외바퀴 로봇 다이내믹 모델과 성능 개선

Dynamic Modeling and Performance Improvement of a Unicycle Robot

김 성 하, 이 재 오, 황 중 명, 안 부 환, 이 장 명*
(Sung-ha Kim¹, Jae-oh Lee¹, Jong-myung Hwang¹, Bu-hwan Ahn¹, and Jang-myung Lee¹)

¹Pusan National University

Abstract: Today, the research related to the robot is achieved in various part. With the high interest in means of transport, various researches about autonomous mobile robot and next generation transport is continuing. The unicycle robot among these needs much control technique like balance control model and driving model. For autonomous driving of this unicycle robot, from the basic balance control to direction switching control and velocity control are needed. But the environment elements like a gradient and frictional force or unbalanced elements from the structural feature. The unicycle needs the real time balance control so more complex, harder to control. And when functional addition is made, the problem that fall entire reaction velocity or accuracy would be happen. This paper introduces entire dynamics modeling of the unicycle robot and reduced model. And propose the new balance control algorithm using fuzzy controller. Also the evaluation about performance would be made through the test.

Keywords: unicycle robot, dynamic model, simplify contribution

I. 서론

시대의 변화와 기술의 발전은 인간의 편리함을 위해 날로 발전하고 있다. 이런 기술의 발전 속에 현재 가장 손꼽히는 분야는 단연 로봇 시스템이라 생각한다. 산업용 로봇부터 사람의 실생활에 서비스를 제공하는 지능형 로봇까지 로봇의 시대가 현실로 변하고 있다. 로봇 기술의 여러 분야 중에서도 이동로봇 관련 기술 분야는 현재 많은 연구개발이 진행되고 있고, 차세대 이동 수단으로 세그웨이 시스템이 개발되었으며[1] 싱글 휠시스템을 이용하는 외바퀴 로봇은 세그웨이 시스템보다 하드웨어적인 측면에서 간소하기 때문에 차세대 이동 수단으로 많은 연구 개발이 진행 되고 있다. 1995년 일본의 동경대학교 Yamahuji 교수는 인간형 외바퀴로봇을 회전 바퀴, 링크 구동부 및 로봇 상단에 설치된 수평 회전반으로 단순화하여 시스템을 모델링하고 PI제어기를 통한 자세제어 시스템을 구축하였다[2]. 그러나 이런 기구학적 구조를 가지는 외바퀴 로봇은 roll 축 자세균형모델과 회전운동모델 상에 간섭이 발생하여 로봇의 주행방향 결정에 문제점을 가지고 있다.

Roll 축 자세균형모델은 회전자 제어를 통한 간접적인 (underacted system) 특징을 가지기에 불안정성을 보인다[3]. 이런 자세균형모델은 외바퀴로봇이 정지상태 혹은 직선주행이 아닌 곡선운동을 하는 경우에는 곡선운동에 의해 발생하는 구심력과 코리올리 힘은 자세균형을 위한 IWP (Inertia Wheel Pendulum)모델 제어기법에 외란 요소로 작용하기에 시스템

전체의 불안정한 제어효과를 가져 올 수 있다[4]. 이 같은 문제점은 외바퀴로봇의 자율주행에 있어 방향제어에 가장 큰 문제점이라 할 수 있다. 그렇기에 외바퀴로봇의 자율주행에 필요한 방향전환을 안정화시키기 위해서는 구심력과 코리올리 힘에 대한 보상기능이 필요하다. 그리고 외바퀴 로봇의 특성상 지면과 한 점에만 바퀴가 닿아 있기 때문에 지면 상태에 따른 마찰력의 상이함에서 오는 환경적인 요소와 전방위로 쓰러질 수 있는 특성은 모델링 또는 제어 루프의 복잡성을 야기하므로 여전히 제어 불안정성 문제로 존재한다[5]. 그리고 외바퀴 로봇의 불안정한 특성상 정확한 모델링은 오히려 제어에 불리함을 발생시킨다[6,7]. 본 논문에서는 위와 같이 로봇의 특성에서 발생하는 문제를 고려하여 안정적인 주행에 기초가 되는 roll 축 자세균형모델에 대한 제어문제를 중요한 해결 과제로 보고 있다. 외바퀴 로봇의 많은 불안정성 특성을 고려한 roll 축 자세균형모델의 균형제어기가 외바퀴 로봇에 적용되면 다음 절차로 외바퀴 로봇의 자체회전을 위한 회전속도 제어기, 전 후진 주행을 위한 속도제어기를 구축할 수 있다. 이는 외바퀴 로봇의 자세제어와 자율이동에 있어 안정성을 보장할 수 있다. 본 논문에서 제안한 외바퀴로봇은 로봇의 특성에서 오는 복잡한 운동방정식에 대해 선형화를 진행하여 비선형적인 제어요소를 제거한 운동방정식을 소개하고 이를 통한 성능 평가를 진행할 것이다. 그리고 외바퀴 로봇의 적응력 높은 제어 모델을 구축을 목적으로 II 장에서 외바퀴 로봇의 동역학 모델링과 운동방정식을 유도하고 III 장에서는 유도된 동역학 모델의 선형화를 진행하여 단순화된 동역학 모델을 소개하고 IV 장에서는 존재하는 제어 불안요소를 줄이기 위해 개선된 알고리즘을 적용하며 V 장에서는 실험 및 고찰을 통한 알고리즘의 성능을 분석한다. 그리고 VI 장에서는 본 논문의 결과에 따른 향후 개선사항과 고찰로 논문을 마무리 짓는다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 12. 24., 수정: 2010. 5. 8., 채택확정: 2010. 9. 30.

