

# 관절 구동형 4족 보행 로봇의 보행 안정화를 위한 컴플라이언스 제어

이수영\* · 홍예선\*\*  
(1999년 5월 12일 접수)

## The Compliance Control for Walking Stabilization of a Jointed-Leg Type Quadrupedal Robot

Soo-Yeong Yi and Yeh-Sun Hong

**Key Words:** Jointed-Leg Type of Quadrupedal Robot, the Compliance Control, the Body Posture Control

### Abstract

Due to the irregularity of walking ground and the inaccuracy in trajectory control of a leg, the mechanical shock and slip on the ground can be caused in the landing and supporting legs of a walking robot, and the robot may lose walking stability. Especially in a jointed-leg type walking robot, those problems are much more severe than in the pantograph type since the leg-weight of the jointed-leg type walking robot is relatively heavier than that of the pantograph type in general. In order to secure the walking stability for the jointed-leg type quadrupedal robot under development in KIST(Korea Institute of Science and Technology), a balancing algorithm consisting of the leg compliance control and the body posture control is implemented in this paper, and the effectiveness of the algorithm is verified through experiments.

### 1. 서론

4족 로봇의 정적 보행은 다리 하나가 이동할 때 다른 세 다리가 몸체를 안정되게 지지하므로써 이루어진다. 정적 보행의 걸음새로 가장 많이 사용되는 물결 걸음새(wave gait)는 보행 로봇의 무게 중심이 다리의 이동에 영향받지 않고, 보행 지면이 편평하다는 이상적인 가정하에 몸체의 무게 중심이 항상 지지 다각형의 내부에 놓이도록 다리 이동의 순서와 시기를 미리 정하는 것이다. 그러나 실제의 경우에는 보행 지면의 불균일성과 다리 관절 궤적 제어에 있어서의 추종 오차 때문

에 미리 정한 이동 다리의 착지 시점에 보다 빨리, 혹은 늦게 착지가 일어날 수 있고, 따라서 착지 다리에 기계적인 충격과 반동 현상이 나타날 수 있으며, 이에따라 불완전한 지지 상태를 형성하게 되므로 로봇의 보행 안정성을 보장할 수 없게 된다.

이러한 문제에 대한 전형적인 해결 방법의 하나는 각 다리의 발목에 기계적인 스프링-댐퍼 시스템이 장착되어 있는 것과 같은 효과를 얻도록 지면의 불균일성에 맞추어 각 다리의 수직 방향 컴플라이언스를 제어하는 것이다. C. Klein 등은 자신들의 OSU Hexapod 로봇의 각 다리에 힘 센서를 장착하고, 이를 이용하여 컴플라이언스 제어를 수행한 바 있으며,<sup>(1)</sup> 이와 유사하게 K. Yoneda 등은 TITAN 로봇을 대상으로 컴플라이언

\* 회원, 전북대학교 전자정보공학부 제어계측공학과  
E-mail : suyeehan@hanmail.net

TEL : (0652)270-4283, 2475 FAX : (0652)270-2451

\*\* 회원, 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터

스 제어를 통하여 보행 안정성을 높였음을 보고한 바 있다.<sup>(2)</sup> 또 C. Klein 등은 다족 보행 로봇의 각 다리에 독립적으로 컴플라이언스를 수행할 때 각 다리의 상호 작용에 대해 분석, 보고한 바도 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 이들의 연구는 대부분 기구적으로 이미 안정도가 높은 펜트그래프형의 로봇을 대상으로 한 것이었으며, 관절 구동형의 4족 보행 로봇을 대상으로한 다리 컴플라이언스 제어 연구 사례는 거의 없다. 이는 현재까지의 보행 로봇들이 대부분 다리 관절의 구동 모터들을 모두 몸체에 설치함으로써 다리를 가볍게 제작하여 구조적으로 높은 보행 안정도를 확보할 수 있는 펜트그래프형 위주로 개발되어져 왔기 때문이다.

이에 반해 관절 구동형 4족 보행 로봇은 다리 하나의 무게가 로봇 전체 무게의 1/5에 가까울 정도로 무겁고, 이로 인해 각 다리의 이동에 따라 전체 무게 중심이 변동하며, 다리의 무게가 무거운 만큼 다리 관절 궤적의 추종제어 오차도 비교적 크게 나타난다. 그러므로 관절 궤적 추종제어 오차나 지면의 불균일성에 의한 기계적 착지 충격과 반동이 크고, 따라서 보행이 불안정해질 가능성이 높다. 그럼에도 불구하고 관절형 4족 보행 로봇은 다리 구조가 인간형 2족 보행 로봇의 구조와 매우 유사하다는 측면에서 연구 대상이 되고 있고, 관절을 직접 구동하기 때문에 구조가 단순하고 전체적인 경량화가 가능하다는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 한국과학기술연구원(Korea Institute of Science and Technology)에서 휴먼 로봇 개발 과제의 일환으로 개발된 관절 구동형 4족 보행 로봇에 대해<sup>(7)</sup> 불균일 지면에서 보행 안정성을 높일 수 있는 다리 컴플라이언스 제어의 구현과 그 실험 결과를 보고하고자 한다.

2장에서는 다리 컴플라이언스 제어와 이를 보조하기 위한 몸체 자세 제어에 대해서 논하였고, 3장에서는 KIST 4족 보행 로봇의 제원에 대한 간략한 소개와 함께 실험 결과 및 분석에 대해서술하였으며, 이에 대한 결론을 4장에서 요약하였다.

