

이족보행의 구현 및 문제점에 관한 고찰

이 글에서는 이족보행 로봇을 개발하여 인간과 같은 자연스럽게 걷는 동작을 구현하는 데 있어서 현재 기술의 한계를 구체적으로 살펴보고, 가능한 해결 방법과 기술 발전 전망을 살펴본다.

걸음새가 가장 안정되어 있다고 하는 아시모의 경우를 비롯한 이족보행 로봇을 보면 다리는 엉거주춤 구부리고 조심스레 걷고 있다. 또 요즈음 유행하는 소형 휴머노이드 로봇 경기에 나오는 보행 모습을 보면 매우 불안정하고 흔들림이 심하며 쉽게 넘어지는 것을 볼 수 있다. 언뜻 생각해 보면 매우 단순한 문제처럼 보이는 이족 보행이 그렇게 힘든 일인가? 걷기 위해서는 한쪽 발 들고 다음 발 내딛고 하며 나아가면 될 것처럼 여겨진다. 기본적으로는 맞는 생각이다. 그러나 실제에서 이것이 쉽게 구현되지 않는 것은 직립 보행이 마치 가만히 두면 쓰러지

는 막대기를 세워 놓은 것처럼 매우 불안정한 자세로 이루어져 있다는 점이다. 사람도 제 자리에 가만히 서 있기 위해서는 의식적으로든 무의식적으로든 쓰러지지 않도록 계속 무게 중심을 이동하며 중심을 잡아야 한다. 만약 쓰러짐이 감지되면 쓰러지는 방향으로 발을 내딛어 새로운 안정자세를 만들어낸다. 걷는다는 행위는 몸을 전진 방향으로 쓰러뜨리고 발을 내딛어 중심을 유지하며 또 앞으로 쓰러지려고 하는 동작의 연속이라 볼 수 있다. 이러한 이유로 자연스러운 보행은 로봇의 동역학적 기구학적 요소와 맞물린 고도의 제어기술이 결합되어야 가

능한 기술인 것이다. 이러한 기술들은 하나 같이 모두 해결하기 쉽지 않은 문제들로 채워져 있다.

이족 보행은 크게 두 가지 요소의 결합으로 이루어진다. 첫째는 미리 계획된 걸음 패턴에 따라 다리, 발목, 팔 등을 움직여 걸음의 기본형을 만드는 것(걸음 경로 계획)이고, 둘째는 매 순간 몸의 각 부분을 미세하게 움직여 지속적으로 동적 안정성을 유지하는 것(자세 안정화)이다. 전자는 걷기 전에 미리 수립되어야 하는 과정(Off-line 또는 batch process)이고 후자는 걸으면서 실시간으로 계산되어야 하는 것(on-line 또는 real time control)이다.

걷는다는 것은 무게의 중심을 양발에 교대로 옮기면서 들려진 발을 앞으로 내딛으며 착지하는 과정을 반복하는 것이다. 이때 사람은 오랜 기간 학습된 무의식적 반응으로 무게 중심을 이동하게 된다. 이러한 걸음 패턴은 인류가 직립보행을 시작한 이래 태어날 때부터 유전적으로 프로그램된 것으로 여겨진다. 이는 대다수의 초식 동물들이 태어남과 더불어 스스로 일어나 걷고 뛰어다니는 것을 보면 보행이 후천적 학습이 주된 것이 아님을 알 수 있다. 단지 인간의 경우 태어난 직후 운동을 위한 골격, 관절, 근육 등이 걸을 수 있을 만큼 충분히 발육되어 있지 않기 때문에 걸음을 시작할 때까지 다소 시간이 걸리는 것이다. 이것은 걷기라는 복합적인 균형 운동이 태어난 직후부터 무(無)로부터의 학습이 아니라 상당부분 본태적이며 오랜 기간의 진화에 의해 최적화된 기구학적, 운동학적으로 표현되는 지극히 지능적 능력이란 점이다. 따라서 로봇이 인간과 흡사하게 걷기 위해서는 인류의 직립보행 진화과정에서 획득된 것 정도 수준의 정보와 숙련도를 확보해야만 한다. 그러나 문제는 이러한 생물학적 진화 과정을 정확히 이해하기도 힘들 뿐 아니라 완성체로서의 인간의 인체구조나 근육, 골격, 보행방법조차도 아직 명확히 파악 못하고 있다는 점이다. 더욱이 이를 현재의 기술수단인 기계적, 전기·전자적, 컴

퓨터공학적 방법론으로는 인간과 같은 유기체를 구현하는 것은 불가능이라 생각된다.

