

외바퀴 구동 GYROBO의 제작 및 밸런싱 제어 구현

Implementation and Balancing Control of One-Wheel Robot, GYROBO

김 필 교, 박 준 형, 하 민 수, 정 슬*
(Pil-Kyo Kim¹, Junehyung Park², Min Soo Ha³, and Seul Jung³)

¹TV Product Development Group, LG Display

²Advanced Research Team, HyunDai WIA

³Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: This paper presents the development and balancing control of GYROBO, a one wheeled mobile robot system. GYROBO is a disc type one wheel mobile robot that has three actuators, a drive motor, a spin motor, and a tilt motor. The dynamics and kinematics of GYROBO are analyzed, and simulation studies conducted. A one-wheeled robot, GYROBO is built and its balancing control is performed. Experimental studies of GYROBO's balancing abilities are conducted to demonstrate the gyroscopic effects generated by the spin and tilt angles of a flywheel.

Keywords: one-wheel robot, gyroscopic effect, balancing mechanism

1. 서론

로봇은 이제 산업 현장에서 단순한 반복 작업에 이용되던 것을 넘어서 가정, 지형탐색, 행성 탐사, 인명구조 등에 폭 넓게 이용되고 있다. 로봇의 이동 방법으로 그동안 우리가 흔히 볼 수 있는 4바퀴 이동 로봇에서부터, 무한궤도를 이용한 로봇, 전방향 로봇, 휴머노이드 로봇 등이 많이 연구, 개발되고 있다.

이동로봇의 바퀴의 수에 따라 이동성 및 주행성이 좌우된다. 바퀴가 3개 이상의 이동로봇은 항상 안정성 보장되는 반면, 회전할 때 반경이 커지는 등의 주행성에서 다소 부족한 면이 있다. Segway의 경우 역진자 기반의 두 바퀴 구동의 이동로봇 시스템으로 사람이 탈 수 있는 운반 수단으로 상용화된 대표적인 예이다. 제자리에서 360도 회전이 가능하여 좁은 공간에서 작동이 가능한 장점이 있다. 안정성을 보장하면 우수한 이동성의 운반 수송체가 된다[1].

최근에는 한 바퀴로 구동하는 이동로봇에 대한 연구가 진행되고 있다. 한 바퀴 이동로봇은 자이로 효과에 의해 균형을 유지하는 로봇으로 미래형 운반 수송체로 발전할 수 있다. 하지만 한 바퀴 구동 이동로봇에 대한 연구는 구조적으로 제작이 쉽지 않고 제어가 어려워 많은 연구가 진행되어 있지 않은 상태이다. 한 바퀴 구동의 경우 바닥과의 접촉이 한 점이므로 안정성은 더욱 취약해 진다.

한 바퀴 구동 로봇은 Rolling Disk의 개념을 적용한 것으로 Carnegie Mellon 대학에서 주도적으로 많은 연구가 이루어 졌는데, 다른 로봇에 비해 방향전환이 쉽고, 제자리에서도 회전이 되기 때문에 공간적인 제약이 적다[2-7].

Xu가 오랫동안 연구를 해 온 Gyrover는 자이로 효과를 이용하여 균형을 잡는 로봇이다[2-4,6,7]. 한 바퀴 구동 로봇은 크게 Drive, Tilt, Spin 모터와 3축 기울기 센서로 이루어져 있다. Drive 모터는 로봇의 이동에 직접적으로 관여하고, Spin 모터는 플라이휠을 고속으로 회전시킨다. 그리고 Tilt 모터는 플라이휠을 이동하여 그림 1에 보여진 것처럼 Gyroscopic effect에 의한 세차운동(precession)을 발생시키게 된다. 센서에서 얻은 기울기값을 이용해 Tilt 모터의 움직임을 조절해 적절한 Gyroscopic effect를 발생시켜 로봇이 중심을 잡고, 방향전환을 할 수 있도록 한다.

한 바퀴 구동로봇에 대한 기구학과 동역학을 기반으로 시뮬레이션 연구가 발표되었지만[8-13], 한 바퀴 구동 로봇에 있어 가장 어려운 점은 한 바퀴 안에 모든 것을 장착해야 하는 최적 설계이다.

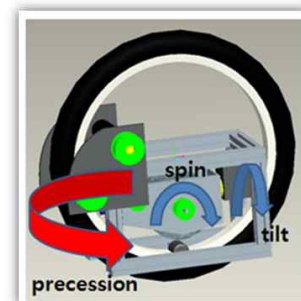


그림 1. 자이로 효과.

