

다각 보행로보트의 순응 제어를 위한 힘의 최적 분배

^o라 인 환* · 양 원 영* · 정 태상**

* 중앙 대학교 전기공학과

** 중앙 대학교 제어계측공학과

Optimal Force Distribution for Compliance Control of Multi-legged Walking Robots

^oIn-Hwan Ra* · Won-Young Yang* · Tae-Sang Chung**

* Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang Univ.

** Dept. of Control & Instrumentation Eng., Chung-Ang Univ.

Abstract-Force and compliance control has been used in the control of legged walking vehicles to achieve superior terrain adaptability on rough terrains. The compliance control requires distribution of the vehicle load over the supporting legs. However, the constraint equations for ground reaction forces of supporting legs are generally underdetermined, allowing an infinite number of solutions. Thus, it is possible to apply an optimization criteria in solving the force setpoint problem.

It has been observed that the previous force setpoint optimization methods sometimes cause a system stability problem and/or the load distribution among supporting legs is not well balanced due to a memory effect on the solution trajectory. This paper presents an iterative force setpoint method to solve this problem using an interpolation technique. By simulation it was shown that an excessive load unbalance among supporting legs and the memory effect in the force trajectory are alleviated much with the proposed method.

1. 서론

해저 탐사, 원자력 발전소, 위험한 토토공사 현장, 혹성 탐사, 화재 진화 등 작업환경이 협난하고 불규칙한 지형에서 지형 적응성을 갖는 보행로보트의 개발이 연구되어 왔다. [1~5] 보행로보트의 불규칙한 지형에 대한 적용의 한 방법으로 순응 제어(compliance control)를 이용하여 왔다. 하지만 이 제어는 힘의 피드백으로 인하여 시스템을 불안정하게 하는 문제점이 있다. 순응 제어를 위해서는 힘(부하)의 분배가 필요하다. 하지만 힘의 분배 방정식은 일반적으로 완전히 규정되어지지 않으므로 무한개의 해를 가질 수 있다. 이 경우 수많은 해 중에서 시스템의 안정도를 해치지 않는 조건을 최적화 조건으로 적용할 수 있다. [2,3]

원점에서 최단거리의 해를 사용하면 각 다리에 부하가 가능한 한 균등하게 분배되지만 현재 상태에서 최단거리의 해를 사용하는 것보다 시스템의 안정도가 떨어진다. [2] 하지만 현재 상태에서 최단거리의 해를 사용하면 안정도는 향상된 반면에 각 다리의 지지(support)와 이동(transfer)의 위상 교대시 메모리(memory) 효과로 인하여 어떤 다리는 지면에 닿고 있지만 부하가 크게 걸리지 않

아 다른 다리에 지나친 부하가 걸리는 문제점이 관찰되었다. [4]

본 논문은 이러한 문제점을 해결하고자 지지다리 위상 변화에 준하는 보간법을 적용하는 힘의 최적 분배 방법을 제안하며, 이의 유용성을 육각 보행로보트를 모델로 하여 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

II. 힘점점 최적화

육각 보행로보트의 지지다리의 힘을 계산하기 위해서는 몇 가지 가정이 이루어진다. 첫째로 제어시스템은 단지 수직력의 측정에 의해서만 중력 방향으로 능동적인 순응운동이 구현된다. 둘째로, 보행로보트는 상대적으로 매우 천천히 움직이므로 모든 방향의 가속력은 무시한다. 그러므로, 힘점점은 규정하는데는 임의의 순간에 지면 반발력이 보행로보트의 세로축(X축)과 가로축(Y축)방향으로 발생하지 않도록 지지다리 사이에 보행로보트의 무게를 분배하는 문제로 감소한다. 고정된 몸체 좌표계(body-fixed coordinate)에서 계산하기 위해서는, 로보트 몸체는 거의 지면과 수평을 이루다는 가정 또한 필요하다. [3,4]

보행로보트가 정직 평형을 유지하기 위해서는 다음의 3 가지 조건을 만족해야 한다.

1. x축에 대한 모멘트의 합이 영과 같아야 한다.

2. y축에 대한 모멘트의 합이 영과 같아야 한다.

3. 수직 지면 반발력의 합이 보행체의 무게와 같아야 한다.

