

## 이족보행로봇의 킥액션을 이용한 보행 구현

진광호, 박천옥, 최상호, 김진걸  
인하대학교 자동화공학과 (Tel: 032-860-7384)

### Gait Implementation using a Kick Action for IWR-III Biped Walking Robot

Kwang-Ho Jin, Chun-Ug Park, Sang-Ho Choi, Jin-Geol Kim.  
Dept. of Industrial Automation Eng., Inha Univ.

**Abstract** - This paper deals with the gait generation of IWR-III using a kick action to have a walking pattern like human. For this, trajectory planning with the consideration of kick action is done in each walking step, and the coordinate transformation is done for simplifying the kinematics. Balancing motion is analyzed by FDM during the walking. By combining 4-types of pre-defined steps, multi-step walking is done. Using numerical simulator, dynamic analysis, ZMP analysis and system stability is confirmed. Walking motion is visualized by 3D-graphic simulator. As a result, trunk ahead motion effect and impactless smooth walking is implemented by experiment. Finally walking with kick action is implemented the IWR-III system.

#### 1. 서 론

이족보행로봇은 인간과 유사한 걸음새를 구현할 수 있고 인간을 대신하여 위험한 작업공간에서도 작업이 가능하다는 장점으로 인해 걸음새 제어 및 안정도 해석의 어려움에도 불구하고 1970년대부터 지금까지 꾸준히 연구대상이 되어왔다. 이 연구는 걸음새 제어와 로봇의 안정도 해석 등으로 나눌 수 있으며, 걸음새 제어의 경우는 평탄지형과 변화가 심하지 않는 3차원 지형에서의 걸음새 제어로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 평탄지형에서 보다 인간과 유사한 보행을 위하여 킥액션을 이용한 걸음새를 구현한다. 이는 보행 중에 몸체 추진이 일어나게 하여 평면 직진 보행보다 긴 보폭을 확보할 수 있으며 또 차지 시에 발바닥 전체로 차지하는 것보다 우선 발꿈치를 지면에 붙이고 발바닥 전체를 내려놓음으로써 충격량을 줄일 수 있다. 이제까지의 IWR 시스템의 보행은 유각의 발바닥 부분이 항상 지면과 평행하게 이동하여 보행시 어색한 움직임이 있었으나 발목관절을 자연스럽게 움직여서 보다 부드러운 걸음새를 구현하고, 나아가서는 곡면 보행이나 경사면 보행 등의 다양한 지형에서의 보행도 구현하고자 한다.

#### 2. 이족보행로봇 IWR-III의 시스템

이족보행로봇 IWR-III(IWR:Inha Walking Robot)는 기구학적 해석과 각 링크들의 동특성의 용이한 해석을 위해 유각, 지지각, 균형관절의 세 부분으로 분리한다. 균형관절은 다리부와 몸체의 움직임에 의한 다양한 걸음새에 대해 보상 모멘트를 발생시켜 원하는 균형점(ZMP: Zero Moment Point)에 대해 전체적인 안정을 이용할 수 있도록 균형관절 제어 방정식을 이용하여 균형관절의 움직임을 결정하고 균형점 검증 방정식으로 안정도 여부를 판별한다. 이 때에 균형점을 걸음새와 무관하게 제어할 수 있도록 균형관절은 회전관절과 직진관절

인 2자유도로 구성되어 있다. 다리부는 몸체지지와 추진을 위한 지지각과 이동하기 위한 유각으로 나누어서 각각을 보폭 및 발부분의 높이 조절을 위한 3개의 회전관절로 구성하여 3자유도를 이루고 균형관절 부분의 2자유도를 포함, 전체 시스템은 모두 8자유도를 이룬다. IWR-III 시스템은 모의실험기를 통해 먼저 주어진 궤적에 대해서 균형추가 균형점을 유지하면서 추종이 가능한지 여부를 결정하기 때문에 반드시 모의실험과정을 거쳐 주어진 궤적에 대한 시스템 안정도를 검증한다.

