

부분 피드백 선형화를 이용한 One-wheel Unicycle Robot 의 자세 제어

김진석#, 조영진*, 김영탁**

The Posture Control of One-wheel Unicycle Robot Using Partial Feedback Linearization

Jin Seok Kim[#], Young Jin Cho^{*} and Young Tark Kim^{**}

ABSTRACT

In this study, the ultimate goal is to acquire stability when turning around efficiently by using the controller which is applied partial feedback linearization of One-wheel Unicycle Robot. When moving around, linear controller could result in unstable factor according to widening operation range. So in order to reduce instability, I have developed Non-linear Controller using Partial Feedback Linearization. Compared with linear controller, Non-linear Controller guarantees the superiority of Regulating Control and Tracking Control in direct and also revolution motion of Robot. I'm sure of the Non-linear controller performance through many experiments.

Key Words : Partial Feedback Linearization (부분 피드백 선형화), Posture Control (자세 제어), One-wheel Unicycle Robot (일륜 구동 로봇)

기호설명

M_U : Mass of the upper body
 M_L : Mass of the lower body
 I_U : Moment of inertia of the upper body about the joint angle
 I_L : Moment of inertia of the lower body about the ground
 I_M : Moment of inertia of the motor angle
 H : Distance between the joint and the ground
 l : Distance between the center of mass of the lower

body and the ground
 L : Distance between the center of mass of the upper body and the joint
 μ_s : Coefficient of friction about motor and gear angles
 μ_g : Coefficient of friction about ground
 η : Reduction ratio of gear
 g : Gravitational acceleration
 γ : Inclination angle of the upper body
 α : Inclination angle of the lower body
 β : $\alpha + \gamma$
 u : Motor input current

✉ 접수일: 2005 년 9 월 27 일; 게재승인일: 2007 년 3 월 8 일

삼성전자 생산기술 연구소

E-mail: jinseoki.kim@samsung.com Tel. (031) 200 - 2453

* 중앙대학교 기계공학과 메카트로닉스연구실

** 중앙대학교 기계공학과

1. 서론

2001년 미국에서 시판된 Segway(1인용 무공해 스쿠터)는 전 세계적으로 큰 관심을 불러 일으켰고, 이를 필두로 더욱 소형·경량의 개인이송수단에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 것은 Autonomous Unicycle Robot으로 바뀌어 2개 혹은 1개로 이루어져 소형·경량화가 가능하여 보관 및 운반이 편리하다는 장점을 지니고 있다. 또한 구조적으로 매우 작은 회전반경으로 좁은 공간에서도 이동이 자유롭다는 장점으로 인하여 각종 서비스 로봇의 몸체로도 많이 채택되어 연구되어진다.

최초의 One-wheel Unicycle Robot은 1990년 MIT의 Vos, D.W.¹가 사람이 외발자전거를 제어하는 것과 같은 형태의 Unicycle Robot이 등장한 이래 “Double Inverted Pendulum”, “Gyroptic” 등 다양한 형태로 연구되어졌다.²

하지만 이러한 장점에도 상업화 되지 않은 이유는 제어의 복잡성, 동력원 등의 문제가 남아 있기 때문이다.³ 특히 회전 시 자세 균형에 있어 근사 선형화를 사용한 제어기의 경우 동작점 밖에서 모델링 오차에 의해서 이를 사용할 수가 없다.

따라서 본 논문에서는 “Double Inverted Pendulum” 형태의 One-wheel Unicycle Robot에서 회전 시 자세 균형 제어에 대하여 피드백 선형화를 이용한 비선형 제어를 통하여 보다 고성능 제어를 설계

하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 유효성을 입증한다.

2. 제어기 설계

2.1 모델링

“Double Inverted Pendulum” 형태의 Unicycle Robot의 측면부는 “Inverted Pendulum” 형태를 지니며 직진운동 시 Fig. 1과 같이 측면부는 각도 ϕ 를 유지하며 각속도 θ 를 제어하여 움직이게 된다. 이러한 “Wheeled Inverted Pendulum” 형태의 모델링 및 제어는 Ha and Yuta⁴에 의해 연구되었다.

