

4족 보행 로봇의 착지점 선정에 관한 연구

정경민*(선문대 기계및제어공학부), 박윤창(선문대 기계및제어공학부)

A Study on the Footholds Selection for Quadruped Walking Vehicle

K. M. Jeong (Mechanical & Control Eng. Divs., Sunmoon Univ.)

Y. C. Park (Mechanical & Control Eng. Divs., Sunmoon Univ.)

ABSTRACT

Inadequate footholds selection may result in deadlock state where the walking vehicle can not anymore to the desired direction. This paper concerns about the footholds selection for quadruped w vehicle to walk with the leg lifting sequence of crawl gait which is desired for straight motion. supporting states for lifting a leg are defined and the proper supporting condition for quadruped c; also proposed. When selecting a footholds of swing leg within the proposed footholds searching are; supporting states after the swing legs are placed, satisfy the proper supporting condition. So it can l for quadruped to execute continuous walking with the lifting sequence of crawl gait

Key Words : Quadruped walking vehicle(4족 보행 로봇), Deadlock (교착 상태), Aperiodic gaits (비주기 걸음새), Footholds Selection (착지점 선택)

1. 서론

보행 로봇은 도로나 계단 등과 같이 이동하기 용이한 규칙적인 인공 지형보다는 산악 지형과 같이 높낮이가 불규칙한 지형에서의 이동 및 작업 수단으로 적용되리라고 기대된다. 실제 보행 로봇은 화성 탐사, 화산 분화구 탐사 등과 같은 극히 제한된 목적에 사용될 목적으로 개발되기도 했고 최근에는 애완 동물들의 다양한 동작을 모사한 엔터테인먼트 로봇들이 대거 소개되고 있다. 이외에도 보행 로봇은 대형 화재나 지진 등에 의해 붕괴된 지역 등에서 재난 구조 등의 목적으로도 사용될 수 있으며 특히 지면과 바퀴나 무한 궤도 등의 접촉 영역이 연속적인 반면 보행 로봇은 지면과의 접촉 영역이 불연속적이기 때문에 이동해야 할 지형의 높낮이가 그리 크지 않더라도 착지 가능한 영역들이 좁고 불연속적으로 분포한 경우에 큰 장점을 가지기 때문에 지뢰 탐사/제거 작업, 농지에서의 작물 관리 등에도 이용될 수 있을 것이다.

보행 로봇을 구현한다고 할 때 보행 로봇의 하드웨어를 구성하는 기구, 제어 장치, 센서 등이 점차

안정된 성능에 저가 화되고 있어 하드웨어의 측면에서 저가의 보행 로봇의 구현이 용이해졌지만 착지 가능 영역이 좁고 불규칙한 지형에 적용할 수 있는 비 주기적인 걸음새에 대한 연구 결과는 아직까지 미진하다.

주기적인 걸음새에 대한 연구[1]에 의하면 직선 이동시에 crawl걸음새가 안정적이기 때문에 지형 적응적인 주기적 걸음새에 대한 연구들[2,3,4,5,6,7,8]에서는 crawl걸음새의 다리 이동 순서를 유지하려는 경향이 있다. 비 주기적 걸음새에 대한 연구에서 중요한 문제는 교착 상태(Deadlock)의 회피이며, Hirose의 연구[2]에서는 평지에서도 부적절한 걸음새에 의해 보행 로봇이 교착 상태에 빠질 수 있음을 보였다.

그림1은 4족 보행 로봇이 crawl 걸음새의 다리 이동 순서(1-4-2-3)로 전진하는 모습을 나타내고 있다. step 4에서 다리3이 기구적인 이동한계에 도달하였기 때문에 이동을 계속하기 위해서는 다리3을 들어야하는 데 다리 3을 들 경우 보행 로봇이 불안정해지기 때문에 다리 3을 들 수 없다. 이와 같은 상태를 교착상태라 한다.

