

칼만예측기의 ZMP 상태추정을 통한 이족로봇의 균형제어기법

Balance Control of a Biped Robot Using the ZMP State Prediction of the Kalman Estimator

박상범* · 한영준*

SangBum Park and Youngjun Han

* 숭실대학교 정보통신전자공학부

요 약

본 논문은 칼만필터를 이용한 ZMP의 다음 상태 예측을 통한 새로운 이족로봇의 균형제어기법을 제안한다. 일반적으로 이족로봇의 동역학 모델은 3D-LIPM(3D-Linear Inverted Pendulum Mode)에 의해 수학적으로 근사화되지만, 이는 로봇의 동역학적 특성을 완벽하게 표현할 수 없다. 이족로봇의 안정성은 ZMP(Zero Moment Point) 위치가 안정영역에 존재하는 경우에 안정성이 보장된다. 그리고 로봇 구조와 그 모델 사이의 내재된 오차는 로봇의 안정성에 영향을 끼칠 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 균형제어기법은 내부 오차를 줄일 수 있으며, 적절한 로봇의 제어가 가능하다. 제안된 균형제어기법의 실험은 다양한 상황을 포함한 가상의 공간상에서 모의실험되었다.

Abstract

This paper proposes a novel balance control scheme of a biped robot to predict the next position of ZMP using Kalman Filter. The mathematical model of the biped robot is generally approximated by 3D-LIPM(3D-Linear Inverted Pendulum Mode), but it cannot completely express the robot's dynamics. The stability of the biped robot depends on whether the ZMP(Zero Moment Point) position is in the stability region or out of. And the internal error between the robot mechanism and its model could affect the stability of a robot. Therefore, the proposed balance control not reduces the internal error, but also timely generates the proper control. The experiment of the proposed balance control is simulated on the virtual workspace where the biped robot may encounter with various difficulties.

Key Words : biped walking robot, balance control, Kalman filter

1. 서 론

Robot은 기존의 산업용에서 가정 및 오락용으로 활용의 범위가 확대되고 있다. 이에 따라 생활환경에서 인간과 함께 활동하는데 어려움이 없도록 ASIMO같은 인간형 로봇들이 지속적으로 개발되고 있다. 인간형 이족보행로봇의 구현에 있어서 어려운 부분은 이족보행로봇은 구동관절이 고정되어 있지 않기 때문에 쉽게 불안정한 상태에 놓이게 되며 이로 인해 로봇의 균형제어가 어렵다는 점이다.

일반적으로 이족보행로봇의 안정적 보행제어를 위해서는 ZMP(Zero Moment Point) 개념을 활용한 방법들이 사용되고 있다[1]. ZMP는 1960년대 M.Vukobratovic에 의해 제안된 이론으로 이족보행로봇이 보행할 때 발바닥 접지면의 최외각 영역에 의해 생성되는 지지영역(Supported Region)안의 안정영역(Stable Region)에 ZMP를 위치시킬 때 로봇을 안정화시킬 수 있다는 것이다. ZMP개념을 이용한 이동로봇의 안정보행에 관한 연구는 1) 로봇의 동역학을 고려한 보행 궤적을 생성하는 연구와 2) ZMP의 오차값을 보정하는 균형

제어에 관한 연구로 구분할 수 있다.

ZMP의 궤적에 기반한 로봇의 보행패턴을 생성하는 방법들은 다양하게 제안되고 있다. 예를 들면, Erbatur는 인간보행에서의 ZMP궤적을 측정하여 이를 보행로봇에 적용하였으며[2], Arakawa는 안정적인 보행에 적합한 자세들의 training set에 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하여 최적의 보행 패턴을 생성하는 방법을 사용하였다[3]. 이러한 방법들은 인간과 유사한 보행패턴을 생성하지만, 로봇의 구조에 대한 고려가 부족하여 실제 로봇의 운동을 자연스럽게 만들지 못한다. 이를 보완하는 방법으로는 이족보행로봇의 근사화된 동역학적 모델링을 위해 3D-LIPM(3D-Linear Inverted Pendulum Mode)을 이용하는 방법이 주로 사용된다. 이 방법은 이족보행로봇을 기구학적으로 역진자로 단순화시켜 로봇의 보행이 역진자의 안정운동곡면 내에 제한함으로써 안정보행을 달성하는 것이다. Shuuji Kajita는 역진자 모델을 이용하여 보행 패턴을 생성하는 방법에 대해 제안하였고[4], 이족로봇의 동역학 성분을 카트 테이블 모델로 근사화하여 보행 패턴을 생성한 뒤 이전의 ZMP를 feed-back시켜 다음 ZMP의 위치를 결정하는 전형적인 부궤환방법으로 균형제어기법도 구현하였다[5]. Tomomichi Sugihara는 역진자의 운동을 기반으로 ZMP의 궤적을 계획하고, 이를 COG(Center Of Gravity)의 속도로 분해한 뒤 각 관절의 변위를 생성하는 방법을 구현하였다[6]. 역진자의 운동을 기반

접수일자 : 2006년 4월 14일

완료일자 : 2006년 10월 9일

감사의 글 : 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

으로 간략화된 이족로봇의 운동은 보행패턴을 해석하는데 보다 쉬운 접근 방법을 제공함으로써 다관절 로봇의 동역학적 복잡성을 감쇄시켜 주었다. 하지만, 이렇게 생성된 보행패턴은 간략화로 인한 잠재된 오차를 내재하고 있기 때문에 실제 로봇에 적용시 로봇의 기구적 성질에 따라 다른 결과를 나타내게 된다.