본 논문에서 다루게 될 전면부는 “Double Inverted Pendulum” 형태를 취한다.

로봇 시스템은 두 개의 Revolute Joint로 연결된 두 개의 몸체로 모델링 되어진다. Fig. 2에서 모델링 된 시스템 및 x, y, z 좌표계를 설정하였다. 좌표계 원점은 지면과 바퀴가 닿는 지점이다. 왼쪽에서 오른쪽으로 x축, 아래서 위로 y축, 뒤에서 앞으로 z축이 구성된다. x축 방향 회전 움직임을 “roll” 혹은 “rolling”, y축 방향 회전 움직임을 “yaw” 혹은 “yawing”, z축 방향 회전 움직임을 “pitch” 혹은 “pitching”으로 사용한다.

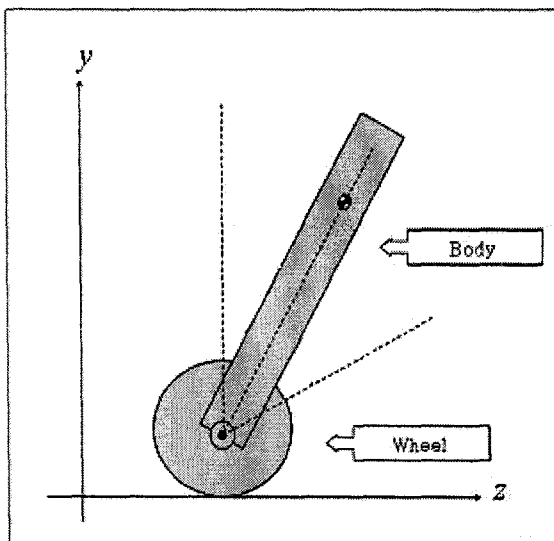


Fig. 1 The model of the wheeled inverted pendulum

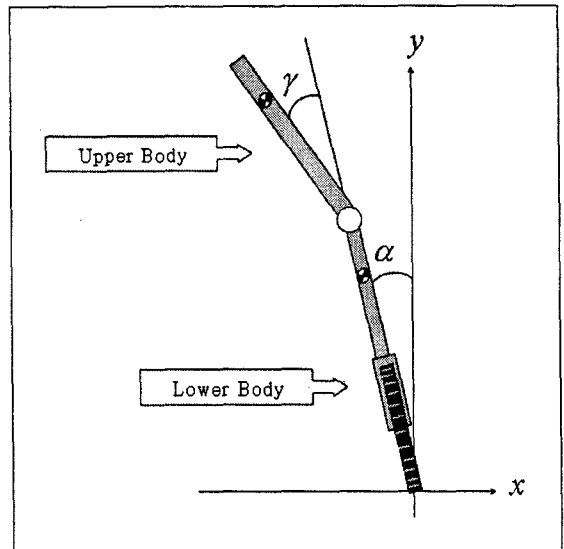


Fig. 2 The model of the double inverted pendulum

Fig. 2와 같이 전면부는 바퀴가 rolling 운동 시 균형유지를 하기 위하여 1차원 평면상의 “Double

Inverted Pendulum” 형태로서 Upper Body 와 Lower Body 로 분리되어 Revolute Joint 로 구성된다. Joint 에 연결된 Actuator 가 pitching 운동을 하여 좌우 균형 유지를 한다.

전면부의 모델은 Lagrange’s motion equation 으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \gamma} + \frac{\partial U}{\partial \gamma} - \frac{\partial D}{\partial \dot{\gamma}} = Q_{\gamma} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} + \frac{\partial U}{\partial \alpha} - \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} = Q_{\alpha} \quad (2)$$