#### 2.1 좌표계 시스템

IWR-III 시스템은 유각, 지지각, 균형관절 각각에 대해 기준좌표계를 갖는다. 또, 지지각의 끝단과 유각 및 균형관절의 시작단을 한 점으로 일치시켜 전체 시스템을 가지구조(branched tree structure)를 갖는 개형상 구조로 모델링시킬 수 있다. 전체 기준좌표계는 지지평면의 발바닥 사이로 설정하여 로봇의 모든 움직임을 표시하도록 했다. 이 좌표계를 기준으로 하여 몸체의 궤적 추진, 동특성, 균형관절의 위치 표현 및 균형점을 표시한다. Fig.1은 IWR-III의 좌표계이다.

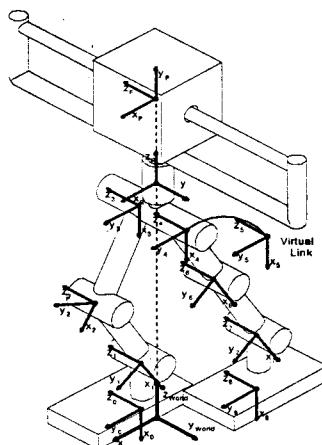


Fig.1 IWR-III 좌표계 시스템

#### 2.2 기구학 해석

지지각은 발바닥 부분을 기준좌표계로 설정하여 전체 좌표계와 같은 평면에 있게 하였다. 몸체와 유각이 만나는 부분을 말단좌표계로 정하여 역기구학을 이용하여 각 관절 값들을 구한다. 유각은 지지각의 말단좌표계를 기준좌표계로 설정하였다. 이 부분에 지지각의 말단좌표계와 유각의 기준좌표계를 기구학적으로 연결시켜주기 위하여 가상링크를 추가하였다. 유각의 말단좌표계는 킥액션이 일어나는 동안에는 발의 앞부분 또는 뒷부분에 위치하고 유각을 들고 움직이는 부분에서는 발목 부분만을 자유롭게 움직이기 위해서 발목부분에 위치하게 하였다.

Fig.2는 킥액션을 이용한 보행 중 유각의 좌표계를 표시하였다.

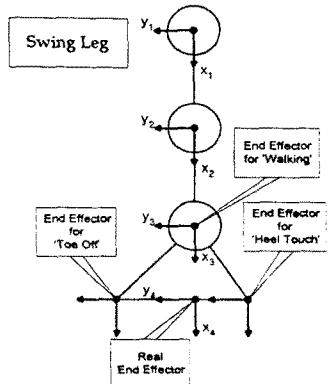


Fig.2 킥액션을 이용한 보행 중  
유각의 좌표계 변환

### 2.3 IWR-III의 보행 패턴

IWR-III 시스템은 지지각, 유각의 운동특성 및 ZMP의 궤적만으로 균형관절의 움직임을 결정한다. 궤적은 각각 지지각과 유각의 기준좌표계에 대해 표현하였고, 보행의 안정성을 고려하여 보행의 시작 단계와 끝단계에서 속도, 가속도를 각각 0으로 하고 각각의 경유점에서 속도는 그 구간의 평균 속도를, 가속도는 제로를 갖게 하였다. 기계적 충격량의 감소를 위해 가속도를 3차 함수로 하는, 시간에 따른 경로 구간을 5차 스플라인 곡선으로 설정하여 보간법을 이용하여 생성하였다.

