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용된 계수값은 표 1과 같다[8]. 질량 m 은 차량에 승차했을 경우 또는 차량의 기름의 양에 따라 가장 많은 변화를 받고, 코너링 강성 $C_{sf}(C_{sr})$ 의 경우는 실험시의 온도, 습도, 도로조건, 타이어의 압력, 타이어의 종류, 차량의 질량 등과 같은 많은 요인에 의해 변화를 한

다. 이러한 조건들을 감안하여 시뮬레이션 시 다음과 같은 외란을 이용하였다[5]. w_y (y_r 에 대한 외란)은 $\pm 0.2m$, w_ε (ε 에 대한 외란)는 $\pm 10^\circ$ 이라고 가정한다.

표 1. 시뮬레이션을 위한 시스템 계수값.
Table 1. Nominal parameters for simulations.

	Nominal value	Min. value	Max. value
$m(kg)$	1740	85%	115 %
$V(m/s)$	4	3	5
$I_z(kgm^2)$	3214	85 %	115 %
$C_{sf}(C_{sr})$ (N/rad)	48000(42000)	20 %	200 %
$l_1(m)$	0.9357	constant	
$l_2(m)$	1.6213		
$d_s(m)$	1.8107		
$d_e(m)$	2.4113		

이는 측정하기 어려운 값이나 상기와 같은 외란에도 견딜 수 있도록 설계하였고, w_{sy} (y_r 측정 센서의 외란)는 $\pm 0.003m$, w_{se} (ε 측정 센서의 외란)는 $\pm 1^\circ$ 로 하여 시뮬레이션을 실시하였다. 페루프 전달함수 T_{zw} 의 ∞ -norm이 주어진 기준 γ (양의 스칼라)보다 작게 유지되도록 플랜트 $G(s)$ 에 대하여 내부적으로 안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 찾아야 한다. 최적화 문제를 풀기 위해서 임의의 γ 값을 가지고 시작하여 문제가 해를 가지지 못할 때까지 γ 를 감소시킨다. 이러한 γ -반복법을 수차례 실시하여 γ 를 결정하였다.

그림 4는 1m의 offset을 두고 5m/s의 속도 하에서 얼마나 빠른 시간 내에 차량이 유도선으로 돌아오는 가를 H_∞ 제어기(실선) 및 PD 제어기(점선)의 시뮬레이션 한 결과이다. 정착시간에 있어서는 PD 제어기가 빠르나 외란에 대하여서는 H_∞ 제어기가 강하다. H_∞ 의 경우에 2.5초 이후 횡방향 거리가 거의 0에 가깝지만 PD 제어기의 경우에는 정상상태 오차가 존재함을 알 수가 있다. 시뮬레이션 결과로는 차량이 유도선을 잘 추종함을 알 수가 있다. 그림 5는 10° 의 offset을 두고 5m/s의 속도 하에서 차량이 유도선을 따라서 진행하는가를 보여준다. 차량의 중심으로부터 유도선까지의 거리는 $\pm 0.02m$ 이내로 만족할 만한 결과이다. 1.5초 이내로 차량이 0° 로 돌아온다. 그림 6은 5m/s하의 시뮬레이션에서 결정된 γ 을 고정시키고 속도만을 4m/s로 낮추고, 0.2m의 offset하에서의 시뮬레이션 결과이다. 이는 실차실험에서 실시할 실험조건과 동일한 조건이다. 그림 4의 시뮬레이션과 비교하면, 차량의 요각차의 최대값이 그림 4에서는 약 -10° 정도였으나 속도 및 offset이 적은 경우인 그림 6에서는 약 -2° 정도이다. 그림 7은 그림 6의 실험조건에 차량에 가해지는 하중을 80kg더하여 실시한 시뮬레이션 결과이다. 이는 실차실험에서 실시할 실험조건과 동

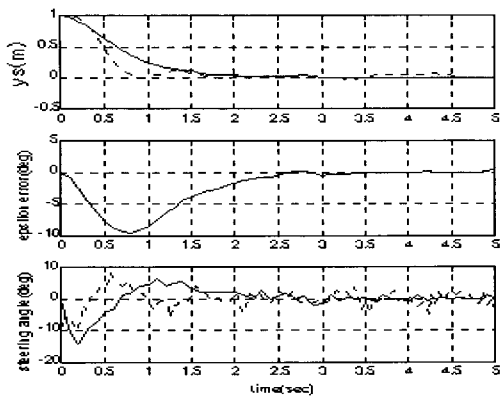


그림 4. 시뮬레이션 결과(5m/s, 1m offset).
Fig. 4. Simulation results(5m/s, 1m offset).

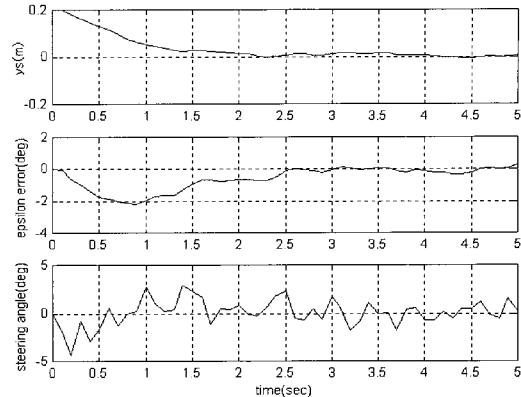


그림 6. 시뮬레이션 결과(4m/s, 0.2m offset).
Fig. 6. Simulation results(4m/s, 0.2m offset).

