

# 유니사이클 로봇의 곡선경로 추종을 위한 퍼지규칙 Fuzzy Rule for Curve Path Tracking of a Unicycle Robot

김 중 완(동아대학교 기계공학과), 정 희 균\*(동아대학교 대학원)  
Joong Wan Kim, Hui Gyun Jeong\*

## ABSTRACT

Our unicycle has simple mechanical structure. But unicycle's dynamic system is a very sensitive unstable nonlinear system. In this paper, a fuzzy inference control mechanism was established throughout an inquiry into human riding a unicycle, and we developed a direct fuzzy controller to control our unicycle robot. This proposed fuzzy controller is consisted with fuzzy logic controllers for attitude stability and wheel's velocity. Computer simulation results show that our fuzzy controller has very powerful performance to unstable nonlinear unicycle robot system.

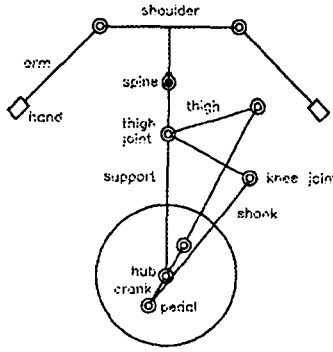
### 1. 서 론

최근 인간의 지능을 모방하는 지능적인 시스템에 대한 연구 및 개발이 활발하다. 특히 인공지능시스템의 효과를 확인할 수 있는 자율주행 로봇에 대한 연구가 활발하다. 본 논문에서는 바퀴가 하나인 유니사이클 로봇이 스스로 자세 안정을 취하면서 곡선경로를 추종하는 퍼지 규칙베이스를 개발하였다. 하나의 바퀴를 갖는 유니사이클 로봇은 물리적으로 대단히 민감하면서 불안정한 시스템이다.<sup>[1]</sup> 기존의 PID제어기는 제어 대상이 정확하게 수학적으로 모델링된 방정식을 요구한다. 고유 불안정성이 높고 비선형적인 복잡한 시스템을 종래의 PID제어로는 시스템의 안정성과 가제어성을 명백하게 규명할 수 없으며 제어기 설계도 쉽지 않다.<sup>[2]</sup> 우리는 인간이 유니사이클을 탈 수 있다는 것을 알고 있다. 그러므로 유니사이클 로봇의 제어기를 설계하는 문제는 유니사이클을 타는 인간의 추론 제어 메카니즘을 연구하므로써 해결할 수 있다고 생각했다. 유니사이클을 조종하는 인간은 자세 안정이나 주행 속도를 조종할 때에 역학적인 연산을 수행하지 않는다. 인간은 끈 끈적질것 같은 유니사이클 위에서 단지 논리 레벨의 애매한 추론을 반복할 따름이다.<sup>[3-4]</sup> 이전의 논문에서 PD제어기와 퍼지제어기를 혼합한 복합제어기를 가지고서 유니사이클 로봇의 자세 안정 및 직선 경로 추종성을 시뮬레이션한

결과 퍼지제어기의 우수성을 입증하였다.<sup>[5]</sup> 본 논문에서는 휠속도, 피치각, 롤각 그리고 요오각 제어기 설계에 PD제어기를 완전히 배제시킨 퍼지논리에만 의존하는 순수 퍼지제어기를 설계하였다. 본 연구에서 제안된 퍼지제어기는 일반 PD제어기로는 성공할 수 없었던 고유 불안정하고 비선형성이 높은 유니사이클 로봇의 자세 안정 및 곡선 경로 추종제어에 적용하여 좋은 결과를 얻었다. 본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 전문가의 경험 및 동역학적 지식에 기반한 퍼지 소속함수와 규칙베이스를 구축하였으며 3장에서는 퍼지제어기 설계를 제시하였고 4장에서는 설계된 퍼지제어기를 Matlab 프로그램으로 시뮬레이션한 결과를 고찰하였고 5장에서는 본 논문의 결론과 앞으로의 연구 과제를 제시하였다.

