

## MRAC 기법을 이용한 무인 컨테이너 운송차량의 조향 제어

이영진\* · 허 남\* · 최재영\* · 이권순\*\* · 이만형\*\*\*

### Steering Control of Unmanned Container Transporter Using MRAC

*Y. J. Lee · N. Huh · J. Y. Choi · K. S. Lee · M. H. Lee*

**Key Words** : 모델 참조 적응 제어(Model Reference Adaptive Control), 경로계획, Lyapunov 안정, AGV(Automated Guided Vehicle), 조향 제어

#### Abstract

This paper presents the lateral and longitudinal control algorithm for the driving of a 4WS AGV(Automated Guided Vehicle). The control law to the lateral and longitudinal control of the AGV includes adaptive gain tuning ability, that is the controller gain of the gravity compensated PD controller can be changed in a real-time. The gain tuning law is derived from the Lyapunov direct method using the output error of the reference model and the actual model, And to show the performance of the presented lateral and longitudinal control algorithm, we simulate the nonlinear AGV equations of the motion by deriving the Newton-Euler Method, The read path is from quay yard area to docking position in loading yard area. The quay yard area is where the quay crane loads the container to the AGV and the docking position is where the container is transferred to the gantry crane. The road types are constructed in a straight line and J-turn. When driving the straight line, the driving velocity is 6m/s and the J-turn is 3m/s.

\* 학생회원, 부산대학교 지능기계공학과 대학원

\*\* 정희원, 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

\*\*\* 정희원, 부산대학교 기계공학부 교수

### 1. 서 론

산업이 발전함에 따라 수출입 화물량이 급격하게 증가하고 있으나, 항만 및 도로를 비롯한 사회간접 자본 시설도 화물량의 증가에 비해 크게 부족한 실정이다. 이에 정부에서도 항만 물류 시스템의 자동화 사업을 적극 추진 중에 있다. 항만 자동화를 달성하기 위해서는 AGV의 개발, Network, Navigation 등 여러 가지 분야가 있겠지만 그 중에서 AGV의 개발이 가장 핵심이 되는 과제이다.

본 논문에서는 AGV의 동역학적 모델을 통해 주행 모델을 산출하고, 이를 바탕으로 AGV가 무인 주행을 하기 위해 MRAC(Model Reference Adaptive Control) 기법을 이용하여 조향 및 속도 제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

일반적으로 산업현장에서는 PD 제어가 많이 사용되는데, 그 이유는 구조가 간단하고 구현이 용이하며, 큰 지연시간이나 심한 비선형 동특성을 갖는 공정이 아니라면, 거의 모든 공정에 적용되어 만족한 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 하지만 큰 지연시간을 갖는 공정이나 비선형 시스템에 적용하기 어렵고, 공정의 동특성에 따라 계수 조정이 필요한데, 보통 시행 착오법으로 시행되어 많은 시간과 경비가 필요하며, 이에 따른 과도 현상에 대한 개선이 필요하다는 단점이 있다. 이러한 문제들의 개선책으로 본 논문에서는 PD 제어기 계인을 기준 모델을 이용한 MRAC 알고리즘을 통해 제어기 계인을 가변하여 기존의 PD 제어기의 단점을 보완하고자 한다. 이를 위해 비선형 AGV 주행 모델의 안정성과 운동에 영향을 미치는 변수들의 오차들을 보상하기 위해 Lyapunov 함수 후보를 이용하여 적응제어 법칙을 유도한다. MRAC는 그 추종성능은 뛰어나나 많은 연산을 필요로 한다. 그러나 AGV는 기존의 차량에 비해 매우 느린 속도로 운동을 하기 때문에 센서가 받아들일 수 있는 샘플링 시간안에 제어를 할 수 있고, 이 이론을 바탕으로 설계된 제어기를 실차에 적용할 수 있다. 또한 제어기 성능 시험을 하기 위해 앞서 항만의 도로 상황과 유사한 테

스트 트랙에 대한 경로 계획을 생성하고, 시뮬레이션을 수행하여 PD제어기와 성능을 비교한다.

### 2. AGV의 운동방정식

그림 1에서와 같이 AGV에 대한 22 DOF 운동방정식은 Lugner의 결과를 근거로 유도하였다. 그리고 AGV를 강체로 고려하였을 때 주행으로부터 각 속도, 각가속도, 그리고 가속도의 식을 구할 수 있다. 운동 방정식을 유도하기 위해서  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , 그리고  $\delta_i$ 는 그 값이 작다고 가정을 한다.

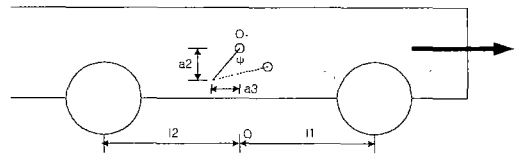


Fig. 1 Side view of AGV

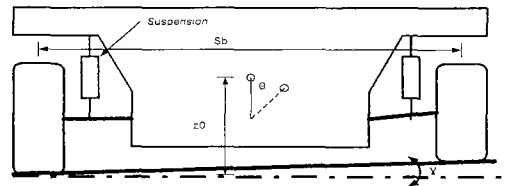


Fig. 2 Front view of AGV

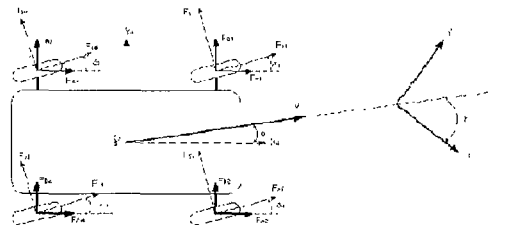


Fig. 3 Top view of AGV

그리고, 점  $O_r$ 은 AGV의 중력 중심점  $O_{cg}$ 를 도로 표면에 투영시킨 점이다.  $O_r$ 에서의 속도  $V_0$ 는

다음과 같다.

$$V_{O_r} = (\dot{x}, \dot{y}, 0)^T \quad (1)$$

식 (1)을 시간에 대해 미분을 하면,

$$\dot{V}_{O_r} = \frac{d}{dt}(V_{O_r}) + \omega_{O_r} \times V_{O_r} \quad (2)$$

이 된다. 이 때  $\omega_{O_r}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{O_r} = (\dot{\gamma}, \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}, \dot{\varepsilon})^T \quad (3)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는  $\Psi - \beta$ 이다.