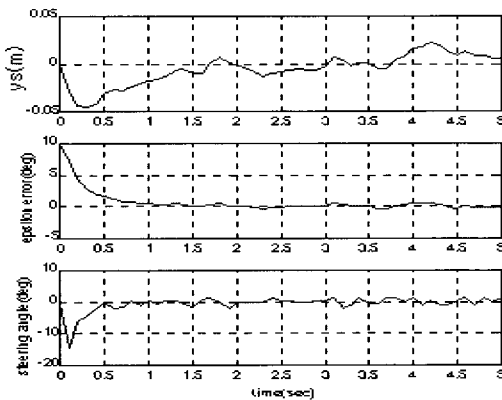


그림 5. 시뮬레이션 결과(5m/s, 10° offset).
Fig. 5. Simulation results(5m/s, 10° offset).

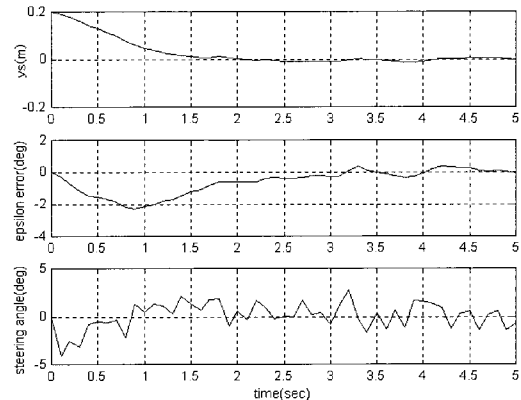


그림 7. 시뮬레이션 결과(4m/s, 0.2m offset, 80kg).
Fig. 7. Simulation results(4m/s, 0.2m offset, 80kg).

일한 조건이다. 시뮬레이션 결과는 그림 6과 큰 차이가 없으며, 앞서 H_{∞} 제어가 설계에서 논의한 바와 같이 질량의 변화에 대해 강인함을 보여준다.

IV. 조향 시스템 구축 및 실험

1. 자석 특성 실험 및 선정

횡방향 제어는 차선의 유지 및 차선변경 등의 기동 시에 필요하며 센서를 통해 기준선 및 차선을 인식하고 이로부터 측정된 횡방향 거리오차를 제어에 사용하게 된다. 횡방향 거리오차 측정에 사용되는 센서 및 유도로는 본 연구에서는 자석의 자기장의 크기를 측정하는 MR 센서 및 자석을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 MR 센서는 3축 자기 센서인 HMR 2003에 16-bit A/D 변환기, set/reset, RS-232통신 기능이 부가된 HMR 2300을 사용하였다. 먼저 자석 선정 및 센서교정을 위하여 한국표준과학연구원에 있는 비자성 목조 실험실에서 실험을 실시하였고, 실험을 통하여 자석의 물리량을 측정하였다. 본 실험을 통하여 3000 gauss의 자석을 선정하였으며, MR 센서의 시험검사를 실시하였다. 현재 시중에 판매중인 자석 중, 본 실험에 적합한 자석으로 희토류계 자석을 선정하였다. 희토류 연구자석은 최대 사용온도가 180℃이고 단위 체적당 최대 에너지 적이 높다.

자석은 직경이 25cm, 높이가 0.5cm인 원반형이고 자기장의 세기는 3000gauss 이다.

자석은 도로에 설치하여 사용하여야 하지만, 실제 실험에 사용하기 위해서는 실험을 위한 시험 도로가 준비되어 있지 않으므로 설치 및 보관이 간편해야 한다. 따라서, 가로, 세로, 높이가 각각 7cm, 4cm, 1.5cm인 아크릴판 중심부에 깊이 1cm로 직경이 25cm인 구멍을 파고, 그 안에 자석을 접착제를 이용하여 고정 시켜 사용하였다. 강자석이므로 자석과 자석이 서로 부착되었을 시 분리하기가 불편하였으나, 자석 케이스를 이용하면 도로 위에 설치가 간편하며, 자석과 자석이 서로 부착되었어도 분리가 용이한 장점이 있다. 또한 일정한 간격으로 자석을 줄이나 테이프를 이용하여 연결하여 자석을 도로에 설치할 때 실험 준비 시간을 절약 할 수 있었다. 실험에 의해 자석간의 거리는 40cm로 정하였다. 이는 차량의 최대 운송 속도인 5m/s에서는 약 12.5개의 자석을 지나게 되고, 자석 1개당 10개의 센서 출력값이 필요하다고 가정하면, HMR 2300 자체의 검출 회수가 154 samples/sec임으로 적절하다.

