

유니사이클 로봇에 대한 인간적 추론 제어 메카니즘

김 중 완, 안 찬 우, 전 태 욱, 정 회 균*

동아대학교 기계공학과

* 동아대학교 대학원

Abstract

Our unicycle robot has simple mechanical structure. But unicycle's dynamical system is a very sensitive unstable system. Equation of motion of this simple unicycle robot was derived using Lagrange's method. In this paper a human inference control mechanism was established throughout an inquiry into human riding a unicycle, and we developed a hybrid controller to control our unicycle robot. Our controller is consisted with the PD and fuzzy controller containing fuzzy gain scheduling technique. Computer simulation shows good results.

1. 서 론

최근 인간의 지능을 모방하는 지능적인 시스템에 대한 연구가 활발해지고 있다. 규칙에 기반을 둔 인공지능 이론은 신경망, 퍼지 이론, 유전자 알고리즘 및 PID 제어기와 의 융합 모델로 결합되는 추세에 있다. 이것은 각각의 장점들을 극대화하여 최적의 시스템을 구현하려는 시도인 것이다. 인간의 탁월한 능력 중의 하나는 운동과 연관된 지적 능력을 들 수 있다. 그 중에서도 인간은 물리적으로 대단히 불안정한 시스템인 바퀴가 한개 있는 유니사이클을 능숙하게 조종할 수 있다. 인간은 자신의 감각기관을 잘 활용하여 유니사이클을 넘어지지 않고 운전하는 추론 능력을 갖고 있다.

유니사이클의 기구 구조는 자전거의 구조 보다 매우 단순하다. 그러나 유니사이클을 타는 사람은 자전거를 탈 때 보다 훨씬 신경을 기한다. 그것은 겉보기에 간단한 구조를 한 유니사이클의 제어가 자전거 보다 어렵기 때문이다.

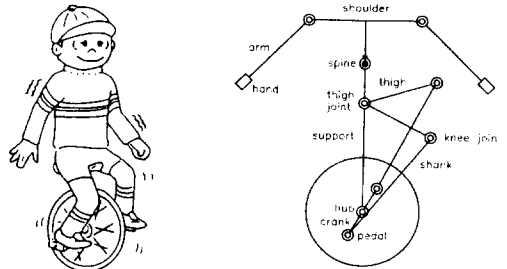
유니사이클 제어에 대한 연구는 독립적인 몇가지 단계를 수행하여야 한다. 첫째는 물리적 모델을 확정하고 이에 대한 운동방정식을 모델링 오차를 최소화하여 운동방정식을 유도하는 것이며 둘째는 제어 알고리즘의 구축이며 셋째는 제작 및 주행시험이다.

본 연구에서는 유니사이클 로봇에 대한 모델링과 제어 알고리즘의 구축을 시도하였다. 심플한 유니사이클 로봇에 대한 모델로 부터 운동방정식을 유도하고 유니사이클을 조종하는 인간이 행하는 제어 메카니즘을 추론하였으며,

유니사이클 로봇의 효과적인 제어를 위해 PD 제어기와 퍼지제어기를 융합한 하이브리드 제어기를 설계하였다.

2. 유니사이클 로봇의 다이내믹스

그림1에 인간이 유니사이클을 타는 자세와 유니사이클 로봇의 개략도를 나타내었다.



(a) human riding a unicycle (b) unicycle robot

Fig.1 Comparison of human riding a unicycle and a unicycle robot.

그림1(b)의 유니사이클 로봇은 유니사이클을 타는 인간과 거의 유사한 동작을 할 수 있다. 그러나 이런 구조로 된 유니사이클 로봇에 대한 정확한 모델링은 매우 복잡하다. 본 연구의 주제는 유니사이클을 조종하는 인간적 추론 제어 메커니즘에 대한 연구이다. 실제로 인간이 유니사이클을 조종할 때 유니사이클에 대한 모델식을 생각하지 않

으며, 유니사이클의 상태를 정량적으로 계산하지도 않는다. 인간에게 필요한 것은 유니사이클의 자세에 대한 민감한 반응과 세심한 감각 및 유니사이클의 조종을 통해 축적된 경험적 지식 베이스이다. 이 과정을 추론하기에 앞서 우리는 가장 간단한 구조의 유니사이클 로봇의 운동방정식을 유도하고 인공지능제어가 아니면 안되는 이유를 생각해 본다. 유니사이클 로봇의 구성요소로서 휠과 몸체만 생각하고 입력으로서 휠의 회전, 몸체의 피치, 휠과 몸체의 몸 및 요오 운동에 필요한 토크들이 있다고 가정한다. 그러면 그림2와 같은 모델을 작도할 수 있다.

