

한 바퀴로 구동하는 로봇 GYROBO에 대한 연구

Research on a Single Wheeled Robot : GYROBO

김필교, 김연섭, 정슬*
Pilkyo Kim, Yeonseop Kim, and Seul Jung

Abstract - In this paper, we develop a single wheeled robot that has one wheel to move. The single wheel robot is similar to a rolling disk relying on gyroscopic motions to balance. The Gyrobo consists of three actuators: a spin motor, a tilt motor and a drive motor. The spin motor spins a flywheel at high rate so that it provides the balancing stability to upright the robot. The tilt motor controls steering of the robot by gyroscopic effect. The drive motor make forward accelerated motion to the robot. We have built and tested the Gyrobo to turn and move forward.

Key Words Gyroscopic motion, gyrobo, single wheel robot

1장. 서론

최근에 로봇에 대한 관심과 연구가 확대됨에 따라 서비스 로봇 분야 많은 진전이 있었다. 서비스 로봇의 근간을 이루는 이동로봇에 대한 연구는 SLAM문제를 해결하고자 노력하고 있다. 이동로봇의 다른 연구 분야로 옴니 방향 로봇이나 무한궤도형태 등 구동 메커니즘에 대한 연구도 활발하다.

기존의 안정적인 구동 메커니즘 방식에서 다소 불안정한 구동방식이 대한 연구도 진행되고 있다. 바퀴 두개로 움직이는 자전거로봇이 이제는 바퀴 하나로 움직이는 Gyrobot으로 발전하여 연구가 되어 지고 있다. 바퀴하나로 움직이는 로봇의 경우에는 구동과 균형잡기를 모두 바퀴 하나로 해결해야 하므로 모터 선정이나 설계 등이 매우 중요하다 [1,2]. 하나의 시스템을 완성하기 위해 많은 시행착오 과정을 거친 것을 볼 수 있다. 미국 카네기 멜론 대학에서는 Gyrobot I, II and III를 계속해서 수정 보완하여 만들어 내었다.

이처럼 gyrobot을 완성하기 어려운 이유는 구동기를 포함하는 모든 설계가 바퀴 안에 내장되어야 하는 구속 조건 때문이다. 구동을 위해서는 모두 3개의 모터가 필요한데 하나는 앞으로 굴러가기 위한 것이고, 다른 하나는 플라이휠을 회전시키고 다른 하나는 플라이 휠 회전에 의해 발생하는 자이로 모션을 통해 균형을 잡기 위한 것이다. 이밖에도 제어기와 센서 그리고 전원부를 설계해야 한다.

본 논문에서는 한 바퀴로 구동하는 GYROBO의 1차 모델을 제작하여 실험하여 보았다. 1차 모델에서는 양쪽에 보조

바퀴를 달아 측면으로 넘어지는 경우를 다소 보완하여 실험하였다. 무선 조정기를 제작하여 원격으로 GYROBO가 앞방향으로 회전하면서 방향을 선회하는 실험을 하였다. 실험결과 Gyrobo는 성공적으로 방향을 선회하였다.

2장. 시스템 모델링

2.1 Gyrobo 좌표

아래 그림 1은 Gyrobo의 좌표를 나타낸다. 표1은 모델의 변수를 나타낸다.

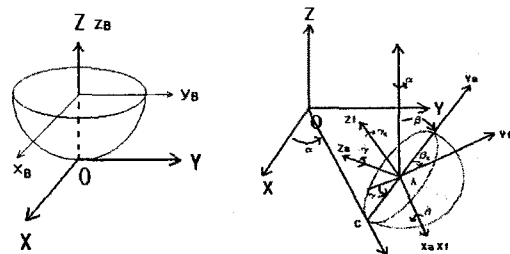


그림. 1 GYROBO 좌표계

표 1. 모델 변수

α, α_a	wheel과 flywheel의 precession angle
β	wheel의 lean angle
β_f	flywheel의 tilt angle
γ, γ_f	wheel과 flywheel의 spin angle
m	wheel과 flywheel의 무게
R	wheel의 반지름
I_{xw}, I_{yw}, I_{zw}	각축에 대한 wheel의 관성
I_{xf}, I_{yf}, I_{zf}	각축에 대한 flywheel의 관성
u_v, u_β, u_γ	drive torque, tilt torque, spin torque

