

접촉 반력을 이용한 4 족 보행로봇의 경사면 감지 및 보행 알고리즘

이순걸*

Slope Detecting and Walking Algorithm of a Quadruped Robot Using Contact Forces

Soon-Geul Lee*

ABSTRACT

For autonomous navigation, a legged robot should be able to walk over irregular terrain and adapt itself to variation of supporting surface. Walking through slope is one of the typical tasks for such case. Robot needs not only to change foot trajectory but also to adjust its configuration to the slope angle for maintaining stability against gravity. This paper suggests such adaptation algorithm for stable walking which uses feedback of reaction forces at feet. Adjusting algorithm of foot trajectory was studied with the estimated angle of slope without visual feedback. A concept of virtual slope angle was introduced to adjust body configuration against slope change of the supporting terrain. Regeneration of foot trajectory also used this concept for maintaining its stable walking against unexpected landing point.

Key Words : Slope walking(경사면 보행), Walking robot(보행 로봇), Virtual slope angle(가상경사각), Trajectory control(궤적 제어), Autonomous navigation(자율 순항)

1. 서론

보행 로봇(walking robot)은 연구실이나 공장 등의 안정된 환경에서 작업하는 산업용 로봇(industrial robot)과는 달리, 미지의 다양한 환경 속을 이동하나 기존의 연구에 있어서 보행 로봇의 제어는 외부 환경의 정보를 미리 예상하고 이에 대해 로봇의 동작을 계획하고 수행하는 방식이 대부분이었다⁽¹⁾. 즉, 로봇이 보행을 수행하기 이전에 외부 환경에 대한 정보를 바탕으로 기 프로그램된 걸음새로 오프라인(off-line)으로 계획하여 보행 로봇의 걸음새를 수행하는 방식이다^(2,3). 그러나, 실제 인간이나 동물의 경우 보행 궤적은 그때의 상

황에 따라 계획하고 수정하여 스스로 적응 이동하는 자율적인(autonomous) 보행 방식을 사용한다^(4,5).

일반적으로 경사면 보행에 대한 연구는 상대적으로 보행의 안정성이 보장되는 거미와 같은 다리 구조나 텔리포트와 같은 형태에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔고⁽⁶⁻⁸⁾, 센서를 이용한 국지적으로 불규칙한 지형에 대한 보행 로봇의 적응 걸음새에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다^(9,10). 1984년 Klein 과 Briggs 는 자세 센서와 힘 센서를 이용하여 비평탄 지형을 보행하는 방법을 연구하였고^(11,12), 같은 해에 Hirose 는 접촉 센서, 자세 센서를 이용하여 상위의 제어부의 관여 없이 몸체의 높이, 몸체의 자세, 각 다리의 착지 실행 등을 제어하는

* 경희대학교 기계공학과

반사 동작 조절부(Reflex-Motion Regulation System)을 구상하였다⁽¹³⁾. 1994년 B. Min, Z. Bein 그리고 S. Hwang에 의해 거미 타입의 로봇 구조에 대해 센서의 정보를 이용한 게 걸음새에 대한 연구 등이 수행되었다⁽⁹⁾. 그러나 휴먼 타입의 다리 구조에 대한 연구는 비교적 미진한 상태이며, 연속적인 경사면 보행과 그 천이상태를 판별하고 안정된 균형을 위한 보행제어 알고리즘에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 한국과학기술연구원(KIST)을 중심으로 활발히 진행되고 있는 연구의 일환으로서 KIST에서 제작된 센토(CENTAUR)로 명명된 인체 또는 동물과 유사한 다리 구조를 지닌 4각 보행로봇의 경사면 보행제어 알고리즘에 대한 연구 내용을 기술하고자 한다. 경사면 보행은 기존의 보행과는 달리 몸통이 수평으로 놓이지 않고 경사면 각도에 따라 변화하여야 하므로 평지 보행과는 달리 무게중심이 등속직선 운동 조건을 하지 않는 대표적인 경우가 되고 경사각도에 따른 중력의 영향도 바뀌게 되어 평지에서와 같은 보행제어 알고리즘의 적용은 적합하지 않다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 경사면에 대한 판정을 비전과 같은 별도의 센서에 의하지 않고 단지 접촉 반력에 의거하여 수행하며 그에 따라 보행 궤적을 수정하며 몸체의 상대적인 경사도(가상경사각)를 유지하는 경사면 보행 알고리즘에 대해 연구하였다. 즉, 이동 중인 다리가 경사면에 도달할 동안 주어진 궤적에 따라 궤적 위치 제어를 행하고 경사면 접지시 반력과 함께 감지된 지면의 경사도에 따라 몸체의 각도를 변경하여 적합한 안정도와 동작영역(working volume)을 유지할 수 있도록 보행궤적을 수정하는 방법을 사용하였다.

2. 경사면 판별과 보행 알고리즘

2.1 센토의 구조와 제어 시스템

Fig. 1(a)에 나타난 바처럼 센토의 모든 관절, 즉 엉덩이와 무릎 관절은 인체 구조와 유사한 구조로 구성되어 있다. 각 관절에는 인코더와 포텐시옴터가 부착되어 있다. 이 센서들은 상위 링크에 고정되어 있으며 하위 링크의 회전축과 연동되어 각 관절각을 계환한다. 발은 전후로 두 개의 발가락을 가진 링크구조로 되어 있다. 이 또한 발목에 고정되어 각 발가락의 회전과 연동하는 포텐

시옴터를 통해 앞 뒤 발가락의 회전각도를 별도로 계환함으로써 지면의 경사각을 측정할 수 있다⁽¹⁸⁾. Fig. 1(b)는 엉덩이에 roll 및 yaw가, 그리고 무릎은 몸체의 전후로 회전할 수 있는 관절이 있음을 보여준다. 또한 보행로봇, 센서 및 제어 시스템 간의 연결 관계와 전체적인 제어의 흐름을 보여준다. 발의 착지 및 지면과의 접촉 여부는 발목에 부착된 로드셀(load cell)에 의해 계환된다.

