

## 유니사이클 로봇의 주행경로를 변경하기 위한 퍼지러의 수정

김 중완\*, 안 찬우, 김 현수, 전 언찬, 한 근조  
(동아대학교 공과대학 기계공학과)

### Abstract

Our study of rider's postulator stability and tracking control on a unicycle began from the observation of a human riding. The system including unicycle and human operating his unicycle is a fuzzy intelligent biomechanical model on basis of instinct and intuition search mechanisms. We proposed a robotic unicycle with one wheel and one body as a basic mode and derived equation of motion to this model. Our works is in making out fuzzy look-up table to control robotic unicycle. Fuzzy look-up tables were determined for straight line and curve under reasonable inference emulating human's instinct and intuition riding a unicycle. Simulation results show that postulator stability and tracking control on both straight line and curve were successful by using proposed each fuzzy look-up table.

Key Words : robotic unicycle, postulator stability, tracking control, fuzzy intelligent biomechanical model, instinct and intuition search mechanism, fuzzy look-up table.

### 1. 서 론

인간이나 동물이 가지고 있는 운동 기능을 로봇에서 구현하려는 노력이 외국에서 연구되고 있다.

Takanasi등은 동물의 걷는 자세를, Hirose 등은 뱀의 이동 자세를, Yamahuji와 Kawamura 등은 고양이의 회전 자세를 모방하는 로봇을 개발하고 연구하였다. 이런 유형의 연구는 주로 동물의 움직임을 로봇에 구현한 것으로서 재미있는 로봇이라는 새로운 연구분야를 형성해 가고 있다.

인공지능을 공학에 접목시키는 연구분야 중에 인간의 본능과 직관을 로봇에서 구현하려는 연구가 활발하다. 외발 로봇의 직립자세 유지 및 전후로 움직이기, 스카이 콩콩 로봇의 이동, 서비스용 두 바퀴 로봇 및 하나의 바퀴로 이동하는 유니사이클 로봇 등이 연구 대상이다.

우리는 유니사이클의 직선경로와 곡선경로의 제어 문제를 연구하였다. 유니사이클의 운동방정식은 비선형성과 불안정성이 높기 때문에 종래의 제어기법으로는 해결하기 어렵다. 따라서 하나의 바퀴로 이동하는 로봇 유니사이클의 제어문제를 인간의 조종 프로세스를 관측하여 해결하고자 하였다. 인간이 유니사이클을 조종하는 동안에 넘어지지 않기 위해서 그 사람의 두뇌는 대단히 활발하게 활동할 것이다. 인간의 양팔과 두 다리도 분주히 움직이지 않을

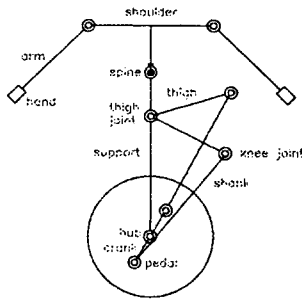
수 없다. 외관상 움직임이 없을 때에도 그의 근육은 무엇인가의 지령에 의해서 힘을 주기도하고 빼기도 할 것이다. 이와 같은 동작들을 관찰자가 모두 알 수는 없겠지만 세심하게 관측하면 로봇 유니사이클의 자세를 안정시키고 주행 경로를 추종하도록 하는 제어문제의 해답이 부분적으로 드러날 것으로 기대된다. 그러므로 유니사이클에 대한 탑승자의 자세 안정과 주행 제어의 연구는 유니사이클을 타고있는 사람을 관측하는 것으로부터 시작된다. 유니사이클과 이것을 조종하는 사람이 포함된 시스템은 본능과 직관 탐색 기구들을 기반으로한 퍼지 지능형 생체역학적 모델이다. 우리는 하나의 바퀴와 하나의 몸체를 갖는 로봇 유니사이클을 기초 모델로서 제시하고 이에 대한 운동방정식을 유도하였다. 우리의 작업은 로봇 유니사이클을 제어하는 퍼지 look-up table을 작성하는 것이다. 유니사이클을 조종하는 인간의 본능과 직관을 모방한 합리적인 추론과 강체 동역학의 운동특성들을 고려하여 직선경로와 곡선경로를 주행할 수 있는 퍼지 look-up table이 만들어졌다. 시뮬레이션 결과는 직선과 곡선에서 제안된 퍼지 look-up table을 사용함으로써 자세 안정과 주행 제어가 모두 성공적이었다.