이족보행 로봇의 구조

인간은 650여 개의 근육과 206개의 뼈, 100여 개의 관절로 이루어져 있다. 또한 보행에 관련된 고관절(hip joint)은 볼 조인트(ball joint)로서 회전, 들기, 벌리기 등 세 가지 방향의 자유로운 운동이 보장되어 있다. 발목과 발 역시 매우 복잡한 관절과 인대, 근육이 유기적으로 결합되어 다양하게 외부 환경과 상호작용하도록 되어 있다. 특히 엄지발가락은 보행에서 하나의 독립적인 관절로서 에너지 소모를 최소화하는 다이내믹한 걸음새를 연출하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 인간형 로봇을 위하여 인간과 같은 갯수의 관절과 근육을 갖추는 것은 기술적으로 구현이 매우 힘들 뿐 아니라 실용적인 측면에서도 바람직하지 않다. 그러므로 실제 인간형 로봇에서는 인간의 행위를 모사할 수 있는 최소한의 기구학적 구조를 채택하게 된다. 먼저 이족 보행이 가능하기 위한 최소한의 독립적인 운동 및 구동이 자유도의 결정이다. 각 다리가 걷기 위한 운동을 하기 위해서는 최소한 각각 6개의 자유도를 갖는 구조를 갖추어야 한다. 그림 1에 서처럼 고관절에 3개, 무릎에 1개 그리고 발목에 2개 등이다. 더욱

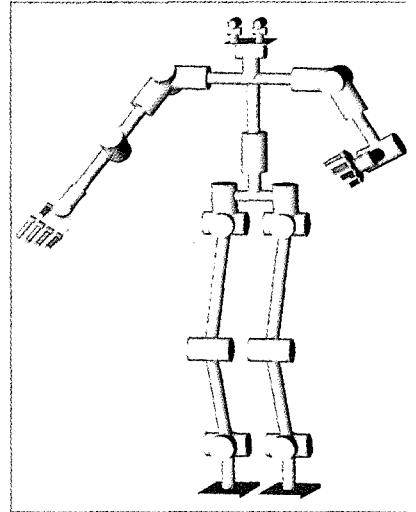


그림 1 이족보행 로봇의 구조

자유로운 운동을 위해서는 발목에 회전운동을, 발에 엄지발가락 관절 등을 추가할 수 있으나 대부분의 경우 이를 생각한다. 로봇 상체는 인간다운 모습과 기능, 우아한 걸음새 연출을 위하여 다양한 구성이 가능하다. 그림 1은 휴보(Hubo)의 경우를 보이고 있다.

걸음 경로 계획의 수립

보행 로봇에서 걸음 경로 계획(gait pattern design)은 가장 기본적이면서도 노력과 시간이 많이 필요한 부분이다. 이족 보행에서는 수립된 걸음 경로 계획에 따라 로봇의 각 관절 구동기의 위치를 미리 프로그램해 둬으로써 보행 시 걷기 위한 반복운동을 하도록 하고 있다.

걸음 경로 계획에서는 ZMP(Zero Moment Point)가 보행주기 동안 항상 착지한 발 내부에

위치하도록 모든 관절운동 패턴을 설계한다. 양발 지지 상태에서부터 첫 걸음을 위해서는 먼저 ZMP를 왼발 안으로 이동시키고 오른발을 들어 올리며 앞으로 내딛는다. 공중에 떠 있던 오른발이 원하는 보폭만큼 이동하면 착지한다. 착지가 완료되어 두발이 대각선으로 위치한 양발 지지 상태가 되면 ZMP를 오른발로 이동시킨다. 다음은 왼발을 들어 앞으로 전진시킨 뒤 보폭거리에서 착지한다. 이러한 경로 계획을 수립하는 데 있어 공중에서 이동하는 발의 운동에 따라 지지하고 있는 발 안쪽의 ZMP가 지속적으로 변하기 때문에 상체의 위치를 적절히 계획하여 ZMP의 위치가 지지발 안에 머물도록 하여야 한다. 이때 잘못된 경로 계획에 의하여 ZMP가 지지발의 경계면에 도달하게 되면 로봇은 쓰러지게 된다. 이러한 경로 계획을 완성하기 위해서는 두 가지 방법이 사용된다. 첫째는 실험적 방법이고 둘째는 전산모사(computer simulation)에 의한 방법이다. 전자는 실제 로봇이 있어야 가능한 방법이고, 후자는 로봇 전체 기구의 수학적 모델을 만들고 이에 대한 동역학 방정식을 풀 수 있어야 된다. 하지만 어느 방식을 택하더라도 경로 계획이 저절로 되는 것은 아니다. 무수한 시행착오를 통하여 로봇이 쓰러지지 않고 보행을 지속할 수 있는 경로를 찾아내야 하는 것이다. 태엽으로 구동되는 값싼 장난감 로