보행패턴에 관한 연구와 함께 균형제어에 관한 연구도 다양하게 진행되고 있다. Napoleon은 운동능력을 제한함으로써 외부 장애물에 대한 민감한 반응을 억제하는 방법을 제안하였다. 이로 인해 ZMP의 균형이 흐트러지는 문제를 해결하기 위해 로봇을 하체의 역진자와 상체의 역진자가 물려있는 동역학 모델로 해석하여, 상체의 움직임을 이용하여 전체적인 균형을 제어하였다[7]. ZMP의 오차값을 보정하는 균형제어는 일반적으로 안정영역과 궤적의 운동영역을 일치시켜 궤적의 운동이 안정영역을 벗어나는 경우 오차만큼 보상하는 방법이 많이 사용된다[8,9]. 노경곤은 로봇의 기구적인 형태의 변화를 해석하여 로봇의 안정성을 확보하는 방법을 사용하였다[10]. 이와 같이 과거의 오차값을 미래의 궤적에 적용시키는 데서 발생하는 시간지연으로부터 기인한다. 따라서, 다관절 이족보행로봇의 필연적인 부정확한 동역학적 모델링 방법과 시간지연이 있는 ZMP의 보상방법에서는 이족보행로봇이 쉽게 불안정하게 된다.

본 논문에서는 다관절 이족보행로봇의 부정확한 모델링의 문제를 해결하기 위해 3D-LIPM의 상태값을 적응적으로 보상하는 Kalman필터를 사용하였으며, ZMP보상의 시간지연 문제를 해결하기 위해 Kalman필터에서 예측된 3D-LIPM의 상태값으로부터 ZMP를 결정하는 새로운 제어기법을 제안한다. 이를 위해 이족보행로봇의 발바닥에 부착된 힘 센서(force sensor)들로부터 ZMP를 측정하고 칼만필터(Kalman filter)를 이용하여 다음 명령주기의 ZMP위치를 예측한다. 예측된 ZMP위치를 로봇의 역기구학 해석을 통해 관절의 각 속도를 보상함으로써 이족보행로봇의 균형제어를 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 3D-LIPM 운동에 대한 기본 개념과 이를 이족로봇에 적용하여 역진자 운동의 제한된 특성을 기반으로 한 이족로봇의 보행패턴 생성 방법에 대해 기술하였다. 3장에서는 이족로봇의 ZMP를 예측하기 위한 모델링하는 방법을 기술하였다. 4장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션결과를 분석하여 보여주었다.

2. 이족로봇 기구학과 역진자 운동

2.1 이족로봇의 구조

3차원 공간 상에서 임의의 물체를 정해진 위치와 방향에서 잡기 위해서는 최소 6자유도가 필요하다. 본 논문에서는 로봇의 각 다리가 6자유도, 각 팔은 3자유도, 그리고 허리와 로봇의 머리에 각각 3 자유도를 갖도록 하여 총 21 자유도를 갖도록 한다. 다음의 그림 1은 두 다리의 기구에 설정된 좌표계를 보여준다.

인간의 다리는 발목과 골반에서 각각 한 점의 회전으로 해석할 수 있기 때문에 링크의 길이에 대한 반경의 효율성을 크게 할 수 있다. 따라서, 대상 로봇의 자유도와 관절의 위치를 인간의 보행을 모사할 수 있는 최소 자유도인 6자유도를 가지게 하고, 기구학적 해석이 용이하도록 발목과 골반에서의 각 관절 프레임을 일치시킴으로써 DH(Denavit-Hartenberg) 인자를 줄여주었다. 발바닥의 크기를 고려할 때

에는 발바닥의 크기가 너무 작을 경우 로봇이 너무 쉽게 불안정한 상태에 놓일 수 있으며, 너무 클 경우에는 자연스럽게 보행을 할 수 없으므로 에너지 효율이 떨어지게 된다는 점을 고려하여 상체가 투영되는 크기보다 작게 설계하였다.

