

# 영상에 포함된 참고물체의 기하학적 정보를 이용한 이족로봇의 균형제어기법

## Balance Control Scheme of a Biped Robot using Geometrical Information of a Reference Object in an Input Image

박상범, 한영준, 한현수

서울시 동작구 송실대학교 전자공학과  
E-mail: {forcepsb,young.hahn}@ssu.ac.kr

### 요 약

본 논문은 로봇이 영상을 통해 획득한 특정물체의 기하학적 정보를 이용하여 이족로봇이 안정적으로 보행할 수 있게 하기 위한 균형제어기법을 제안한다. 영상은 핀 홀 카메라 모델을 통해 획득하였으며, 영상에 포함되는 특정물체의 특징성분에 대한 변위와 로봇의 자세와의 상관관계는 핀 홀 카메라 모델을 이용하여 공간좌표계의 특징정보를 평면좌표계의 영상정보에 매칭시킨 후, 특징들의 변위에 따른 로봇 관절 좌표계의 변위를 추정하는 방법으로 구할 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 균형제어기법은 별도의 센서없이 카메라만을 이용하여 이족보행 로봇의 균형제어가 가능하다는 장점을 가지며, 소형이족로봇을 이용한 실험을 통해 그 효율성을 검증하였다.

**Key Words** : Visual Servoing, Biped Walking Robot, Balance Control, 3D-LIPM

### 1. 서 론

인간이 눈을 감은 상태에서 직진보행을 할 때에 몸이 좌우로 흔들리고 똑바로 걷고 힘들다. 이는 인간의 보행이 전정기관에서 감지하는 균형감각 뿐만 아니라 시각 시스템에서 얻어지는 정보에도 상당히 의존적이라는 사실을 보여준다. 또한, 인간은 목적지를 찾아 걸어갈 때에 방향정보를 얻거나 바닥의 장애물을 감지하고 회피할 때는 시각시스템에 크게 의존한다. 이처럼 인간이 삶을 살아갈 때에 시각정보에 상당히 의존하듯이 인간의 행태를 모방하는 휴머노이드 로봇도 인간과 같은 자연스러운 보행을 위해 시각정보를 반드시 필요로 한다.

시각정보를 이용한 이족로봇의 제어는 경로 생성(Path Planning), 경로 보정(Path Correction), 장애물 회피(Avoid Obstacles) 등의 연구에 집중되었다. Sabe.K[1]는 영상을 통해 블럭화된 맵을 구성하여 주변 환경을 인식하고, 장애물을 회피하여 목적지에 도달하는 기법을 제안하였다. 그러나 로봇의 주변 환경을 셀단위로 정의하여 구성하였기 때문에 공간 효율성이 떨어지므로 로봇의 활동공간의 넓이에 제한을 받게된다. 이를 보정하는 방법으로 Okada K[2]는 장애물의 공간을 원기둥으로 근사화하여 이를 기반으로 하는 경로 설정 기법을 제안

하였지만, 여전히 제한된 공간 효율성을 가지고 있다. K.Nishiwaki[3]는 3D Hough Transformation을 이용한 PSF[Plane Segment Finder]를 적용하여 장애물을 제외한 나머지 바닥면을 추출하고, 생성된 경로를 따르는 로봇의 보행제어 기법을 제안한다. Kumagai.M[4]는 기울어진 바닥면에 대한 수직 성분을 추출하여 발바닥의 안착 각도를 결정하는 기법을 제안했다. 이러한 시각정보와 로봇의 관계를 통해 로봇의 경로를 제어하는 것은 중요한 연구분야로 자리매김되었지만, 별도의 센서정보를 이용한 로봇 본연의 균형제어기법을 병행해야 한다는 부분은 여전히 로봇제어의 부담으로 남아있다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위한 영상에서 대상 물체의 위치, 방향 정보를 이용하여 이족로봇을 제어하는 새로운 균형제어 기법을 제안한다. 목적궤적에 대한 측정궤적을 시각정보를 이용하여 측정하기 위해서는 먼저 이족로봇의 기구적 특성을 고려한 3D-LIPM(3D-Linear Inverted Pendulum Model)을 이용한 목적궤적을 생성한다. 현재의 궤적을 측정하기 위해 이족로봇의 머리에 위치한 카메라 좌표에 대해 핀 홀(pin-hole) 카메라 모델을 이용하여 영상을 통해 획득한 정보와 카메라 좌표계의 기하학적 관계를 측정한다. 측정된 카메라 좌표계는 로봇의 중심좌표

계와 고정된 기하학 관계를 가지기 때문에 로봇의 현재 상태를 알 수 있다. 로봇의 현재 상태는 목적궤적과 비교되어 차이값을 칼만필터에 적용하여 로봇의 균형제어가 수행된다.

