

## 휴머노이드 로봇의 동보행 안정도에 관한 연구

이지영\*, 조정산\*\*, 이상재\*<sup>#,</sup>

\*금오공과대학교 전자공학부, \*\*한국생산기술연구원

### A Study on the Stability of Dynamic Walking of a Humanoid Robot

Ji-Young Lee<sup>\*</sup>, Jung-San Cho<sup>\*\*</sup>, Sang-Jae Lee<sup>\*<sup>#,</sup></sup>

<sup>\*</sup>School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Industrial Technology

(Received 29 January 2016; received in revised form 1 April 2016; accepted 7 April 2016)

#### ABSTRACT

In this paper, we deal with the dynamic walking of a humanoid robot. In our method, the inverted pendulum model is used as a dynamic model for a humanoid robot in which the Zero Moment Point (ZMP) and COG constraints of the robot are analyzed by considering the motion of the robot as that of an inverted pendulum. The motion of a humanoid robot should be generated by considering the dynamics of the robot, which commonly requires a large amount of computation. If a robot walks from one position to another while keeping the ZMP in the stable region, then the robot remains dynamically stable. The linear inverted pendulum model regards the whole robot as a point mass. It is simple, and relatively less computation is needed; however, it cannot model the whole dynamics of a humanoid robot. We propose a method for modeling a humanoid robot as an inverted pendulum system having 14 point masses. We also show that the dynamic stability of a humanoid robot can be determined more precisely by our method.

**Key Words :** Humanoid Robot(휴머노이드 로봇), Stability(안정도), Dynamic Walking(동보행), ZMP(영모멘트점), COG(무게중심), Inverted Pendulum(도립진자)

#### 1. 서 론

산업의 급속한 발전에 따라 로봇에 대한 관심이 높아지고, 로봇의 연구 개발이 활발히 이루어져 여러 형태의 로봇이 개발되고 있다. 최근에는 구동부와 제어기, 그리고 2차 전지의 비약적인 발전으로 인하여 휴머노이드 로봇에 대한 관심이 극대화되고 있다.

휴머노이드 로봇은 계단 등이 존재하는 인간의 생활공간에서 별도의 변형 없이 적용될 수 있는 장점뿐만 아니라, 사람들의 상상이 현실로 이루어진다는 부수적인 효과도 있다.

이러한 휴머노이드 로봇에 대한 연구는 크게 로봇의 물리적 특성을 분석하여 외부의 힘이나 불규칙한 바닥에서도 안정된 보행 구현을 목적으로 하는 연구와 카메라 등의 센서를 활용하여 로봇이 지능을 가지고 인간의 환경에 적응하도록 하는 연구로 나눌 수 있다. 특히 휴머노이드 로봇의 수학적 모델링이 난해하고 계산량이 상당히 많아 실시간 처리가 어려워 인간의 보행을 완벽히 구현하는 로

# Corresponding Author : sjlee@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7452, Fax: +82-54-478-7449

보행의 접근은 아직까지 개발되지는 않고 있지만 안정된 보행에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 몇몇 로봇은 인간과 유사한 보행을 하고 있기도 하다<sup>[1-5]</sup>.

본 논문의 연구 목적은 휴머노이드 로봇이 안정적으로 빠른 보행을 실현하는데 있다. 로봇의 빠른 보행을 실현하기 위해서 기구학적 해석뿐만 아니라 동적 요소를 포함하는 해석을 통하여 동적으로 안정적인 보행이 가능하도록 하는 알고리즘을 필요로 하며, 안정적인 보행 알고리즘의 검증을 위하여 점질량 모델을 통한 보행의 안정도 판별도 필요하다. 로봇의 관절 구동부에 사용된 RC 서보모터는 위치 제어만 가능하므로 속도제어가 가능한 DC 서보모터를 사용하는 독립적인 관절을 이용하여 동적 요소에 대한 보상을 하여 로봇이 보다 안정적으로 보행할 수 있을 것이다.