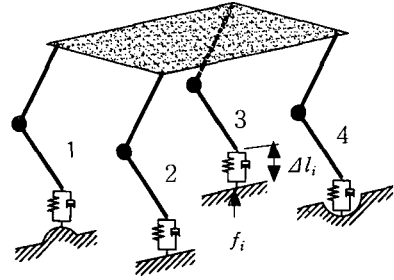


Fig. 1 Model of the leg compliance

## 2. 다리 수직 컴플라이언스 제어

### 2.1 수직 컴플라이언스의 설정

지면의 불균일성과 발끝 궤적의 추종 제어 오차 때문에 발생할 수 있는 착지 충격이나 헛디딤을 고려하여본 논문에서 설정한 각 다리의 컴플라이언스 모델은 Fig. 1과 같다.

컴플라이언스 모델은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$k_v \frac{d}{dt}(\Delta l_i) + k_p \Delta l_i = f_{di} - f_i, \quad (1)$$

$k_v, k_p > 0$ , 상수

여기서  $k_v$ 와  $k_p$ 는 설계 변수로 컴플라이언스 제어의 응답 속도를 결정하고,  $i$ 는 1번부터 4번까지의 각 다리를 나타내며,  $\Delta l_i$ 는 컴플라이언스 제어에 의한 다리 길이의 조정량을 의미한다. 또  $f_i$ 는 발끝에서 측정되는 힘이고  $f_{di}$ 는 각 다리에 컴플라이언스 제어를 통해 추종하고자 하는 기준력이다. 입력항  $f_{di} - f_i$ 에 따라 식 (1)의 해,  $\Delta l_i$ 가 구해지면 이 값과 미리 계획된 발끝 궤적의 수직 성분과 더한 값이 조정된 새로운 발끝 궤적이 되고, 이 값으로부터 몸체 좌표계를 기준으로 역기구학식을 풀어 관절 명령각을 얻어내므로써 관절 제어에 의해 식 (1)의 다리 컴플라이언스 제어를 실현할 수 있다. 기준 지지 반력  $f_{di}$ 는 허공중에서 0, 그리고 지지 상태에서는 양의 값을 가지며, 식 (1)의 해  $\Delta l_i$ 는  $f_i \rightarrow f_{di}$ 를 만족하는 값을 가지므로, 다리 컴플라이언스 모델 식 (1)은 내재적으로 허공중의 상태와 지지 상태 양쪽 모두를 포함하게 된다.

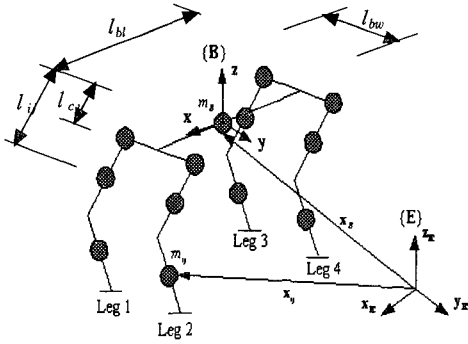


Fig. 2 Point mass model for the walking robot

2.2 정적 모델을 이용한  $f_{di}$ 의 계산

다리 컴플라이언스 제어의 목적은 지면의 불균일성을 극복하는 것이므로, 본 논문에서는 균일한 평지 위를 정적으로 보행할 때 각 다리에 작용하게 될 기준 지지 반력을 다음 Fig. 2에서 보이는 점 질량 모델을 통해 계산하였다. 점 질량 모델은 각 링크의 총 중량이 해당 링크의 무게 중심의 위치에 몰려있다고 가정하는 것이다.

그럼에서  $l_{bw}$ ,  $l_{bi}$ 은 각각 로봇의 폭과 길이를 의미하며,  $l_{ij}$ 는  $ij$  링크의 길이, 그리고  $l_{cij}$ 는  $ij$  링크 무게 중심의 위치를 나타낸다. 여기서 보행 로봇의 움직임이 준 정적(quasi-static)이라고 가정하면  $f_{di}$ 를 계산하는 수식이 단순해지므로 실시간 계산이 가능해진다. 준 정적 가정은 보행 로봇의 안정성을 해석하기 위하여 일반적으로 사용하는 가정인데<sup>(4)</sup>, 뒤의 3.2절에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 동적 효과를 고려했을 때의 지지 반력과 비교하므로써 본 가정의 타당성을 보이기로 하겠다. Fig 2에 보인 점 질량 로봇 모델의 전체 무게 중심  $\mathbf{p}_{cg} = (x_{cg}, y_{cg})$ 은 식 (2)로 주어진다.

$$m_B(x_c - x_{cg}) + \sum_i^{leg} \sum_j^{link} m_{ij}(x_{ij} - x_{cg}) = 0 \tag{2}$$

$$m_B(y_c - y_{cg}) + \sum_i^{leg} \sum_j^{link} m_{ij}(y_{ij} - y_{cg}) = 0$$

여기서  $\mathbf{p}_c = (x_c, y_c)$ 는 로봇 몸체의 무게 중심 위치,  $\mathbf{p}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$ 는  $i$ 번째 다리,  $j$ 번째 링크의 무게 중심 위치를 나타내며,  $m_{ij}$ 는  $ij$  링크의 무게, 그리고  $m_B$ 는 몸체의 무게를 나타낸다.