2. 로보틱 유니사이클과 운동방정식

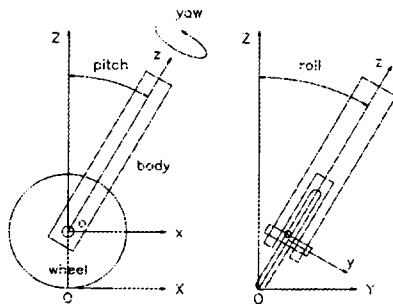
유니사이클을 조종하는 시스템에는 기계적 유니사이클과 답승한 인간의 운동이 포함된다.



(a) Human-machine unicycle system.



(b) Robotic unicycle system.



(c) Simplified unicycle model.

그림1의 (a)는 유니사이클과 유니사이클에 답승한 인간의 모습이다. 인간과 유니사이클은 중력의 영향을 받아 쉽게 넘어질 수 있는 상태에 있다. 그러나 신체의 각 부분과 발의 힘을 이용하여 횡방향과 종방향의 자세를 안정시킨다. 자세안정을 유지하는 과정은 상당히 본능적이고 직관적인 탐색 기구에 의해서 수행된다고 추론할 수 있다. 두 팔은 횡방향의 자세안정에 적극적으로 이용되며, 척추를 포함한 몸통과 다리의 대퇴부는 종방향의 자세안정에 이용되고, 다리의 대부분과 발의 힘은 바퀴에 회전력을 발생하는데 이용될 것이다. 그림1의 (b)는 그림 (a)를 기초로 해서 작도된 기구학적인 로보틱 유니사이클이다. 팔과 다리 및 몸통을 각각 움직일 수 있는 관절과 이들을 구동하는 구동모터가 필요하다. 각각의 구동모터는 독립적으로 회전하겠지만 각 관절의 운동 상태는 서로 종속적임을 알 수 있다. 우리는 간단한 운동방정식을 유도하기 위하여 그림1의 (c)와 같은 단순한 유니사이클 모델을 고려하였다. 라그랑지법을 이용하여 운동방정식을 유도한 결과는 다음 식과 같다. 하첨자 d는 driving, p는 pitch, r은 roll, y는 yaw를 뜻한다.  $\theta$ 는 각위치,  $\dot{\theta}$ 는 각속도,  $\ddot{\theta}$ 는 각가속도이다.  $S\theta$ 는  $\sin(\theta)$ ,  $C\theta$ 는  $\cos(\theta)$ 이다. 단, 휠의 질량은 1kg, 휠의 반경은 0.2m, 휠의 두께는 0.02m, 몸체의 질량은 1kg, 몸체의 가로는 0.09m, 몸체의 세로는 0.09m, 몸체의 높이는 0.6m이다.

