

도립 진자형 이족보행로봇을 위한 안정보행

Stable Walking for an Inverted Pendulum Type Biped Robot

강 찬 수*, 노 경 콘*, 김 진 겐**

(Chan Su Kang, Kyung Kon Noh, Jin Geol Kim)

* 인하대학교 자동화공학과(전화:(032)860-8923, 팩스:(032)863-5822, E-mail : kudass@dreamwiz.com)

** 인하대학교 전자전기공학부(전화:(032)860-7384, 팩스:(032)863-5822, E-mail : john@inha.ac.kr)

Abstract : This paper deal with the biped walking stability by inverted pendulum type balancing joints. This model is hard to interpretation for the nonlinearity caused by upper direction movement then conventional model which have roll and prismatic joints. We can interpret this model by a linear approximation or interpolation method. This paper use a linear approximation method that can decide a movement of upper direction. Inverted pendulum type balancing joints have a advantage of less movement for keep stability and similar with human than conventional model and this model can be used for humanoid robot. We can see a stability of biped by ZMP(Zero Moment Point). Genetic algorithm is used for trajectory planning that is important for stable walking of biped.

Keywords : ZMP, balancing joints, support leg, swing leg

1. 서론

발전이 가속화 되고 있는 현대사회에서 우리의 생활에 로봇이 담당하는 부분은 점차 많아지고 있다. 그 중 이족보행로봇은 인간과 유사한 형태로 인하여 각종 산업현장 및 가정에 이르기까지 인간의 생활에 깊이 참여할 수 있는 장점을 가질 수 있다. 이로 인하여 이족보행로봇은 로보틱스 분야에서 가장 활발한 연구가 전 세계적으로 진행 중이다.

본 논문은 다리관절의 움직임에 의한 불안정성을 도립진자형 균형관절로 보상 모멘트를 발생시켜 안정성을 확보하는 모의실험을 하였다. Vukobratovic에 의해 제안된 ZMP는 보행 안정 현상에 대하여 간단하고 직관적이며 힘의 영향까지 고려됨으로 이족보행로봇의 안정도 해석에 많이 이용되었다[1][2].

기존의 회전과 직진관절을 갖는 모델의 경우 ZMP 균형 방정식은 초기조건을 갖는 2차 미분 방정식으로 표현되나, 도립진자형 모델의 균형방정식은 기존 모델과는 달리 균형추의 높이방향 움직임이 몸체에 독립적으로 발생되어 생기는 비선형항을 포함하게 된다. 이 비선형항을 해결하기 위해 인터플레이션 기법을 이용할 수도 있고, 본 논문에서는 선형 근사화를 통해 접근하였다[3][4]. 이러한 접근은 휴머노이드 로봇에서도 복잡한 동역학 식을 해석하기 위해 사용되어지고 있는 방법이다.[5]

II. 본론

1. 이족보행로봇의 기구학적 해석

본 논문에서 사용된 이족보행로봇은 다축 구동 시스템으로서 기구학적 각 링크의 운동특성이 복잡하기 때

문에 해석의 용이성을 위하여 지지각(Support leg), 유각(Swing leg), 균형관절(Balancing joint)의 세 부분으로 분리하였다. 각 부분은 Denavit-Hartenberg의 강체 링크 표시법을 사용하여 해석하였다. 전체 좌표계의 기준 좌표계는 균형관절의 기준좌표계를 지면에 투영시켰으며 이 좌표계를 기준으로 몸체의 궤적계획, 동역학 특성, 균형관절의 위치를 표시한다.

그림 1.은 이족보행 로봇의 좌표계이다. 기구학적 구성을 보행 형태와 관련해 설명하면, 몸체와 유각은 2초동안 동시에 움직이고 1초간의 상 변환 과정을 거치면서 균형관절이 다음 보행의 초기위치로 이동하여 지지각과 유각이 바뀌게 된다.