한편, 보행 로봇의 지지 반력에 대해서 전체 무게 중심점  $\mathbf{p}_{cg} = (x_{cg}, y_{cg})$ 을 기준으로 한 힘-모멘트 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} &= \sum_i^{leg} \sum_j^{link} m_{ij} + m_B = W \\ \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} (x_i^{hip} - x_{cg}) &= \sum_i^{leg} \sum_j^{link} m_{ij} (x_{ij} - x_{cg}) + m_B(x_c - x_{cg}) \tag{3} \\ \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} (y_i^{hip} - y_{cg}) &= \sum_i^{leg} \sum_j^{link} m_{ij} (y_{ij} - y_{cg}) + m_B(y_c - y_{cg}) \end{aligned}$$

여기서  $W$ 는 로봇의 총중량을 나타내고,  $\mathbf{p}_i^{hip} = (x_i^{hip}, y_i^{hip})$ 은 지지 다리의 발끝 위치를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)을 결합하면 로봇의 무게 중심점  $\mathbf{p}_{cg}$ 과 지지 반력 사이의 관계를 나타내는 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} &= W \\ \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} (x_i^{hip} - x_{cg}) &= 0 \tag{4} \\ \sum_i^{supporting\ leg} f_{di} (y_i^{hip} - y_{cg}) &= 0 \end{aligned}$$

식 (2)를 통해 얻은 매순간의 전체 무게 중심점의 위치값과 식 (4)를 이용하여 각 지지 반력의 크기  $f_{di}$ 를 계산할 수 있다. 식 (4)는 4점 지지 상태에서 힘 변수,  $f_{di}$ 의 개수가 수식의 수보다 많은 불능형(underdetermined)이므로 여기서는 각 지지 반력의 크기를 가능한한 작게하기 위해 최소 노름(norm) 값을 주는 의사 역행렬(pseudo inverse)에 의해서 해를 구하기로 한다.<sup>(3)</sup> 즉 식 (4)의 일반해는 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{A}^t(\mathbf{A}\mathbf{A}^t)^{-1} \mathbf{W} \tag{5}$$

여기서  $\mathbf{f}_d$ 는 지지 다리들의 지지 반력,  $f_{di}$ 로 이루어지는 벡터,  $\mathbf{W} = [W, 0, 0]^t$ 이고  $\mathbf{A}$ 는 지지점들의 위치 벡터로 이루어지는 행렬이다. 예로써 1, 2, 4번 다리가 지지 상태일 경우, 행렬  $\mathbf{A}$ 는 다음과 같다:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1^{hip} - x_{cg} & x_2^{hip} - x_{cg} & x_4^{hip} - x_{cg} \\ y_1^{hip} - y_{cg} & y_2^{hip} - y_{cg} & y_4^{hip} - y_{cg} \end{bmatrix}$$

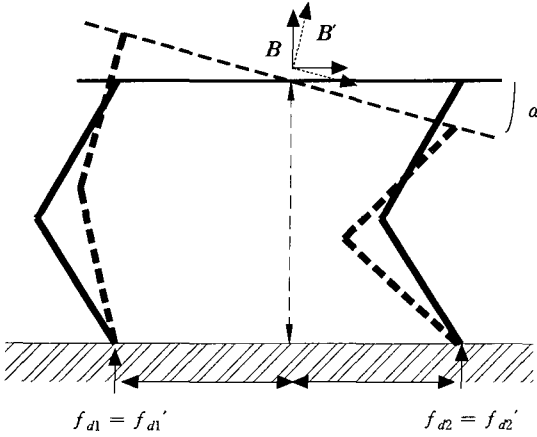


Fig. 3 Two body postures having different inclination angles

2.3 경사각 센서를 이용한 몸체 자세 제어

식 (4)에서 보는 바와 같이 각 다리의 정적 지지 반력은 무게 중심점과 각 다리 지지점간의 거리에만 의존한다. 그러므로 Fig 3에 보이는 것처럼 무게 중심과 각 다리의 지지점 위치가 같은 서로 다른 두 자세에 대해서도 같은 크기의 정적 지지 반력이 얻어지게 된다. 따라서 다리의 컴플라이언스 제어에 의해 추종하고자 하는 기준 지지 반력  $f_{di}$ 의 결정 조건을 일관되게 하고 또한 보행 안정도를 높이기 위해서는 컴플라이언스 제어에 앞서 몸체의 자세를 지면과 평행하게 유지하기 위한 자세 제어가 필요하게 된다.

보행 로봇이 각각  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 pitch 및 roll 경사각을 가질 때, 지면에 평행한 상태로 복귀하기 위해서는  $-\alpha$ 와  $-\beta$ 의 경사각을 갖는 몸체 좌표계의 회전 행렬을 구하여 이를 각 다리 관절의 궤적 생성을 위한 역기구학의 기준으로 이용하면 된다. 우선 pitch 각  $\alpha$ 와 roll 각  $\beta$ 를 갖는 로봇 몸체의 회전 행렬( $R'$ )은 다음과 같이 구할 수 있다. 처음에 일치되어 있는 기준 좌표계( $E$ )와 몸체 좌표계( $B$ )에 대해, 그림 4에서 보는 바와 같이, 기준 좌표계의  $y_E$ 축을 기준으로 몸체 좌표계를  $\alpha'$ 만큼 회전시키고, 회전된 좌표계의  $x_B$ 축을 기준으로 다시  $\beta'$ 만큼 회전시키면 몸체 좌표계의 회전 행렬은 다음과 같이 된다.

