

유전 알고리즘을 이용한 이족보행로봇의 균형 궤적 생성에 관한 연구

A Study on the Generation of Balancing Trajectory for Biped Robot using Genetic Algorithm

김 종 태, 김 진 겐
(Jong Tae Kim and Jin-Geol Kim)

Abstract : This paper is concerned with the generation of a balancing trajectory for improving the walking performance. The balancing motion has been determined by solving a second-order differential equation. However, this method caused some difficulties in linearizing and approximating the equation and had restrictions on using various balancing trajectories. The proposed method in this paper is based on the genetic algorithm for minimizing the motions of balancing joints, whose trajectories are generated by the fifth-order polynomial interpolation after planning leg trajectories. The real walking experiments are made on the biped robot IWR-III, developed by our Automatic Control Laboratory. The system has 8 degrees of freedom and the structure of three pitches in each leg, and one roll and one prismatic joint in the balancing joints. The experimental result shows the validity and applicability of the new proposed algorithm.

Keywords : balancing trajectory, genetic algorithm, biped robot

1. 서론

오늘날 산업화의 급속한 발전에 따라 로봇의 비중이 점차 증가하고 있으며 구조와 용도 및 기능에 있어서도 많은 다양화가 진전되어 왔다. 특히, 보다 다양한 환경에서 작업을 가능하게 하기 위해서 인간과 같이 보행 가능한 로봇 시스템 구현에 대한 요구가 대두되고 있다. 이족보행로봇은 여유 관절을 갖는 링크의 해석 등의 기구적 특성과 운동 특성의 해석은 물론, 다양한 궤적 생성에 따른 주요 관절의 연계성 있는 동작, 사람의 다리를 대신하는 의족의 개발, 그리고 자율주행을 위한 비전 시스템과 균형유지를 위한 증력센서 및 각종 센서의 장착 등, 인간의 보행을 모델로 하는 만큼 다양한 연구가 수행되고 있다[1-6].

이족보행로봇은 다리부와 균형유지를 위한 균형관절로 구성되며 균형관절은 직진운동관절(prismatic joint)과 회전운동관절(revolute joint)의 두가지 형태가 있다. 회전운동관절의 경우 피치와 롤로 구성되며 반구형태의 운동범위를 갖는다. 이런 종류의 균형관절은 외형이 인간의 형상과 비슷한 장점이 있으나 균형추의 균형운동으로 인하여 고차의 비선형성을 내포하게 되므로 균형방정식의 선형화 및 해석이 어려운 단점이 있다. 직진운동관절로 구성된 균형관절의 경우 대부분 하나의 직선운동기구와 롤로 구성된 것으로 무게 중심의 위치 조절을 목적으로 하였다[7-9]. 이 경우 고차원의 비선형성을 내포하고 있는 피치-롤로 구성된 회전운동관절보다는 비교적 용이하게 수학적 모델을 만들 수 있으나 역시 선형화 및 근사화에 따른 문제와 경제치

설정에 대한 어려움이 있었다[10]. 이런 문제로 인하여 해석식으로부터 균형관절의 운동을 구하는데 많은 제약이 따르며, 이를 해결하기 위해 Takamishi[11]는 회전운동관절의 높이 방향의 움직임을 상수화 하였으며, 직진균형관절을 가진 이족보행로봇의 경우도 보행시 균형관절의 높이를 일정하게 유지하도록 보행 계획을 하는 연구가 수행되었다[10].

기존의 알고리즘은 다리부와 균형점(ZMP : Zero Moment Point)의 궤적을 계획하고 이로부터 균형추의 움직임을 해석식을 통하여 자동으로 설정하였다[12][13]. 그러나, 본 논문에서 제시하는 개선된 알고리즘은 균형관절 궤적을 독립적으로 생성하며, 균형점 검증식을 통한 안정도 확인 과정으로 이루어진다. 즉, 해석식과 상관없이 경유점만을 이용하여 균형관절의 움직임을 5차 다항식으로 생성하고 유전 알고리즘을 이용하여 이를 최적화 함으로써 해석식을 이용해 균형운동을 구할 때 발생하는 문제를 미연에 방지하였다. 이 방법은 기구장치로 인한 구속조건을 만족하도록 균형관절 궤적을 생성하므로 기존 알고리즘에서 요구하는 별도의 균형관절 궤적 재구성 과정을 필요로 하지 않는다. 또한, 스핀 모멘트로 인한 보행 방향이 변화하는 현상 및 그 외 목적하는 여러 특성을 최적화하도록 균형 궤적을 계획할 수 있다. 본 논문에서 균형궤적 최적화는 유전 알고리즘을 이용한 균형관절의 움직임을 최소화 시키는 균형관절 궤적 생성을 의미한다. 이로부터 기존의 궤적과 비교하며, 스핀 모멘트와 균형관절의 관계를 고찰하고 모의 실험과 실제 구현을 통하여 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 이루어져 있다. 2장에서 기존 보행 알고리즘과 새로운 보행 알고리즘을 비교하고, 3장에서 유전 알고리즘을 이용한 균형 궤적

접수일자 : 1999. 2. 1., 수정완료 : 1999. 8. 17.

김종태, 김진겐 : 인하대학교 지동화공학과

※본 연구는 1998년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

생성 알고리즘을 다루었다. 4 장에서는 실험기기의 구성, 그리고 5 장에서 모의실험 및 실제 보행실험의 결과를 제시하였다.