## 2. 전체 로봇 시스템

본 연구에서 제작한 휴머노이드 로봇은 몸체인 기구부와 로봇에 탑재되어 있는 제어기, 전원부, 영상을 얻기 위한 CCD 카메라, 그리고 보행 데이터 생성과 영상처리를 위한 호스트 컴퓨터로 구성된 리모트 브레인 구조로 전체 키가 41cm, 몸무게가 2.6kg이며, 자유도는 한 다리에 6 자유도와 한 팔에 3 자유도, 그리고 목에 2 자유도, 허리에 1 자유도를 가져 총 21 자유도를 갖는 구조이다<sup>[6]</sup>.

로봇의 각 관절 자유도마다 한 개의 RC 서보모터를 사용하여 모두 21개의 RC 서보모터가 사용되었고, 관절의 연결부에는 베어링을 사용하여 관절의 움직임이 원활하도록 하였다. 몸체와 발바닥은 알루미늄 합금을 사용하여 제작하였는데, 발바닥은 6cm×10cm의 직사각형 구조이고, 바닥에 미끄러짐 방지를 위해 원형의 얇은 고무패드를 부착했다. 머리 부분에는 로봇이 주변 환경을 인식하는 아날로그 칼라 CCD 보드 카메라를 장착하였고, 무선전송을 위해 아날로그 송수신 모듈을 사용하였다. 각 다리는 6 자유도를 가지고 있어서 전진뿐만 아니라 회전, 좌우, 후진, 이동회전, 대각선, 경사보행 등 다양한 보행이 가능하다. Fig. 1은 제작한 휴머노이드 로봇의 관절 구성과 외관이다.

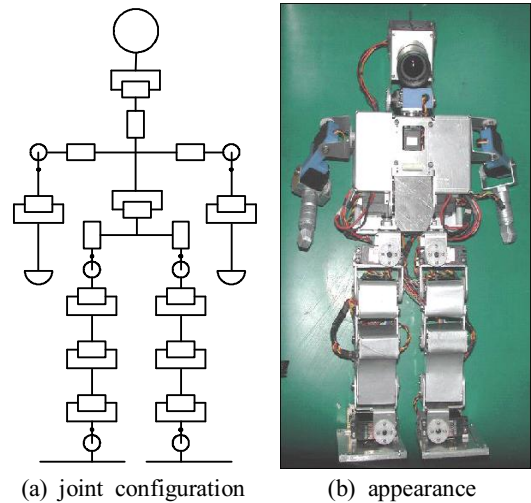


Fig. 1 The joint configuration and appearance

## 3. 로봇의 동보행 안정도

### 3.1 동적보행

인간의 보행에서 보행속도가 빠를수록 무게중심을 앞쪽에 두고 몸체의 위치 에너지와 관성을 이용하여 에너지를 최소화하면서 보행하는데, 이러한 인간의 보행 형태를 분석하여 휴머노이드 로봇의 보행에 적용한다. 로봇의 발이 이상적으로 크지 않다면 동작 중에 정지한다면 넘어지게 되는데, 이는 로봇이 정역학적으로 불안정한 상태에 있음을 의미하는 것으로 보행중인 로봇은 안정적일 수 있게 된다<sup>[1-4]</sup>.

정보행의 경우 몸체의 중심이 안정 영역에 정지한 상태에서 몸을 이동하는 것이고, 동보행의 경우는 몸체의 중심이 동적인 성분을 가지고 있는 상태에서 몸을 이동하는 것이다. 즉, 몸체의 중심이 지지하고 있는 발을 벗어나는 상태가 있음에도 불구하고 안정된 보행을 보이게 되는 것이다. 이러한 특성은 몸체 이동에서의 가속도 성분으로 인하여 나타나게 되고, 이 가속도를 적절히 조절한다면 휴머노이드 로봇이 동역학적으로 안정된 보행이 가능하도록 할 수 있게 되는 것이다.