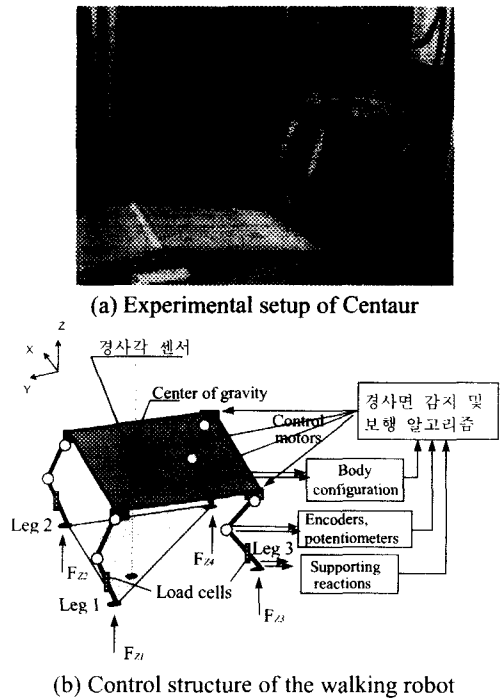


Fig. 1 Centaur and its setting for slope walking

Fig. 3에서 θ 로 표현된 발가락의 회전각도는 바닥면이 비교적 평탄한 경우 바닥면의 경사각과 동일하여 발가락에 부착된 포텐시옴터에 의해 직접 측정이 가능하나 본 논문에서는 앞, 뒤 발가락의 각도를 비교하고 각 관절각에 의해 계산된 발 높이를 역으로 계산하여 측정시 잡음이나 바닥면의 요철에 의한 오차량을 최소화하였다. 이와 같이 측정된 지면의 경사각 및 발에서의 반력 상태에 의해 몸체의 기울기 및 보행궤적을 결정하는 알고리즘의 설정이 제어기에서 이루어진다.

제어기는 68030을 중앙처리 장치로 한 VME 시스템이 주제어 장치로 사용되었고 각 다리는

DSP 320C30 를 CPU 로 KIST 에서 자체 제작한 전용 DSP 보드를 사용하여 궤적 제어를 수행할 수 있도록 구성되었다. VME 시스템의 운영체제로는 VxWorks 의 실시간 운영체제를 사용하였고 VME 시스템과 DSP 보드는 dual port 메모리를 사용하여 임의의 순간에도 프로세서간의 상태 변수나 명령의 전달이 이루어 질 수 있도록 하였다. DSP 보드 1 장이 3 쌍의 모터로 이루어진 1 개의 다리를 제어하며 Fig. 2 에 그 구성을 표시하였다.

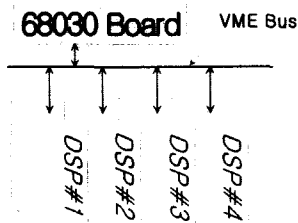


Fig. 2 Control system for Centaur

2.2 가상경사각 및 보행 알고리즘

평지보행 궤적에 대해 지면 경사각의 존재는 Fig. 3 에서처럼 보행 궤적에 제한을 가져올 뿐만 아니라 보행 궤적의 수정이나 몸체 높이의 수정이 없으면 적절한 보폭을 유지할 수 없게 된다. 또한 실제 센토의 보행에서는 Pan 과 Chen 의 연구(6)와 같이 몸통을 수평으로 유지할 경우 그 동작영역이 극히 제한되어 정상적인 보행이 불가능하고 위치에 따른 앞·뒷다리간의 보폭 차이로 인하여 균형을 잃게 된다(7). 따라서 본 보행 알고리즘의 기본 개념은 보행 로봇의 몸체를 경사면에 대해 적절한 각도로 유지하여 적절한 보행 궤적의 확보와 함께 원하는 보폭을 확보하며 몸체의 무게중심이 지지면의 중심에 위치시켜 보행의 안정성을 꾀한다는 점이다. 생체의 경우 기본적인 보행제어는 기 설정되어 있는 걸음새에 의하여 보행궤적이 결정되고 돌발 상황이나 보행 노면의 변화에 대하여는 기본적으로 proprioception 이라는 센서 퓨전 시스템을 통한 반사작용에 의해 대처하며(14), 복잡한 상황변화가 발생하거나 보행체가 의식적으로 보행 자세나 걸음새를 바꿀 경우에만 CNS(Central Nervous System)를 통한 판단 등을 수행하는 제어가 이루어진다(15,16). 본 연구에서는 이와 같은 생체 제어 메커니즘을 경사면 보행의 걸음새 알고리즘에 적용하였다.

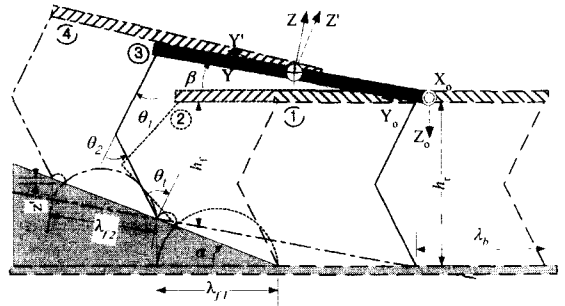


Fig. 3 Configuration change during continuous slope walking

Fig. 3 은 두 보행 주기동안을 나타낸 것으로 평지에서 출발하여(1) 경사면 감지와 판별을 수행하고(2) 경사면에 적응하고(3) 다음 보행주기를 수행하는(4) 걸음새 알고리즘을 보여주는 단계적인 동작을 보여준다. 단계 2에서는 몸체를 직전의 보행 경사각으로 유지하며 보행을 수행한다. 발끝이 지면과 접촉하는 순간 경사면 판별이 이루어지고 식 (1)과 같이 보행면의 경사각을 계산하게 된다.

$$\alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta, \tag{1}$$

여기서, α 는 보행면의 경사각이고 θ_1 은 엉덩이 관절의 수직축에 대한 각도로서 궤환된 엉덩이 관절 각에서 몸체의 수평면으로부터의 각을 뺀 각도이다. θ_2, θ 는 각 무릎 관절 및 발가락의 회전각이다.