이 평형조건에 의해서 다음과 같은 식이 일어진다.

$$\sum_i f_{iz} = W \quad (1)$$

$$M_x = \sum_i x_i f_{iz} = 0 \quad (2)$$

$$M_y = \sum_i y_i f_{iz} = 0 \quad (3)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 i번째 다리의 좌표(foot coordinate)이고, f_i 는 i번째 다리에 대한 수직 지면 반발력이다. 그리고 W 는 보행로보트의 전체 무게이고 색인 i 는 지지위상에 있는 다리이다. 이 3가지 조건 방정식을 단일 행렬 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

$$Af_z = w \quad (4)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \end{bmatrix}, f_z = [f_{1z} f_{2z} f_{3z} \dots f_{nz}]^T,$$

$$w = [W \ 0 \ 0]^T$$

보행로보트가 지면에 안정되게 서 있기 위해서는 3개에서 6개의 발로 지지되어야 한다. 그러므로 방정식 3개에 미지수는 3개에서 6개가 될 수 있다. 만약 지면에 3개의 발로 지지해 있다면, 이 방정식계는 단일하게 풀 수 있지만, 그 이상일 경우 무한개의 해가 존재하기 때문에 이 조건을 결정하기 위해서 최적 개념이 적용된다. 이런 부정 힘 제약방정식에서 힘정점을 결정하고자 이전부터 다양한 최적조건을 적용해 왔다. [4]

부정선형시스템의 무한개의 해 중에서 임의의 기준값 ϕ 로부터 최단거리에 있는 해는 다음과 같이 표현된다. [4]

$$f_s = -A^+ \underline{w} + [I - A^+ A] \underline{\phi} \quad (5)$$

여기서 A^+ 은 A 의 의사역행렬(pseudoinverse)로 다음과 같이 표현된다.

$$A^+ = A^T (AA^T)^{-1} \quad (6)$$

또 $\underline{\phi}$ 는 f_s 와 같은 차원을 가지는 벡터이다.

식 (5)의 오른쪽 첫번째 항은 주어진 벡터 \underline{w} 에 무관하며 실제적으로 원점($\underline{\phi} = 0$)에서의 최단거리 해이다. 이를 의사역행렬해(pseudoinverse solution)라고 부른다. 식 (5)의 두번째 항은 행렬 A 를 앞방향에서 곱하면 영이 되는 동차해(homogeneous solution)이다.

식 (5)에서 $\underline{\phi}$ 벡터로 사용될 수 있는 여러 가지 기준점을 고려해 볼 수 있다. 원점을 기준점으로 해서 힘정점을 구하면 다음과 같다.

$$f_{sd} = A^+ \underline{w} \quad (7)$$

여기서 f_{sd} 는 바람직한 힘(desired force)이다. 힘정점은 지지다리의 현재 힘의 상태에 영향을 받지 않으며 부하가 균등하게 분배됨이 수학적으로 밝혀졌다. [4]

육각 보행로보트의 제어에서 힘의 피드백이 적용될 시에 다리간의 힘의 상호작용에 의해서 불안정성을 일으킬 수 있음이 확인되었다. [4] 그러므로 제어 신호인 힘 에러가 최소화되도록 힘정점을 규정한다면 힘의 상호작용을 감소시켜 시스템 안정도에 도움이 될 것이다. 힘의 에러는 원하는 힘(desired force) 분배와 현재 상태의 힘(actual force) 분배의 차이이므로, 식 (5)의 $\underline{\phi}$ 대신에 측정된 실제의 힘(actual force) f_{ad} 를 대입하면 힘의 에러가 최소된다. 이것으로부터, 힘정점은 다음과 같다.

$$f_{sd} = A^+ \underline{w} + (I - A^+ A) f_{ad} \quad (8)$$

이 경우 힘정점은 현재 힘의 상태에 영향을 받는다. 보행체가 이동하는 동안에 원하는 힘정점과 실제의 힘이 궤적(trajectory)을 형성하며, 따라서 힘 분배에 있어서 일종의 적용성이 발생한다. [3] 이 방법은 위와 같은 이유로 시스템의 안정도는 향상되지만 다리의 위상 교대시 같은 순간에 어떤 다리에 지나친 부하가 걸린다 하더라도 그 이후에도 현재 상태의 힘에서 최단 경로를 찾기 때문에 부하의 불균등을 계속적으로 유지하는 메모리 현상이 있을 수 있다.

불균등한 부하 분배의 메모리 효과를 해결하기 위해서 본 논문에서 힘정점을 구하는 다음과 같은 새로운 식을 제안하였다. [5]

$$f_{sd} = A^+ \underline{w} + \alpha(\phi) (I - A^+ A) f_{ad} \quad (9)$$

여기서 $\alpha(\phi)$ 는 보간비(force setpoint interpolation ratio)를 나타내며 보간위상 ϕ 의 함수로서 지지위상에 준하여 1에서 0까지 변한다. 보행에 있어서 한주기 중 i번째 지지와 이동의 위상 교대시의 보상 위상을 ϕ_{si} 라고 하면 보간비

는 다음과 같이 정한다.

$$\alpha(\phi) = \left[1 - \frac{\phi - \phi_{si}}{\phi_{si+1} - \phi_{si}} \right] \quad (10)$$

이렇게 함으로써 임의의 다리가 이동과 지지 교대시 처음에는 현재 상태에서 최단거리의 해($\alpha(\phi)=1$)를 구하다가 보간비에 의해 점차로 원점에서 최단거리의 해($\alpha(\phi)=0$)를 구하게 된다. 이런 방법을 통해 시스템의 불안정성을 해결하고 메모리 효과로 인한 불균등한 힘의 분배를 해결할 수 있다. 이 방법을 사용하여 개선된 점은 시뮬레이션에서 검토하겠다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서는 기존의 힘의 최적 분배 방법과 제안된 보간법을 이용한 힘의 최적 분배의 타당성을 비교 및 검토하기 위해 시뮬레이션을 행하였다.

