

이족보행 로봇의 연구개발동향

- 자율보행동작을 중심으로 한 연구동향에 대하여 -

발췌인 _ 박성환 _ 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 _ swpark@kimm.re.kr

1. 서론

수많은 동물, 생물이 4각 보행을 하는 가운데 이족 보행은 인간의 특징적인 보행동작이라 불리운다. 하지만 새도 두 다리로 보행이 가능하며, 일부의 공룡도 그러한 것으로 알려져 있기 때문에 인간만이 가지는 고도의 특수기능이라 말할 수는 없다. 그러나 로봇에게 이족보행동작을 실현하기 위해서는 상당히 고도의 동작제어수법이 필요하다. 본고에서는 이족보행 로봇의

자율보행에 관한 최근 연구개발 현황 및 동향에 대하여 소개한다.

이족보행 로봇의 연구개발 역사는 오래되어, 1960년대 후반에 연구가 착수되어, 1970년대 초두에는 자율보행이 실현되고 있다¹⁾. 그 이후 몇 군데의 대학 연구실에서 이족보행 로봇 연구가 진행되어 왔다가, 1996년 12월에 공표된 휴마노이드 P2의 등장²⁾이, 로봇 연구자로서는 처음으로 세계를 놀라게 했다고 할 수

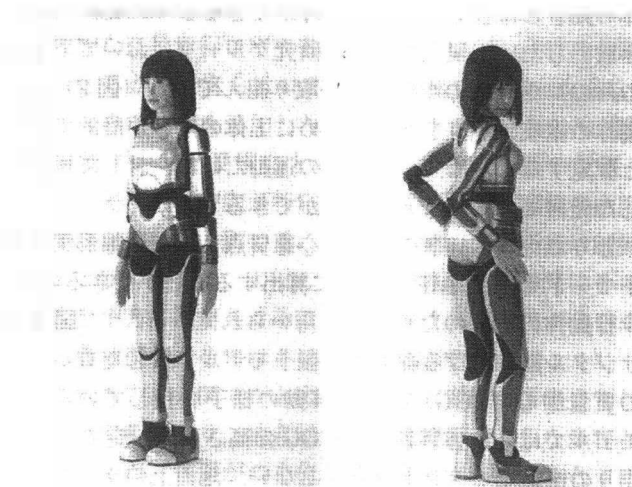


그림 1 사이버네틱 휴만 HRP-4C (독립행정법인 산업기술총합연구소)

있다³⁾. 그때까지는 하반신만을 구성한 이족로봇에 의한 보행기능을 중심으로 한 연구가 진행되어 왔지만, 상반신 및 두부를 갖춘 휴마노이드의 전신동작 영상이 세계로 퍼져나가 많은 사람들에게 알려지게 되었다⁴⁾.

이후 휴마노이드 연구개발은 국내외에서 급속히 진전되어, ASIMO, Johnnie, HRP2, 콘체로(2족보행형), Hubo2 등으로 발표, 공개되고 있다⁵⁻⁹⁾. 평탄한 지상에서는 조깅 정도의 달리기도 하고, 용기형태의 손으로 세탁물을 접기도 한다¹⁰⁾. 게다가 최신의 HRP-4C에서는 인간형태(여성)의 로봇서츠를 입은 듯한 외관도 있고(그림 1), 인간에 가까운 보행, 동작 및 음성인식 등을 가지는 인간과의 인터랙션을 달성하고 있다¹¹⁾.

이러한 고도의 연구수준에 이르러서는 이제 모든 것이 연구되어진 것 같은 인상을 받을지도 모르겠으나 휴마노이드 기술적 범주에 있어 보행동작제어, 핸들링, 환경인식, 인간과의 인터랙션 등 여러 요소에 있어 추구해야 할 과제가 많이 남아 있다. 그 중에서도 본고에서는 보행동작에 초점을 두고 자율보행동작에 관하여 최근 연구동향을 기술한다.