2. MR 센서

MR 센서는 이방성의 자기저항을 이용하여 자기장의 세

기를 검출하는 센서이다. 이방성의 자기저항은 철을 함유한 금속에서 발생하는데, 얇은 금속에 흐르는 전류와 직교하게 자기장을 가하면 저항의 변화를 발생시킨다[14]. 그림 8은 이방성 자기저항에 자기장을 부가하였을 시 나타나는 저항의 차를 그림으로 표현 한 것이다.

그림 9는 MR 센서 실험을 위한 실험 장치이다. 본 실험 장치는 높이를 고정시킨 후 횡방향 거리로 자석을 옮겨 가면서 실제 MR 센서에 나타나는 출력 특성을 알아보기 위해 만들어진 실험 장치이다. 기둥은 알루미늄을 사용하여 센서에 작용하는 영향을 줄였고, 높낮이가 조절이 되도록 설계하였다. 실차실험에 사용되는 모터 및 서보 드라이브를 사용하였고, 높이를 달리하면서 각 센서의 횡방향 거리에 대한 출력값을 측정하였다. 자석은 직경 25cm, 높이 0.5cm 인 원반형이고, 자기장의 세기는 3000gauss이다. 본 실험 장치의 실험 목적은 다음에서 설명하는 MR 센서의 출력 특성을 알아보기 위한 것이다. MR센서가 지면에서 일정한 높이(15cm)에서 자석의 중앙을 통과할 때 다음과 같은 출력을 나타낸다. 각 피크는 자석사이의 거리에 관계가 되는데, 이는 그래프의 X축에 속도를 곱하면 실제 자석간 거리가 되고, 각각의 그래프는 같은 피크 시점을 보이게 된다.

그림 10은 자석을 일정한 거리로 서로 다른 극을 교대로

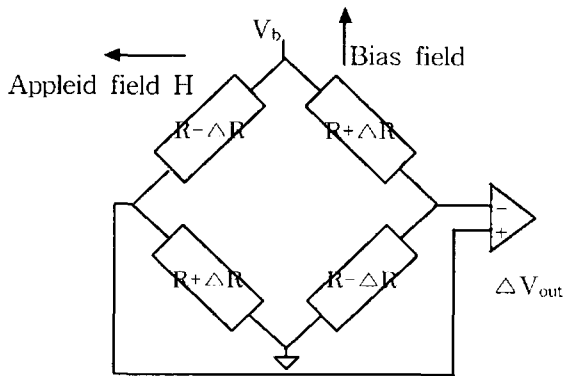


그림 8. MR 트랜스듀서.
Fig. 8. Magnetoresistive transducer.

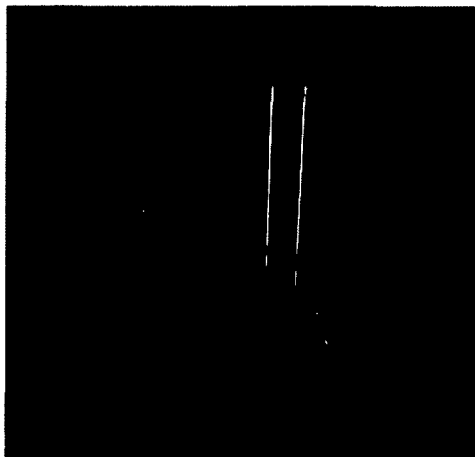


그림 9. MR 센서 실험 장치.
Fig. 9. Test set of MR sensor.

배치하였을 때의 출력 곡선이다. 상대적으로 자석을 배열하면 두 개의 서로 다른 극이 서로 간섭하여 하나의 커다란 자석을 배열한 것과 같은 효과를 나타낼 수 있다. 그러나 어느 정도 이상 간격이 멀어지면 그림 11과 같이 서로 다른 극의 간섭이 적어져 독립된 두 개의 서로 다른 자석으로 인식한다. 자석의 N은 Z축의 아래 쪽 피크에, S극은 Z축의 위쪽 피크에 각각 대응이 된다. X축의 피크는 각 Z축 피크 사이의 중심에서 발생한다. 상대적으로 배열하였을 시 자장의 세기가 더 커지기 때문에 더욱더 센서로 그 자장을 측정하기가 용이해지므로, 본 논문에서는 상대 극 배열 방식을 택하였다. 출력의 크기는 서로 다른 극으로 배열한 것이 같은 극으로 배열한 것보다 큰 출력을 보임으로 측정 데이터의 세분화 측면에서는 서로 다른 극으로 배열한 것이 더 이점이 있다. 영구 자석을 지면으로부터 일정한 높이(15cm)에 장착하여 상대적으로 배열한 유도선을 MR 센서가 바로 위를 진행 할 때와 횡방향으로 거리를 두고 진행 할 때의 출력의 크기는 거리에 따라 값이 작아진다. 즉, 거리가 가까울 때에는 MR 센서 Z축의 최대값과 최소값의 차이가 크고, 거리가 멀 때에는 MR 센서 Z축의 최대값과 최소값의 차이가 작다. 센서의 진행 방향에 대하여 자석을 횡방향으로 거리를 두고 실험을 한 결과를 그래프로 나타내면 그림 12와 같이 나타낼 수 있다.

