

휴머노이드 제어를 위한 지능 제어기

휴머노이드 로봇은 제어하는데 있어서 다양한 기술들이 요구된다.
이유인 즉, 휴머노이드 로봇이 가지고 있는
다관절 로봇으로써의 비선형성과 휴머노이드 로봇은
지면에 고정되어 있지 않아서 생기는 기본적인 불균형성에 의거한다.
이에 이러한 휴머노이드 로봇이 가지고 문제를 알아보고
이에 대한 지능기반의 제어기 개발에
대해 논의해보고자 한다.

■ 공정식
(대덕대학 마이크로로봇과)

1. 서론

생활환경이 윤택해지고 사람들의 요구사항이 지속적으로 증가되면서 로봇, 특히 지능형 로봇에 대한 관심이 급격하게 증가되기 시작하였다. 지능 로봇의 연구와 기술의 발전을 통해 인간을 대신해서 때로는 위험한 일을 수행하기도 하고 때로는 가정 생활과 사회생활을 보다 편리하게 수행할 수 있도록 로봇 시스템을 이용할 것이다. 이때 이러한 요구에 가장 부합하는 지능형 로봇은 인간의 형상을 하고 있는 휴머노이드 로봇이 될 것이다. 그러나 휴머노이드 로봇은 현재 기술에서는 극복해야 할 많은 요소를 지닌 시스템이기도 하다. 이는 대부분의 지능기반의 로봇들이 휠기반으로써 비교적 적은 관절을 가지고도 이동 및 인간에게 필요한 많은 일들을 수행할 수 있는데 반해, 휴머노이드 로봇은 기본적으로 다리에 많은 관절을 가지며 기본적인 불안정성을 내포한 시스템이기 때문에, 로봇을 구동하고 제어함에 있어 다양한 환경들이 고려되어야 하며, 이에 아직은 휴머노이드 로봇이 인간 생활에 바로 적용되기에는 한계를 지니고 있는 것 또한 주지의 사실이다.

현재 개발된 대표적인 휴머노이드 로봇은 일본의 Honda사에서 개발한 ASIMO[1]라고 할 수 있다. ASIMO의 경우는 Honda사

에서 1986년부터 프로토타입인 P1부터 P3를 개발하면서 얻은 데이터를 기초로 개발된 로봇으로 인간과 비슷한 크기에 인간의 동작을 가장 잘 흉내 낼 수 있는 단계에 이르렀다. 이외에 Sony사에서 개발한 QRIO[2]나 Fujitsu사에서 개발한 HOAP[3-4]의 경우 크기는 비교적 작으나 동작상에서는 인간의 동작을 모방할 수 있는 단계에 이르렀다. 국내의 경우 대표적인 로봇이 KAIST의 HUBO가 대표적이라 하겠으며 현재 해외와 기술격차를 상당히 줄인 로봇 시스템이라 하겠다.

이러한 휴머노이드 로봇은 제어하는데 있어서 다양한 기술들이 요구된다. 이유인 즉, 휴머노이드 로봇이 가지고 있는 다관절 로봇으로써의 비선형성과 휴머노이드 로봇은 지면에 고정되어 있지 않아서 생기는 기본적인 불균형성에 의거한다. 이에 이러한 휴머노이드 로봇이 가지고 문제를 알아보고 이에 대한 지능기반의 제어기 개발에 대해 논의해보고자 한다.

2. 휴머노이드 로봇 제어에서 고려해야 할 사항

휴머노이드 로봇을 제어하기 위해서는 기구부 자체가 가지고 있는 불안정성을 제어하기 위한 방법과 관절이 가지고 있는 기계적, 전기적 비선형성을 제거하면서 원하는 움직임을 생성

해 낼 수 있도록 제안된 제어기로 분류할 수 있다.

