

외바퀴 로봇의 진행 방향 강인 제어

Robust yaw Motion Control of Unicycle Robot

임 훈, 황 증 명, 안 부 환, 이 장 명*
(Hoon Lim, Jong-Myung Hwang, Bu-Hwan Ahn, and Jang-Myung Lee)

Abstract: A new control algorithm for the yaw motion control of a unicycle robot has been proposed in this paper. With the increase of life quality, there are various transportation systems such as segway and unicycle robot which provide not only transportation but also amusement. In most of the unicycle robots share the same technology in that the directions of roll and pitch are controlled by the balance controllers, allowing the robots to maintain balance for a long period by continuously moving forward and backward. However, one disadvantage of this technology is that it cannot provide the capability to the robots to avoid obstacles in their path way. This research focuses to provide the yawing function to the unicycle robot and to control the yaw motion to avoid the obstacles as desired. For the control of yawing motion, the yaw angle is adjusted to the inertia generated by the velocity and torque of a yawing motor which is installed in the center axes of the unicycle robot to keep the lateral control simple. Through the real experiments, the effective and robustness of the yawing control algorithm has been demonstrated.

Keywords: unicycle robot, yaw motion, robust control

I. 서론

최근 들어 바퀴 하나에 구동기 및 제어기가 내장되어 움직이는 disk 타입의 로봇과 하체에 외바퀴 형태의 기구부를 부착하고 상체에 가변 중심체로 구성된 강성 물체를 결합해 흡사 외바퀴 자전거를 타는 모습을 지닌 로봇들이 등장하고 있다. 우리들은 이러한 로봇들을 외바퀴 로봇(unicycle robot)이라 부르고 있다[2].

현재까지 연구되고 개발되어 온 기존의 외바퀴 로봇들은 정지 또는 이동 중 전방에 장애물이 나타나거나 방향을 전환하기 위한 시점에서 물체의 각도 θ 를 변화시켜 방향을 회전시키는 yaw 방향으로의 회전 제어에 많은 어려움과 문제점을 가지고 있었다[3]. 따라서 균형을 잡으면서 직선 주행하는 목적으로 주로 활용되고 있다. 복잡한 환경 속에서 이 외바퀴 로봇이 움직이기 위해서는 장애물을 회피[5]하거나 방향을 회전하는 기능이 추가되어야 한다[1,4].

본 논문에서는 자유로운 외바퀴 로봇의 운동을 위하여 반드시 필요한 운동 성능인 yaw 방향 회전 제어 시스템의 효율적인 방법에 대해 연구하여 로봇 물체의 회전 시 외란을 최소화하며 최적의 회전 궤적 이동 방법을 개발하고자 한다[6]. yaw 방향 제어가 자유롭게 되면 외바퀴 로봇은 병원에서 노인, 장애인 등을 도와주는 의료 및 복지 로봇 또는 사람들이 많은 유원지, 식당 등에서의 서비스 로봇 분야 쪽으로의 활용도가 높아 연구 가치가 매우 높은 분야로 발전할 수 있게 될 것이다.

본 논문의 II 장에서는 3차원 공간 상에서의 외바퀴 로봇의 운동 성분과 좌표계 설정 방법[7,8]에 대해 설명을 하고, III 장에서는 특정 질량을 가진 강성 물체인 원반형 disk를 통한 물리적인 회전 운동에 관한 토크를 얻는 수식적 관계에

대해 설명한다. IV 장에서는 III 장에서 소개한 좌표계 설정을 통한 외바퀴 로봇의 기구부 설계 및 제작 과정을 설명하고, V 장에서는 yaw 방향 모터 측정 실험과 회전 궤적 이동 방법에 관한 실험 및 고찰을 통해 나온 결과에 대해 설명하며, VI 장에서 결론으로 본 논문을 마무리를 짓는다.

II. 외바퀴 로봇의 3차원 공간에서의 좌표계 설정

1. 3차원 공간에서의 운동 법칙 - roll, pitch, yaw

외바퀴 로봇의 기본적 운동 형태는 비행기나 선박 또는 자동차에서 사용되는 3차원 운동 상태를 나타내는 roll, pitch, yaw의 3가지 성분의 조합[9,11]으로 이뤄진다.

그림 1에서처럼 3축 좌표계의 중심에 회전체(여기서는 비행기를 가리킴)가 존재할 때, 회전체의 물체가 x축 중심으로 회전하는 것을 rolling 운동, 물체가 y축 중심으로 회전하는 것을 pitching 운동, 물체가 z축 중심으로 회전하는 것을 yawing 운동이라 부른다.

Roll, pitch, yaw의 3차원 공간 상에서의 회전 운동을 이용해 외바퀴 로봇의 3축을 통하여 로봇이 균형 유지, 자세 보정, 방향 회전의 동작 형태가 이루어진다.

