

도립진자형 이족보행로봇의 유연한 궤적 생성

강찬수[#], 노경곤^{*}, 공정식^{*}, 김진걸^{**}

A Smooth Trajectory Generation for an Inverted Pendulum Type Biped Robot

Chan-Soo Kang[#], Kyung-Kon Noh^{*}, Jung-Shik Kong^{*} and Jin-Geol Kim^{**}

ABSTRACT

This paper is concerned with smooth trajectory generation of biped robot which has inverted pendulum type balancing weight. Genetic algorithm is used to generate the trajectory of the leg and balancing weight. Balancing trajectory can be determined by solving the second order differential equation under the condition that the reference ZMP (Zero moment point) is settled. Reference ZMP effect on gait pattern absolutely but the problem is how to determine the reference ZMP. Genetic algorithm can find optimal solution under the high order nonlinear situation. Optimal trajectory is generated when use genetic algorithm which has some genes and a fitness function. In this paper, minimization of balancing joints motion is used for the fitness function and set the weight factor of the two balancing joints at the fitness function. Inverted pendulum type balancing weight is very similar with human and this model can be used for humanoid robot. Simulation results show ZMP trajectory and the walking experiment made on the real biped robot IWR-IV.

Key Words : ZMP(균형점), Balancing joint(균형관절), Genetic algorithm(유전 알고리즘)

1. 서론

지난 1 세기의 산업구조와 생활환경의 변화를 고려해 보면 로봇의 산업 및 가정용의 응용은 더욱 많은 부분을 담당하게 될 것이다. 그 중 이족보행로봇의 인간을 위한 모든 환경에 적응하기 쉬운 형태로 인하여 가장 폭 넓게 응용될 수 있다.

현재 사용되고 있는 이족보행로봇의 안정성 판별 기준으로는 COG(Center of gravity), ZMP(Zero moment point), FRI(Foot rotation indicator)등이 있다. ZMP 는 회전력의 중심점 개념으로서 간단하고 직

관적이며 동 특성도 포함하여 이족보행로봇의 안정도 판별 기준으로 가장 많이 이용되고 있다¹⁻⁵.

최근에는 ZMP 측정 및 제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 휴머노이드 로봇의 ZMP 궤적 생성에 참고하기 위하여 인간의 보행 ZMP 를 측정한 연구가 있다². 또한 휴머노이드 로봇의 향상된 ZMP 제어를 위하여 휴머노이드 로봇을 상체와 하체 두개의 도립진자로 모델링 하여 제어하는 연구도 있다⁶. 이러한 연구는 모두 보다 부드럽고 안정적인 보행을 구현하기 위한 접근방식의 하나이다. 부드러운 궤적을 생성하기 위해 자주

¹ 접수일: 2004 년 8 월 27 일; 게재승인일: 2005 년 5 월 13 일

[#] 교신저자: 인하대학교 대학원 자동화공학과

Email: kudas@dreamwiz.com Tel.(032) 860-8923

^{*} 인하대학교 대학원 자동화공학과

^{**} 인하대학교 전기공학과

사용되고 있는 방법 중 하나는 유전 알고리즘을 이용한 궤적 생성이다. 유전 알고리즘의 적합도 함수는 다양하게 정의 될 수 있다. 그 결과 에너지 최소화, 관절 움직임 최소화, 관절 토크 최소화 등, 다양한 적합도 함수가 사용되어 왔다⁷⁻¹¹. 본 논문은 균형 관절 움직임을 최소화 하는 목적함수를 사용하여 균형궤적을 생성하였으며, 두개의 균형관절에 가중치를 설정하여 보다 유연한 보행을 구현하였다. 이족보행로봇은 다 자유도 시스템이며 종속적 링크 구조로 인하여 완전한 수학적 모델식의 구성이 어렵다. 또한 독립진자형 균형관절은 높이 방향 움직임이 발생하여 생기는 비선형 항을 포함하게 된다. 이러한 점을 수식적으로 해결하기 위해서는 선형 근사화 등의 가정을 하여야 한다^{12,13}. 본 논문은 이러한 가정 없이 유전 알고리즘을 이용하여 생성된 균형궤적을 균형점 검증방정식을 통하여 이족보행로봇의 보행 안정성을 판별한다.

본 논문에서 사용된 IWR-IV는 독립진자형 균형관절을 갖고 있으며, 휴머노이드 로봇의 간략화 모델링의 형상을 가지고 있어서 유용한 보행로봇 모델로서 그 연구 가치가 있다. 비선형의 특성을 가지는 독립진자형 균형추의 5 차 다항식 균형 궤적에 대하여 유전 알고리즘을 적용한다. 또한 이를 모의 실험 및 실험을 통하여 인간과 유사한 균형관절을 가지는 로봇의 균형 보행을 제시한다.