2.1 구조적 불안정성

휴머노이드 로봇 시스템에서 가장 기초적이면서 가장 중요한 기술 중에 하나는 보행에 있다. 이는 휴머노이드 로봇이 가지는 기구부적 불안정성, 즉 로봇이 바닥에 고정되어 있지 않음으로써 생기는 불안정성을 해소하면서 보행의 안정성을 확보하는데 있다고 하겠다. 현재 이러한 보행 안정성을 해석하는 가장 보편적인 방법은 ZMP(Zero Moment Point)를 이용하는 것이라 하겠다. ZMP는 로봇의 각 질점에서의 모멘트를 계산하여 모멘트의 합이 '0'가 되는 지점으로써 ZMP가 발바닥 내에 존재한다면 로봇은 넘어지지 않을 것이라는 개념으로써 러시아의 Vukobratovic[5]가 제안한 방법이다. (1)은 ZMP의 수학적 정의이다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z) x_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + G_x) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)} \quad (1)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z) y_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + G_y) z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + G_z)}$$

(1)에서 $n, m_i, (x_i, y_i, z_i), (\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i)$ 는 각각 다리 관절의 개수, 각 다리 관절의 질량, 다리관절의 질량 중심의 위치, 각 다리 관절의 질량 중심에서의 선가속도를 의미한다.

그리고 앞에서 정의된 ZMP를 제어하기 위해서 많은 센서들을 이용하고 있으며, 대표적인 센서는 발목 관절에 설치하여 힘을 측정하는 6축력 센서와 발바닥에서 지면과의 반발력을 기초로 ZMP를 측정하기 위한 FSR(Force Sensing Register) 등의 힘 센서를 이용한 방법이라 하겠다. 힘 센서를 이용하게 될 경우 발바닥에서 측정된 ZMP는 (2)와 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (2)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

(2)에서 n 은 발바닥에 장착된 FSR센서의 개수를 나타내며, (x_i, y_i) 는 발바닥에 장착된 센서의 위치를 나타낸다. 그리고 F_i 는 각 센서에서 측정된 반발력을 나타낸다. 이렇게 발바닥에

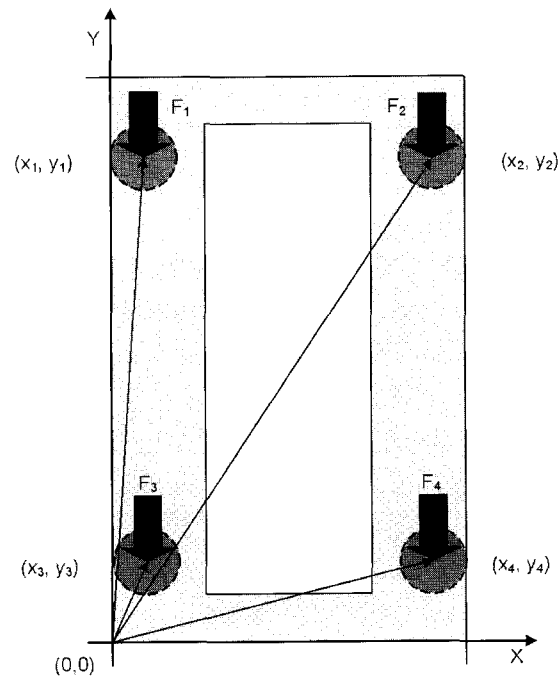


그림 1. 반발력 측정을 위해 장착된 FSR센서

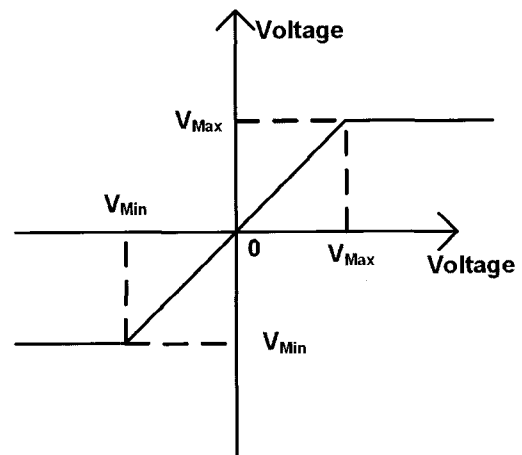


그림 2. 포화의 수학적 모델

FSR센서를 통해 ZMP를 측정할 수 있으며, 이를 기초로 로봇의 안정성을 검증할 수 있다.