몸체가 수평면과 이루는 경사각은 가상경사각(β)으로 정의되며 경사면 보행시 중요한 요소로 작용한다. 경사면 변화 감지 직전까지 몸체는 기존의 경사각을 유지하고 있으므로 무게중심이 이동하는 면은 몸체와 평행한 가상의 평면이 되고 이를 가상 경사면이라 정의한다. 즉 가상경사각은 이 가상 경사면이 수평면과 이루는 각도가 된다. 경사면 적응은 기존의 가상경사각과 착지에 의해 감지된 목표 가상경사각과의 차이를 판별하여 몸체의 가상경사각을 수정하는 일련의 동작이다(3).

실제 보행에 있어서 가상경사각의 계산은 두 앞다리(다리 1, 2)의 중심점과 두 뒷다리(다리 3, 4)의 중심점을 기준으로 수행하였다. 로봇 몸체에 대한 다리의 상대적인 위치는 주어진 보행궤적에 의해 결정된다. 다시 말하면 앞 두 다리 발끝 중심에서 전방의 두 엉덩이 관절의 중심까지의 상대

적인 위치좌표값 $[x, l_i, h_i]^T$ 와 뒤 두 다리 발끝으로부터 후미의 두 엉덩이 관절의 중심까지의 상대적인 위치좌표값 $[x, l_i, h_i]^T$ 는 보행계적에 의해 주어진다. y_i 와 z_i 를 각각 i 번째 다리 발끝의 기준 관성좌표계, $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 에 대한 y 및 z 좌표 값으로 정의하면 앞 엉덩이 중심의 절대좌표는 $[x, l_f + (y_1 + y_2) / 2, h_f + (z_1 + z_2) / 2]^T$ 로 주어지며 뒤 엉덩이 중심의 절대좌표는 $[x, l_r + (y_3 + y_4) / 2, h_r + (z_3 + z_4) / 2]^T$ 로 주어진다. 따라서 가상경사각은 각 다리의 위치에 의해 식 (2)과 같이 주어진다.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{2\Delta_h + z_1 + z_2 - z_3 - z_4}{2\Delta_l + y_1 + y_2 - y_3 - y_4} \quad (2)$$

여기서 Δ_h 는 $(h_f - h_r)$ 로 주어지는 상대적인 앞부분 엉덩이관절의 높이와 뒷부분 엉덩이 관절의 높이의 차이이며 Δ_l 은 $(l_f - l_r)$ 로서 진행방향으로 측정된 앞 뒤 엉덩이 관절간의 간격, 즉 로봇 몸체의 길이의 수평면에 대한 정사영이다.

천이 영역은 경사 진입시, 실 경사각의 변화 및 경사로를 빠져 나올 때와 같이 가상경사각이 변하는 지점으로 가상경사각의 변화가 급격히 일어나고 몸체의 안정성 유지가 최대 관건이 되는 곳이다. 천이 영역에서는 안정성 확보를 위하여 무게 중심이 이동하는 보폭 λ 와 발끝 높이 h 를 아래의 식에 의거 조절되어야 한다.

$$h = \lambda (\sin \alpha - \sin \beta) \quad (3)$$

2.3 보폭의 결정

가상 경사에 대해 실 경사면의 경사각이 계속 증가하는 경우는 ‘양의 경사’가 되고 반대로 가상 경사각에 대해 실 경사각이 감소하는 경우는 ‘음의 경사’로 판별한다. 진술한 경사면 보행의 모든 경우가 이 두 경사각간의 관계로 설명될 수 있다. 즉, 가상경사각과 실 경사각의 비교에 의하여 경사면으로의 천이구역과 지속적인 경사면 보행 상태를 판별할 수 있고 또한 경사에서 평지로의 복귀 여부와 지지면이 평지인지 아닌지를 알 수 있다.

경사각 α 인 지면을 따라 움직이는 앞다리의 발끝을 기술하는 좌표계를 $[X', Y', Z']^T$ 로 표시하고 가상경사각 β 인 지지면을 따라 움직이는 뒷다리의 발끝점을 기술하기 위해 몸통에 고정된

좌표계를 $[X, Y, Z]^T$ 라고 하면 이 두 좌표계 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다 (Fig. 3).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\gamma = \alpha - \beta$ 이다. 발끝의 좌표치의 변화에 대해 동일한 관계식이 성립하며,

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (5)$$

경사면 위에 위치한 앞다리의 보폭을 λ_f 라 하면 수평면에 대한 정사영은 $\lambda_f * \cos \alpha$ 가 된다. 또한 안정성 유지를 위해서 매 번의 보행 사이클이 완료된 후에는 몸체의 무게중심은 네다리에 의해 형성된 지지면의 수평 사영의 중앙에 있게 되므로 가상 경사면 위에서 정의된 뒷다리의 보폭의 수평 사영 $\lambda_b * \cos \beta$ 또한 $\lambda_f * \cos \alpha$ 와 같아야 한다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_b \cos \beta \\ \Delta z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_f \cos \alpha \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (6)$$

또는,

$$\lambda_b \cos \beta = \lambda_f \cos \alpha \cos \gamma + \Delta z \sin \gamma \quad (7)$$

$$\Delta z' = -\lambda_f \cos \alpha \sin \gamma + \Delta z \cos \gamma \quad (8)$$

여기서 $\Delta z = z_i + z_{i-1}$ 는 뒷다리의 i 번째 걸음의 발 높이(z_i)와 $(i-1)$ 번째 걸음의 발 높이(z_{i-1})간의 차이이고, $\Delta z' = z'_i + z'_{i-1}$ 는 앞다리의 i 번째의 발 높이(z'_i)와 $(i-1)$ 번째의 발 높이(z'_{i-1})의 차이이다.

