

틸팅을 이용한 4족 보행 로봇의 정적 보행 알고리즘

Static Walking Algorithm for a Quadruped Robot using Tilting

이 순걸, 조창현, 김병수
(Soon-Geul Lee, Chang-Hyun Cho, and Byoung-Soo Kim)

Abstract : This paper presents walking algorithm for a quadruped robot that does not have an upper body. Tilting motion is added to the planned walking trajectory instead of using an extra body segment that is independent on walking trajectory. Area and tracking algorithms are proposed as tilting method and compared with that of off-line tilting and that of no tilting. Computer simulation shows that stability of tilted walking is more improved than that of the usual walking algorithm for general walking paths. It also shows that the tracking method guarantees stability and best mobility.

Keywords : quadruped walking robot, tilting, stability margin, slope adaptation, virtual slope angle

I. 서론

보행 로봇의 제어에 대한 연구는 보행시 발생하는 외부 환경과의 상호 작용을 보행이 수행되기 이전에 센서를 통해 외부 환경 정보로 미리 예상하고, 이를 바탕으로 보행 동작을 계획하고 걸음새를 오프라인(off-line)으로 수행하는 방식이 대부분이다[1][2][3]. 생체의 경우는 미리 정의된 형태의 보행을 수행하나 돌발 상황이 발생시 설정된 궤적을 수정하고, 궤적수정에 의해 안정된 보행을 얻을 수 없는 경우, 경로 및 걸음새를 바꾸는 적응제어 방법으로 자율보행을 구현한다.

보행에서의 무게중심의 이동은 역진자 구조의 불안정성을 보상하기 위한 중요한 요소이고 이를 이용한 많은 보행 로봇 연구가 수행, 연구되었다. 1990년 *Takanishi* 등은 2족 보행 로봇의 골반 움직임을 단순화하고 보행과 독립적인 상체의 질량을 이용하여 무게중심을 이동시켰으며[1][2][4] 1994년부터 한국과학기술연구원(KIST)에서 인체의 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇 센토(Centaur)를 제작하여 보행 및 그 알고리즘에 대한 연구를 수행하고 있다[5]. 1998년 발표된 일본 혼다 사의 2족 보행 로봇은 동역학적 모델에 의한 ZMP (Zero Moment Point)를 이용한 자세제어에 의한 실 보행을 자연스럽게 보여 주었다[6].

본 논문에서는 KIST의 센토를 대상으로 온라인(on-line) 틸팅을 사용한 궤적형성에 따른 정적 보행 알고리즘에 대해 연구하였다[7]. 기존의 2족 보행로봇의 연구와는 달리 현재 센토는 상체가 없다. 각 다리의 움직임에 의해 보행 궤적과 무게중심의 위치가 동시에 결정되며 보행 단계에서 무게중심을 천이시키기 위해 다리 관절각을 조정하여 자세를 바꾸게 되는데 이를 틸팅(tilting)이라 정의하였다. 따라

서 본 연구에서는 지지다각형에 대한 안정여유(stability margin)를 설정하여 안정도(stability)를 판정하고 무게중심의 새로운 좌표를 계획하여 틸팅을 수행하였다. 또한 경사면 보행의 경우 기존의 가상 경사면 판별과 보행에[8] 부가적으로 틸팅을 부여함으로써 보행시 발생하는 회전을 보상할 수 있었고 로봇의 작업영역을 확보 할 수 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평지 보행에 대해 기존의 물결걸음새, 오프라인 틸팅과 제안된 온라인 틸팅을 비교하고 경사면 보행에 적용하였다.

II. 보행 로봇의 구조 및 좌표계 설정

그림 1은 센토의 구조를 보여주며 {W}는 기준 좌표계를, {B}는 로봇 몸통에 고정된 좌표계를 나타낸다. 각 다리의 경로 계획은 기준 좌표계에 대해서 정의되었고 전체적인 로봇의 구조는 몸통 좌표계에 대해 정의되었다. 벡터 R 과 T_i 는 각각 기준 좌표계에 대한 로봇 몸통 좌표계의 원점과 i 번째 다리의 발끝을 표시한다. 몸통 좌표계에 대해 I 번째 다리의 발끝의 위치는 P_i 로 몸통의 각 모서리 위치는 a_i 로 나타냈다. 이동하는 다리의 궤적은 {W}에서 T_i 를 정의하고 이를 {B}좌표계에서 다시 정의한다.