Fig. 1. Gyro effect.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 1, 2013 / revised March 28, 2013 / accepted April 18, 2013

김필교: LG Display(likesea-na@hanmail.net)

박준형: HyunDai WIA(vij232@hyundai-wia.com)

하민수, 정 슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(kakashi08@naver.com/jungs@cnu.ac.kr)

* 본 논문은 2012년 교육과학기술부 기초연구지원과 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업(NIPA-2012-H1502-12-1002) 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

본 논문에서는 동역학을 기반으로 시뮬레이션 해 보았고, 이전에 제작한 한 바퀴 이동로봇을 재설계하여 다시 제작 하였다. 진동을 최대한 줄이도록 설계하여 보다 안정적인 균형을 유지하도록 하였다[14]. 플라이 휠의 회전 속도를 높이고 틸트 모터를 교체하여 자이로 효과를 극대화 할 수 있도록 하였다. 배터리를 바퀴 안에 장착하도록 설계하여 하나의 시스템으로 움직이도록 하였다. 단순한 선형 제어기를 사용하여 제자리에서 균형을 잡는 실험을 수행하여 시스템의 성능을 확인하였다.

II. GYROBO 시스템 모델링

그림 2는 GYROBO의 좌표구조를 나타내고, 표 1은 각 변수들을 나타낸다.

GYROBO는 그림 1과 같이 플라이휠이 바퀴의 내부에 위치하는 구조로 되어 있다. 플라이휠은 바퀴 중심에서 거리 l 만큼 각도 θ 만큼 떨어져 있지만, 본 논문에서는 플라이휠이 바퀴의 중심에 위치한다고 가정하고, 동역학 식을 유도하였다.

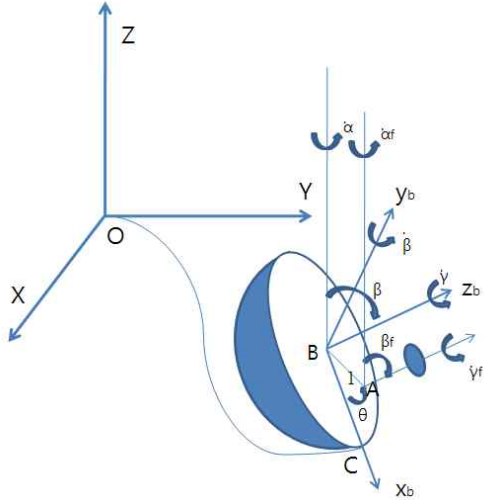


그림 2. GYROBO의 좌표.

Fig. 2. Coordinate of GYROBO.

표 1. 변수 정의.

Table 1. Parameter definition.

α, α_f	precession angle of a wheel and a flywheel
β	lean angle of a wheel
β_f	tilt angle of a flywheel
γ, γ_f	spin angle of a wheel and flywheel
θ	angle between l_1 and x_b
m_w, m_f	mass of a wheel and a flywheel
m	mass of the system
R	radius of a wheel
I_{xw}, I_{yw}, I_{zw}	wheel moment of inertia about X, Y, Z
I_{xf}, I_{yf}, I_{zf}	flywheel moment of inertia about X, Y, Z
g	gravitational acceleration
u_1, u_2	drive torque and tilt torque
l	distance between A and B

라그랑지안 함수를 구하기 위해 바퀴와 플라이휠의 운동 에너지와 위치 에너지를 각각 구해 보았다. 바퀴의 운동 에너지와 위치 에너지는 다음과 같다.

$$K_w = \frac{1}{2} [I_{xw}\dot{\beta}^2 + I_{yw}\dot{\alpha}^2 C^2\beta + I_{zw}(\dot{\gamma} + \dot{\alpha}S\beta)^2] + \frac{1}{2} m_w [\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + R^2 S^2 \dot{\beta}^2] \quad (1)$$

$$P_w = m_w g R C \beta \quad (2)$$

여기에서 $S\alpha = \sin\alpha$, $C\alpha = \cos\alpha$, $S\beta = \sin\beta$, $C\beta = \cos\beta$ 이다.

플라이휠의 운동 에너지와 위치 에너지는 다음과 같다.

$$K_f = \frac{1}{2} [I_{xf}(\dot{\beta} + \dot{\beta}_f)^2 + I_{yf}\dot{\alpha}^2 C^2(\beta + \beta_f) + I_{zf}(\dot{\gamma}_f + \dot{\alpha}S(\beta + \beta_f))^2] + \frac{1}{2} m_f [\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + R^2 \dot{\beta}^2 S^2\beta] \quad (3)$$

$$P_f = m_f g R C \beta \quad (4)$$

앞에서 구한 식을 이용하여 로봇의 Lagrangian 함수 L 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{1}{2} [I_{xw}\dot{\beta}^2 + I_{yw}\dot{\alpha}^2 C^2\beta + I_{zw}\dot{\gamma}^2 + 2I_{zw}\dot{\gamma}\dot{\alpha}S\beta + I_{zw}\dot{\alpha}^2 S^2\beta] + \frac{1}{2} [I_{xf}\dot{\beta}^2 + 2I_{xf}\dot{\beta}\dot{\beta}_f + I_{xf}\dot{\beta}_f^2 + I_{yf}\dot{\alpha}^2 C^2(\beta + \beta_f) + I_{zf}\dot{\gamma}_f^2 + 2I_{zf}\dot{\gamma}_f\dot{\alpha}S(\beta + \beta_f) + I_{zf}\dot{\alpha}^2 S^2(\beta + \beta_f)] + \frac{1}{2} m \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m \dot{Y}^2 + \frac{1}{2} m R^2 \dot{\beta}^2 S^2\beta - m g R C \beta \quad (5)$$

여기에서 $C^2\beta = \cos^2\beta$, $S^2\beta = \sin^2\beta$, $C^2(\beta + \beta_f) = \cos^2(\beta + \beta_f)$, $S^2(\beta + \beta_f) = \sin^2(\beta + \beta_f)$ 이다.