그리고, 점  $O_r$ 에서 본 점  $O_{cg}$ 의 각속도는 다음과 같다.

$$\omega_{O_{cg}/O_r} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, 0)^T \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터  $\omega_{O_{cg}}$ 를 구하면,

$$\omega_{O_{cg}} = \omega_{O_{cg}/O_r} + \omega_{O_r} = (\dot{\phi} + \dot{\gamma}, \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma} + \dot{\theta}, \dot{\varepsilon})^T \quad (5)$$

식 (5)를 시간에 대해서 미분을 하면 다음과 같이  $O_{cg}$ 에서의 각가속도는

$$\dot{\omega}_{O_{cg}} = (\ddot{\phi} + \ddot{\gamma}, \ddot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi\ddot{\gamma} - \dot{\Psi}\dot{\gamma} + \ddot{\theta}, \ddot{\varepsilon})^T \quad (6)$$

와 같이 되고, 식 (1)과 식 (3)을 식 (2)에 대입하면, 점  $O_r$ 에서의 가속도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{O_r} &= \frac{d}{dt} V_{O_r} + \omega_{O_r} \times V_{O_r} \\ &= (\ddot{x}, \ddot{y}, 0)^T + (\dot{\gamma}, \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}, \dot{\varepsilon})^T \times (\dot{x}, \dot{y}, 0)^T \\ &= (\ddot{x}, \ddot{y}, 0)^T + (-\dot{y}\dot{\varepsilon}, \dot{x}\dot{\varepsilon}, \dot{\gamma}\dot{y} - \dot{x}(\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}))^T \\ &= (\ddot{x} - \dot{y}\dot{\varepsilon}, \ddot{y} + \dot{x}\dot{\varepsilon}, \dot{\gamma}\dot{y} - \dot{x}(\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}))^T \end{aligned} \quad (7)$$

그리고, AGV가 주행함에 따라 나타나는 각속도와 각가속도는 다음의 식 (8)과 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega &= [R_{roll}, R_{pitch}]^T \omega_{cg} \\ &= \left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{array} \right]^T \begin{bmatrix} \gamma + \dot{\phi} \\ \dot{\theta} + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta \\ 0 & 1 & \phi \\ \theta & -\phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma + \dot{\phi} \\ \dot{\theta} + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \gamma + \dot{\phi} - \theta\dot{\varepsilon} \\ \dot{\theta} + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma} + \phi\dot{\varepsilon} \\ \dot{\varepsilon} - \phi(\dot{\theta} + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}) + \theta(\gamma + \dot{\phi}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\phi} - \theta\dot{\varepsilon} - \theta\dot{\varepsilon} \\ \ddot{\theta} + \dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi\ddot{\gamma} - \dot{\Psi}\dot{\gamma} + \phi\dot{\varepsilon} + \phi\dot{\varepsilon} \\ \ddot{\varepsilon} - \phi(\ddot{\theta} + \dot{\gamma}\beta - \Psi\ddot{\gamma}) - \phi(\ddot{\theta} + \dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma} - \dot{\Psi}\dot{\gamma}) \\ + \theta(\dot{\gamma} + \dot{\phi}) + \theta(\dot{\gamma} + \dot{\phi}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

그리고,  $O_{cg}$ 에서  $O_r$ 까지의 거리는 AGV가 주행 중 일어나는 롤, 피치, 그리고 수직 운동에 의해서 변화된다. 변화하는 거리 즉,  $O_{cg}$ 에서 본  $O_r$ 의 상대 거리는 다음과 같이 수식으로 표현할 수 있으며,

$$r_{O_{cg}/O_r} = (a_2\theta, -a_1\phi, z - a_3\theta)^T \quad (10)$$

그 때의 상대 속도와 상대 가속도는 식 (11)과 식 (12)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} r_{O_{cg}/O_r} &= \frac{d}{dt} r_{O_{cg}/O_r} + \omega_{O_r} \times r_{O_{cg}/O_r} \\ &= \begin{bmatrix} a_2\dot{\theta} + (\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma})(z - a_3\theta) + \varepsilon a_1\dot{\phi} \\ \varepsilon a_2\dot{\theta} - \dot{\gamma}(z - a_3\theta) - a_1\dot{\theta} \\ \dot{z} - a_3\dot{\theta} - a_1\dot{\gamma}\phi - a_2\theta(\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{r}_{O_{cg}/O_r} = \begin{bmatrix} a_2\ddot{\theta} + (\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi\ddot{\gamma} - \dot{\Psi}\dot{\gamma})(z - a_3\theta) + (\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma})(\dot{z} - a_3\dot{\theta}) \\ + \varepsilon a_1\ddot{\phi} + \varepsilon a_1\dot{\phi} \\ \varepsilon a_2\ddot{\theta} + \varepsilon a_2\dot{\theta} - \dot{\gamma}\ddot{z} - a_3\dot{\gamma}\dot{\theta} - \dot{\gamma}\dot{z} - a_3\ddot{\theta} - a_1\ddot{\theta} \\ \ddot{z} - a_3\ddot{\theta} - a_1\ddot{\gamma}\phi - a_1\dot{\gamma}\dot{\phi} - a_2\theta(\ddot{\gamma}\beta - \dot{\Psi}\dot{\gamma}) \\ - a_2\theta(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