2. 보행동작의 안정화 제어

이족보행은 한쪽 다리를 들어 올려 전방에 착지시키는 동작을 좌우다리로 반복하여 나아가는 것으로 이는 간단한 장난감으로 실현 가능하다. 만일 사전에 중심이동 경로가 정해지면 특정의 동작제어 없이 전도되지 않은 채로 이족보행을 지속할 수 있다. 그러나 임의의 보행동작이 지령되어지는 이족보행 로봇에서는 중심궤도의 제어가 필요불가피하다.

자세나 동작을 능동적으로 제어하는 이족보행 로봇에서는 중심궤도나 다리의 경로, 착지시의 충격력 등에 의한 불안정요인을 고려해 가면서 동작제어를 해나가야 한다. 이하에서는 이족보행 로봇의 기본적인 안정화 제어와 이를 응용한 고도의 동작제어 기법을 소개한다.

2.1 ZMP 규범

이족보행에서는 전도되지 않는 동작의 생성을 제 1차적으로 구하여야 한다. 그 기본이 되는 것이 ZMP (Zero Moment Point) 규범으로, 많은 이족보행 로봇에 있어서 ZMP를 참조한 동작생성법을 채용되고 있다. ZMP라는 것은 착지다리의 접지면에 분포하여 가해지는 지면으로 부터의 반력을 접지면내 1점에 작용하는 힘과 등가시키는 경우의 작용점을 말하며, 접지면 압력중심점과 같은 의미이다¹²⁾. ZMP는 착지다리의 전체 접지면을 포함하는 다각형영역(支持다각형)의 내측 혹은 경계상에 반드시 존재한다. ZMP의 위치는 전체중심의 동작이나 중심주위의 모멘트 등에 의해 변화한다. 로봇이 전도되지 않기 위해서는 중심에 대한 모멘트를 억제하고, ZMP를 지지다각형의 경계로부터 멀리 두는 형태로 전체중심을 이동시켜야만 한다.

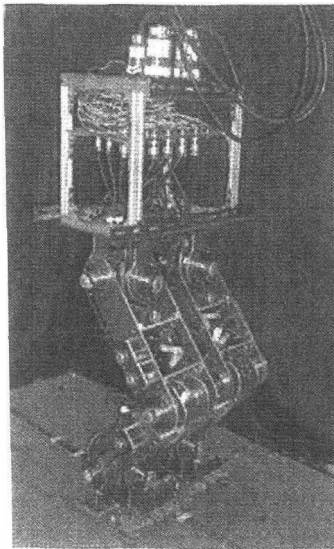
안정적인 이족보행 관점에서는 전체중심의 움직임 을 고려한 상태에서 양다리의 동작제어를 실시하여야 한다. 휴마노이드처럼 상반신을 갖는 로봇에서는 양팔이나 머리를 사용하여 무엇인가 작업을 하는 경우를 상정하여야 하므로, 상체의 움직임과는 독립된 보행동작이 가능하도록 동작제어시스템을 설계하여야 한다. 현재에도 많은 연구 그룹에 있어서는 하반신만의 로봇의 보행제어를 실시하고 있다. (그림 2 참조) 보행 동작생성에 초점을 두기 위해서는 상체의 움직임이 없는 것으로 가정하고, 전체중심의 운동에만 주목한 단순화된 기하학적 모델을 생각할 수 있다¹³⁾.

즉, 로봇의 전체중심을 질점으로 보는 선형도립진자(線形倒立振子) 모드에서는 ZMP를 간단히 산출하는 것이 가능하므로 이 방법이 보행동작 생성을 위해 널리 채용되고 있다^{14) 15)}. 그림 3은 선형도립진자 모드로 표시한 로봇의 질량중심(COG)의 전방 이동 모습을 나타내고 있다. 본 모델에서는 전방이동시 COG의 높이 z 는 일정하고, COG 주위의 관성모멘트는 고려하지 않는다. 지면상의 지지다각형이 충분히 넓은 경우, 예를 들어 착지다리의 족평이 충분히 큰 경우에는