## 2. 이족로봇의 기구적 분석

### 2.1 이족로봇의 기구적 특성

본 연구에 사용된 이족로봇의 구조는 그림 1과 같이 기구학 해석이 용이하도록 골반관절 축과 발목관절 축을 일치시켜 DH(Denavit Hartenberg) 인자를 줄였다. 상체와 카메라 축을 고정시키기 위해 허리 구조에 자유도를 두지 않았으며, 이족로봇의 팔은 각각 3 자유도의 구조를 갖도록 했다.

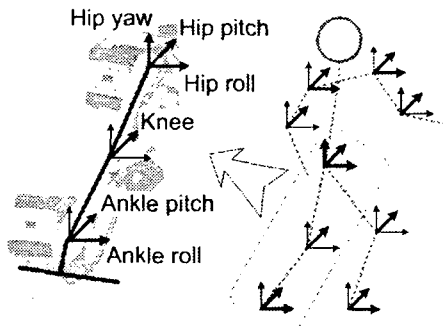


그림 1. 이족로봇의 관절 자유도

### 2.2 이족로봇의 보행궤적 생성

인간과 유사한 6 자유도의 다리구조를 갖는 이족로봇은 대칭적이고 주기적인 보행운동을 분석하는데도 매우 복잡한 동역학적 모델링과 해석방법이 필요하다. 따라서 많은 이족보행로봇의 연구에서처럼, 이족로봇을 하나의 질점에 집중시킨 3D-LIPM을 사용하여 이족로봇의 지배적인 운동만을 고려하였다[5].

$$-\frac{z_c}{g}\ddot{x} + x = P_x, \quad -\frac{z_c}{g}\ddot{y} + y = P_y \quad (1)$$

여기서  $x, \dot{x}, y, \dot{y}$ 는 이족로봇의 COM(Center Of Mass)의  $x$ 축과  $y$ 축의 변위와 가속도이다.  $g$ 는 중력가속도이다.  $P_x$ 와  $P_y$ 는 각각  $x$ 축과  $y$ 축의 ZMP(Zero Moment Point)의 위치이다. 그리고,  $z_c$ 는 고정 평면에 운동하는 COM의 높이이다.

동보행의 원리에 따라 이족로봇의 ZMP가 양 발바닥이 형성하는 면적 내에 놓이기만 하면 이족로봇은 안정적인 보행이 가능하다. 따라서 이족로봇의 보행 시에 발바닥이 만들어내는 궤적으로부터 ZMP 궤적을 생성할 수 있다. 보행궤적의 대칭성과 주기성을 고려한 ZMP

궤적을 삼각함수의 형태로 제한하고, 이를 비제차 2계 미분 방정식(식(1))의 강제함수( $P_x, P_y$ )에 대입하여 COM의 정상상태의 해를 구할 수 있다.

$$x = \Theta_x \left[ \frac{g}{4z_c\omega_x^2 + g} P_x \right], \quad y = \frac{g}{z_c\omega^2 + g} P_y \quad (2)$$

위 식을 살펴보면 COM의 위치는 보행궤적의 주기가 일정하다면 ZMP위치의 상수배로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

## 3. 영상정보 기반의 로봇의 자세 결정

단일 카메라로부터 획득된 영상으로부터 측정된 참조물체에 대한 자세로부터 로봇의 자세를 간단히 결정하기 위해 모든 참조물체 특징들이 동일 평면상에 놓여 있다고 가정한다. 본 논문에서는 그림 2에서 보여주는 것처럼 동일 평면상에 일정간격으로 놓여진 9개의 물체 특징점들을 사용하였다.

