

밸런싱 메커니즘을 이용한 이륜형 자동차 형태의 이동로봇개발 : BalBOT VII

Development of Two Wheeled Car-like Mobile Robot Using Balancing Mechanism : BalBOT VII

이 형 직¹, 정 슬[†]

Hyung Jik Lee¹,Seul Jung[†]

Abstract This paper presents the development and control of a two wheeled car-like mobile robot using balancing mechanism whose heading control is done by turning the handle. The mobile inverted pendulum is a combined system of a mobile robot and an inverted pendulum system. A sensor fusion technique of low cost sensors such as a gyro sensor and a tilt sensor to measure the balancing angle of the inverted pendulum robot system accurately is implemented. Experimental studies of the trajectory following control task has been conducted by command of steering wheel while balancing.

Keywords : Mobile Inverted Pendulum, Gyro Drift, Complementary Filter, Balancing Mechanism

1. 서 론

최근에는 화석에너지 고갈과 환경오염에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으면서 효율이 높은 하이브리드 엔진이나 배기가스가 없는 전기자동차 등 친환경 및 그린에너지를 사용하는 이동수단에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

미국에서 개발된 Segway 라고 불리는 이동 로봇은 근거리 이동을 위한 차세대 운송수단으로 각광을 받게 되었다. Segway는 자전거 구조와는 달리 양 옆으로 구성된 두 개의 바퀴를 이용하여 스스로 균형을 잡으면서 원하는 위치로 빠르고 안정되게 이동할 수 있도록 개발 되었다. 전진과 후진은 몸의 기울어진 각도에 의해 수행되고 회전은 스위치조작으로 구동된다. 그러나 안정화를 위하여 다수의 고가 센서와 마이크로프로세서를 사용하여 기울어진 각도를 측정하고 또한 제어하므로 가격이 비싼 것이 단점이었다.

이후 밸런싱을 기반으로 한 이동로봇에 대한 연구가 많이 진행되었다^[1-12]. 최근에는 밸런싱을 기반으로 운반용 자동차 형태의 연구가 되고 있다^[4,5]. Segway 의 후속 모델로 2인용 전기자동차 PUMA(Personal Urban Mobility and Accessibility)의 시범 모델이 출시되었다. PUMA는 미래의 근거리 운송 수단으로 제작되었으며, Segway와 마찬가지로 밸런싱 기반으로 시내 주행을 할 수 있도록 설계되었다. PUMA는 시내와 같이 복잡하고 좁은 곳에서 주행이 가능한 모델이다. 그리고 Segway는 자동차처럼 가속페달이나 브레이크 페달을 필요로 하지 않으며, 탑승자의 무게 중심이동에 따라 앞으로 이동하거나 또는 뒤로 이동하게 되어 있다. 탑승자가 앞으로 숙이게 되면 앞으로 전진하며, 반대로 뒤로 하게 되면 후진하게 된다. 2인용 전기자동차인 PUMA도 마찬가지로 이러한 작동원리를 채택하고 있기 때문에 탑승자의 무게중심을 앞이나 뒤로 이동시킬 수 있도록 하는 슬라이드 구조가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 이전의 역진자 기반 이동로봇의 연구의 연장으로 일인용 운송수단의 차량을 구현하였다^[8-12]. 이 차량은 한명의 탑승자를 태우고 역진자 기반의 이동로봇 기술을 적용하여 밸런싱을 하고 이동할 수 있다. 정확한 각도를 출력하는 비싼 센서 대신에 저가용 틸트센서와 자이로센서를 이용하여 기울어진 각도를 정확히 측정하고,

Received: Sep. 11. 2009; Reviewed: Oct. 22. 2009; Accepted: Nov. 18. 2009
 ※ 본 논문은 교육과학기술부 특정기초사업 (R01-2008-000-10992-0) 에 의해 지원되었으며, 이에 감사를 드립니다. 본 논문의 일부는 2009년 로봇공학회 학술대회에서 발표되었습니다.

¹ 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사

[†] 교신저자 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수(jungs@cnu.ac.kr)

무게중심이동에 의한 전·후방 이동이 아니라 자동차 핸들에 의해 회전을 할 수 있고, 가감속 페달에 의해 이동을 제어할 수 있는 시스템을 설계 제작하고 실험하였다.

2. 역진자 이동로봇 모델링

2.1 기구학

역진자 이동로봇은 역진자와 이동로봇이 조합된 형태의 로봇이므로 이동로봇의 기구학을 이용하여 구할 수 있었다.

일반적인 이동로봇의 좌표계는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보면 r_w 은 바퀴의 반지름, L 은 바퀴 사이의 거리, v_m 는 로봇의 속도, ω_m 는 회전속도를 나타낸다. 먼저 로봇의 속도 v_m 과 각속도 ω_m 을 구하면,

$$v_m = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (1)$$

$$\omega_m = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (2)$$

이 됨을 알 수 있다. 여기서 $v_R = \omega_R r_w$, $v_L = \omega_L r_w$ 는 각 바퀴의 선속도이다.

