

정적 보행모델에 기반을 둔 4족 보행로봇의 온라인 틸팅 제어알고리즘

이순걸*, 조창현*, 홍예선**, 이증원**

On-line Tilting Control Algorithm of a Quadruped Walking Robot Based on Static Walking Model

Soon-Guel Lee*, Chang-Hyun Cho*, Yeh-Sun Hong**, Chong-Won Lee**

ABSTRACT

During static walking of a quadruped walking robot, stability of the robot depends on whether the projection of the mass center is located within the supporting area that is varying with leg motion and formed by standing legs. In this paper, force margin instead of the mass center was used to determine stability and body-tilting method was used to enhance it. On-line control of body tilting was realized with simple reaction feedback based on force margin of the static walking model of the robot instead of complicated calculation. Model reference on-line control where the model searches stable pose for predefined force margin also gave good walking performance.

Key Words : body tilting (몸체 틸팅), force margin (하중여유), on-line control (온라인 제어), walking robot (보행로봇), static walking (정적 보행)

1. 서론

보행장치를 이용하면 바퀴나 무한궤도에 의해서 접근할 수 없는 비평탄 지면이나 험한 지형에서 이동이 가능하고 별도의 정지작업이 없이도 지지면을 안정적으로 유지할 수 있으며 장애물을 다양한 방법에 의해 효율적으로 통과할 수 있다. 이와 같은 보행의 장점으로 인해 보행로봇에 대해 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 관절과 링크로 구성된 보행로봇은 가변의 지지면을 가진 역진자 구조를 이루고 있어 근본적인 안정성의 문제가 제기되며 이와 같은 이유로 인하여 효율적이고 안정된 이동을 위한 연속적인 보행 제어에 대한

연구가 중점적으로 수행되어 왔다.

보행의 안정성에 대한 연구는 걸음새로부터 시작되었으며, 초기에는 오프라인으로 적절한 보행 궤적을 형성하여 불규칙한 지형에 잘 적응하도록 걸음새를 수정하는 연구가 주로 수행되었으나 [1],[2],[3], 점차 이동 중에 센서에 의한 온라인 제어를 행함으로써 안정성을 꾀하는 연구가 주가 되었다. 1980년부터 OSU(Ohio State University)의 Klein과 Briggs에 의해 6족의 pod 구조의 로봇에 대해 자세 센서와 발끝에 부착된 힘 센서를 이용하여 비평탄 지형을 보행하는 방법을 연구하였다.[4] 1984년 Hirose는 접촉 센서, 자세 센서를 이용하여 몸체의 높이, 몸체의 자세, 각 다리의 착지 실

* 경희대학교 기계공학과

** 한국과학기술연구원 휴먼로봇 센터

현 등을 제어하는 반사 동작 조절부(Reflex-Motion Regulation System)를 구상하였다.^[5] 이상의 연구들은 보행 로봇의 안정 보행에 대한 여러 방법을 제시하였으나 대상이 된 로봇의 구조가 상대적으로 안정한 pod 또는 crab의 형태에 국한 되었고 다리의 궤적 또는 지면의 불균일성에 의한 보정을 행하는 부분적인 온라인 제어이거나 또는 기 설정된 경로를 추종하는 등, 그 제어 알고리즘이 지역적인 측면에서 운용이 되었다.

한편에서는 보행궤적과는 독립적인 상체 또는 몸체의 움직임을 이용하여 보행의 안정성을 도모하는 연구가 수행되었다. Takanishi 등에 의해 주어진 보행궤적에 대해 ZMP(Zero Moment Point)를 로봇의 안정된 범위 내에 유지시키도록 상체의 운동을 오프라인으로 제어하는 보행 알고리즘에 대한 연구가 많이 수행되었다.^{[6],[7],[8]} 이와 같이 몸체의 스윙을 이용한 보행방법은 1994년 Saito 등에 의해서도 연구되었고^[9] 근래에 들어서는 Honda 사의 Humanoid robot 에 적용되어^[10] 매우 유연한 보행을 실현하고 있다.

발에서 측정되는 지지력을 이용한 보행 알고리즘은 매우 다양하게 적용되어 왔다. 오래 전부터 ZMP의 계산과 그에 따른 보행궤적의 보정에 많이 적용되기도 하고^{[7],[8],[10]} 1993년의 Kislenko에 의한 연구^[11]처럼 노면의 감지에 적용되는 경우도 있다. 6족 보행로봇의 경우는 1995년 Schmukey 등에 의해 다리 이동 순서를 변경하고 몸체에 발생하는 반력을 계산하여 적합한 자세를 취하는 작업에 따라 적응하는 연구가 수행되었다.^[12] 그러나 발에서 측정된 지지력만을 온라인으로 궤환하여 보행궤적을 보정한 연구는 매우 적다.