* 김필교, 김연섭, 정슬 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스 그룹, 지능 시스템 및 감성 공학 실험실

좌표축 [X,Y,Z]에서 원점 O에서 임의의 점 C로의 좌표변환 행렬은 다음과 같다.

$$R_O^C = R_{(z,a)} R_{(x,\alpha,90-\beta)} R_{(z,\alpha,0)}$$

$$R_O^C = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha & \cos\alpha\sin\beta & -\cos\alpha\cos\beta \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

관성프레임의 Σ_O 의 단위벡터 $\{i,j,k\}$ 와 바디 프레임 Σ_A 의 단위벡터 $\{u,v,w\}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = R_O^C \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$u = (\cos\alpha)i + (\sin\beta)j$$

$$v = (-\sin\alpha\sin\beta)i + (\cos\alpha\sin\beta)j + (\cos\beta)k$$

$$w = (\cos\alpha\sin\beta)i - (\cos\alpha\cos\beta)j + (\sin\beta)k$$

2.2 Velocity constraints

C점에서 속도 v_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_c = v_A + \omega_B \times R_{AC} \quad (3)$$

각 좌표를 대입하면 다음과 같다.

$$0 = X\dot{i} + Y\dot{j} + Z\dot{k} + (R\dot{\gamma})u + (R\sin\beta)\dot{w} + (R\dot{\beta})w \quad (4)$$

식 (4)에 식(2)를 대입하고 i, j, k 로 정리하면 X, Y, Z 에 대한 식을 각각 구할 수 있다.

$$X + R\dot{\beta}\sin\alpha\cos\beta + R(\dot{\gamma} + \dot{\alpha}\sin\beta)\cos\alpha = 0$$

$$Y - R\dot{\beta}\cos\alpha\cos\beta + R(\dot{\gamma} + \dot{\alpha}\sin\beta)\sin\alpha = 0 \quad (5)$$

$$Z + R\dot{\beta}\sin\beta = 0$$

2.3 동역학 모델

Lagrangian 방정식 $L=T-P$ 을 통해 동역학식을 유도한다. T는 kinetic energy 이고 P는 potential energy 이다. 여기에서 flywheel은 로봇중앙에 붙어있다고 가정하고 유도하였다. 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = A^T\lambda + Bu \quad (6)$$

이식에서 Lagrangian multiplier를 소거하도록 행렬을 구해 곱해주면 다음과 같이 간단한 식으로 표현 할 수 있게 된다.

$$M(q)\ddot{q} = F(q, \dot{q}) + Bu \quad (7)$$

여기서,

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} & 0 & M_{15} \\ 0 & mR^2 + I_{yw} + I_{xf} & 0 & I_{xf} & 0 \\ M_{13} & 0 & mR^2 + I_{zf} & 0 & 0 \\ 0 & I_{xf} & 0 & I_{xf} & 0 \\ M_{15} & 0 & 0 & 0 & I_{zf} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$M_{11} = mR^2\sin^2\beta + I_{yw}\cos^2\beta + I_{zw}\sin^2\beta + I_{yf}\cos^2(\beta + \beta_f) + I_{zf}\sin^2(\beta + \beta_f)$$

$$M_{13} = mR^2\sin\beta + I_{zw}\sin\beta$$

$$M_{15} = I_{zf}\sin(\beta + \beta_f)$$

$$q^T = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \beta_f \quad \gamma_f]$$

$$F(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ -I_{zw}\cos\beta\dot{\alpha} - 2mR\cos\beta\dot{\alpha}\dot{\beta} \\ F_4 \\ -I_{zf}\cos(\beta + \beta_f)(\beta + \beta_f)\dot{\alpha} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$F_1 = 2(I_{yw} - I_{zw})\cos\beta\sin\beta\dot{\alpha}\dot{\beta} - I_{zw}\cos\beta\dot{\beta}\dot{\gamma} + 2(I_{yf} - I_{zf})\cos(\beta + \beta_f)\sin(\beta + \beta_f)(\beta + \beta_f)\dot{\alpha} - I_{zf}\cos(\beta + \beta_f)(\beta + \beta_f)\dot{\gamma}_f - 2mR^2\sin\beta\cos\beta\dot{\alpha}\dot{\beta}$$

$$F_2 = -(I_{yw} - I_{zw})\cos\beta\sin\beta\dot{\alpha} + I_{zw}\cos\beta\dot{\alpha}\dot{\beta} - (I_{yf} - I_{zf})\cos(\beta + \beta_f)\sin(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}^2 + I_{zf}\cos(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}\dot{\gamma}_f + mgR\sin\beta + mR^2\cos\beta\sin\beta\dot{\alpha}^2 + mR^2\cos\beta\dot{\gamma}$$

$$F_4 = -(I_{yf} - I_{zf})\cos(\beta + \beta_f)\sin(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}^2 + I_{zf}\cos(\beta + \beta_f)\dot{\alpha}\dot{\gamma}_f$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix}$$

