4족 보행 로봇의 걸음새 안정화를 위한 몸체 임피던스 제어

論 文
49D-5-5

Body Impedance Control for Walking Stabilization of a Quadrupedal Robot

李 壽 榮* · 洪 藝 善**
(Soo-Yeong Yi · Yeh-Sun Hong)

Abstract - One of the basic assumptions in the static gait design for a walking robot is that the weight of a leg should be negligible compared to that of body, so that the total gravity center is not affected by swing of a leg. Based on the ideal assumption of zero leg-weight, conventional static gait has been simply designed for the gravity center of body to be inside the support polygon, consisting of each support leg's tip position. In case that the weight of leg is relatively heavy, however, while the gravity center of body is kept inside the support polygon, the total gravity center of walking robot can be out of the polygon due to weight of a swinging leg, which causes instability in walking. Thus, it is necessary in the static gait design of a real robot a compensation scheme for the fluctuation in the gravity center. In this paper, a body impedance control is proposed to obtain the total gravity center based on foot forces measured from load cells of a real walking robot and to adjust its position to track the pre-designed trajectory of the corresponding ideal robot's body center. Therefore, the walking stability is secured even in case that the weight of leg has serious influence on the total gravity center of robot.

Key Words : static walking stability, force-moment equation, body impedance control

1. 서 론

4족 로봇은 보행중 항상 최소한 세 다리의 지지 구간을 확보할 수 있으므로, 이동 다리의 순서와 각 다리에 대한 궤적을 적절히 선정하므써 정적으로 안정한 걸음새를 설계할 수 있다. 이러한 정적 걸음새 설계에 있어서 기본 가정은 다리의 무게가 몸체에 비해 무시할 수 있을 만큼 작아야한다는 것이다[1]. 이러한 가정이 유용한 이유는 다음과 같다: 즉, 다리의 무게가 0이라면 각 다리의 들고 내림에 관계없이 로봇 전체의 무게 중심은 몸체만의 무게 중심과 일치하게 된다. 이 때 몸체의 무게 중심 위치는 미리 구할 수 있고 이는 몸체 좌표계에 대해서 고정되어 있으므로, 보행중 임의의 순간에 로봇 전체의 무게 중심이 지지 다각형의 내부에 항상 놓이게 하는 안정 걸음새를 사전에 기하학적으로 설계할 수 있다. 여기서 지지 다각형이란 지지 다리들의 발끝 좌표값으로 이루어지는 보행 지면상의 다각형을 의미한다. 앞으로는 다리의 무게가 영이고, 따라서 다리의 움직임이 전체 무게 중심에 영향을 주지 않는 경우를 이상적인(ideal) 로봇, 그렇지 않은 경우를 실제(real) 로봇이라고 하겠다. 일반적으로 펜토그라프형(pentograph type)으로 설계된 보행 로봇의 경우는 모든 구동 모터를 몸체에 설치할 수 있으므로 다리의 무게가 몸체에 비해 상대적으로 가볍게 제작할 수 있고, 따라서 이상적인 로봇에 가깝다고 볼 수 있다[2]. 그러나 구동 모터가 각 관절에 직접 위치하는 관절 구동형(jointed-leg type) 보행 로봇의 경우에는 다리의 무게가 몸체에 비해 상대적으로 무거우므로 각 다리의 들고 내림이 전체 무게 중심의 변화에 큰 영향을 미치게 되고, 따라서 몸체만의 무게 중심을 기준으로 설계된 기존 정적 걸음새의 안정성은 더 이상 성립하지 않게 된다. 그러므로 이 경우에는 다리의 움직임에 따른 전체 무게 중심의 변화를 보상해주어야 할 필요가 있다. 이러한 방법으로서, 전체 무게 중심이 지지 다각형의 내부에 놓이도록 몸체에 강제적인 sway 움직임을 주는 방법[3]이나, 몸체에 별도의 독립적인 역진자형 균형추를 설치하고 이것의 운동을 통해 전체 무게 중심의 변화를 보상하는 방법[4]이 제안된 바 있다. 그러나 첫번째 방법에서는 보행 상황에 따라 필요한 몸체 sway의 진폭과 방향을 미리 결정하기 어렵다는 문제점이 있고, 두 번째의 경우는 균형추에 의한 전체 무게의 증가와 이를 구동하기 위한 추가적인 제어기가 필요하다는 단점이 있다.