봇의 경우 한 발 지지 상태이건 양발 지지 상태이건 항상 ZMP가 지지발 안에 위치하도록 설계되어 있기 때문에 아주 단순한 경로 계획만으로도 보행이 가능하다. 또한 소형 보행 로봇의 경우 ZMP가 로봇의 정역학적 무게중심이 착지면에 투영된 점과 큰 차이가 없기 때문에 걸음 단계별로 정적 무게 중심을 유지할 수 있는 점을 실험적으로 찾아 경로를 생성하는 방법을 사용하기도 한다. 그러나 로봇의 크기가 80cm 이상의 중형로봇만 되어도 이러한 단순한 방식은 적용되지 않는다. 때 순간 움직임에 따른 ZMP의 변화를 직관적으로 이해하기 힘들기 때문이다. 이족 보행 이외에 공차기 등 좀 더 과격한 운동의 경우 정밀한 전산모사 방법 이외에는 ZMP의 예측이 불가능하다. 중형 로봇만 되어도 작동 중 넘어지면 기계적 파손이나 결함이 생기기 때문에 실험적 방법을 통하여 과격한 움직임에 대한 경로 계획에는 여러 가지 위험요인이 따른다. 이러한 과정에 의하여 수립된 하체 12개 축 및 상체의 시간에 따른 경로를 걸음 경로 계획이라 한다.

불확실성

실험이든 전산모사든 경로 계획을 수립하는 과정을 통하여 어느 정도의 만족할 결과를 얻었다 할지라도 다음에는 실험에서의 재현성의 문제가 뒤따른다. 즉, 수립된

경로를 실제 로봇에 적용해도 계획대로 로봇이 제대로 걷지 못한다는 점이다. 그 이유는 첫째로 백래시(Backlash)에 의한 불확실성이다. 로봇의 구동원은 주로 감속기와 결합된 전기모터이거나 유압 혹은 공압 시스템이다. 어느 경우든 백래시가 존재한다. 매우 정밀한 감속기나 조인트의 경우 헐거움을 거의 무시할 만한 것들이 있으나 고가이고 무거울 뿐 아니라 내부 마찰에 의한 전달 효율이 떨어지는 단점이 있다. 특히 인간형 로봇과 같이 직렬링크 개방형 구조물은 오차가 점차 누적되어 나타나기 때문에 발목부나 무릎, 허리 등 걸음새를 결정하는 하위 조인트에서의 백래시와 마찰은 정밀 반복구동을 요하는 이족 보행시스템의 정확도 및 반복도에 결정적인 영향을 미친다.

두 번째 불확실성은 지면의 균일도와 마찰력이다. 우리가 보통 평편하다고 생각하는 실내 생활공간에서의 바닥은 통상 $\pm 2^\circ$ 정도의 기울기차가 존재한다. 발바닥이 지면과 마찰력 부족으로 미끄러지는 경우 역시 마찬가지다. 이들에 따라 로봇의 착지도 매우 불안정하게 되고 세심하게 설계된 경로 계획도 무의미해지게 된다. 왜냐하면 보행의 반복 운동이란 특성 때문에 마지막 걸음의 자세가 다음 걸음의 시작 조건이 되기 때문에 앞걸음이 흐트러지면 다음 걸음은 제대로 수행될 수 없기 때문이다.

세 번째로는 경로 계획 때 고려되지 않았던 구조물 탄성에 의한 처짐이나 진동이다. 로봇의 구조는 일반적으로 매우 복잡하고 각 관절이 직렬로 연결되어 구조적으로 취약한 형태를 하고 있다. 경로 계획이나 수학적 모델 수립 때 이 모든 요인을 고려하기란 거의 불가능하거나 부정확한 경우가 대부분이다. 이 때문에 이미 수립된 경로계획이 실제 로봇에 적용되어도 제대로 반영되지 않아 재현성 문제를 일으킨다.