II. 이족보행로봇의 기구모델

1. 보행 알고리즘

보행을 위한 중요한 세가지 인자로는 다리의 궤적, 균형점의 궤적, 그리고 균형관절의 움직임이 있으며, 이들은 독립적으로 계획될 수 있으나 서로 연계성을 가지고 있으므로 보행 가능 영역 안에서 안정성을 고려하여 보행 계획을 해야 한다. 이족보행로봇의 보행 계획의 첫 단계는 지지각과 유각이 설정된 경유점들을 지나도록 하는 보행 궤적의 생성이다. 이 다리부의 움직임은 보행의 형태 및 구동 가능 여부를 결정짓는다 따라서 보폭의 거리, 속도, 장애물 등을 고려하여 궤적 계획을 해야 한다. 궤적이 결정되면 역기구학을 통하여 관절 변수들을 구하고 이 값들을 이용하여 동역학을 풀어 각 링크의 가속도를 구할 수 있다. 동역학을 풀기 위한 방법으로 뉴턴-오일러 방식을 사용하였으며, D'Alembert 원리로부터 이끌어 낸 각 링크의 운동 방정식으로부터 균형관절의 움직임을 구하였다. 이 때, 균형관절의 궤적을 구하기 위하여 균형점의 궤적 계획이 선행되어야 한다. 균형점은 안정도 확보를 위해 지면과 발바닥의 접촉면 안에 존재하도록 계획한다. 이 상으로부터 얻어진 운동 방정식은 이차 미분방정식으로서 이를 풀기 위해 근사화 및 선형화가 필요하며, 유한 차분법(finite difference method)이나 해석적인 방법으로 해를 찾게 된다. 이 미분 방정식의 해는 균형관절의 시간에 따른 위치이며 이로부터 역기구학과 동역학을 풀어 전체 링크의 관절변수와 운동 특성을 구하게 된다. 상기 방법으로부터 구해진 균형관절의 움직임에 대한 타당성은 실제 균형점이 안정영역을 만족하는지에 대한 검증으로 입증할 수 있다[13]. 그림 1은 이러한 일련의 과정을 나타낸 흐름도이며 기존의 보행 알고리즘의 전반적인 내용을 표현한다.

보행 알고리즘을 그림 1과 같이 크게 세 부분으로 분류하면 PART I 은 일반적인 로봇 시스템의 해석으로 다리부의 궤적 계획과 기구학, 동역학 해석을 다루고

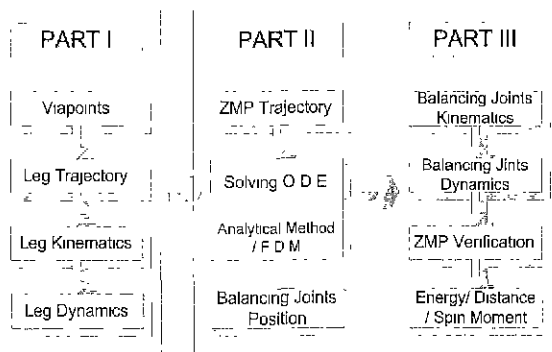


그림 1. 보행알고리즘의 흐름도.
Fig. 1. Flowchart of walking algorithm.

있다. PART II는 보행 로봇에서만 나타나는 부분으로 등특성 해석으로부터 균형관절의 움직임을 구하게 된다. 따라서 균형관절의 궤적을 생성하는 PART II는 보행 로봇의 보행 알고리즘에 있어서 가장 중요하며, 수학적 모델링과 이에 대한 해석이 심도있게 연구되어야 할 부분이다. 특히 해석적 방법에 있어서 임의의 시간 동안의 각 링크의 움직임이 작아야만 선형화된 식이 정확해지므로 오차를 발생시키는 원인이 되기도 한다. 이 비선형 방정식의 풀이와 함께 문제시 되는 또 한가지는 균형관절의 기구적 제한이다. 이는 균형관절의 구동 가능 범위 및 지속 보행의 경우 지지각과 유각이 바뀌는 상변환 시에 균형추가 균형관절 좌표계의 원점을 지나 이동해야 하는 등의 구속 조건이다. PART III에서는 전 과정에서 구해진 균형추의 움직임에 대해 기구학, 동역학 해석을 수행하며 실제 균형점 계산을 통한 안정도 검증을 수행한다. 이러한 모든 과정 후에 에너지, 이동 거리, 스핀모멘트 등의 정보를 구할 수 있다.

보행로봇에서 가장 중요한 것은 보행시의 안정도 유지이다. 본 논문에서는 균형 관절의 움직임을 결정 짓는 PART II의 문제점을 해결하는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 이는 기존의 보행 알고리즘을 변형한 것으로 PART II 부분을 하나의 미지의 함수로 고려하여 다리부의 궤적이 결정되면 유전 알고리즘을 이용하여 비선형 방정식을 풀지 않고도 최적의 균형추 궤적을 결정하도록 한다 따라서 식을 풀기 위한 구속조건과 기구적 제한 요소에 의해 발생하는 문제를 피할 수 있다. 그림 2는 기존의 알고리즘과 새로운 알고리즘의 비교 흐름도이다.

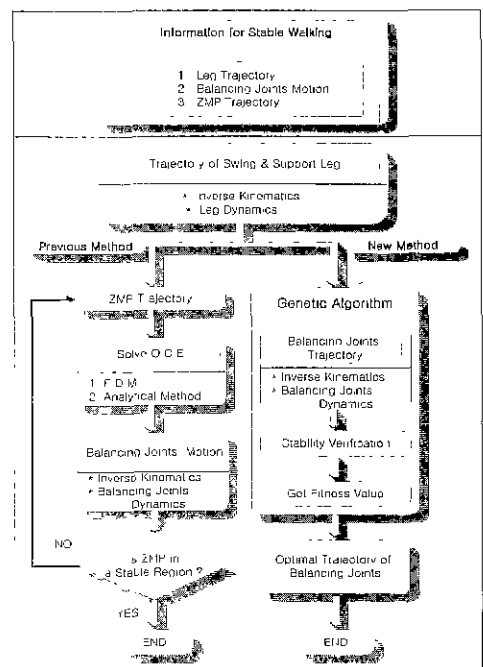


그림 2. 보행알고리즘의 비교.
Fig. 2. Comparison of two algorithms for walking

2. 수학적 모델 및 스핀 모멘트

D'Alembert의 원리를 적용하여 IWR-III 운동의 기본식을 유도할 수 있으며, 그림 3의 질량모델과 기구학적 모델에 맞게 표현하면 다음과 같다[10].