2.2 기구적 불안정성

휴머노이드 로봇은 다리를 형성하는 데에만 12축을 시스템을 가지고 있는 다관절 시스템이라 하겠다. 이러한 다관절 시스템에서 제어를 수행하는 데에는 다양한 문제가 발생할 수 있다. 특히 휴머노이드 로봇을 제어함에 있어서 고려해야 할 요

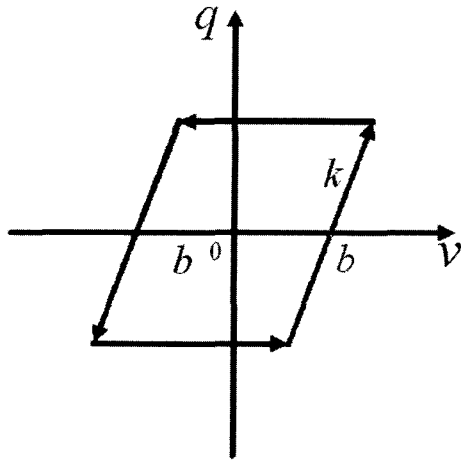


그림 3. 백래쉬의 수학적 모델

소 중에 하나는 로봇 관절에는 다양한 비선형성이 존재한다는 것이다. 대표적인 비선형성은 모터의 전압 한계에 의해 발생하는 포화(saturation)와 각 관절의 감속기에 의해 발생하는 백래쉬가 대표적이라 하겠다. 그림 2와 (3)은 포화의 수학적 모델을 나타낸다.

$$V = \begin{cases} V_{Max} & P \geq V_{Max} \\ V_{Min} & P \leq V_{Min} \\ P & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(3)에서 V_{Max} 와 V_{Min} 은 모터에 인가 가능한 최대 전압과 최소 전압을 의미한다. 포화 현상은 제어에 의한 결과가 일정 값 이상의 전압을 요구할 경우 그 전압을 추종하지 못하는 데에서 발생한다. 그림 3과 (4)는 백래쉬의 수학적 모델을 나타낸다.

$$\dot{q} = \begin{cases} \dot{v} & \text{if } \dot{v} > 0 \text{ and } q = k(v - b), \\ & \text{or } \dot{v} < 0 \text{ and } q = k(v + b), \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

그림 3과 (4)에서 q 는 출력 위치, v 는 입력 위치, k 와 b 는 각각 기어비와 백래쉬의 크기를 나타낸다. 일반적으로 백래쉬는 시스템 내에 존재하는 감속기의 기어치열 사이의 공간에 의해 발생하는데 대부분의 휴머노이드 로봇은 로봇의 구동에 있어 충분한 토크를 생성해 내기 위해서 감속기를 사용하고 있기 때문에 필연적으로 발생하는 비선형 요소이다. 이러한 다양한 비선형성은 모터의 토크 출력에 악영향을 미치며 리미트 사이클 발생으로 인해 기구부의 전체의 떨림에 의하여 보행 안정성에도 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 기구부적인 불안정성을 제