식 (5)에서 구한 Lagrangian 함수를 Lagrangian 방정식 $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i$ 으로 정리하면 다음과 같은 동역학식을 유도 할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) = A^T \lambda + B u \quad (6)$$

여기에서 각 항들은 다음과 같다.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 & I_{zw}S\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xw} + I_{xf} + mR^2S^2\beta & 0 & I_{xf} \\ 0 & 0 & I_{zw}S\beta & 0 & I_{zw} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xf} & 0 & I_{xf} \end{bmatrix}$$

$$M_{33} = I_{yw}C^2\beta + I_{zw}S^2\beta + I_{yf}C^2(\beta + \beta_f) + I_{zf}S^2(\beta + \beta_f)$$

$$F(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_3 \\ F_4 \\ I_{zw}C\beta\dot{\beta}\dot{\alpha} \\ F_5 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = 2(I_{zw} - I_{yw})C\beta S\beta\dot{\beta}\dot{\alpha} + I_{zw}C\beta\dot{\beta}\dot{\gamma} + 2(I_{zf} - I_{yf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)(\dot{\beta} + \dot{\beta}_f)\dot{\alpha} + I_{zf}C(\beta + \beta_f)(\dot{\beta} + \dot{\beta}_f)\dot{\gamma}_f$$

$$\begin{aligned}
F_4 &= mR^2S\beta C\beta\dot{\beta}^2 + (I_{yw} - I_{zw})C\beta S\beta\dot{\alpha}^2 - I_{zw}C\beta\dot{\gamma}\dot{\alpha} \\
&\quad + (I_{yf} - I_{zf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}^2 \\
&\quad - I_{zf}C(\beta + \beta_f)\dot{\gamma}\dot{\alpha} - mgRS\beta \\
F_5 &= (I_{yf} - I_{zf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}^2 - I_{zf}C(\beta + \beta_f)\dot{\gamma}\dot{\alpha} \\
A &= \begin{bmatrix} 10 - RC\alpha C\beta & RS\alpha S\beta & -RC\alpha 0 \\ 01 - RC\beta C\alpha & -RC\alpha C\beta & -RS\alpha 0 \end{bmatrix}, \\
q &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \beta_f \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

A행렬의 마지막 칼럼은 플라이휠에 관한 항이기 때문에 0으로 나타난다. B행렬에서 5번째 행은 바퀴의 회전각이다. 6번째 행은 플라이휠의 기울어진 각을 나타낸다.

로봇의 움직임을 조인트 좌표로 나타내기 위해서 식 (6)을 자코비안 행렬로 표현하면 다음과 같다.

먼저 $A = \begin{bmatrix} 10 - RC\alpha C\beta & RS\alpha S\beta & -RC\alpha 0 \\ 01 - RC\beta C\alpha & -RC\alpha C\beta & -RS\alpha 0 \end{bmatrix}$ 을 다음과 같이 두 부분으로 나누어준다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 10 \\ 01 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -RC\alpha C\beta & RS\alpha S\beta & -RC\alpha 0 \\ -RC\beta C\alpha & -RC\alpha C\beta & -RS\alpha 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$C(q)$ 를 $C(q) = \begin{bmatrix} -A_1^{-1} \times A_2 \\ I_{4 \times 4} \end{bmatrix}$ 라 하면, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{q} = C(q)\dot{q}_2 \quad (8)$$

여기에서 $q_1 = [X, Y]^T$, $q_2 = [\alpha, \beta, \gamma, \beta_f]^T$ 이다.

위와 같은 관계를 이용하여 \dot{q} 와 \ddot{q} 를 q_2 만을 이용하여 나타낼 수 있다. 이렇게 하면 바퀴의 동역학 식은 조인트 좌표에서의 속도와 가속도로 나타낼 수 있다.