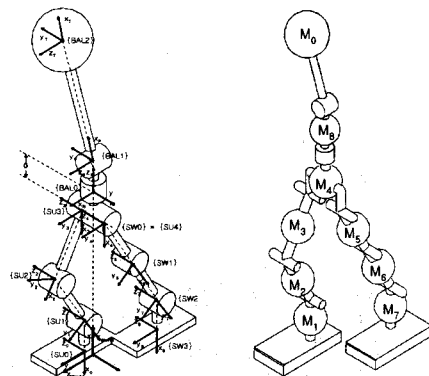


그림 1. 좌표계 시스템 과 질량모델
Fig 1. Coordinate system and mass model

2. 이족보행로봇의 동역학적 해석

이족보행로봇의 안정도 해석을 위한 동역학적 해석은 D'Alambert 원리에 의해 모멘트 운동 방정식을 정리하여 모멘트의 합이 제로가 되는 점이 ZMP이고 다음의 균형점 검증 방정식을 유도 한다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{x}_i + G_x)x_i - \sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{x}_i + G_x)} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{y}_i + G_y)y_i - \sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i(\ddot{y}_i + G_y)}$$

식 (1)은 균형점 x_{zmp} , y_{zmp} 를 구하는 식으로 m_i 는 각 링크의 질량, x_i, y_i, z_i 는 각 질점의 위치 $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 각 질점의 선가속도, x_0, y_0, z_0 는 균형추의 위치, G_x, G_y, G_z 는 중력 가속도를 나타낸다. 식 (1)에서 균형추의 움직임을 제외하면, 궤적 계획과 물성치에 의해 모두 결정되는 값들이다. 식 (1)을 이용하여 균형추 m_0 의 x방향, y방향 움직임은 미지수인 균형추의 움직임을 포함하는 항을 분리하여 정리하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_0 - \frac{(\ddot{x}_0 + G_x)}{z_0} x_0 = -\frac{(\ddot{x}_0 + G_x)x_{zmpD}}{z_0} - G_x + \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{x}_i + G_x)(x_i - x_{zmpD}) - \sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{x}_i + G_x)z_i}{m_0 z_0} \quad (2)$$

$$\ddot{y}_0 - \frac{(\ddot{y}_0 + G_y)}{z_0} y_0 = -\frac{(\ddot{y}_0 + G_y)y_{zmpD}}{z_0} - G_y + \frac{\sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{y}_i + G_y)(y_i - y_{zmpD}) - \sum_{i=1}^8 m_i(\ddot{y}_i + G_y)z_i}{m_0 z_0}$$

여기서 x_{zmpD} , y_{zmpD} 는 사용자가 계획한 ZMP의 궤적이다. 기존의 회전과 직진 관절을 갖는 모델의 경우 식 (2)의 z방향 성분이 없으므로 z_0 가 0으로서 이차 미분 방정식의 형태가 되지만 독립진자형 모델의 경우 높이방향 움직임에 의해 z_0 는 미지수로서 간주되어야 한다. 그러면 식 2개 미지수 3개의 부정형태가 되는 문제가 발생하므로 본 논문에서는 선형 근사화를 이용하여 결정하였다. 이러한 선형 근사화 모델은 균형추의 θ 가 30° 미만일 경우 오차는 5% 미만이다. 최종적으로 이족보행로봇의 안정도를 검증할 때는 균형추의 실제 위치, 가속도 값으로서 모의실험을 통하여 안정적 보행을 확인하였다.

3. 유전 알고리즘을 이용한 궤적생성

유전 알고리즘은 진화현상에 기초한 모델로서 전역

적인 최적해를 찾는데 효과적이다. 생물학적 유전자인 염색체가 가지는 교배, 재생산, 돌연변이 등의 과정을 거치면서 병렬적으로 최적해를 찾아간다[6].