Hirose는 이와 같은 교착 상태가 발생한 원인이 step 2에서 다리 4을 너무 앞(P_4)에 착지했기 때문이었음을 지적하였다. 만약에 다리 4를 P_4 에 착지했을 경우에는 step 4에서 교착 상태에 이르지 않을 수 있다. 따라서 다리 3이 기구적인 이동 한계에 도달했을 때 다리 1,2,4의 착지점을 연결한 삼각형내에 무게 중심이 위치할 수 있도록 다리4의 착지점 선택영역을 제한하는 Diagonal principle I을 제안하였다. 또한 step 2에서 다리 4의 착지점을 너무 뒤에 위치시킬 경우 step 3에서 다리 2를 들어 올릴 수 없기 때문에, 가능한 한 crawl 걸음새의 다리 이동 순서를 유지하도록 다리 4의 착지점 선택 영역을 제한하는 Diagonal principle II를 제안하였다.

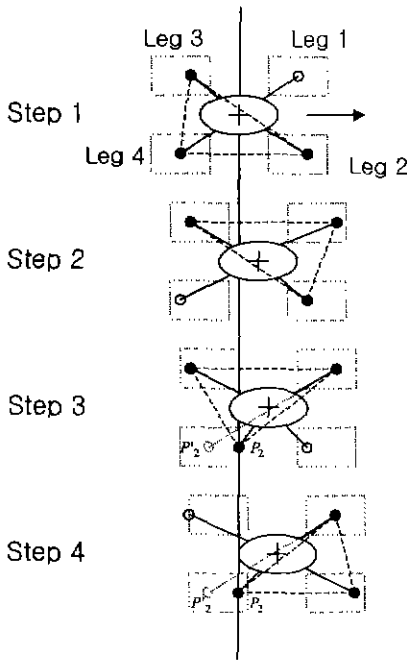


Fig. 1 Sequences leading to deadlock

이와 같이 제안된 Diagonal principle들은 뒷쪽 다리에만 적용되는 제한 조건이다. 하지만 저자의 이전 연구[8]에서 crawl 걸음새는 대각상에 있는 두 다리(예를 들어 다리 1,4)를 연속적으로 들어 옮기되 그 다음에 나머지 두 다리(다리 2,3)가 차례로 옮겨 질 수 있도록 착지함을 보였고, 이와 같은 crawl 걸음새로 이동이 가능하기 위한 지지 조건을 제시한 바 있다. 또한 이 조건을 만족시킬 경우 적용 가능한 비 주기적 걸음새 알고리즘을 제안하였다. 이 연구를 바탕으로 본 논문에서는 착지 가능한 영역 중 crawl 걸음새를 지속할 수 있는 착지점 탐색 영역의 선정에 대해서 논의하고자 한다.

2. 본론

2.1 보행 로봇의 모델링

본 논문에서는 4족 보행로봇이 그림 2와 같이 임의 형태의 기구학적인 이동 영역을 가질 수 있다고 가정한다. xy 좌표계와 uw 좌표계는 그 원점을 로봇의 무게 중심으로 하며 좌표 축 x 는 보행 로봇의 기구적인 전방을 향하고 좌표 축 u 는 직선 이동 방향을 향하고 있다. 그 사이 각 α 를 crab 각이라고 한다. 또한 각 다리 i 의 착지점으로 부터 직선 궤적을 따라 이동 방향의 반대 방향으로 이동 할 때 각각의 기구적 이동 영역과 교차되는 점까지의 거리를 기구적 이동 여유 k_i 라 한다.

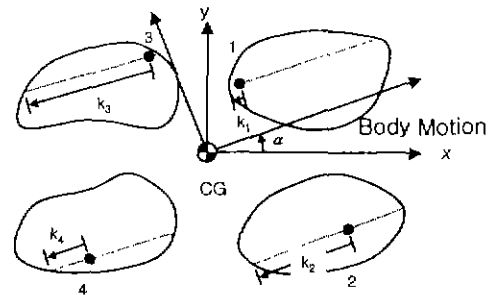


Fig 2 Kinematic model of quadruped

2.2 crawl걸음새에 적합한 지지 조건

보행 로봇의 앞쪽 다리를 f , 대각상에 있는 뒷쪽 다리를 r , 다리 f 의 측면에 있는 다리를 \bar{f} , 다리 r 의 측면에 있는 다리를 \bar{r} 라 할 때, 보행 로봇이 f r \bar{f} \bar{r} 의 다리 이동 순서로 전진 이동할 수 있다면 기구적 이동 여유들은 다음 조건을 만족시킨다.

$$d_f \geq 0, k_r - d_f \geq 2S, k_{\bar{f}} - d_f \geq 2S, k_{\bar{r}} - d_f \geq 4S \quad (1)$$

여기에서 d_f 는 다리 f 를 들 수 있는 이동 한계까지 무게 중심의 이동량이며 S 는 안정 여유이다.