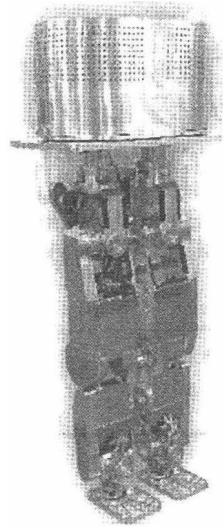
COG의 가속도가 없다면 ZMP는 COG의 연직하방의 지지다각형내 투영될 것이고, COG가 가속도를 가지고 이동한다면 ZMP의 위치는 다음식과 같이 영향을 받게 된다.

$$x_{zmp} = x - \frac{z}{g} \ddot{x} \quad (1)$$

(1) 식에서 얻어진 ZMP의 위치가 지지다각형의 바깥에 있는 경우에는 COG에 관한 모멘트가 발생하여 전도되기 때문에 선형도립진자 모델로부터 이탈하는 것이 된다. 즉, ZMP의 x_{zmp} 위치가 지지다각형 내측에 위치하도록 COG의 위치 x 를 조작하든지, 가속도 \ddot{x} 를 조작하여 보행동작의 안정화를 도모하여야 한다.



(a) 慶應義塾대학 大西 연구실



(b) 요코하마국립대학 河村 연구실

그림 2 대학에서 개발되어진 이족보행로봇

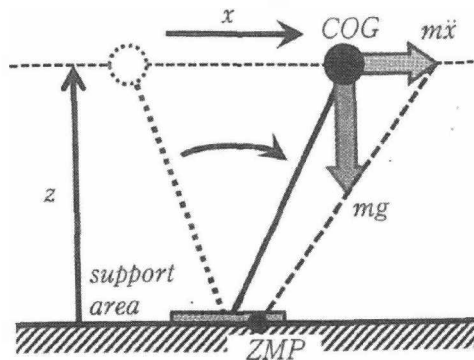


그림 3 선형도립진자(線型倒立振子) 모드

2.2 ZMP 외란 읍서버

선형화 도립진자모델의 ZMP 방정식 (1)에 기초하여 안전화 제어를 하는 경우에는 COG의 위치 X 혹은 가속도 \ddot{X} 를 조작한다. 이를 위치보상제어 혹은 가속도보상제어라 부를 수 있다⁶⁾. 위치보상제어에 있어서 COG의 위치 X 를 조작한다면 그 경우 가속도의 발생을 고려하지 않을 수 없고 이에 따라 다소 늦은 응답이 구해지게 된다⁷⁾. 한편, 가속도보상제어에 있어서는 COG의 가속도 \ddot{X} 를 조작하므로 빠른 응답이 기대되긴 하지만 COG의 위치가 제약조건으로 된다는 것을 유념하여야만 한다.

佐藤 등은 제어계의 특성을 저주파수대역과 고주파수대역으로 분리하여 저주파대역 측에서는 COG의 위치에 대한 위치보상제어를 적용하고, 고주파대역 측에서는 가속도보상제어를 적용하는 수법 (ZMP 외란 읍서버)을 개발하였다⁶⁾. ZMP 외란 읍서버는 위치보상과 가속도보상을 각각 독립하여 수행하고 목표 ZMP 궤도와와의 오차를 보정한다. 2 자유도 제어계로 구성되므로 별개의 제어측과 병행하여 사용 가능한 점이 특징이다.

2.3 가상지점에 기초한 궤도생성법

辻 등이 개발한 ZMP 참조궤도생성법은 보행속도의 가감속을 용이하게 하는 궤도생성법이다⁸⁾⁹⁾. 이 수법 또한 선형화도립진자 모드에 기초하고 있지만 도립진자의 지지점 위치를 가변시키는 점에서 특징이 있다. 통상 지상의 한 점에 정의되는 지지점을 지중이나 지상의 가상변위에 정의함으로써 요철이 있는 부정지(不整地)에 대처할 수 있다. 또한 중심보다도 위쪽으로 가상지지점을 정의하는 것도 가능하다. 이 방법에 의해 ZMP 궤도가 상정한 안정영역을 일탈한 경우에도 실시간으로 운동궤도를 재계획하는 것이 가능하다.