이족보행 로봇의 궤적계획은 보행의 형상과 안정성, 각 관절의 토크에 결정적 영향을 주는 중요한 요소임으로 유전 알고리즘을 이용하여 다리부의 궤적 생성을 실시하였다. 평평한 지면을 가정하여 3개의 경유점을 설정 하였으며, 중간 경유점의 속도, 가속도의 최적값을 찾아내기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다[7]. 사용된 매개변수 값은 개체군의 크기 60, 세대수 50, 스트링의 길이 20bit, 교배율 0.5, 돌연변이율 0.05로 실시하였다. 적합도 함수는 식(3)과 같다.

$$Fit(n) = \frac{1}{\sum (v_{i+1} - v_i)^2 + \sum (a_{i+1} - a_i)^2} \quad (3)$$

여기서 $Fit(n)$ 은 n번째 개체의 적합도 함수이고 v_i, a_i 는 다리부의 궤적 생성 시 중간 경유점의 속도와 가속도를 나타낸다.

4. 모의실험

그림 2는 시간에 따른 경유점 데이터를 입력받아 이족보행로봇의 궤적을 생성하고 안정성을 검증하기 위한 모의실험기의 흐름도이다. 경유점 정보는 지지각, 유각 각각의 시간에 따른 3차원 경유점 위치를 담고 있다. 모의실험기는 경유점 정보에 따라 다리부 궤적을 생성하고 식 (2)를 이용하여 지면에 수직하게 투영된 균형추의 위치를 결정하게 된다.

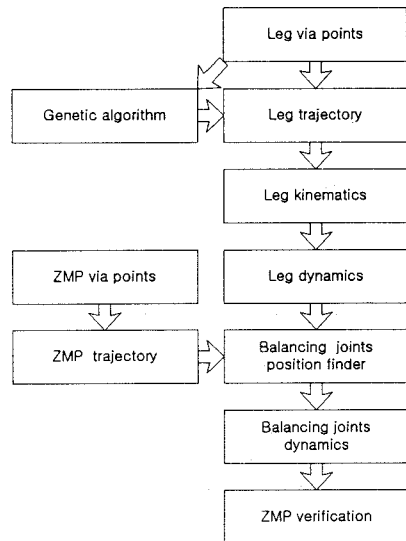
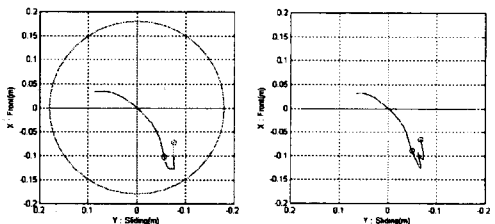
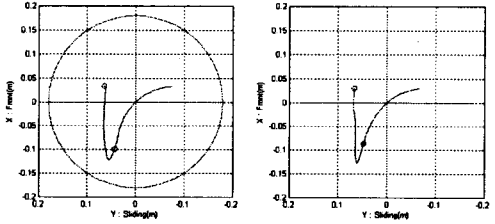


그림 2. 모의실험기의 흐름도
Fig 2. Flow chart of simulator

그림 3은 균형추의 움직임을 기존의 회전과 직진 관절을 갖는 모델의 균형운동과(좌측), 독립진자형 모델(우측) 움직임을 지면에 투영한 모습이다. 그래프 끝에 점이 있는 곳이 출발점이고 2초 후의 경유점도 표시가 되어 있다. 단위 걸음새는 3초이고 2초 동안 몸체와 유각이 동시에 전진한다. 2초~3초 구간은 두다리 지지상태로서 상변환 구간이다. 좌측의 회전과 직진 관절을 갖는 모델은 작업 가능 반경이 표시되어 있다. STEP 1의 균형추 움직임을 보면 독립진자형 모델이 거칠게 움직이는 지점을 볼 수 있는데 이것은 몸체의 가속도가 양에서 음으로 바뀌는 것을 보상해주는 움직임으로 판단된다. 균형추의 무게중심이 높은 곳에 위치한다는 것은 보다 적은 가속도의 변화로 ZMP를 보상할 수 있다는 것을 의미함과 동시에 쉽게 ZMP가 흔들릴 수 있다는 의미를 내포하고 있다. STEP 2, STEP 3, STEP 4에서는 큰 차이를 볼 수 없었다. 양쪽 모두 동일한 ZMP궤적을 주었으며, 경유점에 약간의 차이가 있는 것은 본 연구실에서 구현 예정인 독립진자형 이족보행로봇의 물성치를 사용한 결과이다.