2. 이족보행로봇의 모델링

2.1 이족보행로봇의 기구적 모델

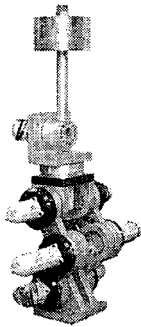


Fig. 1 Photo of biped IWR-IV

이족보행로봇 IWR-IV는 다리부 6 개 자유도, 균

형관절 2 개 자유도 총 8 개의 자유도로 구성되어 있다. 균형관절은 Roll 과 Yaw 로 이루어져 있으며 실제 사진은 Fig. 1 과 같다. 이족보행로봇은 다축 구동 시스템으로서 기구적 운동특성이 복잡하기 때문에 기구적 해석의 용이성을 위하여 몸체의 추진을 위한 지지각(Support leg), 다음 보행을 위해 내 딛는 유각(Swing leg), 균형점을 조절하는 균형관절(Balancing joints)의 세 부분으로 분리하였다. 각 부분은 Denavit-Hartenberg 의 강체링크 표시법을 사용하여 세 개의 단순기구 연쇄로 해석하였다. 전체 좌표계의 기준 좌표계는 균형관절의 기준 좌표계를 지면에 투영시켰으며 이 좌표계를 기준으로 다리부의 궤적계획, 선 가속도 표시, 균형관절의 위치를 표시한다. Fig. 2 는 IWR-IV의 좌표계모델과 질량모델이다.

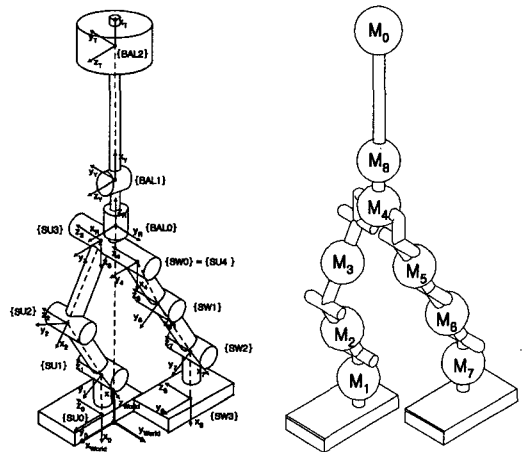


Fig. 2 Coordinate model and mass model

2.2 이족보행로봇의 보행 안정성 모델

이족보행로봇의 안정도 해석을 위해서는 각 링크 질점의 가속도 정보가 필요하며 본 논문은 벡터 개념에서 접근하는 뉴턴-오일러(Newton-Euler)식을 이용하였다. D'Alambert 원리에 의해 모멘트 운동 방정식을 정리하여 모멘트의 합이 제로가 되는 점이 ZMP 이다. 이를 적용하기 위해 각 링크의 하중은 무게중심에 집중하여 있고, 지지평면은 항상 평행하며, 외력이 없다고 가정하였다. 이러한 전제 하에 다음의 균형점 검증 방정식을 유도한다.

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i x_i (\ddot{z}_i + G_z) - \sum_{i=0}^8 m_i z_i \ddot{x}_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)}$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i y_i (\ddot{z}_i + G_z) - \sum_{i=0}^8 m_i z_i \ddot{y}_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)}$$

(1)

식 (1)은 XY 평면에서 각각 균형점 X_{ZMP} , Y_{ZMP} 를 구하는 식이다. i 는 질량의 인덱스로서 9 개의 질량을 표시하고 있으며, 인덱스 제로가 균형추이다. m_i 는 각 링크의 질량, x_i, y_i, z_i 는 각 질점의 직교 좌표계에서의 위치, $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 는 각 질점의 직교 좌표계에서의 선가속도, G_z 는 z 축으로 작용하는 중력가속도를 의미한다. 식(1)을 2 개의 자유도를 가지는 하나의 집중질량 균형추 m_0 에 대해 정리하면 식(2)와 같은 2 차 비선형 미분방정식의 균형추 운동방정식이 유도된다. 이는 기존의 원통형 균형추를 가지는 선형 미분 방정식과 비교하여 균형추의 중력 방향의 운동에 의한 비선형성을 가짐을 알 수 있다.

$$\ddot{x}_0(t) - \frac{(\ddot{Z}_0 + G_z)}{z_0} x_0(t) = \alpha(t)$$

$$\ddot{y}_0(t) - \frac{(\ddot{Z}_0 + G_z)}{z_0} y_0(t) = \beta(t)$$

(2)

3. 유전 알고리즘의 적용

유전 알고리즘은 자연의 진화 현상에 기초한 모델로서 전역적 최적화 알고리즘의 하나이다. 특징으로는 기존의 최적화 알고리즘이 탐색 공간에서 단일 해를 대상으로 한 것인데 반해, 병렬적인 집단(population)을 사용한다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해의 공간을 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형해 가는 과정이 생물학적 염색체가 가지는 특징들을 가진다. 생물학적 염색체에 해당하는 문자열들은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)을 거쳐 다음 세대의 새로운 자손을 생성한다. 탐색 공간에 대한 미분 가능성 등의 조건에 제약이

없다는 점과 전역적인 최적화 알고리즘이라는 특징에 의해 이족보행로봇의 연구에도 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 유전 알고리즘으로 2 진 알고리즘을 적용하였다. 2 진 알고리즘은 데이터를 '0'과 '1'의 두 가지 형태로 유지하여 처리하며 임의의 위치에서 교배율에 맞춘 교배와 돌연변이율에 맞춘 돌연변이를 통해 자료군을 최적 위치에 몰아간다. 본 논문에 적용된 교배와 돌연변이는 Fig. 3 과 같다.