로봇의 다리는 진행 방향에 대해서 수직인 좌우 방향, 즉 ${}^B Y$ 방향으로 움직일 수 있게 설계 되었고 BX 방향의 회

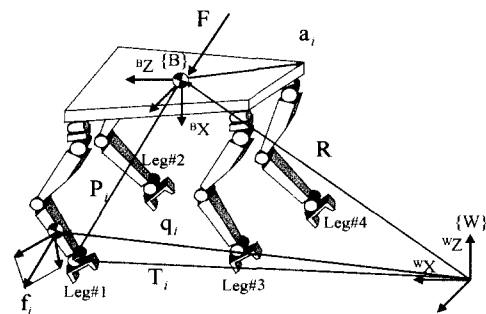


그림 1. 로봇 구조 및 좌표 시스템.
Fig. 1. Structure and coordinate system of the robot.

접수일자 : 2000. 12. 11., 수정완료 : 2001. 4. 27.
이순걸: 경희대학교 기계공학과(sglee@khu.ac.kr)
조창현: 한국과학기술연구원(chcho@kist.re.kr)
김병수: 경희대 기계과 대학원(bskim@ac-server.kyunghee.ac.kr)
※ 본 연구는 96년도 경희대학교 신입교수 지원과제비에 의해 수행되었습니다

진은 할 수 없다. 로봇의 전체 중량은 약 56kg이며 다리를 곧게 편 상태일 때 지면에서 몸통까지의 길이는 약 0.9m이다. 본 논문에서 각 관절에서의 마찰은 무시되었고 로봇 전체의 움직임은 정적인 걸음새에 대하여 알고리즘을 수행하였기 때문에 준정적(quasi-static)이라는 가정을 하였다. 미끄러짐이 발생하지 않는다는 가정에 의해 지면 마찰력 향을 고려하지 않았다.

III. 틸팅 알고리즘

먼저 기하학적인 몸체중심(body center)의 이동 방향에 대한 무게중심의 이동 기준을 설정하여 틸팅 알고리즘을 결정한 다음 주어진 4족 로봇의 준정적 해석에 의해 지지다각형(supporting area)의 수평 사영에 대한 안정도를 정량적으로 정의하여 틸팅 또는 발끝 궤적을 설정하는 알고리즘을 구현하였다[1][3][6].

순간마다 로봇의 이동에 의한 무게중심의 변화를 계산하고 무게중심이 안정된 영역에 위치할 수 있도록 링크의 상대적인 위치를 변경하여 자세를 보정하는 틸팅은 대상이 되는 로봇의 구조에 의거, 먼저 틸팅 방향을 결정하고 다음에 안정도에 의한 무게중심의 이동 기준을 설정한다.

1. 틸팅 방향 설정 및 오프라인 틸팅

진행 방향인 ^BZ 방향 틸팅은 경우에 따라 로봇의 이동 방향에 대해 반대로 주어지는 경우로 나타나며 이는 안정성을 위해 이동성에 대한 제한을 가져다준다. 동일 높이에 서의 몸체의 수평이동은 다리의 작업영역을 벗어날 수 있는 가능성이 크므로 인체처럼 작업영역을 확보하기 위하여 ^BX방향의 움직임을 추가, 회전을 제외한 세 가지의 병진 운동에 대해 틸팅 알고리즘을 결정하였다.

먼저 무게중심의 위치를 정현함수 형태로 이동시키는 오프라인 틸팅에 대해 살펴보면, 계획된 틸팅의 최대값이 7cm일 때 모의실험 결과 무게중심의 ^BY방향 최대 좌표치는 5.85cm로 얻어졌다. 주어진 틸팅과 그에 따른 무게중심의 이동의 비는 약 0.84로 주어지며 이는 전술한 대로 80%에 가까운 이동효율과 유사하다. 정현 함수로 주어진 오프라인 틸팅은 평지 보행에 대하여는 실제 로봇 보행에 있어서 유효하게 적용되었고 로봇의 보행 형태상 무게중심이 ^BZ방향으로 이격되어 있는 것을 보정하기 위해 고정된 ^BY방향 회전을 부가, 사용하였다. 실제 센토의 평지보행에 대한 오프라인 틸팅의 결과는 보행 안정성을 높여 주었다. 그러나 이와 같은 오프라인 보행 실험은 로봇의 초기위치, 지면의 작은 변화 등에 의해 앞다리의 착지시 매우 불안정한 동작을 보여주었다[6].

