

힘 센서를 이용한 4각 보행로봇의 비평탄로 보행에 관한 연구

⁰이 승 하*, 변 중 남*, 서 일 홍**, 이 지 홍*
* 한국 과학 기술원, ** 한양 대학교

Force Sensor Based Locomotion of a Quadruped
Walking Vehicle over Uneven Terrain.

Seung-Ha Lee*, Zeungnam Bien*, Il-Hong Suh**, Ji-Hong Lee*
* KAIST, ** Han Yang Univ.

ABSTRACT

This thesis presents a simple heuristic algorithm which can be applied to a quadruped walking vehicle for increasing the terrain adaptability. The proposed method controls a leg length which is in transfer phase to maintain initial orientation of the robot body by using FSR type force sensors attached to foot-tips. Also, some basic experiments using the vehicle are performed to demonstrate the effectiveness of the algorithm.

1. 서 론

고정된 작업환경에서 작업을 하는 팔(arm) 형태의 로봇과 달리 몸체를 이동하면서 주어진 작업을 수행하는 로봇 중에서, 바퀴나 궤도를 이용하지 않고 인간이나 짐승처럼 다리를 이용해 이동하는 보행로봇은 바퀴나 궤도를 이용한 경우와 달리 장애물을 넘어 갈 수 있고 계단과 가파른 경사를 오르며 불규칙한 지형에서 탁월한 적응성을 보여 원자력 발전소 내부나 지뢰밭, 화재현장, 우주작업 애서와 같은 위험한지역이나 인간이 접근하기 곤란한 특수환경에서 인간을 대신하는 세밀하고 다양한 작업을 시킬 수 있는 등 여러 장점 때문에 60년대 말 부터 많은 연구의 대상이 되어 왔다.[1][2][3]

그러나, 이러한 장점에도 불구하고 보행로봇은 주어진 작업을 수행함에 있어 넘어지지 않고 안정성을 유지하면서 걷는 걸음새(gait, 2장 참조) 계획 등의 연구되어야 할 문제를 갖고 있다.[4] 이 중에서도 특히 중요한 문제는 보행로봇의 평지가 아닌 미지의 비평탄 지형을, 평지에 대해 계획된 걸음새로 걸어 가고자 하면 안정성을 잃고 넘어지는 문제이다. 이러한 미지 지형에 대한 적응보행 문제를 해결하는 방법은 크게 2가지로 나누어 생각할 수 있다.

첫째는 로봇이 보행하여야 할 지형을 미리 비전 센서(vision sensor), 근접 센서(proximity sensor)등을 써서

조사하고 그로부터 지형에 대한 내부 모델(internal model)을 세우고 그 모델에 따라 다리의 궤적(trajecory)을 계획한 후에 다리를 움직여 가는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 정확한 지형의 감지를 위해 값비싼 감지 시스템과 세밀한 계획 알고리즘이 필요한 단점이 있다.

둘째로, 로봇이 걷는데 있어 눈의 개념을 사용하지 않고 다리의 길이(몸체로부터 발끝까지의 거리)를 제어함으로써 로봇의 오리엔테이션(orientation)을 제어하는 방법이 있는데 이 경우는 내부 지형 형태 모델이 필요없고 복잡한 계획 알고리즘(planning algorithm)이 필요없는 장점이 있다.[5]

눈의 개념을 이용하지 않을 때에는 로봇 발바닥의 힘이나 로봇의 자세를 감지하는 것이 필요하다. 그 중에서 자세 센서는 시판용으로 구할 수 있는 것 들은 정확하게 절대고도를 감지 할 수 없거나 비싸며 비율 자이로(rate gyro) 같은 경우에는 적분을 해야 하는 단점이 있으나, 힘 센서는 발끝의 힘 뿐만 아니라 몸체 무게중심의 위치 혹은, 몸체의 자세도 감지할 수 있는 등 여러 장점이 있어 미지 불규칙 지형의 보행에 힘 센서를 이용한 경우가 대부분이다. [5][6]

힘 센서를 이용한 미지의 비평탄 지형 보행에 관한 연구는 크게 Ohio 주립 대학(OSU)의 Active Compliance 개념[7]과 일본 기계 연구소의 육각 보행로봇 MELWALK-III에 적용된 알고리즘[6]에서 그 선례를 찾을 수 있다.