로봇의 속도 v_m 을 이용하여 x , y 축 상의 로봇의 속도를 구하면

$$\dot{x}_m = v_m \cos \phi_m \quad (3)$$

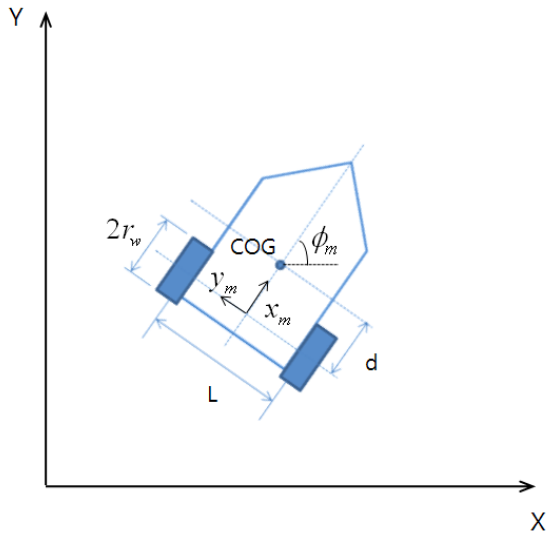


그림 1. 이동로봇 좌표계

$$\dot{y}_m = v_m \sin \phi_m \quad (4)$$

식(3)-(4) 을 조합하여 행렬형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\phi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & 0 \\ \sin \phi_m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

로봇의 무게 중심에서의 속도를 구하면 다음식과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_w}{2} & \frac{r_w}{2} \\ \frac{r_w}{L} & -\frac{r_w}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(5)와 식(6) 을 정리하면 다음과 같은 이동로봇의 기구학식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\phi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_w}{2} \cos \phi_m & \frac{r_w}{2} \cos \phi_m \\ \frac{r_w}{2} \sin \phi_m & \frac{r_w}{2} \sin \phi_m \\ \frac{r_w}{L} & -\frac{r_w}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 동역학

역진자 이동로봇의 동역학은 위치에너지와 운동에너지의 관계에 의한 Lagrangian 방식에 의해 구할 수 있다^{6,7)}. 로봇의 좌표계는 그림 2와 같다.

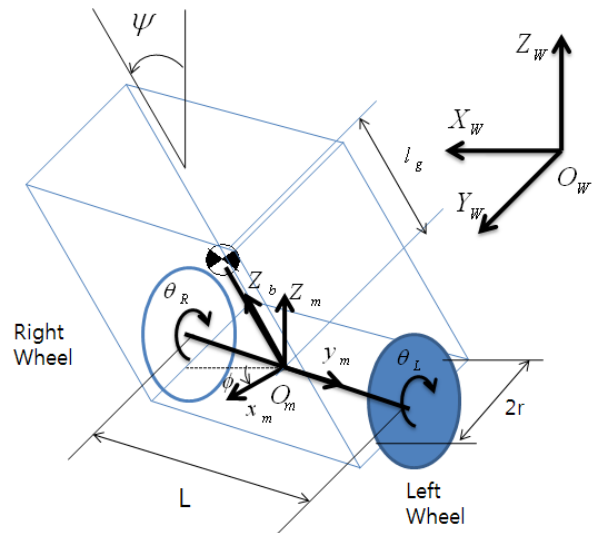


그림 2. 역진자 이동로봇 좌표계

먼저 바퀴를 제외한 카트의 운동에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_g &= \frac{1}{2} V_g^T M_g V_g + \frac{1}{2} \Omega_g^T I_g \Omega_g \\
 &= \frac{1}{2} M_g [x_m^2 + 2x_m \dot{l}_g (\dot{\psi} \cos \psi \cos \phi_m - \dot{\phi}_m \sin \psi \sin \phi_m) + y_m^2 \\
 &\quad + 2y_m \dot{l}_g (\dot{\psi} \cos \psi \sin \phi_m + \dot{\phi}_m \sin \psi \cos \phi_m)] \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_g [l_g^2 \dot{\psi}^2 + l_g^2 \dot{\psi} \sin^2 \psi] \\
 &\quad + \frac{1}{2} (I_{xx} \dot{\phi}_m^2 \sin^2 \psi + I_{yy} \dot{\psi}^2 + I_{zz} \dot{\phi}_m^2 \cos^2 \psi)
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 V_g 는 카트의 선속도, Ω_g 는 카트의 회전속도이다. 다음으로 모터를 포함한 양 바퀴의 운동에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_w &= \frac{1}{2} M_w r_w^2 (\dot{\theta}_{rw}^2 + \dot{\theta}_{lw}^2) + \frac{1}{2} (I_{wa} + I_{ra} \gamma^2) (\dot{\theta}_{rw}^2 + \dot{\theta}_{lw}^2) \\
 &\quad + (I_{wd} + I_{rd}) \dot{\phi}_m^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 역진자 이동로봇의 카트의 위치에너지를 구하게 되면 다음과 같다.