식 (8)을 미분하면 $\ddot{q} = C(q)\ddot{q}_2 + \dot{C}(q)\dot{q}_2$ 이 되고 이 식을 $M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = A^T\lambda + Bu$ 에 대입하고 양변에 $C^T(q)$ 를 곱하면 결과적으로 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned}
C^T(q)M(q)C(q)\ddot{q}_2 \\
= C^T(q)[N(q, C(q)\dot{q}_2) - M(q)\dot{C}(q)\dot{q}_2] + C^T(q)Bu \quad (9)
\end{aligned}$$

$C^T(q)M(q)C(q)$ 은 4X4 행렬로 $\alpha, \beta, \gamma, \beta_f$ 에만 의존하게 된다. 식 (9)에서 u_2 는 tilt motor에 직접 연결되어 있기 때문에 $\dot{\beta}_f$ 를 새로운 입력토크 u_{β_f} 로 간주하면 $\dot{\beta}_f = u_{\beta_f}$ 가 된다. 그리고 식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\tilde{M}(\tilde{q})\ddot{\tilde{q}} = \tilde{F}(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) + \tilde{B}\tilde{u} \quad (10)$$

여기에서

$$\begin{aligned}
\tilde{q} &= [\alpha, \beta, \gamma]^T, \\
\tilde{M} &= \begin{bmatrix} \tilde{M}_{11} & 0 & mR^2S\beta + I_{zw}S\beta \\ 0 & mR^2 + I_{xw} + I_{xf} & 0 \\ mR^2S\beta + I_{zw}S\beta & 0 & mR^2 + I_{xw} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{M}_{11} &= mR^2S^2\beta + I_{yw}C^2\beta + I_{zw}S^2\beta \\
&\quad + I_{yf}C^2(\beta + \beta_f) + I_{zf}S^2(\beta + \beta_f)
\end{aligned}$$

$$\tilde{F} = [\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \tilde{F}_3]^T$$

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_1 &= 2(I_{yw} - I_{zw})C\beta S\beta\dot{\alpha}\dot{\beta} \\
&\quad + 2(I_{yf} - I_{zf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)\dot{\beta}\dot{\alpha} \\
&\quad - I_{zf}C(\beta + \beta_f)\dot{\beta}\dot{\gamma}_f - 2mR^2S\beta C\beta\dot{\beta}\dot{\alpha}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_2 &= -(I_{yw} - I_{zw})C\beta S\beta\dot{\alpha}^2 + I_{zw}C\beta\dot{\alpha}\dot{\gamma} \\
&\quad - (I_{yf} - I_{zf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}^2 \\
&\quad + I_{zf}C(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}\dot{\gamma}_f \\
&\quad + mR^2C\beta S\beta\dot{\alpha}^2 + mgRS\beta + mR^2C\beta\dot{\alpha}\dot{\gamma}
\end{aligned}$$

$$\tilde{F}_3 = -I_{zw}C\beta\dot{\beta}\dot{\alpha} - 2mR^2C\beta\dot{\beta}\dot{\alpha}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \tilde{B}_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \tilde{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_{\beta_f} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{B}_{12} &= 2(I_{yf} - I_{zf})C(\beta + \beta_f)S(\beta + \beta_f)\dot{\alpha} \\
&\quad - I_{zf}C(\beta + \beta_f)\dot{\gamma}_f
\end{aligned}$$

위와 같이 $\tilde{M}(\tilde{q})$ 는 3X3 행렬로 정리된다. 여기서 구한 동역학 식은 시뮬레이션을 수행하는데 사용하였다.

III. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 크게 속도 제어와 토크 제어로 나누어서 구성하였다. 속도 제어는 현재 로봇의 위치와 desired line 사이의 오차를 줄여 나가게 되고, 토크 제어는 속도 제어기로부터 나오는 출력을 입력으로 받아 GYROBO I의 기울기에 영향을 주는 틸트 모터의 토크를 제어 하게 된다. 다시 말하면 글로벌 좌표에서 현재 위치와 desired line 사이의 오차를 줄이기 위해 속도 제어를 이용하고 속도 제어기로부터 나오는 $\dot{\alpha}$ 를 기준값으로 하여 틸트 모터 제어가 구동하게 된다. 시뮬레이션에 사용한 변수는 $m = 15kg$, $g = 9.81m/s^2$, $R = 21.5cm$, $\dot{\gamma} = 15rad/s$, $I_{xf} = 0.00588kg.m^2$, $I_{xw} = 0.34688kg.m^2$, $\dot{\gamma}_f = 1570rad/s$ 로 설정하였다. 전체 제어블록 다이어그램구조는 그림 3과 같다. 자이로 보 I의 균형($\beta = 0$)을 유지하기 위해 플라이휠의 각도 β_f 를 제어한다.

GYROBO의 초기 위치는 (0,0)이고 헤딩각은 약 30도이고, 80초 동안의 움직임을 시뮬레이션 하였다. 그림 4는 기울어진 각과 헤딩각을 나타낸다. 기울어진 각의 움직임에 따라 헤딩각도 변하고 결과적으로 기준각을 따라가게 된다. 제어기 이득 값은 P=20, D=3을 사용하였다.