Ohio 주립 대학의 OSU Hexapod에서는 Z(수직)방향 명령 속도(command velocity)를

$$z_c = z_d + K_f(f_d - f_a) + K_s(z_d - z_a) \quad (1)$$

로 하여 로봇 모양(configuration)과 평형 방정식으로 부터 구해진 원하는 힘(desired force, f_d)과 실제의 힘(f_a) 간의 오차가 위치 오차($z_d - z_a$)와 비례 상수(K_f, K_s)에 의해 서로 평형을 이루는 형식이고, MELWALK-III에서는 지형을

$$f = K \delta^n \quad (2)$$

K, n : 지형 상수

δ : z 방향 지형 변형 거리

으로 모델링 하고 발끝을 지면을 향해서 내릴때 몇개의 δ와 f를 측정해서 K와 n을 추정(estimation) 하여 원하는 힘 값이 되기 위한 δ를 결정, 발끝을 그만큼 내려주는 형태를 제안 하였다.

그런데 앞의 두 방법은 모두가 로봇의 모양(configuration)에 따른 힘과 모멘트의 평형방정식을 세워 계산하고 그 원하는 값에 따라 제어가 동작을 취하는데 이를 위해서는 보행로봇 무게중심의 위치를 정확히 알아야 하고 정확한 힘 감지와 제어를 위한 값 비산 센서와 복잡한 인터페이스 및 계산과정이 필요한 단점이 있다.[8]

따라서 본 논문에서는 보행로봇이 완전한 자율보행(autonomous navigation)을 하게 하는 시각단계로 간단한 힘 센서를 이용하고 선형적 알고리즘(heuristic algorithm)을 적용하여 비평탄 지형을 걸어 감에 있어 지형에 대한 정보가 없을 때에도 넘어지지 않고 정적 안정성(static stability)을 갖고 몸체를 평평하게 유지하면서 걷게 하는 국부 걸음세 제어(local gait control)의 한 방법을 제시하고 대상 4각 보행로봇에 적용, 타당성을 보이는데 그 목적을 두고 있다.

2. 문제 설정 및 제한된 보행 알고리즘

2.1 단순화된 문제의 기술(description)

보행로봇의 미지 지형 보행을 동력학적(dynamics) 으로 기술한다는 것은 매우 어려운 일이다. 왜냐하면 여러개의 다리와 기구가 복잡하게 결합된(couple) 형태이고 이에 내재된 불확실성(uncertainty)과 모르는 지형에 대한 parameter도 고려해야 하기 때문이다.

그런데, 보행로봇의 보행은 각각의 다리를 들어(lift) 옮기고(transfer) 내려서(down) 몸체를 미는(body propelling) 일련의 사건(event)들의 진행(sequence)으로 이루어 진다. 이러한 보행을 위한 다리의 속도, 보폭, 움직임 순서, 움직이는 시점(phase) 등의 계획을 걸음세(gait) 라고 한다.[9] 로봇의 보행에 있어 가감속에 의한 관성력은 고려하지 않고 로봇 자체의 질량에 위한 중력 만을 고려하는 정적 걸음세(static gait)의 경우, 정적 안정(static stability, 몸체의 무게중심이 지지점으로 구성되는 지지각형 내로 수직 조사 될때)을 위해서는 최소한 3개 이상의 다리가 로봇를 지지하고 있어야 하므로 4각 보행로봇에서 다리를 옮기는 시점(transfer phase)에 있는 다리는 하나 이하다 된다.

따라서 보행로봇가 미지의 비평탄 지형을 걷는 문제는 초기 상태에 로봇가 평지에 4각이 같은 다리 길이로 있다고, 혹은 초기의 몸체 오리엔테이션을 안다고 가정하면, 지지점을 옮기는 하나의 다리 이외의 나머지 다리는 원하는 길이를 갖게 되므로 그 다리(swing leg)가 새로운 지지점에 발끝을 내려

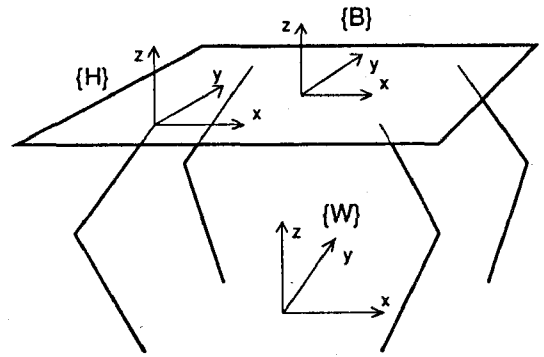


그림 1. 보행로봇의 각 좌표계

놓을때의 길이(lcg length, 몸체에서 발끝까지 거리)를 제어하는 문제로 단순화시켜 기술 할 수 있다.

