

다족 로봇을 위한 효과적인 보행 패턴 분석

Analysis on Effective Walking Pattern for Multi-Legged Robots

김병호

Byoung-Ho Kim

경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부 생체모방제어 및 로봇연구실

Bio-Mimetic Control & Robotics Lab., School of Electrical and Mechatronics Eng., Kyungsoong Univ.,
Busan, 608-736, Korea

요약

다족 로봇이 보행하기 위해서는 기본적으로 어떤 보행 패턴의 설정이 필요하다. 이러한 관점에서 어떤 보행 패턴이 효과적인 다족 보행을 가능하게 할 것인지를 분석하기 위하여 본 논문은 네 개의 다리를 이용하는 4족 보행 로봇 모델을 고려하며, 보행 순간마다 지지발에 의해 형성되는 지지다각형의 중심경로를 기반으로 보행 밸런스를 분석한다. 또한, 다족 로봇의 보행 밸런스를 평가하기 위한 성능지수를 제안한다. 시뮬레이션을 통하여, 4족 로봇의 보행에서 지지다각형의 중심 경로와 보행 밸런스는 사용된 보행 패턴에 따라 다르다는 사실을 보인다. 결과적으로, 보행 밸런스 지수와 생체모방 관점으로부터 4족 로봇의 보행을 위하여 유용한 보행 패턴을 제시한다.

키워드 : 다족 로봇, 보행 패턴, 지지다각형의 중심 경로, 보행 밸런스

Abstract

A proper walking pattern is to be assigned for a walk of multi-legged robots. For the purpose of identifying a good walking pattern for multi-legged robots, this paper consider a simple model of quadruped robotic walking and analyze its walking balance based on the centroid of foot polygons formed in every step. A performance index to estimate the walking balance is also proposed. Simulation studies show that the centroid trajectory of foot polygons and the walking balance in a common quadruped walking are different according to the walking pattern employed. Based on the walking balance index and a bio-mimetic aspect, a useful walking pattern for quadruped robots is finally addressed.

Key words : Multi-legged robot, Walking pattern, Centroid trajectory of foot polygon, Walking balance

1. 서론

이동 로봇(mobile robot)은 산업공정 뿐만 아니라 병원, 전시장, 가정 등 인간의 생활공간에서 다양한 일들을 수행하는데 매우 유용하게 사용될 수 있기 때문에 많은 연구자들이 이러한 응용분야에 활용하기 위한 이동 메커니즘, 운동계획, 제어방법 등에 대한 연구를 진행하고 있다. 일반적으로, 이동 기능은 고정된 로봇의 작업공간을 확장해 줄 수 있어서 보다 넓은 영역의 작

업 및 조작행위를 가능하게 해 줄 수 있다. 따라서 이동 메커니즘은 이동 로봇의 설계관점에서 매우 중요한 부분이 될 뿐만 아니라 성능구현에 있어서도 밀접한 관계가 있다. 현재까지 개발된 이동 로봇은 이동 메커니즘의 관점에서 크게 (1) 바퀴를 사용하는 경우, (2) 다리를 사용하는 경우, (3) 바퀴와 다리를 공유하는 경우와 같이 세 가지 유형으로 분류할 수 있다 [1]. 이러한 각 유형의 이동 로봇은 기본적인 이동 메커니즘이 다르기

접수일자 : 2008년 7월 10일

완료일자 : 2009년 10월 5일

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00189)

때문에 각각 서로 다른 특징을 갖고 있다. 바퀴구동형 이동 로봇은 비교적 평평한 작업공간에서 물체를 빠르게 이송하는 등의 작업에 매우 유용하다 [2]. 그러나, 상대적으로 거친 작업공간에서는 다리를 이용한 이동 로봇이 바퀴구동형 이동 로봇에 비해 더 잘 적용할 수 있다 [3]. 바퀴와 다리를 공유하는 이동 로봇은 구조적으로 복잡해 질 수 있지만, 작업공간의 특성에 따라 바퀴와 다리를 적절히 조합하여 사용할 수 있기 때문에 기능측면에서 다양한 장점을 갖는다 [4] [5].