휴머노이드 로봇의 보행 안정도를 판별하기 위해

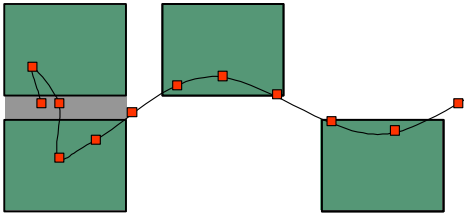


Fig. 2 Example of the trajectory of COG in dynamic gaits

서는 몸체의 무게중심(center of gravity) 뿐만 아니라 가속도 성분이 포함되는 영모멘트점(zero moment point)을 이용한다. Fig. 2는 휴머노이드 로봇의 동보행시의 몸체 중심 궤적의 예이다.

M. Vukobratovic은 2족 보행 로봇의 보행운동에 관한 이론의 토대를 세웠는데, 그는 6 자유도를 가진 로봇 시스템을 모형으로 2족 보행 운동에 대한 안정성을 몸체 안정성, 몸체 경로 안정성, 그리고 보행 안정성 등의 세 그룹으로 나누어 일반적인 궤도를 수치적으로 계산하고 ZMP의 개념을 도입하여 안정적인 보행을 위한 보상방법으로 도립진자(inverted pendulum)의 형태를 소개하였다<sup>[4]</sup>.

Fig. 3은 휴머노이드 로봇의 ZMP를 나타낸다. 휴머노이드 로봇의 ZMP는 모든 관성항의 합이 0이 되는 점으로 지면을 지지하고 있는 발바닥 내에 존재하면 보행의 안정성을 확보할 수 있다<sup>[1]</sup>.

Fig. 4는 휴머노이드 로봇의 안정 영역(stability area)과 여유 안정도(stable margin)를 나타낸다. 안정영역은 보행 상태에 따라 다르게 나타나며, 위에서 정의한 ZMP가 보행 중에 지지하고 있는 발바닥의 안정영역 내에 존재하게 되면 안정된 보행이라고 할 수 있다. 휴머노이드 로봇의 한 발(single support)에 대한 안정영역은 발을 기준으로 발 가장자리에서 10mm 안쪽으로 설정하였다.

다음 식들은 각각 X-Z 평면과 Y-Z 평면에서의 COG와 ZMP의 계산식이다<sup>[6]</sup>.

$$X_{COG} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i g x_i}{\sum_{i=0}^n m_i g} \quad (1)$$

$$Y_{COG} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i g y_i}{\sum_{i=0}^n m_i g} \quad (2)$$

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i \{a(z_i) + g\} x_i - \sum_{i=0}^n m_i a(x_i) z_i - \sum_{i=0}^n I_{iy} \dot{\theta}_{iy}}{\sum_{i=0}^n m_i \{a(z_i) + g\}} \quad (3)$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i \{a(z_i) + g\} y_i - \sum_{i=0}^n m_i a(y_i) z_i - \sum_{i=0}^n I_{ix} \dot{\theta}_{ix}}{\sum_{i=0}^n m_i \{a(z_i) + g\}} \quad (4)$$