보행로봇 연구의 일환으로 KIST(Korea Institute of Science and Technology)에서는 인체와 유사한 다리 구조를 가진 4족보행로봇인 '센토(CENTAUR)'를 제작하였고 많은 결과를 가져왔다. 특이한 설계적 측면의 연구와^[13] 적합한 보행궤적의 형성과 디딤음을 조절하는 걸음새 연구를 비롯하여^{[14],[15]} 외란에 대처한 보행연구^[16] 등이 수행되었다. 1999년 이순걸은 지지력만을 이용한 경사면 보행 알고리즘을 개발하였다.^[17]

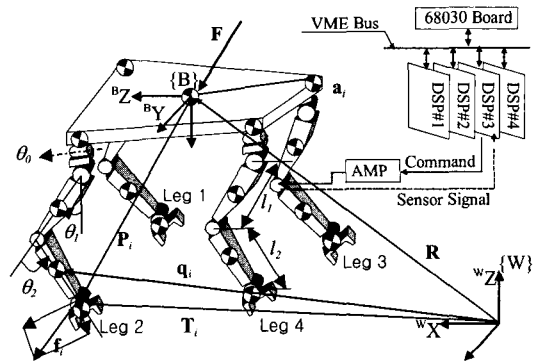
본 논문에서는 센토의 준 정적 보행모델에 대해 안정성을 개선하는 방법으로 무게중심의 궤적을 온라인으로 제어하는 알고리즘에 대해 연구하였다. 기존의 2족 또는 4족 보행로봇과는 달리

현재 센토는 상체가 없으며 각 다리의 움직임에 의해 보행궤적과 무게중심의 위치가 동시에 결정된다. 기존의 ZMP 연구와는 달리 독립적인 상체의 움직임에 의한 무게중심의 보정이 아닌 보행 단계에서 무게중심을 천이 시키기 위한 방법으로 보행궤적에 부가하여 발끝의 위치를 진행방향에 대해 횡으로 이동시키는 방법을 개발하였다.^[18]

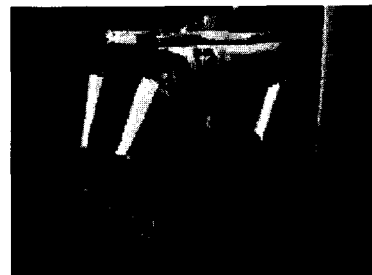
이와 같은 자세 수정은 몸체가 진행방향에 대해 회전하는 양상을 보이게 되어 이를 틸팅(tilting)이라 정의하였다. 따라서 본 연구에서는 보행모델에 의해 계산된 무게중심이 현 상태하에서 안정된 좌표치를 갖도록 궤적을 설정하고 각 다리에서 측정된 수직 반력으로부터 로봇의 무게중심의 위치를 계산하여 이를 모델의 값과 비교하여 필요한 틸팅량을 구하고 이에 의해 무게중심의 궤적을 수정하여 안정도를 향상시키는 보행알고리즘을 개발하여 적용하였다.

2. 4족 보행 로봇과 보행 알고리즘

2.1 4족 보행 로봇 및 그 정적 모델



(a) System structure of the walking robot



(b) Picture of the 'Centaur' being walking

Fig. 1 The quadruped walking robot 'Centaur'

Fig. 1 은 센토의 구조와 그 보행 장면이다. 그림에서 기준 관성 좌표계는 {W}로, 로봇 몸통에 고정된 좌표계는 {B}로 표시하였다. 벡터 \mathbf{R} 과 \mathbf{T}_i 는 각각 기준 관성 좌표계에 대한 로봇 몸통의 중심과 i 번째 다리의 발끝을 나타낸다. 몸통 중심으로부터 i 번째 다리의 발끝의 위치는 \mathbf{P}_i 로, 몸통의 각 모서리 위치는 \mathbf{a}_i 로 나타냈다. 보행계적은 \mathbf{T}_i 로 정의되며 이를 {B}좌표계에 대해 변환하면 각 다리의 경로 계획을 로봇 몸통 좌표계로 나타낼 수 있다. 센토는 전체 질량이 56kg 이며 그 구조는 영경이 부분에 2 자유도의 관절이 존재하여 서로 독립적인 ${}^B Y$ 과 ${}^B Z$ 방향의 회전이 가능하며 무릎관절은 ${}^B Y$ 방향의 회전이 되도록 제작되었다. 또한 발은 가상의 회전중심에 대해 회전이 가능한 앞·뒤 2 개의 발가락을 가진 특수 구조로 설계되어 있다.^{[13],[14]} 따라서 발목은 별도의 관절이 없으며 회전중심 위치에 로드셀이 부착되어 있어 지면에서의 수직반력을 측정할 수 있도록 되어있다.

32bit 마이크로프로세서인 MC68030 을 주 제어기로 사용한 VME 버스 시스템을 채택하였으며 실시간 운용 시스템으로 VxWorks 를 사용하였다. 또한 보행계적의 분산제어를 위해 다리 당 한 개의 DSP(Digital Signal Processor) 보드가 대응되도록 구성하였다. DSP 보드는 미 TI 사의 TMS320C30 을 CPU 로 사용하여 4 개의 DC 모터를 동시에 제어할 수 있다. 이 DSP 보드는 다리의 각 관절에서 인코더 신호를 케환 받아 회전량을 감지하여 케적 제어를 수행한다. 5 개의 DSP 를 관장하는 중추의 역할로서의 68030 CPU 는 전체적인 걸음새를 관리하고 작업계획을 수행한다.

각 관절에서의 마찰은 무시하였고 로봇의 움직임은 준정적(quasi-static)이며 보행시 발끝과 지면과의 미끄러짐이 없다는 가정하에 보행모델을 설정하였다. Fig. 1(a)에 표시된 것처럼 4 개의 발과 각 다리 당 2 개, 그리고 몸체 4 모서리 및 몸체중심에 질점이 존재한다고 가정하여 총 17 개의 질점으로 구성된 링크 모델에 대해 무게중심의 좌표 벡터 \mathbf{r}_m 은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{q}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

여기서 n 은 질점의 수($n=17$)이며 m_i 와 \mathbf{q}_i 는 각각

i 번째의 질점의 질량과 그 위치 벡터이다.