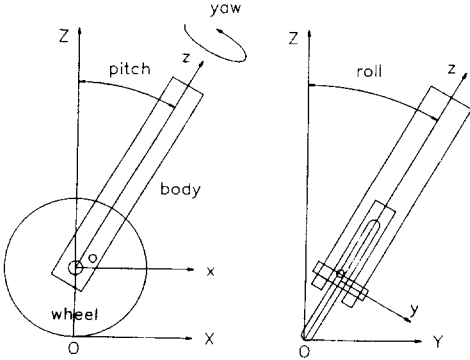


Fig.2 Simplified model of unicycle robot.

그림2에 도시한 유니사이클 로봇 모델의 파라미터를 아래와 같이 두고 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

- wheel's mass = 1 (kg)
- body's mass = 1 (kg)
- wheel's radius = 0.2 (m)
- body's size = 0.6 X 0.09 X 0.09 (m)

Wheel's Driving Equation

$$\begin{aligned}
 & \{ 0.08 (C \theta_r C \theta_r + S^2 \theta_y S^2 \theta_r) + 0.003333 \} \ddot{\theta}_d \\
 & + 0.08 (S 2 \theta_y S^2 \theta_r \dot{\theta}_y - C^2 \theta_y S 2 \theta_r \dot{\theta}_r) \dot{\theta}_d \\
 & - 0.08 S 2 \theta_y S \theta_r \dot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & + \{ 0.08 (C \theta_y C \theta_y C \theta_r + S 2 \theta_y C 2 \theta_y S^2 \theta_r) \\
 & \quad + 0.003333 (C \theta_r - C \theta_y) \} \dot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & + 0.08 \sin \theta_y \cos \theta_y \sin 2 \theta_r \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
 & + 0.06 \sin \theta_y \cos \theta_r \cos \theta_p \dot{\theta}_y \dot{\theta}_p \\
 & + 0.06 \cos \theta_y \sin \theta_r \cos \theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_p \\
 & - 0.06 \cos \theta_y \cos \theta_r \sin \theta_p \dot{\theta}_p \dot{\theta}_p \\
 & + (0.08 \cos \theta_y \cos \theta_y - 0.003333) \sin \theta_r \ddot{\theta}_y \\
 & + (0.08 \sin \theta_y \cos \theta_y \sin^2 \theta_r + 0.003333) \sin \theta_y \ddot{\theta}_r \\
 & + 0.06 \cos \theta_y \cos \theta_r \cos \theta_p \ddot{\theta}_p \\
 & = \text{applied input driving torque}
 \end{aligned}$$

Unicycle Body's Pitch Motion Equation

$$\begin{aligned}
 & 0.210675 \ddot{\theta}_p \\
 & - 2.943 C \theta_r S \theta_p \\
 & + \{ 0.120675 (C \theta_y - C \theta_r) \\
 & \quad + 0.06 (C \theta_r C \theta_p + C \theta_y C \theta_r C \theta_p) \} \dot{\theta}_y \dot{\theta}_r \\
 & - 0.06 \sin \theta_y \sin \theta_r \cos \theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
 & + 0.06 \sin \theta_y \cos \theta_r \cos \theta_p \dot{\theta}_y \dot{\theta}_d \\
 & + 0.06 \cos \theta_y \sin \theta_r \cos \theta_p \dot{\theta}_r \dot{\theta}_d \\
 & - 0.06 \sin \theta_p \cos \theta_p \ddot{\theta}_y \\
 & + 0.06 \sin \theta_y \cos \theta_r \cos \theta_p \ddot{\theta}_r \\
 & - 0.120675 \sin \theta_y \sin \theta_r \ddot{\theta}_r \\
 & - 0.06 \cos \theta_y \cos \theta_r \cos \theta_p \ddot{\theta}_d \\
 & = \text{applied input pitch torque}
 \end{aligned}$$