MR 센서의 출력에 의하여 피크를 제외한 각 구간에서 어느 정도의 선형 근사 출력이 나온다는 것을 알 수가 있다. 선형 근사가 가능하다는 것은 보상 알고리즘 없이 센서

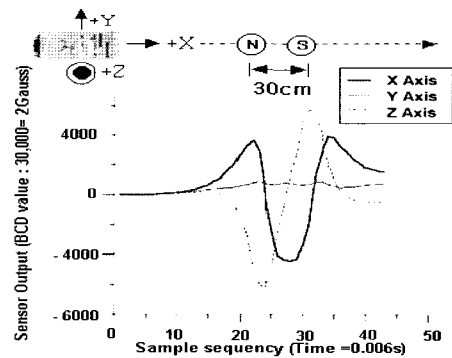


그림 10. 자석 배치에 따른 출력 특성(30cm).
Fig. 10. N-S series of the magnet with 30cm.

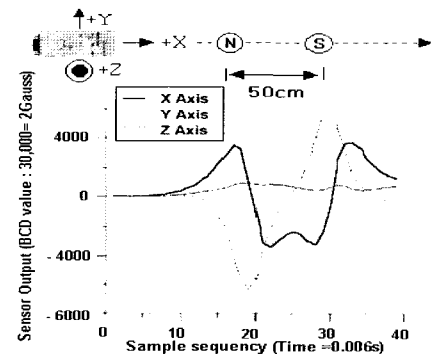


그림 11. 자석 배치에 따른 출력 특성(50cm).
Fig. 11. N-S series of the magnet with 50cm.

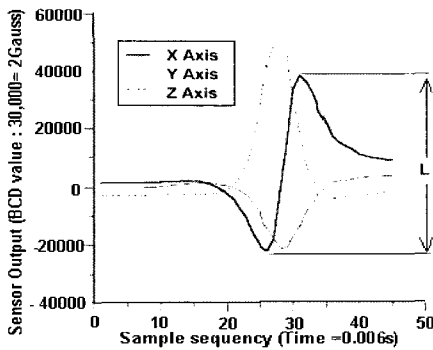


그림 12. 센서 진행방향에 대하여 횡방향 자석 배치에 따른 출력 특성.

Fig. 12. Difference between max. and min(L : difference between Max. and Min. value).

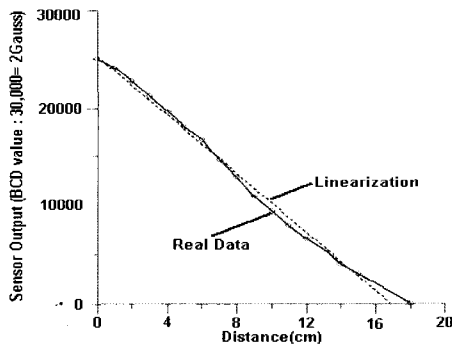


그림 13. 선형 근사 출력.

Fig. 13. Linearization of the distance according to the output.

출력을 그대로 이용할 수 있다는 것을 의미한다. 실험을 통해 선형화가 유지되는 자석간의 최대거리를 구할 수 있다. 본 논문에서는 센서의 이동 방향에 따라 자석간의 상대적 거리가 달라짐을 고려하여 40cm로 정했다. 실험 장치를 그림 9와 같이 제작하여 자석과 일정한 offset 거리에 대한 센서의 출력을 반복하여 구하였다. 이러한 값에서 Z축의 최대값과 최소값의 차이를 평균하여 그림 13과 같이 나타내었다. 선형 보간 이전의 곡선에서는 유도선과 센서의 떨어진 거리가 거의 선형에 가깝게 변한다는 것을 알 수 있다. 상기와 같은 실험 결과를 이용하여 다음과 같은 선형화식을 만들어 사용할 수 있다.

$$y_s = k \times \frac{1}{L} \tag{20}$$

여기서 y_s 는 유도선과 센서사이의 떨어진 거리이고, L 은 센서 출력의 최대값과 최소값의 차이, k 는 비례 상수이다.

유도선에 대하여 센서의 횡방향 거리를 판단하는 알고리즘은 각 샘플링 타임마다 Z축과 Y축의 미분 부호를 판별함으로써 이루어진다. 하지만 Z축 피크와 Y축 피크 시점이 정확하게 일치하지 않기 때문에 바로 적용을 할 수가 없다. 각 피크 시점의 차이는 지구 자기장이나 주위의 철, 혹은 다른 자석 등에 의한 노이즈 영향으로 일정하지 않기