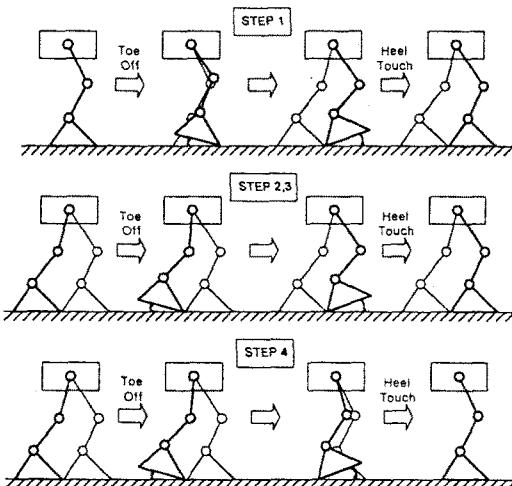


Fig.3 킥액션을 이용한 보행의 4가지 스텝

킥액션을 이용한 보행의 궤적계획은 보행 시작 전 발꿈치를 드는 과정(Toe Off), 중간 보행 과정, 보행 후 발꿈치를 지면에 붙이고 앞부분을 내리는 과정(Heel Touch)의 세 단계로 나눌 수 있다. Fig.3은 킥액션을 이용한 보행의 4가지 스텝을 표시한 것이다. 스텝 1은 보행 시작을 나타내며 오른발이 지지각, 왼발이 유각이다. 스텝 2, 3은 보행 중 지지각과 유각의 위치를 나타내며 스텝 2인 경우 왼발이 지지각, 오른발이 유각이고 스텝 3은 스텝 2와 반대이다. 스텝 4는 보행을 마치고 초기자세로 돌아가는 것을 나타낸다. IWR-III 시스템의 전체 보행은 위의 4가지 스텝을 조합하여 이루어진다. 본 실험에서는 스텝 1 - 2 - 3 - 4를 조합하여 스

텝별로 3초 전체 4 스텝, 12초의 보행방식을 택했다.

### 2.4 균형관절 해석

킥액션을 이용한 보행은 이제까지의 IWR 시스템의 보행과는 다른 방식으로 균형관절을 움직인다. 균형점은 보행 시작 전 킥액션(Toe off)이 일어나는 동안 원점에서 지지면으로 옮겨지고, 보행 중 지지면 안에 머물러 있다가, 보행 후 킥액션(Heel touch)이 일어날 때에 다시 원점으로 옮겨지도록 궤적계획을 하였다. 이에 따라 보행 도중 균형추의 움직임을 최소화 할 수 있도록 킥액션이 일어나는 동안 균형추를 미리 이동시키는 방식을 사용하였다. Fig.4는 스텝별 균형추의 움직임을 나타내었다. 그래프에 표시한 원은 균형관절의 동작 가능 범위를 나타내고, 세로축은 전진방향을 나타낸다. 이 그래프는 로봇의 위쪽에서 투영한 모습이다.

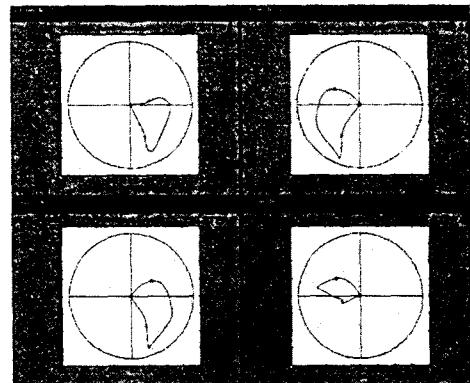


Fig.4 스텝별 균형추의 궤적

### 2.5 모의실험

IWR 시스템은 모의실험기를 사용하여 궤적 계획, 기구학해석, 동력학 해석, 균형점 검증, 스텝의 안정도를 판별한다. 모의실험기는 상용파키지(MATLAB)를 사용하여 프로그램 되었으며, IBM PC 환경에서 구현되었다. 모의실험기는 일정 경유점이 주어지면, 이를 지나는 지지각과 유각의 궤적 계획을 수행한 후, 역기구학을 수행하여 지지각과 유각의 각 관절 값들을 구한다. 그리고 뉴튼-오일러 방정식을 이용하여 각 링크의 운동을 해석한다. 여기서 각 링크의 동특성 항들이 포함되어 있는 상미분방정식을 풀어서 매 순간의 균형추의 위치를 구하고 이 값이 실제 안정영역에 만족하는지 판별하게 된다.