여기서

T : Kinetic energy

U : Potential energy

D : Dissipation energy function

Q : External force

$$T = \frac{1}{2} M_L (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} M_U (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_L \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_U \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} I_M \dot{\eta}^2 \quad (3)$$

$$U = M_L l g \cos(\alpha) + M_U g (l \cos(\alpha) + L \cos(\beta)) \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2} \mu_g \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} \mu_s \dot{\gamma}^2 \quad (5)$$

$$Q_{\gamma} = \eta \tau u = \tau \quad (6)$$

식 (3)~(6)을 식 (1), (2)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \{M_L l^2 + I_L + I_U + M_U (H^2 + L^2 + 2HL \cos(\gamma))\} \ddot{\alpha} \\ & + (I_U + M_U L^2 + M_U HL \cos(\gamma)) \ddot{\gamma} \\ & - M_U HL \dot{\gamma} (\dot{\gamma} + 2\dot{\alpha}) \sin(\gamma) - (M_L + M_U) l g \sin(\alpha) \\ & - M_U g L (\sin(\alpha) \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\gamma)) + \mu_g \dot{\alpha} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (M_U L^2 + I_U + M_U HL \cos(\gamma)) \ddot{\alpha} \\ & + (I_U + M_U L^2 + I_M \eta^2) \ddot{\gamma} + M_U HL \dot{\alpha}^2 \sin(\gamma) \\ & - M_U g L (\cos(\alpha) \sin(\gamma)) + \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ & + \mu_s \dot{\gamma} = \tau \end{aligned} \quad (8)$$

Table 1 Parameters and Variables

symbol	Value[unit]
M_U	0.574[kg]
M_L	1.380[kg]
I_U	0.0111[kgm ²]
I_L	0.0085[kgm ²]
I_M	43x10 ⁽⁻⁷⁾ [kgm ²]
H	0.1182[m]
l	0.0762[m]
L	0.0815[m]
μ_s	0.04[Nm/(rad/sec)]
μ_g	0.02[Nm/(rad/sec)]
η	14[1]
g	9.8[m/ s ²]
γ, α, β	[rad]
u	[Ampare]

이때 파라메타 및 변수는 Table 1 과 같다.

2.1.1 피드백 선형화

2.1 절에서 구한 식 (7), (8)를 다음과 같이 간단히

$$a_1 \ddot{\alpha} + \mu_g \dot{\alpha} + a_2 + a_3 \dot{\gamma} + a_4 = 0 \quad (9)$$

$$b_1 \ddot{\alpha} + b_2 \ddot{\gamma} + b_3 + \mu_s \dot{\gamma} = \tau \quad (10)$$

으로 나타내면 여기서

$$a_1 = M_L l^2 + I_L + I_U + M_U (H^2 + L^2 + 2HL \cos(\gamma))$$

$$a_2 = -(M_L + M_U) l g \sin(\alpha)$$

$$-M_U g L (\sin(\alpha) \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\gamma))$$

$$a_3 = I_U + M_U L^2 + M_U HL \cos(\gamma)$$

$$a_4 = -M_U HL \dot{\gamma} (\dot{\gamma} + 2\dot{\alpha}) \sin(\gamma)$$

$$b_1 = M_U L^2 + I_U + M_U HL \cos(\gamma)$$

$$b_2 = I_U + M_U L^2 + I_M \eta^2$$

$$b_3 = -M_U g L (\cos(\alpha) \sin(\gamma)) + \sin(\alpha) \cos(\gamma)$$

식 (9)와 (10)을 $\ddot{\alpha}$ 와 $\ddot{\gamma}$ 에 대하여 정리하여 이를 상태변수

$$x_1 = \alpha, x_2 = \gamma, x_3 = \dot{\alpha}, x_4 = \dot{\gamma}, \tau = u \quad (11)$$

로 치환하여 상태공간 방정식으로 나타내면 식(12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = f(x) + g(x)u \quad (12)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ -\frac{a_3}{c} \left\{ \frac{b_1}{a_3} \mu_g x_3 + \frac{b_2 a_2}{a_3} + \frac{b_2 a_4}{a_3} - b_3 - \mu_s x_4 \right\} \\ \frac{a_1}{c} \left\{ \frac{b_1}{a_1} \mu_g x_3 + \frac{b_1 a_2}{a_1} + \frac{b_1 a_4}{a_1} - b_3 - \mu_s x_4 \right\} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{a_3}{a_1 b_2 - a_3 b_1} \\ \frac{a_1}{a_1 b_2 - a_3 b_1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (12)의 \dot{x}_3 의 우변항을 식 (15)와 같이 w 라 정의한다.