때문에 프로그램 상에서 보상하는 데에는 다소 어려움이 있다. 현재 구현된 알고리즘 상에는 X축이 피크를 보일 때 Z축과 Y축의 미분 부호를 비교하여 유도선에 대한 센서의 위치를 판단한다. X축 피크까지 센서가 이동을 해야만 데이터가 나오기 때문에 연속적인 값을 얻을 수 없는 문제점을 고려하여야 한다. 실제 실험에서 거리 판단에 사용하는 값은 Z축 값이다. 지구상에는 지구의 자기장이 형성되어 있는데, 미세 저자장인 지구자장(Earth Magnetic Field, EMF, 혹은 지자장)의 크기는 우리나라의 경우, 시간에 따라 변하지 않는 직류성분이 수직방향으로 $40 \mu T(0.4\text{gauss})$, 남북 방향으로 $30 \mu T(0.3\text{gauss})$, 동서 방향으로 $3 \mu T(0.03\text{gauss})$ 이며, 태양풍 등이 없는 정상적인 날의 시간에 따라 변화는 성분은 약 100 nT/day 이다. 따라서 차량이 운동을 지상에서 여러 방향으로 한다면 방위에 따라서 그 자기장의 크기가 달라지므로 Z축 값을 거리 계산에 이용하고, Y축 값은 센서의 좌, 우측을 판별하는 값으로 이용한다. 조향 제어 실험을 위하여 차량중심으로부터 횡방향 거리 및 차량의 요각을 측정하기 위해서는 총 4개의 MR 센서가 필요하다. 전방 범퍼 아랫부분 및 후방 범퍼 아래 부분에 각각 2개씩 총 4개를 사용했다. 실험에는 HMR 2300 및 HMR 2003의 2 종류의 MR 센서를 사용하였다.

3. 실험 차량 구성

실제 실험에 사용된 시스템의 전체 구성도는 그림 14와 같다. 차량은 현대의 티뷰론을 이용하였고, 차량의 앞 범퍼 아랫부분과 뒤 범퍼 아랫부분에 MR 센서를 설치하였고, 핸들 구동을 위한 모터에 관련된 드라이브 시스템은 운전석 바로 옆에 구성하였다. 제어를 위한 연산과 명령을 담당하는 컴퓨터와 전체 시스템의 전원 공급 장치는 뒤 트렁크 부분에 구성하였다.

그림 14에서 A는 핸들 조향 부분을 나타내는 그림이다. 핸들 조향 부분은 차량의 운전석 앞부분에 설치되어 있으며 컴퓨터에 의해 계산된 제어량만큼 핸들을 직접 동작시키는 부분으로서 정확한 제어량을 전달하기 위하여 기어를 이용한 동력 전달 장치를 설치하였으며, 핸들이 장착되어

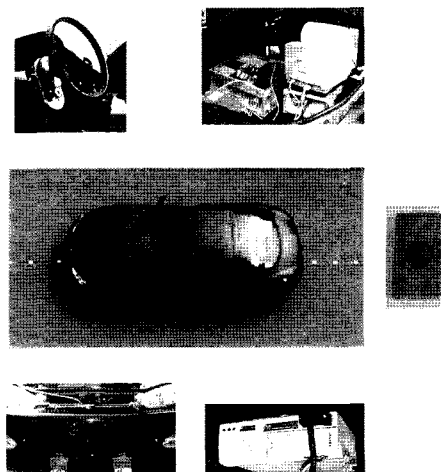


그림 14. 실험 차량 구성.

Fig. 14. Schematic of test vehicle.

있으므로 경우에 따라서는 수동/자동 조종이 가능하도록 설계하였다. 실험차량의 조향 기어 형식은 파워 랙 및 피니언 구조로 되어 있으며 스티어링 휠 자유 유격은 약 10mm 정도이다. 바퀴는 외측으로 30.76°내측으로 35.37°움직이게 되어있고, 핸들 회전과 바퀴의 움직임의 비 즉, Total Gear Ratio는 14.8 : 1이다. 그리고 조향 모터와 핸들은 기어로 물려 있으며 1: 2.6875의 비율로 물려 있다. 따라서 조향 모터와 바퀴의 움직임 비는 39.775:1의 비율이다. 즉 조향 모터가 약 40°움직이면 바퀴가 1°움직이게 된다. 따라서 원하는 각도만큼 바퀴를 움직일 수 있다. 조향부는 삼성 CSM 모터 및 CSD 서보 드라이브를 사용하였다. MMC(Multi Motion Controller) 보드는 모터의 속도 및 운동을 제어하기 위하여 사용하였으며, 속도 제어가 10 ~ 2000 rpm 까지 조정이 가능하다. 본 실험에서는 실제 운전자의 일반적인 조향시의 속도를 흉내내기 위해 60rpm으로 하였다. 모터부와 핸들부 사이의 기어비가 2.6 : 1 임으로, 모터가 초당 1바퀴 회전시 핸들은 초당 약 1/3 바퀴정도 회전하게 된다. 차량의 회전 속도에 제한을 둔 이유는 급격한 조향각의 변경을 방지하고, 사람의 조향을 흉내내기 위함이다.

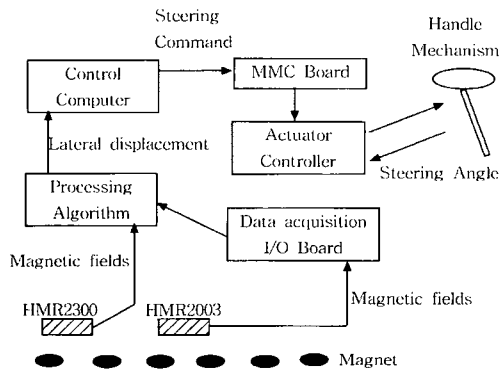


그림 15. 실험 장치 개략도.
Fig. 15. Schematic diagram of the experimental setup.