김성하, 이재오, 황중명, 안부환, 이장명: 부산대학교 전기전자공학과
(sung3605@pusan.ac.kr/jaeh2@pusan.ac.kr/h_kafka@pusan.ac.kr/abssky@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 (부산대학교 특수환경 NAVIGATION/LOCALIZATION 로봇기술 연구센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

II. 외바퀴 로봇의 동역학 모델링 및 운동방정식

1. 외바퀴 로봇의 좌표설정

그림 1과 같이 본 논문에서 제안한 외바퀴 로봇은 “T”형 회전자(Roll축 자세균형장치), 조향장치(yaw축 회전토크 발생장치), 로봇몸체 및 회전바퀴로 구성된다. 로봇시스템의 구성공간(configuration space)은 일반화된 좌표(generalized coordinate), $q = [x_a \ y_a \ \theta \ \chi \ \varphi \ \psi]^T$ 로 표현할 수 있다[8]. x_a, y_a 는 바퀴와 바닥 면의 접점의 횡좌표와 종 좌표, ψ 는 바퀴의 회전변위(pitch angle), θ 는 로봇몸체 좌우방향으로의 기울기(tipping angle), φ 는 로봇의 Z축 방향 회전변위(steering angle), χ 는 회전자의 회전변위를 표시한다. 로봇시스템의 입력은 회전바퀴의 입력토크(τ_ψ), 조향 장치의 입력토크(τ_y) 및 회전자의 입력토크(τ_χ)로 구성되며 로봇의 회전, 전 후진 주행 및 roll축 자세균형을 결정한다.

2. 회전 바퀴의 동역학 해석

위의 좌표 설정방법으로부터 $O-XYZ$ 와 $d-x_1y_1z_1$ 사이의 좌표 변환관계를 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_{x_1} \\ e_{y_1} \\ e_{z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta & \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta & -\cos \varphi \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 1. 외바퀴 로봇의 좌표 설정.

Fig. 1. Coordinate setting of unicycle robot.

그림 2. 회전 바퀴의 기구학.

Fig. 2. Kinematics of the rolling wheel.

여기서 (e_x, e_y, e_z) 는 정지 좌표계의 기초벡터, $(e_{x_1}, e_{y_1}, e_{z_1})$ 는 이동 좌표계의 기초벡터를 표시한다. 회전 바퀴의 운동에너지는 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} T_d = & [A_d(\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \cos^2 \theta) + B_d(\dot{\varphi} \sin \theta + \dot{\psi})^2]/2 \\ & + M_d R_d \dot{\varphi} \cos \theta (\dot{y}_a \cos \varphi - \dot{x}_a \sin \varphi) \\ & + M_d [(\dot{x}_a - R_d \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi)^2 \\ & + (\dot{y}_a - R_d \dot{\varphi} \sin \theta \sin \varphi)^2]/2 \\ & + M_d R_d^2 \dot{\theta}^2 / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $A_d = M_d R_d^2 / 4$ 는 x_1 축 혹은 y_1 축에 대한 관성모멘트, $B_d = M_d R_d^2 / 2$ 는 z_1 축에 대한 관성모멘트를 표시하고, M_d 와 R_d 는 회전바퀴의 질량과 반경을 각각 표시한다 바퀴의 위치에너지는 아래와 같다.

$$U_d = M_d g R_d \cos \theta \quad (3)$$

여기서 g 는 중력 가속도를 의미한다.