그림 3은 고정 좌표계 XY 에서 보행 로봇이 무게 중심이 직선 궤적을 따라 이동하는 모습을 나타내며 다리 f 를 들 수 있는 이동 한계에 이르렀을 경우 다리 f 와 다리 \bar{f} 의 착지점을 연결한 직선과 무게중심까지 이동 궤적을 따라 측정된 거리가 안정 여유 S 와 같으며 그 이상 이동할 경우 다리 f 를 들어 올릴 수 없게 된다.

또한 다리 f 를 들 수 있는 이동 한계에 이르렀을 경우 다리 f 와 다리 \bar{f} 의 착지점을 연결한 직선과 무게중심까지 이동 궤적과 반대 방향을 따라 측정된 거리가 안정 여유 S 와 같으며 그 이상 이동할 경우 다리 r 을 들어 올릴 수 있게 된다.

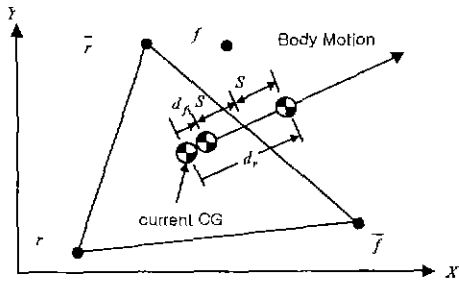


Fig.3 Marginal supporting states for leg f and r

다리 r 을 들 수 있는 이동 한계까지 무게 중심의 이동량을 d_r 이라 할 때 보행 로봇이 r - f - \bar{r} 의 다리 이동 순서로 전진 이동할 수 있다면 기구적 이동 여유들은 다음 조건을 만족시킨다.

$$k_f - d_r \geq 2S, k_r - d_r \geq 0, k_{\bar{r}} - d_r \geq 0, k_{\bar{r}} - d_r \geq 2S \quad (2)$$

조건(1)을 앞다리 f 를 들어 옮기며 crawl 걸음새로 이동하기 위한 적합 지지 조건이라 하고 조건(2)를 뒷다리 r 을 들어 옮기며 crawl 걸음새로 이동하기 위한 적합 지지 조건이라 하기로 한다.

보행 로봇의 지지 상태가 조건(1)을 만족시킬 경우, 다리 f 와 다리 r 을 들어 옮긴 후의 새로운 지지 상태가 다리 \bar{r} 에 대한 적합 지지 조건을 만족시키도록 다리 f 와 다리 r 의 착지점을 선택한다면 지속적으로 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 보행로봇이 이동할 수 있다. 또한 보행 로봇의 지지 상태가 조건(2)를 만족시킬 경우, 다리 r 을 들어 옮긴 후의 새로운 지지 상태가 다리 \bar{r} 에 대한 적합 지지 조건을 만족시키도록 다리 r 의 착지점을 선택한다면 역시 지속적으로 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 보행로봇이 이동할 수 있다.

2.3 착지점 탐색 영역

2.3.1 조건(1)을 만족시킬 경우

현재의 지지 상태가 조건(1)을 만족시켰다고 할 때 현재의 지지 상태에서부터 다리 f 를 들어올릴 때까지 무게 중심이 이동한 거리를 d_f^L , 다리 f 를 착지시킬 때까지 무게 중심이 이동한 거리를 d_f^P , 다리 r 을 들어올릴 때까지 무게 중심이 이동한 거리를 d_r^L , 다리 r 을 착지시킬 때까지 무게 중심이 이동한 거리를 d_r^P 이라 하면 이들은 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$0 \leq d_f^L \leq d_f^P \leq d_f, d_r \leq d_r^L \leq d_r^P, \quad (3)$$