그림 2는 정현함수로 주어진 오프라인 틸팅의 모의 실험 중 앞다리와 뒷다리 이동시 모습을 수평면에 대한 사영으로 나타낸 것이다. 화살표는 진행방향을 나타내며 빗금으로 표시된 부분은 지지다각형, 굵은 실선의 사각형은 몸체, 그리고 사분된 원은 무게중심을 표시한다. 이 그림은 오프라인 틸팅의 전형적인 보행 상태로서 뒷다리의 이동시 과도한 틸팅과 앞다리의 착지시 무게중심이 지지다각형을 벗어남을 보여준다.

정적인 보행에서는 무게중심이 지지다각형을 벗어나면

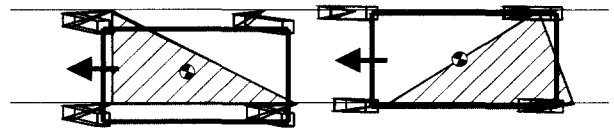


그림 2. (a) 뒷다리 이동시 과도한 틸팅. (b) 앞다리 이동시 불안정한 상태. Fig. 2. (a) Excessive tilting when a rear leg is swing. (b) Unstable state when a front leg is swing.

불안정 상태가 되므로 보행 안정도는 무게중심과 지지다각형 경계와의 최단거리로 나타낼 수 있다. 모의실험의 결과에 의하면 1, 2번 다리 이동시 동일한 걸음새에 대해 틸팅이 없을 경우에는 무게중심이 최대 1cm정도 지지다각형으로부터 벗어나는데 반해 오프라인 틸팅이 주어지면 그 벗어남이 0.5cm정도로 줄어들어 상대적으로 안정성이 높아졌다. 이와 같은 사실로부터 센토의 경우 틸팅이 없는 순수 물결걸음새로는 보행이 부적합하며 오프라인 틸팅의 경우도 평탄한 지형의 이동시에는 보행이 가능하나 비평탄 지형의 경우에는 로봇의 안정성이 큰 문제가 될 수 있다. 또한 뒷다리인 3, 4번 다리가 이동할 때에는 정현 함수에 의한 과도한 틸팅이 문제가 되며 이러한 경우에는 불필요한 동작으로 인한 효율성이 제기 된다.

오프라인 틸팅에서 4번 다리의 이동이 완료될 시점에서는 진행방향과 반대로 주어지는 틸팅으로 인해 이동성이 저하된다. 여기서 이동성은 한 보행주기 동안 무게중심의 진행방향의 이동거리와 전체 이동거리의 비로 나타났다. 즉 그 비가 1이면 가장 이동효율이 높은 상태를 의미하며 무게중심이 진행방향으로만 이동한 상태이고 0이면 이동성이 없는 경우로 진행방향에 대해 좌우로 움직였을 뿐 실제 이동이 없는 것을 의미한다. 모의 실험 결과 동일한 걸음새에 대해 오프라인 틸팅이 주어진 경우 이동성이 약 12:28(cm)로 주어지고 틸팅이 없을 경우의 12:15(cm)보다 반 정도의 이동성이 떨어짐을 알 수 있다.

이처럼 센토와 같은 구조의 로봇에 있어서 안정도와 이동성은 서로 상반된 개념으로서 틸팅을 하지 않을 경우가 최대 이동성을 보장하나 로봇의 이동이 정상적으로 이루어지지 않게 되므로 이상적인 움직임으로 간주된다.

2. 온라인 틸팅

그림 3은 지지다각형 S 내에 안정영역RS를 정해서 새로운 무게중심의 좌표를 구하는 방법을 설명한다. M_C 와 nM_C 는 각각 틸팅이 적용되기 전과 틸팅이 적용된 후 안정된 무게중심의 좌표 벡터이며 U_k 와 n_k 는 각각 지지다각형 S의 경계를 따라 움직이는 점k의 좌표와 이때의 단위 법선 벡터이다.

4점지지 상태에서 로봇 몸체중심을 각 방향으로 이동이나 회전을 주고 무게중심의 변화를 정량적인 비교 결과 ^BZ와 ^BY 방향의 틸팅이 가장 효과적이고 이 두 방향으로 주어지는 틸팅량의 80%정도가 무게중심 이동의 효과로 주어진다[7]. 안정된 무게중심 위치로 보내는 전후방향 틸팅 $\angle R_x$ 와 횡방향 틸팅 $\angle R_y$ 는 무게중심 이동효과를 고려한 각 방향 가중치 c_x 및 c_y 를 곱하여 계산된다.