본 논문에서 제시하는 외바퀴 로봇의 기구부 구조 상 로봇

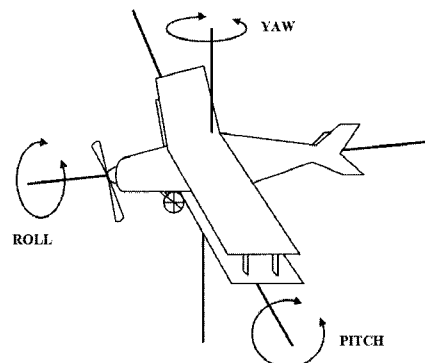


그림 1. 3차원 공간에서 roll, pitch, yaw의 회전각 운동성분.

Fig. 1. The motion of element at roll, pitch, yaw in three dimensions.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 12. 31., 수정: 2009. 2. 2., 채택확정: 2009. 10. 20.

임훈, 황증명, 안부환, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(aptdk0229@nate.com/h_kafka@pusan.ac.kr/abssky@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

몸체의 중앙에 위치하는 원반형 disk의 변수인 α 와 상수인 l 의 역학적 관계에 의한 좌, 우 회전 토크의 발생으로 로봇의 몸체가 방향을 회전할 수 있도록 yaw축 상에서 회전을 제어하는 방법을 사용하고 있다[2].

2. 좌표계 설정

외바퀴 로봇의 좌표계는 3차원 공간 상에서의 3가지 운동 성분에 맞추어 x축에서 roll 방향 운동, y축에서 pitch 방향 운동, z축에서 yaw 방향 운동을 통한 각각의 회전을 하는 것으로 좌표계를 설정하였다[10,12].

그림 2는 3축 방향에서 각각의 독립적인 토크가 작용하였을 때 외바퀴에 회전 운동이 발생하는 모습을 보여주고 있으며, 표 1은 그림 2의 좌표 설정과 토크에 대한 각각의 파라

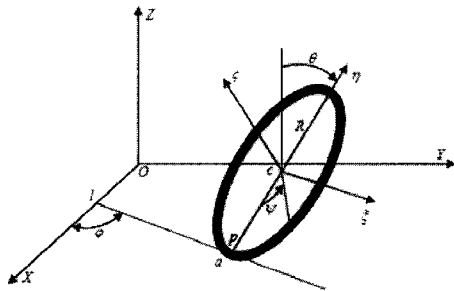


그림 2. 수평면에서 미끄럼 없이 회전 운동 하는 외바퀴.
Fig. 2. Unicycle robot with non-friction at the horizontal axis.

표 1. 좌표 설정에 필요한 파라미터 값에 대한 정의.

Table 1. A definition of parameter.

$O-XYZ$:	3 차원 공간의 고정좌표계	τ_ζ :	Pitch 방향 토크
$c-\zeta\eta\xi$:	바퀴에 고정된 이동좌표계	τ_η :	Yaw 방향 토크
\bar{a} :	바퀴 면과 수평면 사이의 교선	τ_ξ :	Roll 방향 토크
a, p :	바퀴 외곽과 수평면 사이의 접점	R :	바퀴 반경
$\bar{c}_\xi, \bar{c}_\eta$:	바퀴 평면 위치, \bar{a} 평행, 수직	e_x :	$o-xyz$ 벡터요소
\bar{c}_ζ :	바퀴 회전중심 지나 바퀴 평면 수직	e_y :	$o-xyz$ 벡터요소
θ :	Roll Angle	e_z :	$o-xyz$ 벡터요소
ψ :	Pitch Angle	e_ζ :	$c-\zeta\eta\xi$ 벡터요소
ϕ :	Yaw Angle	e_η :	$c-\zeta\eta\xi$ 벡터요소
m :	외바퀴의 질량	e_ξ :	$c-\zeta\eta\xi$ 벡터요소
x_c :	회전중심의 횡좌표	l :	관성모멘트
y_c :	회전중심의 종좌표		
z_c :	회전중심의 수직좌표		

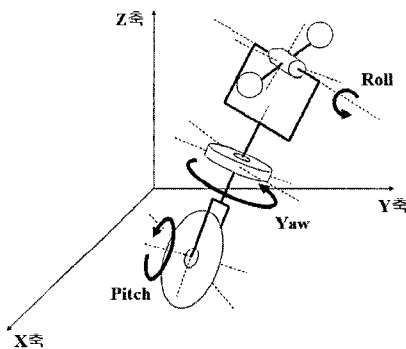


그림 3. 외바퀴 로봇의 형상에 따른 좌표계 설정.
Fig. 3. The coordinate system of unicycle robot.

미터 값을 설명하고 있다.

본 논문에서는 그림 2의 좌표계를 바탕으로 그림 3과 같이 3차원 좌표상에서 외바퀴 로봇의 모습을 나타내었다. 로봇 몸체의 상단에 장착되는 roll축 방향으로 회전하는 회전자, yaw축 방향에서 회전 토크를 발생시키는 조향 장치, pitch축 방향으로 회전하는 이동 바퀴로 전체적인 형태를 구성하였다. 시스템의 제어입력은 위에서 언급한 3부분으로 나뉘어 각각의 τ 로 작동된다.

본 논문의 주제이자 핵심 요소인 yaw 방향 회전 제어 장치인 조향 장치는 m 과 l 의 두 요소로 구성되며, 로봇 몸체의 질량과 관성에 귀속시켜 단순 회전 토크 발생 장치로 설정한다.