2.1 휠의 회전 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & \{0.08(C\theta_r C\theta_r + S^2\theta_r S^2\theta_r) + 0.003333\} \ddot{\theta}_d \\
 & + 0.08(S^2\theta_r S^2\theta_r \dot{\theta}_y - C^2\theta_r S^2\theta_r \dot{\theta}_r) \dot{\theta}_d \\
 & - 0.08 S^2\theta_r S\theta_r \dot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & + \{0.08(C\theta_y C\theta_y + S^2\theta_y C^2\theta_y S^2\theta_r) \\
 & + 0.003333(C\theta_r - C\theta_y)\} \ddot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & + 0.08 S\theta_y C\theta_y S^2\theta_r \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_y \dot{\theta}_p \\
 & + 0.06 C\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_p \\
 & - 0.06 C\theta_y C\theta_r S\theta_p \dot{\theta}_p \dot{\theta}_p \\
 & + (0.08 C\theta_y C\theta_y - 0.003333) S\theta_r \ddot{\theta}_y \\
 & + (0.08 S\theta_y C\theta_y S^2\theta_r + 0.003333) S\theta_y \ddot{\theta}_r \\
 & + 0.06 C\theta_y C\theta_r C\theta_p \ddot{\theta}_p \\
 & = T_{\text{wheel}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Fig.1 Various unicycle models.

## 2.2 몸체의 피치 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & 0.210675 \ddot{\theta}_p \\
 & - 2.943 C\theta_r S\theta_p \\
 & + \{0.120675(C\theta_y - C\theta_r) + 0.06(C\theta_r C\theta_p \\
 & + C\theta_y C\theta_r C\theta_p)\} \dot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & - 0.06 S\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_y \dot{\theta}_d \\
 & + 0.06 C\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_d \\
 & - 0.06 S\theta_p C\theta_p \ddot{\theta}_y \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p \ddot{\theta}_r \\
 & - 0.120675 S\theta_y S\theta_r \ddot{\theta}_r \\
 & - 0.06 C\theta_y C\theta_r C\theta_p \ddot{\theta}_d \\
 & = T_{pitch}
 \end{aligned} \tag{2}$$

## 2.3 몸체의 롤 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & (0.410708 C^2\theta_y + 0.124008 S^2\theta_y) \ddot{\theta}_r \\
 & + \{ (0.16 S\theta_y C\theta_r S^2\theta_r - 0.3734 S\theta_y C\theta_y \\
 & + 0.16 C^2\theta_r S\theta_y) \dot{\theta}_y \\
 & + (0.16(C^2\theta_y S^2\theta_r - S\theta_r C\theta_r) \\
 & + 0.08 S\theta_r C\theta_r S^2\theta_y) \dot{\theta}_r \\
 & - 0.06 S\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_p \\
 & - 0.32 S\theta_r C\theta_r S\theta_y C\theta_y \dot{\theta}_d \} \dot{\theta}_r \\
 & - 9.81 (0.4 + 0.3 C\theta_p) S\theta_r \\
 & + (0.08 C\theta_y C\theta_r S\theta_r \\
 & - 0.316633 S\theta_r C\theta_r) \dot{\theta}_y \dot{\theta}_y \\
 & + (0.06 C\theta_y C\theta_r C\theta_p + 0.124008 C\theta_r \\
 & - 0.06 C\theta_r C\theta_p - 0.120675 C\theta_y) \dot{\theta}_y \dot{\theta}_p \\
 & - 0.06 S\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_p \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r S\theta_p \dot{\theta}_p \dot{\theta}_p \\
 & + 0.06 C\theta_y S\theta_r C\theta_p \dot{\theta}_p \dot{\theta}_d \\
 & + (0.003333 C\theta_y - 0.08 C^2\theta_y S^2\theta_r \\
 & - 0.08 C\theta_y C^2\theta_r) \dot{\theta}_y \dot{\theta}_d \\
 & + 0.08 S\theta_r C\theta_r C^2\theta_y \dot{\theta}_d \dot{\theta}_d \\
 & + 0.08 S\theta_y C\theta_r S\theta_r \ddot{\theta}_y \\
 & - 0.124008 S\theta_y S\theta_r \ddot{\theta}_y \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p \ddot{\theta}_p \\
 & - 0.120675 S\theta_y \ddot{\theta}_p \\
 & + (0.003333 S\theta_y
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - 0.08 S\theta_y C\theta_y S^2\theta_r) \ddot{\theta}_d \\
 & = T_{roll}
 \end{aligned} \tag{3}$$