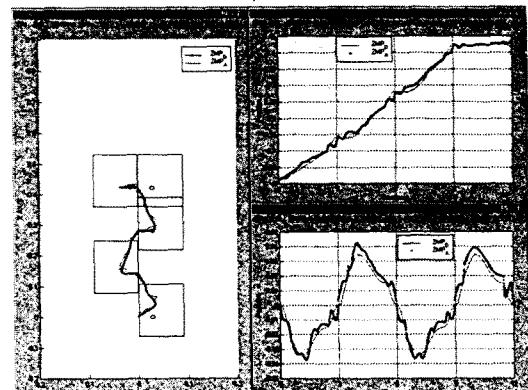


Fig.5 킥액션을 이용한 보행 때의 균형점 궤적

Fig.5는 모의실험을 통하여 킥액션을 이용한 보행 때

의 균형점의 추종을 나타낸 것이다. 보행 중 이 궤적이 발바닥 안에 있으면 안정된 보행이다. 왼쪽 그림은 Fig.3의 스텝 중 스텝 1 - 2 - 3 - 4 를 걸을 때 균형점의 궤적을 발바닥과 함께 xy평면으로 나타낸 것이다. x축은 균형점의 전진방향을 나타내고, y축은 좌우의 움직임을 나타낸다. 오른쪽 그림은 보행 시간에 대한 전진 방향의 균형점의 궤적(위쪽)과 y축의 균형점의 궤적(아래쪽)을 나타내었다. 가는 실선은 미리 주어진 균형점 궤적이고, 굵은 실선이 실제 균형점 궤적이다. 그래프를 보면 실제 균형점이 안정영역 안에서 원하는 균형점 궤적에 잘 추종하는 것을 알 수 있다. Fig.6, 7은 모의실험을 통하여 얻은 결과를 3D 그래픽 모의실험기로 확인한 화면이다.

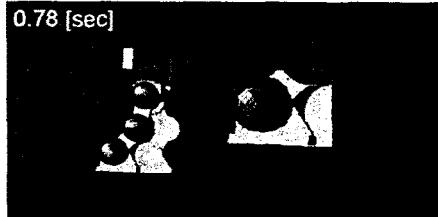


Fig.6 칙액션 효과 (Toe Off)

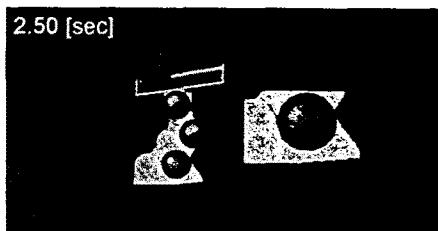


Fig.7 칙액션 효과 (Heel Touch)

## 2.6 실험 및 결과

모의 실험을 수행한 후 나온 8개의 관절 값을 자체 제작한 IWR-III에 사용하여 보행 실험을 수행하였다. IWR-III는 높이 0.68m, 무게 45Kg이고, AC서보모터 200W 6개, 무릎부분에 400W 2개를 사용하여 구동한다. 균형관절의 롤부분, 다리관절의 허벅지와 무릎부분에 5개의 60:1 감속기를, 발목부분에 2개의 100:1감속기를 사용하였다. 제어기는 TI사의 TMS320c31 DSP 칩을 사용하고 관절 값을 필스로 변환하여 8축 동시 제어를 하였다. Fig.8은 IWR-III의 모습이다.