3. 로봇 몸체의 동역학 해석

그림 3에서 b 는 로봇몸체의 무게중심을 표시하고, $b-x_2y_2z_2$ 으로 로봇몸체에 대한 이동 좌표계를 구성한다. 그림 2와 연계시키면 $b-x_2y_2z_2$ 는 $d-x_1y_1z_1$ 을 ab 방향으로 평행 이동한 것이므로 $O-XYZ$ 와 $b-x_2y_2z_2$ 사이의 좌표 변환관계는 동일하다. 로봇몸체의 운동에너지는 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} T_b = & [A_b \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + B_b \dot{\varphi}^2 \cos^2 \theta + A_b \dot{\theta}^2]/2 \\ & + M_b (R_d + L_b / 2) \dot{\varphi} \cos \theta (\dot{y}_a \cos \varphi - \dot{x}_a \sin \varphi) \\ & + M_b \{[\dot{x}_a - (R_d + L_b / 2) \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi]^2 \\ & + [\dot{y}_a - (R_d + L_b / 2) \dot{\varphi} \sin \theta \sin \varphi]^2\} / 2 \\ & + M_b (R_d + L_b / 2)^2 \dot{\theta}^2 / 2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $A_b = M_b I_b^2 / 12$ 는 x_2 축 혹은 z_2 축에 대한 관성모멘트, $B_b = M_b R_b^2$ 는 y_2 축에 대한 관성모멘트를 표시한다. 로봇몸체의 위치에너지는 아래와 같다.

$$U_b = M_b g (R_d + L_b / 2) \cos \theta \quad (5)$$

그림 3. 로봇 바디의 기구학.

Fig. 3. Kinematics of the robot body.

그림 4. 로봇 회전자의 기구학.

Fig. 4. Kinematics of the pendulum.

4. Roll축 자세균형 회전자의 동역학 해석

본 논문은 새로운 “T”형 회전자 구조로써 외바퀴로봇의 동특성을 관찰하고자 하는 것에 목적을 두고 있다. 동시에 원관형 회전자에 대응하는 동역학모델은 “T”형 회전자 구조 동역학모델의 특수경우인 점을 고려하여, 일반화된 동역학모델을 도출하고자 하는 것에 있다. 그림 4에서 점 p 는 회전자의 무게중심을 표시한다. 이동 좌표계는 $p-x_3y_3z_3$ 로 구성된다. 좌표설정방법과 좌표변환 관계는 이전과 동일하므로 회전자가 $O-XYZ$ 에서의 회전운동은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\omega_p = -(\dot{\theta} + \dot{\chi}) \cdot e_{x_3} + \dot{\phi} \cos \theta \cdot e_{y_3} + \dot{\phi} \sin \theta \cdot e_{z_3} \quad (6)$$

여기서 $(e_{x_3}, e_{y_3}, e_{z_3})$ 는 $p-x_3y_3z_3$ 의 기초벡터를 표시한다. 회전자의 운동에너지는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_p = & [A_r \dot{\phi}^2 \cos^2 \theta + A_r \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta + B_r (\dot{\chi} + \dot{\theta})^2] / 2 \\ & + M_r (R_d + L_b) \dot{\phi} \cos \theta (\dot{y}_a \cos \phi - \dot{x}_a \sin \phi) \\ & + M_r \{ [\dot{x}_a - (R_d + L_b) \dot{\phi} \sin \theta \cos \phi]^2 \\ & + [\dot{y}_a - (R_d + L_b) \dot{\phi} \sin \theta \sin \phi]^2 \} / 2 \\ & + M_r (R_d + L_b)^2 \dot{\theta}^2 / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $A_r = A_r \sin^2 \chi$ 는 z_3 축에 대한 순시 관성모멘트, $A_r = A_r \cos^2 \chi$ 는 y_3 축에 대한 순시 관성모멘트를 표시하며, $B_r = M_r R_r^2$ 는 x_3 축에 대한 관성모멘트를 표시한다. A_r 은 z_3 축과 y_3 축에 대한 최대 관성모멘트를 표시하며 $A_r = B_r$ 이다. M_r 와 R_r 는 회전자 구동시스템의 등가질량과 반경을 각각 표시한다. 회전자 위치에너지는 아래와 같다.