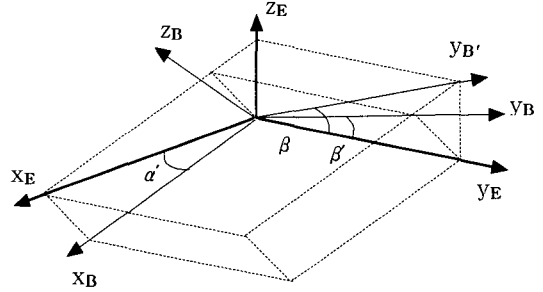


Fig. 4 The body coordinate rotated with pitch angle,  $\alpha$  and roll angle,  $\beta$

$$R' = \begin{bmatrix} \cos \alpha' & 0 & \sin \alpha' \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha' & 0 & \cos \alpha' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha' & \sin \alpha' \sin \beta & \sin \alpha' \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha' & \cos \alpha' \sin \beta & \cos \alpha' \cos \beta \end{bmatrix}$$

여기에 다음과 같은 사실들이 성립한다. 즉,

(i)  $R'$ 의 각 행 벡터는 회전된 몸체 좌표계  $B$ 의 각 성분  $x_B, y_B, z_B$ 의 기준 좌표계  $E$ 에 대한 표현이므로 다음과 같이 쓸 수 있다[5].

$$x_B = [ \cos \alpha' \quad 0 \quad \sin \alpha' ]^t,$$

$$y_B = [ \sin \alpha' \sin \beta \quad \cos \beta \quad \cos \alpha' \sin \beta ]^t,$$

$$z_B = [ \sin \alpha' \cos \beta - \sin \beta \quad \cos \alpha' \cos \beta ]^t \quad (7)$$

(ii) Pitch 각,  $\alpha$ 는 몸체 좌표계의  $x_B$ 와 기준 좌표계의  $x_E$ 의 사잇각이고

(iii) Roll 각,  $\beta$ 는  $y_B$ 의  $x_E - y_E$  평면에 대한 사영(projection),  $y_B'$ 과  $y_E$ 축의 사잇각이다.

위의 (ii)로부터  $x_B$ 와  $x_E$ 축 사이의 내적(dot product)은  $\cos \alpha$ 가 되는데, 식 (7)의  $x_B$ 로부터 다음 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$x_E^t x_B = [ 1 \ 0 \ 0 ] [ \cos \alpha' \ 0 \ \sin \alpha' ]^t$$

$$= \cos \alpha'$$

$$= \cos \alpha \quad (8)$$

결국 회전각  $\alpha'$ 는 경사각  $\alpha$ 와 같아야 한다. 또한  $y_B$ 의  $x_E - y_E$  평면에 대한 사영의 단위 벡터는

$$y_B' = \left[ 0 \quad -\frac{\cos \beta}{M} \quad \frac{\cos \alpha' \sin \beta}{M} \right]^t;$$

$M = \sqrt{\cos^2 \beta + \cos^2 \alpha \sin^2 \beta}$  이므로, 같은 방법에 의해 (iii)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} y_E^t y_B' &= [0 \ 1 \ 0] \left[ 0 \quad -\frac{\cos \beta}{M} \quad \frac{\cos \alpha' \sin \beta}{M} \right]^t \\ &= -\frac{\cos \beta}{M} \\ &= \cos \beta \end{aligned}$$

(9)

그러므로  $\beta$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \cos^{-1}(-M \cos \beta) \quad (10)$$

요약하면 주어진 경사각  $\alpha$ ,  $\beta$ 로부터 식 (8)과 식 (10)을 이용해 얻어지는 회전각  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 에 대해 몸체 좌표계의 회전 행렬  $R'$ 이 식 (6)으로 주어진다는 것이다. 이제 측정된 경사각  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대해서 몸체의 평형을 유지하기 위해서는  $R'$ 을 구한 역순으로  $-\alpha'$ ,  $-\beta'$ 만큼 회전시킨 행렬을 구하고, 이를 기준으로 각 다리의 역기구학을 풀면 되는데, 이 때의 회전 행렬  $R$ 은 결국  $R'^{-1}$ 이고, 이는 식 (11)로 주어진다.

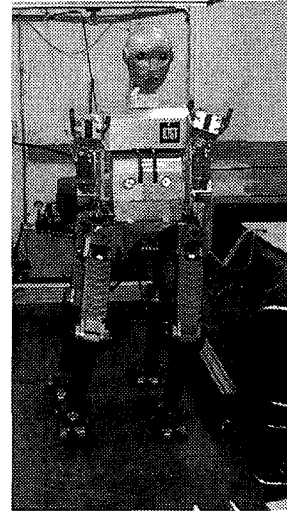
$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha' & 0 & -\sin \alpha' \\ \sin \beta' \sin \alpha' & \cos \beta' & \cos \alpha' \sin \beta' \\ \sin \alpha' \cos \beta' & -\sin \beta' & \cos \alpha' \cos \beta' \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 3. 실험 결과 및 분석