인조근육은 없다

인간의 근육은 우리가 생각할 수 있는 가장 이상적인 구동원(actuator)이다: 1) 근육은 힘원(force source)으로 작용한다. 2) 근육은 아주 미세한 힘으로부터 큰 힘까지 발생시킬 수 있다. 3) 근육은 역 구동(back drive)이 가능하다. 4) 근육은 크기와 무게에 비하여 큰 힘을 낸다. 5) 마찰과 백래시가 없다. 6) 근육은 직선구동을 한다. 7) 자체 관성력이 미미하다. 8) 인대와 함께 탄성이 있다. 등등. 이러한 능력을 갖춘 구동원을 인조근육이라 한다. 그러나 이는 이상적인 모델일 뿐이고 우리 기술로는 아직 구현이 불가능한 연구와 개발의 대상이다. 관절에 직구동(direct drive) 토크모터를 사용할 경우 힘원으로 작동하며 많은 장점이 있는 반면 토크모터가 아직 충분

한 모멘트를 발생시키기에 지나치게 크고 무거운 단점이 있어 현재 인간형 로봇에 주로 사용되고 있는 것은 감속기가 부착된 전기 모터다. 그런데 이것은 인간근육과 매우 다른 특성을 가지고 있다. 감속기 부착 전기 모터는 위치원(position source) 혹은 속도원(velocity source)으로 작용하며 역구동이 잘 되지 않고 높은 감속비에 의하여 자체 회전 관성력이 매우 커지게 된다. 이러한 차이는 로봇을 인간처럼 움직이게 하는데 커다란 어려움을 준다. 역구동이 되지 않으므로 힘빠기를 할 수 없다. 자체 관성이 크기 때문에 보행과 같이 관절의 회전방향과 크기가 급격히 변하는 운동의 경우 자체 에너지의 소모가 크며 탄성이 없기 때문에 운동에너지를 저장할 수도 없다. 충돌, 착지할 때 등 외부환경과 부딪칠 때 적응력이 전혀 없다. 이에 따라 로봇은 자세를 고정시키는 부동자세를 유지하는 것이 가장 쉽고 자연스러운 과제다. 사람이 10시간 동안 기마자세를 취하고 움직이지 않아야 한다고 상상해 보라. 이는 사람에게 불가능에 가까운 고역일 것이다. 반면 로봇은 사람에게 가장 편한 과제인 힘 빠고 외부에 의지하는 것이 가장 어려운 일 중에 하나다.

로봇의 기구설계

이족보행을 하기 위한 로봇설계

에서의 관점은 크게 두 가지로 요약된다. 첫째는 기구적으로 백래시를 최소화하는 것이고 둘째는 구조적 강성을 유지하며 자중을 최소화하는 것이다. 백래시에 의한 불확실성을 없애기 위하여는 보통 1m 이상의 인간 크기 로봇에 대해서는 하모닉 드라이브 방식의 감속기를 채택한다. 하모닉 드라이브는 기어의 강성, 내구성, 전달토크, 마찰력 등에서 약점을 가지고 있으나 고감속비, 제로백래시, 콤팩트한 사이즈, 다양한 크기와 종류의 표준제품 등의 측면에서 아직 이를 대치할 감속기가 없는 실정이다. 로봇의 구조물은 고강성을 유지하기 위하여 다리 부분은 주로 박스형으로 설계하여 무게 대비 관성모멘트를 크게 한다. 모든 조인트는 캔티레버(일단 지지)를 피하고 양단지지를 하여 강성을 보장하도록 한다. 특히 조인트는 베어링의 클리어런스에 의하여 헐거움이 발생하지 않도록 세심하게 설계되어야 한다.

자세 안정화

자연스러운 걸음은 경로 계획에 의한 반복 동작만으로 완성되는 것은 아니다. 왜냐하면 전술한 바와 같이 로봇은 여러 형태의 불확실성에 노출되어 있기 때문이다. 바닥면의 비평탄은 경로 계획의 재현을 무색하게 만드는 가장 큰 요인이다. 이의 적절한 제어를 위하여 Hubo의 경우 두 가지 방법

이 사용된다. 첫째는 발바닥에 경사계를 부착하여 바닥면 경사를 측정하여 경로계획을 보상해 주는 방법이고 둘째는 몸에 부착되어 있는 레이트 자이로와 가속도계(경사계) 신호를 이용하여 몸의 중심을 유지시켜 주는 방법이다. 구체적인 제어 기법 및 신호처리 방식에 대하여는 개발주체마다 독특한 방법을 사용하고 있는 것으로 추정되며 발표되는 논문이나 특허로는 개괄적인 사항만을 표현하고 있다. 마찰력의 경우 미끄럼이 관측되면 경로 계획을 수정하여 발에 과도한 착지력이나 모멘트가 발생하지 않도록 하여야 한다. 구조물의 탄성에 의한 처짐은 실험이나 전산모사를 통하여 어느 정도 반복성 있는 양을 찾아낼 수 있다. 이 처짐량을 경로계획에 가감하여 보상함으로써 로봇이 자연스럽게 안정한 자세를 유지하도록 한다.