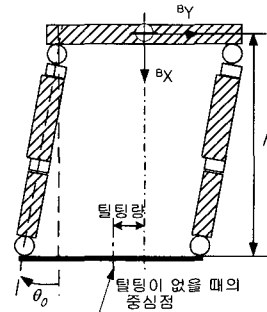
구한 \mathbf{r}_m 을 식 (2)의 \mathbf{r} 로 대입하면 주어지는 발끝계적 \mathbf{T}_i 에 따른 모델의 예상 반력 $\mathbf{f}_{m,i}$ 을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{T}_i \times \mathbf{f}_i = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (2)$$

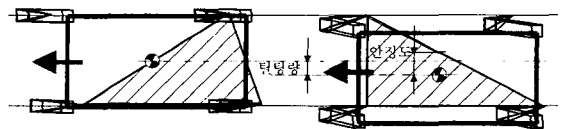
이때 \mathbf{F} 는 로봇 몸체 무게중심에 작용하는 외력의 합이며 정적 보행시는 전체 로봇의 무게가 된다. 또한 정적 보행하에서 지지 다리에서의 반력은 수직 성분만 존재하므로 한 다리가 이동중인 3 점 지지의 경우 식 (2)의 해 \mathbf{f}_i 는 모델에서의 지지다리의 예상 반력 $\mathbf{f}_{m,i}$ 이 된다. 4 점 지지의 경우는 4 개의 반력에 대해 3 개의 식이 구해지므로 로봇이 준정적 상태에 있다고 가정하여 4 다리의 반력의 합이 무게와 같도록 하여 식을 풀었다.

위 식은 실 보행에도 동일하게 적용된다. 다리의 실제 보행계적 \mathbf{T}_i 와 각 다리에서 측정된 반력 $\mathbf{f}_i = \mathbf{f}_{m,i}$ 에 대해 구한 해 \mathbf{r} 은 실 로봇의 무게중심 위치 \mathbf{r}_r 이 된다.

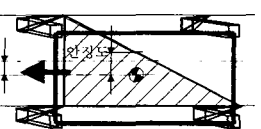
2.2 오프라인 틸팅과 하중여유



(a) front view of tilting



(b) walking without tilting



(c) walking with tilting

Fig. 2 Body tilting and location of the mass center

직진 보행 중에 무게중심을 지지다각형 내로 이동시키기 위한 방법으로 지지하고 있는 다리들에 대해 몸체중심을 횡방향으로 기울이는 틸팅 방법을 사용하였다 (Fig. 2(a)). 물결걸음새의 기본은 무게중심이 일정한 속도로 직선 이동하는 것이며

4 점 지지상태로부터 한 다리를 이동하게 되면 Fig. 2(b)와 같이 정적으로 불안정한 경우가 발생한다. 이 경우 Fig. 2(c)와 같은 물체의 발끝에 대한 상대적인 진행방향의 횡방향 이동은 보행 안정성을 높인다. 즉 매 순간 지지하고 있는 다리들의 관절각을 변경하여 자세를 보정함으로써 로봇 무게중심을 지지다각형 안쪽으로 이동시켜 안정성을 높인다. 그림 (b), (c)에서 빗금 친 부분은 지지다각형이고 굵은 실선은 로봇의 몸체를 나타낸다.

본 연구에서 직진 보행계획은 다리의 발끝 궤적 P_i 의 x, z 성분 P_{ix}, P_{iz} 으로 주어지며 선행연구로부터 얻어진 물결걸음새에 디딤울(β)을 고려한 궤적으로 주어졌다.^{[14],[15]} 먼저 무게중심의 횡방향 이동량이 보행시간에 따른 정현함수로 표시되는 오프라인 틸팅을 고려하였다. 본 연구에서는 다리의 이동순서가 4-2-3-1 순으로 주어지므로 몸체는 정현 함수의 한 주기에 대해 진행 방향의 우측에 있는 다리가 들릴 때는 좌측으로 틸팅하고 좌측 다리가 들릴 때는 다시 우측으로 틸팅하게 된다. 아래 식 (3)은 이를 식으로 나타낸 것이다.

$$R_y = -A \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T_p}\right) \quad (3)$$

여기서 A 는 y 방향 최대 틸팅량이고 T_p 는 보행주기이며 t 는 매 보행주기에 대해 경과된 시간이다.

물결걸음새의 기본가정을 유지하기 위해 다음과 같은 틸팅에 대한 가정을 한다.

- (1) 틸팅에 의한 무게중심의 높이 변화는 무시할 만하다.
- (2) 물결걸음새로 정의된 발끝 궤적은 틸팅에 의해 영향을 받지 않는다.

따라서 발끝궤적의 횡방향 이동은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{iy} = R_y = h_d \cdot \sin \theta_0 & \text{ for standing feet} \\ P_{jy} = 0 & \text{ for a moving foot} \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 3은 평지 직진 보행의 경우 식 (3)으로 주어진 오프라인 틸팅의 보행 모사실험의 결과를 나타낸 것이다. 한 주기 동안의 무게중심 횡방향 궤적을 Fig. 3(a)에 표시하였고 괄호 내 번호는 이동하는 다리를 의미한다. 실험에서 A 는 0.07m로 주어졌고 그때 무게중심의 최대 틸팅량은 5.85cm 이었다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에 표시된 연속적인 8 단계에 대해 보행로봇의 틸팅과 그 자세를 보여주고

있다. 점선으로 표시된 가로 및 세로 선은 보행주기 시작시의 몸체중심 위치를 표시하며 각 단계별로 나타난 몸체중심과의 상대 위치는 무게중심의 지지다각형에 대한 상대적인 틸팅량을 의미한다. 뒷다리의 이동시인 ②와 ⑥은 충분한 틸팅이 발생하며 앞다리 착지시인 ④와 ⑧은 무게 중심이 지지다각형의 경계에 위치하여 불안정의 경계에 있음을 보여준다. 즉 뒷다리의 이동시에는 안정적인 모습을 보여주나 앞다리의 움직임에서는 초기에 높은 안정도를 갖다가 착지시에는 불안정한 영역으로 무게중심이 이동하지만 4 점지지 상태는 항상 안정하므로 곧 안정성을 회복하게 된다.