$$M_{Tx} = -\sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(y_i - y^*) + \sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{y}_i + G_y)z_i = 0 \quad (1)$$

$$M_{Ty} = \sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{z}_i + G_z)(x_i - x^*) - \sum_{i=0}^8 m_i (\ddot{x}_i + G_x)z_i = 0 \quad (2)$$

$$M_{Tz} = \sum_{i=0}^8 m_i [(x_i + G_x)(y_i - y^*) - (y_i + G_y)(x_i - x^*)] + m_8 R^2 \ddot{\theta} \quad (3)$$

이 때, m_i 는 i 번째 링크의 질량을 의미하며, x_i, y_i, z_i 는 전체 기준 좌표계에서 i 번째 링크의 각 축방향 거리를 나타낸다. M_{Tx}, M_{Ty}, M_{Tz} 는 각 축 방향의 전체 모멘트를 의미하며, G_x, G_y, G_z 는 각 축 방향의 중력 가속도를 의미한다. x^*, y^* 는 각각 진행방향과 이에 수직인 방향에 대한 균형점의 위치 성분이다. 균형점은 X-Y 평면상에 존재하므로 균형점의 Z 방향 성분은 0이다. 그리고 (1)과 (2)에서 M_{Tx}, M_{Ty} 는 로봇이 균형을 유지하기 위해서 0이어야 한다. (3)에서 우변의 첫째 항은 전체 기준 좌표계에서 각 링크들의 Z 방향 모멘트 합을 나타내며, 둘째 항은 롤의 회전에 의한 관성모멘트를 나타내고 있다. 이 때, R은 균형관절 좌표계의 원점에서 균형추 질량중심까지의 거리이고, θ 는 롤의 회전각이다. 이러한 회전 성분은 보행시 스핀 모멘트로 작용하여 로봇의 발바닥과 지면과의 마찰력이 이보다 작을 경우 로봇이 회전하여 보행 방향을 변화 시키는 원인이 된다. 이 현상은 보행 속도가 빨라질수록 증가하므로 보행 성능을 향상시키기 위해선 반드시 감소시켜야 한다. 이를 위한 방법으로 지면과의 마찰력 증가를 위한 발바닥 부분의 재설계나 균형관절에 스핀 모멘트를 보상할 수 있는 별도의 회전 롤 관절이 요구되어진다. 스핀 모멘트는 Z 방향 모멘트들의 총합으로써, 관성 모멘트로 직접적인 영향을 미치고 있는 균형관절의 움직임도 다리부 움직임과 연관 지어 스핀 모멘트를 줄이도록 설정해야 한다.

IWR-III 시스템은 회전관절과 직진관절로 이루어진

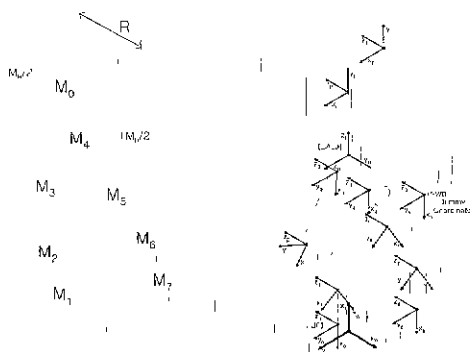


그림 3. 질량모델과 기구학적 모델.
Fig. 3. Mass model and Kinematics model

균형관절을 움직여서 몸체와 유각의 움직임에 대한 보상모멘트를 발생시켜 균형점을 중심으로 안정을 이루게 된다. (1)과 (2)로부터 각각 x^* 와 y^* 를 구하여 보면 다음과 같다.

$$x^* = \left[\frac{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z) x_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\dot{x}_i + G_x) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z)} \right] \quad (4)$$

$$y^* = \left[\frac{\sum_{i=0}^8 m_i (\dot{z}_i + G_z) y_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\dot{y}_i + G_y) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z)} \right] \quad (5)$$

위의 두 식은 다리의 움직임과 균형관절의 움직임에 의해 발생하는 보상 모멘트가 0이 되는 점으로써 실제 균형점을 표현하는 균형점 검증 방정식이다[14][15]. (1)과 (2)로부터 균형추의 질량 m_0 를 분리하여 기지의 항과 미지의 항으로 나누고 정리하면 (6)과 (7)같이 2계 비제차 미분 방정식으로 표현된다.

$$\ddot{x}_0 - \left[\frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \right] x_0 = - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z) x_{zmpD}}{z_0} - G_x + \left[\frac{\sum_{i=1}^8 m_i (z_i + G_z) (x_i - x_{zmpD}) - \sum_{i=1}^8 m_i (\dot{x}_i + G_x) z_i}{m_0 z_0} \right] \quad (6)$$

$$\ddot{y}_0 - \left[\frac{(\ddot{z}_0 + G_z)}{z_0} \right] y_0 = - \frac{(\ddot{z}_0 + G_z) y_{zmpD}}{z_0} - G_y + \left[\frac{\sum_{i=1}^8 m_i (\dot{z}_i + G_z) (y_i - y_{zmpD}) - \sum_{i=1}^8 m_i (\dot{y}_i + G_y) z_i}{m_0 z_0} \right] \quad (7)$$

이 때 x_0, y_0, z_0 는 전체 기준 좌표계에서의 균형추 질량 중심의 위치 벡터이고, x_{zmpD}, y_{zmpD} 역시 전체 기준 좌표계를 기준으로 계획한 원하는 균형점 제적이다. 기존의 알고리즘에 있어서는 균형점의 제적 생성 후 (6)과 (7)의 해석식을 통하여 균형관절의 움직임 x_0, y_0 를 결정한다. 이 때 식의 선형화 및 경계치 문제가 발생하며 이를 해결하기 위한 연구가 수행되었다. 본 논문에서는 해석식과 무관하게 5차 다항식을 이용한 균형관절의 제적 생성이 선행되고 실제 균형점 검증식 (4)와 (5)를 이용하여 안정도 검증을 함으로써 해석식을 푸는 과정에서 발생할 수 있는 여러 문제점을 고려할 필요가 없다.

