

경사계를 이용한 자세 제어

장윤영^{1,2}, 오용환², 박민용¹

연세대학교 전자공학과¹, 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇센터²

Control the Posture using Inclinometer

Yoonyong Chang^{1,2}, Yonghwan Oh², Minyong Park¹

Dept. of Electronic Engineering, Yonsei Univ.¹

Intelligent Robotics Research Center, Korea Institute of Science and Technology(KIST)²

Abstract - 휴머노이드 로봇 연구의 목표는 인간의 생활환경에서 휴머노이드 로봇이 인간과 같은 동작을 수행하는 것이다. 지금까지 많은 연구자들은 안정된 동작을 수행할 수 있는 휴머노이드 로봇에 대한 연구를 많이 해왔지만 주로 보행에 국한되어 있고 이에 비해 자세 제어에 관한 연구는 아직까지 많지 않다. 이 논문에서는 이러한 점을 보완하기 위해서 정확하고 반응속도가 빠른 경사계를 이용하여 자세를 제어하는 방법을 제시한다. 경사계로부터 얻은 데이터를 바탕으로 지면의 상태를 파악하고 현재의 지면에서 알맞은 자세를 유지할 수 있도록 휴머노이드 로봇의 질량중심을 조절하여 자세를 제어한다.

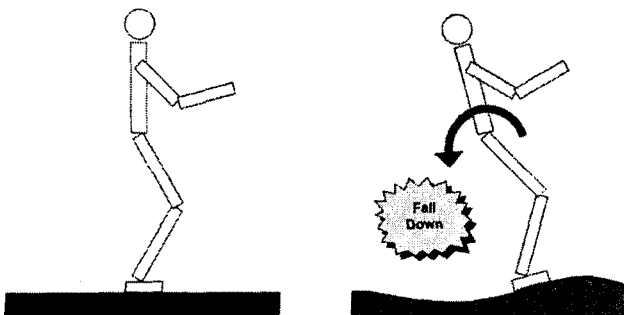
1. 서 론

인간과 유사한 신체 구조를 가지고 있는 휴머노이드 로봇 연구의 목표는 인간의 생활환경에서 휴머노이드 로봇이 인간과 같은 동작을 수행할 수 있도록 하는 것에 있다. 특히 자연스러운 자세를 유지하기 위한 제어 능력은 휴머노이드 로봇이 인간과 같이 능숙하고 지능적으로 환경에 적응하기 위해 기본적으로 갖추어야 할 조건이다.

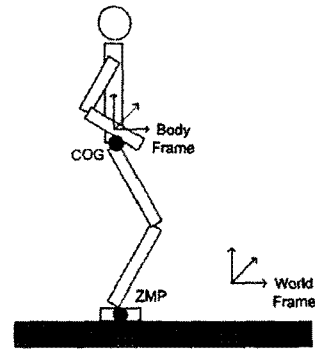
지금까지 많은 연구자들은 안정된 동작을 수행할 수 있는 휴머노이드 로봇에 대한 연구를 계속해왔다. 그렇지만 지금까지의 연구는 주로 이상적인 환경에서의 보행에 국한되어 있으며 이에 비해 자세 제어에 관한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않았다.

최근에는 일본의 Sugihara에 의해 정의된 질량중심(COG) 자코비안[3]을 이용하여 자세를 유지하거나 일본 Honda의 'Asimo'[1]과 독일 TUM의 'Johnnie'[2]와 같이 경사계와 가속도계와 같은 여러 가지 센서를 이용하여 자세를 유지하는 휴머노이드 로봇의 연구가 이루어지고 있지만 그림 1의 (a)에서 보여주는 것과 같이 이상적인 환경에서는 자세유지가 가능한 반면에 (b)에서와 같이 이상적이지 못한 환경에서는 중심을 잃고 쓰러지게 되는 경우가 많이 있다. 이와 같이 휴머노이드 로봇의 자세 제어에 관한 연구는 계속되고 있지만 주로 이상적인 환경에서의 자세 제어를 다루고 있으며 인간의 생활환경과 유사한 환경에서의 자세 제어에 관한 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 이러한 점을 보완하고 인간의 생활환경과 유사한 환경에서 자세를 제어할 수 있는 휴머노이드 로봇을 개발하기 위한 방법을 제시한다. 이를 위해서 정확하고 반응속도가 빠른 경사계를 휴머노이드 로봇의 몸체에 부착하여 데이터를 얻는다. 경사계로부터 얻은 데이터를 바탕으로 지면의 상태를 현재 로봇 몸체의 기울기를 파악하여 휴머노이드 로봇이 현재의 지면에서 쓰러지지 않고 알맞은 자세를 유지할 수 있도록 로봇의 질량중심을 조절하여 자세를 제어한다. 2.1절에서는 휴머노이드 로봇의 자연스러운 자세 제어를 위해 질량중심(COG) 자코비안[3]을 이용하여 각 관절에 알맞은 관절 운동을 부여하는 방법을 정의하고 2.2절에서는 지면에 상황에 적용할 수 있도록 센서의 데이터를 이용하여 자세를 보정하는 방법을 정의한다.