보행 로봇에 있어서 전체 무게 중심에 대한 다리 무게의 영향은 필연적으로 각 다리의 지지 반력에 반영된다. 그러므로 실제 로봇의 경우에, 보행 상황에 따라 측정되는 지지 반력이 이상적인 로봇의 지지 반력과 같아지도록 로봇을 구동하면, 이론적으로 보행 안정도가 보장된 이상적인 로봇의 걸음새를 따르게 할 수 있을 것이다. 특히 보행 로봇에 있어서의 힘-모멘트 방정식은 지지 반력의 크기와 전체 무게 중심의 좌표값 사이의 상관 관계를 나타내므로, 이를 이용하면 이상적인 로봇의 지지 반력과 같은 크기의 지지 반력을 얻기 위한 몸체 움직임의 방향을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 실제 로봇과 이상적인 로봇의 지지 반력의 차이로부터 실제 로봇이 미리 설계된 이상적인 로봇의 안정 걸음새를 따르게 하기 위한 몸체 임피던스 제어 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 이의 효율성을 보이고자

* 正 會 員 : 全北大 制御計測工學科 專任講師 · 工博
** 正 會 員 : KIST 시스템硏究部 責任硏究員 · 工博
接受日字 : 1999年 10月 9日
最終完了 : 2000年 3月 8日

한다. 2장에서 보행 로봇의 다리 무게에 의한 무게 중심의 변동 및 지지 반력에 대해 서술하고, 3장에서 이를 보상하기 위해 제안한 몸체 임피던스 제어 기법에 대해 설명한 후, 4, 5장에서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 효용성을 검증하고 결론을 맺는다.

2. 4족 보행 로봇의 다리 무게에 의한 영향

전체 무게 중심에 대한 보행 로봇 각 다리 무게의 영향을 알아보기 위하여 여기서는 다음 그림과 같이 보행 로봇의 기구적 구성 단위를 각각의 무게 중심점에 위치한 점 질량들로 모델링 한다.

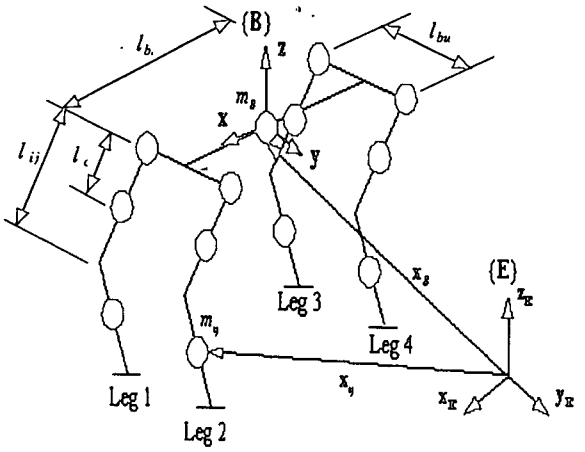


그림 1 보행 로봇의 점질량 모델
Fig. 1 Point mass model for a walking robot

보행 로봇의 각 질량소들에 의한 전체 무게 중심의 좌표값 $\boldsymbol{p}_{cg} = [x_{cg}\ y_{cg}]'$는 다음 식으로 주어진다.

$$m_b(\boldsymbol{p}_b - \boldsymbol{p}_{cg}) + \sum_{i\in LEG}\sum_{j\in LINK} m_{ij}(\boldsymbol{p}_{ij} - \boldsymbol{p}_{cg}) = \boldsymbol{0} \quad (1)$$

여기서 $\boldsymbol{p}_b$는 몸체 무게 중심의 위치, $\boldsymbol{p}_{ij}$는 i번째 다리, j번째 링크의 무게 중심의 위치를 나타내며, m_{ij}는 ij 링크의 무게, 그리고 m_b는 몸체의 무게를 나타낸다. 그리고 $LEG = \{i | i$는모든다리$\}$이고, $LINK = \{j | j$는모든링크$\}$이다. 일반적으로 전후좌우 대칭인 4족 보행 로봇의 몸체 무게 중심, $\boldsymbol{p}_b$는 몸체의 기하 중심에 일치하게 되므로, 그 좌표값을 쉽게 알 수 있다. 식 (1)에 의하면 $m_{ij} = 0 \ \forall i, j$인 이상적인 로봇의 경우 전체 무게 중심의 위치, $\boldsymbol{p}_{cg}$는 몸체 무게 중심의 위치 $\boldsymbol{p}_b$에 일치하지만, 실제적인 로봇의 경우 다리의 무게가 클수록 전체 무게 중심이 $\boldsymbol{p}_b$에서 벗어난다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 이상적인 로봇의 경우에 대해 몸체만의 무게 중심을 기준으로 설계된 정적 걸음새의 보행 안정 조건은 실제적인 로봇에 대해서는 성립되지 않는다.

이제 전체 무게 중심과 지지 반력 사이의 관계를 알아보기 위해 다음을 생각하자. 기준 좌표계 상의 임의의 한 점 $\boldsymbol{p}_- = [x_-\ y_-]'$를 기준으로한 지지 다리들의 힘-모멘트 관계는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
&\sum_{i\in SLEG} f_i(x_i^{tip} - x_-) = \\
&\sum_{i\in LEG}\sum_{j\in LINK} m_{ij}(x_{ij} - x_-) + m_b(x_c - x_-) \\
&\sum_{i\in SLEG} f_i(y_i^{tip} - y_-) = \\
&\sum_{i\in LEG}\sum_{j\in LINK} m_{ij}(y_{ij} - y_-) + m_b(y_c - y_-) \\
&\sum_{i\in SLEG} f_i = \sum_{i\in LEG}\sum_{j\in LINK} m_{ij} + m_b = W
\end{aligned} \quad (2)$$