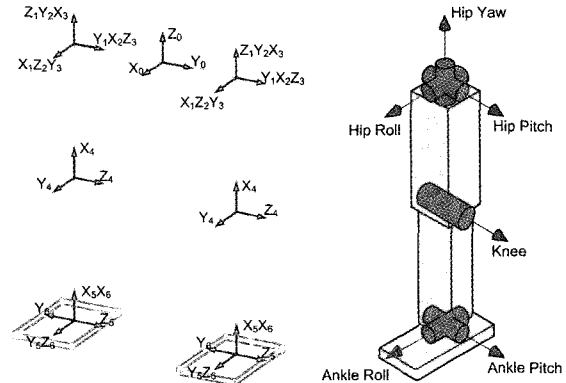
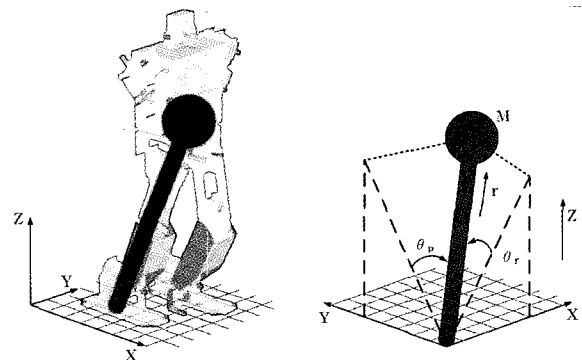


그림. 1 다리구조에 설정된 좌표계 및 다리구조의 명칭
Fig. 1. The coordinates of the foot structure and these name

2.2 3D-Linear Inverted Pendulum Mode

이족로봇의 보행에 있어서 지면의 상태나 외력에 대해 자유도가 높은 구조를 갖는 인간의 경우를 완벽하게 모델링하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 극히 제한적이긴 하지만 인간의 보행 운동 가운데 가장 지배적인 운동력을 발생시키는 형태를 근사적으로 모델링하여 하나의 질점에 집중시킨 역진자 모델을 사용한다. 그림 2에서와 같이 역진자의 운동을 알려진 곡면에 제한하여 선형화시킨 모델을 3D-LIPM이라 한다.

로봇의 동적 보행을 살펴보면, 그림 2(a)에서 보여주듯이, COG(Center Of Gravity)에 해당하는 골반축의 중심이 보행시에 초기의 위치로부터 크게 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 이족보행로봇의 보행이 그림 2(b)에서처럼 특정한 normal vector($k_x, k_y, -1$)를 갖는 평면상에서 일정한 높이(z_c)를 가지고 운동하는 COG로 해석될 수 있다.



(a) 로봇에 투영된 진자 (b) 역진자 모델 파라미터
그림. 2 로봇보행에 대한 역진자 운동모델 적용의 예
Fig. 2. The example of the Robot walking model by the inverted pendulum theorem.

$$z = k_x x + k_y y + z_c \quad (1)$$

만약 식 (1)에서의 k_x 과 k_y 가 0값을 가지는 평면에 운동

을 제한한다면 다음과 같은 역진자의 동역학 방정식이 얻어진다.

$$\ddot{x} = \frac{g}{z_c}x + \frac{1}{mz_c}\tau_y \quad (2)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{z_c}y - \frac{1}{mz_c}\tau_x \quad (3)$$

여기서, m 은 pendulum의 무게를 나타내고, g 는 중력가속도, 마지막으로 τ_x, τ_y 는 각각 x 축과 y 축에 대한 토크이다.

위의 두 선형 방정식은 z_c 에 대한 지배방정식이므로 z 축에서의 한 점과 만나는 제한된 평면이 어떠한 기울기를 가지고 있더라도 수평 운동력에 영향을 주지 않는다. 따라서, 이를 이용한 ZMP는 아래의 수식과 같이 구해진다.

$$p_x = -\frac{\tau_y}{mg} \quad (4)$$

$$p_y = \frac{\tau_x}{mg} \quad (5)$$

여기서 (p_x, p_y) 는 바닥에 투영된 ZMP의 위치값이고 이 식에 식 (2)와 (3)을 τ_x, τ_y 에 대한 식으로 대입하면 다음과 같은 역진자의 동역학 식을 구할 수 있다.

$$-\frac{z_c}{g}\ddot{x} + x = p_x \quad (6)$$

$$-\frac{z_c}{g}\ddot{y} + y = p_y \quad (7)$$

2.3 3D-LIPM을 이용한 보행 궤적 생성

로봇의 COG에 대한 일반적인 접근 방법은 먼저 각 링크에서의 질량분포를 기술하는 Mass diagram을 그리고, 각 링크의 무게중심으로부터 로봇의 COG를 계산한다[11]. 얻어진 로봇의 COG에 대한 운동을 해석함으로써, 이족보행로봇의 복잡한 보행운동을 COG의 운동으로 근사화 할 수 있다. 근사화된 COG의 운동을 역진자 모델이라 하고, 이족보행로봇의 운동을 역진자 모델에 근사화하여 보행패턴을 생성해낸다. 본 논문에서는 이족보행로봇의 동적 보행의 안정성 확보를 위해 ZMP의 궤적을 기반으로 보행 패턴을 구현한다.

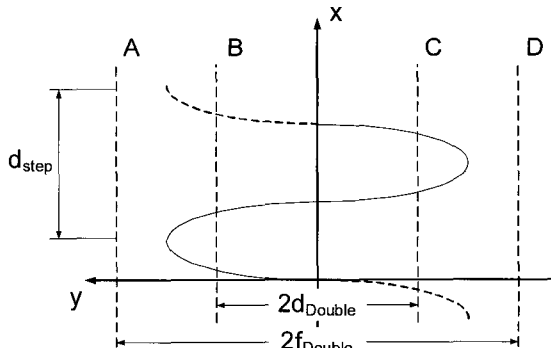


그림. 3 한 스텝에 대한 ZMP 궤적
Fig. 3. ZMP trajectory for a step.