Unicycle Body's Roll Motion Equation

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

Unicycle Body's Yaw Motion Equation

$$\begin{aligned}
 & (0.204008 S^2 \theta_r + 0.011383 C^2 \theta_r) \ddot{\theta}_y \\
 & + \{ (0.08 (2 - C \theta_y) S \theta_r C \theta_r C \theta_r \\
 & \quad + 0.21525 S \theta_r C \theta_r
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 0.120675 S\theta_r C\theta_y) \dot{\theta}_r \\
& - 0.120675 C\theta_y S\theta_r \dot{\theta}_p \\
& - 0.08 S\theta_y C\theta_r S\theta_r \dot{\theta}_d \\
& + (0.08 S\theta_r C\theta_r C\theta_y - 0.08 S\theta_y C2\theta_r \\
& - 0.003333 S\theta_r C\theta_r + 0.2067 S\theta_y C\theta_y) \dot{\theta}_r \dot{\theta}_r \\
& + (0.06 C\theta_r C\theta_p - 0.120675 S\theta_r C\theta_r \\
& - 0.120675 C\theta_r + 0.06 C\theta_y C\theta_r C\theta_p \\
& - 0.120675 C\theta_y) \dot{\theta}_r \dot{\theta}_p \\
& + (0.06 S\theta_r S\theta_p + 0.06 S\theta_y C\theta_r C\theta_p) \dot{\theta}_p \dot{\theta}_p \\
& + 0.08 S\theta_r C\theta_r S\theta_y \dot{\theta}_y \dot{\theta}_d \\
& - (0.08 S\theta_r S\theta_r C2\theta_y + 0.003333 C\theta_y \\
& + 0.003333 C\theta_r) \dot{\theta}_r \dot{\theta}_d \\
& - 0.08 S\theta_y C\theta_y S^2\theta_r \dot{\theta}_d \dot{\theta}_d \\
& - (0.08 S\theta_y C\theta_r S\theta_r + 0.003333 S\theta_y S\theta_r) \ddot{\theta}_r \\
& - (S\theta_r C\theta_p + 0.120675 S\theta_y S\theta_r \\
& + 0.120675 S\theta_r) \ddot{\theta}_p \\
& + 0.08 C\theta_y C\theta_r S\theta_r - 0.003333 S\theta_r) \ddot{\theta}_d \\
& = \text{applied input yaw torque}
\end{aligned}$$

3. 인간적 추론 제어 메카니즘

앞 절에서 유도한 운동방정식의 제어 목표는 주어진 경로를 유니사이클이 추종하는 것이다. 경로의 추종은 요소각의 제어로서 가능하다. 그러나 앞절에서 유도한 운동방정식을 고찰해 보면 휠의 주행과 자세 상태를 표현하는 변수들은 서로 교차곱을 이루는 극도의 비선형 불안정 시스템임을 알 수 있다. 이들은 서로 종속 관계에 있다. 이것이 유니사이클 로봇의 제어를 난해하게 만드는 요인이다. 제어문제에서 흔히 사용하는 PD제어기 만으로는 제어기의 게인값을 상수로서 확정하는 것이 절대 불가능하다. 특히 비선형제에 대해서 가제어성을 명백하게 해석할 수 없다. 그런데 인간은 어떻게 유니사이클을 조종할 수 있을까? 문제 해결을 위한 발상의 전환이 필요하다고 생각한다. 인간적 추론과정을 정성적으로 분석하고 이것을 정량적으로 구현하는 접근법의 모색이 필요하다. 이것을 실현하는 방법은 무수히 많다고 생각되므로 절대적인 해답을 찾기 보다는 합리적인 추론 메카니즘의 정립이 보다 의미있다고 생각한다. 유니사이클을 조종하는 인간의 추론 메카니즘은 다음과 같이 정의할 수 있다.

인간적 추론 메카니즘 1

직관은 경로와 주행상태 및 자세를 감지하고 예측한다.
직관은 경험적 지식을 축적하고 갱신한다.
직관은 본능과 정서를 조종하는 코오디네이터이다.

인간적 추론 메카니즘 2

본능은 직관과 부분 종속 관계에 있다.
본능은 자세 상태와 외부 환경에 대하여 반응하며
자세 안정의 지식 기반 코오디네이터이다.

인간적 추론 메카니즘 3

정서는 직관과 부분 종속 관계에 있다.
정서는 주행 상태와 외부 환경에 대하여 반응하며
주행에 대한 지식 기반 코오디네이터이다.

4. 인간적 추론 제어 메카니즘의 정식화

물리적인 시스템에 인공지능을 구현하는 방법이 각각도로 연구되고 있다. 지능적인 시스템의 표현에 인공지능, 신경망, 퍼지, 유전자 알고리즘, 카오스, 셀룰라 오토마타, 기계학습 등이 시도되고 있다. 본 연구에서는 인공지능 제어법의 설계를 전문가적 지식 기반에 근거한 퍼지적 게인 스케줄링에 중점을 두었다. 그 이유는 유니사이클 로봇이 이동할 때, 작용 토크의 크기가 운동에 직접 관계하며, 게인값이 토크의 크기를 좌우하기 때문이다. 퍼지적 게인 스케줄링은 현재 관측된 변수들의 데이터로부터 게인값을 적절하게 결정하므로 유니사이클 로봇에 필요한 최적의 토크를 제공한다. 이 방식의 또 다른 이점은 PD제어기와 퍼지제어기의 장단점을 활용하는 것이다. 전문가적 퍼지 지식 기반은 인간의 상식적 지식을 배제하고 유니사이클 로봇의 동역학적 지식으로부터 구축되었다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

제어기는 주제어기로서 PD제어기, 보조제어기로서 퍼지제어기를 융합한 하이브리드 제어기를 사용하였다. 시뮬레이션의 초기조건으로 피치각, 롤각, 요각을 각각 10° 로 두었고, 각속도와 각가속도를 모두 영으로 두었다. 목표 경로는 직선이다.