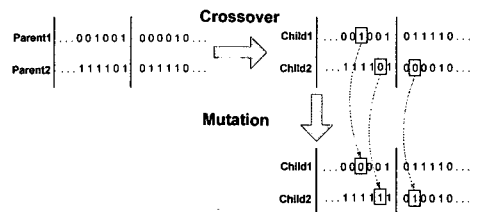


Fig. 3 Crossover and mutation at proposed algorithm

이족보행로봇의 단위보행 거리는 140mm 이고, 단위보행 시간은 3.5 초 이다. 각 단위보행은 2 초 간 몸체와 유각이 동시에 움직이며, 1.5 초간의 상변환 시간동안 다음 보행을 위한 준비를 한다. 상변환 시는 양다리 지지상태이며 균형추가 다음 보행의 초기 위치로 이동하게 된다. 균형관절의 궤적은 5 차 다항식을 이용하여 관절 좌표계에서 생성하였다. 균형관절의 궤적을 결정하기 위해 균형관절의 시작위치와 종료위치, 그리고 경유점에 해당하는 단위보행 2 초 시점 균형관절의 위치, 속도, 가속도를 유전자로 설정하였다. 보행의 안정성은 ZMP 가 지지각 발바닥 내부에 존재하는지의 여부로 판별하게 되는데, 안정 영역은 발바닥 에지(edge)에서 5mm 의 마진(margin)을 설정하였다.

Table 1 에서 적합도 함수를 살펴보면 $\Delta\theta_{Roll}$ 과 $\Delta\theta_{Yaw}$ 는 단위시간 Δt 동안 움직인 관절각의 변화 량을 의미한다. w_1 과 w_2 는 가중치(weight factor)이다. 기존의 목적함수는 원통형 균형추를 가지게 되어 균형관절이 중력에 대해 영향을 받지 않았으나¹⁴ 본 논문에서의 도립진자형 균형추와 같은 중력에 의해 강한 비선형성을 가지는 균형운동에 대하여 기존 목적함수는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 Roll 과 Yaw 의 가중치를 설정하여 중력의 영향에 따른 비선형성을 유전 알고리즘을 통해 기존의 보행결과와 비교를 통하여 가중치 설정의 타당성을 검증한다.

Table 1 Parameters of genetic algorithm in balancing joint

Parameter	Value
Population	50
Generation	50
Crossover	0.8
Mutation	0.05
Gene Num.	6
Fitness Function	$Fit = \sum \left(\frac{w_1 \Delta\theta_{Roll} + w_2 \Delta\theta_{Yaw} }{\Delta t} \right)$

4. 모의실험 결과

모의실험기와 유전 알고리즘은 Matlab 을 이용하여 작성하였다. Fig. 4 은 모의실험기의 흐름도이다. 경유점 정보는 지지각, 유각 각각의 시간에 따른 직교 좌표계의 3 차원 경유점 위치를 담고 있다. 모의실험기는 경유점 정보에 따라 다리부 궤적을 생성하고, 유전자에 의해 생성된 균형관절의 궤적을 통합하여 이족보행로봇의 안정도를 판별한다. 유전자에 의해 생성된 균형관절의 궤적은 적합도 함수에 의해 각각 적합도 값을 갖게 되며, 불안정으로 판명된 유전자는 최소의 적합도 값을 설정하게 된다.

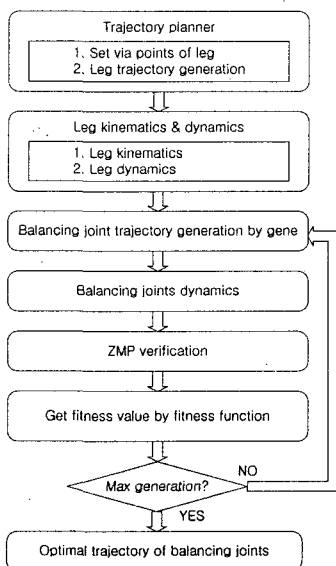


Fig. 4 Flow chart of simulator

모의실험 결과는 단위보행에 대한 결과임으로 단위보행을 살펴보겠다. 단위보행의 설정은 Fig. 5 와 같다. 단위보행은 4 종류가 정의되었으며 모의 실험기에서 생성된 단위보행 궤적을 조합하여 보행실험에 사용하였다. 6 보 보행을 위해서는 단위 보행 1 2 3 2 3 4 의 형태로 전체 보행이 구성된다.

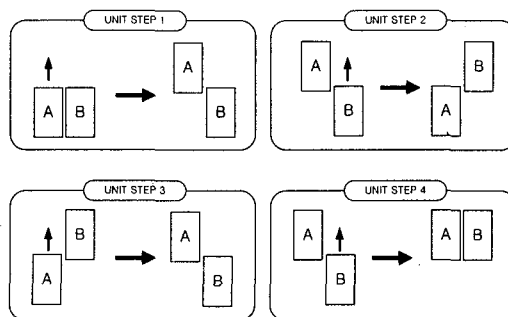


Fig. 5 Unit step setting

Fig. 6 은 모의실험 및 실제실험에 사용된 다리부 궤적을 보여주고 있다. 다리부 궤적은 가능한 부드럽게 생성하기 위하여 평지 보행을 가정하고 직교 좌표계에서 출발점과 도착점 외에 1 개의 경유점 만을 설정하였다. 단위보행 시간 3.5 초, 6 보 보행에 대한 다리부의 관절 값은 Fig. 6 과 같다.