$$w = -\frac{a_3}{a_1 b_2 - a_3 b_1} \left\{ \frac{b_1}{a_3} \mu_g x_3 + \frac{b_2 a_2}{a_3} + \frac{b_2 a_4}{a_3} - b_3 - \mu_s x_4 + u \right\} \quad (15)$$

새로운 입력변수 w 의 상태공간 방정식으로 표현하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ 0 \\ -\frac{1}{a_3} \{ \mu_s x_3 + a_2 + a_4 \} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{a_1}{a_3} \end{bmatrix} w \quad (16)$$

식 (12)의 Kronecker 지수는 $\kappa_1=3, \kappa_2=2$ 이므로 $\kappa_1 + \kappa_2 = 5 = n$ 으로 점검에 필요한 벡터필드들은 다음과 같다.

$$g_1(x), g_2(x), ad_f g_1(x), \dots, ad_f^{n-1} g_2(x) \quad (17)$$

하지만, $[ad_f g_1(x), ad_f^4 g_2(x)] \neq 0$ 으로 선형 독립이 아니므로 대합적인 디스트리뷰션(Involutive

distribution)이 성립되지 않으므로 식 (16)은 피드백 선형화가 불가능하다. 따라서 출력 변수 α 와 γ 를 동시에 선형화 할 수 없으므로 새로운 입력 변수 w 를 피드백하여 동작 범위가 넓은 α 와 $\dot{\alpha}$ 의 두 상태 변수를 선형화하는 부분 피드백 선형화를 취한다.

식 (16)에서 상태함수 $f(x)$ 의 \dot{x}_4 에 관한 항을 $f_4(x)$, 입력함수 $g(x)$ 의 \dot{x}_4 에 관한 항을 $g_4(x)$ 라 하여 전개 후 이를 근사선형화하면 다음과 같다.

$$f_4(x) \cong \frac{-\mu_g x_3 + (M_L l g + M_U l g + M_U g L)x_1 + M_U g L x_2}{I_U + M_U L^2 + M_U H L} \quad (18)$$

$$g_4(x) \cong -\frac{M_L l^2 + I_L + I_U + M_U (H + L)^2}{I_U + M_U L^2 + M_U H L} = \varepsilon \quad (19)$$

식 (18)와 (19)의 분모다항식을 ζ 로 둔다.

$$\zeta = I_U + M_U L^2 + M_U H L \quad (20)$$

식 (16)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{M_L g l + M_U g l + M_U g l}{\zeta} & \frac{M_U g L}{\zeta} & -\frac{\mu_g}{\zeta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} w \quad (21)$$

식 (21)에서 Table 1의 값을 사용하여 개루프 근을 조사하면

$$p = [0 \quad 0 \quad 5.0868 \quad -5.0868]^T$$

으로서 우반 평면상에 극점이 존재하여 불안정한 시스템을 알 수 있다.

또한 완전 상태 가제어성 행렬

$$[B \quad AB \quad A^2 B \quad A^3 B]$$

의 계수가 4로서 각 열이 일

차독립으로 완전 상태 가제어임을 알 수 있다.
안정화가 되는 임의의 페루프 시스템 극점

$$p = \begin{bmatrix} -8.7899 + 3.6257i \\ -8.7899 - 3.6257i \\ -6.2224 + 0.2973i \\ -6.2224 - 0.2973i \end{bmatrix}$$

와 같도록 Ackermann 의 공식을 사용하여 이득 행렬 K 를 구하면

$$K = [258.6338 \quad 71.6699 \quad 46.8241 \quad 14.0881]$$

로서 시스템을 안정화시키는 상태피드백을 취할 수 있다.

2.2 기율기 제어

피드백을 통한 시스템 선형화 후 식 (17) 선형 시스템의 전달함수를 구하면 하나의 입력에 2 개의 출력이 존재하므로

$$\frac{Y_1(s)}{U(s)} = \frac{s^2 - 950.9}{s^4 + 40s^3 + 686s^2 + 4695s + 10852}$$

$$\frac{Y_2(s)}{U(s)} = \frac{-2.27s^2 - 0.99s - 103.91}{s^4 - 31.11s^3 + 40s^2 + 686s + 4695s + 10852}$$

으로서 적분기를 포함하지 않은 O 형 시스템으로 정상상태 오차를 발생함을 추정할 수 있다.