로봇 보행의 ZMP궤적은 로봇이 한 발짝을 ZMP궤적의 주기적 반복으로 구성되고 있음을 기존의 연구들로부터 확인

할 수 있다[12,13]. 사람의 다리는 골반축의 중심으로 좌우 대칭적이기 때문에, 보행 시에 ZMP의 궤적이 좌우 대칭으로 나타난다. 이와 같은 보행패턴의 주기성 및 좌우 대칭성을 고려하면 이족보행로봇의 ZMP운동들은 그림 3과 같이 Sine 파형으로 근사화 될 수 있다.

이족보행로봇의 진행 방향을 X축에 일치시켰을 때, A-B 구간은 LSS(Left Single Support area), C-D구간은 RSS(Right Single Support area)로 나눌 수 있다. 그리고, B-C구간을 DS(Double Support area)로 나눌 때, 크게 SS(Single Support area) 구간에서의 운동과 DS구간에서의 운동으로 나뉘어 진다. SS구간의 폭은 발바닥의 폭과 같은 지지영역을 의미하고, DS구간의 폭은 이족보행로봇의 다리 사이 간격이다. 궤적의 연속성은 Sine파형의 연속성으로 유지되고, 지지각의 전환은 ZMP의 y 축 상의 변위에 따른다. 보행 폭(d_{step})은 Sine파형의 한 주기인 360° 에 대한 각속도에 비례하여 결정할 수 있다.

이족보행로봇의 보행 패턴을 결정하는 ZMP궤적이 얻어지면 역진자의 동역학 방정식(식 (6)과 (7))으로부터 ZMP에 상응하는 COG의 위치값을 계산할 수 있다. 식 (6)과 (7)에서 p_x 와 p_y 는 Sine파형으로 근사화한 ZMP의 좌표점으로 비제차(Non-homogeneous) 2계 미분 방정식의 강제함수(forced function)이므로 이 식의 정상상태(steady-state) 해가 COG의 좌표점(x, y)이 된다.

보행패턴이 결정되면, 먼저 x 축의 COG좌표점 x 를 결정하기 위해 각주파수 ω 를 갖는 p_y 의 궤적을 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$p_x = A \sin \omega t \quad (8)$$

식 (6)은 이를 이용하여 다음과 같이 표준 비제차 2계 미분방정식으로 변환된다.

$$\ddot{x} - \frac{g}{z_c}x = -\frac{g}{z_c}A \sin \omega t \quad (9)$$

비제차 미분방정식의 강제함수인 p_x 가 Sine함수이기 때문에, 정상상태에서의 x 값 또한 다음과 같이 Sine함수형태의 각주파수를 갖게 된다.

$$x = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (10)$$

이를 식 (9)에 대입하여 계수 비교법에 따라 미분방정식의 정상상태 해를 풀면 다음의 식(11)을 구할 수 있다.

$$x = \frac{g}{z_c \omega^2 + g} \cdot p_x \quad (11)$$

같은 방법으로 COG의 y 축 좌표값은 다음과 같이 결정된다.

$$y = \frac{g}{z_c \omega^2 + g} \cdot p_y \quad (12)$$

식 (11)과 (12)로부터 알 수 있듯이 이족보행로봇의 COG의 위치가 평면($z = z_c$) 상에서 움직이도록 제한되고 로봇의 ZMP가 전방향과 좌우방향의 대칭 움직임이 Sine 파형으로 근사화되면, COG의 좌표값은 ZMP의 좌표값의 비례 $\left(\frac{g}{z_c \omega^2 + g}\right)$ 값으로 결정된다.

3. 칼만 필터를 이용한 ZMP 상태 예측

본 논문에서는 다관절 이족보행로봇의 부정확한 모델링의 문제를 해결하기 위해 3D-LIPM의 상태값을 적응적으로 보상하는 Kalman필터를 사용하고, 시간지연의 측정 ZMP의 문제점을 해결하기 위해 Kalman필터에서 예측된 3D-LIPM의 상태값으로부터 ZMP를 결정하는 균형 제어 기법을 사용한다.

다음의 그림 4는 제안하는 균형제어기법의 구성도를 보여준다. 역진자의 균형제어를 위해, 사전에 생성된 ZMP의 목표 궤적(*Px)과 칼만필터를 통해 예측된 값(Px)의 오차값(e(k))을 보상한다. 여기서, ZMP의 예측값은 칼만필터의 보정(correction)과정을 통해 얻어진 상태 예측값을 식 (6)과 (7)에 대입하여 계산한다. Servo control모듈에서는 ZMP의 오차값을 이용하여 로봇을 제어하기 위해 COG의 궤적을 식 (11)과 (12)을 이용하여 구한다. 수정된 COG를 이용하여 역기구학을 풀면 각 관절의 각속도 값들을 계산할 수 있다.