여기서 W는 로봇의 총 중량을 나타내고, $\boldsymbol{p}_i^{tip} = [x_i^{tip}\ y_i^{tip}]'$은 지지 다리의 발끝 좌표값을 나타내며, $SLEG = \{i | i$는 지지 다리$\}$이다. 식 (2)는 임의의 점 $\boldsymbol{p}_-$에 대해 성립하므로 식 (1)로 주어지는 전체 무게 중심점 $\boldsymbol{p}_{cg}$와 결합하면, 다음 식 (3)를 얻을 수 있다[5].

$$\begin{aligned}
&\sum_{i\in SLEG} f_i(x_i^{tip} - x_{cg}) = 0 \\
&\sum_{i\in SLEG} f_i(y_i^{tip} - y_{cg}) = 0 \\
&\sum_{i\in SLEG} f_i = W
\end{aligned} \quad (3)$$

예로서, 1, 3, 4번 다리가 지지하고 있는 경우, 전체 무게 중심의 좌표값, $\boldsymbol{p}_{cg}$는 벡터적으로 다음과 같이 표현된다:

$$\begin{bmatrix} x_{cg} \\ y_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{tip} & x_3^{tip} & x_4^{tip} \\ y_1^{tip} & y_3^{tip} & y_4^{tip} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1/W \\ f_3/W \\ f_4/W \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\equiv \boldsymbol{p}_{cg} = A\boldsymbol{f}$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} x_1^{tip} & x_3^{tip} & x_4^{tip} \\ y_1^{tip} & y_3^{tip} & y_4^{tip} \end{bmatrix}$이고, $\boldsymbol{f} = [\ \frac{f_1}{W}\ \frac{f_3}{W}\ \frac{f_4}{W}\ ]'$이다. 식 (1)과 (4)로부터 각 다리 무게에 의한 전체 무게 중심점 변동의 효과가 결국 지지 반력 f_i에 나타남을 알 수 있다.

3. 보행 안정화를 위한 임피던스 제어

3.1 보행 로봇의 정적 안정성

보행 로봇의 정적 안정성은 지지 다리들의 발끝 좌표값으로 이루어지는 지지 다각형의 각 변과 로봇의 전체 무게 중심 사이의 최단 거리로 정의된다[1]. 특히 보행 로봇의 전체 무게 중심과 지지 다각형의 앞변 및 뒷변과의 거리중 최단 거리를 세로 안정도라고 정의하는데, 본 논문에서는 세로 안정도만을 다루는 것으로 한다. 전체 무게 중심이 지지 다각형의 내부에 놓일 때는 양의 걸음새 안정도를, 반대의 경우에는 음의 걸음새 안정도를 갖는다고 말하며, 음의 안정도를 가질 때에는 보행 로봇이 넘어지는 상태다. 그러므로 안정한 걸음새를 설계하기 위해서는 주어진 몸체의 궤적에 대해 전체 무게 중심이 항상 지지 다각형의 내부에 놓이게 되는 각 다리의 궤적과 이동 순서를 결정해야 한다. 이상적인 보행 로봇의 경우에는 전체 무게 중심이 항상 일정한 위치, 즉 몸체 무게 중심의 위치에 있으므로, 전체 무게 중심이 보행 중 항상 지지 다각형의 내부에 놓이는 안정한 걸음새를 기하학적으로 쉽게 사전 설계할 수 있다. 예로서, 보행 로봇의 정적 걸음새로 가장 보편적으로 이용되는

물결 걸음새(wave gait)의 경우에 보행 중 몸체의 무게 중심과 지지 다각형의 앞변 및 뒷변 사이의 최단 거리, 즉 걸음새 안정도 S는 다음 식으로 주어짐이 해석적으로 증명되어있다[1].

$$S = (\beta - \frac{3}{4})\lambda \tag{5}$$

여기서 β는 보행의 한 주기에 대한 각 다리의 지지 시간의 비, 즉 디딤률을 의미하며, λ는 각 다리의 보폭(stride)을 나타낸다. 그러므로 β가 $\frac{3}{4}$ 보다 크도록 다리 이동 시간 및 순서를 사전에 결정하면, 안정한 걸음새를 구현할 수 있다. 그러나 다리의 무게를 무시할 수 없는 실제 로봇의 경우, 이동 다리의 움직임에 따라 전체 무게 중심이 시시각각으로 변하므로, 식 (5)를 기반으로 설계된 걸음새의 안정성은 유지되지 않는다. 그러므로 식 (1)에서와 같이 보행 로봇 모델로부터, 혹은 식 (4)와 같이 지지 반력 측정에 의하여 전체 무게 중심의 좌표값을 알아내고, 이를 지지 다각형의 내부에 항상 놓이도록 로봇을 움직여 주는 온라인 보정이 필요하다. 다음 절에서 다리의 움직임에 따라 늘 변하는 전체 무게 중심의 위치를 점근적인 방식에 의하여 이상적인 로봇의 몸체 무게 중심을 추종하도록 하는 몸체 임피던스 제어를 제안한다.