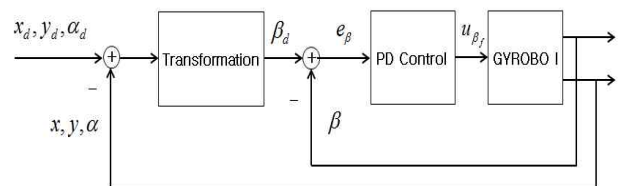
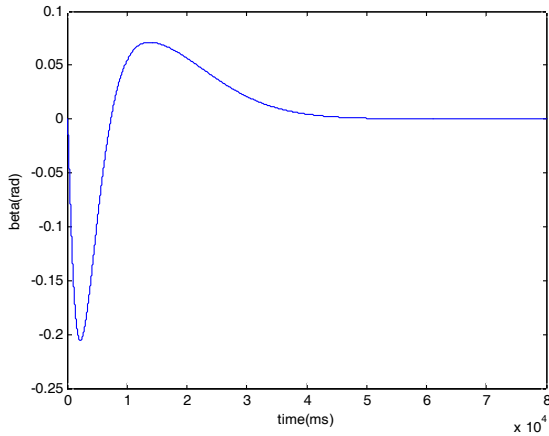
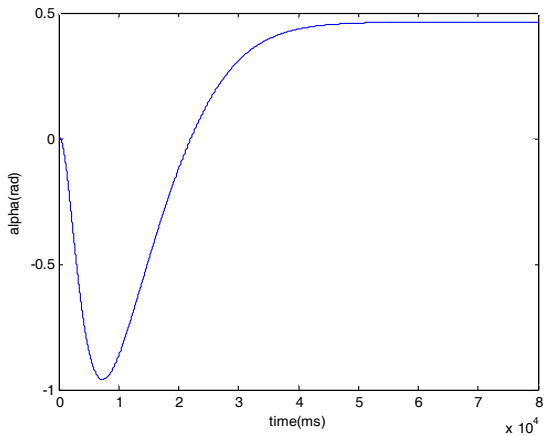


그림 3. PD 제어 블록 다이어그램.

Fig. 3. PD control block diagram.



(a) Lean angle.



(b) Heading angle.

그림 4. PD제어에서 기울어진 각과 헤딩각.

Fig. 4. Lean angle & Heading angle by PD control.

IV. 설계 및 제작

1. 짐벌 balancing 실험

GYROBO 1의 자이로 짐벌을 3축 회전이 가능한 시스템에 장착하고 실험을 하였다. 3축 시스템 중에서 2축, lean angle과 precession angle만 사용하도록 하고, 나머지 한 축은 고정해 GYROBO 1의 자이로 짐벌이 앞뒤로 출렁이는 것을 방지하였다.

그림 5는 기준각을 0도로(수직으로 서 있는 상태)하고 실험한 영상을 1초 간격으로 캡처한 것이다. 첫 번째 사진부터 보면 짐벌을 잡고 있다가 손을 천천히 떼어도 짐벌이 넘어지지 않고 서 있는 것을 확인할 수 있다. 짐벌을 세우기 위해 틸트 모터는 계속해서 짐벌을, 즉 고속으로 회전하는 플라이휠을 틸팅 시켜주고 있기 때문에 짐벌 자체는 세차운동을 일으키게 되서 반 시계 방향으로 회전하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 세차운동과 플라이휠의 회전이 다시 짐벌을 세우는 힘을 발생시키게 된다.

2. GYROBO 1의 설계 및 제작

그림 6은 이전에 제작한 한 바퀴로봇이다[14]. 이전 모델을 재설계하여 그림 7과 같은 현재 모델을 제작하였다. 설계에서 큰 변경사항은 내부의 회전으로 전체 바퀴가 구동하는 메커니즘과 배터리를 탑재한 것이다. GYROBO 1은 크

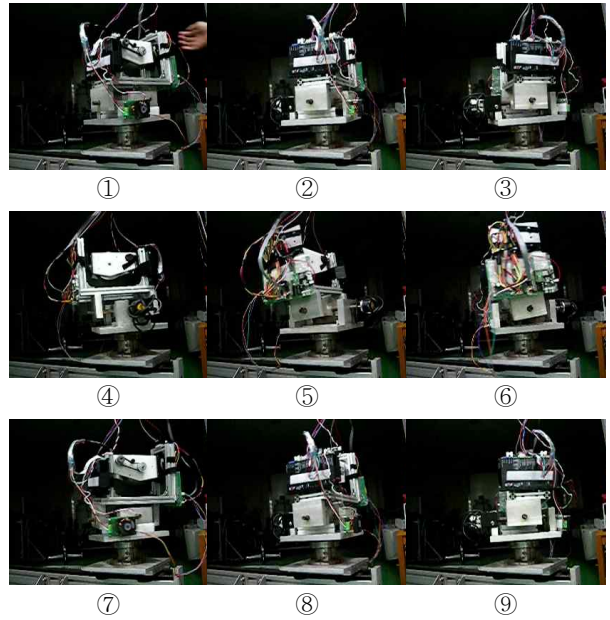


그림 5. 짐벌 Balancing 실험.

Fig. 5. Gymbal balancing experiment.



그림 6. 이전 한 바퀴 모델 [14].

Fig. 6. Former design of single wheel [14].

게 바퀴, 내부 프레임, 자이로 짐벌 부분으로 나뉘고, 세 부분이 잘 구동될 수 있도록 구성하였다.