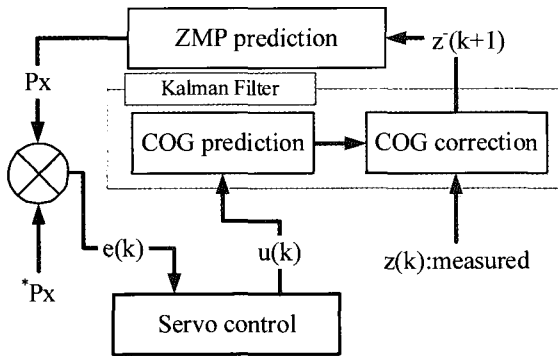


그림 4. 제안하는 균형제어 기법의 구성도

Fig. 4. The block diagram of proposed technique of the balancing control.

ZMP의 상태예측을 위한 COG의 상태 모델링의 칼만필터의 기본식은 다음과 같이 주어진다.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_k \quad (13)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (14)$$

$x_k = [x \ y \ \dot{x} \ \dot{y} \ \ddot{x} \ \ddot{y}]^T$ 는 현재의 상태값으로 COG의 x,y 성분들의 위치, 속도, 가속도를 나타내고 있다. Transition matrix A는 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$z_k = [x_{zmp} \ y_{zmp}]^T$ 는 측정 벡터값으로 ZMP의 x와 y축 위치이다. 상태벡터에 대한 Related matrix H는 아래와 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -z_c/g & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -z_c/g \end{bmatrix} \quad (16)$$

또한 w_k 와 v_k 는 상태에러와 측정어러로 Zero-mean White Gaussian Noise을 따른다.

$$w_k \approx N(0, v_1) \quad (17)$$

$$v_k \approx N(0, v_2) \quad (18)$$

칼만필터의 기본수식에 따른 다음 상태의 예측값은 아래의 수식을 통해 결정되어진다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \dot{x}_{k-1} \\ \dot{y}_{k-1} \\ \ddot{x}_{k-1} \\ \ddot{y}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x(k-1) \\ u_y(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x(k) \\ w_y(k) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

x_k 는 세 가지 요소로 나눌 수 있다. 첫 번째 요소는 x 성분과 y성분의 이전 시간에서의 상태값에 대한 다음 시간의 예측값을 계산한다. 두 번째 요소는 추가 제어 성분으로 이전 상태의 COG에 대한 오차값을 ZMP로 변환하여 더해준다. 마지막 요소는 랜덤변수로서 처리잡음 성분으로 백색잡음을 추가한다. 측정값은 다음의 식을 통해 갱신된다.

$$z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -z_c/g & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -z_c/g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{COM} \\ y_{COM} \\ \dot{x}_{COM} \\ \dot{y}_{COM} \\ \ddot{x}_{COM} \\ \ddot{y}_{COM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

z_k 는 두 가지 요소로 나눌 수 있다. 첫 번째 요소는 측정된 COG를 ZMP로의 변환행렬을 통해 ZMP로 변환된다. 측정된 ZMP성분은 측정잡음과 추정잡음 성분으로 나타나는 두 번째 요소와 더해짐으로써 측정값을 갱신시키게 된다.

4. 모의실험 및 논의

제안하는 균형제어기법의 성능을 평가하기 위해 모의실험을 진행하였다. 이들 프로그램들은 그림 5에서와 같이 공유

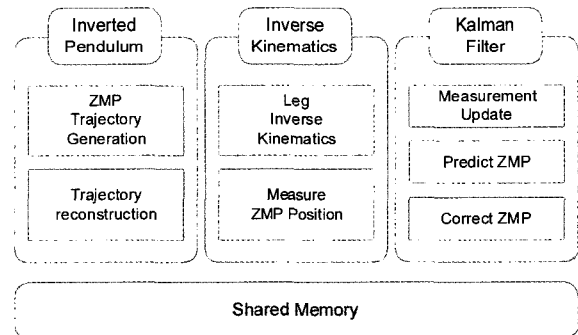


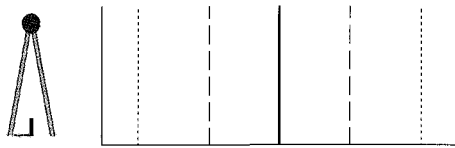
그림 5. 모의실험을 위한 시뮬레이터의 구조

Fig. 5. The architecture of simulation program.

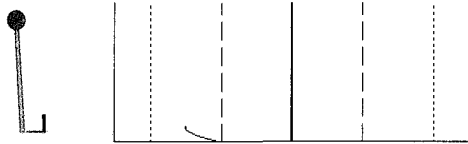
메모리를 파이프라인으로 하여 연결되어 있다. 로봇은 기구학적인 특성과 함께 설계정보를 입력하면 원하는 형태로 설계가 가능하다.

제안하는 방법의 성능은 다음과 같이 세 가지 관점에서 평가된다: 1) 정상적인 보행동작을 수행하는 경우, 2) 측정오차가 일정범위에서 발생하는 경우, 3) 마지막으로 측정오차에서 임펄스 성분이 포함된 경우.