단위보행 사이에서 끊기는 관절 값은 모의실험기 내에서 지지각과 유각이 바뀌며 생기는 현상이다. 3.5 초마다 1 구간으로 가정하면 (a)의 1, 3, 5 구간과 (b)의 2, 4, 6 구간이 오르면 다리의 관절 값에 해당한다.

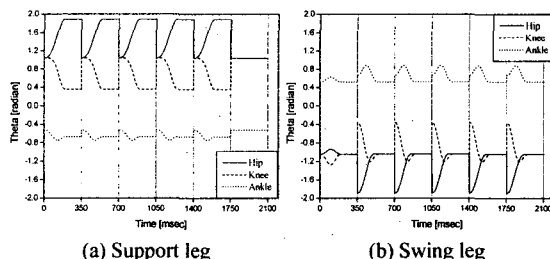
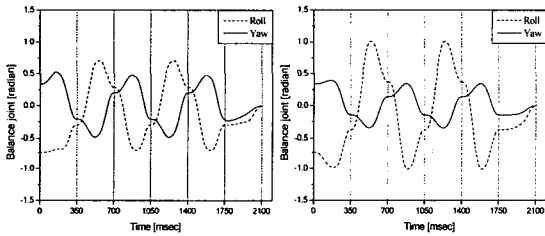


Fig. 6 Joint angles of legs

Fig. 7 은 유전 알고리즘을 이용하여 5 차 다항 식으로 생성된 균형관절의 값 이다. 기존 방법의 가중치는 $w_1 : w_2 = 0.5 : 0.5$ 이고 제한된 가중치는

$w_1 : w_2 = 0.1 : 0.9$ 이다. 이는 기존 방법을 도입 진자형 균형추를 가지는 로봇에 적용한 결과와 각 성분의 비율을 0.1 단위로 변화시켜 모의 실험한 결과를 비교하여 가중치의 값을 결정하였다. 가중치의 설정은 직교 좌표계에서 선가속도를 기준으로 설정하였다. 선가속도의 크기로 가중치를 설정할 경우 매 시간마다 중요도가 다르게 되며 근사적 값을 사용하여야 한다. 최대 선가속도를 감안하면 $w_1 : w_2 = 0.05 : 0.95$ 로 설정되어야 한다. 모의실험과 실제실험에서 이 세가지 가중치 설정에 대하여 모두 실험하였다. 0.1:0.9 와 0.05:0.95 의 모의실험 결과는 매우 유사하며, 보행 실험 시 가장 안정적인 보행을 구현한 0.1:0.9 의 결과를 기존의 결과와 비교하였다. Fig. 7의 궤적을 비교해 보면 Roll의 궤적은 기존 방법에서 변위가 적고, Yaw의 궤적은 제안된 방식에서 변위가 적다. 선가속도의 값에 큰 차이가 있는 것은 중력가속도의 영향이다.



(a) Previous method (b) Supposed method

Fig. 7 Trajectories of balancing joints

Fig. 8은 기존의 적합도 함수를 사용하여 생성된 균형추의 위치를 지면에 투영한 궤적이다. Start로 표시된 부분은 단위보행의 시작시점의 균형추 위치이며, Via로 표시된 부분은 단위보행 2.0초 시점의 균형추 위치이고, End로 표시된 부분은 단위보행의 끝 시점인 3.5초의 균형추 위치이며, 다음 단위보행의 시작 시점이다. 균형추의 궤적이 전반적으로 원점을 기준으로 등갈게 형성된 이유는, 관절 좌표계에서 궤적 계획을 하였고 IWR-IV의 균형관절이 Roll과 Yaw로 구성되어 있기 때문이다.

Fig. 9은 수정된 적합도 함수를 사용하여 생성된 균형추의 궤적이다. 시작점과 경유점이 원점 가까이 생성된 것을 확인할 수 있으며 이것으로 직교 좌표계에서 균형추의 움직임이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 6보 보행의 스틱 다이어그램이다. 각 Fig. 10 내의 우하부는 우측에서 좌측으로 보행하는 옆 모습이고, 좌측은 정면에서 본 모습, 상단은 위에서 본 모습이다. 목적함수를 수정한 보행은 균형추의 좌우 움직임이 감소한 것을 확인할 수 있다.