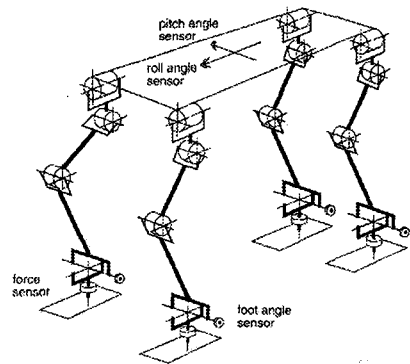
#### 3.1 KIST 4족 보행 로봇의 구조 및 제원

2장에서 서술한 다리 컴플라이언스 제어와 이를 위한 몸체 자세 제어를 KIST 4족 보행 로봇에 적용, 실험하였다. KIST 4족 보행 로봇은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 양팔, 양손과 시각을 갖는 인간형 상체를 탑재한 것으로서, 각 다리에 3 자유도씩, 총 12자유도의 다리 관절이 유압 액츄에이터에 의해 구동되고, 폭 480mm, 길이 560mm, 높이 170mm의 크기를 갖는다. 각 발은 짐발(gimbal) 형태의 관절에 의해 정강이와 연결되며 발목의 요오(yaw) 회전이 가능하다. 총 중량은 상

체 무게 50kg을 포함하여 약 150kg에 이르며, 보행 로봇만의 중량은 아래의 Table 1에 보이는 몸체 프레임과 링크, 탑재형 제어기 및 유압 공급원을 포함하여 100kg에 이른다. 유압 구동식 관절은 로테이터(rotator), 서보 밸브 및 회전각 센서로 구성되며, 최대 구동 토크는 감속 기어 없이 140 bar의 차압에서 187 Nm에 달한다.



(a) Front view



(b) Kinematic structure & sensor system

Fig. 5 The Structure of the walking robot and its sensor system

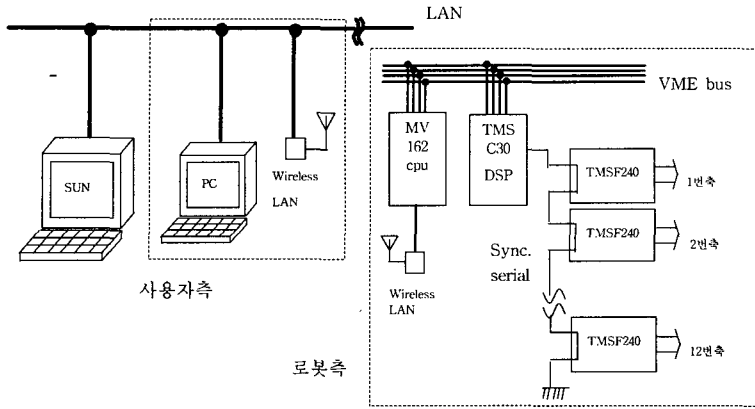


Fig. 6 Configuration of the control system for the walking robot

Table 1 Dynamics parameters of the walking robot

(단위: MKS)

$m_b$	$m_{i1}$	$m_{i2}$	$m_{i3}$	$l_{bw}$	$l_{bl}$	$l_{i0}$	$l_{i1}$	$l_{i2}$	$l_{i3}$	$l_{ci1}$	$l_{ci2}$	$l_{ci3}$
36.0	3.393	6.04	5.30	0.4	0.56	0.06	0.09	0.37	0.495	0.0344	0.1861	0.2475

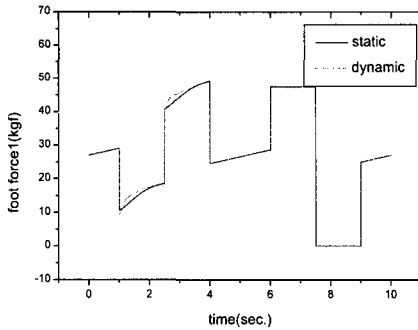
Fig. 6은 보행 로봇의 전체 제어 시스템인데, 관절 제어기로서는 보행 로봇에 탑재가 가능하도록 TMS320F240 DSP를 채택한 소형 마이크로 컨트롤러를 개발하였으며, 이들 총 12개의 관절 제어기들은 최대 2 MBPS 속도의 동기식 직렬 통신 채널에 의해 네트워크로 묶여 주 컴퓨터인 VME-bus기반 TMS320C30 DSP 제어기와 연결된다. 보행 및 상체 작업을 통합하기 위해 VME-bus 기반 MVME 162 컴퓨터가 중앙제어기로서 별도로 탑재, 사용되었으며, 보행 명령 생성과 보행 상황 모니터링을 담당하는 SUN workstation과 중앙제어기 간의 통신은 무선 LAN을 이용하였다. 그리고 전체 전원 공급 장치로서 재충전이 가능한 축전지를 탑재함으로써 외부와의 유선 연결을 배제하여 독립 보행이 가능하도록 하였다.

3.2 기준 지지 반력  $f_d$ 를 위한 정적 모델과 동적 모델의 비교

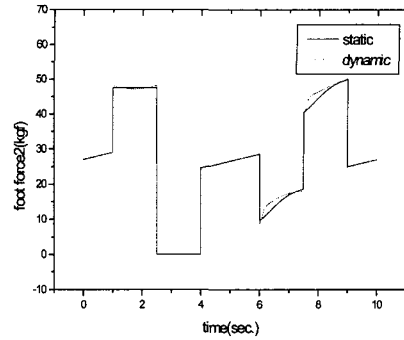
다리 컴플라이언스의 제어를 위한 기준 지지 반력  $f_d$ 를 구하는 식 (2)~(5)의 과정은 로봇의 움직임 속도가 0인 정적 상태를 가정한 것이다.