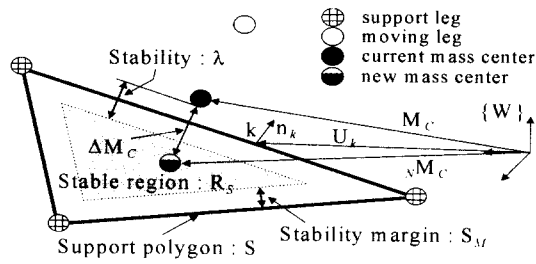


그림 3. 틸팅시 무게중심의 안정여유 및 이동량.
Fig. 3. Stability margin and displacement of mass center by tilting.

$$\Delta R_x = c_x \Delta M_{cx} \quad (1)$$

주어지는 틸팅 ΔR_x 와 ΔR_y 에 대해 그림 1의 로봇 무게 중심 위치벡터 \mathbf{R} 은 다음 식으로 주어진다.

$${}_N \mathbf{R} = {}_O \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R} \\ \Delta \mathbf{R} [\Delta R_x, \Delta R_y, -h_d \cdot (1 - \cos \theta_y \cdot \cos \gamma)]^T \quad (2)$$

where $\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{D \text{Ieta} R_x^2 + \Delta R_y^2}}{h_d \cdot \cos(\theta_y)} \right)$

여기서 하첨자 N 은 틸팅이 적용되고 나서의 새로운 상태를, O 는 적용 이전의 상태를 의미한다. h_d 는 물체의 기준 높이이며 γ 는 틸팅에 의해 계산되는 보정 각도이다. θ_y 는 물체의 ${}^W Y$ 방향 회전각이다. 좌표값 \mathbf{P}_i 는 주어진 틸팅 벡터 $\Delta \mathbf{R}$ 와 이동하는 발끝의 궤적으로 주어지는 벡터 \mathbf{T}_i 로 결정한다.

안정여유 S_M 은 무게 중심 위치를 결정하기 위한 가상의 안정영역 R_s 를 설정하기 위한 변수이며 안정영역과 지지다 각형 S 간의 거리로 주어진다. 안정도 λ 는 실 로봇의 무게 중심과 안정영역 경계와의 최소거리로 정의되며 식 3과 같다.

$$\lambda = \min [(U_K - \mathbf{M}_C \cdot \mathbf{n}_K - S_M)] \quad (3)$$

안정된 보행 수행을 위해 안정도를 판별하고, $\lambda < 0$ 이면 안정영역 내로 최대한 빠르게 이동하기 위해 식4와 같이 이동할 무게중심 ${}_N \mathbf{M}_C$ 의 좌표를 계산한다.

$${}_N \mathbf{M}_C = \mathbf{M}_C - \lambda \mathbf{n}_m \quad (4)$$

여기서 \mathbf{n}_m 은 식3이 최소화 될 때의 \mathbf{n}_k 이다.

$\lambda > 0$ 일 때, 즉 무게중심의 좌표가 안정영역 내에 위치할 때는 틸팅 상태를 유지한 보행 궤적을 수행하게 된다. 이처럼 고정된 안정영역 내에 무게중심 좌표를 유지시키는 것을 면적법(area method)이라 정의한다. 면적법과는 달리 보행상태나 외부상황에 따라 안정여유를 변경하여 안정영역 경계에 무게중심을 위치시키면 보다 효율적인 틸팅을 할 수 있다. 이같은 방법을 추종법(tracking method)이라 정의하였다. 추종법의 틸팅 조건은 설정오차 ϵ 에 대해 다음 식으로 주어진다.

표 1. 한 보행 주기 동안의 무게중심 이동 거리.
Table 1. Moving length of the mass center for one stride.

| Stability margin(cm) | Area method(cm) | Tracking method(cm) |
|----------------------|-----------------|---------------------|
| 2 | 21.4 | 20.5 |
| 3 | 27.1 | 26.2 |
| 4 | 32.7 | 31.9 |
| 5 | 38.4 | 37.5 |

$$| \Delta \mathbf{M}_C | = | {}_N \mathbf{M}_C - \mathbf{M}_C | < \epsilon \quad (5)$$

다시 말하면, 현재 이동할 무게중심 간의 거리가 설정오차 이상이 되면 틸팅을 수행한다. 추종법은 면적법에 식 5에 의한 추종조건이 추가된다. 즉, 식3에서 안정도 λ 를 구하고 식4에 의해 이동할 무게중심의 좌표를 찾아 식5의 조건에 의해 틸팅을 수행한다.