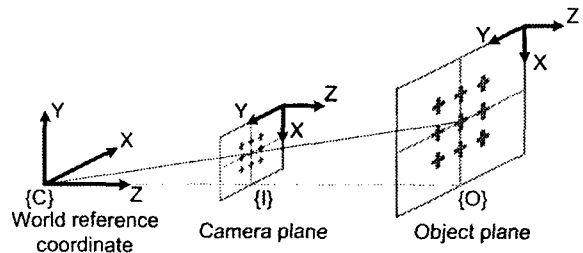


그림 2. 핀 홀 카메라 모델

핀 홀 카메라 모델은 3차원 카메라 좌표계에서 참조물체의 특징점을 2차원 영상 좌표상의 점으로 원근 투영시킨다. 참조물체의 모든 특징점들이 그림 2처럼 동일 평면상에 놓여있다고 가정을 했기 때문에 물체 좌표계의 물체 특징점들을 컴퓨터 영상좌표계의 영상특징점으로 변환할 수 있도록 이들의 상관관계를 고려하여 다음의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$AK = B$$

$$A = \begin{bmatrix} f_s^2 X_1 f_s^2 Y_1 & 0 & 0 & (u_1 - u_0)^2 X_1 - (u_1 - u_0)^2 Y_1 f_s & 0 \\ 0 & 0 & f_s^2 X_1 f_s^2 Y_1 & -(u_1 - u_0)^2 X_1 - (u_1 - u_0)^2 Y_1 & 0 f_s \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_s^2 X_n f_s^2 Y_n & 0 & 0 & -(u_n - u_0)^2 X_n - (u_n - u_0)^2 Y_n f_s & 0 \\ 0 & 0 & f_s^2 X_n f_s^2 Y_n & -(u_n - u_0)^2 X_n - (u_n - u_0)^2 Y_n & 0 f_s \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{21} & R_{22} & R_{31} & R_{32} & T_x & T_y \\ T_x & T_y & T_x & T_y & T_x & T_y & T_x & T_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = [u_1 - u_0 \quad v_1 \quad u_2 - u_0 \quad v_2 - v_0 \quad \dots \quad u_n - u_0 \quad v_n - v_0]$$

위 식에서 8개의 미지수를 가지는  $K$ 을 결정하기 위해 최소 4개의 참조물체 특징점들을

획득해야 한다. 하지만, 실세계 공간상의 외란의 영향을 고려하여 본 논문에서는 그림 2와 같이 9개의 특징점들을 사용하였으며 최소자승법을 적용하여  $K$ 를 결정하였다.

여기서  $t_i$ 값을 계산하기 위해서는 회전행렬의 직교특성과  $t_i$ 값의 크기는 항상  $f$ 보다 크다는 조건을 이용하여  $t_i$ 값에 대한 다음의 해를 계산할 수 있다.

$$t_i = f + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{K_1^2 + K_3^2 + K_5^2}} + \frac{1}{\sqrt{K_0^2 + K_2^2 + K_4^2}} \right) \quad (4)$$

이 때  $K_i$ 는  $K$ 의  $i$ 번째 성분이다.  $t_i$ 값의 결정은 계산된 두  $t_i$ 값의 평균값으로 결정하며,  $t_i$ 값으로부터 카메라 좌표계와 물체 좌표계 사이의 관계인 동차행렬의 성분들을 결정할 수 있다. 이를 기반으로 카메라 좌표계에 대한 물체의 자세를 결정할 수 있다.

#### 4. 칼만필터 기반의 균형제어기법

일반적으로 이족로봇의 균형제어는 로봇의 COM이나 ZMP의 위치에 대한 목적궤적을 계획하고, 로봇을 동작시킨 후 측정된 COM이나 ZMP값과 목적궤적과의 오차값으로 로봇을 제어하는 피드백 시스템을 사용한다. 이런 제어 기법은 보행궤적에서 측정된 현재 오차값으로 다음 주기에 로봇의 ZMP를 보정하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문은 칼만 필터를 사용하여 다음 주기의 ZMP 값을 예측하여 목적궤적과의 오차값으로 이족로봇의 균형제어를 수행한다[6]. 그림 3은 로봇의 COM을 예측하고 영상정보에서 로봇의 자세를 측정하여 COM을 교정하는 기법을 도식하였다.