$$U_p = M_r g (R_d + L_b) \cos \theta \quad (8)$$

5. 시스템 운동방정식 유도

본 장에서는 앞 절에서 유도된 외바퀴 로봇의 각 요소별 위치에너지와 운동에너지를 이용한 시스템 운동방정식을 유도한다. Nonholonomic 특성을 가지는 외바퀴 로봇의 운동방정식은 Lagrange Multiplier의 존재로 인해 불안정한 특성을 보인다. 그렇기에 Kane 방법[9]에서 제시한 일반화된 속도의 개념으로부터 일반화된 속도공간과 대응되는 외바퀴로봇의 일

반화된 좌표(generalized coordinate)와 매핑 관계를 이용하여 속도 기구학을 모델링하고 이를 이용하여 Lagrange Multiplier가 제거된 표준화된 시스템 운동방정식을 도출하게 된다. 운동에너지와 위치에너지로부터 유도된 외바퀴로봇의 Lagrangian [9,10]은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L = & (T_d + T_b + T_p) - (U_d + U_b + U_p) \\ = & [I_1 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + I_2 \dot{\theta}^2 + I_3 \dot{\chi}^2] / 2 \\ & + [(I_4 \cos^2 \theta + I_5 \sin^2 \theta) \dot{\phi}^2 + I_6 \dot{\psi}^2] / 2 \\ & + I_7 \dot{\phi} \dot{\chi} \cos(\theta + \phi) - I_7 \dot{\phi} \dot{\chi} \sin(\theta + \phi) \\ & + I_3 \dot{\chi} \dot{\theta} + I_6 \dot{\psi} \dot{\phi} \sin \theta - I_7 g \cos \theta \end{aligned} \quad (9)$$

Nonholonomic 특성을 가지는 외바퀴 로봇의 Lagrange 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} &= A(q)^T \lambda + F_e \\ F_e &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \tau_x \quad \tau_\phi \quad \tau_\psi]^T \\ \lambda &= [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T \end{aligned} \quad (10)$$

F_e 는 외부에서 인가되는 힘을 표시하고 λ 는 Lagrange multiplier를 표시한다. 정리된 시스템 운동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} M(q) \ddot{q} &= F(q, \dot{q}) + A(q)^T \lambda + B(q) \tau \\ M(q) &= \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 & I_3 \\ 0 & 0 & I_3 & I_3 \\ -I_7 \sin(\theta + \phi) & I_7 \cos(\theta + \phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I_7 \sin(\theta + \phi) & 0 & 0 \\ I_7 \cos(\theta + \phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ I_4 \cos^2 \theta + I_5 \sin^2 \theta & I_6 \sin \theta \\ I_6 \sin \theta & I_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$e_\psi = \dot{\psi} - \dot{\psi}_{ref}(t) \quad (13)$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \theta & 1 \end{bmatrix}^T, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Kane 방법을 이용하여 Lagrange multiplier를 제거하고 최종적으로 유도된 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{q} = J(q) \dot{q}' \quad \text{rank}[J(q)] = 4 \quad (15)$$

$$M'(q) \ddot{q}' = F'(q', \dot{q}') + B'(q') \tau \quad (16)$$

$$\begin{aligned} M'(q') &= J^T(q) M(q) J(q) \\ &= \begin{bmatrix} I_2 & I_3 & 0 & 0 \\ I_3 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_4 \cos^2 \theta + I_5 \sin^2 \theta & (I_6 + I_7) \sin \theta \\ 0 & 0 & (I_6 + I_7) \sin \theta & (I_6 + I_8) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$$F'(q', \dot{q}') = J^T(q) \{F[q, J(q)\dot{q}'] - M(q)\dot{J}(q)\dot{q}'\}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\dot{\phi}^2(I_5 - I_4)\sin 2\theta + (I_6 + I_9)\dot{\phi}\dot{\psi}\cos\theta + I_7g\sin\theta \\ -\frac{1}{2}I_{10}\dot{\phi}^2\cos 2\theta\sin 2\chi \\ I_{10}\dot{\phi}\dot{\chi}\cos 2\theta\sin 2\chi - (I_5 - I_4)\dot{\phi}\dot{\theta}\sin 2\theta\sin 2\chi - (I_6 + I_9)\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\theta \\ -(I_6 + I_9)\dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B'(q') = J^T(q)B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} q' = \begin{bmatrix} \theta \\ \chi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (19)$$

III. 동역학 모델링의 선형화 전략

III 장에서는 앞서 제안한 로봇 동역학 모델의 선형화를 소개한다. 서론에서 밝힌 바와 같이 로봇만의 불안정한 특성상 로봇의 정확한 모델링은 오히려 제어에 불리함을 가져왔기 때문이다. θ 는 로봇몸체 좌우방향으로의 기울기, φ 는 로봇의 Z축 방향 회전변위를 의미한다. 여기서 동작구간을 $\theta=0$, $\varphi=0$ 으로 선정하고 Jacobian 선형화를 수행한다.