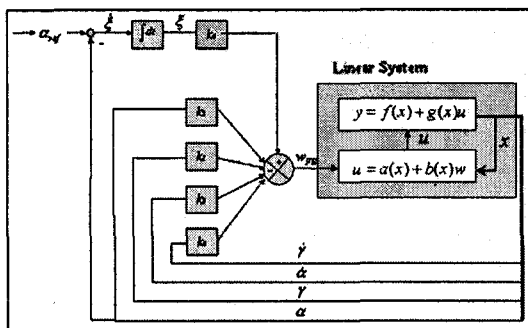


Fig. 3 Servo system configuration of the feedback linearization system

따라서 새로운 상태변수를 추가하여 Fig. 3 과 같이 서보 시스템을 구성할 수 있다.

3. 실험

3.1 Simulation

3.1.1 초기조건에 의한 응답

비선형 제어기의 성능 검토를 위하여 Fig. 4 와 같이 SimMechanics 에서 모델링하여 아래단의 각도 α 의 초기값을 10deg 로 주었을 때의 수렴결과를 알아보았다

Fig. 5 에서 Setting time 이 3.5 초, α 의 최대 Overshoot 가 0.5radian, α 의 최대 Overshoot 가 1.7radian 을 보이는 것을 알 수 있다.

이때의 출력 Torque 를 도식하면 Fig. 6 과 같다.

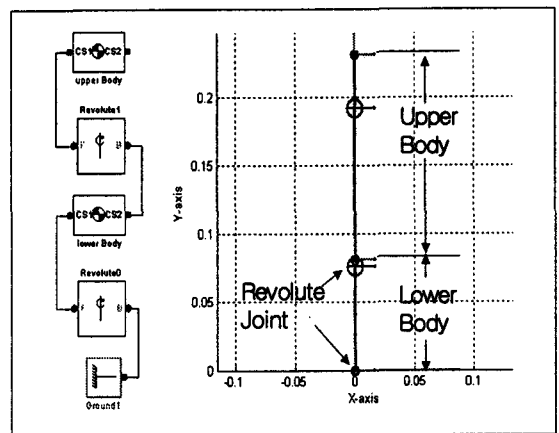


Fig. 4 Mechanical system modeling using the SimMechanics

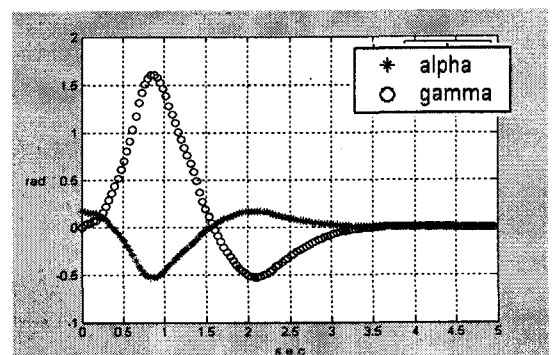


Fig. 5 Initial condition response when inclining angle is 10deg

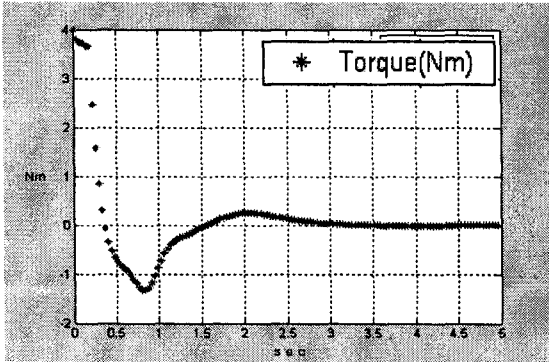


Fig. 6 Torque graph as the initial condition response

3.1.2 회전 시 안정 기울기 각도

로봇이 Fig. 7 과 같이 반경 R 에 대하여 속도 v 로 회전운동을 할 때 발생하는 원심력에 의해 발생하는 토크는

$$\tau_c = m \frac{v^2}{R} l_r \cos \theta = mgl_r \sin \theta$$

이므로 이때 안정된 상태를 유지하기 위한 각도 θ 는

$$\theta = \text{Arctan} \frac{v^2}{R} \quad (22)$$

이 된다. 따라서 속도 v 로 이동중인 로봇을 반경 R 을 그리며 회전시키기 위해선 아랫단 각도 α 가 θ 를 추종하면 된다.