이렇게 구해진 상대 속도와 상대 가속도는 AGV

가 외력에 영향을 받을 때  $O_{cg}$ 에 작용하는 가속도를 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{O_{cg}} &= \ddot{r}_{O_{cg}/O_r} + \ddot{r}_{O_r} = \ddot{r}_{O_{cg}/O_r} + \dot{V}_{O_r} \\ &= \left[ \begin{array}{c} a_2\ddot{\theta} + (\dot{\gamma}\beta + \gamma\dot{\beta} - \Psi\dot{\gamma} - \Psi\dot{\gamma})(z - a_3\theta) + (\gamma\beta - \Psi\dot{\gamma})(\dot{z} - a_3\dot{\theta}) \\ \quad + \dot{z}a_1\dot{\phi} + \dot{z}a_1\dot{\phi} \\ \dot{z}a_2\dot{\theta} + \dot{z}a_2\dot{\theta} - \dot{\gamma}(z - a_1\theta) - \dot{\gamma}(\dot{z} - a_1\dot{\theta}) - a_1\dot{\theta} \\ \dot{z} - a_3\dot{\theta} - a_1(\dot{\gamma}\phi + \dot{\gamma}\dot{\phi}) - a_2(\theta(\gamma\beta - \Psi\dot{\gamma}) + \theta(\dot{\gamma}\beta + \gamma\dot{\beta} - \Psi\dot{\gamma} - \Psi\dot{\gamma})) \end{array} \right] \\ &\quad + \left[ \begin{array}{c} \ddot{x} - \dot{y}\dot{\epsilon} \\ \dot{y} + x\dot{\epsilon} \\ \dot{\gamma}\dot{y} - \dot{x}(\dot{\gamma}\beta - \Psi\dot{\gamma}) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

그리고, AGV의 각운동(angular motion)에 대한 운동방정식은 다음의 Euler 방정식으로부터 얻어진다[1].

$$\begin{aligned} \sum M_x &= I_x \dot{\omega}_x - (I_y - I_z)\omega_y\omega_z \\ \sum M_y &= I_y \dot{\omega}_y - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x \\ \sum M_z &= I_z \dot{\omega}_z - (I_x - I_y)\omega_x\omega_y \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $I_x$ ,  $I_y$ , 그리고  $I_z$ 는 주축(principle axes)에 대한 AGV의 관성 모멘트(moment of inertia)이고, 각속도(angular velocity)  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  그리고 각가속도 (angular acceleration velocity)  $\dot{\omega}_x$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $\dot{\omega}_z$ 는 식 (8)과 식 (9)로부터 얻을 수 있다.

AGV에 작용하는 외력은 타이어와 노면의 접촉력이 있고, 내력으로는 현가질량과 비현가질량의 상대운동에 따라 현가장치에 발생하는 현가장치 힘이 있다. AGV의 진행에 따른 전방 방향에 따른 각 바퀴의 힘은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_{A1} &= F_{x1} \cos \delta_1 - F_{y1} \sin \delta_1 \\ F_{A2} &= F_{x2} \cos \delta_2 - F_{y2} \sin \delta_2 \\ F_{A3} &= F_{x3} \cos \delta_3 - F_{y3} \sin \delta_3 \\ F_{A4} &= F_{x4} \cos \delta_4 - F_{y4} \sin \delta_4 \end{aligned} \quad (15)$$

AGV의 진행에 따른 측면 방향에 따른 각 바퀴

의 힘은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_{B1} &= F_{x1} \sin \delta_1 + F_{y1} \cos \delta_1 \\ F_{B2} &= F_{x2} \sin \delta_2 + F_{y2} \cos \delta_2 \\ F_{B3} &= F_{x3} \sin \delta_3 + F_{y3} \cos \delta_3 \\ F_{B4} &= F_{x4} \sin \delta_4 + F_{y4} \cos \delta_4 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,  $F_x$ 와  $F_y$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{xi} &= F_{Ri}\theta + F_{Ci} \cos \delta_i - F_{Si} \sin \delta_i \\ F_{yi} &= -F_{Ri}\phi + F_{Ci} \sin \delta_i - F_{Si} \cos \delta_i \end{aligned} \quad (17)$$

AGV의 진행에 따른 수직 방향에 따른 각 바퀴의 힘은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{mgl_2}{2(I_1 + I_2)} + S_i \quad \text{for } i = 1, 2 \\ P_i &= \frac{mgl_1}{2(I_1 + I_2)} + S_i \quad \text{for } i = 3, 4 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, 식 (15)~(16)의  $F_{xi}$ 와  $F_{yi}$ 는 타이어 좌표에 따른 종방향과 횡방향의 힘 즉, 외부에서 AGV에 작용하는 힘을 나타내며, 이 힘은 타이어 모델에서부터 얻어진다. 그리고 식 (18)에서의  $S_i$ 는 현가장치 모델에서부터 얻어지는 내부 힘이며, 식 (15)~(18)을 이용하여 타이어를 통해 AGV에 작용하는 모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} M_{r_x} &= \left(\frac{S_b}{2} + a_1\phi\right)(P_1 + P_3) - \left(\frac{S_b}{2} - a_1\phi\right)(P_2 + P_4) + (z - a_3\theta) \sum_{i=1}^4 F_{B_i} \\ M_{r_y} &= (I_2 + a_2\theta)(P_3 + P_1) - (I_1 - a_2\theta)(P_1 + P_2) - (z - a_3\theta) \sum_{i=1}^4 F_{A_i} \\ M_{r_z} &= (I_1 - a_2\theta)(F_{B1} + F_{B2}) - (I_2 + a_2\theta)(F_{B3} + F_{B4}) \\ &\quad - \left(\frac{S_b}{2} + a_1\phi\right)(F_{A1} + F_{A3}) - \left(\frac{S_b}{2} - a_1\phi\right)(F_{A2} + F_{A4}) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $M_{r_x}$ ,  $M_{r_y}$ , 그리고  $M_{r_z}$ 는  $O_r$ 에 작용하는 모멘트이다. 그리고  $O_{cg}$ 에 작용하는 모멘트는 위