따라서 연속된 보행간의 앞다리의 보폭과 뒷다리의 보폭간에는 보행 로봇의 위치에 따라 다음 3 가지 경우를 가진다.

- ① $\Delta z = 0, \Delta z' \neq 0$, 즉 경사면 천이과정으로 앞다리는 경사면에 뒷다리는 수평면에서 움직일 때 ($\beta = 0$)

$$\lambda_b = \lambda_f \cos^2 \alpha \quad (9)$$

로서 앞다리의 보폭이 뒷다리와는 다르며 경

사각에 따라 앞다리 보폭에 제한을 두게 되어 몸체의 중심이 지지점의 중심에 위치하게 한다.

- ② $\Delta z = 0, \Delta z' \neq 0$, 즉 뒷다리가 처음으로 경사면에 진입하여 모든 다리가 경사면 위에 위치할 경우는 식 (8)로부터 Δz 와 $\Delta z'$ 간의 관계식을 구하고

$$\Delta z = \frac{\Delta z'}{\cos \gamma} + \lambda_f \cos \alpha \tan \gamma \quad (10)$$

식 (7)에 대입하면

$$\lambda_b = \lambda_f \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} (1 + \cos \gamma) + \Delta z' \frac{\tan \gamma}{\cos \beta} \quad (11)$$

- ③ $\Delta z = 0, \Delta z' \neq 0$, 이는 로봇이 완전히 경사면에 위치하여 ($\alpha = \beta$) 경사 보행을 진행하고 있는 상태로 앞, 뒷다리의 보폭이 동일함을 보여준다.

$$\lambda_b = \lambda_f \quad (12)$$

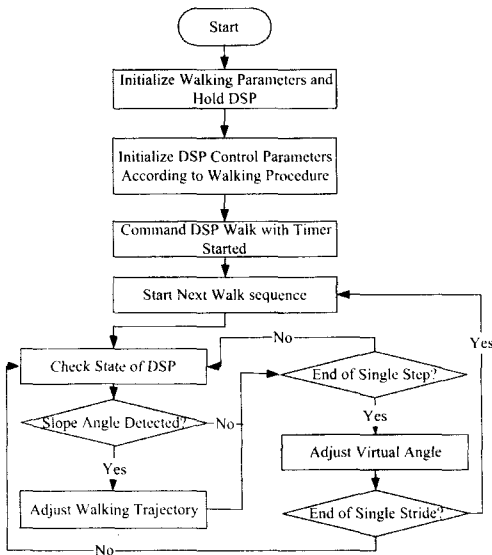


Fig. 4 Proposed slope walking algorithm

보행중 경사각의 변화는 기존의 보행궤적과는 다른 발끝 높이 또는 몸체의 높이를 필요로 한다. 또한 이로 인하여 착지 점의 보폭 또한 변화하게 되어 사전에 계획된 것과는 다른 보행자세를 형성하여 불안정해 진다. 그러므로 전체적인 보행 알고리즘은 평지 보행에 대하여 발의 착지 시에 경

사면을 판별하여 몸체의 가상경사각을 계산하고 그에 따라서 몸체의 경사각을 수정하기 위하여 발끝의 궤적을 다시 생성하는 방법을 사용하였다. Fig. 4 는 이와 같은 보행 알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다. VME 시스템의 보행 프로그램은 DSP 보드에 의해 동기되어 연속적으로 수행되는 걸음새 제어 알고리즘을 수행하고 경사면 감지 및 그 정도를 판별한다. 타이머 인터럽트에 의해 각 DSP 는 VME 시스템의 명령을 읽어 내고 로봇의 실 보행궤적을 제어하는 모션제어를 수행한다.

2.4 양의 경사면 판별 및 수정

전술한 바와 같이 계산된 보폭과 발 높이에 의해 보행 궤적이 형성된다. 이때 몸체의 경사도 보다 실 지지면의 경사가 더 클 경우를 양의 경사라 한다. 양의 경사는 보행 경사면이 오르막인 경우와 내리막에서 평지로 환원 시에 발생하며 시각이 겹쳐져 보행면의 상대적인 경사도를 모를 경우, 몸체의 가상경사각에 의해 계획된 다리의 보행궤적은 완료되지 못하고 경사면에 도달하게 된다. 이때 이동중인 다리의 수직 반력이 주어진 허용치 이상이 감지되면 양의 경사로 판정한다. Fig. 3 은 양의 경사의 경우에 대해 연속적인 걸음새에 대한 가상 경사의 변화와 그에 따른 궤적의 수정을 보여 준다. 보행 궤적 및 보행 속도는 평지에서와 동일하게 주어지며 실제 실험에서 경사 감지는 몸체 요동이나 비틀림과 같은 오차 요인을 줄이기 위해 이동중인 다리가 아래로 내딛는 후반 50% ~ 85% 동안에만 수행된다. 후반 85% ~ 100% 동안 감지되는 반력은 지면의 작은 요철에 의한 수도 있고 또는 실제 경사면의 변화에 기인할 수도 있으나 보행에 미치는 영향은 매우 미미하다. 또한 이에 대한 걸음새의 보정은 다음 걸음 동작에서 행해지게 되거나 몸체의 기울임(tilting) 알고리즘에 의해 충분히 확보되므로 무리 없는 보행을 수행하게 된다⁽¹⁷⁾.