$$U_g = M_g g l_g \cos \psi \quad (10)$$

앞의 식을 조합하여 역진자 이동로봇의 Lagrangian 함수 L_g 을 구하게 되면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L_g &= T_g + T_w - U_g \\
 &= \frac{1}{2} M_g [x_m^2 + 2x_m \dot{l}_g (\dot{\psi} \cos \psi \cos \phi_m - \dot{\phi}_m \sin \psi \sin \phi_m) + y_m^2 \\
 &\quad + 2y_m \dot{l}_g (\dot{\psi} \cos \psi \sin \phi_m + \dot{\phi}_m \sin \psi \cos \phi_m)] \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_g (l_g^2 \dot{\psi}^2 + l_g^2 \dot{\psi} \sin^2 \psi) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (I_{xx} \dot{\phi}_m^2 \sin^2 \psi + I_{yy} \dot{\psi}^2 + I_{zz} \dot{\phi}_m^2 \cos^2 \psi) \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_w r_w^2 (\dot{\theta}_{rw}^2 + \dot{\theta}_{lw}^2) + \frac{1}{2} (I_{wa} + I_{ra} \gamma^2) (\dot{\theta}_{rw}^2 + \dot{\theta}_{lw}^2) \\
 &\quad + (I_{wd} + I_{rd}) \dot{\phi}_m^2 - M_g g l_g \cos \psi
 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 구한 Lagrangian 함수로부터 다음과 같이 Lagrangian 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_g}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L_g}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

정리하여 구한 전체 동역학식은 다음과 같다.

표 1. 역진자 이동로봇 변수들

θ_{rw}, θ_{lw}	[rad]	각 바퀴의 회전각도
x_m, y_m	[m]	이동로봇의 위치
ϕ_m	[rad]	헤딩각도
ψ	[rad]	카트의 기울어진 각도
M_g, M_w	[Kg]	카트 및 바퀴의 무게
l_g	[m]	바퀴축과 무게중심까지 거리
L	[m]	바퀴사이의 거리
r_w	[m]	바퀴의 반지름
I_g	[Kg m^2]	카트의 관성모멘트
I_{wa}, I_{wd}	[Kg m^2]	바퀴 축 및 수직방향 관성모멘트
I_{ra}, I_{rd}	[Kg m^2]	모터의 로터축 및 수직방향 관성모멘트
γ		모터의 기어비
τ_{rw}, τ_{lw}	[Nm]	각 바퀴의 토크

$$M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G = E\tau + A(q)^T \lambda$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_g & 0 & M_{13} & M_{14} & 0 & 0 \\ 0 & M_g & M_{23} & M_{24} & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & 0 & 0 & 0 \\ M_{41} & M_{42} & 0 & M_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{66} \end{bmatrix}$$

$$M_{13} = M_{31} = -l_g M_g \sin \psi \sin \phi_m$$

$$M_{14} = M_{41} = -l_g M_g \cos \psi \cos \phi_m$$

$$M_{23} = M_{32} = l_g M_g \sin \psi \cos \phi_m$$

$$M_{33} = (l_g^2 M_g \sin^2 \psi + I_{xx} \sin^2 \psi + I_{zz} \cos^2 \psi + 2I_{wd} + 2I_{rd}) \quad (13)$$

$$M_{44} = (l_g^2 M_g + I_{yy})$$

$$M_{55} = (M_w r_w^2 + I_{wa} + I_{ra} \gamma^2)$$

$$M_{66} = (M_w r_w^2 + I_{wa} + I_{ra} \gamma^2)$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -l_g M_g \sin \psi \cos \phi_m (\dot{\psi}^2 + \dot{\phi}_m^2) - 2l_g M_g \dot{\psi} \dot{\phi}_m \cos \psi \sin \phi_m \\ -l_g M_g \sin \psi \sin \phi_m (\dot{\psi}^2 + \dot{\phi}_m^2) + 2l_g M_g \dot{\psi} \dot{\phi}_m \cos \psi \cos \phi_m \\ 2(l_g^2 M_g + I_{xx} - I_{zz}) \sin \psi \cos \psi \dot{\phi}_m \dot{\psi} \\ -(l_g^2 M_g + I_{xx} - I_{zz}) \sin \psi \cos \psi \dot{\phi}_m^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -M_g g l_g \sin \psi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_{rw} \\ \tau_{lw} \end{bmatrix}$$

단, $q = [x_m, y_m, \phi_m, \psi, \theta_{rw}, \theta_{lw}]^T$ 이다. 위 식의 $M(q) \in R^{6 \times 6}$ 은 관성행렬, $H(q, \dot{q}) \in R^{6 \times 1}$ 는 coriolis and centrifugal force, $G \in R^{6 \times 1}$ 는 중력힘, $E \in R^{6 \times 2}$ 는 입력 변환 행렬, $\tau \in R^{2 \times 1}$ 는 control torque, $A(q)$ 는 로봇의 제

약 행렬, 그리고 λ 는 Lagrange multiplier 이다.