의 세 식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M_{cg} = [R_{roll}, R_{pitch}]^T M_r \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{c\ddot{x}} \\ M_{c\ddot{y}} \\ M_{c\ddot{z}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_{r_x} \\ M_{r_y} \\ M_{r_z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta \\ 0 & 1 & \phi \\ \theta & -\phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{r_x} \\ M_{r_y} \\ M_{r_z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

AGV의 운동방정식은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (22)$$

이 때 상태벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,  $6 \times 1$  행렬로 구성되어 있다.

$$q = [x, y, z, \phi, \theta, \varepsilon]^T \quad (23)$$

관성행렬  $H(q)$ 는  $6 \times 6$ 로 구성되어 있으며, 중력가속도와 원심력의 항인  $h(q, \dot{q})$ 는  $6 \times 1$  행렬로 되어있다. 그리고, 이 운동방정식의 입력이 되는 것은  $\tau$ 행렬이며  $6 \times 1$  행렬로 되어있다. 이 입력은 3개의 힘과 3개의 모멘트를 구성되어 있다.

각각의 행렬은 각속도식(식 (8)), 각속도식(식 (9)), 가속도식(식 (12)), 타이어 힘에 관한 식(식 (15)~(16)), 모멘트 식(식 (19))등으로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$H(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & ma_2 & ma_1\phi \\ 0 & m & 0 & 0 & -ma_1 & ma_2\theta \\ 0 & 0 & m & 0 & -ma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & -I_x\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & I_y\phi \\ 0 & 0 & 0 & I_z\theta & -I_z\phi & I_z \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$h(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6]^T \quad (25)$$

여기서,  $h(q, \dot{q})$ 행렬의 구성 성분은 다음과 같다.

$$h_1 = m(-\dot{y}\varepsilon(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma - \Psi_\gamma) - a_3\theta(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma - \Psi_\gamma) + \dot{z}(\dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) - a_3\theta(\dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) + a_1\dot{\phi}\varepsilon)$$

$$h_2 = m(a_2\dot{\theta}\varepsilon - \dot{\gamma}(z - a_3\theta) - \dot{\gamma}(z - a_3\theta) + \dot{x}\varepsilon)$$

$$h_3 = m(-a_1\dot{\gamma}\phi - a_1\dot{\gamma}\phi - a_2\theta(\dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) - a_2\theta(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma - \Psi_\gamma) + \dot{\gamma}\dot{y} - \dot{x}(\dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma)) + mg$$

$$h_4 = I_x(\dot{\gamma} - \dot{\theta}\varepsilon) - (I_x - I_z)(\theta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma + \phi\varepsilon)(\varepsilon - \phi(\theta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) + \theta(\dot{\gamma} + \dot{\phi}))$$

$$h_5 = I_x(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma - \Psi_\gamma + \dot{\phi}\varepsilon) - (I_x - I_z)(\dot{\gamma} + \dot{\phi} - \theta(\Psi - \beta))(\Psi - \beta - \phi(\theta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) + \theta(\dot{\gamma} + \dot{\phi}))$$

$$h_6 = I_z(-\dot{\phi}(\theta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma) - \phi(\dot{\gamma}\beta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma - \Psi_\gamma) + \theta(\dot{\gamma} + \dot{\phi}) + \theta\dot{\gamma}) - (I_x - I_z)(\dot{\gamma} + \dot{\phi} - \theta\varepsilon)(\theta + \dot{\gamma}\beta - \Psi_\gamma + \phi\varepsilon)$$

그리고, AGV 운동방정식의 입력이 되는 것은  $\tau$  행렬은 식(26)과 같이 3방향의 힘과 각 방향에 대한 모멘트로 구성되어 있다.

$$\tau = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 F_{Ai} \\ \sum_{i=1}^3 F_{Bi} \\ \sum_{i=1}^3 P_i \\ M_x - \theta M_z \\ M_y + \phi M_z \\ M_z - \theta M_x - \phi M_y \end{bmatrix} \quad (26)$$

### 3. 제어기 설계

2장에서 유도한 비선형 운동방정식을 제어기 설계를 위해 몇 가지 가정을 세워 간략화 시킨다. 첫 번째로  $\gamma$ 는 0이다. 즉 선착장 도로는 높이 방향의 굴곡이 없이 평평한 도로이므로 도로의 단면에 대한 기울이는 0이라고 가정을 할 수 있다. 두 번째로 롤 운동, 요잉 운동, 피칭 운동이 질량 중심점과 동일한 위치에서 작용하고 있다.