추가적인 궤적의 수정이 없을 경우 경사면에 착지하여 이동이 완료되는 시점을 전체 이동기간 (swing phase)에 대해 A (%)라 하면 이동기간의 진행이 추가되어 식 (7, 8)에서 주어진 앞다리의 수정된 보폭의 값은 $\lambda_f * (100-A) / 100$ 이 된다. 기본적으로 발끝궤적은 베지어 곡선을 사용하였고 양의 경사에 대해 A 시점에서 발끝점 높이의 수정치 $\Delta z'$ 는 아래 식으로 주어진다.

$$\Delta z' = \lambda_f (100 - A)/100 * \tan \alpha * \cos \beta \quad (13)$$

따라서 구해진 발끝 점의 높이와 잔여 보폭에 대해 수정된 베지어 곡선이 남은 이동기간 (100-A) (%)의 보행궤적이 된다 (Fig. 3). 이러한 수정을 '양의 작용' (positive action)이라 정의한다.

2.5 음의 경사면 판별 및 수정

보행중 음의 경사를 만난 경우에 평지보행 알고리즘을 수정 없이 적용하면 Fig. 5 에서와 같이 보행궤적이 완료된 시점에서 이동하는 다리가 허공 중에 머무르게 되어 무게 중심의 진행 방향으로 지지가 이루어지지 않게 되므로 보행의 안정성 확보가 가장 큰 문제점이 된다. 사람의 보행에 대해서도 내리막 경사는 시각의 도움이 없이는 매우 위험한 부분이다. 음의 경사면의 판별은 이동 다리의 궤적이 완료되거나 완료되기 직전(이동 기간중 후반 95% ~ 100% 동안)에 수직 반력이 허용치 이상이 되어 안전한 착지가 이루어 졌는지를 감지함으로써 알 수 있다.

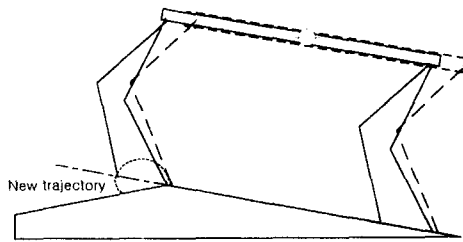


Fig. 5 Walking trajectory over inflection of slope

음의 경사의 경우는 양의 경사와는 달리 이동 중인 다리의 궤적뿐만 아니라 VME 주제어기에 의하여 몸체의 무게 중심을 현재의 지지다각형 내로 이동시킨 후 적절한 안정도가 확보된 후 이동 중인 다리의 궤적을 수정한다⁽¹⁹⁾. 인체와 동일하게 음의 경사를 감지 시에는 DSP 에 의한 반사적인 이동 다리의 궤적 수정이 아닌 생체의 CNS 에 해당하는 주제어기에 의한 판단을 거친 보행 제어가 이루어진다.

'양의 작용'에 대응하는 동작으로 '음의 작용' (negative action)의 정의는 무게 중심의 이동으로 안정도가 확보가 된 후 이동 중인 다리의 발끝의 높이를 착지가 일어날 때까지 낮추는 동작을 말한다.

다. 경사도가 큰 경우 안정성을 위하여 이와 같은 무게중심의 이동과 '음의 작용'이 번갈아 반복되도록 프로그램되어 있다.

3. 보행실험 및 그 결과

3.1 실험개요

제작된 4 각 보행 로봇에 대해 제안된 알고리즘을 적용하여 경사면 판별, 적응에 대한 보행실험을 수행하였다. Fig. 1(a)에서 나타난 경사면을 포함한 보행로를 보행 시 경사도는 발가락과 연동되는 포텐시오미터로 발가락의 회전각도로 측정할 수 있다⁽¹⁸⁾. 발가락의 회전각도는 지면이 평탄한 경우 지면의 경사각과 동일하나 본 연구에서는 앞, 뒤 발가락의 회전각도를 비교하고 각 관절각에 의해 계산된 발 높이를 상호 비교하여 측정 잡음이나 지면의 요철에 의한 오동작을 최소화하였다. 관절에 설치된 포텐시오미터는 잡음을 고려하여 모터에 전원이 공급되지 않은 상태에서 각 관절의 절대각도를 측정하며 이후의 관절각은 인코더에 의해 측정된다.

실험은 평지에 오르막 경사로를 1.5m 의 길이로 설치하고 오르막이 끝난 지점에서 다시 1.5m 의 내리막 경사로를 설치하여 4 각 보행 로봇이 경사 변곡점, 경사 천이구역 뿐 아니라 양의 경사각, 음의 경사각을 보행하도록 하였다. 이때 경사각은 조절이 가능하며 변곡점의 틈새 등 불규칙 노면에 의한 외란의 영향을 최소화했다. 경사로 시작 지점과 같은 사전 정보는 로봇에 입력되지 않고 비전정보가 고려되지 않은 자율적인 평지 및 경사로 판별 보행이 되도록 설정하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

몸체 중심의 상대적인 이동을 보여주는 수직 접촉 반력은 발목에 설치된 로드셀의 측정치를 발목 관절각 및 몸체 경사도를 고려하여 계산하였다. 접촉 반력의 측정과 경사도 판별의 타당성 검증을 위하여 각다리의 접촉 반력을 검토하였다.

Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 각각 평지 보행, 양의 경사 그리고 변곡점에서의 1주기 보행 동안 각 다리에 작용하는 수직 반력응답을 측정했다. 모든 경우 다리의 이동 순서는 Fig. 6(a)에서 표시된 것처럼 4-2-3-1로 주어 졌으며 2-3 간에는 4 다리 지지 상태로 무게중심을 이동방향으로 진행시키는

디딤기간을 두었다⁽¹⁸⁾. 평지 보행 시에 나타난 것과 같이 수직 반력의 합은 로봇의 무게와 동일하고 그 변화량은 보행 기간내에 초기 보행중 발생한 1회의 큰 변동을 제외하면 모두 5% 내의 값을 갖는다. 이는 접촉 반력 및 그에 따른 수직 반력의 측정이 타당함을 보여 준다. 하중은 4 번과 1 번 다리, 3 번과 2 번 다리가 각각 대칭의 응답성을 보여 주며 이는 이동 중인 다리와 대칭인 다리에 대해 대각선을 이루는 나머지 두 다리가 시이소의 축이 되기 때문이다.