들어 옮기는 다리의 착지 가능 영역은 그 다리를 착지할 때 무게 중심의 위치에 의해서만 결정되기 때문에 $d_f^L = 0$, $d_r^L = d_r$ 으로 해도 무방하다. 따라

서 조건(3)으로부터 d_f^P , d_r^P 에 대해 다음을 유도할 수 있다.

$$0 \leq d_f^P \leq d_f, d_r \leq d_r^P, \quad (4)$$

다리 r 을 착지 시켰을 때 다리 f 의 기구적 이동 여유를 k_f , 다리 r 의 기구적 이동 여유를 k_r 이라 하자. 그리고 다리 r 을 착지 시킨 후의 새로운 지지 상태에서 다리 \bar{r} 를 들 수 있는 이동 한계까지 무게 중심이 이동한 거리를 $d_{\bar{r}}$ 라고 하자.

다리 r 을 착지 시킨 상태에서 다리 \bar{r} 에 대한 적합 지지 조건을 만족시키면 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 계속 전진 이동할 수 있다.

다리 r 을 착지 시킨 상태까지 무게 중심이 이동한 거리가 d_r^P 이므로 다리 \bar{r} 의 기구적 여유 $k_{\bar{r}}$ 는 $k_{\bar{r}} - d_r^P$ 이고 다리 \bar{r} 의 기구적 여유 $k_{\bar{r}}$ 는 $k_{\bar{r}} - d_r^P$ 가 된다.

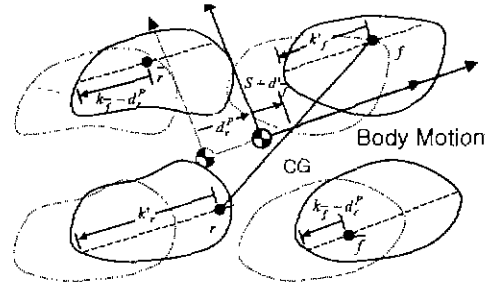


Fig.4 Supporting state after leg r is placed

따라서 이 상태가 \bar{r} 에 대한 적합 지지 조건을 만족시키기 위한 다음과 같은 조건을 조건(1)로부터 유도할 수 있다.

$$d_{\bar{r}} \geq 0, k_{\bar{r}} - d_r^P - d_{\bar{r}} \geq 2S, k_f - d_{\bar{r}} \geq 2S,$$

$$k_r - d_{\bar{r}} \geq 4S \quad (5)$$

다리 r 을 착지 시킨 상태에서 모든 다리들이 기구적인 이동 영역을 벗어나지 않고 또한 위의 조건(4),(5)를 만족시키기 위해서는 d_f^P , d_r^P 과 $d_{\bar{r}}$, k_f 와 k_r 이 다음 조건을 만족시켜야 된다.

$$0 \leq d_f^P \leq d_f, \quad (6)$$

$$d_r \leq d_r^P \leq k_r, d_r^P + d_{\bar{r}} \leq k_{\bar{r}} - 2S, d_{\bar{r}} \geq 0, \quad (7)$$

$$k_f \geq d_{\bar{r}} + 2S, k_r \geq d_{\bar{r}} + 4S. \quad (8)$$

다리 r 을 착지 시킨 시점에서 다리 f 의 착지점이 존재할 수 있는 영역은 d_f^P 와 $d_{\bar{r}} + 2S$ 에 의해서 결정되고 다리 r 의 착지점이 존재할 수 있는 영역은 d_r^P 과 $d_{\bar{r}} + 4S$ 에 의해서 결정된다. d_f^P 가 클수록 착지점이 존재할 수 있는 영역이 커지기 때문에

$d_f^p = d_r^p$ 로 하는 것이 바람직하다.

그림5는 다리 f 의 착지점이 존재할 수 있는 영역과 다리 r 의 착지점이 존재할 수 있는 영역을 음영으로 나타내고 있다.