III. 균형 제적 생성

1. 균형 제적

이족보행로봇의 보행에서 가장 중요한 부분은 균형을 유지하여 안정성을 확보하는 것이다. 균형 제적이란 로봇의 균형을 유지하여 안정성을 확보해주는 로봇 요소들의 움직임으로써 균형점 제적과 균형관절 제적으로 나누어진다. 균형점은 로봇의 발바닥 면적을 안정영역으로 가지며 작은 변화에도 로봇 전체에 미치는 영향이 크다. 보행시 안정성을 유지하는 균형 제적은 동일한 다리 제적에 대해서 다양하게 생성할 수 있으며 균형 제적에 따라 스핀모멘트나 에너지 등에 변화를 가져와 로봇의 보행 특성에 큰 영향을 준다 따라서 적절한 균형 제적 설정은 보행 향상을 위해 반드시 요구되어진다. 균형점 제적을 설정하고 해석식을 풀어 이에 따른 균형추의 운동을 구현하면 안정 영역 내에서 균형점의 제적 계획을 하였으므로 안정성이 크게

보장되는 반면, IWR-III가 갖는 균형관절의 기구적 구속을 충족시키기에는 부적절하다. 이 구속 조건은 상변환시 균형추가 균형관절 좌표계의 원점을 통과하여 다음 보행을 위한 초기 위치로 움직여야 하는 데서 기인한다. 균형점을 한 점에 고정하지 않고 궤적으로 선정함으로써 상변환 시간을 줄이는 이점을 얻을 수 있지만 균형점을 이용한 균형추의 제어 및 최적화는 구속조건에 의한 한계를 가지며 한 걸음 보행시의 균형점 최적 궤적이 다음 걸음을 위한 상변환 과정에서 오히려 좋지 않은 결과를 가져올 수 있다. 따라서 연속 보행 시 걸음간의 연관성을 고려하지 않은 최적 궤적은 의미가 없으며 이 구속조건은 중요성을 갖는다

이상에서와 같이 지속 보행에 있어서 균형점을 이용한 균형관절 제어보다 균형관절의 최적 궤적을 직접 생성하는 것이 훨씬 용이함을 알 수 있다. 본 논문에서는 특이점 문제를 방지하기 위해 관절 좌표계 상에서 두개의 관절 변수를 이용하여 균형관절의 궤적 계획을 하였다

2. 유전 알고리즘을 이용한 궤적 생성 및 최적화

균형관절의 궤적 계획은 부드러운 곡선을 얻기 위해 시간에 대한 5차 다항식으로 표현하였다. 특히 5차 곡선은 3차 곡선과 비교해 볼 때 여러 면에서 우수성을 보인다. 즉, 궤적 생성시 변위 비교에서는 3차와 5차의 차이가 적다 그러나 가속도는 변위에 대한 2계 미분 치에 해당하므로, 5차 곡선의 경우는 3차 함수의 부드러운 곡선을 형성하지만 3차 곡선의 경우는 가속도가 1차 함수로 그 충격량(jerk)을 고려하면 시스템에 좋지 않은 영향을 미친다. 특히 경유점에서는 영향이 매우 크다. 본 논문에서는 각 단위 걸음에 대해 균형관절 궤적을 생성하였고 지속 보행은 이들의 조합으로 이루어진다. 균형관절 궤적의 시작점을 미리 설정하고, 균형관절의 중심을 경유점으로 설정하여 구속조건을 만족하였으며, 유각이 보행을 마치고 상변환이 발생하는 시점의 균형관절 위치인 중간 경유점과 궤적의 끝점을 유전 알고리즘을 통해 자동으로 찾아 곡선을 생성하였다.

유전 알고리즘은 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리

즘으로 Holland 에 의해 적자생존의 진화 현상을 기초로 개발되기 시작했다 유전 알고리즘은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐서 다음 세대의 새로운 자손을 인공적으로 생성한다. 탐색공간이 연속이거나 비분가능이라는 가정이 필요 없으며, 이는 최적화 함수 정보를 필요로 하지 않고 단지 적합도 함수 값만을 사용하기 때문이다[16][17]. 그림 4는 균형관절의 움직임을 나타낸다. 원은 균형관절의 구동가능 범위를 나타내며 균형관절은 하나의 회전관절과 하나의 직진관절로 구성되어 있다

IWR-III의 균형 직진 관절의 구동 가능 범위는 회전관절의 중심을 기준으로 $-0.18\sim+0.18m$ 이며, 기구적 특성을 고려하여 균형 롤 관절의 구동 범위를 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 로 한정시켰다. 따라서, 상변환 시에 균형추를 반드시 균형관절의 원점을 통과시켜 이동해야 하며 그 외의 경우엔 롤 관절이 $\pm 90^{\circ}$ 에서 $\mp 90^{\circ}$ 로 급격한 변화를 하게 된다 또한 균형관절의 원점에서 특이점이 발생하므로 이의 해결을 위해 관절 좌표계에서 균형관절 궤적을 계획하였다. 본 논문에선 한 걸음당 3초 보행을 대상으로 보행 알고리즘을 수행하였다. 이 경우 다리부의 이동은 2초간 수행되며, 다음 보행을 위해 균형추가 그림 5의 우반부에서 좌반부로, 혹은 좌반부에서 우반부로 이동하는 상변환 과정이 1초간 수행된다. 궤적 생성시 보행을 시작하는 0초와 유각이 지면에 착지하고 상변환을 시작하는 2초, 균형추가 균형관절의 중심을 지나는 2.5초, 그리고 상변환이 끝나고 보행이 완료되는 3초에서의 균형관절의 위치, 속도, 가속도를 경계치로 설정하였다. 이 때, 속도는 시작과 끝점에선 0으로, 중간 경유점에선 등속으로 설정하고 가속도는 0으로 설정하여 단순화시켰다. 이는 다수의 변수가 다양한 형태의 궤적을 생성하지만 유전 알고리즘의 수행시간의 증가와 정밀도의 감소를 가져오기 때문이다. 유전 알고리즘에서 균형관절의 궤적 생성을 위