즉, 다음과 같이 로봇 좌표계를 몸체 중심의 좌표와 각 다리의 엉덩이 좌표계(hip coordinate)로 설정한다(그림 1). world 좌표계 {w} 에서 바라본 다리 i 의 엉덩이 좌표계의 원점 벡터의 (k번째 보행주기에서의) z성분을 H_k^i 라고 하면

$$H_k^i = l_k^i + e_k^i + s_k^i \tag{3}$$

- l_k^i : 다리의 길이
- e_k^i : 지형의 높이
- s_k^i : 발끝과 지면의 간격

로 표시되고 주어진 가정, 즉

$$l_o^i = H_o^i = H_d \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{4}$$

에 대해 $s_k^i = 0$ 일때

$$\| H_k^i - H_{k-1}^i \| < \epsilon \quad k = 1, 2, \dots \tag{5}$$

인 l_k^i 를 결정하면 된다.

2.2 알고리즘 개요 및 기본 가정

앞에서 언급한 바와 같이 보행로봇의 자세제어를 새로운 지지점으로 옮기는 하나의 다리(leg in swing phase)가 착지 할때 그 길이를 제어하는 문제로 단순화시켜 생각하고, 원하는 힘 값을 계산하지 않는 방법으로 문제를 풀기 위해서 몇가지 기본 가정을 두기로 한다.

즉, 앞서 가정한 보행로봇가 초기에 평탄지형에 있다는 가정(식 4)과 더불어, 발 끝이 하나의 점(point)이 아니고 발바닥을 가지는 면이고 구조적으로 측면 힘(lateral force)을 고려할 수 없으므로 미지지형에서 각 발바닥이 딛는 곳(foot-hold)은 지형이 변형을 일으키거나 자연적으로 평평하다고 가정한다. 또, 지형의 굴곡이 로봇가 최대로 발을 뻗거나 움츠러서 발이 지면을 디딜 수 있는 한도 내에 있어야 한다고 가정한다.

이러한 기본가정 아래서 다음 절에서 α를 정의하고 그 α 값을 평지를 걸을 때 미리 off-line으로 실험에 의해 구하고

착지시 α 길이 만큼을 보상해 주는 방법을 제안 하고자 한다.

2.3 α 보상(compensation) 알고리즘

다리 길이 제어시 보상해 주어야 하는 변형에 관계하는 양 α 를 다음과 같이

$$\alpha^i = H_d - l_f - f_o \quad (6)$$

로 정의 하기로 한다. 이것은 평지를 걸을때 최초의 다리 길이(H_d)와 발끝(발바닥)의 힘의 값이 f_o 가 될때의 다리 길이와의 차이이다. 즉, 착지시에 다리를 내리면 로봇 몸체가 완전한 자세가 아니므로 발끝 힘은 0 에서 부터 증가하게 되는데 발끝의 힘이 f_o 가 될때의 다리길이로 부터 식(4)의 H_d 가 되기위해 더 내려주어야 하는 값이 α 가 된다.

α 값은 처음에 보행로보트로 하여금 평지를 주어진 걸음새로 걷게하면서 다리 i 가 착지할때 발 끝의 힘의 값이 f_o 보다 크면 발 끝을 내리는 것을 중지하고 간단히 α^i 값을 구하는 방법으로 미리 실험에 의해 구한다.

off-line으로 실험에 의해 구한 α 값을 이용하여 미지지형을 보행하는 알고리즘은 그림 2와 같다. 그림 2는 전체 보행 알고리즘 중에서 하나의 다리가 지지점을 옮겨 달는 동작만을 나타낸 것이다.