먼저, 로봇의 전체 크기를 결정하게 될 바퀴는 미니벨로 바퀴를 선정함으로써 최대한 작은 모양을 하도록 하였다. 내부 프레임에는 로봇의 주요 부품들이 장착 될 수 있도록 구성하였다. 4개의 구석에는 가이드 바퀴를 달아 바깥의 큰 바퀴를 내부 프레임이 타고 구를 수 있도록 하였다. 프레임 아래에 drive 모터 박스가 위치 해있다. 자이로 짐벌 안에는 지름 10cm, 두께 2cm의 플라이휠과 spin 모터가 들어가 있다. Spin 모터와 플라이휠은 풀리로 연결되며, 고속회전을 하게 된다. 표 2에 GYROBO 1의 제원이 나타나 있다.

프레임과 짐벌 그리고 바퀴를 조립하게 되면 그림 7과 같은 모습이 된다. 프레임 안쪽으로는 자이로 짐벌과 틸트 모터가 위치해 있고, 위쪽 공간에는 제어보드 및 배터리가 들어가게 된다.

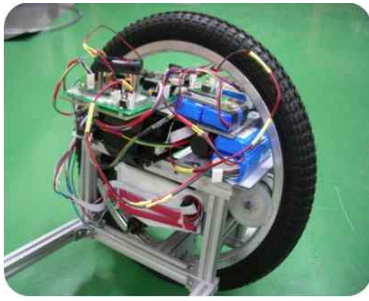


그림 7. GYROBO I.
Fig. 7. GYROBO I.

표 2. GYROBO I 제원.

Table 2. GYROBO I Specification.

Parameters	Values
wheel diameter	40 cm
wheel mass	10 Kg
flywheel diameter	10 cm
flywheel mass	2.4 Kg

3. GYROBO I 하드웨어

제어기는 DSP2812와 AVR을 사용하였다. DSP에서는 센서데이터 수신, PD 제어 알고리즘 실행, SCI 통신으로 Tilt 모터에 제어 입력을 신호를 보낸다.

AVR은 DSP로부터 받은 신호를 이용해 spin 모터와 drive 모터를 제어하고 무선조종기로부터 신호를 받게 된다. Spin 모터는 주로 정속 회전을 하고 있으며 drive 모터는

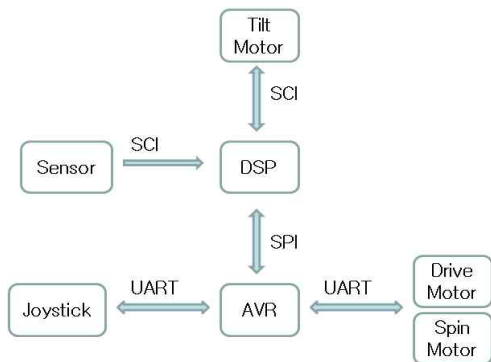


그림 8. GYROBO I 제어기 블록 다이어그램.
Fig. 8. GYROBO I controller block diagram.

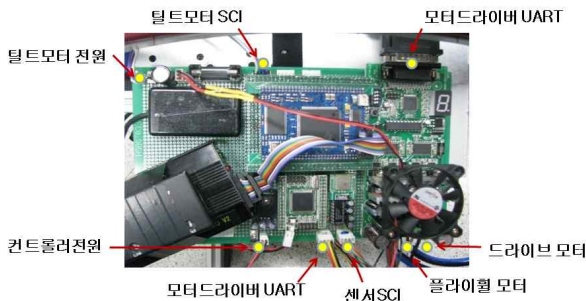


그림 9. 제어 보드 사진.
Fig. 9. Picture of controller board.

DSP로부터 받은 신호에 따라 속도 제어를 하게 된다. DSP와 AVR은 SPI 통신으로 데이터를 주고받는다.

전체 블록 다이어그램은 그림 8과 같고, 그림 9는 제작한 보드이다. 균형을 유지하기 위해 각도 검출용 센서는 3축 자이로 센서를 사용하였다.

V. 실험

1. GYROBO I

그림 5에서 실험적으로 자이로 짐벌이 넘어지지 않고 균형을 유지할 수 있는 것을 확인한 후, GYROBO에 장착하여 실험을 하였다. 제자리에서 넘어지지 않고 자세를 유지하는 것을 확인하는 밸런싱 제어 실험을 수행 하였다. 바닥과의 마찰도 커져서 플라이휠의 속도를 13200rpm으로 높였다. 실험에 사용된 제어주기는 10ms이고 PD 제어기의 이득값은 P=10, D=15이다. PID 제어 대신 PD제어를 사용하는 이유는 적분제어기의 각도 오차의 누적에 따른 현상 때문이다.

그림 10에 보여진 것처럼 초기에 손으로 GYROBO의 각도를 세운 다음 제어를 수행하였다. 그림 11은 제자리에서 균형을 잡고 있는 GYROBO I의 모습으로 실험 영상을 캡



그림 10. GYROBO I의 초기 각도 설정.
Fig. 10. Initial angle setting of GYROBO I.