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \\ \cos\theta &\approx \cos(0) + \theta(-\sin(0)) = 1 \\ \sin\theta &\approx \sin(0) + \theta(\cos(0)) = \theta \\ \varphi &= 0 \\ \cos\varphi &\approx \cos(0) + \varphi(-\sin(0)) = 1 \\ \sin\varphi &\approx \sin(0) + \varphi(\cos(0)) = \varphi \end{aligned} \quad (20)$$

선형화된 시스템의 운동방정식을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$M'(q')\ddot{q}' = F'(q', \dot{q}') + B'(q')\tau \quad (21)$$

여기서 $M'(q')$, $F'(q', \dot{q}')$, $B'(q')$, q' 는

$$M'(q') = \begin{bmatrix} I_2 & I_3 & 0 & 0 \\ I_3 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_4 & \theta \\ 0 & 0 & (I_6 + I_9)\theta & (I_6 + I_8) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$F'(q', \dot{q}') = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\dot{\phi}^2(I_5 - I_4)2\theta + (I_6 + I_9)\dot{\phi}\dot{\psi} + I_7g\theta \\ -\frac{1}{2}I_{10}\dot{\phi}^2\sin 2\chi \\ I_{10}\dot{\phi}\dot{\chi}\sin 2\chi - (I_5 - I_4)\dot{\phi}\dot{\theta}2\theta\sin 2\chi - (I_6 + I_9)\dot{\psi}\dot{\theta} \\ -(I_6 + I_9)\dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B'(q') = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad q' = \begin{bmatrix} \theta \\ \chi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (24)$$

으로 정리된다.

MATLAB에서 선형화된 시스템과 비선형시스템의 특성을 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5의 상단은

그림 5. 시뮬레이션 블록도.

Fig. 5. Block diagram of the simulation.

그림 6. 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Result of the simulation.

비선형 시스템이고 하단은 선형화된 시스템이다.

시뮬레이션 결과는 그림 6과 같으며 시뮬레이션결과에서 볼 수 있듯이 선형화를 거쳐 간소화된 시스템 모델은 선형화 이전의 시스템과 성능상 유사한 결과를 출력하였다.

따라서 이 시스템은 선형화된 모델을 이용해 제어를 설계하고, 실제 시스템에 적용해도 만족할 만한 성능을 보여준다고 볼 수 있다.

IV. 구동 성능 개선을 위한 알고리즘

서론에서 밝힌 바와 같이 동역학 모델링 된 로봇이라도 외바퀴 로봇의 특징인 지면과 한 점점에만 바퀴가 닿아 있음으로 인해 모든 방향으로 넘어질 수 있는 불안정성, 지면의 상태에 따른 마찰력의 상이함 또는 모델링 된 제어 루프의 복잡함으로 인한 제어불안정성은 항상 존재한다. 본 IV 장에서는 이런 외바퀴 로봇만의 특수한 제어불안정성을 개선하기 위하여 퍼지 알고리즘을 이용하였다. 퍼지 알고리즘은 사람의 생각을 쉽게 규칙으로 나타낼 수 있으므로 사람의 지능적인 대처를 쉽게 로봇에 반영할 수 있다는 이점 때문이다 [11,12]. 현재의 로봇의 기울어진 정도와 이전의 정도와 비교하여 로봇의 균형제어를 위한 모터의 속력을 추론해 내는 알

고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 외바퀴 로봇의 기본적인 제어 목표인 자세제어를 더욱 반응성이 뛰어나고 처리 속도가 높은 제어기를 만드는 것을 목표로 한다. 그리고 외바퀴 로봇제어에 있어 주행방향에 대한 로봇의 이동은 pitch 축의 자세제어를 위해 이동하는 것이므로 주행방향으로의 로봇의 이동 속도는 자세제어를 위한 pitch 제어에 포함된다.