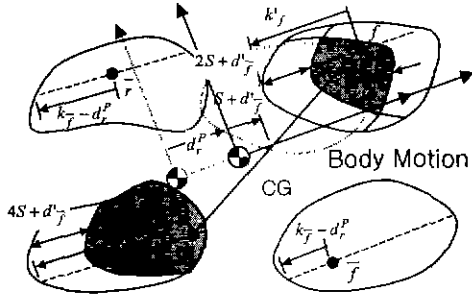


Fig. 5 Footholds existence region for Leg f and r when the leg r is just placed

실제 착지점 탐색 영역은 조건 (7)을 만족시키는 d_r^p 과 d_f^p 범위 대한 착지점 존재 영역들의 합이며 각 다리에 대한 착지점 탐색 영역내에 있는 다리 f 의 착지점과 다리 r 의 착지점을 연결한 직선과 초기 무게 중심과의 거리 $d_r^p + d_f^p + S$ 가 조건(7)을 만족시키기만 하면 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 지속적으로 전진 이동할 수 있다.

2.3.2 조건(2)만을 만족시킬 경우

초기 지지 상태가 조건 (1)을 만족시키지는 못하지만 조건 (2)를 만족시키는 경우 다리 f 를 들어 옮길 수 없지만 다리 r 을 들어 옮길 수 있다.

다리 r 을 들어 옮긴 후의 새로운 지지 상태가 다리 f 에 대한 적합 지지 조건을 만족시킨다면 역시 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 지속적인 전진 이동을 할 수 있다.

이 때 다리 f 의 기구적 이동 여유 k_f' 가 $k_f - d_f^p$ 이므로 이 상태가 다리 f 에 대한 적합 지지 조건을 만족시키기 위해서는 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} d_f^p &\geq 0, \quad k_f - d_f^p - d_f^p \geq 2S, \quad k_f - d_f^p - d_f^p \geq 2S, \\ k_f' - d_f^p &\geq 4S \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 이 경우에 $d_f^p + d_f^p$ 는 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$\begin{aligned} d_f^p &\leq d_f^p \leq k_f, \quad d_f^p + d_f^p \leq \min(k_f - 2S, k_f - 2S), \\ d_f^p &\geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$k_f' \geq d_f^p + 4S. \quad (11)$$

실제 착지점 탐색 영역은 조건 (10)을 만족시키는 d_r^p 과 d_f^p 범위 대한 착지점 존재 영역들의 합

이며 f 의 착지점과 다리 r 의 착지점 탐색 영역내에 있는 착지점을 연결한 직선과 초기 무게 중심과의 거리 $d_r^p + d_f^p + S$ 가 조건(10)을 만족시키기만 하면 crawl 걸음새의 다리 이동 순서로 지속적으로 전진 이동할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 4족 보행 로봇이 crawl 걸음새의 다리 이동 순서를 유지하면서 전진이동하기 위한 착지점 탐색 영역의 결정 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 착지점 탐색 영역은 crawl 걸음새로 걸을 수 있는 모든 착지점들을 포함하기 때문에 착지가능 영역이 좁고 불규칙한 지형에서의 착지점 선택에 유용하다.

참고문헌

1. R.B.McGhee, A.A. Frank, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," *Mathematical Biosciences*, vol.3, pp.331-351, 1968.
2. S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," *Int'l J. of Robotics Research*, Vol.3, no.2, pp.113-133, 1984.
3. R.B.McGhee, G.I. Iswandhi, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain," *IEEE Trans. on SMC*, vol.9, no.4, pp.176-182, 1979.
4. M.A.Jimenez, P. Gonzalez de Santos, "Terrain-Adaptive Gait for Walking Machines," *Int'l J. of Robotics Research*, vol.16, no.3, pp.320-339, 1997.
5. P. Gonzalez de Santos, M. A. Jimenez, "Generation of Discontinuous Gaits for Quadruped Walking Vehicles," *J. of Robotic Systems*, vol. 12, no. 9, pp. 599-611, 1995.
6. P.K.Pal, K.Jayarajan, "Generation of Free Gait - A Graph Search Approach," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.7, pp.299-305, 1991.
7. Y.J.Lee, Z. Bien, "Hierarchical Strategy for Planning Crab Gaits of a Quadruped Walking Robot," *Robotica*, vol.12, pp.23-31, 1994.
8. K.M.Jeong, J.H. Oh, "An Aperiodic Straight Motion Planning Method for a Quadruped Walking Robot," *Autonomous Robots*, vol.2, pp.29-41, 1995.