여기서  $i$ 는 점 질량 모델에서의 질량의 개수를 나타내며,  $m_i$ 는 각 부위의 질량,  $x_i$  및  $y_i$ 는 전체

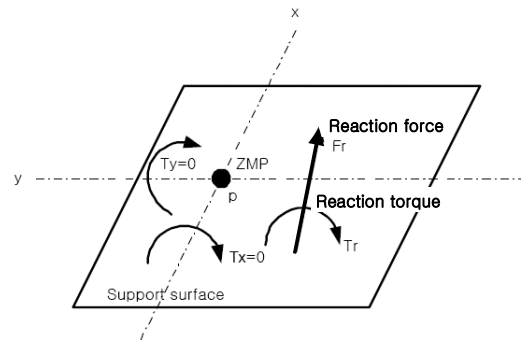


Fig. 3 ZMP of humanoid robot

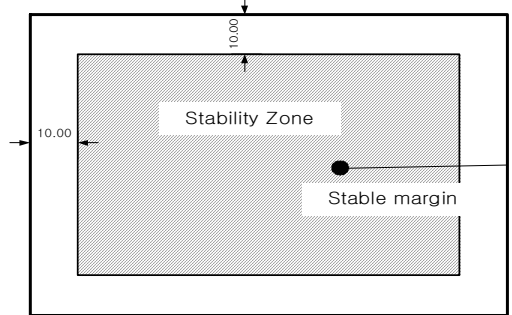


Fig. 4 Stability area and stable margin of humanoid robot

좌표에 대한 질량 중심의 위치, 그리고  $a(x_i)$ ,  $a(y_i)$  및  $a(z_i)$ 는 점 질량의 가속도를 나타낸다. 또한  $I_x$  및  $I_{iy}$ 는 각 축에 대한 점 질량의 모멘트,  $\dot{\theta}_{ix}$  및  $\dot{\theta}_{iy}$ 는 각가속도, 그리고  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 위 식들로부터 휴머노이드 로봇의 보행이 느려지면 가속도가 감소하여 ZMP는 COG에 접근하게 됨을 알 수 있다.

### 3.2 도립진자 모델을 이용한 안정도 판별

도립진자 모델은 Fig. 5와 같이 로봇의 전체 질량을 하나의 점 질량으로 보고 수학적 모델링을 하는 것을 말한다. 도립진자 모델은 휴머노이드 로봇을 매우 제한적으로 해석할 수밖에 없는 단점을 지니고 있지만, 모델링이 쉽고 계산량을 줄일 수 있어 휴머노이드 로봇의 기본 모델로 사용되어 왔다. 하나의 점 질량으로 모델링한 형태의 단점을 보완하기 위해 2개의 점 질량으로 모델링한 경우도 있다<sup>[7]</sup>.

로봇의 하체 무게가 상체에 비해 가볍고 허리 관절을 고정한 12 자유도의 다리로 몸체의 Z축에 대한 변위가 없도록 하고, 바닥면과 발바닥 사이의 미끄러짐이 없고 각 축에 대한 모멘트의 영향이 작다고 가정하고, 질량 중심을 몸체 좌표의 중심점으로 두고 모델링했다. 식(1)~(4)에 도립진자 모델의 조건을 대입하여 정리하면 다음과 같이 비교적 간단한 형태의 수식으로 정리되는 COG와 ZMP 관계식을 얻을 수 있다.

$$X_{COG} = x_{body} \quad (5)$$

$$Y_{COG} = y_{body} \quad (6)$$

$$X_{ZMP} = X_{COG} - a(x) \frac{z}{g} \quad (7)$$

$$Y_{ZMP} = Y_{COG} - a(y) \frac{z}{g} \quad (8)$$

여기서  $x_{body}$  및  $y_{body}$ 는 몸체의 중심 좌표,  $z$ 는 몸체 중심의  $z$ 축 좌표를 나타내고,  $a(x)$ ,  $a(y)$ 는 각각  $x$ ,  $y$  방향으로의 가속도를 나타낸다.

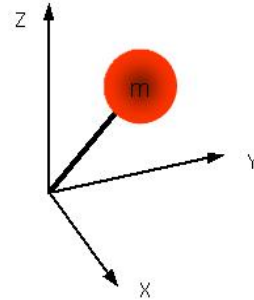


Fig. 5 Linear inverted pendulum model

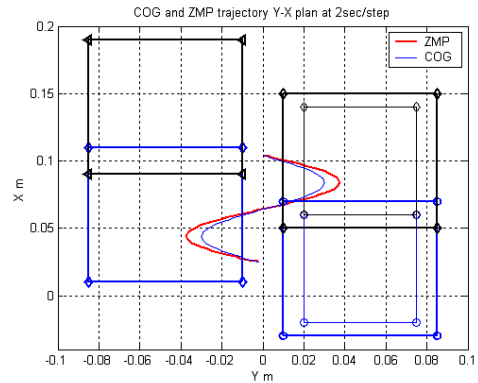


Fig. 6 COG and ZMP trajectory(inverted pendulum model)

Fig. 6은 2sec/step에서 직진 보행의 경우 도립진자 모델을 이용하여 계산한 ZMP 및 COG 궤적을 나타낸다. 그림에서 우측 하단의 사각형은 first step의 안정영역과 안정도 여유 영역이고, 우측 상단의 사각형이 second step의 안정영역과 안정도 여유 영역인데, COG에 비해 ZMP의 변화가 더 크게 나타나고, 안정영역에 근접하고 있음을 볼 수 있다. 또한 X축에 대한 이동은 시간에 대하여 정속도의 직선 궤적을 생성하여 가속도 성분이 제거되어 COG와 ZMP가 거의 동일하게 나타난다.