### 2. 유니사이클 로봇의 주행속도 및 자세안정에 대한 퍼지규칙베이스

아래 Fig.1(a)는 인간이 유니사이클을 타는 자세를 묘사한 것으로 Fig.1(b)는 Fig.1(a)를 본떠서 기구학적인 모델로서 유니사이클 로봇을 나타낸 것이다. 인간은 유니사이클 로봇의 운동방정식을 모르면서 유니사이클을 조종한다. 인간이 유니사이클을 능숙하게 조종할 수 있기까지는 운동과 연관된 과거의 경험적 지식과 유니사이클을 잘 탈수 있기까지의 반복적인



(a) human riding a unicycle (b) unicycle robot  
Fig.1. Comparison of human riding a unicycle and a unicycle robot.

시행착오 과정에서 얻어지는 지식에 기반한다. 본 논문에서 퍼지 규칙을 구성하는데 있어서 인간의 경험적 지식과 동역학적 지식을 이용하여 휠 속도, 피치각, 롤각, 요오각의 제어에 필요한 각각의 퍼지 규칙베이스를 구축하였다. 피치, 롤, 요오는 서로에게 영향을 주기 때문에 소속함수내에 또다른 소속함수를 갖는 중첩된 소속함수꼴을 갖는다.

2.1. 휠 구동을 위한 퍼지 규칙베이스

Fig.2는 유니사이클 로봇이 추종할 목표경로 곡선의 모양을 보여주며, 휠과 지면의 접촉점에 대한 위상을 목표 경로곡선과 기준축을 기준으로 내부영역과 외부영역으로 구분한다.

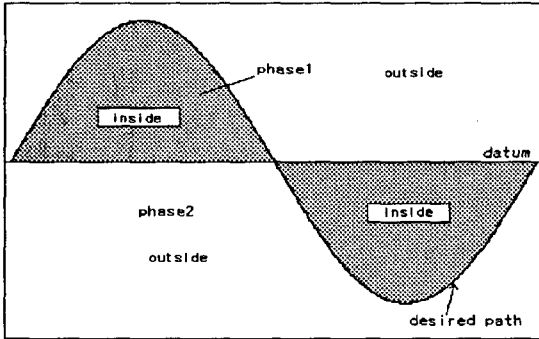


Fig.2. Phase mode for curvilinear path

아래의 if-then은 유니사이클 로봇이 곡선경로를 추종하는 과정에 있어서 휠과 접촉면간의 위상모드를 결정하는 규칙베이스이다.

if ( $D_y \leq W_y$  and  $W_y \leq T_y$ ) or  
 $(D_y \geq W_y$  and  $W_y \geq T_y)$  then phase1  
 elseif ( $D_y > W_y$  and  $W_y < T_y$ ) or

$(D_y < W_y$  and  $W_y > T_y)$  or  
 $(D_y > W_y$  and  $W_y < T_y)$  then phase2

end

여기서,

$D_y$ : 기준선의 y좌표값

$W_y$ : 휠의 현재 위치 y좌표값

$T_y$ : 휠의 현재 위치 x좌표값에서의 곡선경로 y좌표값

phase 1: 휠과 지면의 접촉점이 내부영역에 있을 때  
 phase 2: 휠과 지면의 접촉점이 외부영역에 있을 때

인간은 유니사이클을 타고서 곡선경로를 추종할 때 매 순간마다 일시적인 목표점을 설정하면서 갱신한다고 생각된다. 유니사이클 로봇이 순간 목표점을 정확히 통과하기란 힘들며 보통은 목표점 근방을 지나간다. 목표점 설정시 유니사이클 로봇의 몸체 높이, 주행 속도에 따라 일반적으로 다르게 설정된다. 본 연구에서는 목표점 갱신시 유니사이클 로봇이 진행하는 전방 약 10m로 설정하였다. 목표점을 순간 순간 설정하는데 있어서 목표경로 곡선을 기준으로 내부영역과 외부영역을 지그재그로 설정하도록 하였다. 아래의 if-then규칙은 새로운 목표점 설정에 대한 규칙베이스를 보여 주고 있다.