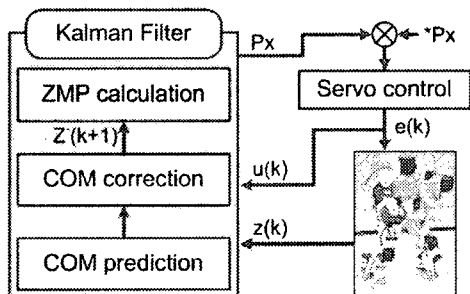


그림 3. 칼만필터기반의 로봇의 균형제어

먼저, ZMP의 목적궤적과 예측궤적 사이의 오차값  $e(k)$ 를 로봇의 Servo controller에 전달한다. Servo Controller는 ZMP 공간의 오차값  $e(k)$ 를 COM 공간으로 변경하여 칼만 필터의 입력으로 전달한다. Servo Controller는 이족로봇의 균형제어를 위해  $u(k)$ 를 결정한다. 칼만

필터는 COM 영역의 오차값과 시스템 잡음(system noise)을 이용하여 로봇의 COM을 예측한다. COM의 교정은 영상에서 측정된 로봇의 자세와 측정잡음(measurement noise)을 고려함으로써 수행된다.

#### 5. 실험 결과 및 고찰

본 연구에 대한 실험을 위해 머리에 카메라를 장착하고, 각 6 자유도의 다리를 가지는 이족로봇을 사용하였다. 이족로봇과 참조물체의 기하학적 정보를 고정시키기 위해 그림 4와 같은 실험환경을 구성하였다.

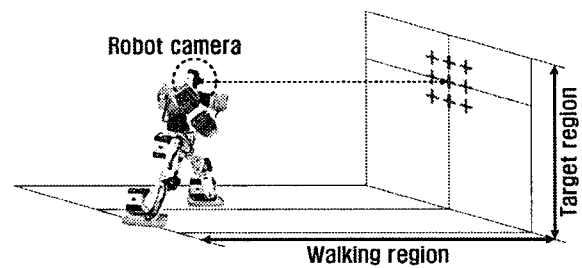


그림 4. 이족로봇과 실험공간

##### 5.1 카메라 캘리브레이션

공간상의 참조물체에 대한 카메라의 자세정보를 얻기 위해서는 카메라 내부변수와 외부변수에 의한 전이관계를 계산해야 한다. 이를 위해 Camera Calibration Toolbox for Matlab을 이용하여 그림 5와 표 1의 결과를 도출하였다.

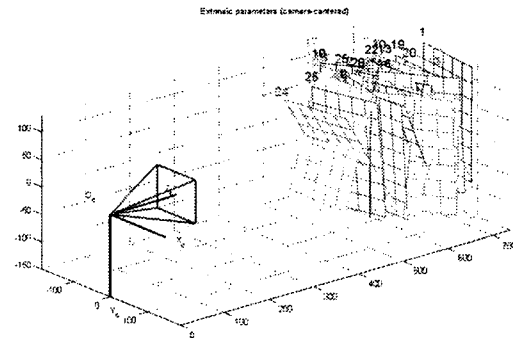


그림 5. 카메라 캘리브레이션 실험 결과  
표 1. 모델링을 위한 초기 파라미터들.

변위 성분 값		평균 오차값
X	병진 성분	17.153867[mm]
	회전 성분	7.825043[°]
Y	병진 성분	18.893050[mm]
	회전 성분	5.111375[°]
Z	병진 성분	31.185900[mm]
	회전 성분	5.151296[°]

### 5.2 일반 서보 제어 실험

일반적인 이족로봇의 제어는 PID 제어를 통해 이루어진다. 센서를 통해 획득한 정보는 제어 입력 정보와 함께 제어기의 입력으로 처리되어 로봇을 제어하게 된다. 그림 6은 PID 제어 실험 결과를 그래프로 도식하였다.