III. yaw 방향 회전 운동의 물리적 힘 성분 분석

1. 회전 운동에서의 ω 와 α 의 관계 및 성질

yaw 방향에서의 회전 운동을 이해하기 위해서는 토크의 기본적인 요소인 ω 와 α 에 대해 알아야만 한다.

각속도(angular velocity)는 단위 시간당 회전한 각도로 θ_1 과 θ_2 는 초기 각도와 이동 각도, t_1 과 t_2 는 초기 시각과 이동 시각으로 정의되며 $\bar{\omega}$ 와 ω 로 나뉜다.

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \tag{1}$$

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \tag{2}$$

각가속도(angular acceleration)는 단위 시간당 변한 각속도로 정의되며 $\bar{\alpha}$ 와 α 로 나뉜다.

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{3}$$

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \tag{4}$$

(1)과 (2), 그리고 (3)과 (4)에 의해 강체(rigid body), 즉, 원반형 disk가 회전할 때 disk 내의 각속도와 각가속도는 모든 점에서 같은 값을 가지게 된다. 이렇듯 특정한 강체의 α 를 알기 위해서는 ω 를 구해야만 하므로, ω 와 α 는 서로 종속적인 관계라 할 수 있다.



그림 4. DC 모터에 장착된 원반형 disk.
Fig. 4. Disk with DC motor.

원반형 disk의 회전 운동과 정지 운동에 의해 발생하는 회전 토크(torque)는 크기와 방향을 가지는 벡터량이므로, τ 의 구성 성분인 ω 와 α 도 벡터량이다.

2. 원반형 disk의 회전 운동의 운동 법칙

위의 그림 4는 yaw 방향 회전 시뮬레이터에 실제로 장착되는 원반형 disk의 실물 모습이다.

초기 시간 t_1 초 동안 정지해 있던 DC 모터를 구동시켜 특정 속도로 가동시키면 원반형 disk는 특정 시간 t_2 초 안에 속도를 가속시켜 일정 속도에 도달하게 되고, 그 구간부터 등속 운동을 하게 된다.

등속 운동을 하는 원반형 disk는 지정된 시간 t_3 초에 도달하게 되면 회전 운동을 멈추고 정지 운동 상태로 변환된다. 그 순간, α 에 비례하는 일정량의 τ 값이 발생하고 외바퀴 로봇은 물체를 회전시킬 수 있는 벡터적 성향의 힘 F 가 발생하여 방향을 틀 수 있는 것이다.

이것을 외부의 노이즈가 없다는 전제 하에 DC 모터의 순수한 속도 그래프로 간단히 나타내면 아래 그림과 같이 표현할 수 있다.

DC 모터의 특성상 전압을 인가하면 특정 속도로 가속하여 일정 속도에 도달하면 가속 운동 없이 등속 운동을 하며 회전을 하게 된다.

그림 5를 통해 t_1 초에서 t_2 초까지의 가속 운동 구간에서 미세한 각 초마다의 기울기 값이 같다는 것을 알게 되고 $\bar{\alpha}$ 와 α 가 같다는 결론을 통해 다음과 같이 $\bar{\alpha}$ 와 α 사이의 구속 조건을 정의할 수 있다.

$$\bar{\alpha} \cong \alpha \tag{5}$$

(5)의 구속 조건을 이용해 DC 모터의 16단계의 속도 레벨에 따른 16가지 속도 변화량에 의한 토크 τ 의 값을 각각 구할 수 있게 된다.

원반형 disk의 회전 시간과 정지 시간은 각각 10초로 지정하였고, rpm 측정기로 10초 간 회전하는 원반형 disk의 가장 자리를 3번 측정하여 평균값을 내어 도출된 값을 rpm 값으로 사용하였다.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \tag{6}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{7}$$

f 는 회전 진동수로서 단위 시간당 회전한 회수 (즉, rpm과 같은 의미)를 뜻하며, 한 회전은 각 2π 라디안 회전과

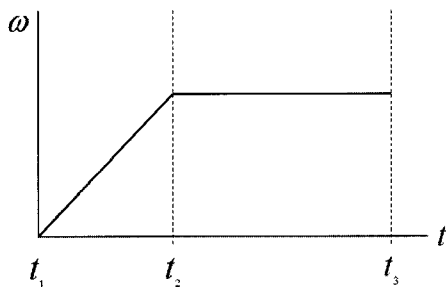


그림 5. DC 모터의 속도 특성 그래프.
Fig. 5. The velocity-character graph at DC motor.

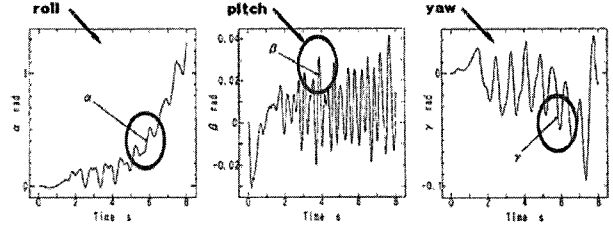


그림 6. 기존 외바퀴 로봇의 회전각이 발산하는 모습.
Fig. 6. Diffusion of roll, pitch, yaw in accordance with time.