if ( $\Delta d \leq \Delta error$ ) and (flag = 1)  
 then 목표점 갱신, flag=0  
 elseif ( $\Delta d \leq \Delta error$ ) and (flag = 0)  
 then 목표점 갱신, flag=1

end

여기서,

$\Delta d$ : 로봇의 현재 위치점에서 임시 목표점까지 거리  
 $\Delta error$ : 임시 목표점 근방의 오차범위값

flag: 로봇의 현재 위치점이 곡선 내부영역점(flag=1) 또는 외부영역점(flag=0)인지를 나타내는 상태

Fig.3은 휠을 구동할 때 롤운동을 고려하기 위한 퍼지 멤버쉽 함수이다.

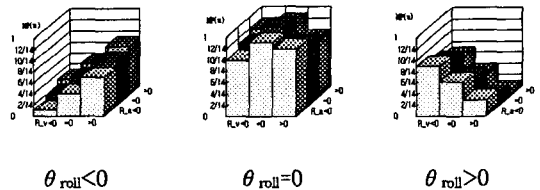
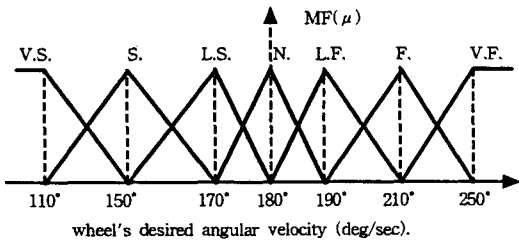


Fig.3. Fuzzy membership function of roll for wheel.

Fig.4는 휠의 주행속도에 대한 퍼지 멤버쉽함수이다.

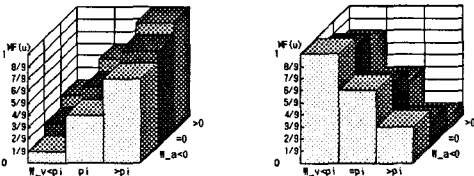


(V. : Very L. : Little S. : Slow F. : Fast N. : Normal)

Fig.4. Fuzzy membership function for wheel.

### 2.2. 피치 구동을 위한 퍼지 규칙베이스

피치각의 제어는 휠의 속도와 가속도로부터 영향을 받으므로 Fig.5는 피치를 구동할 때 휠운동을 고려하기 위한 퍼지 멤버십 함수이다. Fig.6은 피치각에 대한 퍼지 멤버십 함수이다.



(a) dec\_ratio (b) inc\_ratio

Fig.5. Fuzzy membership function of wheel for pitch.

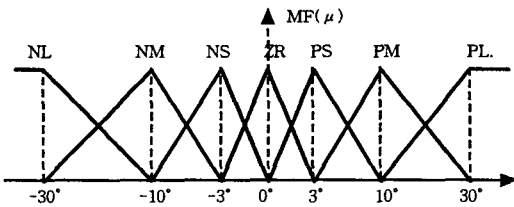


Fig.6. Fuzzy membership function for pitch.

### 2.3. 롤 구동을 위한 퍼지 규칙베이스

롤은 유니사이클 로봇의 목표경로 추종성을 좌우하는 중요한 부분으로 요오로부터 영향을 받는다. Fig.7은 롤각 제어를 위한 요오에 대한 퍼지 멤버십 함수이다.

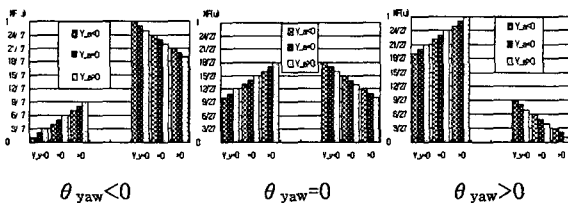


Fig.7. Fuzzy membership function of yaw for roll.

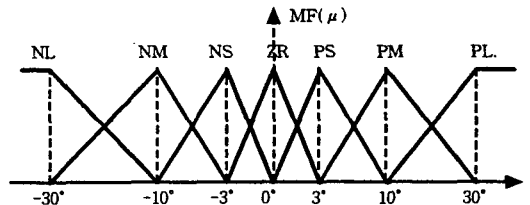


Fig.8. Fuzzy membership function for roll.