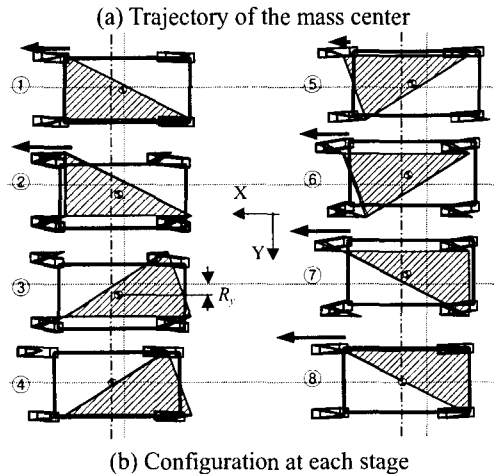
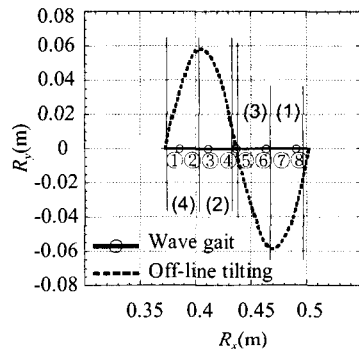


Fig. 3 Simulation result of the off-line tilting algorithm

보행중 지지다각형에 대한 무게중심의 위치에 의해 주어지는 안정성은 각 지지다리에 작용하는 하중조건으로 바꿀 수 있다. Fig 3(b)의 각 단계의 1번 다리 상단에 표시된 굵은 화살표는 식 (2)에 의해 계산된 1번 다리의 수직반력 크기를 의미한

다. 상대적으로 안정성이 떨어지는 1 번 다리의 지지기간인 ⑤와 안정된 ⑥를 비교하면 안정성과 그 하중조건은 긴밀한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 실 보행에 있어서 복잡한 지지다각형과 무게 중심의 위치관계를 계산하지 않고 취약한 다리의 하중상태를 측정, 궤환함으로써 안정성의 제어가 가능하다. 본 연구에서는 안정조건에 취약한 다리에 최소한으로 요구되는 하중을 하중여유로 정의하고 이에 대하여 궤환을 수행하는 온라인 제어 알고리즘을 개발하였다. 하중여유는 29.4N 에서 49N 사이의 값으로 설정하였고 이는 실험에 의해 구한 오프라인 틸팅에 대한 다리의 지지 조건과 같다.

2.3 단순 온라인 틸팅 알고리즘

인체에서의 보행은 안정성의 최악 조건이 발생하지 않도록 하는 직립 자세제어를 한다.^{[19],[20]} Fig. 4 는 이와 같은 온라인 제어 메커니즘을 나타낸 것으로 계획된 보행궤적에 대한 틸팅을 수행하는 보정을 보여준다. 그림에서 Robot 으로 표시된 블록은 실제 로봇을 의미한다. 사전 계획된 보행 궤적에 대해 실제 로봇의 수직반력 f_r 가 측정되고 그에 따라 로봇의 무게중심 궤적 r_r 이 계산된다. 이 무게중심 위치와 기준으로 주어진 위치 r_{ref} 를 비교함으로써 제어기는 틸팅량을 다음과 같은 식으로 결정하게 된다.

$$\Delta R_y = c_y \Delta M \quad (5)$$

여기서 c_y 는 비례상수이다. 틸팅에 의해 주어지는 무게중심의 좌표벡터는 식 (6)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} {}_N \mathbf{R} &= {}_O \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R} \\ \Delta \mathbf{R} &= [0, \Delta R_y, 0] \end{aligned} \quad (6)$$

이때 하첨자 N 은 틸팅 이후를, 하첨자 O 는 틸팅 이전을 표시한다.

모든 지지다리에서 지면과 미끄럼이 없다고 가정했으므로 i 번째 다리의 궤적 P_i 은 아래 식으로 주어진다.

$${}^W P_i = T_i - {}_N R \quad (7)$$

$${}^B P_i = {}^B D {}^W P_i$$

여기서 ${}^W D$ 는 좌표계 $\{B\}$ 에 대한 $\{W\}$ 좌표계의 회전 변환 행렬이다.

구한 틸팅궤적 ${}^B P_i$ 로부터 실제 관절각은 역기구학 식에 의해 구해지고 그에 따라 각 관절각을 제어할 수 있게 된다. 실제 직진보행의 경우 틸팅은 진행방향에 수직한 엉덩이에서의 ${}^B Z$ 방향 회전으로 주어지며 이에 의해 무게중심의 상대적인 ${}^B Y$ 방향 이동으로 나타난다. 다시 말하면 모든 지지중인 다리의 엉덩이 관절을 진행 방향의 횡방향으로 일정각도 회전시킴으로써 간단히 물체를 틸팅시킬 수 있다.