본 논문에서는 계단을 오르거나 어떤 장애물이 산재해 있는 작업공간에서 다양한 일들을 원활하게 수행할 수 있는 보행 로봇(walking robot)에 대하여 고려한다. 일반적으로, 여러개의 다리를 이용하는 다족 보행 로봇은 자유도의 증가로 인하여 메커니즘이 복잡해 질 수 있지만, 작업지형이 불규칙하여 이동에 불편함이 발생하더라도 바퀴를 이용할 경우보다 쉽게 극복할 수 있기 때문에 매우 유용하다. 다족 로봇의 보행과 관련하여 살펴보면, 어떤 다리의 이동이 로봇의 움직임과 잘 조화되지 못하는 경우에는 로봇의 이동성(maneuverability)이나 밸런스(balance) 유지에 어려움이 발생할 수 있다. 그래서, 어떤 보행 로봇이 작업성을 원활하게 달성하기 위해서는 기본적으로 각 다리간의 조화로운 동작에 의해 적절한 밸런스를 유지하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 다족 로봇이 보행하기 위해서는 각 다리를 어떤 순서로 들어 올려서 원하는 위치로 적절히 움직여 주어야 한다. 따라서 효과적인 보행을 위한 방법을 고려할 필요가 있고, 모든 다리의 조화로운 보행 전략을 구성하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 보행 밸런스(walking balance) 관점에서 다족 로봇에 관한 연구를 고찰하고자 한다. 어떤 연구자들은 6족 로봇의 보행 안정성에 관한 연구를 수행하였다 [6]- [9]. 여섯 개의 다리를 갖는 보행 로봇이 고장 등의 이유로 인하여 4개의 다리만을 이용하여 보행을 해야 하는 경우에는 네 개의 다리 구조를 갖는 보행 로봇 메커니즘으로 고려해 볼 수 있다. 즉, 다자유도의 보행 로봇이 보행 성능을 최대한 발휘할 수 있기 위해서는 자유도가 줄어든 경우에 나타날 수 있는 문제점들을 극복할 수 있어야 한다는 관점에서 본 논문에서는 4족 로봇의 보행 문제를 다루고자 한다. 4족 로봇의 보행에서 4족을 모두 이용하는 경우에는 비교적 쉽게 설 수 있다. 그러나 4족 로봇이 보행을 하게 되면, 적어도 한개 이상의 다리를 들게 됨으로 인하여 나머지 다리들의 공간적 및 구조적 운동상황에 따라 로봇 전체의 밸런스가 불안정하게 될 수 있다 [10] [3]. 이때, 넘어지지 않으면서 잘 보행하기 위해서는 무엇보다도 로봇의 무게중심(center of gravity)의 위치가 매우 중요하게 작용한다. 즉, 보행이 진행되는 동안 로봇의 무게중심 위치가 평형(equilibrium)을 이룰 수 있는 위치로 신속하게 이동될 수 있다면, 비록 뒤땅 거리는 보행현상이 나타날 수는 있어도 로봇이 넘어지는 않게 될 것이다. 최근에 4족 로봇의 보행 밸런스와 관련된 연구 [11]가 진행되었는데, 지속적인 보행 밸런스의 유지문제는 다족 로봇의 활동에 있어서 필수적인 이슈(essential issue)가 된다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 선행연구를 바탕으로 어떤 보행 패턴

이 효과적인 다족 보행을 가능하게 할 것인지를 분석하고자 한다. 이를 위하여 일반적인 4족 보행 로봇 모델을 제시한 후, 다양한 순차보행 패턴에 따른 보행 상황에서 지지다각형(foot polygon)의 중심 경로와 제안된 보행 밸런스 지수(walking performance index)를 확인한다. 결과적으로, 보행 밸런스 지수와 생체모방 관점으로부터 4족 로봇의 보행을 위하여 유용한 보행 패턴을 제시한다.

2. 4족 보행 로봇 모델링

4족 로봇의 보행 패턴에 관한 분석을 위하여 그림 1에 나타낸 기존의 4족 보행 로봇을 살펴본다.