1. 퍼지규칙에 의한 모터토크의 가중치 추론

퍼지 추론기의 입력 변수로 로봇이 기울어진 각도와 각도의 변화량을 설정하였다. 각도에 대한 변수는 그림 6(a)와 같이 7개의 소속함수(MF: Membership Function)로 구분하여 “N.B, N.M, N.S, Z.E, P.S, P.M, P.B”의 언어변수로 표현하였다. 또한 변화량에 대한 변수는 그림 6(b)와 같이 5개의 소속함수로 구분하여 “N.B, N.S, Z.E, P.S, P.B”의 언어변수로 표현하였다. 여기서 N은 Negative, P는 Positive, B와 M, S는 각각 big, medium, small을 나타내며 Z.E는 Zero를 의미한다. 퍼지 추론기의 출력으로는 모터토크의 가중치 ω_1, ω_2 이며 그림 6(c)와 같이 7개의 소속함수로 구분하여 세밀한 제어가 이루어지도록 하였다. 퍼지추론에서 비퍼지화는 일반적인 mamdani의 무게중심법을 사용하였다.

2. 퍼지 알고리즘 추론 규칙

입력변수에 대하여 상황을 구분하고 그에 적절한 가중치의 규칙을 인간의 생각에 근거한 판단으로 설정하였다. 기본적인 구상은 외바퀴로봇이 기울어진 각도에 따라 모터의 토크가 결정되며 이 결정된 토크로 인해서 로봇의 기울어짐에 대한 변화가 생기면 변화의 특성을 분석하여 모터의 토크에 얼마만큼의 변화를 주는지 결정하게 된다. 변화량은 누적 가능하기 때문에 급격한 변화에도 효율적인 대처가 가능하다. 이러한 개념에서 상황에 맞도록 표 1과 2의 퍼지규칙을 작성하였다.

입력변수에 대해 추론된 출력결과를 그림 7에 입출력 평

그림 7. 가중치 추론에 사용된 퍼지 입출력 변수.
Fig. 7. Fuzzy input, output variables for inference weight.

표 1. Pitch direction 가중치의 추론규칙.

Table 1. Weight inference pitch direction.

Cha Ang	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PM	PM	PS	ZE
NM	PM	PM	PS	PS	NS
NS	PM	PS	PS	ZE	NM
ZE	ZE	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	PS	ZE	NM
PM	PM	PM	PS	PS	NS
PB	PB	PM	PM	PS	ZE

면으로 나타내었다. 그림 7(a)의 ω_1 출력평면 결과에서 pitch 방향의 제어는 직접제어의 결과로 전체적으로 균형 있는 가중치를 부과하는 것을 살펴볼 수 있다. 그러나 그림 7(b)의 ω_2 출력평면 결과를 살펴보면 roll 방향의 제어는 pendulum으로 인한 간접제어의 결과로 가중치가 비교적 높게 구성됨을 살펴볼 수 있다.

기존에 알려진 inverted pendulum 자세제어 알고리즘은 단순히 기울기 방향만을 검출하여 그 반대 방향으로 모터 토크를 인가하는 방법이지만 본 알고리즘을 적용하면 모터 토크에 외바퀴로봇의 상태를 적용하여 가중치를 이용한 가변적 토크로 지능적인 제어가 가능하다. 그리고 퍼지제어기가 포함된 외바퀴 로봇의 전체 시스템 블록도는 그림 9와 같다.

Roll과 pitch 방향의 센서값은 로봇의 자세제어를 위한 desired angle과 비교 연산하여 data processing module를 통해 이동량과 각도로 변환된다. 이후 퍼지 제어기를 통해 실제 제어 모터의 신호를 생성하여 모터 드라이브 유닛을 제어하게 된다.

표 2. Roll direction 가중치의 추론규칙.

Table 2. Weight inference roll direction.

Cha Ang	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PM	PM	PS	ZE
NS	PM	PM	PS	ZE	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	NS
PS	PM	PM	PS	ZE	NS
PM	PB	PM	PM	PS	ZE
PB	PB	PB	PM	PS	ZE

(a)

(b)

그림 8. 가중치 추론부의 입출력 평면.

Fig. 8. Input-output surface of weight inference system.

그림 9. 시스템 블록도.

Fig. 9. System block diagram.