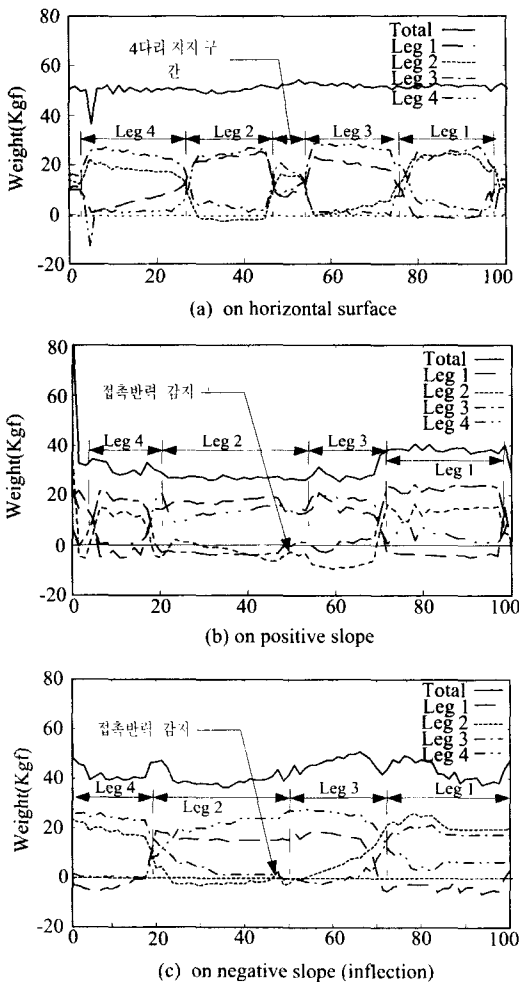


Fig. 6 Variation of vertical force at each leg

경사 보행 중의 수직 반력의 합계는 일반적으로 균일하여 경사판별 및 경사도 감지에 적용 타

당함을 보여준다. 그러나 평지 보행 때와는 달리 4 다리의 반력이 동일한 4 점지지 구간이 뚜렷이 나타나지 않는다. 이는 안정성 확보를 위해 엉덩이 관절을 이용하여 보행에 동기 시킨 횡방향 기울임을 사인(sine) 함수로 주었기 때문이다^(17,19). 또한 경사 적용시 4 번 다리가 착지하게 될 때 수직 반력의 합계의 변화가 평지에서와는 달리 상대적으로 큼을 알 수 있다(Fig. 6(b)의 실선부). 이러한 작용이 누적 되게 되면 경사를 오르는 도중 방향이 틀어지게 되는 것을 관찰 할 수 있게 된다. 경사 변곡점에서는 3 과 4 번 다리에 양의 경사가 적용되고 몸체는 수평에 가깝게 되기 때문에 경사면 보행보다 3 번 다리의 하중이 보다 안정함을 보여 주나 경사면 보행과 마찬가지로 중간의 뚜렷한 4 점지지 상태가 나타나지 않는다.

Fig. 7 은 Fig. 6 과 동일한 순간에 대해 각각의 몸체 중심의 수평사영에 대한 무게중심 수평사영의 변위(ZMP: zero moment point)를 나타낸 것이다. 횡방향의 무게 중심의 변화는 평균 평지 보행시에는 $\pm 5\text{cm}$, 경사면에서는 $\pm 10\text{cm}$ 이내로 발생함을 볼 수 있어 동일한 횡방향 톨팅에 대해 제안된 알고리즘이 무게 중심을 지지면 내로 보다 많이 이동시켜 안정성을 높여줄 수 있다. 제안된 보행 알고리즘에 의한 전후 방향의 무게 중심의 이동은 보다 크게 나타나며 평지 보행시(Fig. 7(a))보다 경사면 위(Fig. 7(b))에서 더 크게 일어남을 알 수 있다. 평지 보행의 알고리즘을 적용하면 3 번과 4 번의 뒷다리들에 하중이 많이 작용하여 보행이 불가능하나 Fig. 7(b)에 의해 보여진 것처럼 식 (3), (7), (8)로 주어지는 제안된 알고리즘은 오름 경사면에서 로봇의 무게중심을 앞으로 이동시켜 상대적으로 하중이 앞쪽으로 이동하여 보행의 안정성을 확보하여 줌을 알 수 있다. Fig. 7(c)에서 무게 중심이 2 번 다리가 움직이는 시점에서 앞으로 급격히 이동하는 점과 2 번 다리가 움직인 이후에 (+) 횡방향으로 이동하는 이유가 앞쪽으로 하중이 많이 치우쳐진 결과에 기인한다. 이 경우 무게 중심의 횡방향 이동은 평지 보행시와 비슷하게 되고 전후방향 또한 평지 보행의 수준으로 변화한다.

그 이유는 변곡점에서 가상경사각이 0으로 접근하는 구간이 되어 경사각에 대한 수정치가 적어져서 몸체에 대해서는 평지 보행과 유사한 상태로 바뀌기 때문이며 뒷다리의 양의 경사각 적용과 앞다리의 음의 경사각 적용이 잘 일어나 경사 변곡

점에서 평지와 비슷한 수준의 걸음새를 유지할 수 있게 되기 때문이다.