### 3.3 다수의 점질량 모델을 이용한 안정도 판별

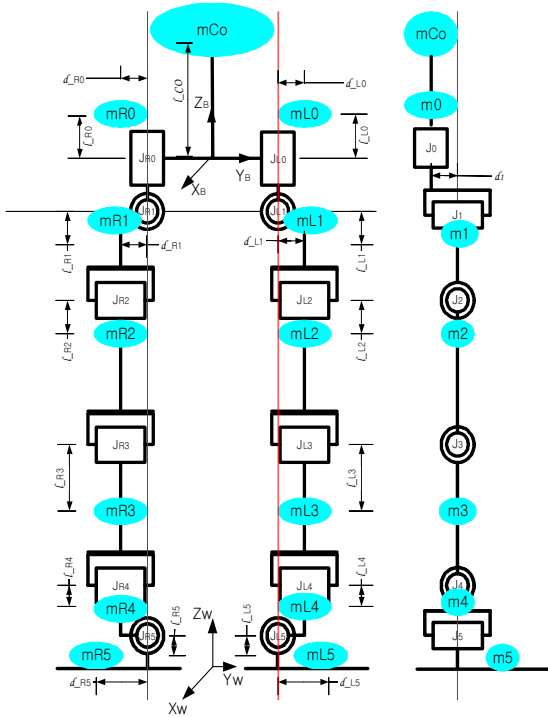


Fig. 7 14 Point masses model

3.2절에서 도입진자 모델로 ZMP를 분석하는 과정에서는 전체 질량을 하나의 점 질량 형태로 설정하므로 로봇의 특성을 분석함에 있어 한계가 있다. 따라서 로봇의 질량 형태를 여러 개의 점 질량으로 구성된 모델로 ZMP를 해석하면 보다 실제에 가까운 안정도 판별이 가능하다.

Fig. 7과 같이 다리에는 관절의 중심에 점 질량의 중심을 설정하고, 몸체는 하나의 점 질량으로 설정하여 총 14개의 점 질량으로 ZMP를 해석함으로써 보다 실제적인 ZMP에 근접하는 값으로 휴머노이드 로봇의 동적 안정도를 판별할 수 있다. 이는 오프라인에서 보행의 안정도를 판별하기 위함이므로 계산량과 시간에 구애를 받지 않는다.

여러 개의 점 질량 형태로 ZMP를 해석하는 방법을 휴머노이드 로봇에 적용하기 위해 도입진자 모델에서의 조건과 함께 팔의 질량이 가벼우므로 팔의 스윙으로 인한 영향은 없다고 가정하고 식 (3)과 (4)를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$X_{ZMP} = X_{COG} + \frac{\sum_{i=0}^n m_i x_i a(z_i) - \sum_{i=0}^n m_i z_i a(x_i)}{\sum_{i=0}^n m_i g} \quad (9)$$

$$Y_{ZMP} = Y_{COG} + \frac{\sum_{i=0}^n m_i y_i a(z_i) - \sum_{i=0}^n m_i z_i a(y_i)}{\sum_{i=0}^n m_i g} \quad (10)$$

여기서  $m_i$ 는 각 부위의 질량,  $x_i, y_i, z_i$ 는 전체 좌표에 대한 각각의 점 질량의 좌표를 나타낸다.