V. 실험 및 고찰

그림 9는 실험을 진행한 외바퀴 로봇의 모습이다. 로봇의 하부 좌우에 설치된 보조 바퀴는 로봇이 바닥에 넘어지는 것을 방지하기 위해 설치한 것이며 그림에서 볼 수 있듯이 지면에 닿아있는 외바퀴 로봇의 바퀴보다 짧기 때문에 실험에는 아무런 영향을 미치지 않음을 밝힌다.

보조바퀴의 여유는 외바퀴 로봇의 pitch 축과 roll 축이 약 $\pm 15^\circ$ 범위까지 기울어 질 수 있도록 설정 되었다. 로봇 특성상 기울기가 15° 를 넘어가면 제어범위를 벗어나기 때문에 최대 범위각으로 설정하였다. 그림 10은 로봇몸체 중간의 센서 부 위치를 나타내는 그림이다. 본 로봇의 실험에는 4개의 tilt 센서와 4개의 gyro 센서가 사용된다. 그리고 tilt 센서 아래쪽에 4개의 gyro 센서가 있으며 하나의 tilt 센서와 gyro 센서가 set이 되어 한 방위각의 기울기 정보를 획득한다.

그림 9. 실제 로봇의 몸체.

Fig. 9. Realization of robot body.

그림 10. 외바퀴 로봇의 센서 위치.

Fig. 10. Sensor position of the unicycle robot.

그림 11과 12는 로봇이 정지한 상태에서의 자세제어 실험 데이터 분석이며, 빨강색은 pitch, 파란색은 roll, 연두색은 yaw 방향의 데이터이다. 그림 11에서는 앞선 II 장에서 기술한 동역학 모델링 수식 전체를 적용하였고, 그림 12의 과형은 III 장에서 기술한 시스템 선형화를 거쳐 단순화 한 모델을 적용하였다.

그림 11과 비교했을 때 그림 12의 모델은 로봇의 자세가 안정화 되는 시간이 짧고, 정상상태 구간의 안정도가 향상된다. 이는 제안한 알고리즘과 더불어 제어 루프의 계산량이 줄어들어 로봇 반응이 더욱 민첩해진 것으로 사료된다. 또한, 외바퀴 로봇의 특성상 자세 안정화가 된 이후 정상상태에서는 모든 실험 데이터에서와 같이 roll, pitch 방향에서 작은 움직임이 관찰 되는데, 이는 실제 외바퀴 로봇의 자세가 실시간으로 변하기 때문에 이에 지속적인 자세제어를 실시하기 때문이다.

그림 13은 그림 12의 simple model의 실험 중 2초 지점에서 작은 외란을 발생시킨 경우의 과형이다. 외란은 자세제어가 진행되고 있는 순간에 로봇의 뒤쪽에서 앞쪽으로 90° 방향으로 힘을 가한 것이다. 이 같은 방향으로 외란을 주는 이유는 로봇의 정면에는 roll 제어 팬들럼이 동작하기 때문에 로봇의 몸체에 힘을 가하기가 어렵다. 그리고 90° 외에 다른 방향으로 힘을 작용시켰을 때는 외란 요소로 작용한다기 보다 로봇바퀴와 접지면에 슬립이 발생하여 힘을 가한 방향으로 로봇이 미끄러지는 현상이 발생하였기 때문이다. 이런 외부의 외란에 대해 외바퀴 로봇은 제어 시작시의 응답과 마찬가지로 짧은 과도 영역을 거쳐 정상상태에 도달함을 알 수

그림 11. 성능 분석 (full model).

Fig. 11. Contribution analysis (full model).

그림 12. 성능 분석 (simple model).

Fig. 12. Contribution analysis (simple model).

그림 13. 외란 분석 (simple model).

Fig. 13. Disturbance analysis (simple model).

있다. 그리고 외바퀴 로봇의 yaw 제어기는 로봇의 방향전환을 위해 disk를 이용한 회전토크를 발생시키는 장치이다. 그렇기에 본 논문에서는 yaw 제어기의 회전성분을 표시할 수 있는 센서의 값을 roll, pitch 제어 값과 같이 표시하여 자세제어간에 로봇의 몸체에 회전이 얼마나 존재하는지를 표현하였을 뿐 기본적인 자세제어에는 아무런 영향을 주지 않는다.