로봇은 구조상 강성이 취약하고 감쇄가 거의 없다. 이에 따라 착지 시 충격이나 팔, 다리의 운동에 따른 잔류진동이 매우 심하게 나타난다. 특히 들러진 다리의 진동은 착지 지점과 시점의 교란을 가져와 걸음새 안정성에 큰 영향을 미친다. 이러한 진동은 다리와 팔 등에 부착된 레이트 자이로와 가속도계의 신호를 이용하여 능동감쇄가 이루어지도록 제어한다. 또한 자세 제어를 위해서는 몸의 기울어짐과 각속도를 측정할 수 있는 관성센서와 착지 발의 접지력

과 모멘트를 측정할 수 있는 힘·모멘트 센서가 필수다. 여기에서 획득된 정보를 바탕으로 착지 순간과 착지 위치를 산출한다. 또한 이 정보는 한 발 지지상태와 양발 지지상태에서 로봇이 진동하거나 쓰러지지 않도록 지속적인 안정성을 유지하는 데에도 사용된다. 자세 안정화는 환경변화에 따른 반복적인 걸음 안정성을 보장하는데 필수적인 요소이나 소형로봇의 경우 알고리즘 및 센서 시스템의 단순화를 위하여 자세 안정화를 생략하는 경우가 대부분인데 결과적으로 매우 불안정한 걸음새를 보이게 된다. 그림 2에서 Hubo의 자세제어알고리즘의 대략적인 흐름도를 보이고 있다.

지금의 기술적 한계를 뛰어넘는 혁신적인 이론과 기술 및 아이디어가 요구된다. 인간 뇌신경과학에 근거한 자가학습(self learning) 이론을 도입한 경로 계획 및 자세 안정화가 과거부터 꾸준히 연구되어 좀더 간편하고 인간 친화적인 제어기법을 추구하고 있다. 또한 인조근육과 같은 구동기, 가볍고 튼튼한 재질 및 구조물, 용량이 큰 소형배터리, 저전력 고속 중앙처리장치(CPU), 더욱 정밀한 센서 시스템 그리고 인공지능 알고리즘 등 차세대 인간형 이족보행 로봇을 위한 필수 기술들이 계속 연구되고 있다. 만약 이러한 이론이나 새로운 혁신적인 기법이 완성되어 성공적으로 적용

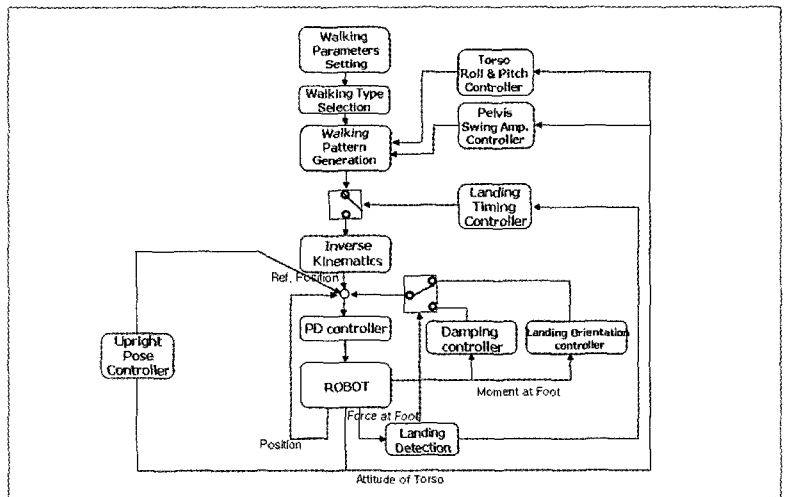


그림 2 보행제어 알고리즘의 흐름도

맺음말

인간과 흡사하게 안정되고 안전한 보행로봇이 출현하기 위해서는

된다면 지금보다 훨씬 다양하고 안정되며 자연스러운 동작과 걸음이 구현되리라 예측한다.