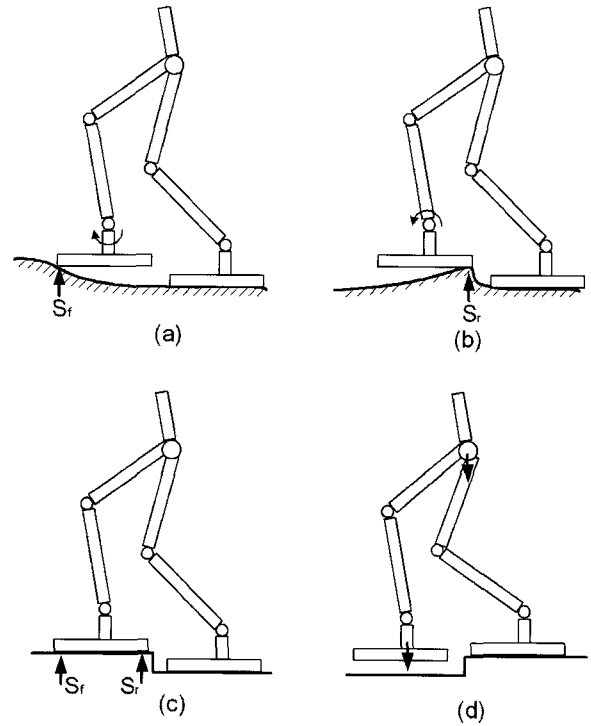


그림 4. 비평탄 지형의 예

거하기 위한 모션 제어 알고리즘이 필요하다.

3. 휴머노이드 로봇을 위한 제어기

휴머노이드 로봇은 기구적으로 복잡한 시스템이며 구조적으로 불안정성을 가지고 있으므로 안정적인 움직임을 수행하기 위해서는 먼저 안정적인 다리 모션 생성이 선행되어야 하며, 다른 한편으로는 관절에서 발생하는 다양한 비선형성을 제거하기 위한 비선형제어기가 구현되어야 한다. 그러나 휴머노이드 로봇 시스템은 시스템의 복잡성 때문에 실시간적으로 시스템 해석을 통한 안정성 확보는 쉽지 않은 것이 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 지능 제어기법이 요구된다.

3.1 보행 제어

휴머노이드 로봇은 각 관절이 상호 연결되어 있기 때문에 다관절 시스템을 수학적으로 해석하기에는 한계를 지니며 이러한 부분을 해석하는 데에는 크게 로봇 시스템을 간략화 하는 방법과 시스템의 안정성에 비추어 지능적으로 제어하는 기법[6]으로 나뉜다.

지능적으로 보행을 해석하기 위한 방법으로써 유전 알고리

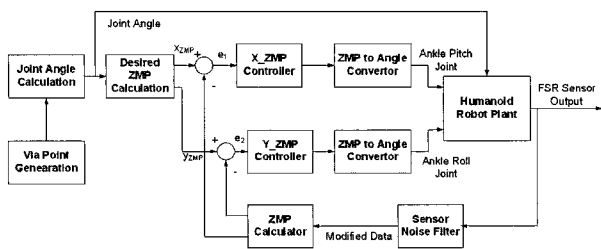


그림 5. ZMP 제어기

즘을 통한 궤적 최적화 기법[7]이 많이 논의되어 왔으며, 유전 알고리즘을 통한 최적 궤적 생성을 통해 동작상의 부드러움을 유도하면서 보행의 안정성 및 토크 감소의 효과를 가져올 수 있었다. 그리고 이러한 최적화된 궤적 생성을 기초로 퍼지 알고리즘이 도입되었으며 퍼지 알고리즘은 보행의 다양성을 가지고 왔다.

휴머노이드 로봇이 비평탄 지역에서 보행을 하게 될 경우 보행의 안정성을 확보하려는 시도가 현재 진행 중이다. 현재 대부분의 휴머노이드 로봇은 다리 궤적이 여러 가지 알고리즘을 통해 미리 궤적 계획이 생성되어 있는데 이러한 미리 정의된 움직임으로 비평탄 지형을 걷게 될 경우 그림 4와 같은 4가지 상황을 만나게 된다.