### 2.4. 요오 구동을 위한 퍼지 규칙베이스

요오각은 유니사이클 로봇의 목표제적 추종성에 가장 중요한 부분으로 롤각으로부터 영향을 받는다. Fig.9는 요오를 구동할 때 롤 운동을 고려한 퍼지 멤버십 함수이다. Fig.10은 요오각의 구간별 요오의 속도와 가속도를 고려한 퍼지 멤버십 함수이다.

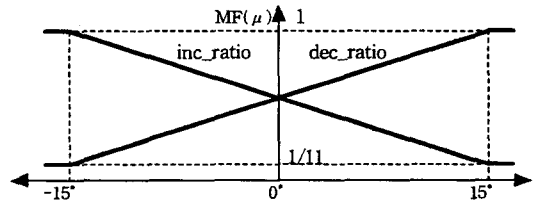


Fig.9. Fuzzy membership function of roll for yaw

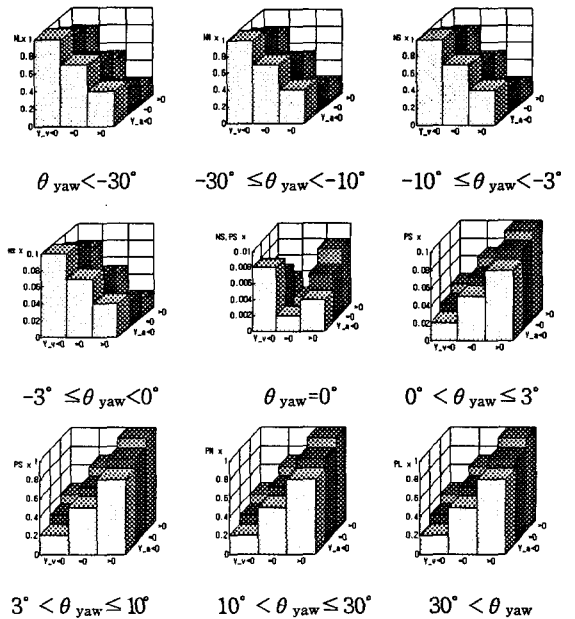


Fig.10. Fuzzy membership function for yaw

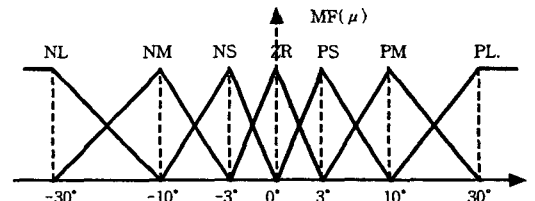


Fig.11. Fuzzy membership function for yaw.

### 3. 퍼지제어기 설계

본 연구에서는 유니사이클 로봇이 자세안정을 유지하면서 일정한 속도로 곡선경로를 추종하는데 있다. 퍼지 제어기 설계에 동역학적 지식과 유니사이클 조종에 대한 경험적 지식에 기반하여 퍼지 규칙을 구축하였다. 퍼지 추론방식에는 여러 가지가 있다. 그 중에서 Zadeh가 제시한 결합원리(conjunction principle)와 필연원리(entailment principle)를 혼합한 형태의 추론의 복합규칙(compositional rule of inference)을 사용하였다.<sup>[6]</sup> 퍼지수의 소속함수에는 삼각형, 종형, 사다리꼴형등이 있는데 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 삼각형을 사용하였다. Fig.12는 유니사이클 로봇에 사용한 제어 계통도이다. 휠의 속도, 피치각, 롤각, 요오각의 제어에 각각 퍼지제어기를 사용하였다.