2.4 모델추종 온라인 틸팅 알고리즘

전술한 단순 온라인 틸팅 보행 알고리즘은 기 설정된 보행의 발끝 궤적만을 추종하는 방법이며 불확실한 보행 특성상 효율적이라고 할 수 없다. 반면에 생체는 계획된 보행궤적에 따라 물체를 이동시키거나 지속적으로 물체의 자세 상태를 예측하여 불안정성이 예상되면 기 설정된 보행궤적을 수정하여 안정된 보행궤적을 생성하고 그에 따라 다리의 부가적인 이동 방향을 결정하거나 자세를 보정하게 된다.^[20] 본 연구에서는 생체의 보행 모델 제어 알고리즘을 적용하여 로봇 모델에서 계산된 지지다리에서의 수직하중 값들의 최저치를 기 설정된 하중여유와 비교하여 자세조정 즉 새로운 목표 틸팅 궤적을 생성한다. 이 계산된 목표 틸팅 궤적에 의해 추종하고자 하는 수직하중과 무게중심의 위치를 계산하게 된다. 즉 기준 모델의 무게중심 위치는 주어진 하중여유에 대한 보정치 δR 을 더함으로써 연속적으로 얻을 수 있다.

$$\mathbf{R}_m = {}_O \mathbf{R} + \delta \mathbf{R} \quad (8)$$

Fig. 5 는 이와 같은 제어 알고리즘을 흐름도로

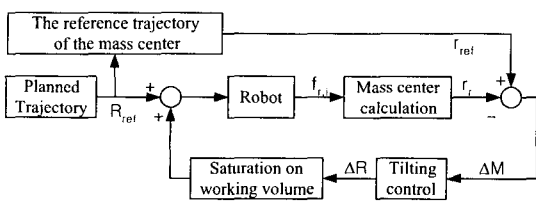


Fig. 4 Block diagram of simple on-line tilting algorithm

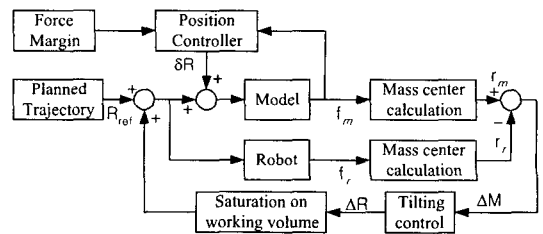


Fig. 5 Model following on-line tilting algorithm

나타낸 것이다. 알고리즘은 두개의 보정을 위한 루프로 구성되어 있다. 첫째는 주어진 보행궤적에 대해 준정적 모델의 하중여유를 만족시키도록 모델의 킬팅 궤적을 수정하는 루프이고, 또 하나는 실 로봇의 킬팅의 보정을 행하는 루프이다. 실 제어기의 적용은 다음과 같다. VME 시스템 제어기에 의해 주어진 기준 보행궤적과 하중여유에 대해 지속적인 모델 시뮬레이션이 수행되어 r_m 과 f_{mi} 를 계산한다. 시뮬레이션 중 취약한 다리에 대해 하중여유를 만족할 수 있도록 식 (8)에 의한 모델의 자세보정치를 얻고 모델의 기준 킬팅 궤적을 수정하는 ΔR 을 계산한다. 또한 로봇의 발끝에서 측정된 수직반력 f_{ci} 과 실 무게중심의 위치 r_c 는 각각 모델의 경우와 비교되며 식 (5)에 의한 적절한 킬팅이 주어지도록 보정치 ΔR 을 부가하여 새로운 보행궤적이 DSP 에 의해 생성되도록 시스템이 구성되었다. 모델의 경우는 진행방향에 대해 전후 킬팅이나 회전에 의한 효과는 고려되지 않았으나 작업 영역의 제약에 대한 조건은 고려되었다.

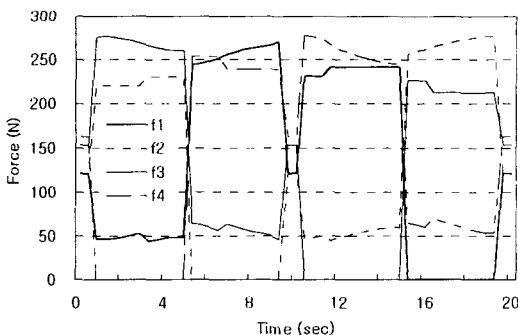
두 종류의 보행 실험을 수행하였다. 첫번째는 단순 온라인 킬팅 알고리즘으로 로봇 모델을 고려하지 않은 제어 시스템이다. 두번째는 모델추종 킬팅 알고리즘이다. 이 두 실험은 동일한 보행 조건에 대해 수행이 되었다. 보행 주기는 20 초로 주어졌고 보폭은 10cm로 주어졌으며 다리의 이동 순서는 4-2-3-1 로 주어졌다.

3.1 모델 검증

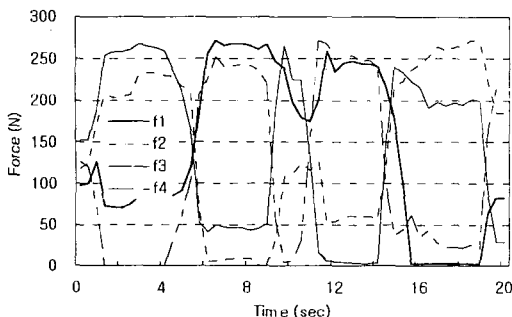
모델의 검증을 위해 평지 직진보행 시 모델에서의 계산된 로봇의 수직 반력과 실험에서 측정된 수직 반력을 비교하여 Fig. 6 에 나타냈다. 각 다리의 수직 반력은 관절각을 고려하여 계산하였으며 정적 보행을 위해 보행 주기는 20 초로 주었다. 한 다리가 지면에 접촉하는 시간과 보행주기와의 비, 즉 디듀티는 0.77로 주어졌고 이는 준정적이라는 가정에 크게 어긋나지 않는 보행 조건이다.