3.2 몸체 임피던스 제어

보행 로봇의 정적 안정도는 무게 중심을 기준으로 정의되므로, 실제 로봇의 보행 안정성을 확보하기 위해서는 전체 무게 중심이 다리의 움직임에 따라 변하더라도, 미리 설계된 이상적인 로봇의 몸체 무게 중심 궤적을 그대로 따르게 하는 것이 필요하다. 실제 로봇의 전체 무게 중심의 좌표값은 발끝 지지 반력에 반영되므로, 미리 설계된 이상적인 로봇의 안정 걸음새에 대해서 보행 중에 예상되는 지지 반력과 실제로 측정되는 지지 반력 사이의 차이를 줄이는 방향으로 로봇의 몸체를 구동하면 보행 안정성의 측면에서 실제 로봇이 이상적인 로봇의 걸음새를 따르게 할 수 있다.

먼저 로봇의 몸체는 보행중 항상 지면에 대해 수평을 유지한다고 가정한다. 식 (4)의 우변은 지지 반력에 의한 로봇의 x축, y축 방향의 모멘트, 즉 로봇이 받는 힘의 방향을 의미함에 주목하자. 이제 그림 2와 같은 몸체 임피던스 모델에 대해서 다음의 식을 정의한다.

$$k_a(\ddot{p}_d - \ddot{p}_b) + k_v(\dot{p}_d - \dot{p}_b) + k_p(p_d - p_b) = A\{f(p_d) - f(p_b)\} \tag{6}$$

$$k_a,\ k_v,\ k_p > 0$$

여기서 p_b는 미리 설계된 이상적인 보행 로봇의 몸체의 무게 중심점의 궤적을 나타내고, p_d는 실제 로봇의 몸체 무게 중심점을 의미하며, A와 f는 앞의 식 (4)에서 정의된 바와 같다. 또 $f(p_d)$는 실제 로봇에서 측정되는 지지 반력이고, $f(p_b)$는 이상적인 로봇의 경우에 예상되는 지지 반력이다. 그림에서는 보행 로봇의 몸체가 기하학적으로 대칭이고, 따라서 몸체의 무게 중심은 기하 중심에 있다고 가정하였다. 전술한 바와 같이 식 (6)의 우변항 $A\{f(p_d) - f(p_b)\}$는 예상되는 지지 반력과 실제 측정된 지지 반력의 차에 의한 각 x, y축 방향으로의 모멘트가 되므로, 식 (6)의 해, p_d는 실제 로봇의 지지 반력, $f(p_d)$이 이상적인 로봇의 지지 반력, $f(p_b)$과 같게 하기 위해서 실제 로봇이 추종해야할 몸체 궤적이 된다.

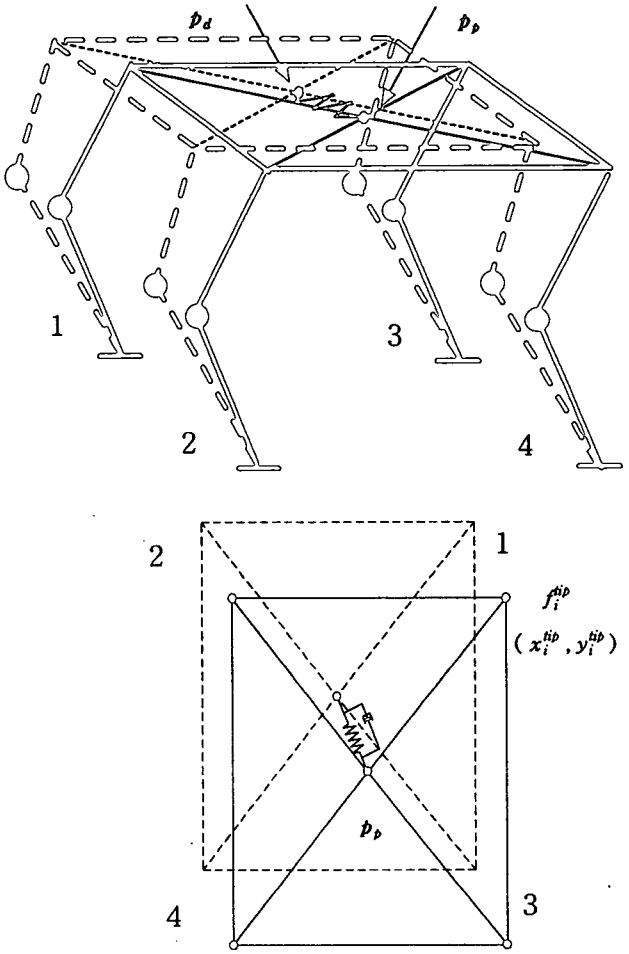


그림 2 몸체 임피던스 모델
Fig. 2 Body impedance model

3.3 예상 지지 반력 $f(p_b)$의 계산

이상적인 로봇의 경우 전체 무게 중심, p_{cm}는 몸체만의 무게 중심, p_b와 항상 일치하므로, 전체 무게 중심과 지지 반력 사이의 관계식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum_i f_{pi}(x_i^{tip} - x_b) &= 0 \\ \sum_i f_{pi}(y_i^{tip} - y_b) &= 0 \\ \sum_i f_{pi} &= W \end{aligned} \tag{7}$$