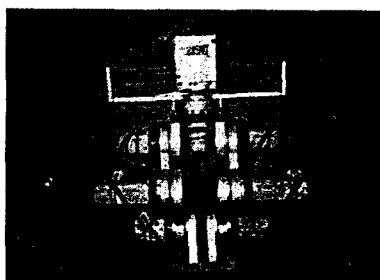


Fig.8 이족보행로봇 IWR-III의 모습

이 로봇을 사용하여 보행 실험을 수행하여 실제로 평면 직진 보행의 걸음새와 비교해 보았다. 실험 결과, 보다 인간과 유사한 자연스러운 보행을 하였고, 칙액션에 따른 몸체 추진 효과로 보폭도 늘어나게 되었다. 보행시 발생하는 충격량도 감소하는 효과도 얻을 수 있었다.

Fig.9는 실제로 서보 모터로 입력되는 지령치와 결과치, 오차 값이다. 왼쪽 그림에 원쪽-오른쪽 다리부, 균형관절부의 지령치와 결과치를 시간에 관한 그래프로 나타내었고, 오른쪽 그림에 각각의 오차 값을 나타내었다.

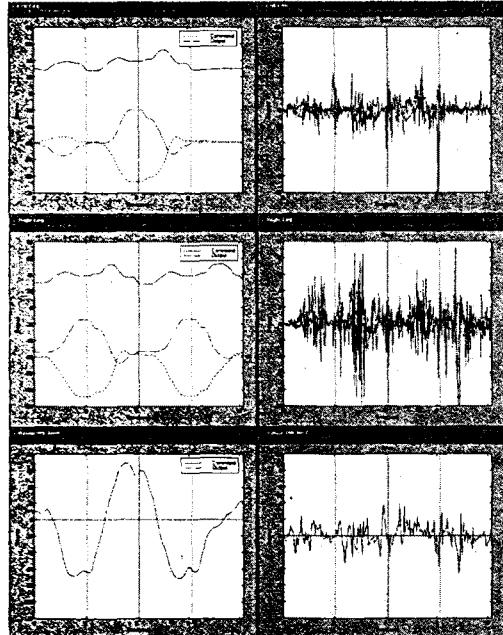


Fig.9 실제 모터 구동 지령치와 결과치, 오차 값

## 3. 결론

이족보행로봇의 목표는 인간과 똑같은 보행을 하는 로봇의 개발이다. 그런 의미에서 칙액션은 보행에 있어서 꼭 필요한 부분이다. 인간의 경우 칙액션으로 몸체를 앞으로 추진시키며, 또 보행시 오는 충격을 부드럽게 흡수 한다. 이 논문은 IWR 시스템을 이용하여 이족보행로봇의 걸음새에 칙액션을 구현해 보았다. 평면 직진 보행의 한 스텝의 앞, 뒷부분에 칙액션을 추가하여 자연스러운 보행을 하게 하였다. 칙액션을 추가하는 과정에서 새로운 유각의 말단좌표계를 사용하였고, 평면 직진 보행과는 달리 칙액션이 일어나는 동안 균형추를 이동시키는 새로운 ZMP 궤적계획을 하였다. 이 과정은 모두 모의실험을 통하여 수행하였으며 모의실험 결과를 IWR시스템에 적용하여 최종적으로 칙액션을 이용한 보행을 구현하였다. 이 후에 보다 인간에 가까운 보행을 위해서 몸체에 높이방향운동을 포함시키고, 스텝별로 나누지 않은 전체 스텝에 관한 해석이 필요하다. 이를 적용하고 칙액션을 이용하여 새로운 걸음새의 구현에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## (참고문헌)

- [1] Sun-Ho Lim, Jin-Geol Kim "Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot.", IEEE, p438-443, 1995.
- [2] 최상호, 이족보행로봇 IWR의 동적 안정도를 위한 균형점 해석에 관한 연구, 석사학위 논문, 인하대학교, 1998.
- [3] 이보희, 이족보행로봇 IWR의 걸음새 구현, 박사학위논문, 인하대학교, 1996.
- [4] Mostafa Rostami, Guy Bessonnet, "Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase.", IEEE, p1385-1391, 1998.