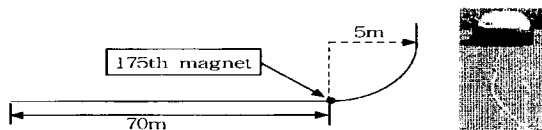


그림 16. 실험용 곡선 도로.
Fig. 16. Test track layout.

시스템을 제어하기 위하여 일반 데스크 탑 PC를 사용하였다. 실험에 사용된 프로그램은 볼랜드 C++를 이용하였다. 차량에 설치된 장치의 전원은 모두 차량 배터리로부터 각종 전력변환기를 통해 만들어진다. 주 동력원은 차량에 내장된 12V 75AH 배터리와 추가 구입한 12V 80AH 배터리를 병렬로 연결하여 사용하여 동시 충전이 가능하게 하였다. AC 서보 드라이브가 400W, 컴퓨터가 360W로 차량에 내장된 배터리만으로는 모자라기 때문에 보조 배터리를 사용하였으며, 차량 운행 시 계속하여 충전이 되어 전원 공급이 원활 하도록 하였다. 1KW 급의 인버터로 12V 전원을 220V로 승압하여 컴퓨터 전원 및 조향 모터 컨트롤러에 공

급하도록 하였다.

그림 15는 실험을 하기 위해 구성된 실험 장치에 대한 그림이다. HMR 2300을 차량의 앞 범퍼에, HMR 2003을 차량의 뒤 범퍼에 장착한 후, 획득된 정보가 컴퓨터를 통해서 차량에 부착된 핸들부까지의 전달 체계를 설명한 그림이다.

실험은 80m의 도로에서 실시하였다. 실험은 UCT 차량의 운행 속도(최대 운송 속도 : 5m/s, 가동 운송 속도 : 4m/s, 곡선 운송 속도 : 3m/s)에 준하여 실시하였고, 계획된 양호한 아스팔트 도로에서 실시하였으며, 도로의 중앙에 자석을 직선 및 곡선으로 설치하여 실시하였다. 곡선 도로는 그림 16과 같이 구성하였다.

실험은 다음과 같이 실시한다.

- 1) 차량의 바퀴는 다음과 같이 정렬하기로 한다. 시험 도로에 진입하기 전에 차량은 정속으로 핸들의 조정 없이 직선 운행을 한다.
- 2) 시험 도로에 도착시, 시스템을 가동 시켜 무인 조향되게 한다.
- 3) 차량의 속도는 차량에 부착된 속도 계기판을 이용하여 수동으로 조작하며, 오차는 ±10% 이내로 유지하도록 한다.
- 4) 조향각 δ 는 조향 명령당 15° 이내로 제한한다.

실험은 직선 및 직선과 곡선으로된 도로에서 실시하였다. 가동 운송 속도인 4m/s에서 직선 및 곡선으로된 도로에서 실시하였고, 80kg의 하중을 가변하면서 실험을 실시하였다. 또한 최대 운송 속도인 5m/s에서 직선 및 곡선으로된 도로에서 실시하였고, 80kg의 하중을 가변하면서 실험을 실시하였다. 실험 결과는 대체적으로 중심을 잘 따라간다. 곡률이 시작하는 부분에서 약간의 떨림이 발생하였으나, 센서의 측정 범위 내에서의 떨림으로 별로 문제가 되지 않았다.

그림 17은 PD 제어를 이용한 실험이다. 시뮬레이션에서 결정된 이득값을 이용하여 실험을 실시하면, 오차값이 커질 경우에 조향각이 커져서 폭주하는 경우가 발생하여, 그 결과를 이용하여 현장에서 이득값을 조정하여 사용하였다. 차량 자체에서 발생하는 잡음 성분 때문에 차량이 좌우로 떨림이 발생하는 것처럼 보이나, 실제 차량의 크기에 비하여 볼 때 3~5cm의 떨림은 운전자가 느끼지 못하는 차량의 진동이고, 센서는 외부 잡음의 영향으로 떨림이 발생하는 것과 같은 값을 가진다.

그림 18은 PD 제어를 이용한 실험으로 곡선을 주행할 때의 실험 결과이다. 초기 진행 시에는 유도선을 따라서 잘 진행하나 곡선을 만나는 12초 이후에는 오차값이 증가함에 따라 유도선을 벗어 날려고 하는 경향을 보였다. H_{∞} 제어기의 실험 결과에서는 시뮬레이션에서 결정된 제어기를 실험에 직접 사용시 대부분 조향각이 점점 커져 발산하는 경향이 많았다. 이러한 경우에는 3.2절에 나타나있는 설계 파라미터를 다시 조정하여 γ 를 찾고, 다시 결정된 제어기를 실험에 사용하였다.]