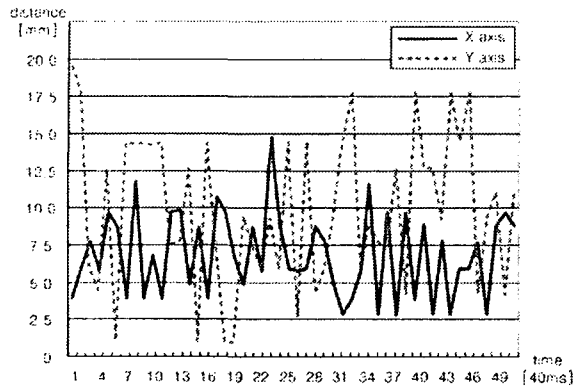


그림 6. 일반 서보 제어 실험 결과

목적궤적의 COM과 참조영상을 통해 획득한 COM의 변위는 Y축에 대해 평균 9.82[mm]의 차이를 나타내고, X축에 대해서는 평균 7.35[mm]의 차이를 나타낸다. Single Support Phase에서의 안정영역의 중심으로부터의 Y축의 변위가 21.0[mm]인 점을 감안할 때 순간 변위가 17.5[mm]정도에 이르는 경우 로봇의 속도에 따라서 중심을 잃고 쓰러지려는 경우도 발생하였다.

### 5.3 칼만필터를 이용한 제어 실험

칼만필터를 이용한 균형제어 기법을 적용하는 경우 카메라를 통해 획득한 COM의 측정궤적 정보가 칼만필터 기반 제어기의 입력값으로 가해지게 된다. 입력된 측정값을 기반으로 다음 목적궤적에서의 오차값을 예측하고, 예측된 오차에 대해 수정된 목적궤적을 통해 로봇을 제어하게 된다. 그림 7을 통해 실험 결과를 도식하였다.

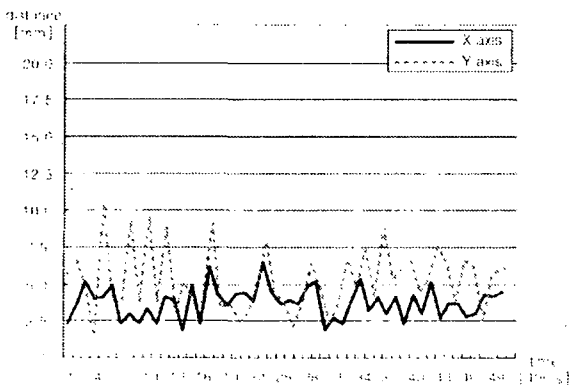


그림 7. 칼만필터 기반의 제어 실험 결과

목적궤적에 대한 측정궤적의 차이는 Y축에 대해 평균 5.37[mm]값을 가지고, X축에 대해서는 평균 3.91[mm]값을 가진다. 일반 서보 제어 실험에 비해 약 2배의 안정성 향상을 보이고 있다.

본 논문에서 제안하는 영상에 포함된 참조물체 기반의 이족로봇 균형제어 기법은 역각센서에 의존하여 로봇의 상태정보를 획득하던 기존의 방법을 영상정보를 통해 획득하여 로봇의 균형 제어를 하였다. 제안된 시스템은 이족로봇의 경로 설정이나 자기 위치 설정 등의 다양한 영상기반의 로봇 응용 분야에서 여타의 센서들을 추가 장착해야하는 부분을 덜어주기 때문에 유용하다고 할 수 있다. 향후 연구과제는 다양한 환경에서 로봇의 제안된 기법을 적용하여 확장하였을 때 발생하는 문제를 해결하는 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Sabe.K, Fukuchi.M, Gutmann.J.S, Ohashi.T, Kawamoto.K and Yoshigahara, "Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo Vision," IEEE Int. Conf. on ICRA, Vol.1, pp.592-597, 2004.
- [2] Okada.K, Indaba.M and Inoue.M, "Walking Navigation System of Humanoid Robot using Stereo Vision based Floor Recognition and Path Planning with Multi-Layered Body Image," IEEE/RSJ Int. Conf. on IRS, Vol.3, pp.2155-2160, 2003.
- [3] K. Nishiwaki, S.Kagami, J.J. Kuffner, K. Okada, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Online humanoid locomotion control using 3d vision information," In Proceeding IEEE/RSJ Int. Symp. on. (ISER'02), 2002.
- [4] Kumagai.M, Emura.T, "Vision based Walking of Human Type Biped Robot on Undulating Ground," IEEE/RSJ Int. Conf. on IRS, Vol.2, pp.1352-1357, 2000.
- [5] T.Sugihara, Y.Nakamura, and H.Inoue, "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1404-1409, 2002.
- [6] 박상범, 한영준, "칼만예측기의 ZMP 상태 추정을 통한 이족로봇의 균형제어기법," 한국 퍼지 및 지능시스템학회 논문지, 제16권 5호, pp.601-607, 2006.