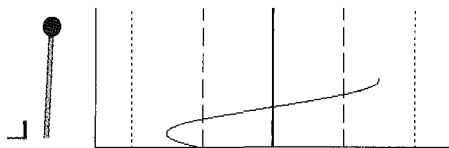
첫 번째의 정상적인 보행동작을 수행하는 경우에 대한 실험은 측정오차 성분이 존재하지 않는 경우로 정의할 수 있다. 먼저 프로그램이 동작을 하게 되면 역진자 운동을 통한 ZMP의 목적 궤적을 생성하고, 이를 COG의 궤적으로 변환하여 로봇에 전달한다. 그림 6은 역진자의 운동에 의한 ZMP의 목적궤적을 생성하는 실험 결과이다.



(a) Double Support Phase



(b) Left Single Support Phase

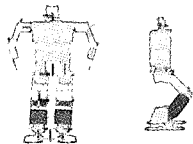


(c) Right Single Support Phase

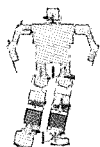
그림 6. 역진자 운동에 따른 보행 궤적 생성

Fig. 6. The walking trajectory using the inverted pendulum mode.

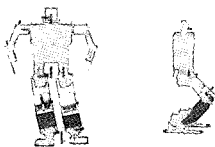
이는 COG값으로 변환되고, 변환된 COG을 역기구학에 적용하여 로봇의 각 관절의 변위를 계산해 낼 수 있다. 변환된 변위는 즉각 로봇에 전달되어 로봇은 역진자의 운동에 맞게 중심변환을 통한 보행이 이루어진다. 그림 7은 시뮬레이션 로봇에 적용하여 표현한 결과이다.



(a) DS Phase



(b) LSS Phase

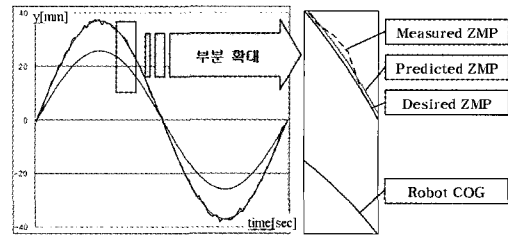


(c) RSS Phase

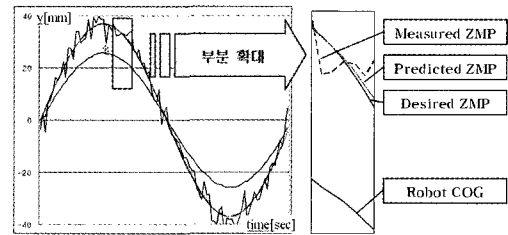
그림 7. 로봇 보행 모델링

Fig. 7. The robot walking phases.

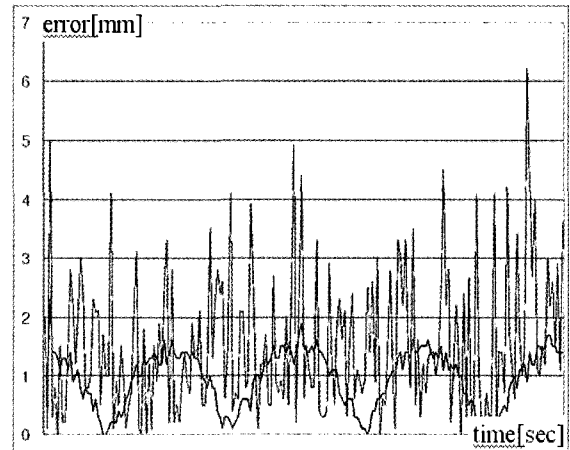
두 번째로 측정오차가 일정범위에서 발생하는 경우를 가정하여 각각 2.0[mm²]와 10.0[mm²]경우를 실험하였다.



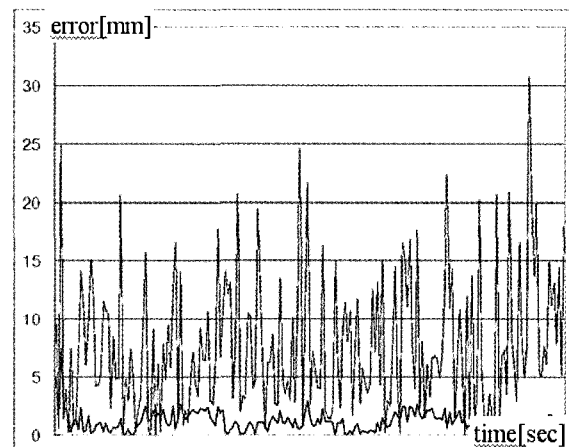
(a) ZMP와 COG의 궤적 (var.=2.0[mm²])



(b) ZMP와 COG의 궤적 (var.=10.0[mm²])



(c) 목적값과 측정값의 오차 (var.=2.0[mm²])



(c) 목적값과 측정값의 오차 (var.=10.0[mm²])

[가로축 : periodic time cycle

세로축 : 로봇의 어깨방향에 평행한 축에 대한 변위]

그림 8. 분산값에 따른 실험결과

Fig. 8. The experimental result in the various values about variance.