(a) 평탄면에서 자세유지 (b) 비평탄면에서 쓰러짐
<그림 1> Stability of Humanoid Robot



<그림 2> Humanoid Robot

2. 본 론

2.1 운동방정식

2.1.1 단순화된 시스템 모델링

휴머노이드 로봇이 인간과 유사한 동작을 수행하기 위해서는 그림 2에서 도시된 것과 같이 높은 자유도를 갖게 된다. 그러므로 자세 제어기를 설계하거나 휴머노이드 로봇의 안정성을 증명하는 것은 계산량이 매우 많으며 복잡하다. 이런 문제를 해결하기 위해서 휴머노이드 로봇의 질량중심(COG)을 구하고 각각의 독립된 지의 통합질량을 질량중심에서의 점 질량으로 가정하여 역 전자 모델과 같이 단순화된 운동방정식으로 재해석 한다.

2.1.3 질량중심(COG)과 지지다리의 관계

휴머노이드 로봇의 움직임을 구현하기 위해서 그림 2에서 도시되어 있는 것과 같은 절대좌표계와 몸체좌표계가 필요하다. 절대좌표계는 휴머노이드 로봇의 절대적인 움직임을 나타내기 위해 로봇 몸체 밖의 한 점에 고정되어 있는 좌표계이고 몸체좌표계는 휴머노이드 로봇의 상대적인 움직임을 나타내기 위해 로봇 몸체의 중심에 고정되어 있는 좌표계이다.

먼저 [3]의 논문으로부터 얻은 일반적인 질량중심(COG)의 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{p}_G = \dot{p}_0 + \omega_0 \times (p_G - p_0) + \sum_{i=1}^n R_o^o J_{G_i} \dot{q}_i \quad (1)$$

여기에서 \dot{p}_G , \dot{p}_0 와 p_G , p_0 는 절대좌표계에서 바라본 질량중심(COG)과 몸체좌표계의 선속도와 위치이고 ω_0 와 R_o^o 는 절대좌표계에서 바라본 몸체좌표계의 각속도와 방향이며 J_{G_i} 와 \dot{q}_i 는 몸체좌표계에서 기술된 i-번째 지의 질량중심(COG) 자코비안과 각속도이다.

휴머노이드 로봇의 안정성을 판단하기 위해 가장 일반적으로 사용되고 있는 영 모멘트 위치(ZMP)를 이용하기 위하여 지지다리의 영역 안에 영 모멘트 위치(ZMP)가 존재한다고 가정하고 식(1)을 지지다리 질량중심에 관해서 다시 정의하면 다음과 같다.[4]

$$\dot{p}_G = \sum_{i=1}^n R_o^o J_{G_i} \dot{q}_i + R_o^o \{-^o J_{v_1} + [(^o p_G - ^o p_1) \times] ^o J_{\omega_1} \} \dot{q}_1 \quad (2)$$

여기에서 J_{G_i} 와 J_{ω_i} 는 몸체좌표계에서 기술된 지지다리의 자코비안을 선속도 성분과 각속도 성분으로 분리하여 표현한 것이고 $^o p_G$ 와 $^o p_1$ 는 몸체좌표계에서 기술된 질량중심과 지지다리의 위치이다.

2.1.3 질량중심(COG) 자코비안

앞의 절에서 지지다리와 질량중심(COG)의 관계에 대하여 정의하였다. 이 절에서는 지지다리를 제외한 모든 지의 운동에 대한 질량중심(COG)의 변화와 이에 의한 지지다리의 변화에 대하여 정의한다.

몸체좌표계로부터 i -번째 지에 이르는 기구학적 관계식은 다음과 같다.

$${}^o\dot{x}_i = {}^oJ_i\dot{q}_i \quad (3)$$

여기에서 ${}^o\dot{x}_i = [{}^o\dot{p}_i^T; {}^o\dot{\omega}_i^T]$ 은 몸체좌표계에서 기술된 i -번째 지의 끝단 속도이고 \dot{q}_i 는 i -번째 지의 각속도, oJ_i 는 몸체좌표계에서 얻을 수 있는 일반적인 자코비안이다.