a) Step 1의 균형추 궤적 비교



b) Step 2의 균형추 궤적 비교

그림 3. 균형추 궤적 비교
Fig 3. Comparison of balancing joints trajectory

그림 4는 4보 보행의 발의 위치가 표시되어 있고, 기존의 회전과 직진 관절을 갖는 모델과 독립진자형 모델의 ZMP추종을 비교한 결과이다. 우측 독립진자형 모델은 좀더 거칠게 추종함을 확인할 수 있다. 균형추의 움직임은 그림 3.에서 확인한 바와 같이 유사한데 반하여 ZMP추종이 차이가 있다는 것은 무게 중심이 높아지면 불안정성을 더욱 내포하는 결과라 하겠다. 본 논문에서는 동일 ZMP궤적으로 결과를 도출하였지만, 독립진자형 모델은 좀더 움직임이 적도록 즉, 단

위 보행에 대하여 균형추의 출발점과 도착점의 거리가 가깝도록 ZMP궤적을 생성하여야 좋은 결과를 도출할 수 있다. 또한 독립진자의 질량이 커지면 균형추의 움직임은 줄어들게 되며 이것은 보다 인간과 유사한 형태이고 휴머노이드 로봇에도 응용될 수 있다.

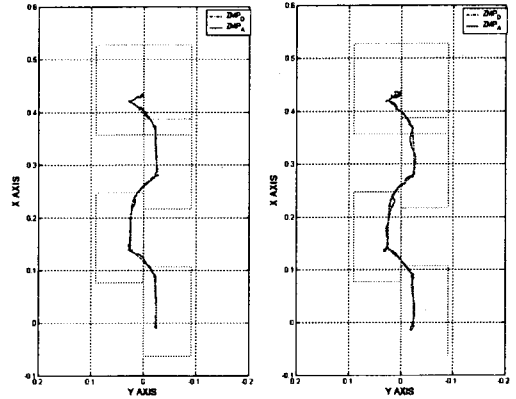


그림 4. ZMP 추종의 비교
Fig 4. Comparison of ZMP tracking

그림 5는 4보 보행 전체에 대하여 12초 동안의 ZMP의 추종을 보여주는 그래프이다. 상위 그래프는 시간에 따른 전진방향, 하위 그래프는 좌우방향의 추종을 보여주고 있다. ZMP가 발바닥 내부에 최소 15mm의 여분을 가지도록 계획되었으므로 그림 4.와 그림 5.로서 보행이 안정하게 이루어짐을 확인할 수 있다.

