

신경망을 이용한 이족 보행로봇의 동작 패턴 생성

황상현, 박귀태
고려대학교 전자, 전기컴퓨터 공학

Motion Pattern Generation of Biped Walking Robot Using Neural Network

Sang-Hyun Hwang, Gwi-Tae Park

Department of Electrical Engineering, Korea University (E-mail:tomcroze@korea.ac.kr, gtpark@korea.ac.kr)

Abstract - 인간형 로봇(Humanoid)은 인간과 유사한 구조를 갖고 있는 로봇으로, 이족 보행이 가능하고 양 손이 자유롭게 때문에 인간 생활 환경에 적용이 가능하다. 인간형 로봇은 이족 보행 로봇의 형태를 지니며 보통 20 자유도(DOF : Degree of freedom) 이상의 높은 자유도와 직렬형 링크 구조로 인해 로봇의 안정도를 해석하고 움직임을 제어하기가 어렵다. 이러한 이유로 이족 보행 로봇 동작의 안정도를 증가시키기 위해 로봇의 최적화된 동작 패턴 생성과 자세 제어 등이 연구 되고 있다. 본 논문에서는 범용 근사자의 특징을 갖는 신경망을 이용하여 이족 보행 로봇의 동작 패턴 생성 방법에 대하여 제안하였다. 실제로 계획된 동작을 토대로 6가지의 동작 패턴을 생성하였으며 컴퓨터 모의실험과 상용 이족 보행 로봇을 이용하여 생성된 동작 패턴의 안정도를 확인해보고 제안된 방법에 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최초의 로봇은 고대 그리스 로마 시대부터 사람의 모양을 본떠 생명이 있는 것처럼 움직이도록 만든 자동인형(automata)으로부터 시작한다. 그 후 1920년 체코슬로바키아의 작가 K.차페크가 발표한 희곡 <로봇의 인조인간 : Rossum's Universal Robots>에 체코슬로바키아어로 강제적인 노동, 고되고 지루한 일, 노예 상태라는 뜻을 갖는 robot라라는 단어를 사용하면서부터 로봇이라는 이름을 얻게 되었고, 기계와 전자 공학의 발달과 함께 현재 인간을 대신하여 의료에서 전쟁에 이르기까지 다양한 분야에서 많은 로봇들이 활약하고 있다.

그 중에서도 본 논문의 주제인 인간형 로봇(humanoid)은 인간과 유사한 구조를 갖고 두 손이 자유로우며 이족 보행(biped walking)이 가능하므로 인간 생활 환경에 적용이 가능하다. 예를 들어 현관문을 열고 나가 애완견을 산책시키고 돌아오기, 1층에 있는 물건을 계단을 올라 2층에 가져다 놓는 등의 작업이 가능해 질 것이다. 그러나 이족 보행 로봇은 보통 20 자유도(DOF : Degree of freedom) 이상의 높은 자유도와 직렬형 링크 구조로 인해 안정도를 해석하고 제어하기가 어렵다. 뿐만 아니라 그에 관한 기술 발달이 충분치 못하고 시장성이 부족하여 현재 인간형 이족 보행 로봇의 실용성과 경제성에 대한 회의적인 시각이 다소 존재하고 있다.

초창기의 단순 보행 연구를 바탕으로 현재는 인간이 할 수 있는 다양한 동작의 연구가 시도 되고 있다. [1-5] 과거 단순한 보행의 경우는 정교한 동작 패턴 없이 자세 제어 만으로 안정적인 동작이 가능하였다. 그러나 주로 하체의 움직임만을 사용하는 단순 보행과는 달리 요즘 연구되고 있는 물건을 들고 계단을 오르내리고 축구를 하며 춤을 추는 동작들은 하체와 함께 상체의 움직임까지 필요한 전신 동작(whole body motion)들이 대부분이다. 이러한 전신 동작을 자세 제어만으로 수행 한다면 전신의 움직임을 보살필 수 있는 더욱 고성능의 자세 제어 알고리즘이 필요하게 되며 비록 자세 제어만으로 안정한 동작을 유지하더라도 사람의 움직임과는 상이한 어색한 동작이 나올 수 있다. 만약 특정 동작에 대하여 사전에 정교하고 부드러운 동작 패턴을 생성 할 수 있다면 자세 제어의 부담을 덜어 주게 되어 로봇은 더욱 부드럽고 안정한 동작을 할 수 있을 것이다.