물론 보행중의 지지점의 좌표값, p_i^{tip}와 몸체의 궤적 p_b는 이상적인 로봇에 대한 안정 걸음새 설계 단계에서 사전에 미리 정해진다. 4점 지지 상태인 경우, 식 (7)은 구하고자하는 지지 반력 변수의 갯수가 수식의 갯수보다 많은 불능형이므로 해를 구하기 위한 제한 조건이 필요하다. 여기서는 최소 노음(norm)을 제한 조건으로 갖는 의사 역행렬에 의한 해를 구하는 것으로 한다[5][6]. 즉 식 (7)의 일반해는 다음과 같다.

$$f_b = A^t(AA^t)^{-1}W \quad (8)$$

여기서 $W=[0, 0, W]^t$이다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 몸체 임피던스 제어의 보행 안정화에 대한 효용성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 보행 로봇의 링크 변수는 다음 표 1과 같으며, 이 수치들은 한국과학기술연구원, 휴먼로봇연구센터에서 개발중에 있는 관절 구동형 4족 보행 로봇을 대상으로 실제 측정한 것이다(그림 3).

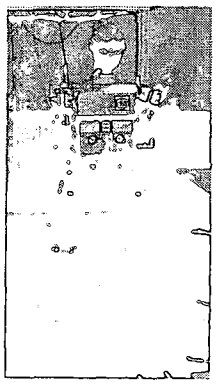


그림 3 KIST에서 개발중인 관절 구동형 4족 보행 로봇
Fig. 3 The jointed-leg type of quadrupedal walking robot under development in KIST

표 1 보행 로봇의 링크 변수
TABLE 1 Link parameters of walking robot

(단위: MKS, $i=1, 2, 3, 4$)

m_b	m_{i1}	m_{i2}	m_{i3}	l_{bw}	l_{bl}	l_{i0}
36.0	3.393	6.04	5.30	0.4	0.56	0.06
l_{i1}	l_{i2}	l_{i3}	l_{ic1}	l_{ic2}	l_{ic3}	
0.09	0.37	0.495	0.0344	0.1861	0.2475	

표 1.에서 보는 것처럼 로봇의 총 중량은 $W=m_b+4\times(m_{i1}+m_{i2}+m_{i3})=94.932$이다. 이에 대응하는 이상적인 로봇은 몸체의 무게를 $m_b=94.932$로 하고 각 링크들의 무게를 $m_{i1}=m_{i2}=m_{i3}=0.0$으로 하므로써 총 중량을 같도록 하였다. 이상적인 로봇에 대한 기본 걸음새로서 정적 안정도가 식 (5)와 같이 주어지는 물결 걸음새를 택하였다. 따라서 보행 중 양의 안정성을 가질 조건은 $\beta>0.75$이다. 다리의 이동 순서는 4-2-3-1로 하였다.

제안한 몸체 임피던스 제어 시뮬레이션에 앞서, 먼저 보행 안정도에 대한 다리 무게의 영향을 살펴보기 위해 전체 무게는 일정하게 유지하면서 몸체와 다리의 무게 비를 변화시켰을 때, 디딤률에 따른 보행 안정도를 시뮬레이션을 통해 구하였다. 본 시뮬레이션은 미리 설계된 걸음새에 따라 로봇이 보행하는 과정에서, 식 (1)에 의한 전체 무게 중심점과 지지 다각형 사이의 최단 거리를 구하는 것이다. 여기서 보폭, λ는 20 cm이고, 이동 다리의 궤적은 높이, $h=15\,cm$인 bezier 곡선으로 하였다. 그림 4의 시뮬레이션 결과에서 m_0가 이상 로봇에 해당하며, 실선으로 표시된 m_4의 경우가 표 1에서 제시한 실제 로봇의 데이터이다. 이 시뮬레이션을 위한 링크 변수의 값들을 표 2에 정리하였고, 표에 제시한 것 이외의 변수들은 편의상 표 1에서 보인 것과 같이 하였다.

표 2 보행 안정도 시뮬레이션을 위한 링크 변수
Table 2 Link parameters for walk stability simulation

(단위: MKS, $i=1, 2, 3, 4$)

	m_b	m_{i1}	m_{i2}	m_{i3}	W
m_0	94.932	0.0	0.0	0.0	94.932
m_1	89.0388	0.3393	0.604	0.530	94.932
m_2	65.466	1.6965	3.02	2.65	94.932
m_3	6.534	5.0895	9.06	7.95	94.932
m_4	36.0	6.04	3.393	5.30	94.932

그림에서 이상적인 로봇, m_0의 경우, 식 (5)와 같이 $\beta>0.75$이면 항상 양의 보행 안정도를 갖는다. 그러나 실제 로봇, m_4의 경우에는 식 (5)에 의한 보행 안정성을 만족하지 못하고, β가 0.75 보다 큰 경우에도 음의 안정성을 갖는다.