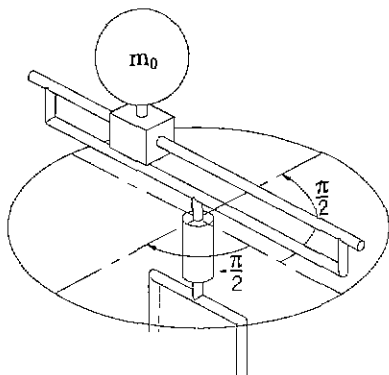


그림 4. 균형 관절의 이동.
Fig. 4. Movement of balancing joints.

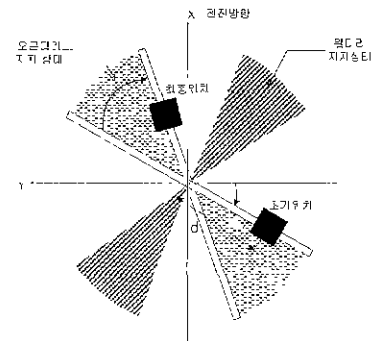


그림 5. 탐색공간
Fig. 5. Searching space.

표 1. 유전 알고리즘 실성치.
Table 1. Parameters for genetic algorithm.

개체수	50
세대수	50
교배율	0.3
돌연변이율	0.3
유전자수	4

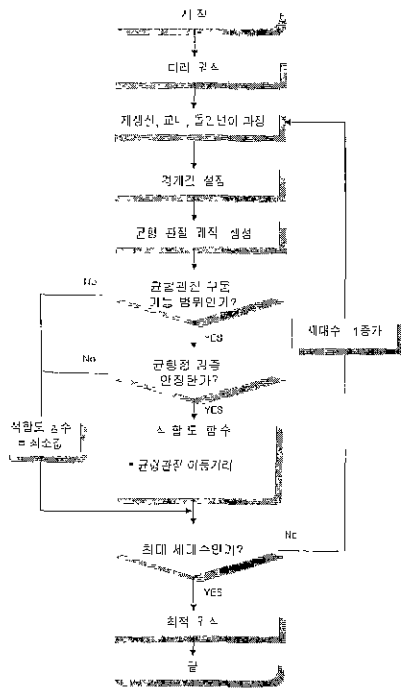


그림 6. 균형관절 궤적 생성 알고리즘.
Fig 6 Trajectory generating algorithm for balancing joints.

한 유전자는 4 개로 구성되며 실수 형태로서 상변환의 시작과 끝의 균형추 위치에서의 직진관절 이동거리와 회전각의 정보를 지닌다. 즉, 초기위치에서 시작하여 최단거리가 되도록 궤적의 중간 경유점과 끝점을 유전 알고리즘을 통해 자동으로 찾는다. 탐색공간은 그림 5 와 같이 오른다리가 지지각일 경우와 왼다리가 지지각일 경우로 나누어 균형관절의 구동 가능 영역에서 선정하였으며, 균형관절의 직진 이동거리(d)와 회전각(θ)을 표현하고 있다. 유전 알고리즘의 각 설정치는 표 1 과 같다.

다리부의 궤적 계획이 끝나면 유전자의 값이 균형관절의 궤적 생성을 위한 경계값으로 주어진다. 이로부터 균형추 초기위치에 대해 유전 알고리즘을 수행하여 최소 균형관절 움직임을 갖는 균형관절 궤적을 구할 수 있다. 이 때, 범위 안에 있는 모든 유전자가 만들어 낸 궤적이 적용 가능하지는 않다. 즉, 실제로 균형관절이 구동 가능 영역 안에 존재 하는지와 실제 균형점이 안정 영역 안에 존재하는지를 판별하여 이를 만족하면 적합도 함수 값을 구하고, 만족하지 못하면 적합도 함수는 미리 설정한 매우 작은 값으로 정해진다.

본 논문에서는 균형관절의 이동거리를 의미하는 적합도 함수를 사용하였다. 유전 알고리즘의 연산자에 해당하는 재생산, 교배, 돌연변이 과정을 거쳐 새로운 유전자를 사용한 궤적 생성이 이루어지며 각각의 적합도 함수를 구하게 된다. 이 과정은 최대 세대수에 이를 때까지 수행되며, 최종적으로 최적값을 구하게 된다. 그림 6 은 유전 알고리즘을 이용한 최적 균형관절 궤적 생성 과정을 나타낸다.

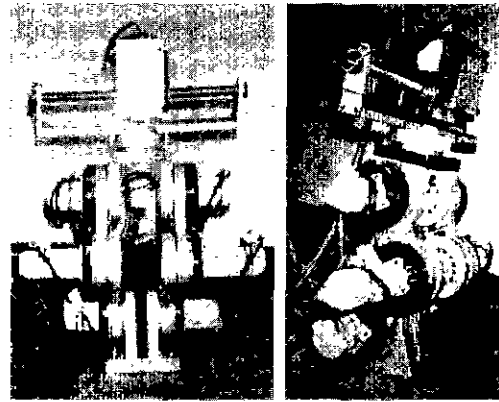


그림 7. IWR-III 외관.
Fig. 7. Appearance of IWR-III.