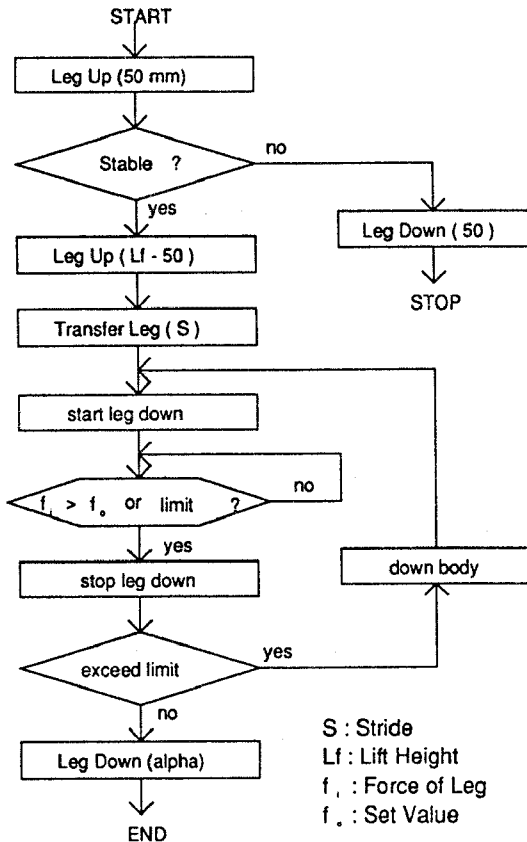


그림 2. α 보상 알고리즘

그림 2에서 보면 먼저 지지점을 옮기고자 하는 다리를 최대 몸체 변형량(body deflection) 보다 조금 큰 50mm를 들고 로보트 몸체가 안정한지를 조사한다. 이는 들어 올리는 발끝의 힘이 어느 문턱 값 이하로 되었는지를 조사하여 발 끝이 지면으로부터 떨어진 상태($s \neq 0$)인지를 알아보면 된다. 안정되지 않은 상태이면 다리를 다시 내리고 전체적 걸음새 계획부(Global gait planner)에게 알리고 정지하지만 그렇지 않고 안정된 상태라면 걸음새에 계획된 나머지 양($Lf - 50$)을 들어올리고 다리를 다른 지지점(foohold)으로 옮긴다.(transfer) 여기서 Lf는 다리를 드는 높이(lift height)이다.

새로운 지지점에 이르면 발 끝을 내려놓기 위해서로보제어부에 DOWN 명령을 내린다. DOWN 명령은 그림 2에서 보는 바와 같이 발 끝의 힘이 f_o 보다 크거나 다리의 길이가 한계에 이르면 내리는 동작을 멈춘다. 이때 한계에 다다른 경우가 아니고 힘 조건이 만족된 경우이면 전술한 바와 같이 멈춘 지점에서 부터 α 를 더 내려준다.

그런데 한계에 다다른 경우 즉, 발 끝을 최대한 뺀 경우에는 몸체의 높이를 낮추는 동작을 취하고 다시 DOWN동작을 실시한다. 이 몸체를 낮추는 동작은 내 다리의 길이를 동시에 같은 속도로 일정 양만큼 줄이는 일이다.

3. 구현 및 실험

3.1 적용 시스템

제안된 알고리즘은 국내에서는 최초로 개발된 4각 보행로보트 KAISER-I에 적용, 실험을 하였는데 KAISER-I은 몸무게 75Kg, 정상자세 높이 약 110cm, 보행속도는 최대 420mm/min 정도이며 현재는 8개의 자유도 만으로 전진과 후진 만이 가능하게 되어 있다. 발바닥에는 필름 형태로 되어 있어 가볍고 값싼 반도체형 힘 센서인 FSR(Force Sensing Resistor)을 부착하고 수동 관절(passive joint)을 두어 지면의 수직 반발력을 측정하였다.

KAISER-I의 제어구조는 판리제어기, 걸음새제어기, 서보제어기가 계층적(hierarchy) 구조를 이루고 있는데 본 논문의 알고리즘은 걸음새 제어기의 국부 걸음새 제어 부분을 수정하여 구현되었다.

3.2 보행 실험

먼저 미지지형을 보행하기 전에 α 값을 평지보행을 통해 실험적으로 구하였는데 30회 주기를 반복 보행하였을때 얻어진 α 값들을 평균하여 사용하였다. 이때 f_o 는 실험적으로 A/D변환 출력값 10H로 선택 하였고 α 값은 각 다리가 15.23mm, 34.05mm, 17.11mm, 14.32mm로 측정되었다.