위의 그림에서는 분산값을 달리하여 ZMP의 목적 궤적과 측정 궤적, 그에 따른 COG와 ZMP의 궤적을 각각 (a)와 (b)에서 도식하였다. 목적 궤적을 기반으로 분산값을 달리하여 측정 궤적을 생성하였다. (c)와 (d)에서는 목적궤적에 대한 측정 궤적과 예측궤적의 차이를 도식하였다. 실험 결과는 필터를 사용한 경우 예측값과의 오차가 적게 나타남으로써 원하는 결과를 유도할 수 있었다. 특히 분산값이 클수록 상대적으로 오차값이 작게 나타남을 알 수 있었다. 분산값이 2.0[mm²]인 경우 측정 궤적과의 평균 오차는 15[mm²]이며, 추정 궤적과의 평균 오차값은 9.60[mm]를 나타내고 있다. 반면 분산값이 10.0[mm²]인 경우 측정 궤적과의 평균 오차값은 39.5[mm]이며 11.30[mm]로 나타났다. 이를 통해 환경의 영향에 대해 강인한 모델로 동작하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 임펄스 성분에 대한 경우는 측정오차의 분산값을 5.0[mm²]으로 하였으며 불규칙한 임펄스 성분에 대한 분산값은 50.0[mm²]으로 하여 실험하였다. 그림 9는 임의의 임펄스 성분을 가했을 경우의 왼 발의 각 관절의 변위를 나타낸 그래프이다.

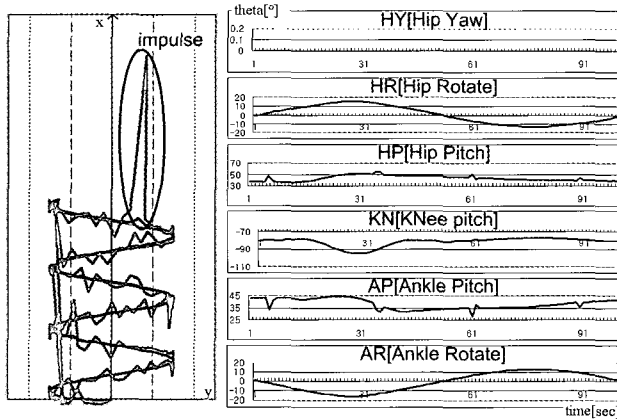


그림 9. 임펄스 성분에 대한 실험 그래프

Fig. 9. The test graph of the unexpected impulse factor.

위의 실험을 통해 검증된 이론을 실제 로봇에 적용할 경우에 나타날 수 있는 문제점은 로봇의 기구적 변위에 따라 얼마만큼 강인함을 나타나는가에 있다. 따라서, 본 논문에서 제안된 이론에 대한 검증을 확고히 하기 위해 로봇의 기구적 변위를 표현하는 DH 인자를 변경하여 실험하였다. 실험에 사용되어진 인자는 표 1에 기술하였다.

표 1. 기구적 변이에 따른 안정성 평가를 위한 DH인자
Table 1. DH parameters of the various kinematic element for the stability test.

#	Type A				Type B				Type C			
	a	α	d	Θ	a	α	d	Θ	a	α	d	Θ
1	0	0	0	90	0	0	0	90	0	0	0	90
2	0	90	0	HY	0	90	0	HY	0	90	0	HY
3	0	90	0	90+ HR	0	90	0	90+ HR	0	90	0	90+ HR
4	-102	0	-37	HP	-120	0	-37	HP	-82	0	-37	HP
5	-120	0	0	KN	-140	0	0	KN	-100	0	0	KN
6	0	-90	0	AP	0	-90	0	AP	0	-90	0	AP
7	0	90	31.1	AR	0	90	31.1	AR	0	90	31.1	AR

Type A는 로봇 전체 신장에 적합한 하체의 로봇에 대한 인자를 나타내고, Type B는 Type A 로봇에 비해 하체가 긴 로봇에 대한 인자를 나타낸다. Type C는 Type A 로봇에 비해 하체가 짧은 로봇에 대한 인자를 나타낸다. 각각의 로봇에 대해 분산값을 각각 2.0[mm²]과 10.0[mm²]로 하여 실험하였다. 또한 다리부분의 링크 길이가 변화하였기 때문에 이에 따른 로봇 골반의 높이도 달리하여야 한다. 본 논문에서 적용된 로봇은 Type A이며 골반의 높이는 198.23[mm]를 가지게 된다. Type B는 상대적으로 로봇의 다리를 길게 가지므로 골반의 높이를 206.00[mm]로 높인다. Type C는 반대로 다리를 짧게 가지므로 골반의 높이를 192.00[mm]로 낮춘다. 각 Type에서의 안정성에 대한 척도는 목적 궤적과 추정 궤적의 차이값으로 둘 수 있다. 실험 결과는 표 2에 기술하였다.

표 2. 기구적 변이에 따른 안정성 평가 결과 [단위:mm]
Table 2. The result of stability test about kinetic difference.