궤적계획을 통해 생성된 다리 궤적을 통해 비평탄 지형을 걷게 될 경우 유각이 지면에 닿는 형상에 따라 크게 4개로 나눌 수 있다. 이는 그림 4의 (a)처럼 발 앞쪽이 먼저 닿는 경우 (b)처럼 뒷면이 먼저 닿는 경우, (c)처럼 계단을 오르는 상황과 같이 다리가 궤적 계획을 통해 계획된 시점보다 일찍 지면에 닿을 경우와 (d)처럼 계획된 궤적을 모두 수행했을 때에도 다리가 지면에 닿지 않을 경우로 나뉘어 진다. 이러한 경우 각각의 경우에 대한 지면 반발력에는 차이가 생길 것이며 지면 반발력을 측정할 수 있는 FSR 센서가 발바닥에 붙어 있을 경우 로봇의 상황을 감지하고 이에 대한 대처가 가능해 진다. 이러한 경우에도 지능 알고리즘 시스템의 모호성과 더불어 임의의 비정규적인 상황에 대해서도 로봇을 안정적으로 구동시킬 수 있다. 그림 5는 FSR 센서를 통한 ZMP 제어기의 구조로써 보행의 안정성을 확보할 수 있도록 지능 제어 시스템을 구축하였다.

그림 5에서 경유점의 정보와 이를 통한 각 관절의 궤적은 이미 기존에 계산되어 있으며, 로봇이 평탄 지형을 보행할 경우 계산에 의해 생성된 desired ZMP와 FSR 센서를 통해 추정되는 ZMP는 유사할 것이다. 그러나 실제 보행은 비평탄 지형에서 이루어지기 때문에 로봇이 궤적 중간에서 ZMP의 변화가 발생할

것이고 이러한 변화는 ZMP제어기를 통해 발목의 관절을 제어함으로써 유각의 발바닥이 지면에 밀착될 수 있도록 할 수 있다. 만약 이러한 제어를 구축할 때, 시스템의 다관절에 의한 고차 방정식으로 시스템을 해석하게 되면, 연산시간이 오래 걸리며 로봇은 기구적인 한계와 균형점의 이탈로 인한 전복의 위험성을 가지게 된다. 따라서 휴머노이드 로봇이 향후 비평탄 지형에서 보행을 수행하기 위해서는 ZMP와 같은 안정성 제어는 반드시 이루어져야 하며, 이러한 때에 지능 제어는 가장 실용적으로 문제를 해결할 수 있는 알고리즘이 된다.

3.2 기구 시스템 제어

휴머노이드 로봇과 같은 다관절 시스템에서 가장 중요한 부분은 시스템 내에 존재하는 비선형성을 제거하면서 얼마나 궤적 추종을 잘 하느냐에 있다. 이는 로봇에 비선형성으로 인해 리미트 사이클이 발생할 경우, 시스템의 출력에 지대한 영향을 미치고 제어와 동특성이 상당히 안 좋아지기 때문이다. 이에 이러한 휴머노이드 로봇의 문제점을 해결하기 위해 많은 지능 기반의 제어기가 제안되었고, 이러한 제어기의 가장 기본적인 관건은 비선형성을 해결하면서 얼마나 향상된 궤적 추종성을 가지느냐는 것이다. 이는 다관절 시스템들이 기본적으로 궤적에 따른 추종제어를 하기 때문이다. 먼저 로봇 관절의 비선형성을 제거하기 위한 기법으로써 외란 관측기[8-9]등과 같은 시스템의 수학적 접근을 통해 시스템을 구축하는 방법과 지능 제어 시스템[10]을 통해 제어하는 기법으로 나눌 수 있다.

현재 외란 관측기의 경우 시스템이 수학적으로 비교적 정확한 모델링이 되어 있다고 할 때에는 안정적으로 구동된다. 하지만 다관절 시스템의 경우 수학적 모델이 고차 미분 방정식에 해당하여 시스템적으로 복잡할 뿐만 아니라, 하나의 관절로 국한되어 해석한다고 해도 하나의 관절과 인근의 다른 관절의 외력에 의해 수학적 접근이 어려운 문제가 있다.

지능 제어기의 경우 시스템의 수학적 접근이 필요하지 않으며 입출력 상관관계만으로 시스템을 정의하므로, 시스템의 모호성을 극복하기에 적합한 제어기이다. 특히 퍼지 제어기의 경우 다른 지능 제어기에 비해 빠른 시간 내에 결과를 도출할 수 있으므로 다른 지능 알고리즘에 비해 사용 빈도가 높다.