휴머노이드 로봇은 몸체가 지면으로부터 떨어져있는 시스템이므로 절대좌표계에 의해 다시 기술되어야 하며 이를 기준으로 기술된 i -번째 지의 끝단속도는 다음과 같다.[4]

$$\dot{x}_i = X_i^{-1}\dot{x}_o + X_o {}^oJ_i\dot{q}_i \quad (4)$$

여기에서 $\dot{x}_o = [{}^o\dot{p}_o^T; {}^o\dot{\omega}_o^T]$ 은 절대좌표계에서 바라본 몸체좌표계의 끝단 속도이다.

모든 지에 대해서 로봇 몸체좌표계의 속도는 일정하기 때문에 식(4)에 의해 i -번째 지와 j -번째 지 사이에는 항상 다음의 관계식이 성립한다.

$$X_i(\dot{x}_i - J_i\dot{q}_i) = X_j(\dot{x}_j - J_j\dot{q}_j) \quad (5)$$

식(4)을 이용하면 지면상에서 휴머노이드 로봇 몸체를 지지하고 있는 지지다리의 각속도 벡터를 이용하여 어떠한 임의의 지의 각속도 벡터라도 표현할 수 있다.[4]

$$\dot{q}_i = J_i^{-1}\dot{x}_i - J_i^{-1}X_{i1}(\dot{x}_1 - J_1\dot{q}_1) \quad (6)$$

지지다리에 의해 표현되는 임의의 지의 관절 운동을 식(6)에서 정의하였고 이 식을 식(2)에 대입하면 지지다리와 지지다리에 의해 표현되는 각 지에 의한 관계식으로 질량중심(COG)을 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{p}_G = & \sum_{i=1}^n R_o {}^oJ_{G_i} J_i^{-1}(\dot{x}_i - X_{i1}\dot{x}_1) + \sum_{i=1}^n R_o {}^oJ_{G_i} J_i^{-1} X_{i1} J_1 \dot{q}_1 \\ & + R_o \{-{}^oJ_{v1} + [({}^o p_G - {}^o p_1) \times] {}^oJ_{\omega 1}\} \dot{q}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)은 질량중심(COG)운동을 지지다리의 운동에 관계하여 표현한 일반적인 자코비안처럼 다음과 같이 재정의 된다.

$$\dot{p}_{reG} = J_{reG} \dot{q}_1 \quad (8)$$

여기에서 \dot{p}_{reG} 와 J_{reG} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{p}_{reG} = \dot{p}_G - \sum_{i=1}^n R_o {}^oJ_{G_i} J_i^{-1}(\dot{x}_i - X_{i1}\dot{x}_1) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} J_{reG} = & \sum_{i=1}^n R_o {}^oJ_{G_i} J_i^{-1} X_{i1} J_1 \\ & + R_o \{-{}^oJ_{v1} + [({}^o p_G - {}^o p_1) \times] {}^oJ_{\omega 1}\} \dot{q}_1 \end{aligned} \quad (10)$$

결과적으로 지면에 지지하고 있는 다리를 제외한 모든 다른 지에 운동에 대하여 식(8)의 역기구학을 통해 자동적으로 휴머노이드 로봇이 자세를 제어하는 지지다리의 관절운동을 구할 수 있다. 또한 지지다리의 관절운동을 이용하여 위하여 식(6)을 사용하면 다른 모든 지의 관절운동을 구할 수 있다.

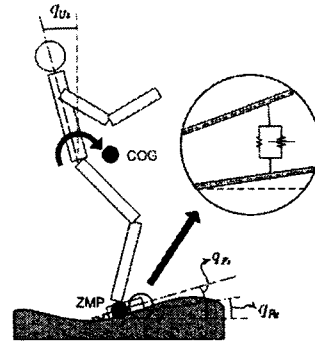
2.2 센서값을 이용한 자세 보정

2.1.1절에서 복잡한 휴머노이드 로봇의 움직임의 간단하게 구현하기 위하여 역 진자 모델을 적용하였다. 기본적으로 역 진자 모델은 기울기가 없는 이상적인 환경에서 정의되기 때문에 기울기가 있는 환경에서의 역 진자 모델 도입은 모순이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 그림 3에 도시되어 있는 것과 같이 지면과 접촉되는 점을 기준으로 발에 부착된 센서로부터 얻은 지면의 기울기, q_{Fs} 와 q_{Fu} 에 의한 발목에 작용되는 모멘트에 의해 상체에 부착된 센서로부터 얻은 상체의 기울기인 q_{Us} 만큼 역 진자가 기울어져 있다고 가정한다.