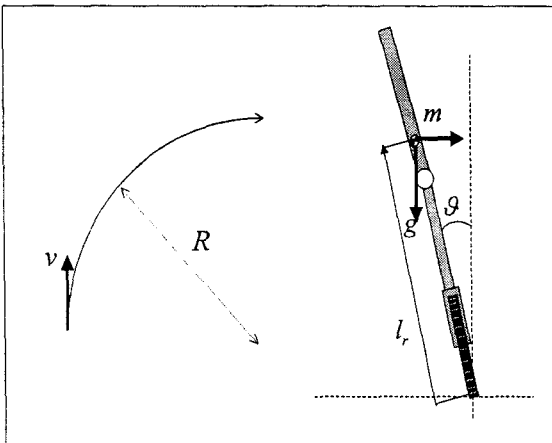


Fig. 7 Posture of rotating motion in the abstract

3.1.3 램프 응답

회전 시 기울기 추종 능력을 알아보기 Fig. 8 과 같이 모델링하고 로봇이 회전 시 원심력에 의해 반경을 이탈하지 않는다고 가정하여 무게가 없는 반경 R 의 바에 로봇을 부착하고 이를 y 축을 회전시키고 램프 입력으로 주었을 때 응답을 알아 보았다.

Fig. 10 은 램프 응답선도이다. 모델링 오차 및 원심력항에 의해 정상상태 오차가 발생하지만 계산되어진 기준값 α_{ref} 에 대해 잘 추종함을 시뮬레이션 상에서 볼 수 있다.

3.2 실험

3.2.1 실험 장치의 구성

실험을 위하여 Fig. 11 의 설계도와 같이 Double Inverted Pendulum 형태의 실험 장치를 구성 하였다. 19cm(D) x 5cm(W) x 28cm(H)의 크기에 약 2Kg 이다.

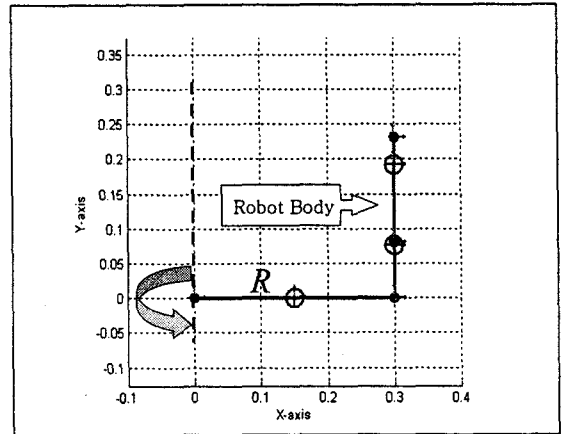


Fig. 8 Modeling of rotating motion

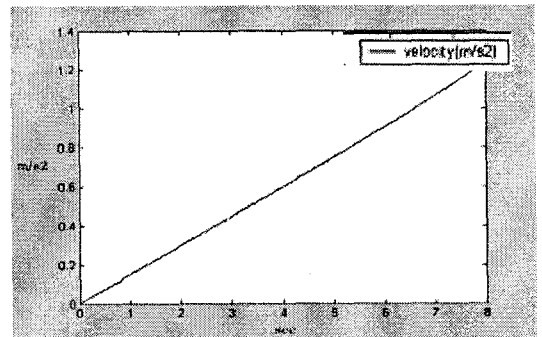


Fig. 9 Line velocity when robot is rotating

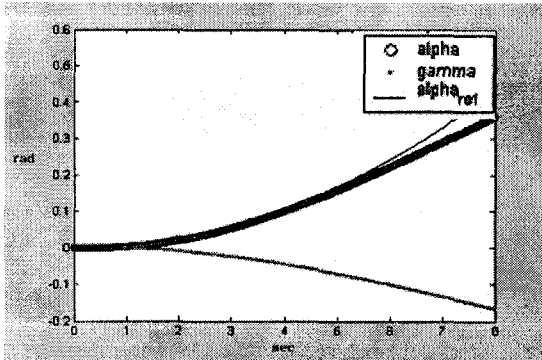


Fig. 10 Ramp response graph

Controller 및 모터 드라이브, 전원은 외부 공급을 받으며 중간 Joint 부위에 DC 모터를 부착하였다. 회전 시 기울기 자세 실험을 위하여 회전력을 주기 위한 Stepping 모터와 30cm 길이의 바 위에 로봇을 설치하였다.