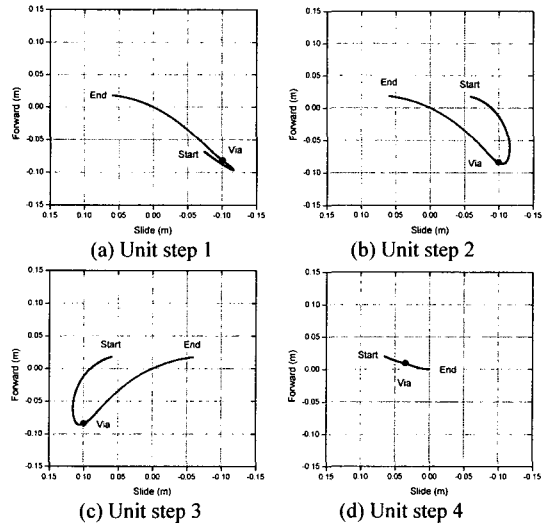


Fig. 8 Trajectories of Balancing weight by previous method

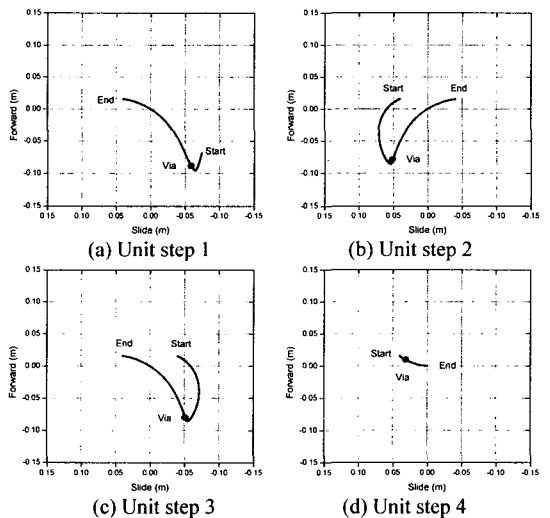


Fig. 9 Trajectories of balancing weight by proposed method

기존의 목적함수가 두 균형관절의 중요도에 관계없이 관절 값 변화량의 합을 최소화한 것에 반하여 수정된 목적함수는 Roll 과 Yaw 의 관절 값 변화량에 가중치를 0.1:0.9 로 설정하여 Yaw 의 움직임이 줄고, 상대적 중요도가 적은 Roll 의 움직임이 커진 결과이다. 목적함수의 수정으로 직교 좌표계에서 균형추 움직임의 변위가 작아졌다. 또한, 상단에서 본 균형추의 움직임을 비교해 보면, 기존의 균형추 궤적은 간격이 일정하지 않은데 이것은 특정 부분에 큰 속도가 발생하는 것을 의미한다. 이에 반하여 수정된 목적함수에 의한 균형추 궤적은 보다 간격이 고르게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. Roll 과 Yaw 의 0.1:0.9 가중치 값이 최적이라 할 수는 없지만 보다 부드럽고 적은 움직임을 확인할 수 있다.

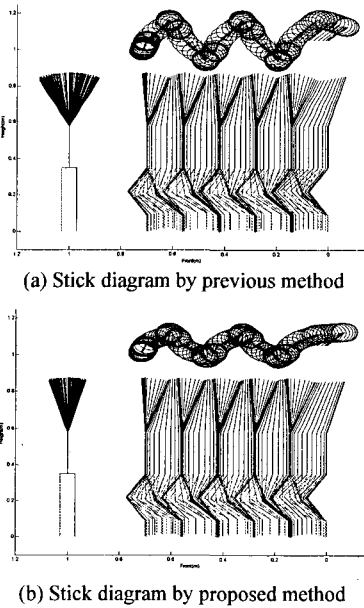


Fig. 10 Comparison of stick diagram

이족보행로봇의 보행 안정성을 판별하는 기준으로 사용한 균형점 궤적은 식 (1)을 이용하였으며, Fig. 11 에 도시하였다. 사각형 모양의 발바닥 자취는 안정 영역에 해당한다. 한 다리 지지 상태일 경우는 한 개의 사각형이 안정 영역이며, 두 다리 지지 상태일 경우는 두개의 사각형내의 임의의 점들을 선분으로 연결할 때 생기는 모든 점들이 안정 영

역이 된다. 각, 단위보행의 시작 시점에는 작은 리본 모양의 균형점 궤적을 확인할 수 있는데 이것은 정지해있던 질량의 이동순간 혹은 이동하던 질량이 정지하는 순간에 발생하는 가속도의 반작용에 의한 결과이다. 이러한 균형점 궤적은 단위보행 시작시점 전후에 발생하고 있고, 제안된 방법에서 보다 적게 발생하고 있다. 균형점 결과는 모두 각 단위보행 2 초 직전의 시점에 발바닥 앞부분 5mm 까지 최대한 균형점이 전진하였다.

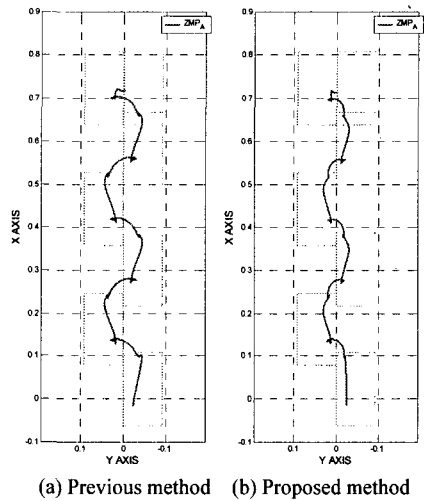


Fig. 11 Comparison of ZMP trajectories

균형관절의 궤적 생성시 유전알고리즘의 목적함수를 수정함으로 인하여 직교 좌표계에서 균형추의 움직임이 크게 감소함과 동시에 균형점의 좌우 움직임이 감소하였고, 보다 유연한 균형추의 궤적을 확인하였다.

5. 보행실험 결과

모의실험기에서 생성된 관절 값을 Fig. 12 의 실험 시스템의 구성으로 IWR-IV의 보행실험을 실시하였다. 각 관절의 구동기는 AC 서보모터(servo motor)로서 무릎부 모터의 정격토크는 1.3Nm 이고 그외 다른 모터는 모두 0.64Nm 이다. 각 부분 감속기의 감속비는 발목부 100:1 그외 다른 부분은 모두 60:1 이다. PC 에서 생성된 8 축에 대한 궤적은 MMC (Multi motion controller)보드와 모터 드라이버를 거쳐 AC 서보모터의 제어신호로 사용된다.