표 1은 12cm의 동일보폭에 대해 이 두 방법에 따른 무게중심의 전체 이동거리를 모의실험에 의해 계산한 것이다. 추종법에 의한 무게중심 이동거리가 면적법에 의한 경우보다 줄어든 것을 볼 수 있으며 이는 넓은 안정영역보다 안정여유의 경계를 따라 무게중심 좌표를 이동하는 경우가 안정여유의 가용범위를 줄이고 이동성을 높임을 의미한다.

온라인 틸팅에 있어서 로봇의 이동성은 안정여유가 증가함에 따라 저하되었다. 표 1에 의하면 이동성은 안정여유가 2cm일 때는 약 12 : 21(cm)이었고 안정여유가 5cm로 증가하면 이동성은 약 12 : 38(cm)로 감소했다. 전술한 바 처럼 오프라인 틸팅의 경우 이동성이 12 : 28(cm)이었고 이는 무게중심이 일정한 높이로 이동한다는 점과 불안정한 구간이 있었다는 점을 고려하면 상대적으로 온라인 틸팅에 비해 이동성이 낮음을 알 수 있다. 오프라인 틸팅과는 대조적으로 온라인 틸팅은 일반 보행시 상대적으로 가장 불안정한 경우인 1, 2번 다리 이동시 진행 방향에 반대로 무게중심이 이동하는 경우가 나타났다.

그림 4(a)는 안정여유를 2cm로 하고 물결걸음새의 보행 궤적에 대해 면적법에 의한 온라인 틸팅시 무게중심의 이동 궤적의 결과를 보여준다. 안정도를 변경하여도 무게중심의 이동 형태는 유사하게 나타난다. 그림에서 보듯 순수한 Y방향 움직임을 보여주는 시점이 2회 발생하는데 이는 앞다리의 이동 종료 시점과 일치한다. 이같은 동작은 진행방향에 수직으로 작용하며 이동성을 저하시킴을 알 수 있다.

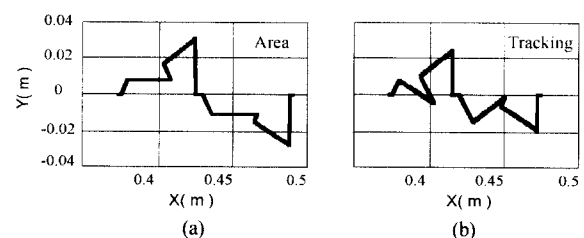


그림 4. 최소안정도가 2cm일 때 무게중심의 이동.
Fig. 4. Movement of mass center when minimum stability is 2cm.

순수한 X방향 움직임은 뒷다리가 이동할 때 나타나며 무게중심이 안정영역 내에 위치하여 틸팅 상태를 유지하는 구간이다. 또한 그림 4(b)는 동일한 상태에서 추종법에 의한 온라인 틸팅시 무게중심의 이동을 나타낸 것이다. 두 결과를 비교해보면 최대 Y의 변위가 면적법에 의한 것이 약 3cm임에 반해 추종법에 의한 것이 약 2.5cm정도로 줄어들고 면적법에서 나타난 순수한 X방향 움직임도 사라졌다.

IV. 틸팅에 의한 경사면 보행

경사면 보행을 위한 지형 정보는 시뮬레이션에서는 미리 주어지며 사용된 지형은 노면을 따라 0~1m의 평지, 1~2m의 경사도 10°인 오르막 경사, 2~3m의 경사도 -10°인 내리막 경사 그리고 3~4m의 평지로 주어졌다. 로봇의 발끝 궤적은 일정한 보폭을 유지하도록 설계되었기 때문에 다음 착지점의 좌표를 구할 수 있다.