힘의 최적 분배를 실험하기 위해 걸음새 선택은 크게 물결 걸음새와 균등 걸음새 두 가지로 분류하여 실험하였다. 디딤율 β 는 5/6, 3/4, 2/3, 1/2인 경우만을 이용하였다.

동등한 조건에서 실험 결과를 평가하기 위해서 보행로보트는 물결 걸음새를 이용하여 디딤율 $\beta = 2/3$ 로 전진 운동을 수행하였다. 이 실험 조건을 이용하여 보행로보트를 운행했을 때 1번 다리의 힘의 분배 곡선은 그림 1과 그림 2, 그림 3에 나타내었다.

그림 1은 원점에서 최단거리의 해를 사용한 경우이다. 그림에서 보듯이 다리가 지지를 시작하는 시점에서 힘(부하)이 갑자기 부과되며 힘의 분배 곡선이 불연속적임을 알 수 있다. 이는 보행로보트 시스템에 주기적으로 순간적인 자극을 주어 불안정을 일으키는 진동(oscillation)이 발생할 수 있다. [4]

그림 2는 현재 상태에서 최단거리의 해를 사용한 경우이다. 그림에서 보듯이 다리가 이동위상을 지나 지지위상에 들어갈 때 현재 상태에서 최단거리의 해를 구하므로

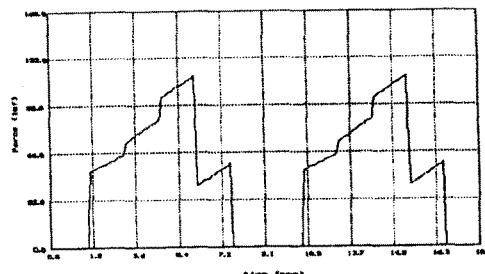


그림 1. 육각 보행로보트에 대한 원점에서 최단거리 힘의 분배

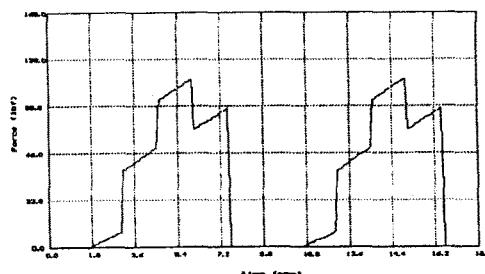


그림 2. 육각 보행로보트에 대한 현재 상태에서 최단거리의 해를 사용한 힘의 분배. 디딤율은 2/3이고 물결 걸음새를 이용하였다.

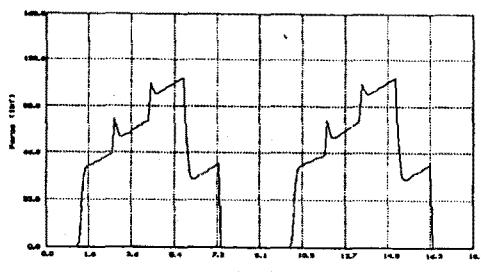


그림 3. 보간법을 이용한 힘의 분배. 디딤율은 2/3이고 전진운동만을 수행하였다.

힘의 분배 곡선이 유연하게 변화되고 있다. 따라서 힘의 어려가 최소화되도록 동작한다. 이는 원점에서 최단거리의 해를 구하는 방법보다 시스템의 안정도가 향상된다.

그림 3은 본 논문에서 제안한 지지다리 위상 변화에 준하는 보간법을 적용하여 최적의 해를 구하는 방법을 이용한 경우이다. 그림의 곡선 변화를 보면 다리가 지지위상에 들어갈 경우 유연한 곡선 변화를 이루다가 그 후 어느 위

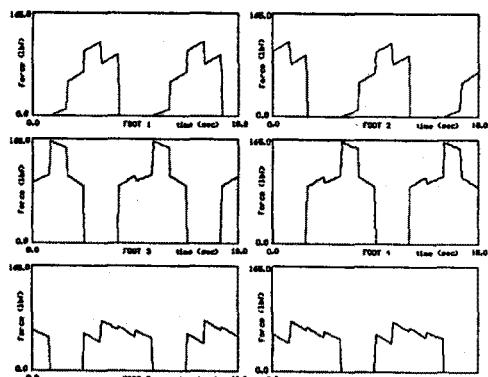


그림 4. 그림 2와 같은 방법으로 보행로보트를 제어하였다. 6개의 다리 모두의 힘의 분배 곡선을 나타내었다.