각 서보 모터의 엔코더는 모터의 실제 위치 값을 PC 까지 전하여 레퍼런스 관절 값과 실제 모터의 위치를 관절 값으로 변환한 차이로서 실제 오차를 추정하게 된다.

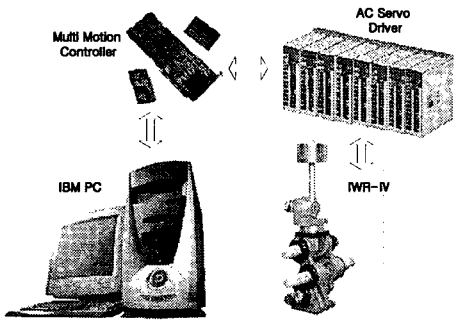


Fig. 12 Configuration of experimental system

Fig. 13 과 Fig. 14 는 IWR-IV의 보행 실험의 사진이다. 약 2 초 간격의 보행 사진을 확인 할 수 있다.

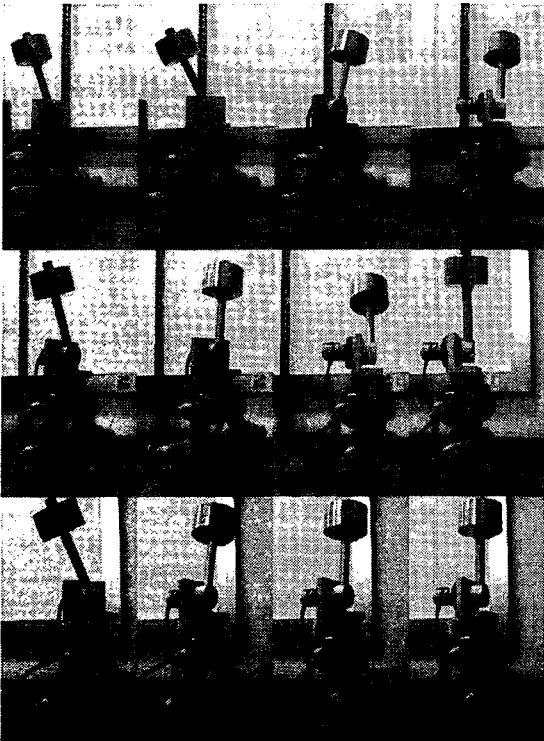


Fig. 13 Photos of gait by previous method

기존의 균형관절 변화량 최소화의 보행 실험에서는 균형추의 움직임이 크게 발생한 결과 보행 로봇이 좌우로 흔들리는 현상이 있었지만, 수정된 목적함수를 사용한 보행 실험에서는 흔들림 현상이 감소하였다. 이런 흔들림 현상은 단위보행 2 초 부터 3.5 초 즉, 두 다리 지지 상태일 경우에 발생하였다. 두 다리 지지 상태일 경우 안정영역이 넓음에도 불구하고 이러한 흔들림 현상이 발생한 것은 Fig. 10 에서 확인한 바와 같이 기존의 균형추 궤적이 2 초와 3.5 초 사이에 큰 속도 값을 가진 결과이다. 흔들림 현상의 다른 요인으로는 유각과 지면의 충격량에 의한 영향과, 모의실험에서 확인 하였던 균형점 궤적의 거친 부분의 영향이다. 균형점 궤적의 작은 리본 모양의 거친 부분 또한 수정된 목적함수가 적게 발생함은 Fig. 11 에서 확인 하였다.

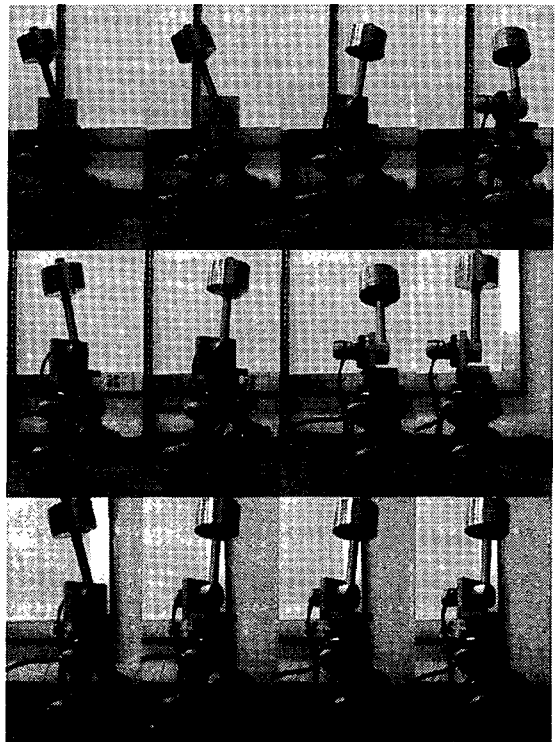


Fig. 14 Photos of gait by proposed method

Fig. 13 와 Fig. 14 의 보행사진을 비교해 보면, Fig. 14 의 제안된 방법에 의한 보행실험에서 균형 추의 움직임이 감소한 것을 확인할 수 있다. 모의

실험 결과와 실제실험의 차이점은 각 관절의 목표 궤적과 실제 구동기의 위치 차이 값인 오차의 영향과 유각과 지면의 충격, 전선의 영향 등이 있다.