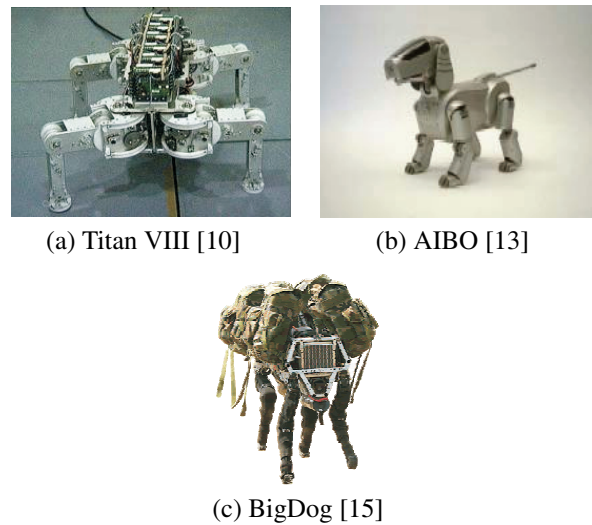


그림 1. 4족 보행 로봇
Fig. 1. Quadruped walking robots

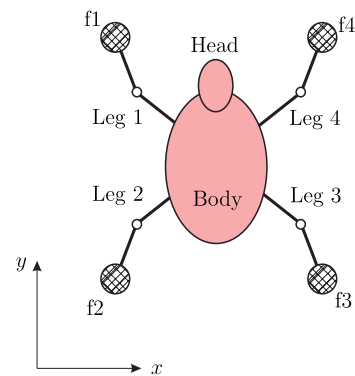


그림 2. 4족 로봇 모델
Fig. 2. Model of a quadruped robot

그림 1(a)에 나타낸 Titan VIII 로봇은 일본의 동경공대(Tokyo Institute of Technology)에서 개발한 4족 로봇이다 [10]. Arikawa와 Hirose 등에 의해 개발된 이 로봇은 향후 다양한 다족 로봇 메커니즘의 개발 및 다족 로봇을 위한 활발한 제어 알고리즘 연구의 계기가 되었

다. 그림 1(b)는 오락용 로봇분야에 관심이 많은 일본의 Sony회사가 개발 모방하여 개발한 로봇이다 [12] [13]. 최근에는 군사용 로봇분야에 많은 연구자들의 관심이 집중되고 있다. 그림 1(c)는 미국의 Boston Dynamics사에서 군사적 물자이송 등의 목적으로 개발한 4족 서비스 로봇을 나타낸다 [14]. 이 로봇은 거친 산악환경이나 위험한 지역에서 군사용 물자를 이송하는데 이용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이와 같은 연구로부터 주목하고자 하는 것은 다족 로봇의 보행을 위하여 필수적으로 요구되는 적절한 보행 패턴 및 밸런스 문제이며, 이러한 문제를 다루기 위하여 본 논문에서는 일반적인 4족 로봇을 그림 2와 같이 모델링하였다.

3. 보행 로봇의 지지다각형 및 중심

그림 2와 같은 4족 로봇의 보행 패턴 및 밸런스 문제를 다루는데 있어서 지지다각형의 중심점은 매우 중요한 요소로서 고려될 수 있다. 여기서, 지지다각형은 로봇의 각 발이 어떤 지면이나 플랫폼(platform)과 접촉하여 정해지는 각 발의 위치점을 연결한 다각형을 의미한다.

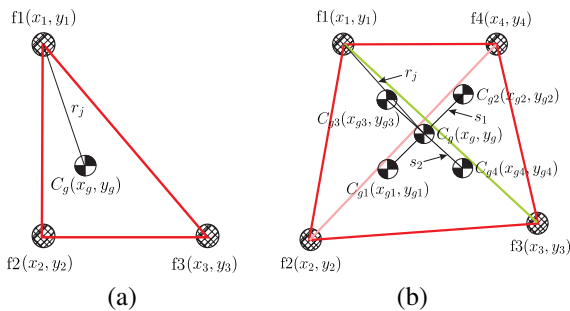


그림 3. 지지다각형
Fig. 3. Foot polygons

일반적으로, 다족 이동 로봇에서는 다리의 갯수에 따라 다양한 지지다각형을 고려해 볼 수 있다. 특히, 네 개의 다리를 이용하는 경우에는 그림 3과 같이 삼각형 또는 사각형 형태의 지지다각형을 고려할 수 있는데, 지지다각형이 삼각형인 경우, 이 지지다각형의 중심좌표($C_g(x_g(t), y_g(t))$)는 일반적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_g(t) = \{x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)\}/3 \quad (1)$$

$$y_g(t) = \{y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)\}/3 \quad (2)$$

여기서, $x_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$)와 $y_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$)는 각 발의 x - 및 y -방향의 위치를 나타낸다.