같으므로 (6)과 (7)로 정의된다.

따라서 α 와 τ 는, $\alpha \propto \tau$ 의 관계를 가지고 회전 운동에서의 운동 방정식을 이용하여 회전 운동에서의 운동 법칙을 유도할 수 있다.

$$\tau = mR^2\alpha \tag{8}$$

(8)로부터 회전 운동에서의 I 를 도출할 수 있고, 위의 이론들을 바탕으로 원반형 disk의 τ 에 대해 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\tau = (\sum m_i R_i^2)\alpha \tag{9}$$

(9)를 유도할 때 고정된 축을 중심으로 회전하는 모든 부분의 α 는 같다는 사실을 이용하였다. (9)에서 $\sum m_i R_i^2 = m_1 R_1^2 + m_2 R_2^2 + m_3 R_3^2 + \dots + m_n R_n^2$ 을 원반형 disk의 I 라 하고, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I = \sum m_i R_i^2 \tag{10}$$

(9)와 (10)을 합하여,

$$\tau = I\alpha \tag{11}$$

로 정의한다.

(8)과 같이 (11) 역시 뉴턴의 제2법칙에 해당하는 회전 운동의 운동 법칙으로 유도할 수 있고, 토크 τ 에 대한 정의로 사용할 수 있다.

3. yaw 방향 회전 실험을 통한 시뮬레이션 결과

그림 6은 기존에 연구되었던 외바퀴 로봇이 시간이 지나면서 각각의 roll, pitch, yaw에 해당하는 회전각들이 급격하게 발산하는 모습을 보여주고 있다.

위의 그림에서 보면 8초 이후가 지나면서부터 발산하는 범위가 커져 로봇 몸체의 안정성을 상실하여 외바퀴 로봇 전체의 제어가 불가능하게 되는 것을 확인할 수 있다. 그러므

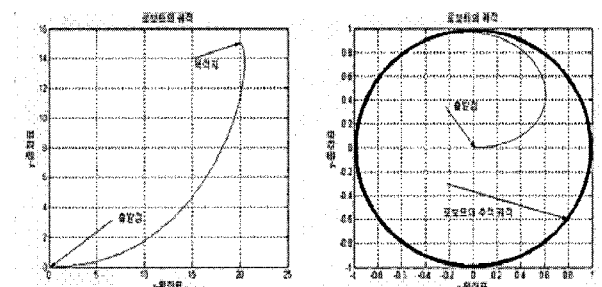


그림 7. 외바퀴 로봇의 궤적 추종 제어.
Fig. 7. Tracking control of unicycle robot.

로 그림 6의 시뮬레이션 결과를 통하여 기존 외바퀴 로봇들의 문제점들을 파악할 수 있다.

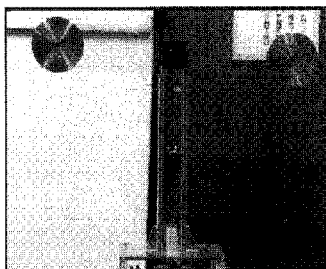
그림 7은 그림 12에 나오는 외바퀴 로봇의 회전 궤적 이동 방법에 근거한 시뮬레이션 결과를 도식화 한 것이다. 그림에서 처럼 외바퀴 로봇이 추적 궤적을 그리며 회전하기 위해서는 출발점에서 직선으로 나가 바로 원을 그리며 회전을 할 수 없다. 출발점에서 로봇이 균형 제어를 위한 자체 회전을 하며 목적지에 도달한 뒤 원하는 추적 궤적을 그리며 회전을 할 수 있는 것이다.

IV. 좌표계 설정에 따른 기구부 설계 및 제작

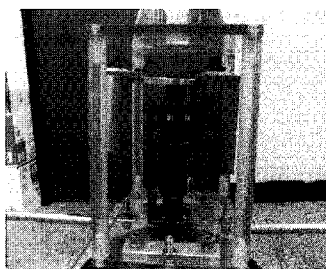
1. 기구부 설계 및 제작 과정

본 절에서는 시뮬레이션 결과에 근거하여 실제 제작한 외바퀴 로봇의 roll, pitch, yaw의 각 부분의 특징에 대해 설명하도록 하겠다.

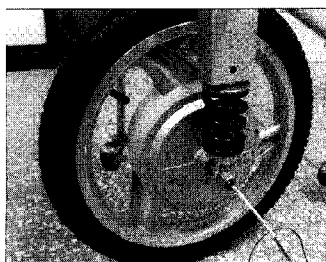
- Roll 특징: 좌, 우 자세 보정용 DC 모터에 장착된 일자형 프로펠러의 양 옆에 원반형 disk를 달아줌으로써 회전 관성력을 높여줌.
- Yaw 특징: 좌, 우 회전 보정용 DC 모터에 장착된 원반형 disk가 순간적으로 고속 회전하며 회전 토크를 발생시켜 로봇 몸체가 좌, 우로 회전함.
- Pitch 특징: 전,후 구동 및 자세 보정용 모터로 외전형 (outer rotor type motor)모터인 In Wheel Motor (Hub 모터)를 장착하여 모터와 바퀴의 회전이 같이 발생하여 이동함.