3장. 시스템 구성

3.1 전체 시스템

그림 2에 나타난 전체 system은 주제어기, 보조제어기, 무선조정기 3부분으로 나뉜다. 주제어기는 8bit 마이크로프로세서이기 때문에 Digital filtering 등 연산과정을 처리하는데 많은 시간이 소요되므로 주제어기와 보조제어기로 나누어 Dual processing을 하였다. 각각의 system은 Digital filtering, PID control등의 각각 주어진 연산을 수행하고 결과의 데이터를 SCI를 통해 주고 받는다. system의 Input은 2개의 기울기 센서 Angle의 error값, 무선조정기의 4개의 좌우 position 값(Lx, Ly, Rx, Ry) 5개로 이루어지며 system을 거쳐 최종 Drive motor, Tilt motor의 PWM을 생성한다.



그림 2. GYROBO의 외형

3.2 주제어기의 역할

주제어기의 첫 번째 역할은 무선제어기의 데이터를 USART0를 통해 수신하는 것이다. 무선제어기의 데이터는 Lx(Left x-axis), Ly(Left y-axis), Rx(Right x-axis),

Ry(Right y-axis) 총 4개로 이루어지는데 여기서 Rx, Ry의 데이터만 사용한다. Rx는 Tilt Motor의 desired angle에 관여하고 Ry는 Drive motor의 duty를 조절하는데 사용된다.

주제어기의 두 번째 역할은 보조제어기와 통신이다. 무선조정기에서 수신한 데이터를 Drive motor의 duty rate로 normalization하여 보조제어기로 보낸다. 또한 보조제어기로부터 두 개의 기울기 센서간의 오차를 받아서 PID controller의 오차로 사용한다. 그림3은 이러한 통신관계를 블록다이어그램으로 나타낸다.

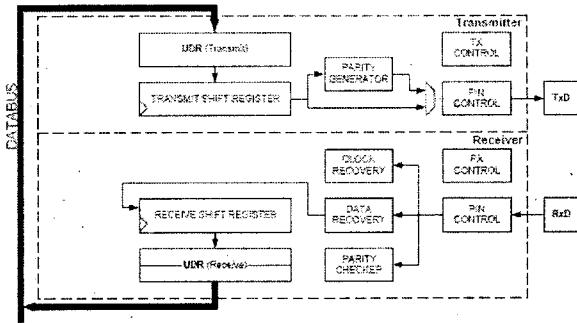


그림 3 USART Block Diagram

3.3 보조제어기의 역할

보조제어기는 주제어기와 data를 주고받으며 2개의 기울기 센서를 Digital filtering해야 한다. 이러한 보조제어기의 조건은 원하는 시간 내에 연산을 끝낼 수 있어야 하며 SPI와 SCI를 동시에 지원해야 한다. 기울기 센서는 noise가 심해 filtering과정을 거치지 않고 쓸 경우 system이 noise에 의한 영향을 받을 수 있으므로 그림4처럼 Bessel Low Pass Filter를 이용하여 filtering을 하였다.

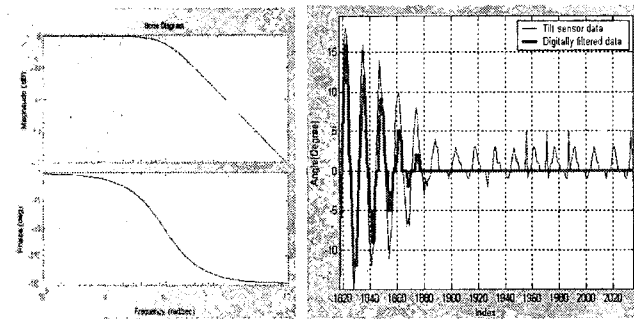


그림 4. 설계된 Bessel filter와 실제 Data비교 결과

3.4 무선조정기와의 통신방법

무선조정기와 주제어기와는 SCI로 통신을 하며 bluetooth를 이용하여 통신을 하였다. Bluetooth는 휴대용 장치간의 양방향 근거리 무선통신 기술로서 저렴한 가격과 적은 전력소모로 10~100m내의 소구역간 통신기술이다.