각 관절의 오차 값은 Fig. 15 와 Fig. 16 에서 비교하였고, 충격이 적도록 유각이 지면에 닿는 순간의 발바닥 속도, 가속도는 제로가 되도록 궤적계획하였다. Fig. 15 와 Fig. 16 에서 보행실험 시 발생한 관절 오차를 보여주고 있다.

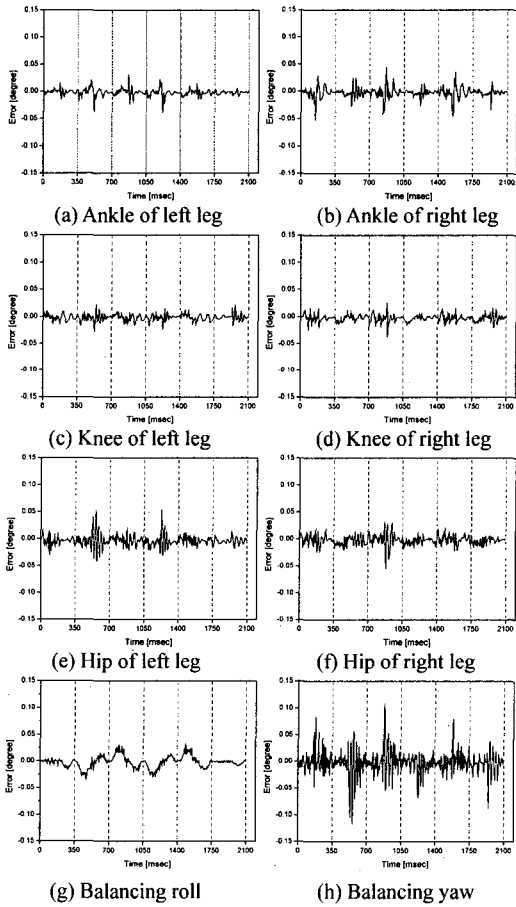


Fig. 15 Errors by previous method

다리부에서 발생한 오차 결과를 확인해 보면 두 가지 보행 패턴에 동일한 다리부 궤적을 사용하였기 때문에 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다. 다리부 궤적의 최대 오차는 동일하게 단위보행 1.75 초 부분에서 발생하고 있는데, 이 시점 다리부 궤적의 특징으로는 지지각의 발목, 무릎, 힘

의 관절 가속도가 가장 큰 절대값을 가지고 있다. 유각이 지면과 충돌하는 단위보행 2.0 초 시점에도 전반적 오차가 크게 나타나고 있다. Fig. 15 와 Fig. 16 의 왼편 다리의 오차를 확인해 보면, 지지각인 2, 4, 6 구간에서 가장 큰 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 오른편 다리의 오차 역시 지지각인 1, 3, 5 구간에서 크게 발생하였다. 부위별 오차는 힘의 오차가 가장 크고 거칠게 발생 하였다. 발목과 무릎에 비해 토르카가 적은 힘의 오차가 크게 발생한 이유는 균형추의 움직임에 의한 영향을 가장 많이 받은 결과로 보인다. 균형 Yaw 관절의 오차가 크게 발생한 시점에 지지각 무릎부분 오차도 크게 발생하고 있다.

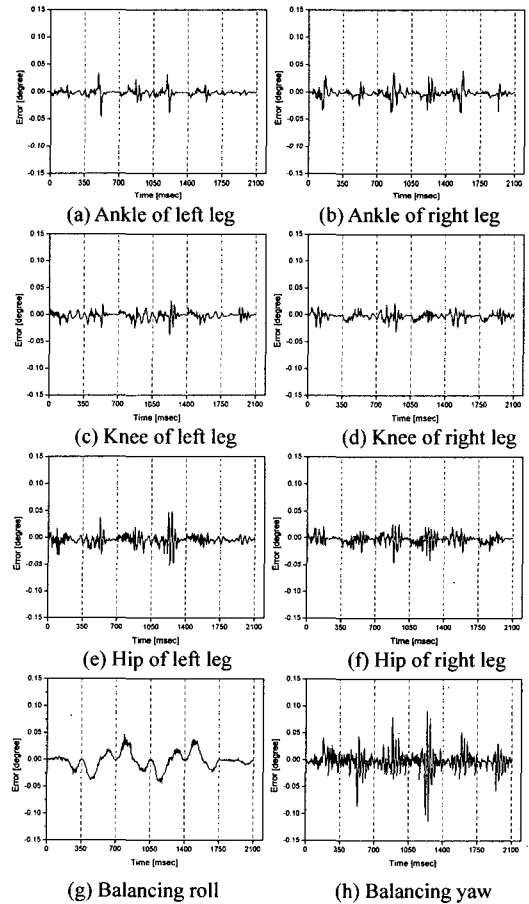


Fig. 16 Errors by proposed method

균형관절의 오차를 비교해 보면 균형 Roll 관절

의 오차는 기존의 방법에서 적게 발생하였다. 상대적으로 제안된 방법보다 Roll 의 중요도가 높게 평가된 결과이다. 균형 Yaw 관절의 오차는 발생 빈도와 오차의 크기가 감소한 것을 확인할 수 있다. 균형 Yaw 관절 오차가 최대 발생 시점은 단위 보행 1.75 초 부분이며 이때 균형 Yaw 관절 궤적의 특징으로는 최대 관절 값을 가지고 있다. 균형 Yaw 관절이 최대 관절 값을 가지는 것은 중력 가속도의 영향을 크게 받는 것을 의미한다. 이 결과도 다리부 최대 오차 발생 이유와 동일한 최대 가속도 발생 시점이라 볼 수 있다.