이를 위해 수치적 방법(numerical method)와 근사적 방법(approximate method)의 두 가지 방법이 주로 사용되고 있다. [1,6-7] 수치적 방법이란 컴퓨터의 반복 연산을 이용하여 원하는 동작 패턴과의 오차가 어느 특정 값 이하로 떨어질 때까지 계산해내는 방법이고 근사적 방법은 로봇의 상체를 간략화하여 근사적인 동작 패턴을 얻어 내는 방법이다. 그러나 수치적 방법은 컴퓨터의 성능에 좌우 되므로 계산 시간이 많이 소모되며 근사적 방법은 특정한 로봇 구조에만 사용될 수 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 범용 근사자(universal approximator)의 성질을 갖고 있는 인공 신경망을 이용하여 보다 간편하고 정확하게 동작 패턴을 생성하는 방법을 제안하고 한다. 이를 위해 두 가지 하체의 보행 동작과 두 가지 상체의 동작을 미리 설정하고 각각 두 가지의 상, 하체의 동작을 이용한 총 네 가지의 전신 동작에 대하여 신경망을 이용하여 이에 대한 동작 패턴을 생성한 다음, 컴퓨터 시뮬레이션과 실제 상용 로봇에 적용하여 결과를 비교해보고 제안된 방법의 타당성 및 효율성을 검증해 보고자 한다.

2. 본 론

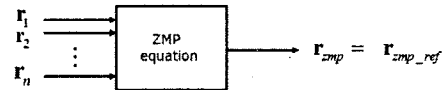
2.1 동작 패턴 생성 원리

동작 패턴이란 동작을 할 수 있는 패턴 즉 로봇을 고성능하는 팔과 다리와

각 부분들의 연속적인 움직임의 형태를 말하며, 안정한 동작 패턴이란 로봇이 정해진 동작을 수행하는 도중 로봇이 넘어지거나 쓰러지지 않는 동작 패턴을 말한다. 로봇이 직립한 체로 안정된 상태를 유지하기 위해서는 아래의 균형점 방정식(ZMP equation)을 통해 구한 ZMP가 발의 내부 영역에 존재해야 한다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (r_{ix}(\ddot{r}_{ix} + G_x) - r_{ix}(\ddot{r}_{ix}))}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{r}_{ix} + G_x)} \quad y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (r_{iy}(\ddot{r}_{iy} + G_y) - r_{iy}(\ddot{r}_{iy}))}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{r}_{iy} + G_y)}$$

균형점 방정식이란 로봇의 각 부분의 질량과 그 질량의 위치를 알고 있을 때 균형점을 찾아 낼 수 있는 방정식이다. 따라서 어떤 보행 패턴을 균형점 방정식에 입력하여 그 때 출력되는 균형점의 위치와 미리 설정된 안정한 균형점(이하 기준 균형점 : Reference ZMP)의 위치가 같으면 그 동작 패턴은 안정한 동작 패턴이 된다.

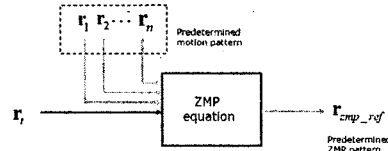


<그림 1> 다변수 형태의 균형점 방정식

따라서 안정한 동작 패턴의 생성이란 기준 균형점을 갖는 동작 패턴을 찾아 주는 것을 말하며 동작 패턴 생성 문제는 기준 균형점(reference ZMP)을 출력으로 하는 균형점 방정식의 해를 찾아 내는 것으로 귀결된다.

$$f_{zmp}(r_1, r_2, \dots, r_n) = r_{zmp_ref}$$

위의 식은 균형점 방정식을 입력과 출력 변수 형태로 간략하게 표시한 식이다. 로봇이 n 개의 부분으로 이루어져 있다고 가정할 때 균형점 방정식은 n+1 개의 변수를 갖는 다변수 방정식이 된다. 다변수 방정식 풀이의 기본은 식의 개수와 변수의 개수를 같도록 하는 것이다. 그러나 균형점 방정식은 하나밖에 없기 때문에 그림 2 및 식 (1)와 같이 하나의 변수만을 제외한 나머지 변수를 특정한 값으로 미리 정해두어 변수를 줄이는 방법을 사용한다. 이렇게 되면 방정식의 입력과 출력이 하나가 되는데 균형점 방정식의 출력에 해당하는 기준 균형점(reference ZMP)값 역시 미리 설정 하였으므로 균형점 방정식 입력에 해당하는 변수에 대해서 이 균형점 방정식의 해를 구하는 것이 곧 동작 패턴을 생성하는 것이 된다.