한편, 지지점이 아닌 지면을 가상적으로 변위시키는 기법도 고안되어 있다¹⁰⁾. 가상평면상에 정의되어진 ZMP

를 도입하는 것으로 COG의 상하변동을 고려하고, 이에 의해 부정지(不整地) 있어서의 COG의 상하 움직임에 대응한 보행이 가능하게 된다.

3. 센서의 새로운 활용법

일반적으로 이족보행 로봇의 안정적인 동작제어에서는 가속도 선세 및 각속도 정보를 취득하기 위한 자이로센서가 널리 사용되어진다¹¹⁾. 그 밖에도 외계정보 취득을 위한 힘 센서 및 초음파센서, CCD카메라를 앞세운 화상센서 등도 이용되어진다. 가속도 센서 등을 활용하게 되면 본체의 변위 및 모멘트를 계측할 수 있고, ZMP를 구하기 위해서는 다리선단부의 접지면에 장착한 힘 센서에 의해 상반력(床反力)을 직접 계측하는 것도 가능하다.

일반적으로 로봇에 사용되는 화상센서는 대상물의 위치 및 자세정보를 취득하기 위한 물체인식에 활용되는 경우가 많다²²⁾. 화상센서를 활용한 보행동작 생성법으로, 淺野 등은 비주얼 보행제어를 개발하였다²³⁾. 두부에 갖추어진 스트레오카메라를 이용하여 대상물을 인식하고 거리 및 대상물 방향에 대응한 보행추종 동작을 생성하고 있다.

小田 등은 허리부에 연직하방으로 장착된 레이저거리계를 사용하여 바닥면과의 거리를 계측하고 상체의 변위를 구하며, 그 정보를 본체의 안정제어에 활용하고 있다²⁴⁾²⁵⁾. 또한 이와는 별개로 小田 등은 CCD카메라를 이용하여 환경인식에 바탕하여, 외부환경에 대한 본체의 기울기각을 구함으로써 본체 교란을 억제하는 보행동작제어도 달성하고 있다²⁶⁾.

4. 기구의 개량

4.1 엑추에이터의 개발

보행동작은 중력에 거슬러 다리를 들어 올리는 것이므로 가볍고 튼튼한 다리구조를 가질 필요가 있다.

관절부를 구동하기 위한 액추에이터 또한 소형경량으로 고출력일 필요가 있다.

액추에이터를 관절부에 직접 취부하는 것이 아니라 동체부에 액추에이터를 집약하는 한편, 무릎이나 발머리에 와이어 구동을 채용하여 다리의 경량화를 실현하는 연구도 있다²⁷⁾. 그러나 전체 중량의 경량화 관점에서는 액추에이터 자체를 소형경량화 혹은 고출력화하고 싶다. 아직 보통 사용되어지는 모터가 아니라 고출력을 얻을 수 있는 공기압을 이용하는 것도 이전부터 생각되어지고 있다¹⁾. 그러나 압축 기체의 동적 특성은 복잡하고 정밀한 제어가 곤란하다는 과제 있다²⁸⁾. 공기압 액추에이터의 보행 로봇에의 적용으로서서는 수동보행로봇에 도입한 사례가 있다²⁹⁾³⁰⁾.

浦田 등은 고출력을 얻기 위해 brushless DC 서브모터를 개발하였다³¹⁾. 액내에 의한 모터의 강제냉각을 도입하는 것으로 고출력시 발생하는 발열을 흡수하고 권선의 소손을 억제하였다. 이에 따라 순간고출력이 아닌 연속고출력 운전이 가능하다.

鈴木 등은, 고정자와 회전자가 이중구조로 된 액추에이터를 개발하였다³²⁾³³⁾. (그림 4) 이 액추에이터는 회전자의 회전에 의해 출력축이 스피스트 방향으로 병진 이동한다. 외전상 이 출력축의 동작은 리니어 모터와 같으나 리니어 모터에 비해 출력축의 발생력이 강하고, 체적이나 중량당 발생력을 고려할 경우 이족보행 로봇의 구동원으로서 유용한 성능을 갖추고 있다.