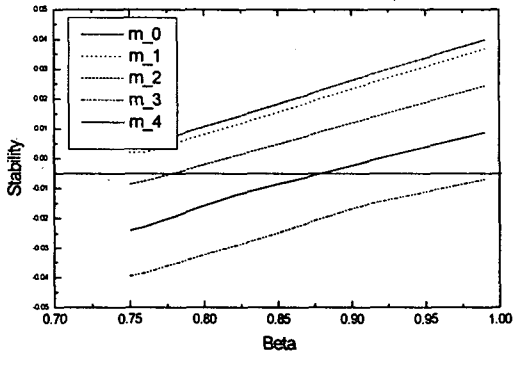
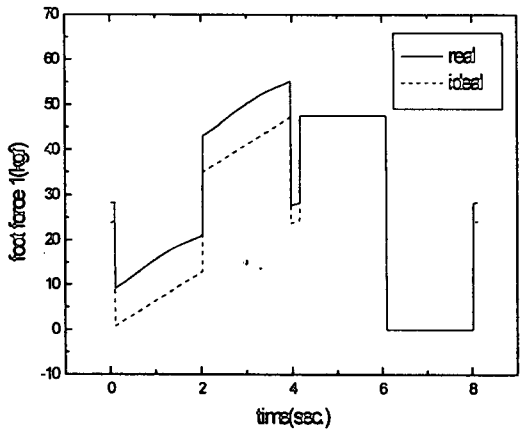


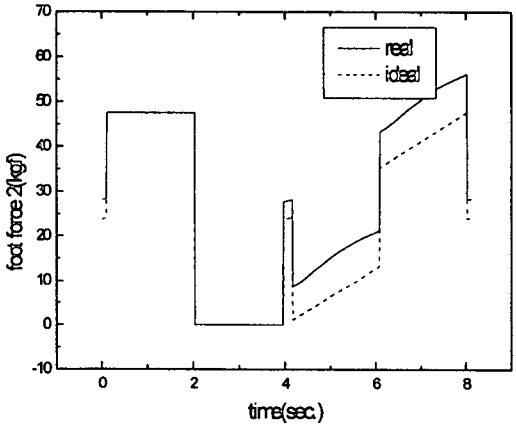
그림 4 다리 무게에 따른 보행 안정도 변화
Fig. 4 Variation in walking stability according to leg-weight

이제 본 논문에서 제안한 몸체 임피던스 제어에 의해 보행 안정성이 개선되는 효과를 살펴보기로 한다. 그림 5.는 표 1에서 제시한 링크 변수 값을 갖는 실제 로봇에 대해서 몸체 임피던스 제어를 적용하지 않았을 때, 보행 한 주기 동안에 나타나는 지지 반력을 그린 것이다. 점선으로 그려진 것은 같은 상황에서 이상적인 로봇의 지지 반력을 나타낸다. 이 때 다리의 이동 순서는 앞서와 같이 4-2-3-1로, 보폭은 20 cm로, 이동 다리의 궤적은 높이 15 cm의 bezier 곡선으로 하였으며, 물결 걸음새의 디딤률은 $\beta=0.76$으로 설정하였다. 따라서 이상적인 로봇의 몸체 중심 궤적은 $+x$ 방향의 직선이 된다. 디딤률 값, 0.76에서 실제 로봇은 음의 보행 안정도를 갖는다(그림 4). 그림 5. (c)의 2~4초와 그림 5. (d)의 6~8초 부근에서 3번 다리와 4번 다리의 지지 반력이 음의 값을 가짐을 볼 수 있다. 이

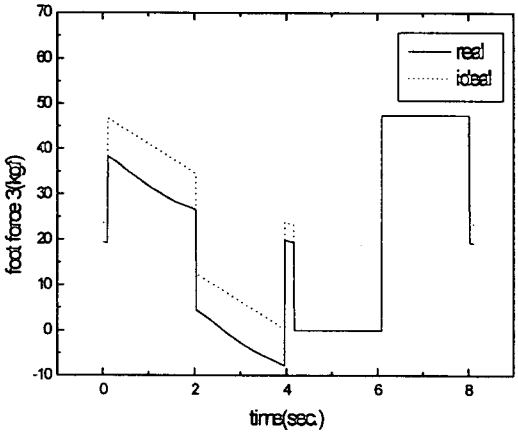
값은 실제로는 나올 수 없는 것이지만, 시뮬레이션 상황에서 지면이 발끝을 밀어내는 것과 같은 불안정한 상황임을 의미한다.