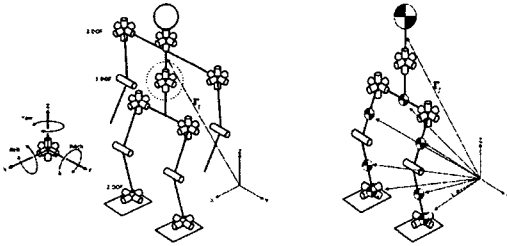
<그림 2> 변수를 제거한 균형점 방정식

2.2 동작 패턴 생성 과정

[과정 1]
균형점 방정식의 변수를 하나로 줄여 나가는 과정에서 남겨질 변수와 제거할 변수를 결정한다. 그림에 점선으로 표시한 것과 같이 일반적으로 허리의 관절을 균형점 방정식의 변수로 사용하는 것이 여러모로 합리적이고 편리하다. 균형점 방정식은 실제 공간의 위치 좌표를 사용하기 때문에 이 허리 관절을 직접 사용하기 보다는 이 관절에 연결되어 움직이는 몸통의 위치를 변수로 사용한다. 이 몸통의 공간상의 위치를 r , 라고 하고 그림에 표시하였다.

[과정 2]
이제 다음으로 나머지 부분의 움직임을 미리 정의해 주어 변수를 줄여 주

어야 한다. 균형점 방정식의 변수로 선택한 \mathbf{r}_i 를 제외한 나머지 부분들의 움직임을 미리 정의해 주어야 한다. 아래 그림과 같이 상체를 간략화 하고 하체의 움직임만을 정의 하도록 한다.



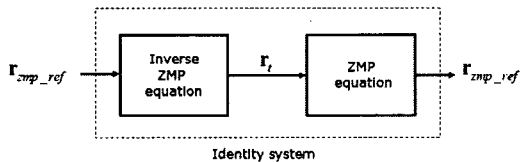
〈그림 3〉 균형점 방정식의 변수 선택 및 상체의 간략화

몸통을 제외한 나머지 부분의 무게 중심 움직임을 정의하기 위해서는 그림 3과 같이 적어도 7개의 부분의 무게 중심에 대한 위치를 설정해야 한다. 그러나 이 7개의 무게중심의 위치를 모두 정의 할 필요 없이 로봇 허리발의 움직임을 제적만 정의 해주면 된다. 인간형 로봇은 '엉덩이-허벅지-종아리-발'의 직렬 링크의 구조를 갖고 있어서 양 끝 단인 엉덩이와 발의 위치만을 정의 해주면 나머지 부분의 공간좌표의 위치와 각 조인트의 값들을 기구학 및 역기구학을 이용하여 구해낼 수 있기 때문이다. 이는 상체가 움직이는 경우에도 마찬가지이다.

2.3 균형점 방정식의 신경망 적용

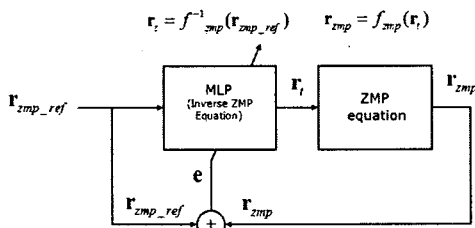
균형점 방정식을 푼다는 것은 이 시스템이 안정된 균형점의 제적인 \mathbf{r}_{zmp_ref} 를 출력하도록 하는 \mathbf{r}_i 가 무엇인지 알아내는 것과 일치 한다.

이 시스템은 입력 \mathbf{r}_i 과 입력의 도함수 $\dot{\mathbf{r}}_i$ 에 영향을 받는 비선형 시스템으로 \mathbf{r}_{zmp_ref} 을 출력하는 \mathbf{r}_i 를 역으로 구하기가 어렵다. 다음 그림처럼 균형점 방정식 시스템 앞에 새로운 시스템이 직렬로 연결된 새로운 시스템을 가정하자.



〈그림 4〉 균형점 방정식의 새로운 시스템

만약 그 새로운 시스템이 균형점 방정식과 역함수 관계인 시스템이라고 가정하면 전체 시스템은 입력과 출력이 항상 같은 항등 시스템(identity system)이 될 것이다. 즉 우리가 원하는 출력이 있을 때 그 출력과 같은 입력을 시스템에 넣어주면 되는 것이다. 이때 이 균형점 방정식과 역함수 관계를 갖고 있는 시스템의 출력이 우리가 찾고자 했던 균형점 방정식의 기준 균형점을 만족하는 입력이 곧 균형점 방정식의 해가 된다. 그림 5 처럼 범용 근사자의 성질을 갖는 신경망을 이용하여 균형점 시스템과 역관계를 갖는 새로운 시스템을 모델링 할 수 있다.