그림은 4 점 지지로부터 시작하여 4 점 지지 상태로 끝나는 1 주기에 대한 응답을 나타냈다. 실험치와 근접한 결과를 보이기 위해 로봇 모델의 초기 상태는 진행방향에 대해 우측으로 약간 기울어진 상태로 두었다. 결과는 모델과 실제 로봇의 수직반력의 크기나 변화하는 경향이 거의 일치함을 볼 수 있다. 일부 구간에서의 차이는 로봇의 초기 자세, 동적인 요소, 바닥면의 불균일성 그리고 로봇 자체에서 발생하는 오차 등의 여러 불확실한 요인에 기인한다. 로봇의 초기 0~1 초 사이의 하중분포를 비교하면 모델에서 주어진 것과는 다르게 초기 자세를 유지하고 있고 이에 의해 보행 초기의 응답이 모델과 차이가 있음을 보여준다. 또한 10 초 지점에서의 4 점지지 기간동안 실제 로봇은 모델의 가정과는 다르게 균등 하중을 유지하지 않음을 보여준다. 실제 로봇에서 매번 다리를 들 때와 착지 시의 하중의 변화는 동력학적인 요인에 의해 모델의 경우와는 다르게 다소 완만함을 볼 수 있다. 이와 같이 초기시나 다리의 교체 기간 등과 같이 준정적이 아닌 일부 부분들을 제외한 3 점 지지기간의 모델에서 계산된 수직반력은 실제 측정치에 대해 $\pm 25N$ 이내에 머물고 있어서 제안된 로봇 모델이 본 연구를 수행하기에 적절함을 알 수 있다.

3. 실험 및 결과



(a) Simulation result of the model



(b) Experimental result of the real robot

Fig. 6 Vertical reaction forces for straight static walking

3.2 오프라인과 온라인 제어

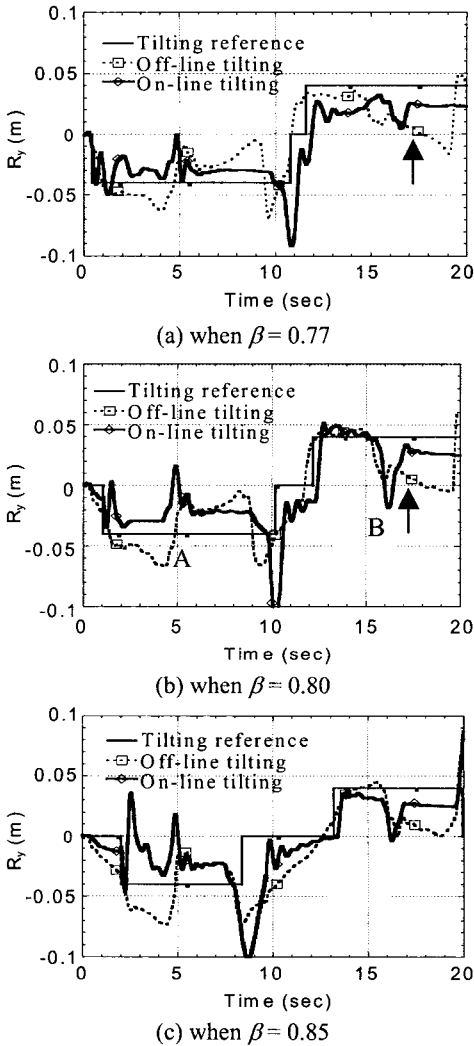


Fig. 7 Comparison between on-line and off-line algorithm

평지 직진보행에 대하여 디딤울을 각각 0.77, 0.8, 0.85로 조정하여 실험을 수행 하였다(Fig. 7). 그림에서 실선으로 표시된 무게중심의 기준궤적은 0.04m의 일정한 틸팅이 2, 4번 다리가 들릴 때는 음의 R_y 방향으로 설정되었고 1, 3번 다리가 들릴 때는 반대로 양의 값으로 설정되어 정량적인 안정도를 보장하도록 주어졌다. 점선은 정현함수로 주어진 오프라인 틸팅을 수행했을 때 무게중심의 궤적이며 기준궤적과 유사한 틸팅효과를 비교하기 위해 진폭은 0.04m로 주어졌다. 굵은 실선은 주어진 기준궤적에 대해 온라인 알고리즘 제어를 수행

하였을 때 로봇의 무게중심 궤적을 보여준다.