< roll >



< yaw >



< pitch >

그림 8. Roll, yaw, pitch축의 기구부 형태.
Fig. 8. Model of roll, yaw, pitch axis.

2. 시스템 사양 및 구성

표 2와 그림 9는 외바퀴 로봇의 전체적인 제어 시스템 사양과 구성으로 yaw 방향 회전 실험을 하기 위한 실험 환경을 보여주고 있다.

외바퀴 로봇의 제어를 하기 위해 고속연산이 가능한 Microchip사의 dsPIC30F6014 칩을 사용하였고, roll축과 yaw축에는 Maxon motor 2개를, pitch축에는 Hub motor 1개를 각각 장착하여 구동시켰다. 그리고 로봇 몸체의 균형 제어를 위해 각 부위에 자이로 센서와 기울기 센서들을 부착하였다.

표 2. 외바퀴 로봇의 제어 시스템 사양.

Table 2. The control system model of unicycle robot.

CPU 보드	모터 드라이브	기울기센서	자이로 센서
신호처리기: Microchip, dsPIC30F6014 신호 처리속도: 40MHZ A/D 변환기: 12BIT 통신사양: CAN, 1MHZ 기능: 센서정보에 대한 필터링, 보간, 균형제어 루프 실행(토크계산)	신호처리기: Microchip, dsPIC30F4012 신호 처리속도: 40MHZ A/D 변환기: 10BIT 통신사양: CAN 통신, 1MHZ 기능: 진류피드백, 속도피드백, 위치피드백을 통한 토크명령실행	Measuring range: ±70 도 Resolution: <0.01deg Non-Linearity: <0.2% Power supply: 5V(DC) 신호 처리속도: 40MHZ 기능: 기울기 각 정보획득	모델명: MURATA, ENV-05G Angular Velocity: ±70 도/s Supply Voltage: 5V(DC) 사용조건: 12BIT 이상 A/D 변환기 기능: Roll, Pith, Yaw 방향 자세정보 획득
가속도 센서	허브 Motor	Maxon DC Motor	
모델명: Analog Device, ADXL311E Measurement Range: ±0.2g Supply Voltage: 5V(DC) 사용조건: 12BIT A/D 변환기 기능: 자율주행에 필요한 가속도 피드백, Yaw 방향 토크제어를 위한 가속도피드백	정격파워: 240W, 36V 정격토크: 3.53 N.m 등각판도: 8 도 정격회전속도: 350 rpm 특징: Direct Drive, 저속 고 토크 기능: 전체 로봇 Body 의 운전담당	정격파워: 150W, 24V 엔코드 해상도: 1000L1 회전 정격회전속도: 1500 rpm Gear Ratio: Roll: 12:1; Yaw: 3.5:1 특징: 로봇제어기 설계에 흔히 사용, 고 토크 기능: 균형제어를 위한 토크 발생	

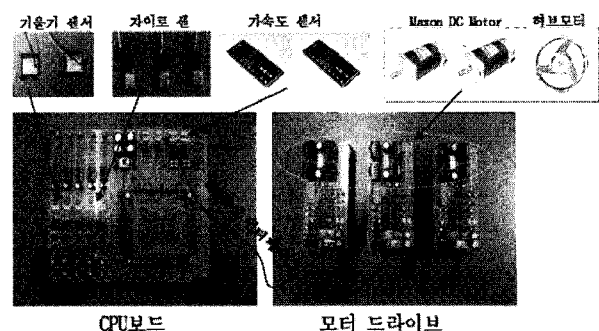


그림 9. 외바퀴 로봇의 제어 시스템 구성.
Fig. 9. The configure control system.

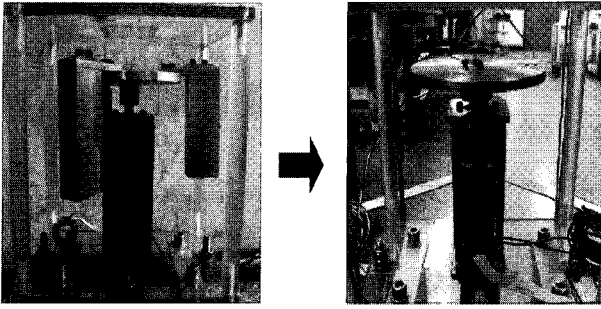


그림 10. 원반형 disk의 변화된 모습.
Fig. 10. The change of disk.

그림 10은 원반형 disk의 초기 형태와 후기 형태이다. Yaw 축에 부착되는 Maxon motor의 최대 연속 토크 사양이 181mNm로써, 등속 운동 시 최적의 부하의 무게는 1.7kg이다. 초기 원반형 disk의 무게는 3.5kg이므로 적절하지 못하여 1.4kg으로 무게를 감량시킨 후기의 원반형 disk로 교체해 고속 회전과 순간 정지 상태를 반복하며 최적의 회전 토크를 얻을 수 있었다.