IV. 실험 기기의 구성

이족보행로봇 IWR-III는 본 자동제어 연구실에서 제작된 로봇으로 현재 모의 실험기와 TMS320C31 이 내장된 8 축 제어기, AC 서보앰프, 그리고 로봇 기구부로 구성되어 있으며, 외관은 그림 7 과 같다. 8 자유도의 AC 서보와 40 개의 외부 접점을 제어할 수 있으며, 향후 균형추를 도립 진자 형태로 전환이 용이하도록 제작되었다 구동기는 엔코더가 장착되었으며 무류에는 400W, 그 외에는 200W 로 총 8 축이며, 구동 속도는 느리나 상대적으로 큰 토크를 요구하는 발목관절에 100:1, 그 외에는 60:1 의 감속비를 설정하였다. 높이는 0.6842m, 폭은 최대 0.599m, 너비는 최대 0.17m 이다. 발바닥 면적은 0.09m×0.17m 의 사각형으로 되어 있다. 로봇 본체는 듀랄루민을 사용하여 경량화 시켰다.

V. 모의 실험 및 보행 실험 결과

실험은 두 단계로 나누어 진행되며 1 단계는 유전 알고리즘을 통하여 최적의 관절값을 생성하는 모의 실험이며, 2 단계는 구해진 관절값을 PID 제어 기법을 이용하여 실시간으로 제어하는 것이다.

모의 실험기는 상용패키지 MATLAB 을 이용하여 프로그램 되었다. 프로그램은 모듈화하여 확장성 및 기능 향상에 유리하고 각종 데이터의 비교가 용이하며 그래픽 메뉴체계를 갖추어 사용이 용이하도록 하였다.

실험에서는 3 초 보행시의 동일한 다리궤적에 대해 기존 알고리즘의 결과와 새로이 제시한 알고리즘의 결과를 비교했으며, 최적화된 균형 궤적을 보이고자 한다. 보행 형태별로 각 단위 걸음새의 다리부 자세에 따른 발의 움직임은 그림 8 과 같다.

단위 걸음새 1, 3 은 지지각의 발바닥 B 에 대해서 유각의 발바닥 A 의 전진을 나타내며, 단위 걸음새 2, 4 는 지지각의 발바닥 A 에 대해서 유각의 발바닥 B 의 전진을 나타낸다. 이상의 4 개 단위 걸음새를 조합하여 지속 보행을 만들 수 있다. 단위 걸음새 1 은 로봇 지속 보행의 시작에 사용되며 단위 걸음새 4 는 로봇 지속 보행의 끝에 사용된다. 본 논문에선 각 단위 걸음

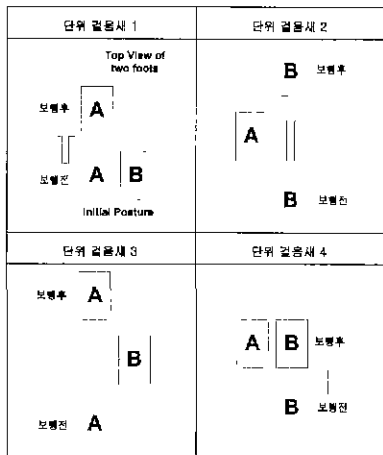


그림 8. 단위 걸음새 정의.
Fig. 8. Definition of unit gate.

새에 대해 새로운 알고리즘을 수행하여 보행시 균형관절 움직임을 최소화하는 균형관절의 궤적을 생성하였다. 이 때, 목적함수는 무차원으로 변환한 직진 이동 거리와 회전 이동각의 합이다. 이는 균형관절이 회전관절과 직진관절로 이루어진 데 기인하며 균형추의 직선 이동이 방향에 따라서 서로 다른 회전 이동량을 발생시키기 때문이다. 목적함수 f 는 (8)과 같다.

$$f = \sum_{i=t_0}^{t_f} (\theta_i / \theta_a) + \sum_{i=t_0}^{t_f} (d_i / d_a) \quad (8)$$

θ_a 는 전체 회전 가능각을 의미하며 θ_i 는 단위시간당 회전각을 나타낸다. d_a 는 전체 직진 이동 가능 거리가

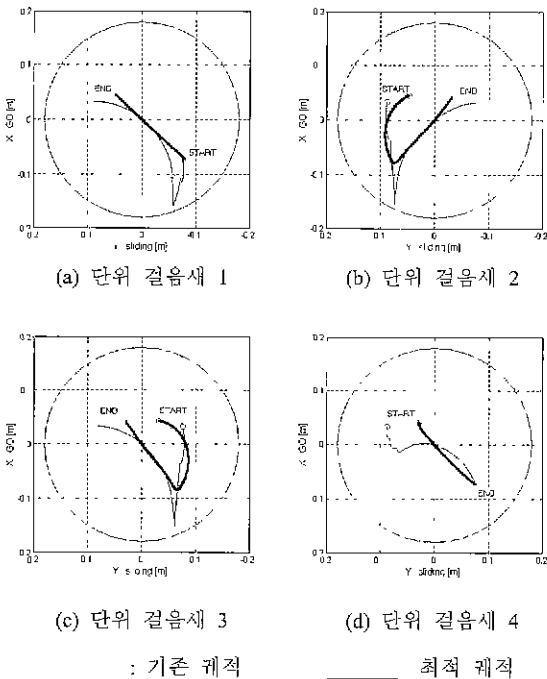
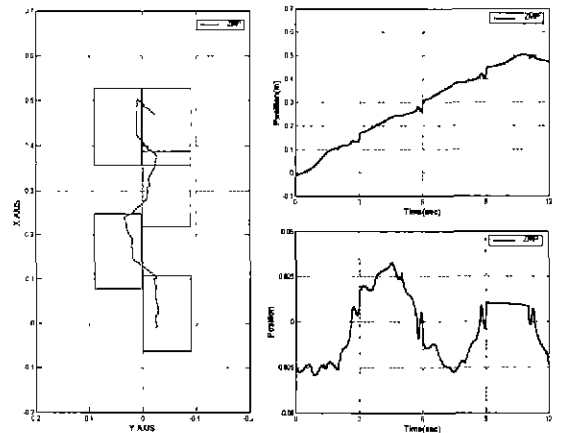


그림 9. 균형추 궤적.
Fig. 9. Balancing weight trajectory.



(a) 지지각 발바닥에 대한 균형점 궤적 (b) 시간에 대한 균형점의 X축(상)과 Y축(하) 궤적

그림 10. 균형점 궤적.
Fig. 10. ZMP trajectory.

다. t_0 는 보행 시작 시간을, t_f 는 보행 마지막 시간을 의미한다. 그림 9는 기존 알고리즘의 궤적과 최적화된 궤적의 비교이다. 이는 3.2 절의 그림 4에서 균형추의 이동 궤적을 표현한 것이며 굵은 선은 최적궤적, 가는 선은 기존의 궤적을 의미한다. 원은 균형추의 이동 가능 영역이며, 가로축은 로봇의 좌우 방향을 세로축은 전후 방향을 나타낸다. 단위 걸음의 균형추 끝 위치는 지속 보행시 다음 보행의 균형추 초기 위치로 사용된다. 단위 걸음새 1에서 시작점은 비교를 위해 기존의 궤적과 동일하게 주었으며, 중간 경유점과 끝점은 유전 알고리즘을 이용하여 자동으로 찾은 값이다. 단위 걸음새 4의 끝점도 기존 알고리즘과 동일하게 하여 비교가 용이하도록 하였다. 기존의 해석식을 통한 균형추의 움직임과 비교하면 이동거리가 상당량 감소하였으며 궤적이 부드럽게 생성되었음을 알 수 있다. 또한 구동 가능 영역 안에 존재하며, 균형관절의 원점을 통하여 상변환이 진행되므로 구속조건을 만족한다. 그림 10은 안정도 판별을 위한 실제 균형점의 그래프이다. 로봇 보행시 균형점이 지지각의 발바닥 안에 존재하므로 안정 영역을 벗어나지 않음을 보이고 있다. 좌측의 그림은 단위 걸음새 1부터 단위 걸음새 4까지 지지각의 발바닥과 균형점의 이동 경로를 나타내며 우측 상 움직임을 나타낸다. 우측 하단의 그림은 시간에 대한 단의 그림은 시간에 대해 균형점의 전진 방향으로의 균형점의 좌우 방향의 움직임을 나타내며 이로부터 로봇의 안정성을 확인할 수 있다.

이상의 모의실험 결과로부터 안정도가 검증된 다리부의 궤적과 균형관절 궤적의 정보를 얻어 실제 로봇 구동 실험을 수행하였다. 이 때, 구동부에는 매 10msec 마다 펄스 형태로 변환된 신호가 전달되며 엔코더로부터 신호를 받아 제어를 하게 된다. 보행은 단위 걸음당 3초로 4보폭의 지속보행을 수행하였다. 그림 11은 구동기에 구현된 명령치와 추종 결과를 나타낸다.

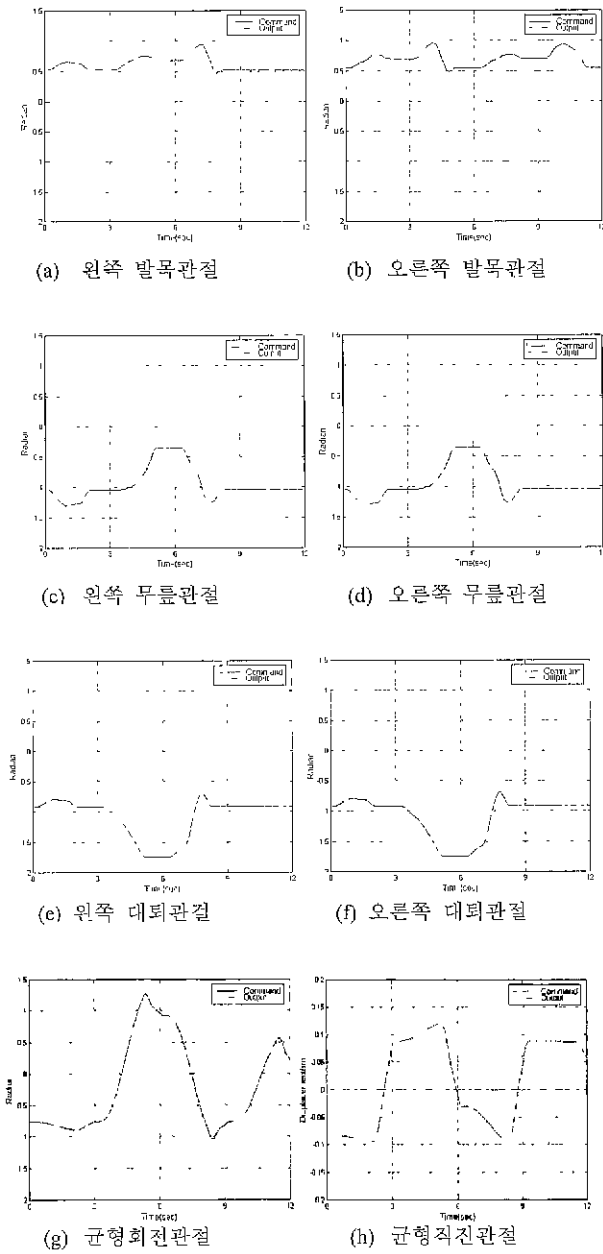


그림 11. 구동부의 궤적추종.
 Fig. 11. Tracking of motors.

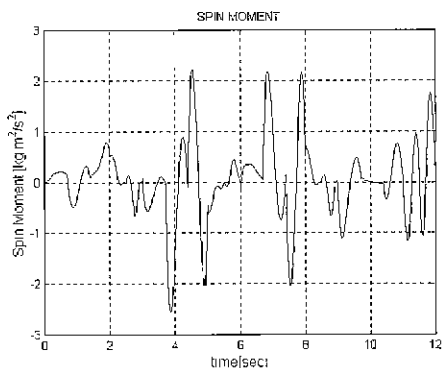


그림 12. 기존 알고리즘에 의한 스핀 모멘트.
 Fig. 12. Spin moment using previous algorithm.

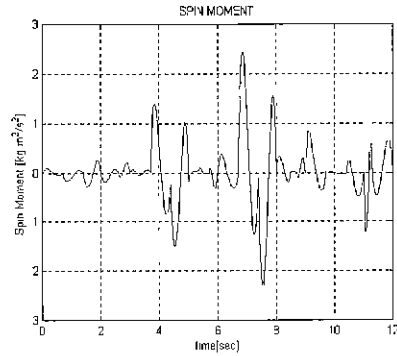


그림 13. 새로운 알고리즘에 의한 스핀 모멘트.
 Fig. 13. Spin moment using new algorithm.

그림 12, 13 은 4 보폭을 수행할 때 전체 구간에 대해 중진 알고리즘과 개선된 알고리즘의 스핀 모멘트를 비교한 그래프이며, 새로운 균형 관절 궤적 생성이 대체로 스핀 모멘트를 감소시킴을 알 수 있다

이로부터 균형관절 궤적이 스핀모멘트에 주는 영향을 알 수 있다 즉, 균형관절의 움직임이 적을수록 스핀 모멘트 양이 줄어들며 이는 보행시 유각의 전진에 의한 회전 모멘트와 균형관절의 이동으로 인한 회전 모멘트가 동일 방향이기 때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 IWR-III의 균형관절 움직임을 최소화하는 향상된 균형관절 궤적을 생성하였고 실제 실험을 통하여 타당성을 확인하였다. 이러한 균형관절의 최적화는 균형점 영역의 확장을 통한 지면 접촉면의 활용성을 높임과 동시에 스핀 모멘트 감소 등의 로봇 보행을 향상시키는 효과를 가져온다. 또한 알고리즘 수행시 다리 궤적과 독립적으로 수행하므로 보행 가능한 다리 궤적이라면 최적의 해를 구할 수 있었다. 향후 연구 과제는 알고리즘을 향상시켜 궤적 생성의 원활함을 기해야 하며, 독립 진자와 같이 높이방향을 고려한 3 차원 궤적을 필요로 하는 균형관절에 대해서도 기존의 비선형 미분 방정식의 해석과 기구적 구속조건의 문제에 상관 없이 그 해를 푸는 데에 대한 연구가 필요하다. 또한 보행시 에너지 최적화 및 가감속을 고려한 향상된 보행 궤적 생성, 그리고 유각과 몸체의 동시 추진에 의한 원활한 지속 보행 궤적 생성에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] W. Chen, S. H. Yeo, K. H. Low, "Modular formulation for dynamics of multi-Legged robots," *ICAR*, pp. 279-284, 1997.
 [2] F. M. Silva, J. A. Tenreiro Machado, "Kinematic evaluation of robotic biped locomotion systems," *ICAR*, pp. 95-100, 1997.
 [3] C.-L. Shih, "Inverted pendulum-like walking pattern of a 5-link biped robot," *ICAR*, pp. 83-88, 1997.

- [4] Masayuki INABA, Ken'ichiro NAGASAKA, Fumio KANEHIRO, Satoshi KAGAMI, Hirochika INOUE, "Real-time vision-based control of swing motion by a human-form robot using the remote-brained approach," *Proc. IROS96*, pp. 15-22, 1996.
- [5] Masayuki INABA, Takashi IGARASHI, Satoshi KAGAMI, Hirochika INOUE, "A 35 DOF humanoid that can coordinate arms and legs in standing up, reaching and grasping an object.," *Proc. IROS96*, pp. 29-36, 1996
- [6] J. k. Hodgins, "Three-dimensional human running," *Proce. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3271-3276, Minneapolis, Minnesota - April, 1996.
- [7] S. Kawamura et al "Realization of biped locomotion by motion pattern learning.," *Journal of Robot Society of Japan*, vol. 3, No. 3, pp. 177-180, 1985.
- [8] S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki, "Can mechanical robots learn by themselves?," *Robotics Research*, pp. 127-134, MIT Press, 1985.
- [9] C.-L. Shih, "Analysis of the dynamics of a biped robot with seven degrees of freedom.," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3008-3013, 1996.
- [10] S. H. Lim, J. G. Kim, "Adaptive gait algorithm for IWR biped robot.," *Proced. of the 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 438-442, Singapore, February 21-24, 1995.
- [11] A. Takanushi, "Robot biped walking stabilized with trunk motion," *Robots and Biological Systems : Towards a New Bionics*, Spring Verlag, 1989.
- [12] Q. Li, A. Takanishi, I. Kato, "Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on ZMP stability criterion.," *Proc. of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 597-603, Raleigh, USA, July. 7-10, 1992.
- [13] Yamaguchi, A Takanishi, I. Kato, "Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion.," *Proc. of the 1993 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol 1, pp. 561-566, Yokohama, Japan, July. 26-30, 1993.
- [14] A.Takanushi, H. O. Lim, M Tsuda, I. Kato, "Realization of dynamic biped walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface.," *Procd. of the 1990 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 323-329, Tsuchiura, Japan, July. 3-6, 1990.
- [15] C.-L. Shih, "Analysis of the dynamics of a biped robot with seven degree of freedom.," *Procd. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3008-3013, Minneapolis, Minnesota, April, 1996.
- [16] D. E Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- [17] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms+Data Structures= Evolution Programs*, Third Edition, Springer-Verlag, 1995.



김 종 태

1973년 4월 29일생. 1997년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1999년 인하대학교 자동화공학과 석사졸업 1999년~현재 동대학원 박사과정 재학중.



김 진 길

1955년 7월 4일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Univ. of Iowa 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 1988년~현재 인하대학교 기계항공자동화 공학부 교수