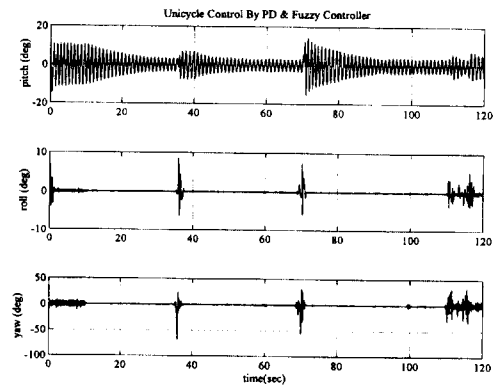


Fig.3 Simulation results of Euler angles.

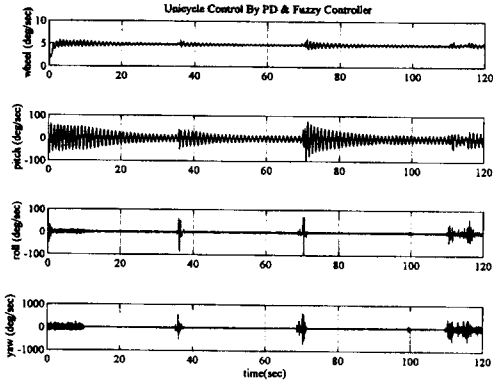


Fig.4 Simulation results of angular velocities.

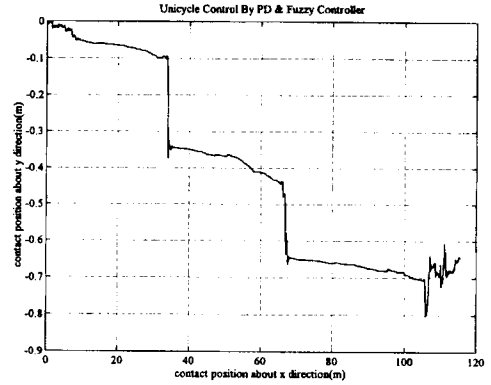


Fig.7 Simulation results of contact position on the ground.

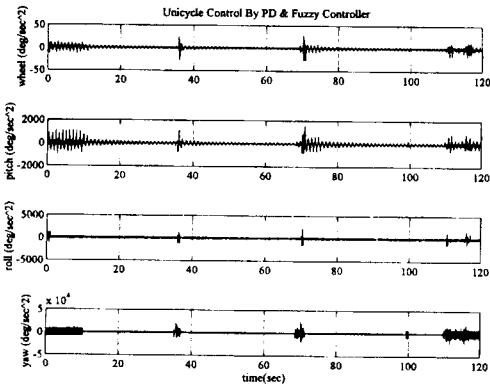


Fig.5 Simulation results of angular accelerations.

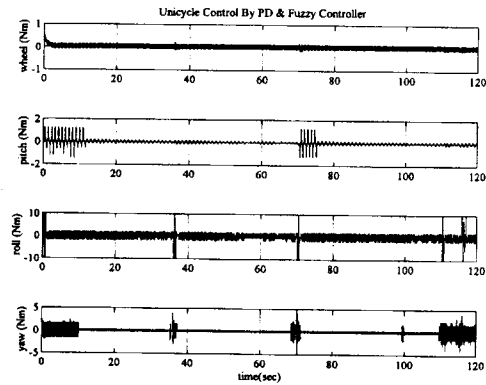


Fig.6 Simulation results of applied torques.

5. 결 론

본 연구에서는 물리적으로 고유불안정성이 큰 유니사이클 로봇의 제어를 위해서 인간적 추론 제어 메카니즘을 정의하였고 동역학적 지식을 퍼지 논리의 지식 기반으로 구축하였다. 그리고 PD제어기와 퍼지 게인 스케줄링에 의한 퍼지제어기를 융합한 복합제어기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 제안된 복합제어기가 자세 안정에 유효함을 보였으나 목표 경로의 추종성은 다소 미흡하였다. 실기의 유니사이클 로봇이 제작되면 제안된 제어 메카니즘과 인공지능제어기 설계의 문제는 실용성있게 보완될 수 있으리라 기대된다.

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) 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
- 3) 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