로봇이 보행할 때에는 속도가 0이 아니므로 필연적으로 동적 효과가 발생하게 되고, 따라서 기준 지지 반력을 구할 때 동적 모델을 이용하므로써 보다 정확한 값을 얻을 수 있으리라는 것은 자명하다. 그러나 각 다리에 3 자유도씩 총 12개의 자유도와 몸체의 위치 및 방향 6 자유도를 포함하여 총 18개의 자유도를 갖는 Lagrange-Euler 동력학식, 그리고 지면 지지에 의해 주어지는 페어링 구조의 구속 조건식을 실시간으로 풀어 컴플라이언스 제어를 구현하는 것은 보행 제어기의 성능상 현실적으로 매우 어렵다.

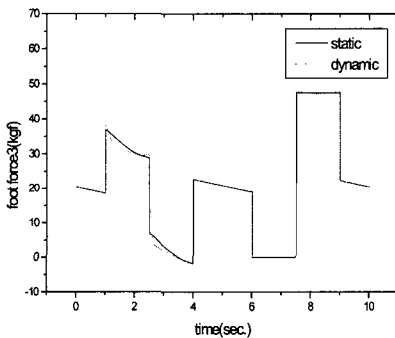
따라서 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 동적 모델과 정적 모델에 의해 구해지는 기준력  $f_d$ 가 근사적으로 일치하는 보행 주기 시간의 영역을 확인하고, 이를 근거로 하여 실제 실험에는 식 (2)~(5) 처럼 정적 모델에 의한 기준력을 계산, 적용하였다. 동적 모델에 의한 기준력의 계산은 참고문헌[6]에서 개발된 동력학 모델 시뮬레이터를 사용하였으며, 여기에 적용된 모델 매개 변수들을 Table 1에 제시하였다[7]. 각 변수들의 의미는 Fig. 2에 나타난 바와 같다.



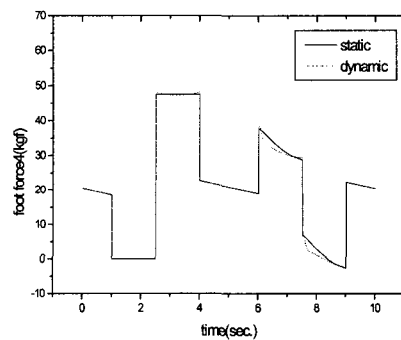
(a) 1번 다리



(b) 2번 다리



(c) 3번 다리



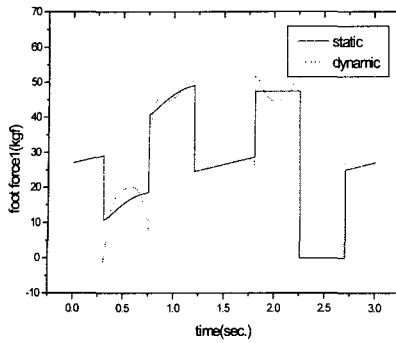
(d) 4번 다리

Fig. 7 Foot force of each leg in case of the walking period, 10 sec

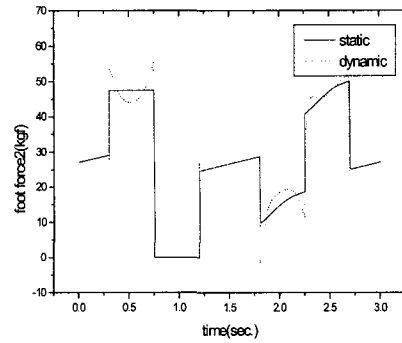
Fig. 7은 보행 주기가 10초인 경우에 대해 정적 모델과 동적 모델에 의해 구한 각 다리의 지지 반력을 비교한 것이다. 보행의 기본 걸음새로는 물결 걸음새를 이용하였으며, 이 때 보행 주기 시간에 대한 한 다리의 지지 구간의 비를 나타내는 디딤률은 0.85로, 다리의 이동 순서는 4-2-3-1로 하였다[4]. 그림에서 보는 것처럼 보행 주기가 10초인 경우 정적 모델과 동적 모델의 계산 결과가 거의 같음을 알 수 있다. 참고로 Fig. 8은 보행 주기가 3초인 경우에 대해 시뮬레이션한 결과인데, 이 때에는 동적인 관성 효과가 크기 때문에 정적 모델을 이용하여 계산한 결과의 오차가 큼을 알 수 있다. 따라서 실제 보행 실험에서는 모델 매개 변수 오차 등을 감안하여 보행 주기를 20초로 충분히 길게 설정하여 다리 컴플라이언스 제어를 시도하였다.