그림 5는 가상경사면과 가상경사각을 나타낸다. 가상경사는 로봇의 지지점이 이루는 가상평면이고 가상경사각은 이들이 이루는 각이다. 가상경사각은 각 다리의 이동 종료시 판정되고 식6에 의해 계산된다[7][8]. 여기서 T는 발끝의 좌표 벡터를 나타낸다. T의 첨자 중 숫자는 각 다리 번호이고 z, x는 각각 T벡터의 ^WZ와 ^WX성분을 의미한다.

$$\theta_y \tan^{-1} \left[\frac{(T_{1z} + T_{2z}) - (T_{3z} + T_{4z})}{(T_{1x} + T_{2x}) - (T_{3x} + T_{4x})} \right] \quad (6)$$

몸체는 가상 경사면에 대하여 수평으로 움직여 경사면에 적용하며, 이러한 움직임은 그림 5의 {B}와 {B'}의 관계로 나타난다. 그림에서 점선으로 된 부분은 {B'}이고 실선은 {B} 좌표계를 의미한다. 이동에 의한 좌표계 {B}는 {B'}을 가상경사각의 변화 Δθ_y만큼 회전시키고 진행방향의 이동량L만큼 이동시킨 좌표계이다. 병진 및 회전 양을 결정하면 경사면 보행시 몸체의 위치와 방향을 결정할 수 있고 이로부터 발끝의 궤적P_i를 결정한다.

보행시 미끄럼이 없다고 가정하면 공간상에서 지지 다리의 발끝점, 즉 지지점들은 고정된다. 다시 말하면 i번째 지지 다리의 발끝 벡터T_i가 고정인 된다는 것을 의미하며 무게중심의 공간상 좌표R은 발끝 좌표T_i와 몸통에 대한 발끝 좌표P_i에 의해서 결정된다. 반면 j번째 다리가 이동하는 다리이면 그 발끝 좌표T_j는 R과 P_j로 나타낼 수 있다. 이

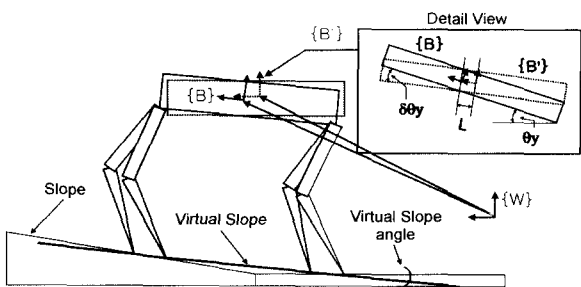


그림 5. 가상경사각과 가상경사면. Fig. 5. Virtual slope and its angle.

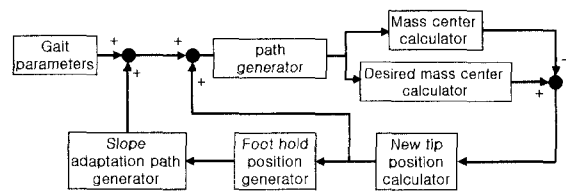


그림 6. 경사면 보행 및 틸팅 알고리즘 흐름도. Fig. 6. Diagram of tilting and slope adaptation algorithm.

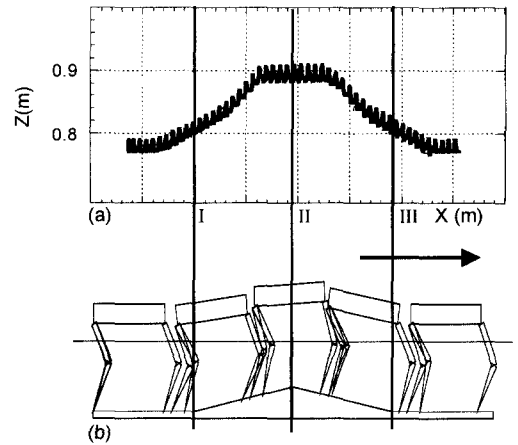


그림 7. (a) {B}좌표계 원점의 이동. (b) 경사면에서의 로봇의 움직임. Fig. 7. (a) Movement of origin of {B}. (b) Robot posture at slope.

동중인 다리는 몸통좌표계에서 정의된 P_i에 의해 제어되므로 식7과 같은 관계식으로부터 좌표치를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^W P_i &= {}^W T_i - {}^W_N R \\ {}^B P_i &= {}^B_W D {}^W P_i \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ^B_WD는 회전 변환 행렬이다.

식7로 주어진 경사면의 적용은 각 다리의 이동 종료시마다 기존 보행궤적 좌표치에 단순 부가되어 실행된다. 다리의 이동중 보행궤적의 수정은 몸체의 궤적을 샘플링 때마다 보정해야 하므로 실 보행 실험에서는 실시간 제어가 어렵게 된다. 주어진 경사면 보행과 틸팅의 블록 다이어그램을 그림 6에서 나타냈다.