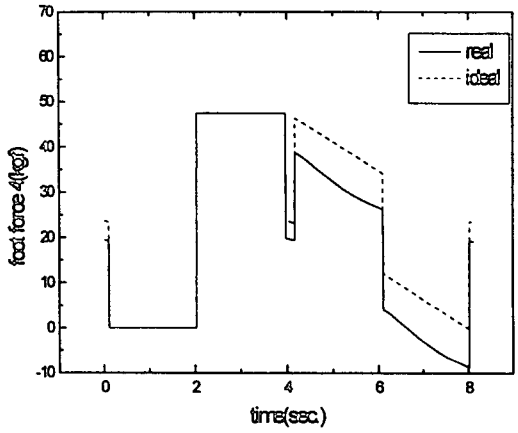
(a) 1번 다리



(b) 2번 다리



(c) 3번 다리



(d) 4번 다리

그림 5 몸체 임피던스 제어를 적용하지 않았을 때, 보행 한 주기 동안의 각 다리의 지지 반력($\beta = 0.76$)

Fig. 5 Foot force of each leg during a period of walking without the body impedance control($\beta = 0.76$)

이를 확인하기 위해 보행 한 주기 동안 보행 안정도의 순시 값을 그림 6.에 나타내었다. 앞에서 설명한 것처럼 2~4초와 6~8초 부근에서 음의 안정도 값을 보이고 있다.

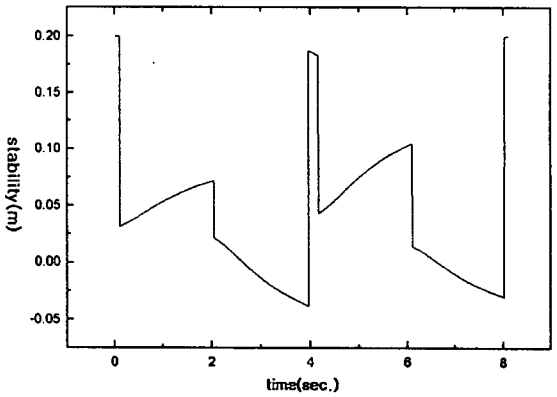
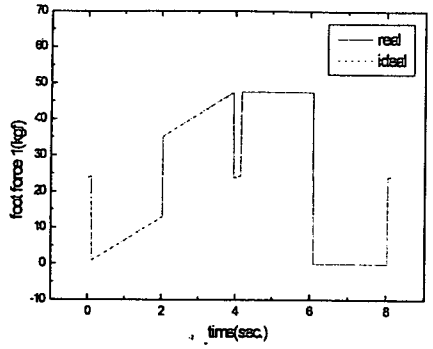


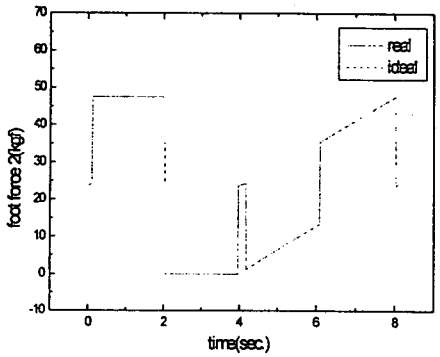
그림 6 몸체 임피던스 제어를 적용하지 않았을 때, 보행 한 주기 동안의 안정도($\beta = 0.76$)

Fig. 6 Walking stability during a period of walking without the body impedance control($\beta = 0.76$)

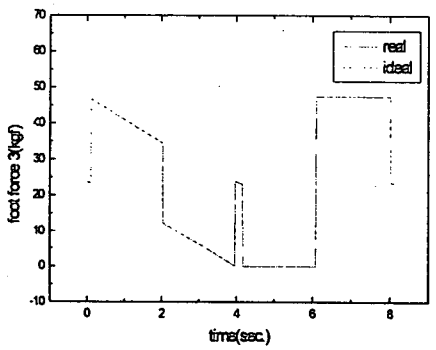
그림 7.은 같은 조건하에서 본 논문에서 제안한 몸체 임피던스 제어를 적용한 경우, 보행 한 주기 동안 지지 반력의 변화를 보여준다. 실제 로봇의 지지 반력이 이상적인 로봇의 지지 반력과 일치하게 됨을 볼 수 있다. 즉 실제 로봇이 보행 안정성의 관점에서 이상 로봇의 걸음새를 그대로 따른다는 것이다. 이러한 사실은 보행 한 주기 동안 순시 안정도의 변화를 그린 그림 8.에서도 볼 수 있다. 전 구간에 걸쳐 항상 양의 안정도를 갖는다는 사실로부터 제안한 몸체 임피던스 제어를 적용한 경우 안정한 걸음새를 구현할 수 있음을 알 수 있다.