### 3.3 다리 컴플라이언스 제어와 자세 제어의 실험 결과

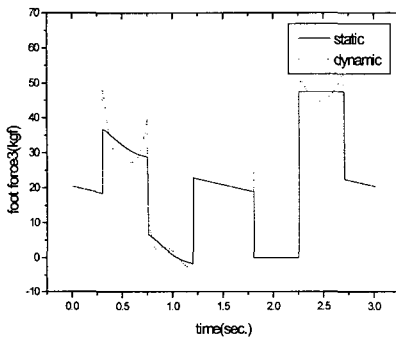
다리 컴플라이언스 제어의 효과를 비교하기 위한 실험 결과로서 Fig. 9는 보행 주기가 20초, 보행 주기 시간에 대한 한 다리의 지지 구간의 비를 나타내는 디딤률이 0.85인 물결 걸음새로 보행 할 때 다리 컴플라이언스 제어 알고리즘 없이 단순 관절 궤적 추종 제어만을 실행한 경우 각 다리의 발끝 힘을 측정된 결과이다. 그림에서 점선으로 표시된 것은 정적 모델에 의해 계산된 기준력이다. Fig. 9 (a)에서 초기 구간에 보행 명령은 4점 지지임에도 불구하고 실제 측정된 지지 반력은 0에 가까움을 볼 수 있다. 이것은 지면의 불균일성, 혹은 관절 궤적 제어 오차 때문에 1번 다리가 지면과 접촉하지 않고 허공에 떠있어서 실제로는 3점 지지 상태가 되었음을 의미한다.



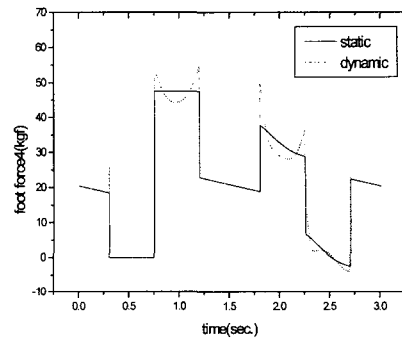
(a) 1번 다리



(b) 2번 다리



(c) 3번 다리



(d) 4번 다리

Fig. 8 The foot force of each leg in case of the walking period, 3 sec

따라서 Fig. 10에서 볼 수 있는 것처럼 초기의 pitch 및 roll 경사각이 크게 나타났다. 이에 반해 Fig. 11에서는 다리 컴플라이언스 제어 효과에 의해 초기 구간에서 모든 다리에 적당한 크기의 힘이 가해지고 있음을 볼 수 있다. 이는 모든 다리가 지면을 견고하게 지지하고 있음을 의미한다. 이 효과는 Fig. 12의 보행 중 몸체 경사도 측정 결과에서도 확인할 수 있는데, 전반적인 경사도의 변화량이 컴플라이언스 제어를 적용하지 않은 Fig. 10의 경우보다 작게 나타났다.

#### 4. 결론

4족 로봇이 균일하지 않은 지면을 보행할 때 발생하는 일반적인 문제점은 지면상의 요철 형태의 장애물 때문에 발과 지면간의 접촉 상태가 불

확실하거나 지지 구간에 있는 다리에 로봇의 무게가 적절히 분배되지 못하는 것이다. 특히 다리의 무게가 무거운 관절형 보행 로봇의 경우에는 관절 궤적의 제어 오차가 비교적 크게 나타나므로 이러한 문제점이 보행 안정성에 미치는 영향이 더욱 심각하다. 본 논문에서는 KIST에서 개발한 관절 구동형 4족 보행 시스템을 대상으로 다리 컴플라이언스 제어와 자세 제어를 구현함으로써 불균일한 지면에서의 보행 안정성을 높일 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

보행 로봇은 몸체의 무게를 각 다리에 분산시킴으로써 각 다리의 지지력을 제어하기 때문에, 지면에 고정되어 있는 매니퓰레이터형 로봇에 비해 힘 제어가 어려운 것이 사실이다. 보행 로봇 각 다리의 지지 반력에 대한 반작용력은 지지 다각형에 대한 전체 무게 중심의 모멘크 크기가