복잡한 실험 장치 구동 및 빠른 연산을 위하여 많은 주변장치를 가지고 있으면서도 복잡한 실수 연산을 고속으로 처리할 수 있는 DSP 를 선정하였으며 그 중에서도 모터 제어 및 로봇 시스템 구성에 가장 적합하고 저렴한 16bit fixed floating point 처리능력을 가진 Texas Instrument 사의 TMS320F2407 DSP 를 선택하였다.

보다 간편하고 정확한 실험을 위하여 2 개의 로타리 엔코더가 각도 및 각속도를 검출하도록 하였다. 로타리 엔코더는 Koyo 사의 2500pulse/rev 의 분해능을 가진 엔코더로서 DSP 에서 4 체배 분주하여 한 바퀴당 10000pulse(0.036deg/pulse)로 사용하였다.

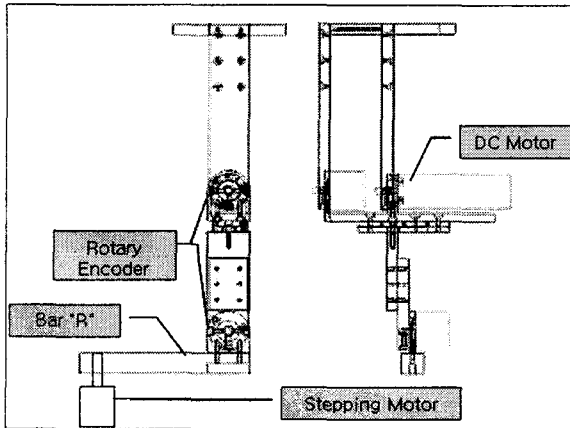


Fig. 11 Mechanical design for the robot

로봇에 사용된 DC 모터는 로봇의 균형을 유지하기 위한 동력원으로 무게 0.7kg, 기어 비 1:14 이며 최대 Stoll torque 가 6Nm 인 대만 yang-ri 사의 24V/50W DC 모터를 부착하였으며, 회전력을 주기 위하여 최대 4Nm 의 힘을 낼 수 있는 Stepping 모터를 부착하였다. 모터 드라이브는 National Semiconductor 사의 LMD18200 모델 2 개를 병렬 연결하여 연속 6A, 피크 12A 의 전류를 제어할 수 있다.

3.3 실험결과 및 고찰

본 절에서는 앞장에서 구성한 로봇과 제어기를 사용하여 자세 균형 유지 및 회전 시 자세에 대한 실험을 하였다. 2.1.1 절에서 구한 피드백 게인 K 를 시행착오법을 통하여 수정한 K 는