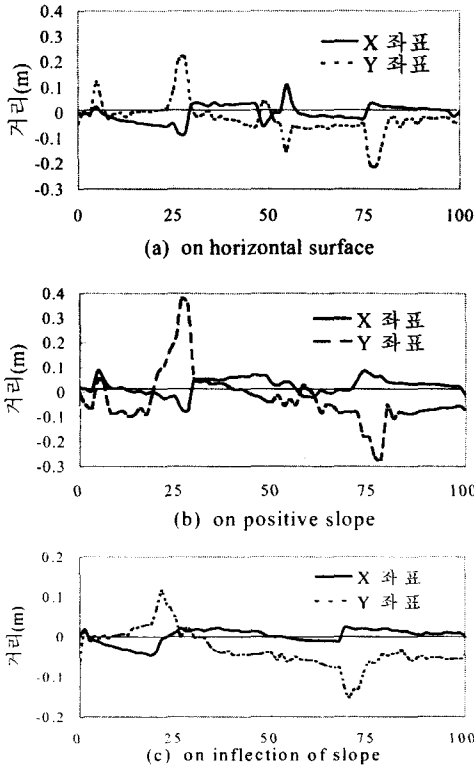


Fig. 7 Variation of ZMP position of the walking robot (Horizontal axis: percentage period of single stride)

Fig. 8 은 평지와 경사면에서의 발끝궤적을 센서에 의해 궤환된 관절각 입력과 식 (2)로부터 얻어진 가상경사각을 이용하여 계산된 값을 기준 관성좌표계로 나타낸 것이다. 경사면에서의 궤적은 평지와 달리 수정된 양상을 확연히 보여 주고 있다. Fig. 8(b)는 현재 이동 중인 발이 평지에서 시작하여 경사면에서 궤적이 종료되는 양의 경사 치이 과정을 잘 보여 주고 있다. 접촉 반력의 감지에 의해 수정된 궤적과 보폭 그리고 발끝 높이가 변화가 모두 늘어나는 방향으로 작용하고 있음을 보여 준다. 음의 경사의 경우는 Fig. 5 에서 보여 주는 것과 같이 보폭이 완료된 시점에서 발끝 높이의 변화를 주는 알고리즘에 의해 보폭과 발끝 높이가 줄어든 궤적을 얻을 수 있다. 그림에서 수정을 수행하기 직전 순간적으로 증가하여 감소하는 발끝

높이는 실 보행 실험에서 변곡점의 틈새에 발이 빠지는 것을 막기 위해 인위적으로 궤적을 추가하여 생긴 현상이다.

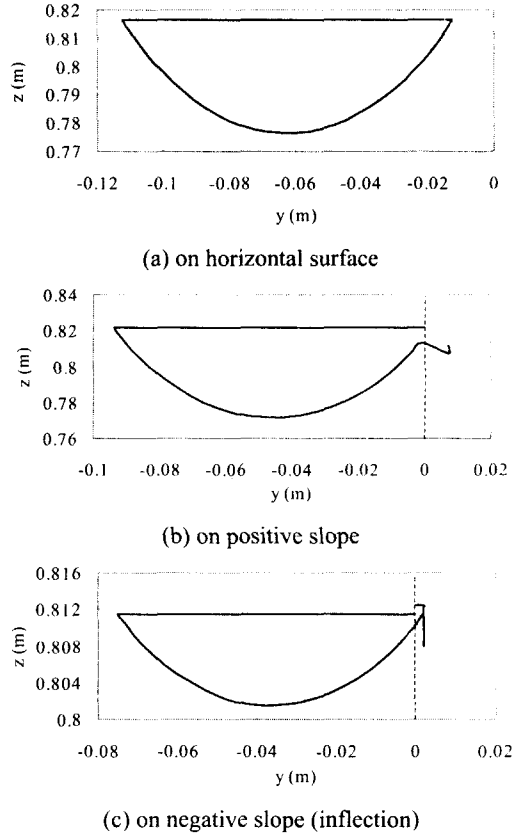
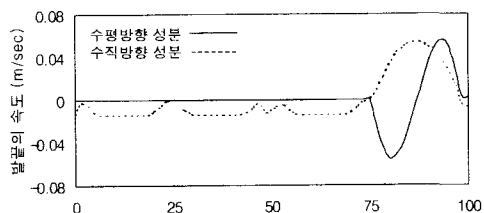


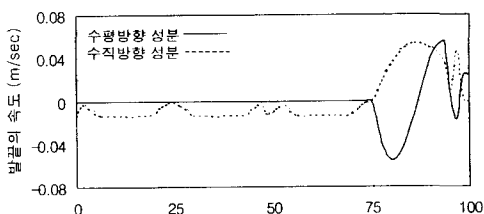
Fig. 8 Adjusted tip trajectory of swing leg with slope walking algorithm (The vertical dotted line shows when the reaction force is sensed.)

Fig. 9 는 경사면 보행시 다리의 발끝의 속도를 나타냈다. 대표적으로 1 번 다리에 대해 그 속도를 기준 관성좌표계에 대해 각각 수직 및 수평 성분을 보행 1 주기에 대해 표시하였다. 1 번 다리의 이동 구간은 보행 주기의 후반 25% 부분이 되고 그림에서 속도의 수평방향 성분은 이 같은 사실을 잘 보여준다. Fig. 9(a)에서 보듯 수평면 보행시에는 경사면내와는 달리 경사 감지에 의한 궤적 수행이 없으므로 원활한 베지어 곡선의 속도 궤적을 보여 준다. Fig. 9(b)와 (c)의 경사면 보행 경우는 1 번 다리가 이동중인 후반부에서, 즉 보행 주기 75% 이

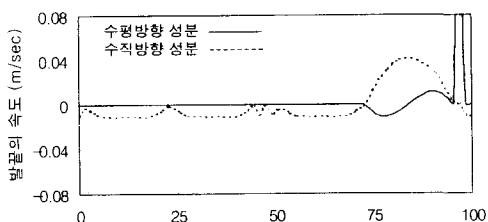
후 부분의 50 ~ 85%구간에서, 경사면을 감지하여 보행 궤적의 수정과 함께 새로운 베지어 곡선에 의한 속도의 변화를 보여주고 있다. 특히 변곡점에서의 보행궤적의 수행은 틈새에 발이 끼는 것을 막기위해 인위적으로 부가된 궤적에 의해 수평방향 속도가 급격히 증가한 것도 볼 수 있다.