그림 7은 센토의 경사면 보행 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림의 화살표는 로봇의 진행 방향이며 I, II, III은 지면 경사각의 변화 위치이다. 그림 7(a)는 틸팅이 주어질 때 초기의 무게중심의 연속적인 보정과 그 보정의 경계치를 표시했다. 그림 7(b)는 경사면 보행시 로봇의 움직임을 순차적으로 나타낸 것이다.

표 2는 제안된 알고리즘을 적용하였을 때 경사면 보행시 설정된 안정여유에 대해 얻어진 최대, 최소 안정도를 보여준다. 경사면의 경우도 평지 보행과 동일한 수준의 안정도가 확보됨을 알 수 있다.

표 2. 경사면 보행시 안정여유.

Table 2. Stability when slope walking.

| Stability margin(cm) | 2 | 5 |
|----------------------|------|------|
| λ_{max} (cm) | 19.8 | 49.8 |
| λ_{min} (cm) | 2.0 | 5.1 |

V. 결론 및 토론

본 논문에서는 4족 보행로봇의 보행 안정성을 높이기 위해 기존의 물결걸음새를 기반으로 한 틸팅을 계획하였다. 센토의 구조에 적합한 틸팅 방향을 선정하였고 틸팅의 기준을 두 가지 방법으로 연구하였다. 첫째는 지지각각형 내에 안정여유를 두어 무게중심이 그 내부에 있도록 하는 것이고 두 번째는 안정여유를 추종하는 방법이다. 모의실험 결과는 틸팅이 없는 경우나, 오프라인 틸팅의 경우보다 이 두 방법에 의해 보행의 안정성이 향상됨을 보여주었다. 두 번째 방법인 추종법은 첫 번째 방법인 면적법보다 안정여유의 가용범위를 줄이고 이동성을 높이는 것을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 추종법과 경사면 적응 알고리즘을 이용해 경사면 보행을 모의 실험하여 제안된 틸팅의 안정성을 검증하였다. 경사면 보행시 제안된 알고리즘을 적용하였을 때 최대, 최소 안정도는 설정된 안정여유이내로 얻어지며 따라서 평지 보행과 동일한 수준의 안정도가 확보됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. Takanishi 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.
- [2] A. Takanishi, "Biped walking robot compensating moment by trunk motion," *J. of Robotics and Mechatronics*, vol. 5, no. 6, pp. 505-510, 1993.
- [3] Y. Sakakibara, K. Kan, Y. Hosoda, M. Hattori, and M. Fujie, "Foot trajectory for a quadruped walking machine," *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robot and Systems, IROS90*, pp. 315-322, 1990.
- [4] Michael Whittle, *Gait Analysis : An Introduction* (2nd ed.), Butterworth-Heinemann, 1997.
- [5] 이종원 외, *휴먼로봇 시스템 개발 연차 보고서 -1~3차년도*, 한국과학기술연구원 KIST-2000연구사업단, 1995, 1996, 1997.
- [6] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of honda humanoid robot," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, R&A 98*, pp. 1321-1326, 1998.
- [7] 이순걸, 조창현, 4족 보행로봇의 경사면 보행을 위한 posture control 알고리즘 개발, 경희대 신입교수 과제보고서, 1997.
- [8] 이순걸, "접촉 반력을 이용한 4족 보행로봇의 경사면 감지 및 보행 알고리즘," *한국정밀공학회지*, 16(4), pp. 138-147, 1999.

이 순 걸

1983년 서울대 기계공학과(공학사). 1985년 KAIST 생산공학과(공학석사). 1993년 미시간대 기계공학과(공학박사). 1994년~1996년 KIST 휴먼로봇센터 선임연구원. 1996년~현재 경희대학교 기계산업시스템공학부 교수. 관심분야는 로보틱스 및 제어,

생체역학, 인터넷 이용한 원격제어, 메카트로닉스.

김 병 수

1991년 서울산업대학교 기계공학과(공학사). 1993년 경희대학교 기계공학과(공학석사). 현재 경희대 기계공학과 박사과정. 관심분야는 로보틱스 및 제어.

조 창 현

1970년 12월 5일생. 1997년 경희대 기계공학과(공학사). 1999년 경희대 기계공학과(공학석사). 현재 KIST 학연 박사과정(고려대 기계공학과). 관심분야는 로보틱스 및 제어, 메카트로닉스.