## 2.4 몸체의 요오 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & (0.204008 S^2\theta_r + 0.011383 C^2\theta_r) \ddot{\theta}_y \\
 & + \{ (0.08 (2 - C\theta_y) S\theta_r C\theta_r C\theta_r \\
 & + 0.21525 S\theta_r C\theta_r + 0.120675 S\theta_r C\theta_y) \dot{\theta}_r \\
 & - 0.120675 C\theta_y S\theta_r \dot{\theta}_p \\
 & - 0.08 S\theta_y C\theta_r S\theta_r \dot{\theta}_d \} \dot{\theta}_y \\
 & + \{ 0.08 S\theta_r C\theta_r C\theta_y - 0.08 S\theta_y C^2\theta_r \\
 & - 0.003333 S\theta_r C\theta_r \\
 & + 0.2067 S\theta_y C\theta_y \} \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
 & + \{ 0.06 C\theta_r C\theta_p - 0.120675 S\theta_r C\theta_r \\
 & - 0.120675 C\theta_r + 0.06 C\theta_y C\theta_r C\theta_p \\
 & - 0.120675 C\theta_y \} \dot{\theta}_r \dot{\theta}_p \\
 & + \{ 0.06 S\theta_r S\theta_p \\
 & + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p \} \dot{\theta}_p \dot{\theta}_p \\
 & + 0.08 S\theta_r C\theta_r S\theta_y \dot{\theta}_y \dot{\theta}_d \\
 & - \{ 0.08 S\theta_r S\theta_r C^2\theta_y + 0.003333 C\theta_y \\
 & + 0.003333 C\theta_r \} \dot{\theta}_r \dot{\theta}_d \\
 & - 0.08 S\theta_y C\theta_y S^2\theta_r \dot{\theta}_d \dot{\theta}_d \\
 & - \{ 0.08 S\theta_y C\theta_r S\theta_r \\
 & + 0.003333 S\theta_y S\theta_r \} \dot{\theta}_r \\
 & - \{ S\theta_r C\theta_p + 0.120675 S\theta_y S\theta_r \\
 & + 0.120675 S\theta_r \} \ddot{\theta}_p \\
 & + 0.08 C\theta_y C\theta_r S\theta_r - 0.003333 S\theta_r \} \ddot{\theta}_d \\
 & = T_{yaw}
 \end{aligned} \tag{4}$$

이상과 같이 유도된 각각의 방정식은 불안정하고 비선형성이 강함을 알 수 있다.

## 3. 퍼지 look-up table 작성

인간은 유니사이클을 조종할 때, 수학적, 동역학적, 제어공학적인 계산과정을 수행한다고 생각할 수 없다. 인간이 느끼기에 불안정한 상태의 시작과 완전히 넘어지는데 걸리는 시간은 길지 않다. 유니사이클을 타고 있는 동안은 훈련주기가 매우 짧다. 자세안정에 관하여 이성적으로 복잡하게 계산하는 동안에 이미 인간은 횡방향으로든 종방향으로든 땅에 접근해 있을 것이다. 유니사이클을 타는 훈련기간

중에 본능을 배제하고 이성이 적극적으로 작용하는 시기는 발이 땅에 닿아 있거나, 유니사이클을 떠나 있는 동안일 것이다. 잘 훈련된 사람은 유니사이클의 방향을 바꾸기 위해서 이성이 사람의 근육기관에 어떤 지령을 내릴 것이다. 자세 안정에 대한 지령은 이성 보다는 본능과 직관이 맡을 것이다. 유니사이클의 자세안정은 피치운동과 롤운동 상태에 큰 영향을 받고, 방향전환은 요오운동에 큰 영향을 받는다. 주행속도는 휠의 구동토크에 직접적인 영향을 받는다. 그러나 앞 절에서 유도된 운동방정식을 세밀하게 분석해 보면 휠, 피치, 롤, 요오의 운동이 서로 교차하면서 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 불안정성이 강하고, 교차곱이 많은 비선형 시스템을 부드럽게 제어할 수 있는 제어치를 찾기 위하여 우리는 인간의 본능과 직관의 탐색 메커니즘을 모방하기로 한다. 시신경과 몸의 자세 상태로부터 위치정보를 얻고, 속도정보는 시신경과 평형기관으로부터, 가속도 정보는 평형기관에서 얻는다. 이 정보들은 수치적이지 않다. 단지 적당한 위치인가, 많이 기울었는가, 속도가 빠르거나 느린가, 가속이 지나친가, 적당한가 등을 느낄뿐이다. 이런 정보들로써 인간은 유니사이클을 조종하는 것이다.