위의 식의 제약 행렬은 이동로봇이 수직으로 이동할 수 없고, 또한 슬립이 일어나지 않는다는 가정에 의해 다음과 같이 구속조건이 정의된다.

$$A(q) = \begin{bmatrix} \sin \phi_m - \cos \phi_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \phi_m & \sin \phi_m & L/2 & 0 & -r_w & 0 \\ \cos \phi_m & \sin \phi_m & -L/2 & 0 & 0 & -r_w \end{bmatrix} \quad (14)$$

한편 $A(q)$ 와 $A(q)S(q) = 0$ 이 만족하는 즉 null space 관계인 행렬을 $S(q)$ 라 하면 다음 식 (15)과 같이 구할 수 있다.

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & 0 & 0 \\ \sin \phi_m & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{r_w} & \frac{L}{2r_w} & 0 \\ \frac{1}{r_w} & -\frac{L}{2r_w} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

만약 \dot{q} 이 null space에서 항상 존재하고, 새로운 속도 벡터를 $v = [v_m, \dot{\phi}_m, \dot{\psi}]^T$ 라 하면 다음과 같이 식이 존재하게 된다.

$$\dot{q} = S(q)v \quad (16)$$

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)v + S(q)\dot{v} \quad (17)$$

앞의 식 (13)에 $S(q)^T$ 를 곱하여 Lagrange multiplier 를 소거하면 다음과 같은 식이 성립된다.

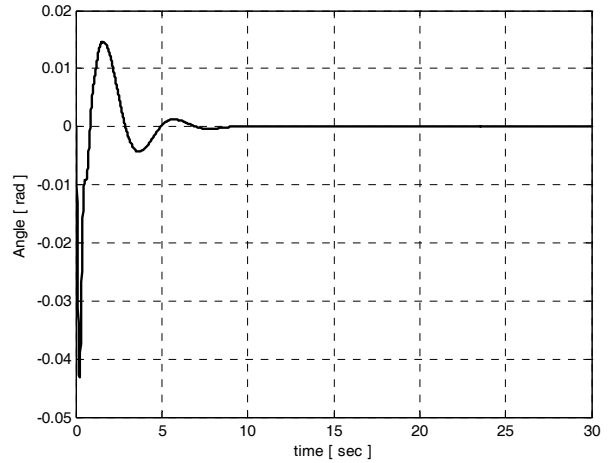
$$S(q)^T M(q) \ddot{q} + S(q)^T H(q, \dot{q}) + S(q)^T G = S(q)^T E \tau \quad (18)$$

위의 식에 식 (16)-(17)를 대입하고 정리하면 다음과 같은 식이 성립되게 된다.

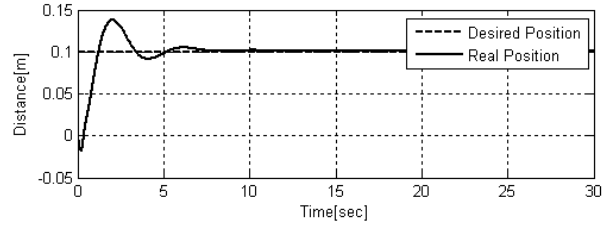
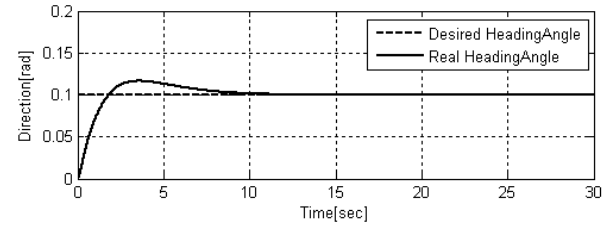
$$\hat{M}v + \hat{H}(v, \dot{v}) + \hat{G} = \hat{E}\tau \quad (19)$$

단 $\hat{M} = S(q)^T M(q) S(q)$, $\hat{G} = S(q)^T G$, $\hat{H} = S(q)^T [M(q)\dot{S}(q)v + H(q, \dot{q})]$, $\hat{E} = S(q)^T E$ 이다. 이로써 역진자 이동로봇의 제약조건이 제거된 동역학식을 구할 수 있었다.

그림 3은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.