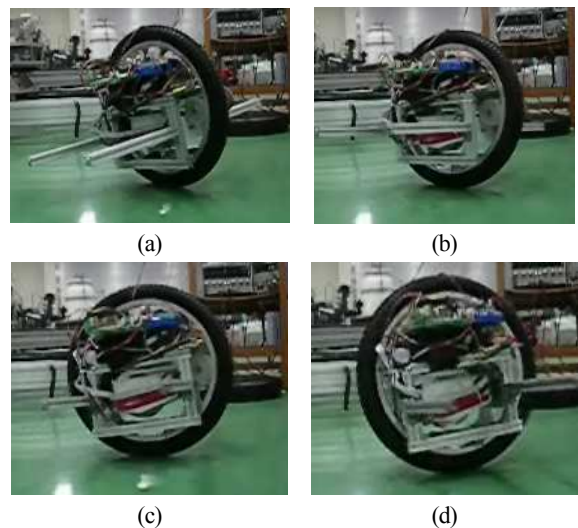


그림 11. PD 제어 GYROBO I balancing 실험(a-b-c-d).
Fig. 11. PD control GYROBO I balancing experiment.

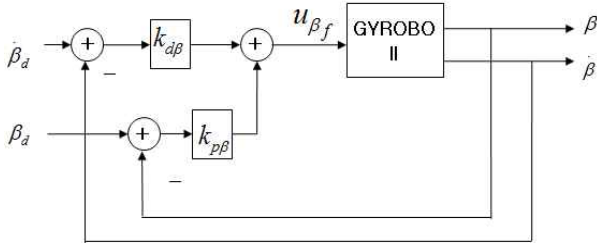


그림 12. GYROBO II 제어블록도.
Fig. 12. GYROBO II control block diagram.

처 한 것이다. 시간에 홀러도 균형을 잘 유지 하는 것을 볼 수 있다.

2. GYROBO II

GYROBO I을 보완하여 GYROBO II를 제작하였다. GYROBO II는 I보다 바퀴 크기를 크게 하여 하드웨어의 제약을 다소 줄였다. 양옆의 보조바는 넘어지는 경우를 대비하여 GYROBO II의 안전을 위한 것으로 균형 유지의 목적으로 사용된 것은 아니다. 기울어진 각도 β 를 제어하기 위해서는 플라이휠의 각도 β_f 를 제어해야 한다. 그림 12는 플라이휠의 각도를 제어하는 제어입력 $u_{\beta f}$ 를 생성하는 PD 제어블록도를 나타낸다.

그림 13은 GYROBO II가 실제 밸런싱을 유지하는 실험 모습이고 그림 14는 그에 대한 데이터를 나타낸 것이다. 그림 14(a)에서 보면 처음에 균형을 잘 유지하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 8초 이후 시간이 지남에 따라 불안정해 지는 것을 볼 수 있는데 이는 그림 14(b)의 틸팅 각도를 보면 알 수 있다. 플라이휠의 틸팅 각도가 균형을 유지하기 위한 한 방향으로 계속 기울어지게 되는데 현재 설계 구조상 기울어짐에 제한이 있어 기울어지지 못하게 되어 불균형이 된다.

이를 해결하기 위해서는 설계구조를 변경하거나 제어방식을 달리하여 해결할 수 있다. 제어방식을 변경하는 경우에 yaw 방향의 제어를 추가하고 기울어진 각도의 영역별로 게인 스케줄링을 통해 한 방향으로 쏠리는 현상을 방지할 수 있다.

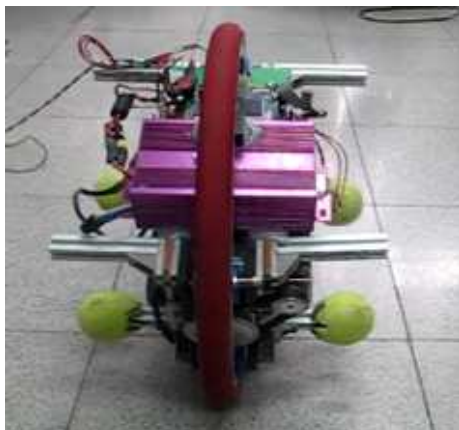
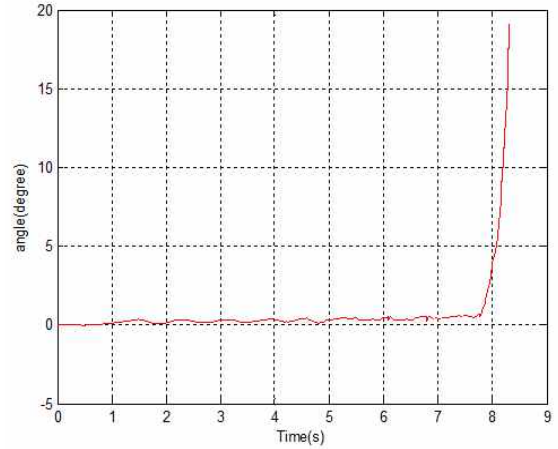
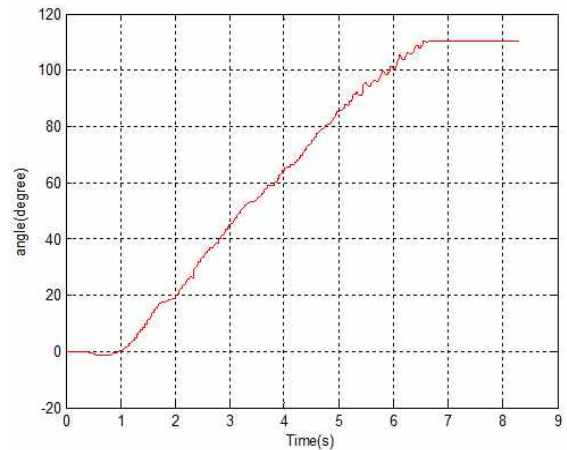