4. 결론

오늘날 지능로봇의 관심 증대를 통한 다양한 기술의 발전에서 사람들이 특히 관심을 가지고 있는 분야 중에 하나는 휴머노

이드 로봇이다. 하지만 휴머노이드 로봇은 시스템의 복잡성에 기인하여 기술적으로 해결해야 할 많은 상황들이 존재한다. 이러한 휴머노이드 로봇의 문제에 대해 지능 제어 알고리즘은 보다 손쉬운 해결책을 제시하고 있다.

휴머노이드 로봇이 인간과 유사한 작업을 수행하기 위해서는 먼저 인간과 같은 환경에서 이동할 수 있도록 제어가 구축되어야 하고 이를 위해 ZMP제어가 선행되어야 하며 각 관절의 비선형성을 제어하기 위한 궤적 추종성을 고려한 관절 제어가 필요로 하다. 이때 시스템의 복잡성을 해결하기 위한 방안으로써 지능 제어 시스템을 구축함으로써 보다 안정적으로 제어를 수행할 수 있다.

향후 보다 시스템의 상황에 빠른 대처를 하기 위한 시스템들이 요구될 것이다. 그리고 그에 대응하여 보다 빠르고 보다 향상된 성능을 가진 프로세서가 지속적으로 개발될 것이다. 이러한 상황을 통해 현재 일부 지능 알고리즘이 가지고 있는 연산 속도 문제는 해결되리라 기대된다. 이를 통해 보다 다양한 지능 알고리즘이 제어 시스템에 적용되길 기대한다.

참 고 문 헌

[1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration," *IEEE/RSJ International Conference*, vol. 3, pp. 2478-2483, 2002.

[2] Fujita, M., Kuroki, Y., Ishida, T., and Doi, T.T., "Autonomous behavior control architecture of entertainment humanoid robot SDR-4X," *Intelligent Robots and Systems(IROS2003)*, vol. 1, pp. 960 - 967, 2003.

[3] Riesenman, M.J., "Robots stand on own two feet," *Spectrum*

IEEE, vol. 39, pp. 24-25, Aug. 2002.

[4] Kurazume, R., Hasegawa, T. and Yoneda, K., "The sway compensation trajectory for a biped robot," *ICRA '03*, vol. 1, pp. 925-931, 2003.

[5] Vukobratovic, M. Juricic, D., "Contribution to the Synthesis of Biped Gait," *IEEE Trans. On Bio-Medical Engineering*, vol. BME-16, pp. 1-6, 1969.

[6] 공정식, 김진걸, 이보희 "휴머노이드 로봇의 자세 제어에 관한 연구", *제어 · 자동화 · 시스템 공학회지*, vol. 11, no. 1, 2005.

[7] 공정식, 노경곤, 김진걸, "이족보행로봇의 최적 걸음새에 관한 연구", *한국정밀공학회*, vol. 21, no. 7, pp.115-123, 2004.

[8] J.-S. Kong, B.-H. Lee, and J.-G. Kim, "Design of a Switching PID Controller Using Advanced Genetic Algorithm for a Nonlinear System," *LNAI 3801*, pp. 176-183, 2005.

[9] P. Yang, X. Kong, Z.-J. Liu, H. Chen, Q. Zhau, and J. Liu, "Hybrid Joint Controller For Humanoid Robot," *Int. Conf. on Machine Learning Cybernetics*, pp. 4188-4192, 2005.

[10] C. W. Tao, "Fuzzy Control for Linear Plants with Uncertain Output Backlashes," *IEEE Trans. On systems, Man and Cybernetics*, vol. 32, no. 3, pp. 373-380, 2002.

저 자 약 력



공 정 식

- 1998년 인하대학교 자동화공학과(공학사).
- 2006년 인하대학교 대학원 자동화공학과(공학 박사).
- 현재 대덕대학 마이크로 로봇과 전임강사.
- 관심분야 : 휴머노이드 로봇 제어, 비선형 제어, 실시간 제어, 서비스 로봇 제어, 의용공학.