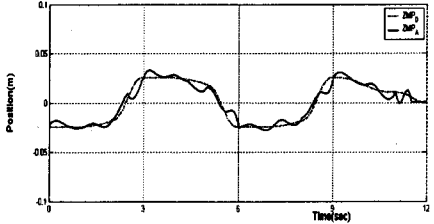
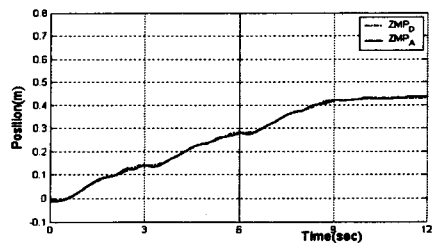
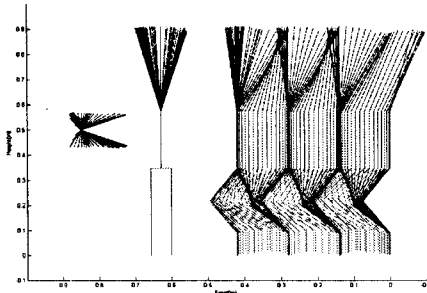
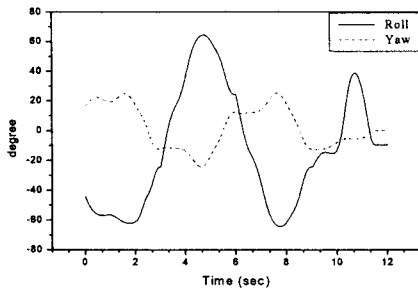


그림 5. ZMP 추종
FIG 5. ZMP tracking

그림 6.은 4보 보행에 따른 전진을 스틱다이어그램으로 표현하였다. 왼편에서 순서대로 위에서 본 모습, 전면에서 본 모습, 측면에서 본 모습이다. 하단의 그래프는 균형관절의 Roll, Yaw의 데이터를 그린 그래프이다. 점선으로 표시된 Yaw의 최대 최소 값이 $-25^{\circ} \sim +25^{\circ}$ 이내에 있음으로 선형화 모델의 타당성을 입증한다. 실제로 균형추의 높이방향 최대가속도는 $0.3m/s^2$ 정도로서 $9.8m/s^2$ 의 중력가속도의 영향에 가려지게 된다.



a) 4보행의 스틱다이어그램



b) 도립진자형 균형추의 관절값

그림 6. 스틱다이어그램과 균형추의 관절값

Fig 6. Stick diagram and angle of balancing joints

III. 결론 및 향후과제

도립진자형 균형관절은 보다 인간과 유사한 형태이고 휴머노이드 로봇의 간단한 해석을 위해 사용될 수 있는 유용한 보행로봇 모델로서 그 연구 가치가 있다고 할 수 있다. 본 논문은 균형추 움직임이 기존의 회전과 직진 관절을 갖는 모델과 특별한 차이가 없음을 검증하였고, 선형화의 타당성도 검증하였다. 도립진자형 보행로봇은 적은 균형추의 움직임으로 많은 ZMP의 보상을 할 수 있다. 그러므로 킥액션, 몸체의 추진으로서 전진방향의 ZMP보정 등의 방법을 이용하여 균형추의 움직임이 적도록 보행을 구현 한다면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10364-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] M. Vukobratovic, A. A. Frank and D. Juricic, "On the Stability of Biped Locomotion", IEEE Trans on Bio-medical Engineering, BME-17, pp.25-36, 1970.
- [2] Q. Huang, S. Kajita, N. Koyachi, K. Kaneko, K. Yokoi, T. Kotoku, H. Arai, K. Komoriya, K. Tanie, "A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped Robot", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.65-71, 1999.
- [3] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churng, Y. Y. Lee and W. A. Greven, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the single Support Phase", IEEE Robotics and Automation, pp.1646-1652, 1990.
- [4] K. H. Jin, "The Development of Balancing Motion Algorithm for a Biped Robot Using Pendulum Type Balancing Joints", Master Thesis, Inha Univ., 2000.
- [5] S. Kajita, et al., "Biped walking pattern generation by a simple three dimensional inverted pendulum model", IEEE Advanced Robotics, Vol.17, pp. 131-148, 2003.
- [6] T. Arakawa, T. Fukuda, "Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Robot using Genetic Algorithm through Energy Optimization", IEEE Proc. System, Man and Cybernetics, Vol.2, pp.1495-1500, 1996.
- [7] K. S. Han, "A study on the Optimal Trajectory Generation at Even Terrain Walking for Biped Robot Using Genetic Algorithm", Master Thesis, Inha Univ., 2003.