그림 13. GYROBO II balancing 실험.
Fig. 13. GYROBO II balancing experiment.



(a) Lean angle.



(b) Tilting angle.

그림 14. GYROBO II balancing 결과.

Fig. 14. GYROBO II balancing results.

VI. 결론

외바퀴 이동로봇은 자이로 효과에 의해 균형을 유지하는 로봇으로 미래형 운반 수송체로 발전할 수 있다. 하지만 외바퀴 구동 이동로봇에 대한 연구는 구조적으로 제작이 쉽지 않고 제어가 어려워 많은 연구가 진행 되어 있지 않은 상태이다. 본 논문에서는 자이로 효과를 응용하여 외바퀴의 균형을 잡는 목적으로 시뮬레이션하였고, 실험을 수행하였다. 그 결과로 제자리에서 균형을 잘 잡을 수 있었다. 하지만 오랜 시간 균형을 유지하기 위해서는 틸팅각도가 한 방향으로 쏠리는 현상을 해결하여 GYROBO II가 안정성 있게 움직이게 해야 할 것이다. 또한 주어진 경로를 추종하는 실험을 해야 할 것이다.

REFERENCES

[1] J. S. Noh, G. H. Lee, and S. Jung, "Position control of a mobile inverted pendulum system using radial basis function network," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 157-162, Feb. 2010.

- [2] C. Rui and N. H. McClamroch, "Stabilization and asymptotic path tracking of a rolling disk," *IEEE Conf. on Decision & Control*, pp. 4294-4299, 1995.
- [3] Y. S. Xu, K. W. Au, G. C. Nandy, and H. Ben Brown, "Analysis of actuation and dynamic balancing for a single wheel robot," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1789-1794, 1998.
- [4] Y. S. Xu, K. W. Au, and H. Ben Brown, "Dynamic mobility with single-wheel configuration," *The international Journal of Robotics Research*, pp. 728-738, 1999.
- [5] S. J. Tsai, E. D. Ferreira, and C. J. Raredis, "Control of the gyrover: a single-wheel gyroscopically stabilized robot," *IEEE IROS*, pp. 179-184, 1999.
- [6] Y. S. Xu and K. W. Au, "Stabilization and path following of a single wheel robot," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 407-419, 2004.
- [7] Y. S. Xu and Y. S. Oh, "Control of single wheel robots," Springer, 2005.
- [8] W. Nukulwuthiopas, S. Laowattana, and T. Maneewarn, "Dynamic modeling of a one-wheel robot by using Kane's method," *IEEE ICIT*, pp. 524-529, 2002.
- [9] A. Alasty and H. Pendar, "Euqstions of motion of a single-wheel robot in a rough terrain," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 879-884, 2005.
- [10] Z. Zhu, A. A. Mamun, P. Vadakkepat, and T. H. Lee, "Line tracking of the GYROBOT-A Gyroscopically stabilized single-wheeled robot," *IEEE Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 293-298, 2006.
- [11] Z. Zhu, M. P. Naing, and A. Al-Mamun, "Integrated ADAMS+MATLAB environment for design of an autonomous single wheel robot," *IEEE IECON*, pp. 2253-2258, 2009.
- [12] T. B. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 2884-2889, 2006.
- [13] U. Nagarajan, A. Mampetta, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 998-1003, 2009.
- [14] P.-K. Kim, Y. Kim, and S. Jung, "Implementation of single-wheeled robots: GYROBO," *Journal of Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 44, no. 4, pp. 35-41, 2007.



김 필 교

2007년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2009년 동 대학원 석사졸업. 현재 LG 디스플레이 근무 중. 관심분야는 지능형 로봇, 탐사 로봇, 지능제어, 인공지능 응용.



박 준 형

2010년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2012년 동 대학원 석사졸업. 현재 현대 위아 연구원. 관심분야는 지능형 로봇, 외바퀴 로봇 응용.



하 민 수

2011년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업. 현재 충남대학교 대학원 석사과정. 관심분야는 지능형 로봇, 외바퀴 로봇 응용.



정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 로봇교육.