지지다리와 이동다리가 바뀌는 기간 동안의 응답은 불안정해 보이나 이는 지지점의 불연속에 의해 나타나는 예외적인 경우로 안정하다. 전체적으로 이 같은 불연속기간을 제외하면 모든 경우에 대해 온라인 알고리즘은 주어진 기준 틸팅입력을 지속적으로 잘 추종한다. 반면에 오프라인의 경우는 보행이 상대적으로 불안정하게 나타나며 심지어 로봇이 쓰러지는 경우도 보였다. 실제 디딤울이 0.77과 0.8로 주어진 Fig. 7(a)와 (b)에서 화살표로 표시된 부분은 오프라인 보행중 로봇이 균형을 잃은 지점이다. Fig. 7(c)는 디딤울을 증가시킨 경우로 오프라인 보행시에도 균형을 잃지 않고 보행을 수행한 상태를 보여준다. 디딤울이 증가하면 전체 보행기간 중 지지기간은 길고 이동기간은 짧아져, 보행은 안정적이거나 다리의 이동속도가 빨라져서 다리에 의한 동적 효과가 증가하여 온라인 알고리즘의 응답이 정적 모델에 대한 기준 틸팅 입력으로부터 많이 벗어남을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)에서 영문자 A, B로 표시한 시점은 각각 앞다리인 2, 1번 다리의 이동시점을 나타내며, 이때 앞다리의 이동시, 제시된 틸팅 궤적에 대한 무게중심 변위의 차이가 뒷다리의 이동시보다 큼을 알 수 있다. 이는 로봇의 자세와 다리의 이동 순서에 기인한다. 센트는 Fig 1(b)에서와 같이 진행 방향으로 다리를 구부린 형태로 보행을 하며, 다리의 무게가 상대적으로 많이 나가는 센트의 경우는 무게중심이 몸통의 중심보다 약 7cm 정도 전방에 위치하고 있음이 계산되었다.

또한 보행을 위해서는 무게중심이 지속적으로 전방으로 이동해야 하는데 보행중 앞다리가 들리게 되면 지지영역이 몸체의 후방으로 위치하게 된다. 이 경우 무게중심은 지지영역보다 더 전방으로 가기 쉽게 되어, 안정 보행을 위해서는 앞다리가 이동중일 때 무게중심 이동의 틸팅량이 뒷다리가 움직일 때의 틸팅량보다 크게 된다. 다리의 이동을 나타내는 3 점지지 상태에서 이와 같은 무게중심의 치우침과 보행의 특성은 작은 무게중심의 변화에 의해 정해진 안정도를 쉽게 벗어날 수 있음을 말하며 상대적으로 불안한 앞다리의 이동시 더 큰 틸팅량을 요구하게 된다. Fig. 7은 온라인 틸팅의 경우에도 기 설정된 궤적을 추종하는 경우에는 불안정한 요인을 갖음을 보여준다.

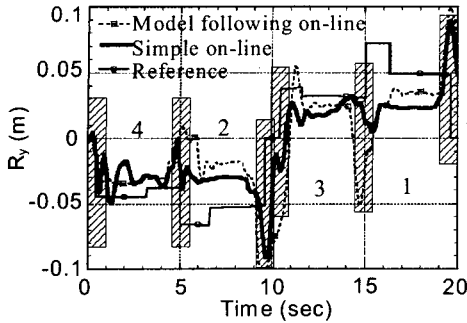


Fig. 8 The trajectory of the mass center of the model following on-line control and the simple on-line algorithm on horizontal surface

3.3 하중여유 조건과 모델추종 온라인 제어

평지 직진보행에 대해 모델추종 온라인 제어 실험을 수행하였다. 다딤울은 0.77로 주어졌고 보폭과 보행주기는 전과 동일하게 수행하였다. 오프라인이나 기 설정된 궤적을 추종하는 단순 온라인 제어의 결과와 동일하게 다리의 교체에 따른 불연속이 존재한다.

모델을 이용하여 무게중심의 바람직한 궤적을 계산함으로써 Fig. 7에서 보여지는 단순 온라인 알고리즘의 문제점을 해결하였다. Fig. 8은 단순 온라인 알고리즘과 모델 추종 온라인 제어의 결과를 비교한 것으로 그림에서 빗금 친 사각형의 구간은 다리 교체에 따른 천이 기간을 의미한다. 그림에서 이동성이 요구되는 3, 4번 다리가 움직이는 구간에서는 틸팅량이 줄어 비효율적인 과도한 틸팅이 억제되고 있으며, 앞다리인 1, 2번 다리가 움직이는 구간에서는 틸팅량이 증가되어 요구되는 안정성이 확보됨을 알 수 있다.

보행에 있어서 틸팅은 진행방향과 수직으로

주어지므로 보행의 안정성을 높여주지만 이동성을 저해하는 움직임이라고 할 수 있다. 따라서 어느 정도의 안정성, 즉 확보되어야 하는 하중여유에 대해 이동성을 높이는 것이 보행 효율을 높이는 기본전략이 되며 이 같은 사항은 Fig. 9와 같이 모델추종 제어가 이루어지는 하중여유 응답 특성으로 잘 나타난다. Fig. 9에서 직선으로 표시된 실선은 주어진 기준 하중여유로서 40N 이고, 곡선은 4번 다리의 반력으로부터 계산된 하중여유 응답을 나타낸다. 그림에서 초기의 0에 근접하는 순간이 4번 다리의 이동시점으로서 다른 보행 방법보다 짧게 나타난다. 빗금 친 사각형 부분은 다리교체에 의한 천이기간을 의미하며 이를 제외하고 실제로 로봇의 하중여유 응답의 크기는 50N을 넘지 않았다. 따라서 모델추종 제어의 경우 주어진 안정성을 유지하는 보행이 가능하다는 점을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 보행로봇에 대한 걸음새 제어를 하중여유 조건에 의한 모델 무게중심 궤적을 추종하는 제어 구조를 제시하였다. 로봇의 이동시 하중여유 조건을 만족하도록 제시된 모델을 모의 실험하여 안정한 로봇의 무게중심 궤적을 생성하고 이를 센서 정보를 통해 구해진 실제 무게 중심과 비교하여 안정한 보행을 할 수 있도록 하였다. 실험에 의하면 생성된 궤적은 오프라인 틸팅과 달리 제한된 기준에 의해 최소한의 틸팅을 하게 되어 효율적임을 보여 주었고 불안정한 영역에서도 충분한 보상을 할 수 있음을 보여 주었다.