또한, yaw축의 모터를 제어할 때 발생하는 외란은 외바퀴 로봇이 roll축으로 균형 제어를 할 때 좌, 우 쓰러짐의 최대 한계 범위인 $\pm 5^\circ$ 에 영향을 줘 심각한 손상을 준다. 초기 원반형 disk 구동 시 발생하는 외란은 기구부의 좌, 우 쓰러짐 최대 한계 범위를 크게 벗어나므로, 원반형 disk의 질량을 가볍게 하여 외란이 발생해도 roll축의 균형 제어를 쉽게 할 수 있도록 하였다.

V. 실험 및 고찰

1. yaw 방향 모터 측정 실험

아래에 나타난 표 3은 모터의 속도 변화에 따른 rpm의 측정값과 그에 비례한 로봇 몸체의 회전 각도이다.

그림 11은 표 3에 나온 외바퀴 로봇의 yaw 방향 회전 토크 발생 장치의 속도 제어에 따른 rpm 변화 값과 그에 따라 비례적으로 변화되는 회전 각도 값에 대한 그래프이다. 표 3과 비교해 볼 때 같은 결과치 값을 보이는 것을 확인할 수 있다.

2. 회전 궤적 이동 방법을 이용한 회전 제어 실험

위의 그림은 본 논문의 yaw 방향 회전 제어 기법인 외바퀴 로봇의 회전 궤적 이동 방법으로써, 6가지 패턴의 변화로 외바퀴 로봇이 방향을 전환하도록 고안되었다.

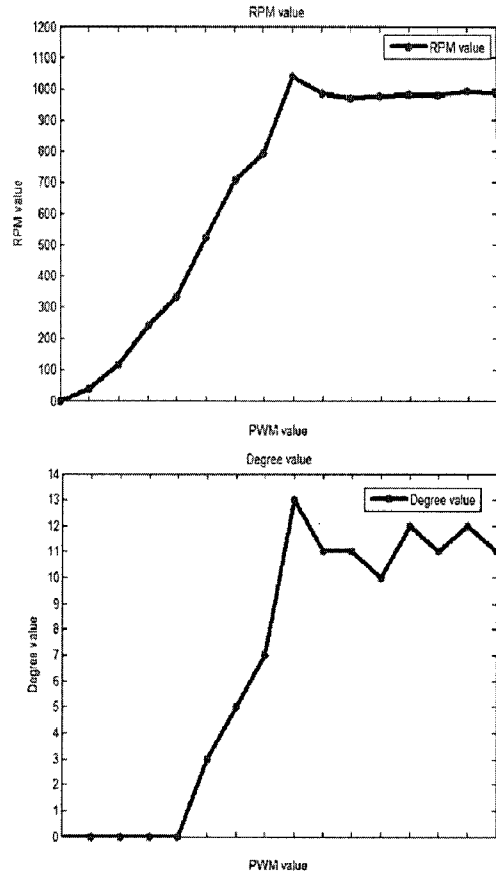


그림 11. Yaw축 모터 속도 제어의 RPM 값과 회전 각도 값.
Fig. 11. RPM and angle value according to the yaw direction motor speed control.

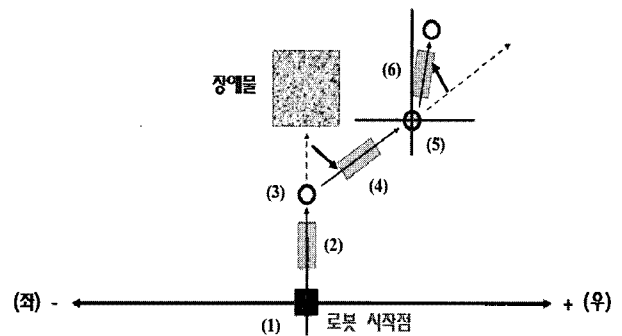


그림 12. 외바퀴 로봇의 회전 궤적 이동 방법.
Fig. 12. Trace of wheels at unicycle robot.

표 3. Yaw 방향 모터의 속도 제어에 대한 성능 평가.

Table 3. Speed control by RPM and Rotational angle value at Yaw.

PWM 값	RPM 값 (3 번 측정 - 10 초 회전)	RPM 평균값	회전 각도 (degree)	PWM 값	RPM 값 (3 번 측정 - 10 초 회전)	RPM 평균값	회전 각도 (degree)
0x000f	0	0	0°	0x008f	1014.0, 1016.0, 1098.4	1042.8	13°
0x001f	39.9, 38.1, 40.5	39.5	0°	0x009f	991.8, 985.2, 985.1	987.4	11°
0x002f	110.7, 116.0, 119.2	115.3	0°	0x00af	973.4, 962.0, 976.9	970.8	11°
0x003f	233.9, 253.2, 227.9	238.3	0°	0x00bf	978.3, 978.4, 980.8	979.2	10°
0x004f	335.8, 339.1, 321.4	332.1	0°	0x00cf	980.9, 983.0, 988.8	984.2	12°
0x005f	539.2, 515.1, 511.4	521.9	3°	0x00df	985.4, 974.9, 980.9	980.4	11°
0x006f	690.8, 763.0, 669.2	707.6	5°	0x00ef	994.5, 994.4, 990.2	993.0	12°
0x007f	799.2, 806.8, 772.6	792.9	7°	0x00ff	990.8, 987.7, 984.2	987.6	11°

그림 12의 회전 궤적 이동 방법에 대해 설명하자면, (패턴 1) 외바퀴 로봇이 시작점에 있을 때 원반형 disk는 OFF 상태로 정지해 있음.