그림 19는 4m/s의 속도 하에서, 13cm의 횡방향 거리를 두고 차량이 직선의 유도선을 추종하는 가를 알아보는 실험이다. 차량이 점차 유도선으로 향함을 알 수 있다. 그림 20은 4m/s의 속도 하에서, -10cm의 횡방향 거리를 두고 차

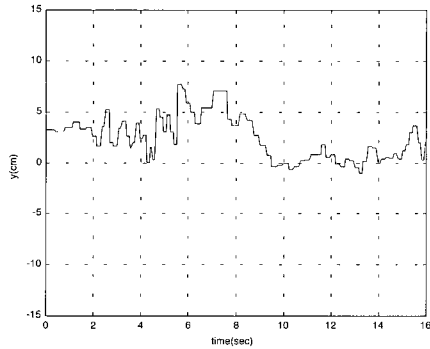


그림 17. 실험 결과(PD 제어, 4m/s, 직선 도로).
Fig. 17. Test result (PD, 4m/s, straight course).

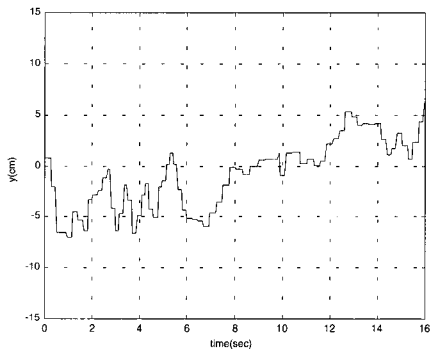


그림 18. 실험 결과(PD 제어, 4m/s, 곡선 도로).
Fig. 18. Test result (PD, 4m/s, curved course).

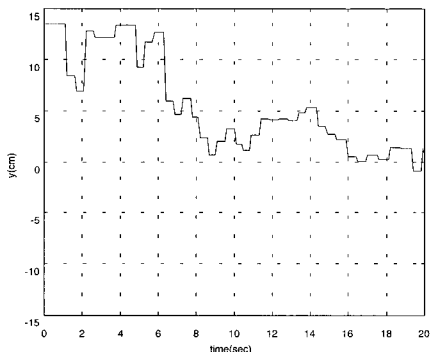


그림 19. 실험 결과(H_{∞} 제어, 13cm 횡방향 거리, 4m/s, 직선 도로).
Fig. 19. Test result (H_{∞} , 13cm offset, 4m/s, straight course).

량이 직선의 유도선을 추종하는 가를 알아보는 실험이다. 그림 19와 마찬가지로, 차량이 점차 유도선으로 향함을 알 수 있다. 그림 21은 4m/s의 속도 하에서 차량이 직선 및 곡선으로 구성된 유도선을 추종하는 가를 알아보는 실험이다. 직선 구간에서는 차량이 유도선을 잘 따라감을 알 수 있으나, 곡선 구간에서는 값이 급격하게 변화하는 부분이 발생한다. 이는 곡률이 외란으로 작용하였고, 차량의 쏠림등으로 인한 코너링 강성 등이 변화하였기 때문에 발생하였다고 볼 수 있다.

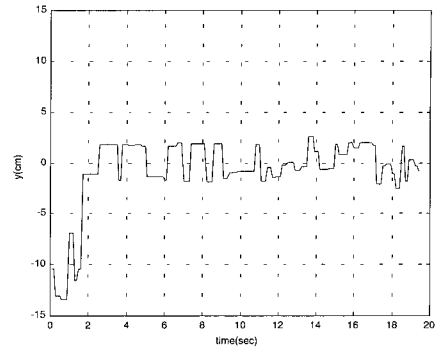


그림 20. 실험 결과(H_{∞} 제어, -10cm 횡방향 거리, 4m/s, 직선 도로).
Fig. 20. Test result (H_{∞} , -10cm offset, 4m/s, straight course).

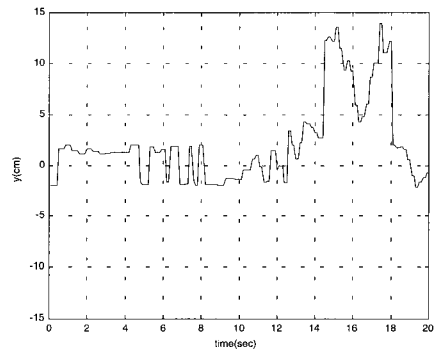


그림 21. 실험 결과(H_{∞} 제어, 4m/s, 곡선 도로).
Fig. 21. Test result (H_{∞} , 4m/s, curved course).

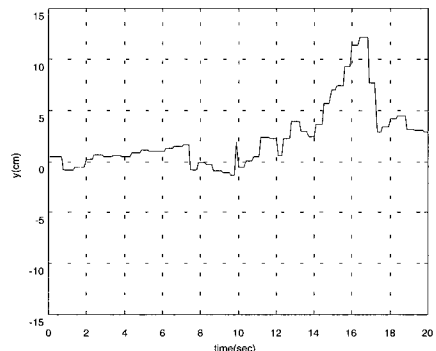


그림 22. 실험 결과(H_{∞} 제어, 4m/s, 80kg 하중, 곡선 도로).
Fig. 22. Test result (H_{∞} , 4m/s, curved course with 80kg).