〈그림 5〉 균형점 방정식의 역함수의 모델링

3. 결 론

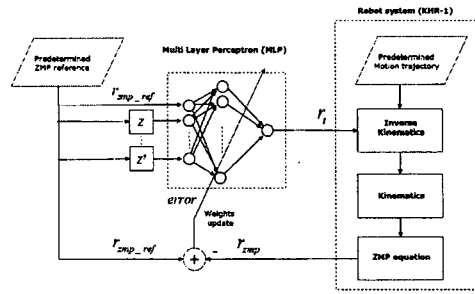
3.1 실험로봇의 재현 및 특징

본 연구에서는 일본의 서보(servo) 모터 전문 회사 곤도 과학 주식 회사에서 개발한 상용 로봇 KHR-1을 이용하여 실제 실험에 사용하였다. [8]

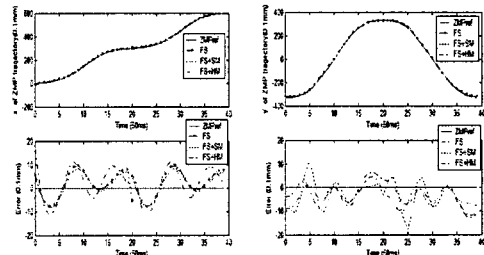
3.2 동작 패턴 설정

본 절에서는 간략히 소개된 균형점 방정식의 해를 구하기 위한 신경망의 구조를 바탕으로 실제적으로 이를 이용하여 동작 패턴을 생성하는 과정에 대하여 설명한다. 그림 7은 균형점 방정식의 해를 구하기 위한 실제적인 신

경망의 구조를 및 이를 통해 구한 동작 패턴을 적용하여 측정된 ZMP 제어를 도시하였다.



〈그림 7〉 신경망의 구조



〈그림 8〉 x 방향 및 y 방향 균형점의 제적

3.3 결과 및 평가

본 논문에서는 신경망을 이용하여 이족 보행 로봇의 동작 패턴을 만들 때 필수적으로 사용되는 균형점 방정식의 해를 구해내는 방법을 제안하였으며 제안된 방법을 이용하여 6가지로 계획된 동작 패턴에 대하여 균형점 방정식의 해를 구하였다. 또한 컴퓨터를 이용하여 모의 실험과 실제 이족 보행 로봇에 적용하여 실험하여 타당성을 검증하였다. 그러나 신경망 학습의 특징으로 학습 시 전역 최솟값(local minima)에 빠지는 문제점이 자주 발견되었으며 이로 인해 많은 문제가 발생하였다. 향후 신경망의 지역 최솟화 문제 제거 및 학습 속도 향상을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출원하고 한국 건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 첨단융합기술개발사업 [과제번호:06 첨단융합 D01]의 지원으로 이루어졌습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jin'ichi Yamaguchi, Eiji Soga, Sadatoshi Inoue and Atsuo Takanishi, "Development of a Bipedal Humanoid Robot-Control Method of Whole Body Cooperative Biped Walking-", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.368-374, May, 1999
- [2] Koji Terada, Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, "Analysis and control of whole body Dynamic Humanoid Motion-Towards Experiments on a Rall-and-Rise Motion", Proceedings of the 2003 IEEE/RJS Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1382-1387, October, 2003
- [3] Shichiro Nakaoka, Atsushi Makazawa Kazuhito Yoko, "Generating Whole body Motions for a biped Humanoid Robot from Captured Human Dances", Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3905-3910, September, 2003
- [4] Koichi Nishiwaki, Mamoru Kuga, Satoshi Kagami, Masayuki Inaba, Hirochika Inoue, "Whole-body cooperative Balanced Motion Generation for Reaching", IEEE Humanoid 2004, pp.672-689, 2004
- [5] T.Sugihara, Y.Nakamura, "Whole body Cooperative Balancing of Humanoid Robot using COG Jacobian", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2575-2580, October 2002
- [6] Yu Ogura, Teruo Kataoka, Hun-ok Lim, Atsuo Takanishi, "A Novel Method of Biped Walking Pattern Generation with Predefined Knee Joint Motion", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2831-2836, October, 2004
- [7] Hun-ok Lim, Yousuke Yamamoto and Atsuo Takanishi, "Control to Realize Human-like Walking of a Biped Humanoid Robot", 2000 IEEE, pp.3271-3276, 2000
- [8] KHR-1 hardware Manual for English, "http://www.kondo-robot.com/html/Info_En.html", Kondo Kagaku co., LTD