두 균형관절의 중요도를 수치로 확인하기 위하여 각 균형관절 오차와 다리부 관절 오차간 상관관계를 확인해 보았다. $p < 0.05$ 설정하였다. Fig. 15의 기존 보행실험 결과의 Roll 은 (c), (f)와 Yaw 는 (a), (b), (c), (d), (e), (f)의 모든 다리관절과 유의한 상관관계를 보였다. Fig. 16의 제안된 보행실험 결과의 Roll 은 (c), (f)와 Yaw 는 (b), (c), (d), (e)와 유의한 상관관계를 보였다. 균형관절 오차의 표준편차를 비교해보면 기존 보행실험 Roll 은 0.011rad, Yaw 는 0.023rad 이고 제안된 보행실험 Roll 은 0.016rad, Yaw 는 0.019rad 이다. 표준편차의 합은 두 가지 보행패턴에 대하여 거의 차이가 없지만, 제안된 방법은 상대적 중요도가 높은 Yaw 의 오차가 감소한 결과 보행실험 시 적은 흔들림 현상이 발생하여 안정적 보행을 수행하였다.

6. 결론

도립진자형 균형관절은 인간과 유사한 형태이고 휴머노이드 로봇의 해석을 위해 사용될 수 있는 유용한 보행로봇 모델로서 그 연구 가치가 있으나 균형 운동에 있어서 비선형성은 안정적인 보행의 구현을 위하여 기존과 다른 해결 방법을 요구한다. 이에 본 논문은 유전 알고리즘을 이용하여, 기존의 적합도 함수와 비선형성을 극복하여 보다 안정적인 적합도 함수로 생성된 균형관절 궤적을 모의실험과 보행실험으로 비교하였으며, 두개의 균형관절에 가중치를 설정하여 보다 부드러운 보행을 구현하였다.

향후 과제로는 단위보행 간의 연속적인 동작을 최적화 하기위한 연구 및 양 발을 이용한 자연스러운 상 변환에 의한 균형점 보상 및 제어에 관한 연구와 실시간 환경 정보에 대해 적응 가능한 보

행 알고리즘에 관한 연구 등이 필요하다.

후 기

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

참고문헌

1. Takanishi, A., Ishida, M., Yamazaki, Y. and Kato, I., "The Realization of Dynamic Walking by The Biped Walking Robot WL-10RD," Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 3, no. 4, pp. 325 - 336, 1985.
2. Erbatur, K., Okazaki, A., Obiya, K., Takanishi, T. and Kawamura, A., "A Study on the Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots," Advanced Motion Control, 2002 7th International Workshop on 3 - 5, pp. 431 - 436, 2002.
3. Goswami, A., "Foot Rotation Indicator (FRI) point : A new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robot," IEEE ICRA, pp. 47 - 52, 1999.
4. Okumura, Y., Tawara, T., Endo, K., Furuta, T. and Shimizu, M., "Realtime ZMP Compensation for Biped Walking Robot using adaptive Inertia Force Control," IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 335 - 339, 2003.
5. Lim, S.H. and Kim, J.G., "Control of a Biped Walking Robot using Zero Moment Point Formulation," Trans. KIEE Vol. 48A, No.8, pp 1022 - 1030, 1999.
6. Napoleon., Nakamura, S. and Sampei. M., "Balance Control Analysis of Humanoid Robot based on ZMP Feedback Control," IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2437 - 2442, 2002.
7. Chevallereau, C., Formal'sky, A., and Perrin, B., "Low Energy Cost Reference Trajectories for a Biped Robot," IEEE ICRA, pp. 1398 - 1404, 1998.
8. Arakawa, T. and Fukuda, T., "Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Robot using Genetic Algorithm through Energy Optimization," IEEE Systems, Man and cybernetics, pp. 1495 - 1500, 1996.
9. Cheng, M.Y. and Lin, C.S., "Genetic Algorithm for

- Control Design of Biped Locomotion,” IEEE Proc. System, Man and Cybernetics, pp. 1315 – 1320, 1995.
10. Choi, S.H., Choi, Y.H. and Kim, J.G., “Optimal Walking Trajectory Generation for a Biped Robot Using Genetic Algorithm,” Pro. Of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1458 – 1459, 1999.
 11. Arakawa, T., Fukuda, T., “Natural motion generation of biped locomotion robot using hierarchical trajectory generation method consist of GA, EP layers,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 211 – 216, 1997.
 12. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H., “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation,” IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems, pp. 239 – 246, 2001.
 13. Noh, Kyung-Kon and Kim, Jin-Geol, “A Stability Analysis of a Biped Walking Robot about Balancing Weight,” Journal of the Korean Society of Precision Eng, Vol. 22, No. 1, pp. 89 – 96, 2005.
 14. Kim, Jin-Geol, Choi, Sang-Ho and Park, Ki-Heon, “Optimal Gait Control for a Biped Locomotion Using Genetic Algorithm,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3046 Part IV, Springer pp. 29–38, 2004.