그림 22는 4m/s의 속도 하에서 80kg의 하중을 차량에 더한 다음, 차량이 직선 및 곡선으로 구성된 유도선을 추종하는 가를 알아보는 실험이다. 차량의 전체 중량에 비하여 사람이 1 사람정도 더 타는 것은 차량에 별 영향이 없다.

V. 결론

본 연구에서는 항만 자동화의 일환으로 개발중인 UCT의 실차 제작 전에 조향제어 시스템 개발을 목적으로 실시하였다. MR 센서의 출력 특성을 알아보기 위해 실험을 실시

하였고, 실차실험을 위하여 차량 조향제어 시스템을 구축하였다. PD 제어기 설계 기법을 이용하여 설계한 제어기를 실차에 적용하여 실험을 실시하였다. 차량에 작용하는 각종 외란을 H_∞ 제어기 설계 기법을 이용하여 최적화 기법에 근거한 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통하여 비선형 또는 불확실성에 견실성을 보장하는 성능을 보였다. H_∞ 제어기를 차량의 조향장치에 적용하여 실험을 실시하였고, 시뮬레이션 결과와 비교 검토를 하였다.

참고문헌

[1] 첨단항만 핵심기술 개발사업단, *첨단항만 무인장비제어 및 통합운영 핵심기술개발*, 현대중공업(주), 1999.
 [2] 최재원, 이석, 이만형, 박운식, "ITS분야에서의 예측제어 및 통신기술," *한국정밀공학회지*, 제 18권 제1호, pp. 12-20, 2000.
 [3] M. Heller and M. Huie, "Vehicle lateral guidance using vision, passive wire and radar sensors," *Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference Society of Automotive Engineers*, pp. 505-508, 1993.
 [4] M. Tai and M. Tomizuka, "Robust longitudinal velocity tracking of vehicles using traction and brake control," *Advanced Motion Control, Proceedings of the 6th International Workshop*, pp. 305-310, 2000.
 [5] M. Maurer, R. Behringer, S. Furst, F. Thomanek and E.D. Dickmanns, "A compact vision system for road vehicle

guidance," *Pattern Recognition, Proceedings of the 13th International Conference*, Vol. 3, pp. 313-317, 1996.
 [6] C. Chen, J. Guldner, I. Kanellakopoulos and M. Tomizuka, "Nonlinear damping in vehicle lateral control: theory and experiment," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2243-2247, 1998.
 [7] H. Peng, W. -B. Zhang, A. Arai, Ye Lin, Thomas Hessburg, Peter Devlin, Masayoshi Tomizuka and Steven Shladover, *Experimental Automatic Lateral Control System for an Automobile*, PATH Research Report, 1992.
 [8] H. Peng and M. Tomizuka, *Lateral Control of Front-Wheel-Steering Rubber-Tire Vehicles*, UCB-ITS-PRR-90-5, PATH Research Report, 1990.
 [9] H. Peng, *Vehicle lateral control for highway automation*, University of California, Berkeley, Dissertation, 1992.
 [10] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
 [11] 황우현, 안성모, Matlab을 이용한 제어시스템 설계, 대광서립, 1997.
 [12] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis, "State-Space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," *IEEE Transactions on Automation Control*, Vol. 34, No. 8, pp. 831-847, 1989.
 [13] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essential of Robust Control*, Prentice-Hall, Inc., 1998.
 [14] Honeywell, *Magnetic Sensors Data Sheets*, Honeywell, 1999.



정 승 권
 1992년 조선대 정밀기계과 졸업. 부산대학원 석사(1996), 동대학원 박사수료(2000). 부산대 전임연구원, 동서대학교 겸임교수, 관심분야는 메카트로닉스, 로보틱스, 자율주행, 강인제어.



김 인 수
 1997년 부산대 제어기계과 졸업. 동 대학원 석사(1999). 동대학원 박사수료(2001). 국방과학연구소. 관심분야는 강인제어, 견실 PID 제어, 수중운동체 제어 및 응용, 시스템규명.



박 기 선
 1993년 부산대 기계설계학과 졸업. 동 대학원 석사(2001). 1995년~1998년 삼성전자 GIS 개발팀. 관심분야는 강인제어 및 메카트로닉스.



이 종 남
 1981년 부산대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1985), 미국 아리조나대 기계공학과 박사(1992). 국방과학연구소, 동서대학교 정보시스템공학부 교수. 관심분야는 로보틱스, 메카트로닉스.



이 만 형
 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1971), 미국 오리건 주립대 전기.컴퓨터공학과 박사(1983). 1975년~현재 부산대학교 기계공학부 교수, POSCO 석좌교수, 공과대학장. 관심분야는 메카트로닉스, 비선형제어, 확률제어, 견실제어 이론 및 응용, 랜덤 프로세스 및 파라메타 추정기법, ITS.

어, 확률제어, 견실제어 이론 및 응용, 랜덤 프로세스 및 파라메타 추정기법, ITS.