위의 두 가정으로부터 2장에서 유도한 복잡한 비선형 운동방정식은 다음과 같이 단순한 형태의 비선형 운동방정식으로 유도된다[2].

$$\hat{H}(q) \ddot{q} + \hat{h}(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \quad (27)$$

$$\hat{H}(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\hat{h}(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ mx\dot{\epsilon} \\ mg \\ -I_x \theta \dot{\epsilon} - (I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\epsilon} \\ (I_z - I_x) \theta \dot{\epsilon}^2 \\ (I_x - I_y) \theta \dot{\epsilon} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_{Ai} \\ \sum_{i=1}^4 B_{Ai} \\ \sum_{i=1}^4 P_i \\ M_x - \theta M_z \\ M_y + \phi M_z \\ M_z - \theta M_x - \phi M_y \end{bmatrix} \quad (30)$$

제어기의 형태는 AGV의 운동방정식(식 (27))의 입력 토크를 다음과 같은 형태를 가진 중력보상 PD제어기로 선정한다[3].

$$\tau = K_p(\dot{t}) q_e(t) + K_d(\dot{t}) \dot{q}_e(t) + G \quad (31)$$

식 (31)을 식(32)에 대입하여 다음과 같은 형태의 운동방정식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{H} \ddot{q}_e + (\hat{h} + K_d) \dot{q}_e + K_p q_e &= \hat{H} \ddot{q}_d + \hat{h} \dot{q}_d \\ \rightarrow \ddot{q}_e + A^* \dot{q}_e + B^* q_e &= F^* \end{aligned} \quad (32)$$

여기서,  $A^* = \hat{H}^{-1}(\hat{h} + K_d)$ ,  $B^* = \hat{H}^{-1} K_p$ , 그리고  $F^* = \hat{H}^{-1}(\hat{H} \ddot{q}_d + \hat{h} \dot{q}_d)$ 이다.

그리고 기준 모델의 운동방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{q}_m + a_m \dot{q}_m + b_m q_m = F^* \quad (33)$$

AGV의 운동방정식과 기준모델의 운동방정식의 오차에 대한 상태방정식은 다음과 같다.

$$E = Z - Z_m \quad (34)$$

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -b_m & -a_m \end{bmatrix} E + \begin{bmatrix} 0 & I \\ b_m - B^* & a_m - A^* \end{bmatrix} Z \quad (35)$$

여기서,  $Z = [q_e, \dot{q}_e]^T$ 이고,  $Z_m = [q_m, \dot{q}_m]^T$ 이다.

식 (35)로 부터 Lyapunov 함수 후보를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} E^T P E + \frac{1}{2} \text{tr}((b_m - B^*)^T \Gamma_1 (b_m - B^*)) \\ &\quad + \frac{1}{2} \text{tr}((a_m - A^*)^T \Gamma_2 (a_m - A^*)) \end{aligned} \quad (36)$$

여기서, 행렬 P는 양의 행렬이고,  $\Gamma_1, \Gamma_2$  역시 양의 행렬이며, 대각행렬이다.

그리고 식(36)을 시간에 대해서 미분을 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -E^T Q E + \text{tr}((b_m - B^*)^T (\Omega q_e^T - \Gamma_1 \dot{B}^*)) \\ &\quad + \text{tr}((b_m - A^*)^T (\Omega q_e^T - \Gamma_2 \dot{A}^*)) \end{aligned} \quad (37)$$

여기서,  $\Omega = p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)$ 이다.

이 때  $\dot{V} \leq 0$ 이 되면 안정 조건을 만족하게되므로, 다음의 두 적응 제어 법칙을 제안한다[4].

$$\begin{aligned} (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) q_e^T - \Gamma_1 \dot{B}^* &= 0 \\ \rightarrow \dot{B}^* &= \frac{1}{\Gamma_1} (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) q_e^T \\ (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) q_e^T - \Gamma_2 \dot{A}^* &= 0 \\ \rightarrow \dot{A}^* &= \frac{1}{\Gamma_2} (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) q_e^T \end{aligned} \quad (38)$$

제안된 두 적응 제어 법칙으로부터  $\dot{V}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} = -E^T Q E \quad (39)$$

$Q$ 는 항상 양으로 한정된 행렬이므로  $\dot{V}$ 는 항상 영보다 작게 같게 되므로. 따라서 Lyapunov 함수 후보는 안정도를 보장할 수 있다.

그러므로 두 제어 법칙으로부터 다음의 적분 형태의 제어기 게인 동조 법칙을 얻을 수 있다.

$$K_p(t) = K_p(0) + \alpha_1 \int_0^t (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) \dot{q}_e^T dt$$

$$K_d(t) = K_d(0) - \hat{h}(q) + \alpha_2 \int_0^t (p_2(q_e - q_m) + p_3(\dot{q}_e - \dot{q}_m)) \dot{q}_e^T dt \quad (40)$$

여기서,  $\alpha_1 = \hat{H}/\Gamma_3$  그리고  $\alpha_2 = \hat{H}/\Gamma_1$ 이다.

그림 4는 전체 시스템의 블록선도를 나타내는 것이다.