(패턴 2) 로봇이 roll, pitch 부의 모터를 구동해 이동을 할 때 원반형 disk는 OFF 상태로 정지해 있음.

(패턴 3) 장애물 또는 방향을 전환하여야 될 상황에 이르면 원반형 disk를 일정 시간 동안 고속 회전시킨 뒤 순간 정지시켜 회전 토크를 발생하여 로봇 몸체의 회전 각도를 변화시켜 방향을 바꿈.

(패턴 4) 로봇 몸체에 외란을 주지 않기 위해 원반형 disk는 OFF 상태로 정지함.

(패턴 5) 일정 시간 동안 이동한 뒤 다시 원래 방향으로 돌아오기 위해 원반형 disk를 고속 회전시킨 뒤 순간 정지시켜 발생하는 회전 토크로 원 위치로 돌아옴.

(패턴 6) 원반형 disk는 다음 장애물을 발견하거나 방향을 전환해야 될 시기까지 OFF 상태로 정지함.

위에 설명한 원반형 disk의 ON & OFF를 이용한 회전 방법으로 회전 제어 실험을 했다. 단, 본 실험은 이동 상태가 아닌 정지 상태에서의 회전 실험임을 밝힌다.

그림 13은 외바퀴 로봇의 yaw 방향 회전 실험을 하기 위한 정지 상태에서의 실험 환경과 로봇 몸체 중앙의 원반형 disk를 회전시키기 전의 모습, 그리고 회전 토크로 인해 오른 쪽으로 외바퀴 로봇의 몸체가 회전 각도만큼 방향을 전환한 모습을 각각 보여주고 있다.

그림 13의 2번째 사진과 3번째 사진을 비교해 볼 때 로봇의 몸체가 우측으로 회전한 것을 확인할 수 있다.

아래 사진은 yaw 방향 회전 제어 실험에 의한 정지 상태

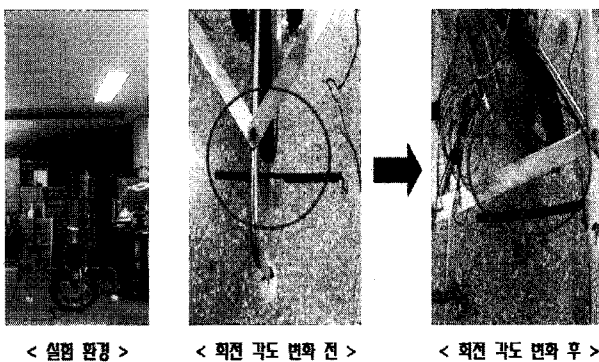


그림 13. Yaw 방향 회전 실험에 의한 회전 각도 변화 장면.
Fig. 13. An angle variation at yaw trace of wheels.

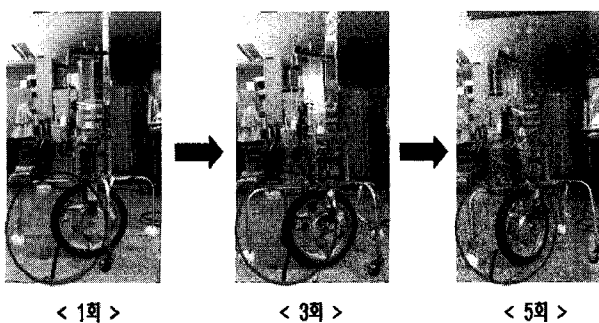


그림 14. 외바퀴 로봇의 5회 반복한 yaw 방향 회전 장면.
Fig. 14. A unicycle robot of yaw rotational view.

에서의 외바퀴 로봇 몸체의 방향 전환 장면을 순서대로 보여 주고 있다.

그림 14는 정지 상태에서 5회의 회전 실험을 반복한 외바퀴 로봇의 yaw 방향 회전 장면을 보여주고 있다.

원반형 disk가 5번의 고속 회전과 순간 정지 상태를 반복적으로 거치며 방향을 전환하고 있다.

그림 14의 pitch부의 In Wheel Motor를 보면 바닥 면에 표시한 검은색 선이 처음에는 수직이던 면과 조금씩 회전 각도가 변하면서 우측으로 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다.

이 때의 원반형 disk의 회전 속도값은 rpm 값이 가장 높은 0x008f로 설정하였고, 일관된 회전 각도 값을 측정하기 위해 회전 방향은 우회전 (+값)으로 통일하였다. 그 결과, 한 번의 회전으로 13° 를 우측으로 방향 전환했으므로, (1)회에서 (5)회까지의 회전 실험으로 인해 총 52° 의 각도를 우측으로 회전하여 로봇 몸체의 방향이 바뀌었다는 것을 알 수 있다.