$$K = [258.6338 \quad 71.6699 \quad 28.09464 \quad 8.45286]$$

이다. 이 gain K 를 사용하여 피드백을 구성하였다

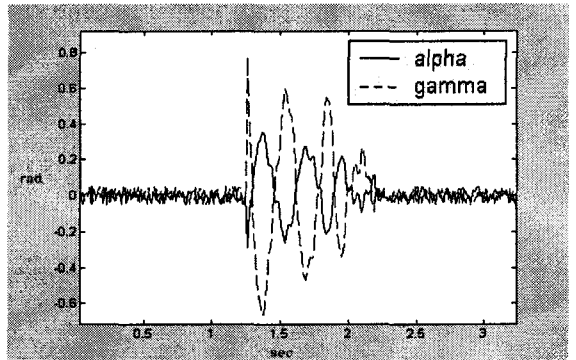


Fig. 12 Impulse response

Fig. 12 는 로봇에 Impulse 를 가했을 때의 응답 선도이며 Fig. 5 의 시뮬레이션 결과와 비교 시 모델링 오차에 의해 시정수가 작았음을 단적으로 보여준다. Fig. 10 은 레퍼런스 입력에 대한 트래킹 시뮬레이션을 보여주며 이에 대한 실험 결과는 Fig 13 과 같다. Fig. 10 은 회전 시 로봇의 기울기 제어를 위하여 0.3m 바의 한쪽에는 로봇을 설치하고, 다른 쪽에는 회전을 원활히 하기 위한 동일한 무게 추를 장착하여 실험한 결과이다.

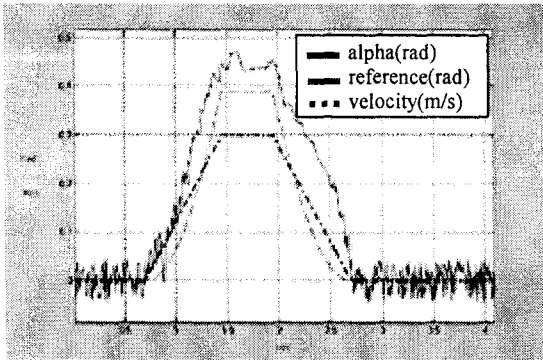


Fig. 13 Inclination angle and tangential velocity of the lower body when rotating radius of the robots is 30cm

Fig. 13 에서 velocity(m/s)는 회전 각속도를 속도 값으로 바꾼 것으로써 로봇을 회전시키는 Stepping motor 의 속도 테이블과 일치한다. 이러한 속도로 이동하고 있는 로봇을 회전시키기 위하여 필요한 각도는 velocity 값과 R 을 식 (22)에 대입함으로써 구할 수 있다. 이렇게 구한 각도 θ 를 실제 실험에서 다소 오차가 발생하지만 유사한 형태로 추종함을 확인 할 수 있다.

하지만 시뮬레이션 상에서는 추종 각도 보다 적은 값으로 각도 α 가 추종하였는데 실제 실험에서는 더 큰 값을 나타내었다. 이것은 다시 말해 각도 또한 더 큰 값을 나타낸다는 것으로 로봇이 균형을 잡기 위하여 보다 낮은 자세를 취함을 알 수 있다.

본 실험은 로봇이 반경 R 을 유지하며 회전할 수 있다는 가정 하에 시행된 것으로서 실제 적용과는 많은 차이가 생길 수 있다. 그러나 Fig. 13 에 나타난 실험 결과는 Table 로 만들어 각 회전 시 필요한 기울기 각도를 역출하면 좋은 성능 향상을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 “Double Inverted Pendulum” 형태의 One-wheel Unicycle robot 의 회전 시 회전 축 방향으로 몸체의 기울기를 유지하는 Tracking 제어를 시행하였다.

Tracking 시에는 로봇의 기울기의 동작 범위가 넓어짐에 선형 제어기의 부분을 벗어나며 이를 해결하기 위하여 부분 피드백 선형화를 통한 비선형

제어기를 사용하여 보다 효과적인 제어를 하였다.

설계한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 DSP Controller 를 사용하여 실제 비선형 피드백 연산을 수행하였으며 이를 실험용 로봇에 적용하여 비선형 제어기의 우수성을 검증하였다.

참고문헌

1. Vos, D.W. and Von Flotow, A. H., “Dynamics and nonlinear adaptive control of an autonomous unicycle: theory and experiment,” Decision and Control, Proceedings of the 29th IEEE Conference, Vol. 1, pp.182-187, 1990.
2. Ou, Y. S. and Xu, Y. S., “Balance control of a single wheel robot,” Intelligent Robots and System, IEEE/RSJ International Conference, Vol. 2, pp.2043-2048, 2002.
3. Kim, J. W. and Jeong, H. G., “Fuzzy Rule for Curve Path Tracking of a Unicycle Robot,” Proceeding of the KSPE Autumn Annual Meeting, pp.425-429, 1996.
4. Ha, Y. and Yuta, S., “Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum,” Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', Vol. 3, pp.1875-1882, 1994.