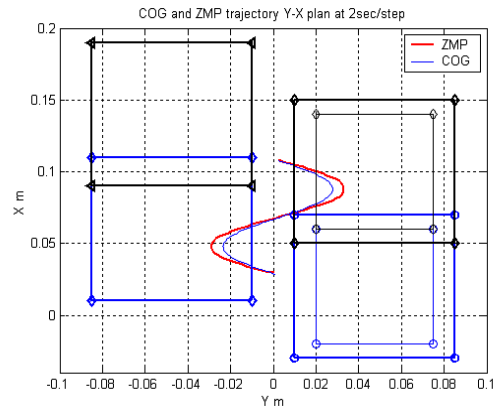
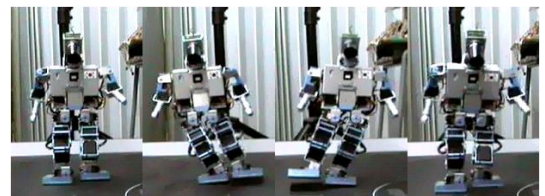
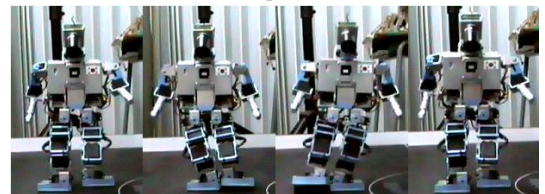


Fig. 8 COG and ZMP trajectory(14 point masses model)



(a) Inverted pendulum model



(b) 14 point masses model

Fig. 9 Experiment

Fig. 8은 여러 개의 점 질량 형태로 해석한 휴머노이드 로봇의 직진 보행에서의 COG와 ZMP 궤적을 나타낸다. 여기서 우측 하단의 사각형은 first step의 안정영역과 안정도 여유 영역이고, 우측 상단의 사각형이 second step의 안정영역과 안정도 여유 영역이다. 이는 Fig. 6에 보인 독립진자 모델을 이용하여 해석한 ZMP 및 COG 궤적과 비교해 볼 때, 독립진자 모델에서는 ZMP가 안정영역에 존재하여 안정적이라 판단된 보행이지만, 여러 개의 점 질량 모델로 해석한 결과는 불안정한 것으로 판별되었는데, Fig. 9에 보인 실제 보행에서도 샘플링 시간이 약 20sec 정도의 지점에서 발이 바닥에 닿으면서 보행하여 독립진자 모델을 사용하는 것보다 여러 개의 점 질량 모델을 사용하여 휴머노이드 로봇의 안정성을 판단하는 것이 보다 더 나은 방법임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 총 21 자유도를 가지는 휴머노이드 로봇의 점 질량 모델을 이용한 보행의 안정성 분석을 통하여 안정된 보행을 할 수 있도록 독립진자 모델을 사용했다. 모의실험 결과 ZMP가 안정영역에 존재하지만 실제 보행에서는 불안정함을 볼 수 있었고, 동적 안정도 판별에 있어 한계가 있음을 알 수 있었다.

따라서 휴머노이드 로봇의 질량 형태를 여러 개의 점 질량으로 구성된 모델로 ZMP를 해석함으로써 보다 실제에 가까운 안정도 판별이 가능하고 동역학적으로 안정된 시스템임을 검증하였다.

#### 후 기

“이 논문은 2013년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

#### REFERENCES

1. Kajita, S., Kanehiro, B., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.,

"Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point," Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1620-1626, 2003.

2. Kuroki, Y., Fujita, M., Ishida, T., Nagasaka, K. and Yamaguchi, J. I., "A Small Biped Entertainment Robot Exploring Attractive Applications," Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 471-476, 2003.

3. Takanishi, A., Lim, H. O., Tsuda, M. and Kato, I., "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface," Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 323-330, 1990.

4. Vukobratovic, M., Brovac, B., Surla, D. and Stokic, D., Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application, Scientific Fundamentals of Robotics, Vol. 7, pp. 102-113, Springer-Verlag, 2012.

5. Kim, J. H., Kim, D. H., Kim, Y. J., Park, J. H., Moon, C. K., Seow, K. T. and Koh, K. C., "Humanoid Robot HANSARAM: Recent Progress and Developments," International Conference on First Humanoid Nanotechnology Information Technology, Communications and Control, Environment and Management (HNICEM), pp. 1-11, 2003.

6. Sung, Y. H. and Cho, D. K., "An Optimal Initial Configuration of a Humanoid Robot," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 56, No. 1, pp. 167-173, 2007.

7. Park, J. H., Kim, K. D., "Biped Robot Walking using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3528-3533, 1998.