제안된 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 먼저 미지지형을 높이가 12mm, 31mm, 51mm 인 나무로 된 육면체를 놓아 만들고 보폭은 420mm, 몸체 미는 속도가 약

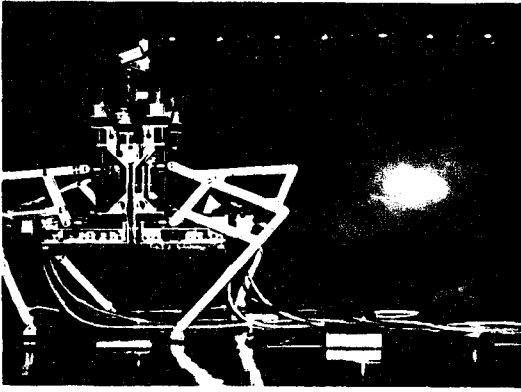


그림 3. 제안된 방법을 쓴 비평탄 지형의 보행

3mm/sec, 발 드는 높이는 150mm로 보행하게 하였다. 그리고 몸체의 요동(fluctuation)과 다리의 이동 모습을 보기 위해 보행로봇에 부착된 카메라 및쪽과 1번 다리에 램프를 부착하여 연속으로 촬영 하였다.

그림 3은 미지의 물체를 예상되는 지지위치(foohold)에 놓아 두고 제안된 방법을 써서 보행할 때의 모습이다. 힘센서를 이용하지 않았을 때, 이러한 비평탄 지형을 걸을 경우는 로봇이 균형을 잃고 넘어지는 결과를 보였다. 그러나 불규칙 지형을 제안된 방법으로 걸었을 때는 불규칙 지형을 마치 평지처럼 몸체의 균형을 유지하며 걷고 있음을 볼 수 있다.

4. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 미지 지형을 보행로봇이 넘어지지 않고 평평한 몸체를 유지하면서 걷는 것을, 몇 가지 가정하에서 힘센서와 간단한 실험적 알고리즘을 적용하여 구현 하였고 실험에서 높이를 모르는 미지의 비평탄 지형을 걸어 갈 경우, 로봇 몸체가 그러한 제약을 보였는데 안정도를 유지하면서 평지를 걸어 갈 때와 유사한 결과를 얻었다.

제시된 방법은 FSR형 힘 센서를 이용하여, 다각 보행로봇 연구과제를 수행함에 있어 대상 로봇에 맞게 가볍고 간단하고 값 싸게 구현되었다. 또한 이 방법은 지형의 모델링이나 보행로봇 몸체의 동역학적 모델링, kinematics를 고려하지 않고 off-line으로 실험에 의해 α 를 구하므로 센서의 특성이 각기 달라도 무방하며 원하는 힘(desired force) 계산을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 그리고 착지시에만 알고리즘을 변화시키면 되기 때문에 다른 걸음새 알고리즘에도 적용할 수 있는 장점이 있다.

그러나 최초로 평지에 있어야 하는 가정이 불필요 하도록 하기 위해서는 다른 자세를 감지할 수 있는 센서와 더불어 센서에 중복성(redundancy)을 두어 보다 더 정확한 자세제어를 하면서 미지지형 보행을 할 수 있게 하는 일과 본 논문에서

고려하지 못한 측면 반발력(lateral force)을 고려하기 위한 힘센서 적용 및 보다 나은 발바닥 기구 설계는 추후과제로 남긴다.

참고 문헌

- [1] C. A. Klein and T. S. Chung, "Force Interaction and Allocation for the Legs of a Walking Vehicle", *IEEE J. Robotics Automat.*, vol. RA-3, no. 6, pp. 545-555, Dec 1987.
- [2] Y. Ichikawa, N. Ozaki, and K. Sadakane, "A Hybrid Locomotion Vehicle for Nuclear Power Plants", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-13 no.6, pp.1089-1093, Nov/Dec 1983.
- [3] D. E. Orin, "Supervisory Control of a Multilegged Robot", *Int. J. Robotics Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 79-91, Spring 1982.
- [4] K. J. Waldron, V. J. Vohnout, A. Pery, and R. B. McGhee, "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle", *Int. J. Robotics Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 37-48, Summer 1984.
- [5] C. A. Klein, K. W. Olson, and D. R. Pugh, "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over Irregular Terrain", *Int. J. Robotics Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 3-17, Summer 1983.
- [6] M. Kaneko, K. Tanie, and H. N. Mohamad Than, "A Control Algorithm for Hexapod Walking Machine Over Soft Ground", *IEEE J. Robotics Automat.*, vol. 4, no. 3, pp 294-303, June 1988.
- [7] C. A. Klein and R. L. Briggs, "Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol SMC-10, no. 7, pp. 393-400, 1980.
- [8] 이 도남, "다각 보행로봇을 위한 힘제어에 관한 연구", KAIST, 석사 학위 논문, 1989.
- [9] R. McN. Alexander, "The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals", *Int. J. Robotics Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 49-59, Summer 1984.