참고문헌

1. Bekker, M. G., *Introduction to Terrain Vehicle Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1969.
2. S. Hirose and Kan Yoneda, "Dynamic and Static Fusion Control of Quadruped Walking Vehicle," Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on intelligent Robots and Systems, pp. 199-204, Tsukuba, Japan, 1989.
3. Yoshihiro Sakakibara, Kazutoshi Kan, Yuuji Hosoda, Makoto Hattori and Masakatsu Fujie, "Foot Trajectory for a Quadruped Walking Machine, IEEE International Workshop on Intelligent Robot and

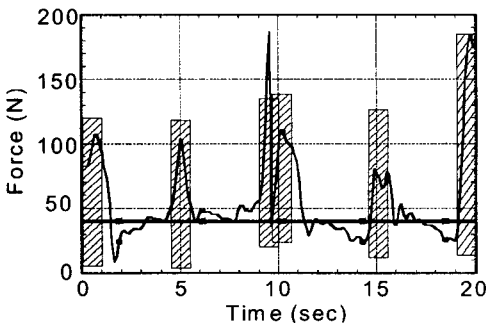


Fig. 9 The force margin and the measured vertical reaction force of the model following on-line control

- Systems," IROS 90, pp. 315-322, 1990.
4. C. A. Klein and R. L. Briggs, "Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles," IEEE Trans SMC, Vol. 10, No. 7, pp. 393-400, 1980.
 5. S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," Int. J. Robotics Res. Vol. 3, No. 2, pp. 113-133, 1984.
 6. Takanishi, A., et. al., "Realization of dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motions," ROMANSY, 1988.
 7. Takanishi, Atsuo and Lim, Hun-ok, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface," IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS 90, pp. 323-330, 1990.
 8. Takanishi, Atsuo, "Biped Walking Robot Compensating Moment by Trunk Motion," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 5, No.6, pp. 505-510, 1993.
 9. F. Saito, T. Fukuda, F. Arai, "Swing and Locomotion Control for a Two-Link Brachiation Robot," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 5, 1994.
 10. K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.
 11. Y. Kislenko, "Tactile Sensation in a Walking Robot," J. of Computer and Systems Sciences, Vol. 31, No. 2, pp.150, 1993.
 12. Schmuker U., Schneider A., Ihme T., "Hexagonal Walking vehicle with sensing capability," Proceedings of ISMCR '96.
 13. Y. S. Hong, S. Y. Yi, S. B. Ryu, C. W. Lee, "Design and experimental test of a new robot foot for a quadrupedal jointed-leg type walking robot," Proc. 5th IEEE Int. Workshop on RO-MAN'96, Tsukuba pp. 317-22, 1996.
 14. 이종원의, 휴먼로봇 시스템 개발 연차 보고서 - 2 차년도, 한국과학기술연구원 KIST-2000 연구사업단, 1996.
 15. 이종원의, 휴먼로봇 시스템 개발 연차 보고서 - 1 차년도, 한국과학기술연구원 KIST-2000 연구사업단, 1995.
 16. D. O. Kang, et. al., "A study on an adaptive gait for a quadruped walking robot under external forces," Journal of the Korean Institute of Telematics and Electronics, Vol. 33B, No. 9, pp. 1-12, 1996.
 17. 이순걸, "접촉반력을 이용한 4족 보행로봇의 경사면 감지 및 보행 알고리즘," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 138-147, April. 1999.
 18. 조창현, 이순걸, "틸팅과 안정여유도를 이용한 4족 보행 로봇의 보행 알고리즘," KACC'98, pp1556-1559, Pusan, Korea, 1998.
 19. S-G Lee, J. A. Ashton-Miller, and A. B. Schultz, "An Analysis of the Biomechanical Factors Affecting Recovery of Unipedal Balance in the Frontal Plane," ASME J. Biomechanical Engineering, BED. Vol 26, pp. 475-478, 1993.
 20. S-G Lee, "Theoretical and Experimental Biomechanical Analyses of the Effects of Age and Peripheral Neuropathy on Unipedal Balance," Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1993.
 21. Lee, T. T. and Shin, C., "Real time Computer Control for a Quadruped Walking Robot," Trans. of the ASME, Vol. 108, pp. 346-353, 1986.
 22. Neil R. Carlson, *Physiology Behavior 5th Ed.*, Allyn and Bacon, MA, 1994.
 23. A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking Robot WL-IORD," Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp.459-466, 1985.
 24. S. Kajita and K. Tani, "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on Realtime Sensing of the Ground Profile", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.570-577, 1996.
 25. S. Kajita and K. Tani, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking in the Linear Inverted Pendulum Mode," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2885-2891, 1995.
 26. B. Min, Z. Bien, and S. Hwang, "Basic Characteristics and Stability Properties of Quadruped Crab Gaits," Robotica, Vol. 11, pp. 233-243, 1994.
 27. K. Arikawa, S. Hirose, "Development of quadruped walking robot TITAN-VIII," IROS96, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf., Vol. 1, pp. 208-14, 1996.