Type	A		B		C	
	var[mm ²]					
측정값과 평균오차값	15.35	39.5	15.37	39.56	15.34	39.55
예측값과 평균오차값	9.6	11.30	9.89	12.09	9.72	11.43

모든 Type에 적용하였을 경우 보폭의 차이가 나타났을 뿐, 안정성 면에서는 기구적 변위에 대해 강인함을 보여준다. 이상으로 시뮬레이션을 이용한 모의실험을 통해 실제 로봇에 적용될 경우의 성능을 평가하였다. 정상적인 보행을 하는 경우는 이상적인 환경이기 때문에 실험의 결과는 이론적인 방법에 대한 증명으로 그칠 수 있지만, 측정잡음의 분산의 범위를 달리하여 실험한 경우를 고려하면 실제 로봇에서의 측정오차가 크게 발생하더라도 안정성을 유지하는 모습을 볼 수 있다. 더불어 임펄스에 대한 고려를 통해 바닥면이 고르지 못해서 발생하는 측정오차의 큰 변위에 대해서도 강인한 실험결과를 도출하였기 때문에 실제 로봇에 적용되어 발생하는 경우에도 안정성을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

다관절 이족보행로봇의 균형제어를 위해 주로 사용되는 ZMP의 보상방법은 필연적인 부정확한 동역학적 모델링과 시간 지연으로 인해 로봇의 보행이 쉽게 불안정하게 된다. 본 논문에서는 부정확한 모델링의 문제를 해결하기 위해 3D-LIPM의 상태값을 적응적으로 보상하는 Kalman필터를 사용하였으며, 시간지연의 문제점을 해결하기 위해 Kalman필터에서 예측된 3D-LIPM의 상태값으로부터 ZMP를 결정하는 이족보행로봇의 균형제어기법을 사용했다. 제안하는 방법을 다양한 구조의 로봇에 적용해보기 위해 3차원 시뮬레이터를 제작하여 실험하였으며 성능평가는 칼만 필터를 적용한 상황과 그렇지 않은 상황을 비교하여 실험하였다. 칼만필터의 측정값을 얻기 위해, COG으로부터 계산된 ZMP에 두 가지 다른 분산값을 갖는 WGN을 더하여 실험하였다. 실험 결과에서는 WGN의 분산값이 작은 경우에는 비슷한 성능을 보였지만, WGN의 분산값이 커짐에 따라 칼만필터를 사용한 제안하는 방법이 뛰어난 보행 안정성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M.Vukobratovi and B.Borovac, "Zero-Moment Point Thirty Five Years of its Life," International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1, No.1, pp.157-173, August 2004.

[2] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, and A. Kawamura, "A Study on the Zero Moment Point Measurement for Biped Walking Robots," International Workshop on Advanced Motion Control, Vol. 7, pp.431-436, July 2002.

[3] T. Arakawa and T. Fukuda, "Natural motion trajectory generation of biped locomotion robot using genetic algorithm through energy optimization," Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Man and Cybernetics(Conference Proceedings), pp.1495-1500, October 1996.

[4] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H.Hirukawa, "A Realtime Pattern Generator for Biped Walking," Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.31-37, May 2002.

[5] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K.Harada, K.Yokoi, and H.Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point," Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1620-1626, September 2003.

[6] T. Sugihara, Y. Nakamura, and H. Inoue, "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control," Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.1404-1409, May 2002.

[7] Napoleon, S. Nakaura, and M. Sampei, "Performance Limitation on Control Systems : An Analysis to ZMP Control of Biped," Proceedings of the IECI Japan Workshop 2003.

[8] Q. Huang, S. Kajita, N. Koyachi, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Arai, K. Komoriya, and K. Tanie, "A high stability, smooth walking pattern for a biped robot," Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.65-71, 1999.

[9] Q. Huang, G. Wang, and K.Li, "Sensory Reflex Control for Hum-anoid Walking," Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp.3256-3260, June 2002.

[10] 노경곤, 공정식, 김진걸, "이족보행로봇의 궤적 추종 오차 감소를 위한 걸음새 분석," 제어자동화시스템 공학 논문지 제8권, 제10호, pp890-897, October 2002.

[11] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue, and A. Takanishi, "Development of a bipedal humanoid robot-control method of whole body cooperative dynamic biped walking," Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.368-374, May 1999.

[12] Junghoon Kim, "A study on the realization of dynamic gait for a biped humanoid robot," KIST 학위논문(박사), 2004.

[13] 김태욱, "이족 보행 로봇을 위한 ZMP 기반의 동작 패턴 생성과 실시간 자세제어," KAIST 학위논문(석사), 2003.

저 자 소 개



박상범(SangBum, Park)

2004년 : 숭실대학교 IT대학 전자공학과 졸업.
 2006년 : 숭실대학교 전자공학과 석사과정 졸업.
 2006년 3월~현재 : 숭실대학교 대학원 전자공학과 박사과정.

관심분야 : 이족보행로봇, 제어시스템, 로봇비전
 Phone : +82-02-821-2050
 Fax : +82-02-826-8937
 E-mail : forcepsb@ssu.ac.kr



한영준(Youngjoon, Han)

제 14권 7호(2004년 12월호) 참조