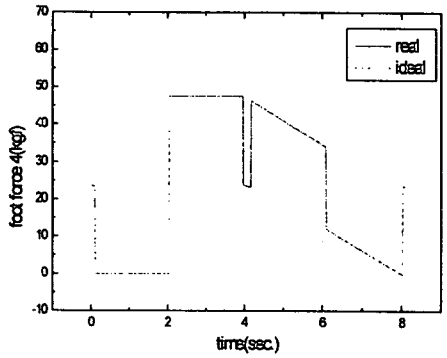
(a) 1번 다리



(b) 2번 다리



(c) 3번 다리



(d) 4번 다리

그림 7 몸체 임피던스 제어를 적용했을 때, 보행 한 주기 동안의 각 다리의 지지 반력($\beta = 0.76$)

Fig. 7 Foot force of each leg during a period of walking with the body impedance control($\beta = 0.76$)

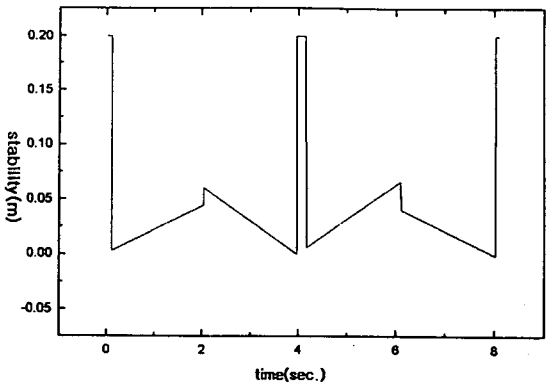


그림 8 몸체 임피던스 제어를 적용했을 때, 보행 한 주기 동안의 안정도($\beta = 0.76$)

Fig. 8 Foot force of each leg during a period of walking with the body impedance control($\beta = 0.76$)

5. 결 론

보행 로봇의 다리 무게가 0이 아닌 경우 로봇의 전체 무게 중심은 다리의 움직임에 따라 변동하므로, 통상 다리의 무게를 0이라고 가정하고 몸체의 무게 중심만을 기준으로 설계하는 정적 걸음새의 보행 안정성은 관절 구동형 로봇 같은 실제 로봇에 대해서는 성립하지 않는다. 보행 로봇의 전체 무게 중심은 결국 지지 반력에 나타나므로, 본 논문에서는 실제 로봇의 지지 반력을 다리의 무게가 0인 이상적인 로봇의 지지 반력에 맞도록 배분하는 몸체 임피던스 제어를 제안하였다. 본 몸체 임피던스 제어에서는 로봇의 움직임에 따르는 전체 무게 중심의 변동이 항상 발끝 힘 궤환에 의해 다시 로봇 움직임에 반영되므로 점근적인 움직임을 생성하게 되고, 결과적으로 실제 로봇이 항상 해석적으로 보행 안정성이 보장되는 이상적인 보행 로봇의 걸음새를 따르게 된다. 본 몸체 임피던스 제어에 의해 실제의 로봇을 이상적인 로봇 처럼 다룰 수 있으므로, 보행 로봇의 경로 및 걸음새 계획을 극도로 단순화할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었습니다. 논문 작성에 도움을 주신 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터의 이 종원 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] S. Song et. al, "An Analytical Approach for Gait Study and Its Applications on Wave Gaits", *The Int'l Jour. of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 60-71, 1987

[2] S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadrupedal Walking Vehicle", *The International Journals of Robotics Research*, vol. 3, no. 2, pp.113-133, 1984

[3] S. Hirose et. al, "Dynamic and Static Fusion Control of a Quadruped Walking Vehicle", *Proc. of IROS'89*, pp. 199-204, 1989

[4] A. Takanishi et. al, "Dynamic Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion", *Proc. of IROS'89*, pp. 187-192, 1989

[5] C. A. Klein et. al, "Force interaction and allocation for the legs of a walking vehicle", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 3, No. 6, pp. 546-555, 1987

[6] C. A. Klein et. al, "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over Irregular Terrain", *The Int'l Jour. of Robotics Research*, vol. 2, No. 2, pp. 3-17, 19831

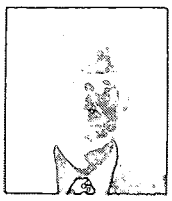
저 자 소 개

이 수 영 (李 壽 榮)

1964년 10월 2일생. 1988년 2월 연세대 전자공학과 (학사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공박). 1995년 3월-1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997년 2월-1998년 2월 미국 Univ. of Southern California Dept. of CS/EE 박사후과정 연구원. 1999년 9월-현재 전북대 전기 및 전자공학부 제어계측전공 전임강사. 주관심분야는 보행 로봇 시스템, 지능 제어 이론, AGV 시스템등임

Tel : 0652-270-4283, Fax : 0652-270-2475

E-mail : suylee@moak.chonbuk.ac.kr



홍 예 선 (洪 藝 善)

1978년 2월 한국항공대 항공기계공학과 (학사). 1980년 2월 한국과학기술원 생산공학과 (석사). 1986년 12월 독일 Aachen공대 기계공학과 (공박). 1987년 2월-현재 한국과학기술연구원 책임연구원. 주관심 분야는 자동차. 로봇. 공작기계등을 위한 유공압 제어 시스템 및 요소 개발

Tel : 02-958-5622

E-mail : yshong@kistmail.kist.re.kr