### 3.1 직선경로 추종을 위한 퍼지 look-up table

본 연구에서 사용한 퍼지 look-up table은 휠, 피치, 롤, 요오 등의 4개의 기초 토크와 계인을 결정하는 데 사용되며, 다중의 if-then 논리 구조를 갖는다.

피치운동을 예로 들면 다음과 같다.

if pitch angle  $< \theta_p$

if pitch angular velocity  $< \dot{\theta}_p$

if pitch angular acceleration  $< \ddot{\theta}_p$

then pitch's basic torque is  $B_p$  (5)

이와 같이 피치토크를 결정함에 있어서 피치의 상태변수를 모두 고려하였다. 또한 피치운동은 휠의 회전에도 영향을 받게되므로 휠의 회전상태에 대한 보조 논리도 사용되었다.

if wheel angular velocity  $< \dot{\theta}_w$

if wheel angular acceleration  $< \ddot{\theta}_w$

then pitch torque's gain is  $G_p$  (6)

식(5)와 식(6)으로 결정되는 피치토크는 다음과 같다.

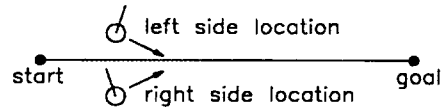
$$T_p = G_p B_p \quad (7)$$

각각의 각, 각속도, 각가속도의 모든 연속적인 값

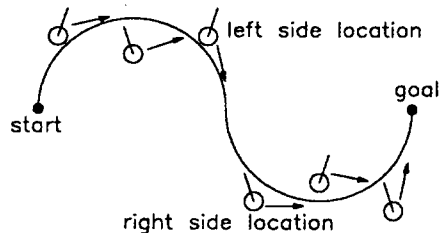
에 대하여 퍼지 look-up table을 작성할 필요는 없다.  $G_p$ 를 결정함에 있어 휠각속도를 7개의 전진부, 휠각가속도는 양, 음, 영 등 3개의 전진부로하여 조합하면 모두 21개의 계인값이 발생하도록 하였다. 기본 토크를 결정하는 퍼지 look-up table은 피치각을 9개의 전진부, 피치각속도와 피치각가속도를 각각 양, 음, 영의 3개의 전진부로 조합하여 모두 81개로 구성하였다. 결국 피치토크를 결정하는 퍼지 look-up table의 요소수는 81개이다. 이와 유사한 방법으로 로보틱 유니사이클의 자세 안정과 직선 주행 제어에 사용된 퍼지 look-up table의 요소수는 약 320여개였다.

### 3.2 곡선경로 추종을 위한 퍼지 look-up table

직선경로와 곡선경로의 추종제어에 사용될 퍼지는 리를 상당히 다를 것으로 생각하기 쉽다. 그러나 진행방향을 고려한 상황도인 그림2를 고찰하면 비슷한 퍼지 논리 구조가 될 것임을 알 수 있다.



(a) space mode for linear path



(b) space mode for curvilinear path

Fig.2 Space modes of linear and curvilinear path.