(a) 각도제어



(b) 위치제어 및 헤딩각도제어

그림 3. 제어 시뮬레이션

3. 상태 측정센서

현재 많이 사용되고 있는 각도측정센서로는 자이로센서, 틸트센서, 가속도센서 등이 있다. 이중 본 논문에서 사용한 저가의 틸트센서의 경우 낮은 주파수에서는 비교적 정확한 각도값으로 측정됨을 알 수 있었지만, 주파수가 높아짐에 따라 급격하게 센서 특성이 나빠지며, 자이로 센서의 경우 저주파수의 드리프트 현상이 일어남을 볼 수 있었다. 이에 complementary 필터와 칼만 필터를 적용하여 정확한 각도를 측정하고자 하였다.

그리고 역진자 이동로봇의 위치와 헤딩각도 측정을 위해 각 바퀴에 장착된 엔코더와 이동로봇 기구학을 이용하여 구할 수 있었다.

3.1 각도측정

3.1.1 complementary 필터

Complementary 필터는 저주파수의 각도는 틸트센서를 이용하여 측정하고, 고주파수의 각도는 자이로센서를 이용하여 측정하는 간단한 원리를 이용한 센서융합 방법이다. $H_t(s), H_g(s)$ 를 각각 틸트센서와 자이로센서의 전달함수라 할 때 식 (1)이 되도록 필터를 설정해야 한다.

$$H_t(s)F_t(s) + H_g(s)F_g(s) = 1 \quad (20)$$

각각 낮은 주파수에서의 H_t 와 높은 주파수에서의 $H_g(s)$ 를 다음과 같이 이상적인 센서인 $H_t(s) = 1$, 그리고 $H_g(s) = 1$ 로 모델링하고, 1차 필터 형태로 $F_t(s), F_g(s)$ 을 설정하게 되면 식 (21)-(22)과 같다.

$$F_t(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (21)$$

$$F_g(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1} \quad (22)$$

형태로 보면 $F_t(s)$ 는 저역통과필터, $F_g(s)$ 는 고역통과필터이다. 위의 필터의 τ 값은 실험을 통해 구할 수 있었으며 0.8로 설정 하였다.

3.1.2 칼만필터

좀더 정확한 각도값을 얻기 위해 다음과 같은 칼만 필터를 적용하였다. 자이로센서를 다음과 같이 간단히 모델링하였다^[12].

$$\dot{\phi}_{gyro} = \dot{\phi}_{real} + offset + noise \quad (23)$$

앞의 식을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x_k + w_k \quad (24)$$

$$z_k = [1 \quad 0] x_k + v_k \quad (25)$$

단 w_k 와 v_k 는 프로세스 노이즈와 센서 노이즈를 의미한다. Kalman 필터의 업데이트는 다음과 같은 순서로 이루어진다.

Time update :

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} \quad (26)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (27)$$

Measurement update :

$$K_k = P_k^- H^T (HP_{k-1}H^T + R)^{-1} \quad (28)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (29)$$

$$P_k = (I - K_kH)P_k^- \quad (30)$$

결과적으로 각도를 측정하는 단계는 그림 4와 같다. 각각의 출력된 센서 A/D 값을 평형상태의 offset 값으로 빼주고, scale factor를 곱함으로써 각속도와 각도를 생성하고, 이에 complementary 필터와 Kalman 필터를 적용함으로써 실제 각도를 추정하게 된다^[12].

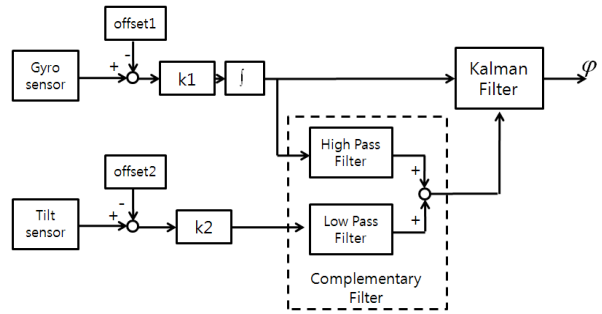


그림 4. 각도센서필터링

3.2 위치 및 헤딩각도측정

역진자 이동로봇을 제어하는데 있어서는 각도 이외에도 정확한 이동거리 측정 또한 중요한 요소이다. 엔코더의 경우 DSP2812의 QEP 모듈을 통해 카운트되어 측정된다. 이동로봇의 경우 측정값에 기구학을 적용하여 이동로봇이 이동한 거리와 회전 각도를 구하지만, 역진자 이동로봇의 실제 이동한 거리와 회전각도는 각 바퀴의 회전에 역진자의 각도를 고려하고 이동로봇의 기구학을 고려하여 구할 수 있게 된다. 속도의 경우 finite difference 방법을 통해 거리를 미분을 하고, 저역통과필터를 3차의 IIR필터로 설계 후에 적용하여 구할 수 있었다. 그림 5에서 보는 방법을 통해 역진자 이동로봇 제어에 필요한 파라미터를 구할 수 있었다^[12].

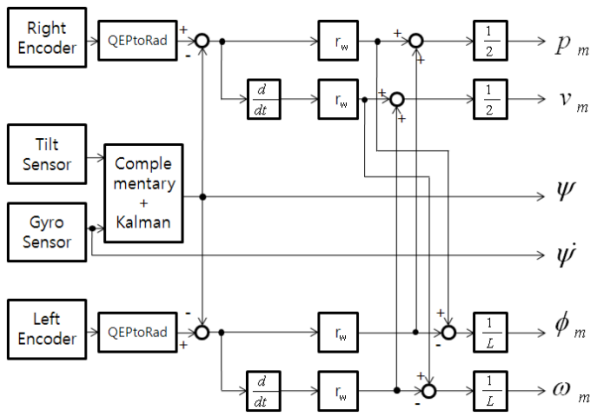


그림 5. 역진자 이동로봇 시스템 파라미터

4. 제어 알고리즘

이동로봇의 균형을 유지하면서 동시에 위치를 제어하기 위해서는 식 (31)-(32)과 같이 기울어진 각도제어에 PD 제어기, 위치 및 heading 각도제어에 PID제어기를 이용하였다^[12].

$$\begin{aligned} \tau_R = & K_1(\theta_d - \theta) + K_2(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \\ & + K_3(\phi_{md} - \phi_m) + K_4(\omega_{md} - \omega_m) + K_5 \int_0^t (\phi_{md} - \phi_m) dt \\ & + K_6(x_{md} - x_m) + K_7(v_{md} - v_m) + K_8 \int_0^t (x_{md} - x_m) dt \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \tau_L = & K_1(\theta_d - \theta) + K_2(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \\ & - K_3(\phi_{md} - \phi_m) - K_4(\omega_{md} - \omega_m) - K_5 \int_0^t (\phi_{md} - \phi_m) dt \\ & + K_6(x_{md} - x_m) + K_7(v_{md} - v_m) + K_8 \int_0^t (x_{md} - x_m) dt \end{aligned} \quad (32)$$

역진자 이동로봇의 제어 블록다이어그램은 그림 6과 같다.

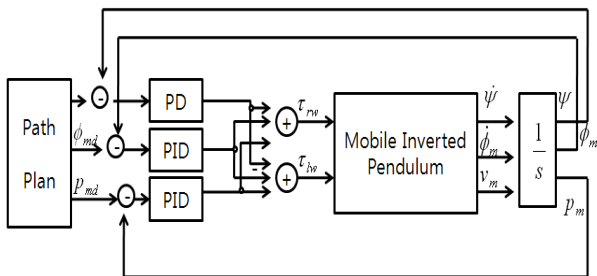


그림 6. 제어블록다이어그램

5. 일인용 운반차량 제작

5.1 일인용 운반차량 설계

그림 7과 같이 실제 자동차와 비슷한 환경으로 자동차 시트에 앉아서, 휠 형태의 조이스틱을 조작함으로써 탑승자와 이동로봇이 원하는 위치로 이동할 수 있도록 제작된 역진자 이동로봇은 2개의 24V DC 모터(150W)로 구동되며 각각의 모터에는 엔코더가 부착되어 바퀴의 회전 각도를 측정할 수 있게 된다. 모터에 장착된 바퀴의 반지름은 0.2m 이며, 양 바퀴의 거리는 0.7m으로 제작하였다. 그림 8에 나타난 것 처럼 전원은 총 5개의 납축전지로 구성되어 있으며, 그중 4개의 12V 12AH 납축전지를 직렬로 연결하여 24V로 만들어 모터의 전원으로 사용하며, 1개의 납축전지는 컨트롤러의 전원으로 사용하고 있다.



그림 7. 일인용 운반차량

5.2 일인용 운반차량 구조

제작된 로봇은 일반적인 이동로봇으로 작동되며 또한 역진자 이동로봇으로도 이동할 수 있도록 하기 위해 리프트 구조를 추가하였다.

이동로봇으로 작동할 때는 볼캐스터로 작동하며, 사용자에게 의해 역진자 이동로봇모드로 될 때 초기의 각도를 0도를 만들어주기 위한 리프트로 동작한다. 리프트의 경우 모터를 이용해 구동되기 때문에 릴레이 회로를 추가함으로써 조이스틱의 Start, Stop 키에 의해 제어되도록 하였다. 조이스틱의 Start 키가 눌러지게 되면 0도가 될 때까지 리프트를 상승시키며, 0도가 되어 균형을 잡게 되면 자동으로 리프트를 줄이게 된다. 그리고 Stop 키가 눌러지게

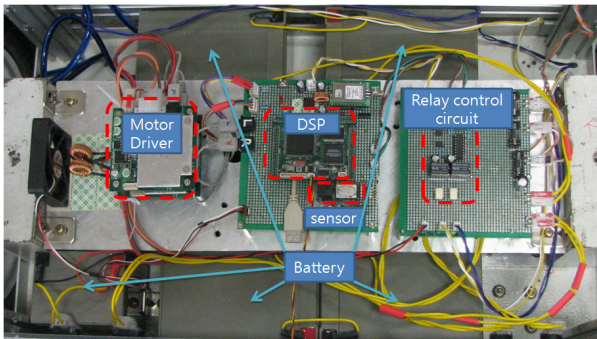


그림 8. 역진자 이동로봇 내부

면 리프트를 눌러 바닥에 닿을 수 있도록 하여 탑승자가 안전하게 내릴 수 있도록 하였다.

5.3 일인용 운반차량 하드웨어

전반적인 역진자 이동로봇의 하드웨어 시스템 구성은 그림 9와 같다. 시스템은 조이스틱의 데이터를 처리하고, DSP2812와 시리얼 통신을 통해 전체적인 시스템 상태를 체크할 수 있는 컴퓨터, 탑승자가 원하는 위치로 이동할 수 있도록 하기 위한 조이스틱 모듈, 그리고 각종 센서 데이터를 이용하여 역진자 이동로봇의 자세를 제어하는 DSP 부분으로 이루어져 있다.

이동로봇의 주제어기로는 TI 사의 TMS320F2812를 이용하였다. DSP는 A/D 컨버터와 PWM 발생기, 엔코더 카운터 기능을 내장하고 있다. 이를 이용하여 두 개의 각도 측정 센서인 틸트센서(SA1), 자이로센서(ENV-05G)의 A/D 컨버팅 후에 complementary 필터, Kalman 필터를 처리하여 기울어진 각도를 추정하고, 엔코더신호를 QEP 모듈을 이용하여 위치 및 속도를 추정하였다. 그리고 제어이론을 이용하여 토크를 생성 후에 PWM 발생시켜 모터드라이브에 신호로 주어 모터를 제어하게 된다.

컴퓨터에서 조이스틱 신호 데이터를 처리하며, DSP2812에 전송하고, DSP2812에서 처리한 속도나 각도 데이터를 실시간으로 PC에서 확인 할 수 있도록 그림 10과 같은 GUI(Graphic User Interface)를 개발 하였다.소프트웨어 개발은 Labview를 이용하였으며, PC와 DSP 간의

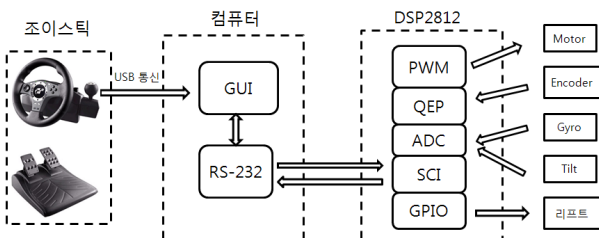


그림 9. 역진자 이동로봇 시스템 구성



그림 10. Graphic User Interface (LabView)

통신은 RS232 시리얼 통신을 이용하였다.

6. 일인용 운반차량 실험

6.1 조이스틱 제어

먼저 개발된 차량의 안정성을 테스트 하기 위해 자동차 핸들 형태의 조이스틱을 이용하여 실험하였다. 가속페달에 힘을 줄 경우 역진자에 외란으로 작용하였다. 핸들에 의한 제어 실험만 하였다.

그림 11과 12의 그래프를 보면 자동차핸들을 움직여도

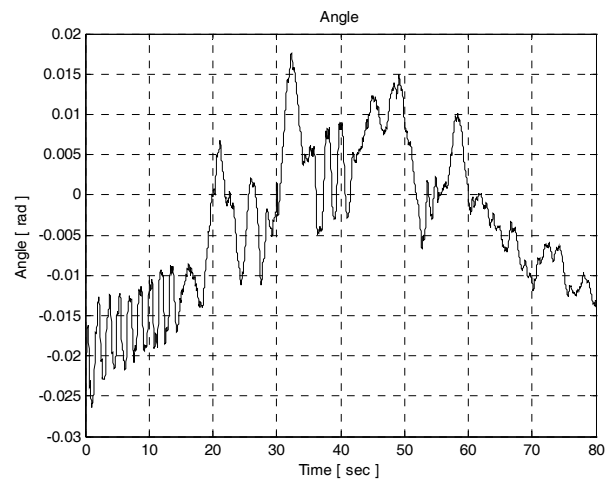


그림 11. 각도제어결과

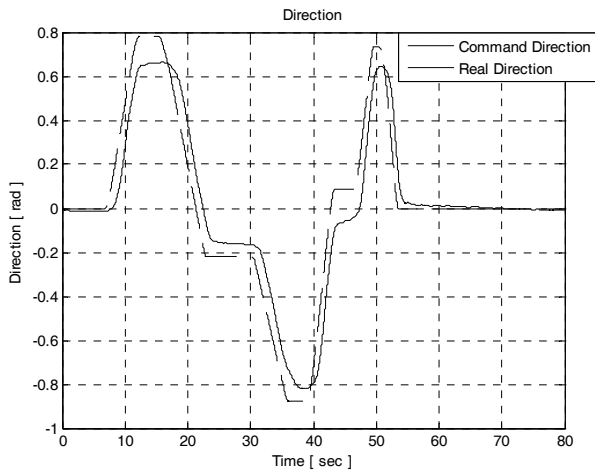


그림 12. 헤딩각도제어결과

역진자 이동로봇의 뱀런싱 각도를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 12와 같이 자동차 핸들명령에 따라 역진자 이동로봇이 제어가 됨을 볼 수 있다.

6.2 운전자 모드

그림 13의 그래프에서는 사람이 탑승한 상태에서 제어가 됨을 볼 수 있다. 안전을 위해 탑승자는 안전벨트를 착용하고 있으며, 뱀런싱 모드에서 이동하고 있다. 실험을 통해 사람이 탑승한 상태에서도 조이스틱에 의한 전·후 방향으로 이동이 가능하며, 또한 제자리 회전이 가능함을 볼 수 있다.



그림 13. 실내탑승실험사진(뱀런싱 모드)

7. 결론 및 추후연구

본 논문에서는 역진자 형태의 이동로봇 기술을 자동차 형태의 차량에 적용하였다. 역진자 이동로봇의 기구학 및

동역학을 구하고 PD 및 PID 제어기를 이용하여 운반차량의 기울어진 각도 및 헤딩각도 그리고 위치를 제어 할 수 있었다. 그리고 제작된 일인용 운반차량을 이용하여 앞의 각도센서처리방법과 제어방법을 적용하여 제어하는 실험을 수행하여 안정되게 제어됨을 알 수 있었다. 실제 사람이 탑승하여 실험함으로써 차량으로서의 유용성에 대해서 검증하였다.

추후에는 사람을 태운상태로 GPS나 레이저 스캐너 신호를 수신하여 원하는 위치로 제어하는 연구를 수행해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Baerveldt A.-J. and Klang R., "A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter", IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, pp. 391-395, 1997
- [2] Sungsu Kim and Seul Jung, "Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network", IEEE Trans. On Control Systems Technology, Vol.16, No.2, pp.297-303, 2008
- [3] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colmbi, Alfred C. Rufer, "JOE:A Mobile, Inverted Pendulum", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.49, No.1, pp.107-114, 2002
- [4] H. Tirmant, M. Baloh, L. Vermeiren, T. M. Guerra, and M. Parent, "B2, An alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system", IEEE Intelligent Vehicle System, pp.594-603, 2002
- [5] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M Goza, P. Strawser, M. A. Diftler, I. Spain, and N. Radford, "Mobile manipulation using NASA's robonaut", IEEE ICRA, pp.2104-2109, 2004
- [6] K. Pathak, J. Franch, and S. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization", IEEE Trans. on Robotics, Vol.21, pp.505-513, 2005
- [7] SeongHee Jeong, Takayuki Takahashi, "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot : Inverted Mobile, and Sitting Motion", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1932-1937, 2007

- [8] J. S. Noh, G. H. Lee, and S. Jung, "Position control of a mobile inverted pendulum system using radial basis function network", IEEE WCCI, pp.371-377, 2008
- [9] J. S. Noh, G. H. Lee, H. J. Choi, and S. Jung, "Robust control of a mobile inverted pendulum system using RBF neural network controller", IEEE ROBIO, pp. 1932-1937, 2008
- [10] G. H. Lee, S. J. Lee, and S. Jung, "Line tracking control using visual feedback of a mobile inverted pendulum: BalBOT IV", submitted to IASTED 2009
- [11] H. J. Lee, H. J. Choi, J. H. Park, J. H. Lee, and S. Jung, "Center of gravity based control of a humanoid balancing robot for boxing games : BalBOT V", ICCAS-SICE 2009,
- [12] H. G. Lee and S. Jung, "Gyro sensor drift compensation by Kalman filter to control a mobile inverted pendulum robot system, IEEE Conference on Industrial Technology, pp.1026-1031, 2009



정 슬

1988 미국 웨인 주립대학교 전기컴퓨터공학과
 1996 미국 캘리포니아 대학 데이비스 전기컴퓨터공학과 석사, 박사
 1997~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

관심분야: 지능 로봇 시스템, 가정용 서비스 로봇 응용, 교육 로봇 개발

E-mail : jungse@cnu.ac.kr



이 형 직

2006 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사)
 2009 충남대학교 메카트로닉스공학과 지능로봇시스템전공(석사)
 2009~현재 항공우주연구소 인턴과정

관심분야: 지능로봇 시스템, 이동로봇