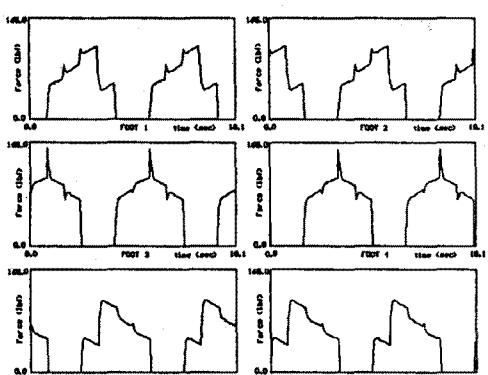


그림 5. 그림 3과 같은 방법으로 힘을 최적 분배했을 경우. 육각 보행로보트의 6개 다리의 부하 변화를 표현.

치에서 피크치가 발생하다가 점차로 감소되는 곡선 하향 현상을 볼 수 있다. 여기서 피크치는 다른 다리가 지지위상에서 이동위상으로 바뀜으로써 이 시스템에 영향을 주는 결과에서 발생한다. 그러나 보간비에 의해 현재 상태에서 최단거리의 해를 구하는 방법으로부터 시작하여 점차로 원점에서 최단거리의 해를 구하는 방법으로 전환함으로써 이 피크치가 유연하게 감소됨을 볼 수 있다. 이는 어느 한 다리가 지나친 힘이 부과되는 결과를 방지하고 전체의 다리에 균등한 분배를 이루게 한다.

그림 4에서 보듯이 현재 상태에서 최단거리의 해를 구하는 방법으로 제어를 했을 경우 보행로보트의 3번 다리와 4번 다리에 장시간에 걸쳐 지나친 부하가 걸리는 현상이 관찰되었지만, 보간법을 적용하여 힘의 분배를 제어했을 경우 6개의 다리 중 어느 한 다리도 지나치게 불균등한 부하 분배 현상을 볼 수 없음이 그림 5에 나타나 있다.

이상의 실험 결과로 볼 때, 보간법을 적용하여 육각 보행로보트를 제어했을 경우 어떤 다리에도 지나친 부하가 걸린다든지 하는 문제가 발생하지 않았으며 또한 6개의 다리 중 지지위상에 있는 다리들은 메모리 현상이 나타나지 않는 균등한 부하 분배를 관찰할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 다각 보행로보트의 순용 제어를 위한 힘(부하)의 분배 문제를 기술하였다. 기존의 부하 분배 방법들은 시스템의 안정도가 멀어지거나 메모리 효과로 인한 부하의 불균등한 분배를 초래한다. 이런 문제점을 개선하기 위해서 보간법을 적용한 힘의 최적 분배 방법을 제안하여 이의 유용성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 여기서 보간법의 적용은 지지다리 위상 변화에 준하여 보간비를 정합으로써 이루어졌다.

실험의 결과로 볼 때, 원점에서 최단거리의 해를 사용하여 보행로보트의 힘의 분배를 제어했을 경우 힘의 균등 분배라는 면에서는 좋은 결과를 이루었지만 안정도 면에서는 시스템 성능이 저하되었다. 또한 현재 상태에서 최단거리의 해를 사용하여 보행로보트를 제어하여 운행했을 경우 지지위상에 유연한 힘의 변화를 보이지만 각 다리 간에 불균등한 부하 문제를 초래하였다.

이에 제안된 보간법을 이용한 힘의 최적 분배 방법으로 보행로보트를 주행했을 때 어떤 다리에도 과다한 부하 분배 현상이 관찰되지 않았으며 또한 각 다리간에 균등한 부하 분배를 이루었다. 그리고 보행로보트의 시스템 안정도 면에서도 우수함을 알 수 있었다.

V. 참고 문헌

- [1] Song, S.M., and Waldron, K.J., "Machines That Walk," The MIT Press, MIT, 1989.
- [2] Chung, T.S., "An Inherent Stability Problem in Cartesian Compliance and an Alternative Structure of Compliance Control," IEEE J. Robotics and Automation, July, 1989.
- [3] Pugh, D.R., "An Autopilot for a Terrain-Adaptive Hexapod Vehicle," M.S. thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, September, 1982.
- [4] Klein, C.A., Chung, T.S., "Force Interaction and Allocation for the Legs of a Walking Vehicle," IEEE J. Robotics and Automation, December 1987.
- [5] 라인환, "다각 보행로보트의 순용 제어를 위한 힘의 최적 분배," 석사학위논문, 중앙대학교, 1995년 6월.