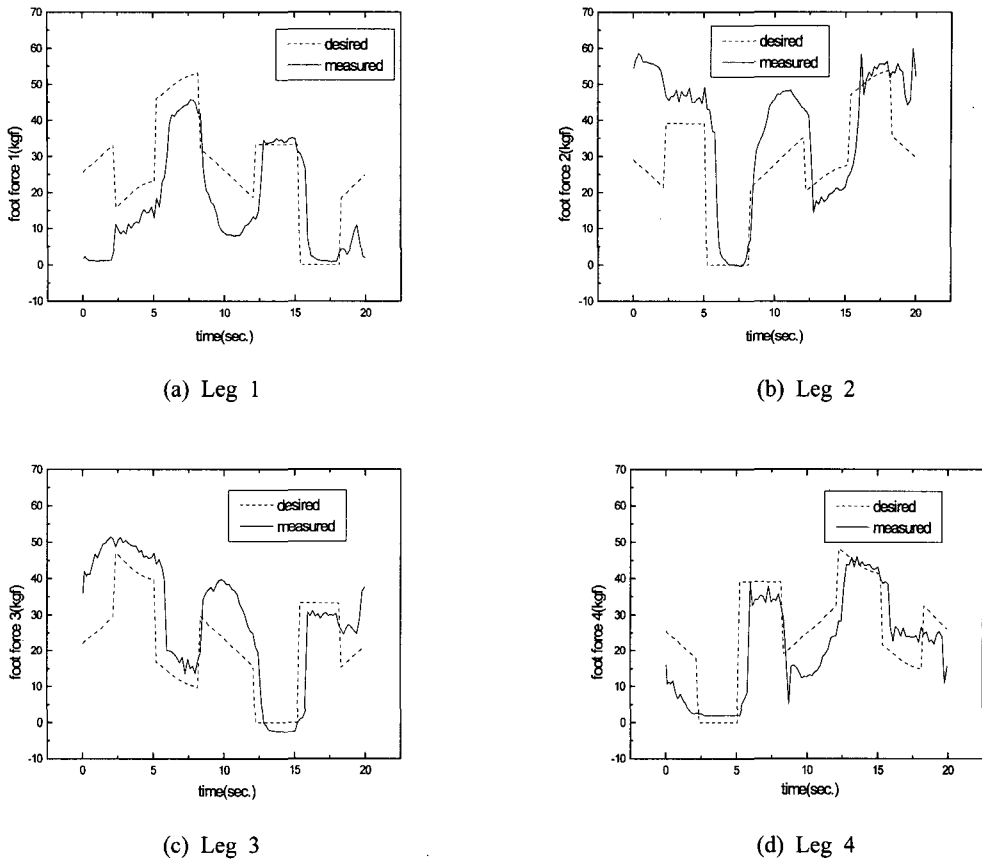


Fig. 9 The foot force of each leg during a period of walking without the leg compliance control

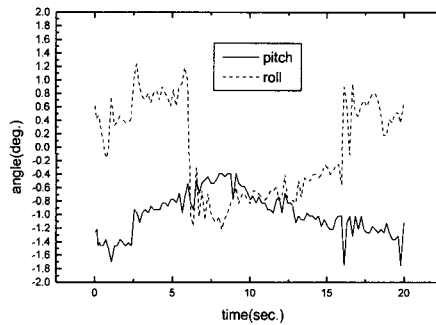
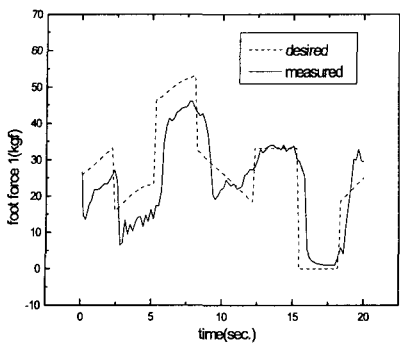
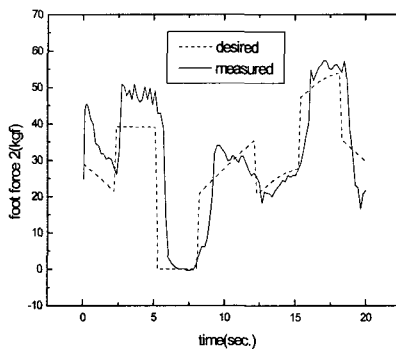


Fig. 10 The inclination angle of body during a period of walking without the leg compliance control

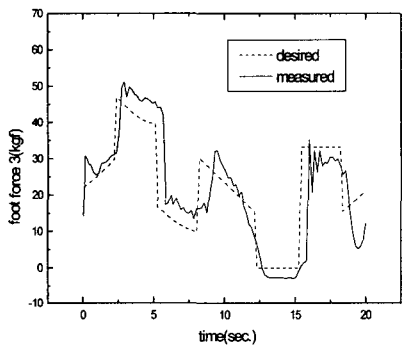
되므로, 다리 컴플라이언스 제어의 효과를 높이기 위해서는 먼저 정적 모멘트가 높은 걸음새의 개발이 필요하다.



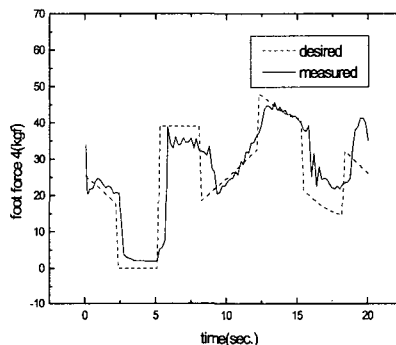
(a) Leg 1



(b) Leg 2



(c) Leg 3



(d) Leg 4

Fig. 11 The foot force of each leg during a period of walking with the leg compliance control

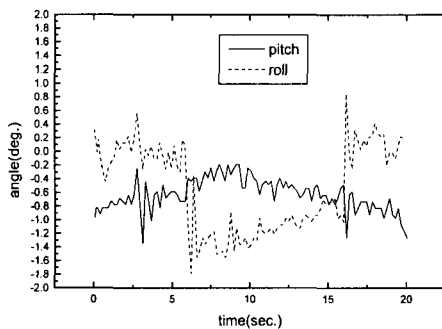


Fig. 12 The inclination angle of body during a period of walking with the leg compliance control

## 후 기

본 논문을 수행하는데 도움을 주신 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터의 이종원 박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Klein C.A, Briggs R.L., 1983, "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.
- (2) Yoneda K., Iiyama H., Hirose S., 1994, "Sky-Hook Suspension Control of a Quadruped Walking Vehicle," *Proc. of IEEE Int'l Conf. of Robotics and Automation*, pp. 999~1004.
- (3) Klein C.A., Chung T.S, 1987, "Force Interaction and allocation for the Legs of a Walking Vehicle," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 546~555
- (4) Song S., Waldon K., 1987, "An Analytical Approach for Gait Study and Its Applications on Wave Gaits," *The Int'l Jour. of Robotics*.
- (5) Fu K.S., 1987, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill.
- (6) Koo T.W., 1998, *Study for the Gait Stability of Quadruped Walking Robot*, Ph.D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (7) 이종원, 1994-1998, 휴먼 로봇 시스템 개발 보고서: I, II, III, IV, V, 한국과학기술연구원.