직관적으로, 직선은 곡선을 잡아 늘린 것과 같고, 곡선은 직선을 우그러뜨린 모양이다. 둘다 진행방향이 정해지고, 지면과 휠의 접촉부가 경로의 왼쪽에 놓여 있는지 또는 오른쪽에 놓여 있는지를 알면 된다. 이것으로 방향각인 요오각의 목표값을 갱신할 수 있다. 그러나 사이클링 시에 직선경로와 곡선경로에서 방향을 바꿀 때, 탑승자는 어떤 다른 힘을 느낀다. 곡선경로에서는 직선경로에서 보다 더 큰 원심력을 받기 때문이다. 원심력은 롤운동을 야기하

므로 우리는 퍼지 look-up table에서 이 부분을 보강하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

직선과 곡선경로를 추종하는 시뮬레이션의 초기조건을 다음 표와 같이 두었다.

Table.1 Initial conditions for computer simulation.

state variable		initial value
wheel	angular velocity	0 degree/sec
	angular acceleration	0 degree/sec <sup>2</sup>
pitch	angle	10 degree
	angular velocity	0 degree/sec
	angular acceleration	0 degree/sec <sup>2</sup>
roll	angle	10 degree
	angular velocity	0 degree/sec
	angular acceleration	0 degree/sec <sup>2</sup>
yaw	angle	-10 degree
	angular velocity	0 degree/sec
	angular acceleration	0 degree/sec <sup>2</sup>

피치각, 롤각, 요오각을 비교적 큰 초기값으로 준 것은 본 연구에서 작성된 퍼지 look-up table이 불안정 비선형 시스템에 강인성함을 보이고자 함이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다.

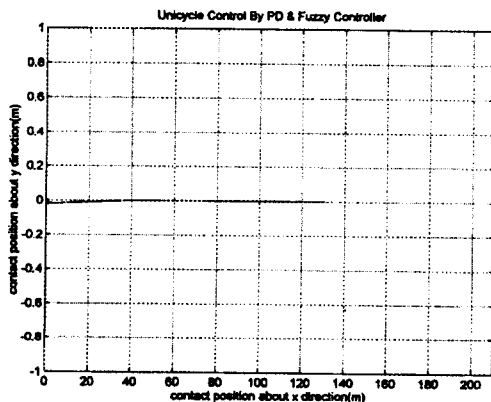


Fig.3 Simulation result for tracking of linear path.

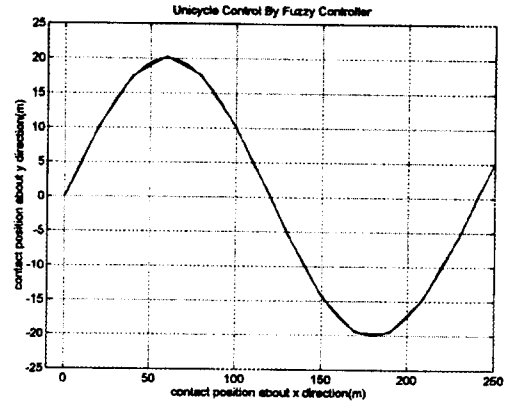


Fig.4 Simulation result for tracking of curvilinear path.

그림3에 직선경로의 추종 결과를, 그림4에 곡선경로의 추종 결과를 각각 도시하였다. 이 결과는 매우 만족스러우며, 퍼지 look-up table에 의한 제어가 성공적임을 보여준다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 로봇틱 유니사이클의 자세안정과 주행경로의 추종 제어문제를 해결하기 위하여 퍼지 제어기법으로 접근하였다. 로봇틱 유니사이클 시스템의 불안정성과 비선형성 및 동역학 시스템인 관점에서 퍼지 논리를 다중의 if-then 논리로 구성하였다. 직선경로 추종에 사용할 퍼지 look-up table을 기초로하였고 부분적으로 수정된 곡선 경로 추종 퍼지 look-up table을 작성하였다. 퍼지 look-up table의 요소수는 약 320여개였으며, 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 대단히 양호하였다. 앞으로 경사면에서의 제어를 위하여 새로운 look-up table을 찾는 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌 : 생략