

보행로봇의 시뮬레이터개발에 의한 보행패턴계획의 기초적 연구

박창용*, 권현규*

A Basic Study of Planning Walking Pattern by developing a New Biped Robot-Simulator

Chang-Young Park*, Hyun-Kyu Kweon*

(Received 2 November 2010; received in revised form 17 December 2010; accepted 23 December 2010)

ABSTRACT

In this paper, a new simulator of the biped robot for planning walking patterns was showed. And this simulator(MHBiped) is able to not only visualize the plan of patterns but also verify whether a biped robot design is suitable. In addition, MHBiped can modify various kinds of walking parameters and the trajectory of biped robot. Therefore, a new biped robot can be designed easily by the this simulator before you apply to a robot. As a result, a well-balanced parameters of walking patterns watching the movement of CG and ZMP can be obtained. Walking patterns should be changed according to both the existence of obstacles and conditions of ground and it can be described by the trajectory of hip and ankles. All those trajectory can be also obtained by the cubic spline functions and the way of modeling walking patterns. The results of simulator, the movement function of CG and ZMP, the cubic spline functions and modeling of biped robot were introduced in this paper. And the effectiveness of this simulator was confirmed by the simulations.

Key Words : Planning Working Pattern(보행패턴계획), Simulator(시뮬레이터), Biped Robot(2족로봇), Robot Model(로봇모델)

1. 서 론

2족 보행 로봇은 보통의 바퀴로봇 보다 운동성(mobility)이 높기 때문에 거친 지형을 통과하거나 계단을 오르내림, 그리고 장애물을 통과 하는데 있

어서 유리하여 그 효율적인 사용이 기대되어져, 보행 안정성의 평가, 실제적인 로봇의 설계 및 응용, 동적해석 부분 등에 관하여 많은 연구가 진행되어지고 있다. 그 중에서도 보행 패턴에 관한 연구는, Zarrugh 등에 의해 실제의 인간의 보행 데이터를 이용해서 보행 패턴에 관한 연구가 진행되고 있으며 [1], 특히 2족 보행 로봇은 쉽게 전복될 수 있기 때문에 보행 패턴을 만드는데 있어서 안정성을 확보의 필요성이 강조되고 있다. Zheng 등은 CG(무게중심, Center of Gravity)의 위치에 기초를 둔 정적인 안정

*금오공과대학교 기계공학부
E-mail : hkkweon@kumoh.ac.kr

성을 위한 걸음새 생성 방법을 제안했다[2]. 2족 보행 로봇의 동적 안정성을 확보하기 위해서 Takanishi 등은 ZMP(Zero Moment Point)에 기초를 둔 보행 패턴 생성방법을 제안하였다[3]. ZMP는 지면에 위치한 모든 반력모멘트의 합이 제로가 되는 점으로 정의된다. 만약 ZMP가 지면과 접촉하고 있는 발바닥 내에 위치하고 있으면 2족 보행 로봇은 전복되지 않는다. 결국 지면과 접촉하고 있는 발바닥의 면적이 안정한 영역(stable region)을 의미한다. 이 연구에서는 우선 ZMP궤적을 설계한 후에 이러한 ZMP궤적을 수행할 수 있는 엉덩이궤적을 유도하였다. 이러한 방법의 장점은 ZMP를 안정한 영역(stable region)의 중앙으로 위치시킴으로써 안정도에 여유를 둘 수 있다는 것이다. 그러나 엉덩이의 모션이 제한적이기 때문에 ZMP는 변하게 된다. 그렇기 때문에 목적인 ZMP궤적을 달성할 수 없게 된다. 또한 이렇게 목적인 ZMP궤적을 달성하기 위해서는 엉덩이부분의 가속도가 아주 커야 하는데 이러한 경우 엉덩이 혹은 몸체는 다른 링크들에 비해 비교적 무거운 질량체이므로 에너지 소비가 증가하게 되고 구동기의 사양에 따라 알맞은 모션이 불가능하게 될 수도 있다. 또한, Tanie는 희망ZMP궤적을 먼저 설계하지 않고 엉덩이의 궤적을 결정하고 ZMP의 위치를 평가하여 엉덩이 궤적의 결정여부를 판단하는 방법으로 보행 패턴을 계획하였다[4]-[5]. 그리고 Park 등은 보행 중에 안정성 향상을 위하여 엉덩이의 궤적을 온라인(on-line)으로 수정하는 방법을 연구하였다[6]. 지면의 기울기, 거친 지형, 장애물로 가득한 환경과 같은 다양한 지면의 조건에서도 보행할 수 있는 2족 보행 로봇을 위해서는 다양한 형태의 발(foot, 발목 이하 부분)의 모션이 가능해야 한다. 예를 들어 2족 보행 로봇은 장애물을 헤쳐 나갈 수 있을 만큼 충분히 높게 다리를 들어 올릴 수 있어야 하며 거친 지면에 맞게끔 발의 각도를 조정할 수 있어야 한다. 이미 여러 논문에서 다항식 보간(polynomial interpolation)에 의해 발의 궤적을 생성하는 방법을 기술 하였다. 그러나 발의 궤적을 위한 구속조건이 다양할 때 다항식의 차수가 높아지게 되는데 이것은 연산의 복잡성과 생성된 궤적의 진동을 유발한다. 이러한 문제를 피하기 위해서 Tanie는 3차 스플라인 보간(Cubic Spline Interpolation)에 의해 발의

궤적을 생성하였다[4]. 2족 보행 로봇의 보행 패턴은 엉덩이와 발목의 궤적으로 표현할 수 있는데 본 논문에서는 3차 스플라인 보간에 의해 엉덩이와 발목의 궤적을 구하고 보행을 그래픽으로 수행할 수 있는 시뮬레이터(MHBiped) 제작과 그 유효성에 관하여 정리하였다.

2. 보행의 모델링

2.1 로봇의 모델링

본 논문에서 사용하는 2족 보행 로봇의 모델을 Fig.1에 나타내었다. 원점 or 에 해당하는 좌표계는 관성기준좌표계(inertial reference system)이다. 그리고 로봇에는 엉덩이 좌표계(hip fixed coordinate system)와 몸통 좌표계(torso fixed coordinate system)가 설정되어 있다. 관성기준 좌표계는 로봇이 이동을 시작하는 시점에서 임의의 위치에 설정할 수 있다. 이 로봇은 몸체(trunk)가 있는 인간형 로봇이다. 각 다리는 넓적다리(thigh)와 정강이(shin) 그리고 발(복사뼈 밑 부분, foot)로 구성되어 있고 각 다리는 5자유도(DOF)를 가지고 있다. 엉덩이(hip)에 2자유도, 무릎(knee)에 1자유도, 발목(ankle)에 2자유도를 가지고 있고 로봇 전체의 자유도는 10자유도이다. 몸체에 관절은 없다. 보행 패턴을 계획하는데 있어서 많은 연구자들은 두발 지지 기간이 순간적으로 일어난다고 가정하고 있다[7]~[11]. 이러한 경우에 엉덩이는 상대적으로 아주 빠르게 움직여야 하는데 이것은 로봇의 CG로 판단하는 정적인 안정성이나 ZMP로 판단하는 동적인 안정성을 확보하기 위해서 짧은 두발 지지 기간 동안 뒷발에서 앞발로 로봇의 CG나 ZMP를 옮겨야 한다는 것을 의미한다. 그러나 이것은 로봇의 구동기에 큰 제약을 야기시킨다. 반면에 두발 지지 기간이 너무 길면 빠른 속도의 이동이 어렵게 된다. 인간의 보행의 경우 두발 지지 기간은 한걸음의 보행주기의 20%를 차지한다[12],[13].

보행 패턴은 엉덩이와 발목의 궤적에 의하여 결정된다. 본 논문에서 스플라인 함수를 이용하여 구하는 발목의 궤적이라 함은 스윙다리의 발목궤적을 의미한다. 반대편 다리의 발목의 경우 지지다리이므로 관성기준좌표계에 대한 위치는 변하지 않으며 엉덩이 좌표계에 대한 상대 위치가 변하는데 이는 엉덩이

이의 궤적에 의하여 결정된다. 따라서 스윙하는 다리의 발목궤적은 단지 한쪽 다리에 대해서만 생성하면 된다. T초 후에 좌,우 다리의 역할이 바뀌는 반대편 다리의 궤적은 동일한 궤적을 엉덩이 좌표계의 y 축 방향으로 $\pm a_{hip}/2$ 만큼 이동시켜 사용하면 된다. 여기서 $a_{hip}/2$ 항의 부호가 (+)인 경우엔 좌측 다리의 발목의 위치를 나타내며 (-)인 경우는 우측 다리의 발목의 위치를 Fig.2와 같이 나타낸다. 본 논문에서 발바닥은 지면과 항상 수평을 유지한다고 가정한다.

엉덩이와 발목궤적을 생성하는데 결정적인 역할을 하는 것은 보폭(D), 한걸음에 소요되는 시간, 발목의 최대높이(F_{ZMAX}), 엉덩이의 높이(H_{height}), 한

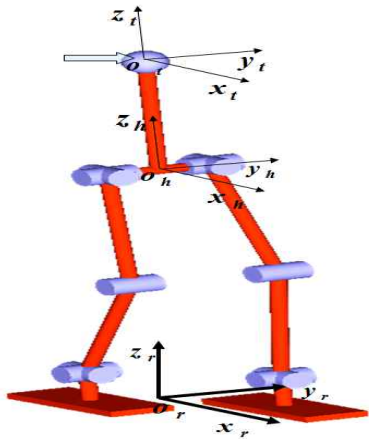


Fig. 1 Robot modeling

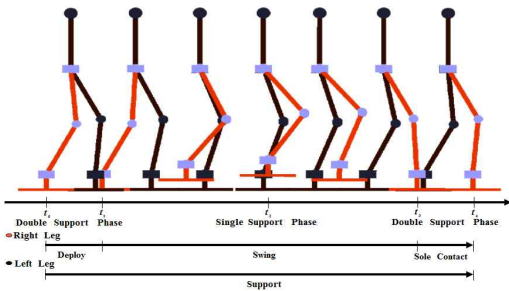


Fig. 2 Walking pattern

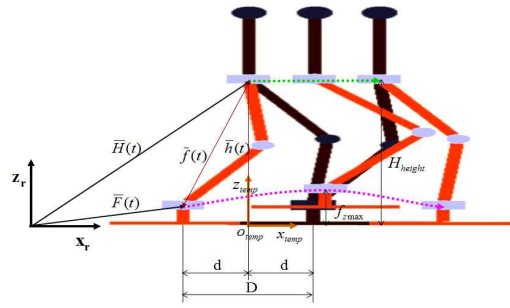


Fig. 3 Walking parameter

걸음의 주기(T), 두발지지기에서 소요되는 시간 (T_{double}), 걸음의 계수(k) 등이며, 이러한 요소들을 보행 파라미터라 한다. Fig.3은 보행파라미터를 모델 로봇에 표시한 것이다.

2.2 발목과 엉덩이부분의 궤적

먼저, 관성기준좌표계에 대한 엉덩이의 위치 $\bar{H}(t) = [H_x(t), H_y(t), H_z(t)]$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_x = X_0 + h_x(t) \tag{1}$$

여기서 X_0, Y_0 는 보행 시작시의 관성기준좌표계에 대한 엉덩이의 위치이다. 초기자세에서 X_0 은 임의의 값이 될 수 있지만 Y_0 는 0이어야 한다. 발목의 궤적 $\bar{f}(t)$ 은 소구간에 따라 구속조건이 달라지지만 엉덩이의 궤적 $\bar{h}(t)$ 은 소구간에 따른 기구학적 구속조건은 없으며 역기구학의 해가 존재할 수 있는 범위에서 자유롭게 결정할 수 있다.

결국 엉덩이의 궤적을 3차 스플라인 함수를 통하여 구하기 위해서 t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 에서의 $\bar{h}(t)$ 가 필요하다.

지지다리의 경우 T초 동안의 $\bar{f}(t), \bar{F}(t)$ 는 엉덩이의 궤적 $\bar{h}(t)$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$f_x(t) = d - h_x(t) \tag{2}$$

$$F_x = \dots \tag{3}$$

여기서 a_{hip} 은 엉덩이 좌표계의 원점으로부터 y축을 따라 0좌표계의 원점까지의 거리이므로 식 (2)의 $f_y(t)=(\pm a_{hip}/2)-h_y(t)$ 에서 $a_{hip}/2$ 항의 부호가 (+)인 경우엔 좌측 다리의 발목의 위치를 나타내며 (-)인 경우는 우측 다리의 발목의 위치를 나타낸다. 지지 다리의 발목의 궤적은 $\bar{h}(t)$ 에 의해 결정된다. k, D, d, a_{hip} 는 상수이므로 이 기간동안에 관성기준좌표계에 대한 x_r, z_r 축 방향으로의 이동은 없다. 그러나 임시좌표계에 대한 엉덩이의 이동량만큼 엉덩이 좌표계에 대하여 발목이 이동하게 된다. 이것은 엉덩이가 이동하기 위해서 발바닥이 지면을 밀어내야 한다는 것을 의미한다. 결국 이러한 지지다리의 운동으로 인하여 로봇이 앞으로 이동하게 된다. 반면 스윙다리(스윙시 다리의 궤적)에서의 발목궤적은 분할된 각 소구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 구속조건이 서로 다르며 각 노드(node)에서의 함수 값 또한 다르게 구하여야 한다. 그러나, 각 소구간에서의 발목궤적은 기본적으로 식 2와 식3을 기본으로 한다. 발목궤적과 엉덩이 궤적을 모두 알고 있다면 2족 보행 로봇의 모든 축들의 관절-공간(joint-space)에서의 궤적은 역기구학에 의해 결정되어진다.

2.3 ZMP와 3차스플라인함수

무게중심(Center of Gravity)은 다음과 같이 정의할 수 있다[14].

$$m_t = \sum m_i \tag{4}$$

여기서 m_t 는 시스템의 전체질량, m_i 는 질점 i 의 질량, CG는 시스템의 무게중심, c_{gi} 는 질점 i 의 무게중심을 기준좌표에 대해 나타낸 위치이다. 정적인 보행 안정성을 평가하기 위해서 이 무게중심의 위치를 이용한다.

ZMP(zero moment point)는 시스템의 모든 반력 모멘트의 합이 0이 되는 지점을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)}$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \tag{5}$$

여기서 x_i, y_i, z_i 는 관성기준좌표계에 대한 질점의 위치, $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 는 질점의 가속도, x_{zmp} 은 x_r 축 방향에 대한 ZMP의 위치, y_{zmp} 은 y_r 축 방향에 대한 ZMP의 위치이다.

식 (5)에서 가속도의 항을 모두 0로 두면 무게중심과 같아진다. 따라서 정적인 보행을 하는 로봇은 각 링크들의 가속도가 충분히 작아야 함을 알 수 있다. 본 논문에서 각 링크는 점질량으로 가정하였다. 따라서 각 링크의 질량과 관성기준좌표계에 대한 위치와 가속도를 알면 ZMP를 구할 수 있다. 위에서 언급되었듯이, 2족 보행 로봇의 보행 패턴은 엉덩이와 발목의 궤적에 의해 결정된다. 이 궤적들은 보행의 안정성을 위하여 급격한 가속(혹은 감속)을 피해야 하며 지면의 형상과 장애물과 같은 주변의 환경에 따라 변해야만 한다. 또한 로봇을 부드럽게 움직일 수 있게 해야만 한다. 이것은 심미적인 관점에서도 중요하지만 로봇의 관절들이 부드러운 운동을 하지 못 한다는 것은 속도나 가속도의 불연속이 발생한다는 것을 의미하며 결국 보행의 안정성을 해치는 요인이 된다. 더구나 생성된 관절공간에서의 궤적이 작업영역(workspace)이나 구동기의 사양을 벗어나서도 안 된다. 본 논문에서는 3차 스플라인함수(Cubic Spline Function)를 사용하여 엉덩이와

발목의 궤적을 생성하였다. 궤적생성을 위하여 보간 다항식을 사용할 때 엉덩이나 발목의 경유점들이 많아지게 되면 다항식의 차수가 비례적으로 증가하게 되는데 이것은 생성된 궤적의 진동현상을 유발하게 되며 계산량도 증가한다. 3차 스플라인 함수의 경우 주어진 구간을 여러 개로 조각 내어 각 소구간에서 차수가 낮은 다항식을 사용 하기 때문에 이러한 진동현상을 막을 수 있으며 계산량도 줄어들게 된다. 또한 이어지는 점(node)들에서 끊어지지 않게 연속으로 연결한 조각다항식(piecewise poly-nomial function)을 이용함으로써 부드러운 궤적을 생성할 수 있다.

많은 수치적 실험에 의하여 삼차보다 큰 차수의 스플라인 함수를 사용하는 것은 큰 이점이 거의 없는 것으로 알려져 있다[15].

자료 $(t_i, y_i), i=1, \dots, n$ 을 보간하는 3차 스플라인 함수 $S(x)$ 를 구성하는 함수 $S_i(x)$ 는 각 소구간 $[t_i, t_{i+1}]$ 에서 정의된 삼차다항식 $(aix^3+bix^2+cix+di)$ 의 형태이므로 미지수는 a_i, b_i, c_i, d_i 이다. 따라서 전체적으로 구하여야 할 미지수는 모두 $4(n-1)$ 개이다. 각 매듭에서 정의된 함수값 $S(t_i)=y_i$ 인 조건이 n 개 있고 연속성 조건

$$S_i(t_{i+1}) = S_{i+1}(t_{i+1}) \quad (6)$$

이 모두 $3(n-2)$ 개 있어 조건의 개수는 모두 $4(n-6)$ 개이므로 모든 미지수 a_i, b_i, c_i, d_i 를 구하려면 조건 두개를 더 추가하여야 하며,

$$(7)$$

식 (7)의 조건을 추가하면 조건의 개수와 미지수의 개수가 같아진다. 이와 같이 경계조건에 따라 다양한 함수를 얻을 수 있으며 본 논문에서는 식 (7)과 같은 경계조건을 추가하여 구한 3차 스플라인 함수를 사용한다.

3. Simulator 및 Simulation 결과

3.1 시뮬레이터(simulator)의 개발

본 논문에서 제작한 시뮬레이터(MHBiped)는 VC++로 개발되었다. 그래픽 처리는 OpenGL을 사용하였다. 본 시뮬레이션 프로그램의 실행은 그래픽, 로봇초기화과정, 엉덩이와 발목의 궤적생성, 궤적업데이트, 역기구학풀이, 조인트위치, 속도, 가속도계산, CG 및 ZMP계산, 그래프 출력순으로 진행하였다. Fig.4는 MHBiped의 전체모습을 나타낸 것이며, 프로그램에는 링크 파라미터 입력 대화상자를 통하여 링크의 길이와 질량을 변경할 수 있다. 또한, 입력대화상자에서는 궤적을 생성하기 위하여 엉덩이와 발목의 각 노드에서의 함수값을 입력하고 보행 파라미터를 입력이 가능하도록 프로그램화 되어있다. Fig. 5는 그래프 출력창의 결과이다. 보행동작과 각 링크의 위치, 속도, 가속도 그리고 CG와 ZMP의 변화를 그래프를 통하여 볼 수 있다.

3.2 Simulation 결과

안정한 보행이 가능한 보행패턴을 계획하기 위하여 Fig. 6과 같은 절차로 궤적을 결정하였다 본 연구에서 사용한 보행파라미터는 T는 1s, D는 14cm, FZmax는 10cm, Hheight는 44cm, Tdouble는 0.2cm로 하여

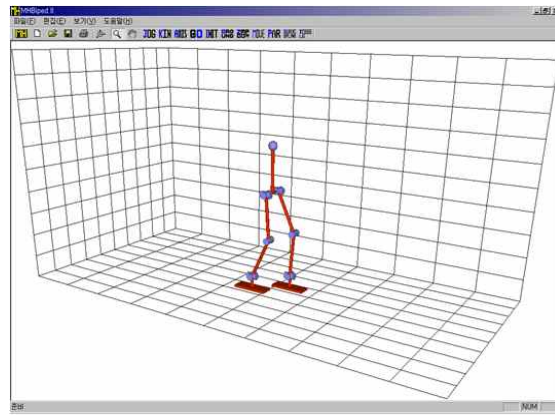


Fig. 4 Simulator (MHBiped)

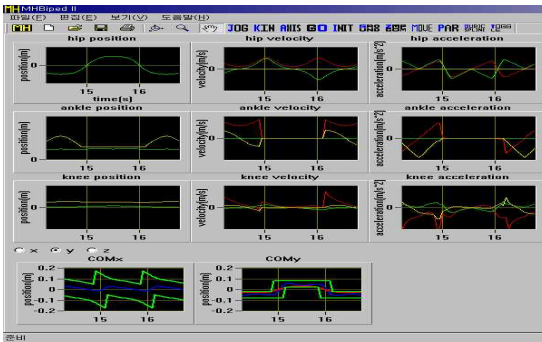


Fig. 5 Output of simulator (MHBipad)

시뮬레이션을 하였다. Table 1과 2는 본 실험에서 사용한 각 노드에서의 함수값 $\bar{f}(t)$, $\bar{h}(t)$ 과 링크의 제원을 나타내고 있고, 발바닥은 h_s (발바닥에서 발등까지의 높이)는 1cm, l_s (발바닥의 길이)는 16cm, w_s (발바닥의 폭)은 6cm로 하였다. 또한, 각 링크의 질량은 0.5kg, 길이는 엉덩이 부분이(y축방향) 8cm 링크0에서 5번링크까지 10cm, 0cm, 20cm, 20cm, 0cm, 5cm로 각각 구성하였다. Table 1에서 모든 노드에서 Hz을 Hheight으로 둔 것은 보행 중 관성기준좌표계에 대한 엉덩이의 높이가 변하지 않음을 의미한다. Fig. 7과 Fig. 8은 좌표축의 x방향으로의 위치, 속도, 가속도의 출력 창에 나타난 시뮬레이션 결과 값을 나타내고 있다.

Table 1 Position value of the ankle and the hips

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
time(sec)	0	0.1	0.5	0.9	1
H_x (cm)	0	2.5	7	11.5	14
H_y (cm)	0	2.1	5	2.1	0
H_z (cm)	44	44	44	44	44
F_x (cm)	-	2.5	7	16.5	-
F_z (cm)	-	5	10	5	-

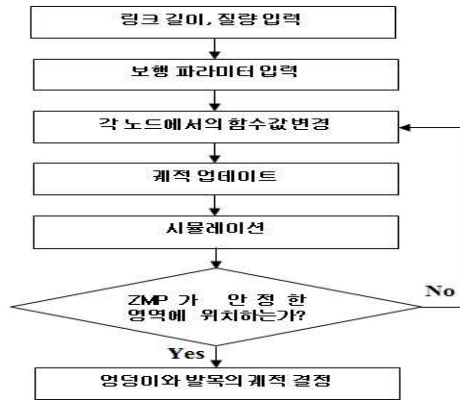


Fig. 6 Method of planning walking pattern

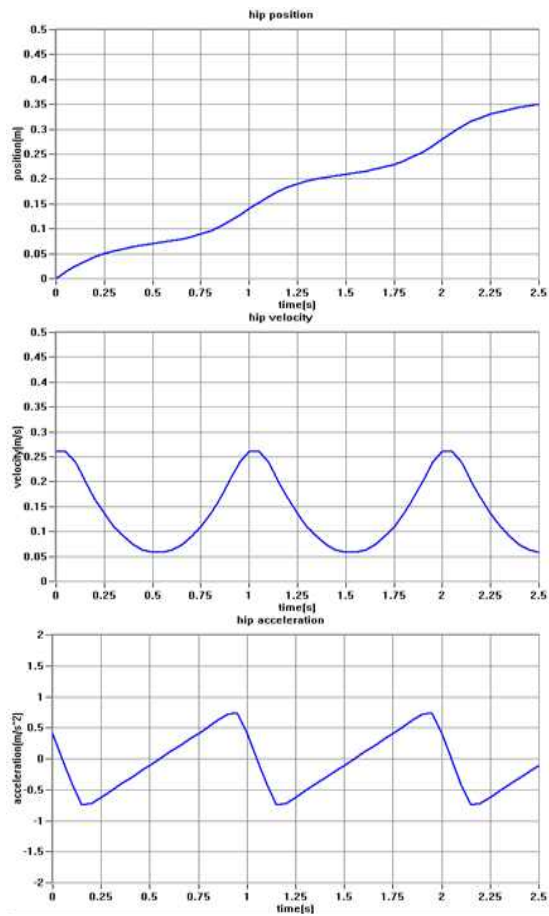


Fig. 7 Output results of position, velocity and acceleration the

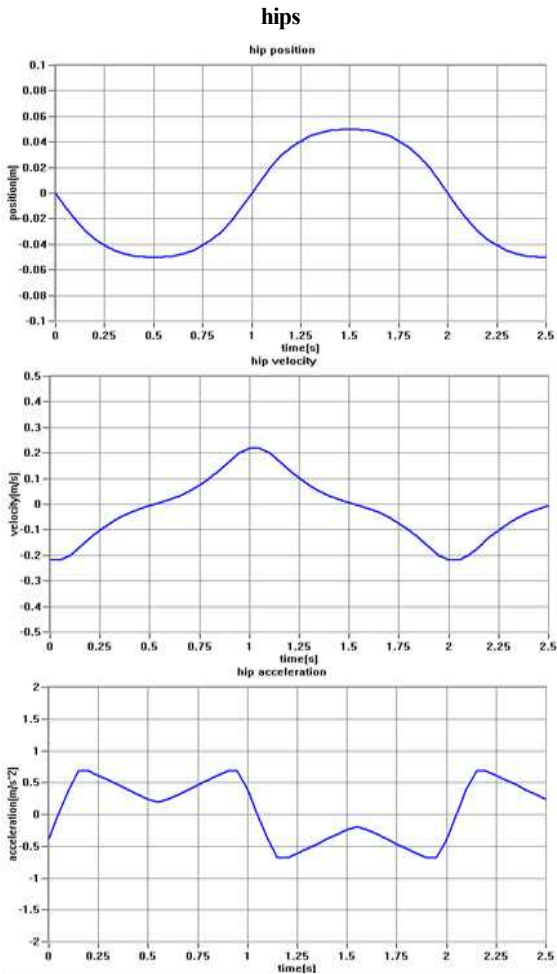


Fig. 8 Output of position, velocity and acceleration of the ankle

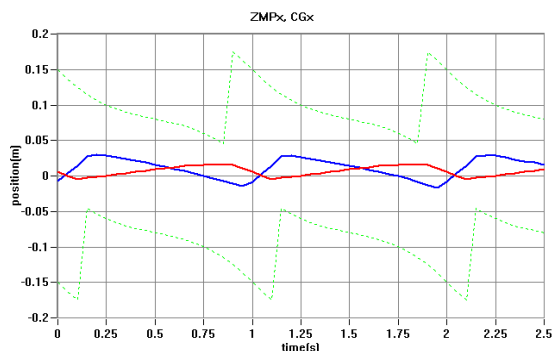


Fig. 9 Position of the CG and ZMP(X-axis)

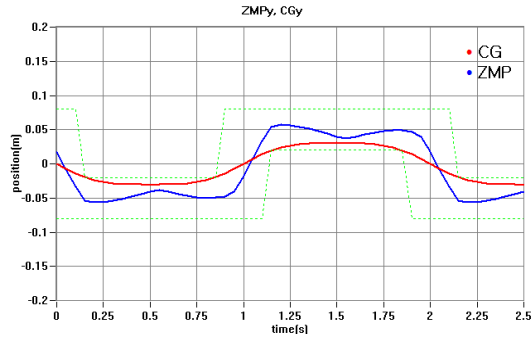


Fig. 10 Position of the CG and ZMP(Y-axis)

Fig.9 와 Fig.10은 ZMP와 CG의 결과값을 정리한 결과이다. ZMP의 기준 좌표계는 관성기준좌표계이며, 두개의 점선 사이의 거리는 ZMP가 위치할 수 있는 최대 범위이다. 이는 발바닥의 길이와 폭에 의해 결정되어진다. 본 결과에서 ZMP의 위치가 두 점선이 이루는 면적 밖으로 벗어나지 않았으므로 로봇이 넘어지지 않는다고 할 수 있다.

4. 결론

프로그래밍언어인 VC++을 이용하여, 2족 로봇의 보행 패턴에 관한 연구를 위한 시뮬레이터를 개발을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 시뮬레이터를 설계, 제작하여, 각 파라미터 값의 변화에 대한 다양한 보행패턴의 가능성을 확인하였다.

(2) 다소구간을 세밀하게 나누지 않았음에도 불구하고 비교적 안정된 보행을 수행할 수 있다는 것을 알 수 있음을 확인하여, MHBiped는 2족 보행로봇의 보행에 있어서 기구학적 분석과 CG와 ZMP의 변화를 살펴보면서 안정한 보행이 가능한 보행 패턴을 개발하기 위한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 금오공과대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. M. Y. Zarrugh and C.W. Radcliffe, "Computer generation of human gait kinematics", J. Biomech., vol. 12, pp. 99-111, 1979.
2. Y. F. Zheng and J. Shen, "Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface", IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 6, pp. 86-96, Feb. 1990.
3. A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The realization of dynamic walking robot WL-10RD", in Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp. 459-466, 1985.
4. Kazuo Tanie, "Planning Walking Patterns For a Biped Robot", IEEE Trans. Robot. Res., Vol.17, No.3, JUNE 2001.
5. Seyoon Tak, Oh-young Song, and Hyeong-Seok Ko, "Motion Balance Filtering", EUROGRAPHICS 2000, Vol. 19 (2000), Number 3, 2000.
6. Jong H. Park and Hyun C. Cho, "An Online Trajectory Modifier for the Base Link of Biped Robots To Enhance Locomotion Stability", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2000), pp. 3353-3358, April 2000.
7. T. McGeer, "Passive walking with knees", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1640-1645, 1990.
8. P. H. Channon, S. H. Hopkins, and D. T. Phan, "Derivation of optimal walking motions for a biped walking robot", Robotica, vol. 10, pp. 165-172, 1992.
9. M. Rostami and G. Bessonnet, "Impactless sagittal gait of a biped robot during the single support phase", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1385-1391, 1998.
10. L. Rousset, C. Canudas-de-Wit, and A. Goswami, "Generation of energy optimal complete gait cycles for biped robots", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2036-2041, 1998.
11. F. M. Silva and J. A. T. Machado, "Energy analysis during biped walking", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 59-64, 1999.
12. T. A. McMahon, "Muscles, Reflexes, and Locomotion", Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1984.
13. V. T. Inman, H. J. Ralston, and F. Todd, "Human Walking", Baltimore, MD: Williams & Wilkins, 1981.
14. J.L.MERIAM, L.G.KRAIGE, "Engineering Mechanics Dynamics", vol. 4, John Wiley & Sons, Inc., pp. 264-265, 2001.
15. 이규봉, "알기쉬운 수치해석학", vol. 1, 서울특별시, pp. 221~280, 2001.