그러므로 그림 13과 그림 14를 통해 원반형 disk의 회전 토크를 이용하여 로봇 몸체의 방향각 θ 를 제어함으로써 장애물이 나타나거나 방향을 전환해야 될 시점에서 외바퀴 로봇이 yaw축 제어로 효율적인 회전이 가능하다는 것을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 균형 유지, 자세 보정, 방향 회전까지 이동 로봇의 3가지 운동 성능을 가지고 하나의 바퀴로 이동하는 외바퀴 로봇(unicycle robot)의 메커니즘을 설계하고 실험을 통하여 yaw 방향제어가 가능함을 확인하였다. 기존의 외바퀴 로봇들은 yaw 방향의 좌, 우 회전 제어를 할 수 없었기 때문에 자세의 균형을 잡는 측면에서만 연구되었으나 yaw 방향의 제어가 추가됨으로써 다양한 형태의 궤적을 추종할 수 있는 기능을 가지게 되었다. Yaw 방향 회전 제어에 필요한 벡터적 성분의 r 에 대한 이론적인 분석과 좌표계 설정을 통한 외바퀴 로봇의 궤적 추종 제어에 관한 시뮬레이션 결과를 도출하였으며, 실제 실험을 통하여 yaw 방향의 변위를 회전궤적 이동이 가능함을 확인하였다. Yaw 방향의 회전제어에는 관성모멘트가 활용되었으며 이는 yaw축 모터의 토크와 속도값의 제어를 통하여 관성모멘트를 발생시켰다. 실험을 통하여 물리적으로 불안정성이 큰 외바퀴 로봇의 yaw 방향 회전 제어가 가능함을 알 수 있었다.

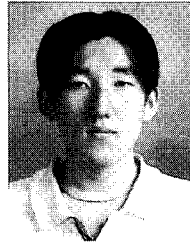
향후 연구는 yaw 방향 회전 제어를 정밀하게 하기 위한 알고리즘의 개발과 정확한 모델링을 통한 회전 토크 값 및 회전 속도 계산을 통하여 yaw 방향 제어의 안정성과 성능을 개선함에 있다.

참고문헌

[1] 김중완, “유니사이클 로봇의 곡선경로 추종에 대한 퍼지 규칙베이스 구축,” 생산기술연구소 연구논문집, 제1권 제2호, pp. 129-135, 1996.
 [2] 김중완, “유니사이클 로봇에 대한 인간적 추론 제어 메커니즘,” 생산기술연구소 연구논문집, 제1권 제2호, pp. 119-128, 1996.
 [3] 김진석, “부분 피드백 선형화를 이용한 One-wheel Unicycle Robot의 자세 제어,” 한국정밀공학회지, 제24권

제4호, pp. 68-75, Apr. 2007.

- [4] 김필교, “한 바퀴로 구동하는 로봇 GYROBO의 구현,” 전자공학회 논문지, 제44권 SC편 제4호, pp. 35-41, July 2007.
- [5] 이기성, “자율 주행 로봇의 장애물 회피,” 자동제어 학술회의 논문집, 제1권, pp. 777-781, 1994.
- [6] 김성수, 정슬, “신경회로망을 이용한 이동로봇 위의 역진자의 각도 및 로봇 위치제어에 대한 연구,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제11권 제10호, pp. 888-894, Oct. 2005.
- [7] 신진호, 김원호, “구동기 성능 저하를 가진 불확실한 비선형 로봇 시스템에 대한 신경 적응 제어기의 설계,” 동의대학교 산업기술연구집, 제20권, pp. 67-77, Feb. 2006.
- [8] 정슬, 조현택, “속도추정 기반의 2자유도 도립진자의 안정화를 위한 입력보상 방식의 분산 신경망 제어기에 관한 실험적 연구,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권 제4호, pp. 341-349, Apr. 2004.
- [9] M. Iwase, “An assistant system for riding a unicycle,” *International Journal of ARM*, vol. 8, no. 1, pp. 10-18, Mar. 2007.
- [10] Y. Ou, “Balance control of a single wheel robot,” *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 179-185, Oct. 2002.
- [11] D. W. Vos, “Dynamics and nonlinear adaptive control of an autonomous unicycle: theory and experiment,” *Proceedings of The 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii, pp. 182-187, Dec. 1990.
- [12] K. W. Au, “Decoupled dynamics and stabilization of single wheel robot,” *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 197-203, 1999.



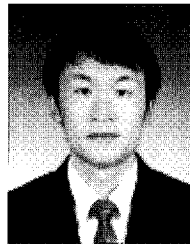
임 훈

2007년 동의대학교 전자공학과 졸업. 2007년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 로보틱스, 지능 로봇 제어, 마이크로 프로세서 응용.



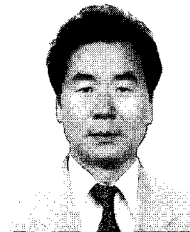
황 종 명

2007년 동아대학교 전자공학과 졸업. 2008년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 로보틱스, 지능제어, 영상처리.



안 부 환

2008년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업. 2008년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 Position control, non-linear system.



이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC(미국 남가주 대학교). 1992년~현재 부산대학교 정교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 설계 및 제어, 마이크로 프로세서 응용, Localization.