4장. 실험 및 결론

4.1 실험결과

Gyrobo의 선회주행을 실험하기 위해 실내에서 무선으로 조정하였다. 안정된 실험을 위해서 좌우에 보조바퀴를 달아 넘어지지 않도록 하였지만 Gyrobo가 닿는 지면과는 차이를 두어 선회제어를 할 수 있도록 하였다. 무선조정기로 Gyrobo의 방향을 제어

하였다. 무선 통신의 경우에 두 개의 데이터 중 Rx 데이터는 Flywheel의 Desire Angle을 조절하는데 사용하였고, Ry는 Drive motor의 Duty rate를 조절하는데 사용되었다. 좌우로 flywheel을 tilting 시켜서 gyroscopic 움직임을 발생시켜 single wheel을 직선 주행 후 선회하도록 하였다.

그림 4는 실제 Gyrobo의 실제 움직임을 몇 개의 사진으로 나타낸 것이다. 실제로 Gyrobo는 방향을 선회하며 주어진 경로를 따라갔다. 하지만 실험 중에 보조바퀴에 의존하여 넘어지는 경우가 발생하였다. 이는 선회를 하지만 완전하게 균형을 잡으면서 선회하지는 못하는 것을 보여주고 있다.

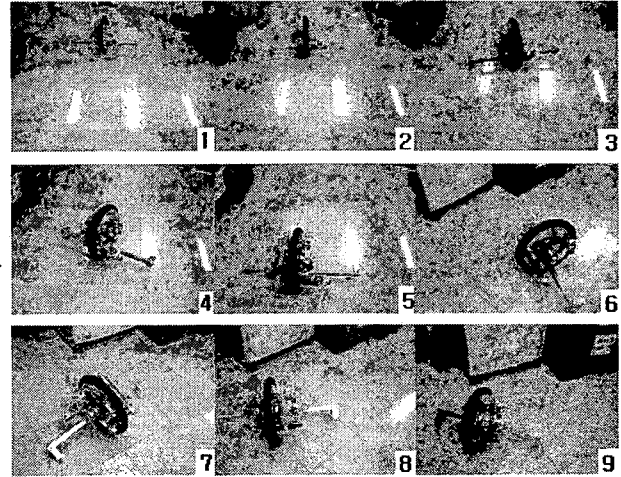


그림 5. 실제 선회하는 Gyrobo의 모습

4.2 결론

본 논문에서는 One wheel robot, Gyrobo를 제작하여 움직임을 제어하고 실험하였다. 먼저 Gyro에 대한 동역학 식을 살펴보고, 시스템에 적용하여 실험을 수행하였다. 유도된 동역학 식으로부터 로봇이 넘어지지 않고 이동하기 위한 무게와 flywheel의 회전속도 그리고 tilt 모터의 토크 등을 구하고 로봇 제작에 적용하여 실험을 통해 결과를 확인 하였다. 하지만 아직 다음과 같은 여러 문제점들을 해결해야 한다.

- Gyrobo의 구조적인 설계문제 해결로 균형적인 무게 배분으로 진동을 줄인다.
- 자이로 움직임을 나타낼 구동 모터의 선정으로 충분한 회전 속도를 만든다.
- 각 구동 모터의 소형화로 자체 무게를 줄인다.
- 강건한 제어 알고리즘구현으로 제어를 잘 하도록 한다.

참고 문헌

- [1] Chunlei Rui, n. Harris McClamroch "Stabilization and Asymptotic Path Tracking of a Rlling Disk" Proc. Conf. on Decision & Control, 1995
- [2] Gora C. Nandy and Yangsheng Xu "Dynamic Model of A Gyroscopic Wheel" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1998
- [3] Thomas L.Floyd, David Buchla, Fundamentals of Analog Circuits, Prentice Hall, 2002
- [4] R.C. Hibbeler, Engineering Mechanics: Dynamics, 9th Edition, Prentice Hall