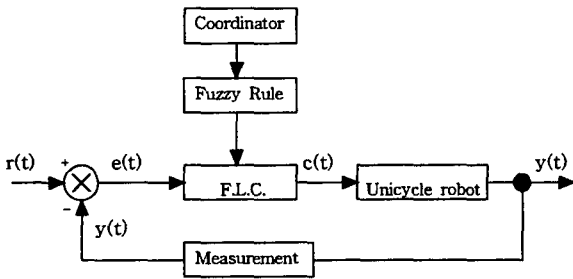
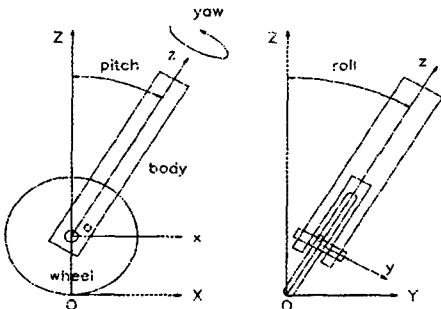


Fig.12. Controller structure of unicycle robot.

### 4. 시뮬레이션

본 연구에서는 유니사이클 로봇에 대한 시뮬레이션의 모델로서 표1의 제원을 갖는 Fig.13과 같은 심플한 모델을 선정하였다. 시뮬레이션의 초기조건으로서 피치각, 롤각, 요오각을 각각  $-10^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $15^\circ$ 로 두었으며 피치, 롤, 요오의 각속도와 각가속도를 전부 영으로 두었고 휠의 초기속도는  $\pi \text{ rad/sec} (= 180 \text{ deg/sec})$  주었으며 목표 경로는 곡선이다.



(a) lateral view (b) front view

Fig.13. Simplified model of unicycle robot.

Table 1. Specification of the simple unicycle robot

wheel's mass	wheel's radius	wheel's width	body's mass	body's size
1 kg	0.2 m	0.02 m	1 kg	0.09 x 0.09 x 0.6 m

Matlab을 이용한 computer simulation 결과를 Fig.14에서 Fig.18까지 도시하였다. 곡선경로 추종을 위한 요오각의 변화에도 불구하고 피치각과 롤각이 매우 안정함을 알 수 있다. 정현곡선이 한 사이클을 완성하는 동안에 요오각은 25회 정도 수정되었다. 초기에 자세를 안정시키기 위해서 비교적 큰 토크들이 발생하고 있으나 피치와 롤 운동이 안정된 이후에는 대단히 적은 토크값이 발생하였다. 갱신된 요오각에 대해서 자세안정을 이루는데는 약 10초 이내의 시간이 걸렸다.

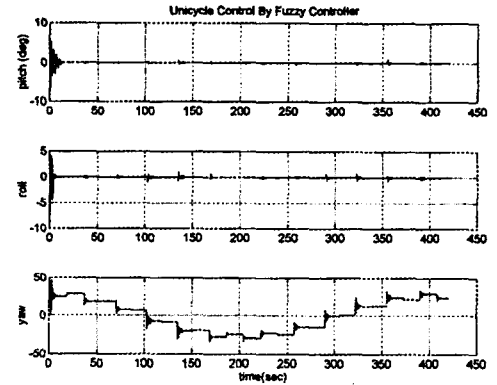


Fig.14. Simulation results of Euler angles.

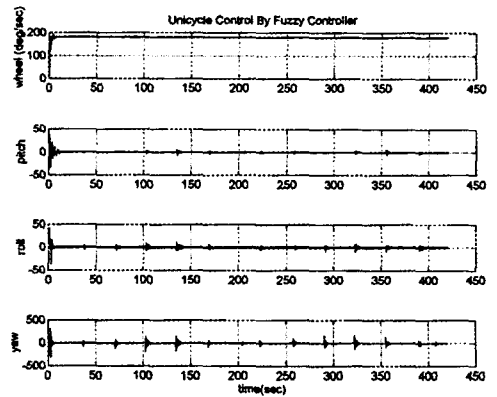


Fig.15. Simulation results of angular velocities.