VI. 결론

“I”형 회전자 구조를 가지는 외바퀴로봇의 동역학 모델링과 제어기법을 제안하고, 성능 개선을 위해 모델의 단순화를 위한 시스템 모델의 선형화를 본 연구에서 소개하였다. 외바퀴 로봇의 특징인 지면과 한 점접점에서 바퀴가 닿으므로 모든 방향으로 바퀴가 넘어질 수 있는 불안정성, 지면의 상태에 따른 마찰력의 상이함, 또는 모델링 된 제어 루프의 불완전성으로 인한 제어 불안정성을 극복하기 위해, 퍼지 알고리즘을 사용하여 기울어지는 방향에 대한 자세제어를 실시하였다. 외바퀴로봇의 자세균형 실험에서는 정지상태인 조건에서, 외란이 작용하지 않은 경우와 회전바퀴의 전 후진 주행방향의 외란이 존재하는 경우로 구분하여 외바퀴 로봇의 자세균형에 대한 제어성능을 검증하였다. 외바퀴 로봇의 모델링과 제어기의 단순화를 통해 얻을 수 있었던 응답속도와 안정성은 향후 외바퀴 로봇의 주행 제어에 많은 이점을 줄 것이라 생각한다. 하지만 여전히 남아 있는 시스템적인 불안정성을 극복하기 위해 더욱 정밀한 알고리즘이 필요하다고 생각하고 향후 연구에서도 시스템의 복잡성을 줄일 수 있고 로봇의 응답 속도 또한 빠를 수 있는 알고리즘과 제어기에 대해 계속 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] <http://www.segway.com/>
- [2] Z. Sheng and K. Yamafuji, “Postural stability of a human riding a unicycle and its emulation by a robot,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 13, no. 5, pp. 709-720, Oct. 1997.
- [3] S. V. Ulyanov, Z. Sheng, and K. Yamafuji, “Fuzzy intelligent control of a robotic unicycle: A new benchmark in non-linear mechanics (ICRAM’95), Istanbul, Turkey, vol. 2, pp. 704-709, 1995.
- [4] 김중완, “유니사이클 로봇의 곡선경로 추종에 대한 퍼지 규칙베이스 구축,” 생산기술연구소 연구 논문집, 제1권

제2호, pp. 129-135, 1996.

- [5] 신진호, 김원호, “구동기 성능 저하를 가진 불확실한 비선형 로봇 시스템에 대한 신경 적응 제어기의 설계,” 동의대학교 산업기술연구집, 제20권, pp. 67-77, Feb. 2006.
- [6] 김진석, “부분 피드백 선형화를 이용한 One-wheel Unicycle Robot의 자세 제어,” 한국정밀공학회지, 제24권 제4호, pp. 68-75, Apr. 2007.
- [7] 김필교, “한 바퀴로 구동하는 로봇 GYROBO의 구현,” 전자공학회 논문지, 제44권 SC편 제4호, pp. 35-41, July 2007.
- [8] K.W. Au, “Decoupled dynamics and stabilization of single wheel robot,” *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 197-203, 1999.
- [9] W. Nukulwuthiropas, S. Laowattana, and T. Maneewarn, “Dynamic modeling of a one-wheel robot by using kane’s method,” *IEEE ICIT’02*, Bangkok, THAILAND, vol. 1, pp. 524-529, 2002.
- [10] Anthony M. Bloch, Mahmut Reyhanlu, and N. Harris McClamroch, “Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems,” *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 11, pp. 1746-1757, Nov. 1992.
- [11] L. A. Zadeh, “Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision processes,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 1, pp. 28-44, Jan. 1973.
- [12] H. Kamada, S. Naoi, and T. Goto, “A compact navigation system using image processing and fuzzy control,” *IEEE Southeastcon*, New Orleans, Apr. 1990.

김 성 하

2008년 동서대학교 메카트로닉스 공학 과졸업. 2009년~현재 부산대학교 전자 전기공학과 대학원 석사과정 재학중. 관심분야는 Robotics, 마이크로 프로세서 개발, Embedded System.

이 재 오

2009년 부산대학교 전자전기 공학부 졸업. 2010년 현재 부산대학교 전자전기 공학과 대학원 석사과정 재학중. 관심 분야는 마이크로 프로세서 응용, 센서 응용, 비선형 제어.

황 종 명

2006년 동아대학교 전자공학부 졸업. 2010년 현재 부산대학교 전자전기 공학과 대학원 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 지능로봇제어, 로봇틱스, 비선형제어.

안 부 환

2008년 부산대학교 전자전기공학부 졸업. 2010년 부산대학교 전자전기공학과 대학원 석사과정 졸업. 관심분야는 로보틱스 비선형 제어.

이 장 명

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