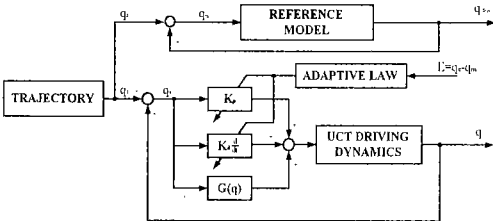


Fig. 4 Block diagram of AGV control system

#### 4. 경로 계획

도로 경로는 선착장에서 하적장의 도킹위치까지이다. 직선구간을 주행할 때 주행 속도는 5m/s이고, J-turn을 할 때에는 3m/s이다. 그림 5의 경로를 주행하기 위해서 등속구간, 가속구간, 감속구간으로 나누었다. 등속구간은 직선 주행 등속 구간(O'A, DE, HI, LM, 그리고 QR)과 곡선 주행 등속 구간(BC, FG, GK, 그리고 NP)으로 나누어진다. 가

속 구간은 정지 상태에서 주행 속도(OO')까지 그리고 곡선 주행에서 직선 주행 등속 구간(CD, GH, KL, 그리고 PQ)까지로 나누어진다. 그리고 감속

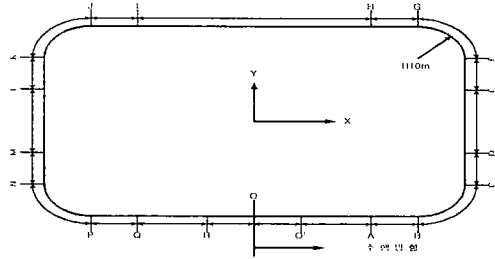


Fig. 5 Schematic diagram of the test track

구간은 직선 주행에서 곡선 주행 등속 구간(AB, EF, U, 그리고 MN)까지 그리고 주행 상태에서 정지 상태까지의 구간(RO)으로 나누어진다.

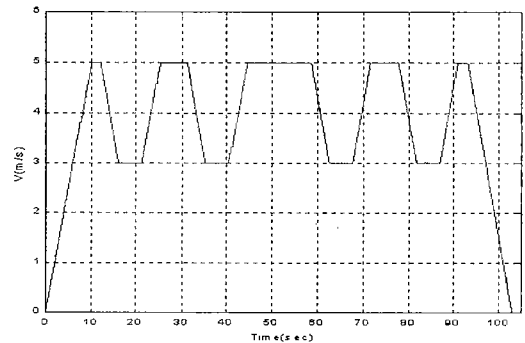


Fig. 6 Velocity trajectory profile

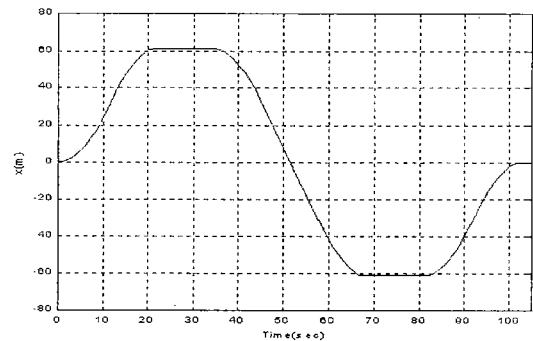


Fig. 7 x-axis position

### 5. 시뮬레이션

본 절에서는 3장에서 유도된 AGV의 제어 알고리즘의 성능을 평가한다. 시뮬레이션 결과 그림 11~12에서와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 결과 그래프에서 나타내듯 위치 오차는  $\pm 0.01m$  이내에 있음을 알 수 있고, 속도 오차는  $\pm 0.01m/s$  이내에 있음을 알 수 있다.

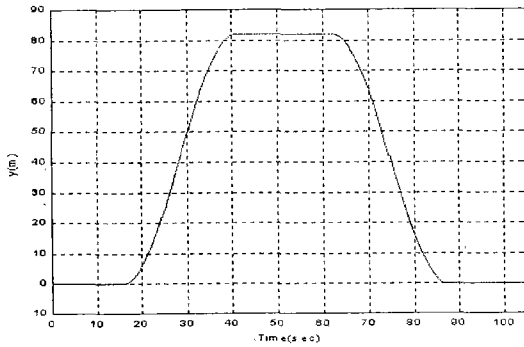


Fig. 8 y-axis position

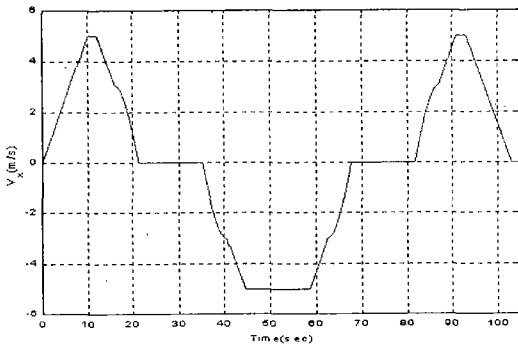


Fig. 9 x-axis velocity

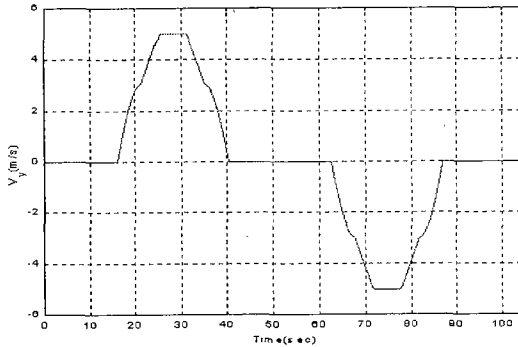


Fig. 10 y-axis velocity

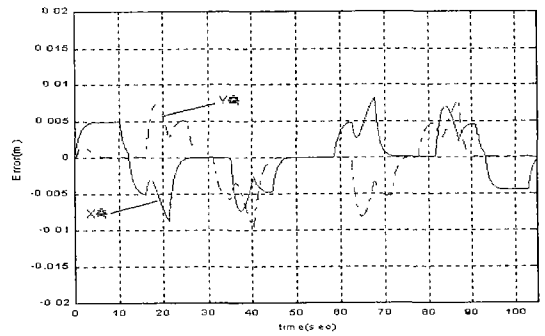


Fig. 11 Position error

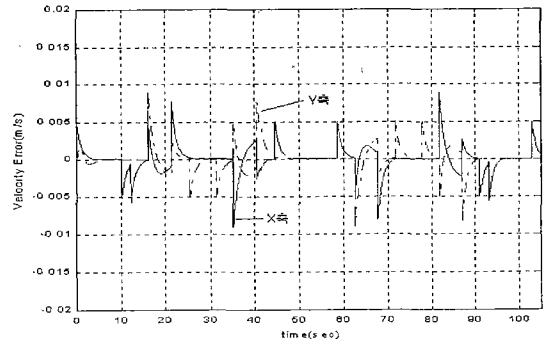


Fig. 12 Velocity error

그림 13~20는 앞에서 수행하였던 MRAC 기법을 이용한 AGV 주행 제어 시뮬레이션과 PD 제어기를 이용한 AGV의 주행 제어 시뮬레이션을 비교한 것이다.