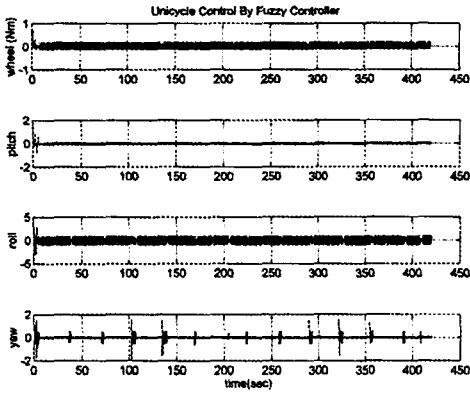


Fig.16. Simulation results of applied torques.

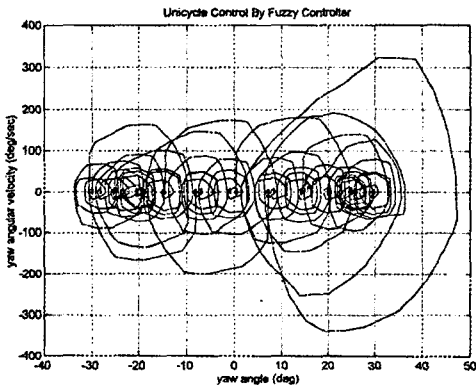


Fig.17. Simulation results of yaw angular velocity to yaw angle

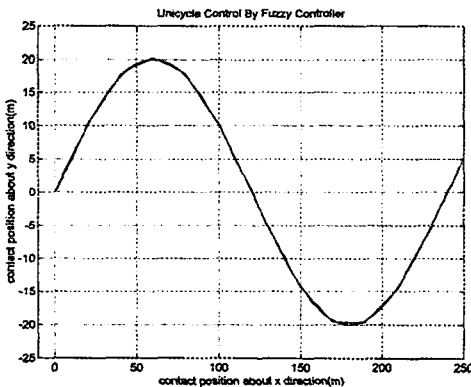


Fig.18. Simulation results of contact position on the ground

## 5. 결 론

본 연구에서는 물리적으로 고유 불안정성이 큰 유니사이클 로봇이 자세안정을 유지하면서 주어진 곡선경로를 추종하도록 하는 퍼지규칙을 구축하였다. 휠의 속도, 롤각, 피치각, 요오각의 제어에 각각 퍼지제어기를 사용하였다. 제안된 퍼지 규칙에 의한 제어기를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 곡선경로의 추종에 따른 자세 안정 및 목표경로의 추종성이 매우 좋았다. 실제의 유니사이클 로봇이 제작되면 제안된 제어 메커니즘과 인공지능제어를 검증 받을 수 있다고 생각된다. 앞으로 man-machine interface에 의한 지식기반 구축을 배제하기 위해서 자율학습에 의한 지식기반구축 알고리즘을 개발하고자 한다.

## 참고문헌

- 1) Ulyanov S. V., Sheng Z. and Yamafuji K., "Fuzzy Intelligent Control of a Robotic Unicycle: A New Benchmark in Non-linear Mechanics", Int. Conf. Recent Advanced in Mechatronics (ICRAM'95), Vol.2, pp.704-709, Istanbul, Turkey, 1995
- 2) Sheng Z. and Yamafuji K., "Stability and Motion Control of a Unicycle (1st Report: Dynamics of a Human Unicycle and its Modeling by Link Mechanism)", JSME, International Journal, Series C, June, 1995
- 3) Ulyanov S. V., Sheng Z., Yamafuji K. Watanabe S., Ohkura T. and Kim J. W., "Self-Organization Fuzzy Chaos Intelligent Controller for a Robotic Unicycle: A New Benchmark in AI Control", 5th. Intelligent System Symposium, Tokyo, pp.41-46, Sep.29-30, 1995
- 4) E. H. Mamdani, "Twenty years of Fuzzy Control: Experience Gained and Lessons Learnt", IEEE, Technology Update Series, Fuzzy Logic Technology and Applications, pp.19-24, 1994
- 5) 김중완, 안찬우, 전태옥, 정희균, "유니사이클 로봇에 대한 인간적 추론 제어 메카니즘", 한국정밀공학회'96 춘계학술대회 논문집, pp.359 - 362, 1996
- 6) 채 석, 오영석, 퍼지이론과 제어, 청문각, pp.253-290, 1995