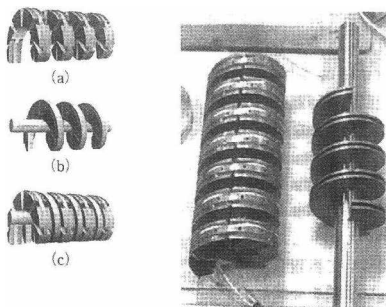


그림 4 Spiral Motor (오코하미국립대학 藤本연구실)

4.2 다리구조의 연구

일반적으로 이족보행 로봇에서는 허리, 무릎, 발목 3개의 관절이 갖추어지지만 필자 등은 로봇의 다리구조 자체를 개조하여 거기에 1 관절을 추가하여 용장각 구조를 도입하였다³⁴⁾. (그림 5) 운동학적으로 용장각 구조를 갖고 있기 때문에 허리의 위치, 방향, 발의 위치 방향이 정해지더라도 다리자세가 용장자유도를 갖는다. 이로 인해 다리의 중심위치나 이동속도를 임의로 제어하는 것이 가능하다. 따라서 올린 다리를 착지하는 순간에 그 다리의 중심을 하방으로 가속시키는 경우 보기보다는 관성이 작게 되고 착지충격력이 거의 0 이 될 수가 있다.

이 걸음걸이를 인간에 비유하면 보통의 발끝으로 서고 걷는 듯 한 자세가 나온다. 실제 인간이 발끝으로 지면을 밟는 경우 발뒤꿈치로 걷는 듯 한 충격력이 발생하면 곤란하다. 이것은 용장구조에 있어서 관절부의 미소한 변위에 의해 다리중심이 착지시에는 하방으로 이동하여 다리의 관성이 작게 되는 원인이 된다. 그런데 용장구조를 갖는 로봇의 다리에서는 관절부의 미소한 변형에 의해 능동적으로 다리중심변위를 변화시키지 않아도 충격력이 거의 발생하는 않는 것으로 알려져 있다³⁶⁾.

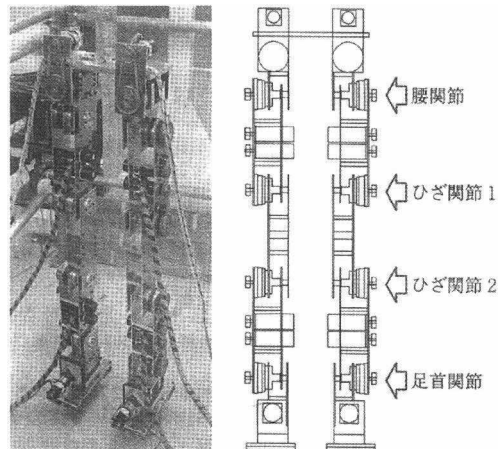


그림 5 용장각(冗長脚) 이족보행 로봇

5. 맺음말

이족보행 로봇의 자율보행동작에 관한 최근의 연구 동향에 관하여 소개하였다. 특히 보행기능을 중심으로 한 연구개발에 대하여 개관하였고, 많은 연구가 각각의 관점에서 새로운 수법을 제안하고 있는 상황을 보고하였다.

또한 본고에서는 널리 활용되고 있는 휴마노이드 있어서의 핸들링, 환경인식, 인간과의 인터랙션 등의 기능향상 전망에 대해서는 열거하지 못하였다.

이상과 같이 이족보행 로봇의 연구개발은 현재 진행형에 있고 금후 상당한 발전이 예상된다.



참고문헌

1. 加藤一郎 : 이족보행 로봇 - 그 역사와 과제, 일본로봇학회지, 1, 3 (1983) 164.

이하 참고문헌은 논문의 원본을 참조하길 바람.

<<일본정밀공학회지, Vol.77, No.5, 2011>>

본 기사는 한국기계연구원의 박성환 편집위원이 “일본정밀공학회지” 2011년 5월호 pp.453-456을 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

· 주소 : ㊦102-0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9
(九段誠和Building 2F)

· 전화 : +81-3-5226-5191 / FAX : +81-3-5226-5192

· URL : <http://www.jspe.or.jp/>