q_{Us} 만큼 기울어져 있는 휴머노이드 로봇은 그림 1에서 도시된 것과 같이 중심을 잃고 쓰러진다. 이러한 문제점을 보완하고 안정성을 유지하면서 자연스러운 자세를 제어하기 위해서 q_{Us} 와 휴머노이드 로봇의 기울어짐의 원인이 되는 q_{Fs} 의 사이에 다음과 같은 구속 조건을 부여한다.

$$J_{\omega 1} \dot{q}_{Fu} = -\dot{q}_{Us} \quad (11)$$

여기에서 q_{Fu} 는 상체의 기울기로부터 순기구학을 풀어 얻은 지지다리의 관절속도를 나타낸다. 식(8)과 식(11)의 \dot{q}_1 에 관한 식들을 q_{Fu} 에 의한 식으로 변환하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.



〈그림 3〉 Humanoid Robot on slope

$$\begin{bmatrix} J_{reG} \\ J_{\omega 1} \end{bmatrix} \dot{q}_{Fu} = \begin{bmatrix} \dot{p}_{reG} \\ -\dot{q}_{Us} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(12)는 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$\dot{q}_{Fu} = C_{reG} \dot{p}_{reG} - C_{\omega} \dot{q}_{Us} \quad (13)$$

여기에서 $[C_{reG} \ C_{\omega}] = [J_{reG} \ J_{\omega 1}]^{-1}$ 이다.

식(13)을 이용하면 상체의 기울어짐을 보정하며 경사면에서도 안정한 자세를 유지할 수 있는 지지다리의 q_{Fu} 를 얻을 수 있다.

식(13)에서 구한 q_{Fu} 는 상체의 기울기로부터 순기구학을 통해 얻은 지지다리의 관절운동을 기술한 것이다. 실제 발목에 부착된 센서를 통해 얻은 q_{Fs} 와 상체의 기울기를 바탕으로 얻은 q_{Fu} 의 차이를 보상하기 위해 그림 3에서 도시된 것과 같이 q_{Fu} 과 q_{Fs} 에 의한 발의 위치 사이에 감쇠기와 스프링이 있다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{q}_{Fu} = \dot{q}_{Fs} + K(q_{Fu} - q_{Fs}) + D(\dot{q}_{Fu} - \dot{q}_{Fs}) \quad (14)$$

여기에서 K와 D는 각각 스프링과 감쇠기의 상수이다.

식(14)에서 얻은 q_{Fu} 를 식(8)에 q_1 값에 대입하여 주면 현재 지지다리의 관절 운동에 따른 알맞은 자세를 생성할 수 있다.

3. 결 론

인간과 유사한 신체 구조를 가지고 있는 휴머노이드 로봇 연구의 목표는 인간의 생활환경에서 휴머노이드 로봇이 인간과 같은 동작을 수행할 수 있도록 하는 것에 있다. 특히 자연스러운 자세를 유지하기 위한 제어 능력은 휴머노이드 로봇이 인간과 같이 능숙하고 지능적으로 환경에 적응하기 위해 기본적으로 갖추어야 할 조건이다. 그러나 지금까지 휴머노이드 로봇에 대한 연구를 많이 해왔지만 주로 보행에 국한되어 있고 이에 비해 자세 제어에 관한 연구는 아직까지 많지 않다.

본 논문에서는 이러한 점을 보완하기 위해서 정확한 경사계로부터 얻은 데이터를 바탕으로 지면의 상태를 파악하고 현재의 지면에서 알맞은 자세를 유지할 수 있도록 휴머노이드 로봇의 질량중심을 조절하여 자세를 제어하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법을 이용하면 인간의 생활환경에서 휴머노이드 로봇이 안정되고 자연스러운 자세를 유지할 수 있을 것이라고 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1998
- [2] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich, F. Pfeiffer, "Computer system and control of biped "Johnnie"", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4222-4227, 2004
- [3] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Whole-body cooperative balancing of humanoid robot using COG Jacobian", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp.2575-2580, 2002
- [4] Doik Kim, Youngjin Choi, Yonghwan Oh, Bumjea You, "Real-Time Generation of Humanoid Motion with the Motion-Embedded COG Jacobian", Int. Conf. on Control, Automations and System, 2005