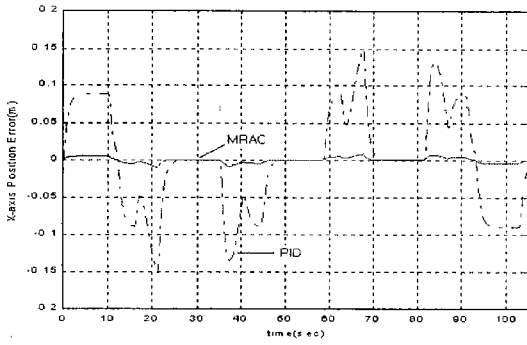


Fig. 13 Position error about x-axis

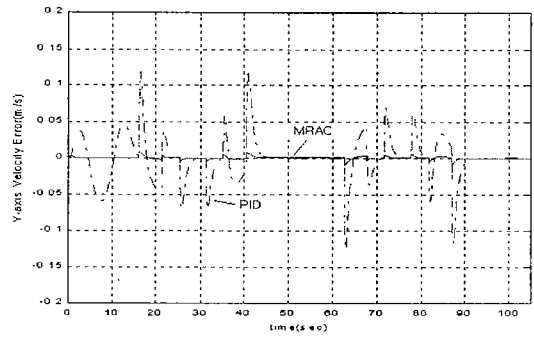


Fig. 16 Velocity error about y-axis

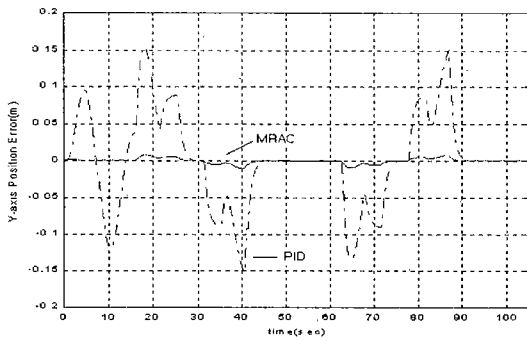


Fig. 14 Position error about y-axis

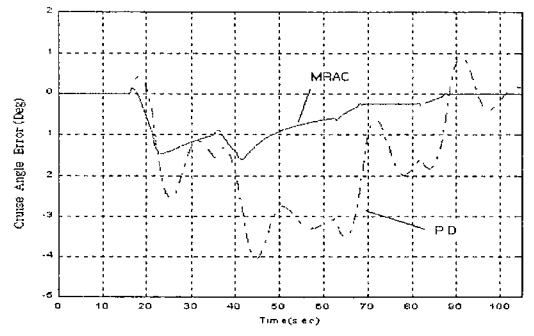


Fig. 17 Error about cruise angle

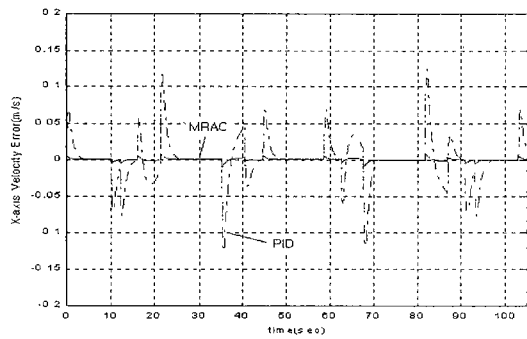


Fig. 15 Velocity error about x-axis

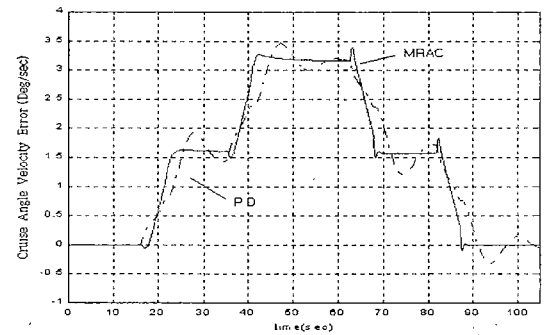


Fig. 18 Error about cruise about velocity

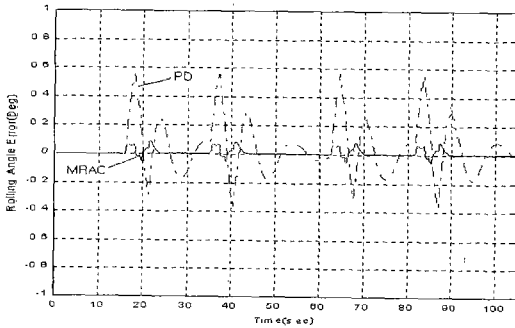


Fig. 19 Error diagram about rolling angle

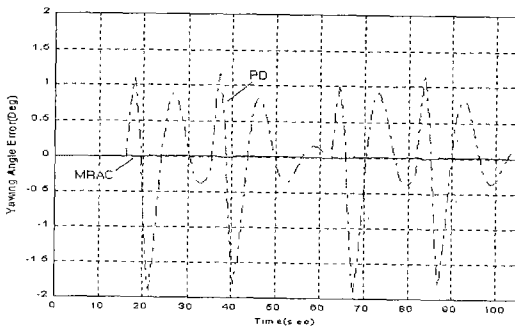


Fig. 20 Error diagram about yawing angle

### 6. 결론

본 논문에서는 항만에 대한 자동화 시스템의 기술개발에 대한 일환인 항만내의 AGV의 주행 제어 알고리즘의 제안을 목적으로 수행하였다. 주행 제어를 수행하기 위하여 기존의 주행 모델링 해석 방법을 바탕으로 AGV만이 고려될 수 있는 항을 첨가하여 운동방정식을 유도하였다. 그리고, AGV가 주행 중에 제어기 계인을 조정할 수 있어 환경의 변화에도 잘 적응할 수 있는 주행 제어 알고리즘을 제시하여 기존의 PD제어기 보다 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 이 제어기는 현가장치와 조향

장치 등을 통합하여 수행함으로써 개별적 제어기들 간의 간섭과 충돌 현상의 발생을 줄일 수 있다.

그러나 아직 정확한 항만의 지도가 생성되지 않아 주행 경로 생성이 문제점으로 남아있다. 이 문제점의 보완책 모색을 향후 연구방향이라고 할 수 있다.

### 참고문헌

- 1) D. T. Greenwood, Principles of Dynamics, Prentice Hall, 1988.
- 2) E. M. Lim, Lateral and Longitudinal Vehicle Control Coupling in the Automated Highway System, PATH report, 1998.
- 3) K. S. Narendra, and A. M. Annaswamy, Stables Adaptive Systems, Prentice Hall, 1989.
- 4) M. Vidasagar, Nonlinear Systems Analysis, Prentice Hall, 1993
- 5) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 1992.
- 6) P. Lugner. "The Influence of the Structure of Automobile Models and Tyre Characteristics on the Theoretical Results of Steady-state and Transient Vehicle Performance," The Dynamics of Vehicle : Proceedings 5th VSD-2nd IUTAM Symposium, pp. 21-39, 1979.
- 7) H. Peng, and M. Tomizuka, Lateral Control of Front -Wheel-Steering Rubber-Tire Vehicles, Inst. Transportation Studies, Univ. California, Berkeley, Rep. UCB-ITS-PRR-90-5 of PATH Program, July, 1990.
- 8) Matlab, Using SIMULINK, The Math Works, inc. January, 1997.

## NOMENCLATURES

$I_x(I_y)(I_z)$  : Moment of Inertia in x(y)(z) Direction  
 $l_1(l_2)$  : Distance from Center of Mass to front(rear) Axle  
 $L$  : Distance of Wheel Base  
 $S_b$  : Distance of Wheel Tread(Track)  