(a) on horizontal surface



(b) on positive slope



(c) on negative slope (inflection)

Fig. 9 Velocity at the tip of one foot (Horizontal axis: percentage period for single stride)

수직방향의 속도는 1 번 다리가 이동중이 아닐 때에는 비교적 작고 일정한 음의 값을 가지고 있어 툴링과 관절의 유격등에 의한 발끝의 작은 위치변화가 있음을 보여 준다. 다시 말하면 기준 관성좌표계의 (-)Z₀의 방향이 위로 수직한 방향이므로 보행중 지지다리가 약간씩 틀리거나 하중의 변화에 따라 관절의 유격이 변화한다고 할 수 있다.

Fig. 10는 이와 같은 알고리즘에 의한 센트의 연속적인 보행과정을 사진으로 나타낸 것이다.

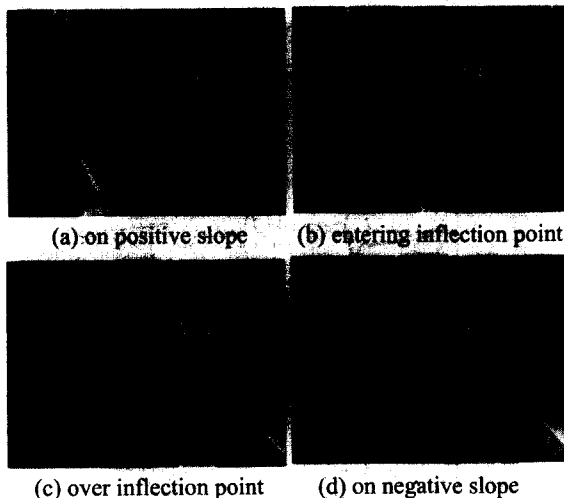


Fig. 10 Pictures of Centaur which show slope walking

4. 결론

본 연구에서는 오르막 및 내리막을 포함한 보행로에서 단순히 접촉 반력에만 의존한 4 각 보행 로봇의 자율 보행에 대해 연구했다. 시각 정보 및 경사도를 포함한 사전 정보가 배제된 상황에서 원활한 이동을 위한 능동적인 적응의 방법으로서 물결 걸음새를 기본으로 하여 보폭과 발 높이의 결정 및 반력의 제한에 의한 보행 궤적의 수정 등을 통해 평지에서 경사로의 천이와 경사면에서의 보행, 양의 경사에서 음의 경사로 천이, 음의 경사에서 평지로의 천이를 가능케 하는 통합알고리즘을 개발하였다.

가상경사각의 개념을 도입함으로써 몸체와 실 보행면과의 관계를 좌표변환 시스템으로 나타내었고 연속된 보행에 대해 관절각을 제한하여 가상경사각과 보행경사각을 일치시켜 나가게 하는 준 온 라인(on-line) 제어가 이루어지게 하였다. 또한 접촉 반력에 의한 보행 궤적의 수정에 생체의 반사 신경계 작동원리를 적용하였다. 즉 반력이 감지되어 보행궤적을 완료하지 못할 경우 DSP는 잔여 보폭과 시간 그리고 그에 따른 높이로 주어지는 기 설정된 보행패턴을 수행하여 적절한 보폭과 발 높이의 보정이 이루어지도록 하였다. 이는 주제가 기가 한번 보행패턴을 DSP에 설정하면 걸음새를 변경하거나 기타 특수한 상황에 의해 보행궤적을 변경하기 전까지 센서와 다리를 관장하는 반사신

경계에 해당하는 DSP 에 의해 국부적인 자율제어가 가능하도록 한 것이다. 그 결과 경사면 보행 중 ZMP 의 이동량이 평지 보행 때보다 2 배정도 안정된 방향으로 이동시킴을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1997 년도 학술진흥재단의 신진교수 지원과제비와 한국과학기술연구원의 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 특히 본 연구를 위해 많은 도움과 조언을 주신 KIST 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. Takanishi, Atsuo, "Biped Walking Robot Compensating Moment by Trunk Motion," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 5, No.6, pp. 505-510, 1993.
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 Systems," IROS 90, pp. 315-322, 1990.
4. Bares, J. E. and Whittaker, W. L., "Configuration of an Autonomous Robot for Mars Exploration, In proceedings 1989 World Conference on Robotics Research: The Next Five Years and Beyond," Vol. 1, pp.37-52, Gaithersburg, MD, May 7-11, 1989.
5. Yoneda, Ken, and Hirose, Shigeon, "Dynamic and Static Fusion Gait of a Quadruped Walking Vehicle on a Winding Path," Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation, pp. 143-148, Nice, France, May 1992.
6. Junmin Pan, Junshi Chen, "Gait Synthesis for Quadruped Robot Walking up and down Slope," Proceedings of Int. Conference on Robotics and Systems '93, pp. 532-536.
7. Bekker, M. G., *Introduction to Terrain Vehicle Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1969.
8. 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.
9. B. Min, Z. Bein, and S. Hwang, "Basic Characteristics and Stability Properties of Quadruped Crab Gaits," Robotica, Vol. 11, pp. 233-243, 1994.
10. Takanishi, A., et. al, "Dynamic Biped Walking Stabilized with Optimal Trunk and Waist Motion," Proceedings of IROS-89, 1989.
11. Takanishi, A., et. al., "Realization of dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motions," ROMANSY, 1988.
12. 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.
13. 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.
14. Neil R. Carlson, *Physiology Behavior 5th Ed.*, Allyn and Bacon, MA, 1994.
15. 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.
16. 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.
17. 이종원외, 휴먼로봇 시스템 개발 연차 보고서 - 2 차년도, 한국과학기술연구원 KIST-2000 연구사업단, 1996.
18. 이종원외, 휴먼로봇 시스템 개발 연차 보고서 - 1 차년도, 한국과학기술연구원 KIST-2000 연구사업단, 1995.
19. 조창현, 이순걸, "틸팅과 안정여유도를 이용한 4족 보행 로봇의 보행 알고리즘," KACC'98, pp1556-1559, Pusan, Korea, 1998.