 $Z_F, Z_R$  : Static distance along the Z-axis between the center of gravity on the sprung mass and the roll center of the front and the rear wheels  
 $M_s$  : Sprung mass  
 $T_{SF}, T_{SR}$  : Distance between spring connections of the front and rear suspensions  
 $C_F, C_R$  : Viscous damping coefficient for a single suspension at the front and rear  
 $C_F', C_R'$  : Coulomb damping coefficient for a single suspension at the front and rear  
 $K_F, K_R$  : Suspension load-deflection rate for a single suspension spring in the quasi-linear range at the front and the rear suspension  
 $T_F, T_R$  : Wheel tread width at front and rear  
 $K_T$  : Radial tire rate in quasi-linear range for a single tire  
 $Z_F, Z_R$  : Static distance along the Z-axis between the center of gravity of the sprung mass and the roll center of the front and rear wheels  
 $\lambda_F \lambda_R$  : Term by which and are multiplied to the represent the suspension spring rate when the suspension deflection stops are encountered

$\Omega_{FC}, \Omega_{RC}$  : Maximum suspension deflection in compression from the positions of static equilibrium relative to the vehicle for quasi-linear load-deflection characteristics of the springs  
 $\Omega_{FT}, \Omega_{RT}$  : Maximum suspension deflection in tension from the positions of static equilibrium relative to the vehicle for quasi-linear load-deflection characteristics of the springs  
 $R_F, R_R$  : Auxiliary roll stiffness(suspension in roll) at the front and rear suspension

## Simulation Parameters

$I_x$	17103.8 kg · sec <sup>2</sup> /m	$K_F$	235.2 kg/cm
$I_y$	363978.7 kg · sec <sup>2</sup> /m	$K_R$	190.4 kg/cm
$I_z$	373875 kg · sec <sup>2</sup> /m	$T_F$	250 cm
$l_1$	5 m	$T_R$	250 cm
$l_2$	5 m	$K_T$	92390 kg/m
$L$	10 m	$Z_F$	32.69 cm
$S_b$	2400 mm	$Z_R$	32.69 cm
$Z_F$	65.5 cm	$\lambda_F$	20
$Z_R$	65.5 cm	$\lambda_R$	20
$M_s$	120 kg	$\Omega_{FC}$	8.4 cm
$T_{SF}$	110 cm	$\Omega_{RC}$	10.8 cm
$T_{SR}$	180 cm	$\Omega_{FT}$	15.5 cm
$C_F$	18.3(tension) kg · sec/cm 22.37(compression)	$\Omega_{RT}$	18.9 cm
$C_R$	7.83(tension) kg · sec/cm 11.19(compression)	$R_F$	250 m · kg / rad
$C_F'$	25 kgf	$R_R$	250 m · kg / rad
$C_R'$	25 kgf	$P \text{ gain}$	0.175
		$D \text{ gain}$	0.034