지지다각형이 사각형인 경우, 이 지지다각형의 중심좌표는 일반적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_g(t) = \frac{1}{s_1(t) - s_2(t)} \{s_1(t)x_{g1}(t) - s_2(t)x_{g3}(t) + y_{g3}(t) - y_{g1}(t)\} \quad (3)$$

$$y_g(t) = \begin{cases} s_1(t)\{x_g(t) - x_{g1}(t)\} + y_{g1}(t), \text{ or} \\ s_2(t)\{x_g(t) - x_{g3}(t)\} + y_{g3}(t) \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $x_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$)와 $y_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$)는 각 발의 x - 및 y -방향의 위치를 나타낸다. 파라미터 $s_1(t)$ 는 삼각형 $\Delta f_1f_2f_3$ 의 중심($C_{g1}(t)$)과 삼각형 $\Delta f_1f_3f_4$ 의 중심($C_{g2}(t)$)을 지나가는 직선의 기울기를 나타내고, 파라미터 $s_2(t)$ 는 삼각형 $\Delta f_1f_2f_4$ 의 중심($C_{g3}(t)$)과 삼각형 $\Delta f_2f_3f_4$ 의 중심($C_{g4}(t)$)을 지나가는 직선의 기울기를 의미한다.

4. 보행 밸런스 지수

보행 로봇의 무게중심점이 지지다각형의 중심으로 조정된다면, 이 보행 로봇의 밸런스는 안정화 될 수 있는데, 밸런스의 정도는 로봇 발의 위치에 따라 다를 수 있다. 즉, 지지다각형의 모양이 모든 발에 의해 더 광범위하게 형성되면 될수록 보행 밸런스는 증가될 수 있다는 사실은 자연스럽게 받아들일 수 있다. 이러한 관점에서, 본 논문에서는 보행 로봇의 밸런스 정도를 측정하기 위하여 다음과 같은 보행 밸런스 지수(walking balance index)를 제안하였다.

$$I_B = \min(r_j(t)), j = 1, \dots, n \quad (5)$$

여기서, $\min(r_j(t))$ 는 $r_j(t)$ 의 최소치를 제공하는 함수를 나타낸다. 파라미터 n 은 지지다각형이 삼각형인 경우에는 3으로 설정되고, 사각형인 경우에는 4로 설정된다. 그림 3에서 지지다각형의 중심과 j 번째 꼭지점간의 거리($r_j(t)$)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_j(t) = \sqrt{\{x_g(t) - x_j(t)\}^2 + \{y_g(t) - y_j(t)\}^2}. \quad (6)$$

식 (5)으로부터, 보행 밸런스 지수(I_B)는 지지다각형의 중심과 각 발의 위치간의 거리중에 최소값으로 결정됨을 알 수 있고, 이 지수는 보행 로봇이 사용하게 될 다양한 보행 패턴의 유용성을 평가하는데 활용될 수 있다.

5. 보행 시뮬레이션

4족 로봇의 보행을 위하여 유용한 보행 패턴을 분석하기 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 구체적으로, 보행 패턴에 따른 4족 로봇의 지지다각형(foot polygon)의 중심경로를 파악하였고, 제안된 보행 밸런스 지수(walking performance index)의 동향을 분석하였다.

5.1 보행 계획

일반적으로, k 개의 다리를 갖는 이동 로봇이 활용할 수 있는 보행 패턴(N)은 다음과 같이 결정된다 [1].

$$N = (2k - 1)! \quad (7)$$

여기서, $q!$ 은 q 의 계승(factorial)을 나타낸다. 예를 들어, 4족 로봇은 5040가지의 보행 패턴을 고려할 수 있게 된다.

본 논문에서는 많은 보행 패턴중의 하나로서, 한 개의 발을 순차적으로 변경시키면서 걷는 순차적 보행을 고려하였다. 이러한 순차적 보행의 경우, 이동할 발의 순서에 따라 그림 4와 같은 다양한 보행 패턴을 고려할 수 있는데, 여기서는 첫번째 발부터 옮겨가는 걸음을 고려하였으며, 표 1에 나타난 것과 같이 여섯 가지로 분류하였다.

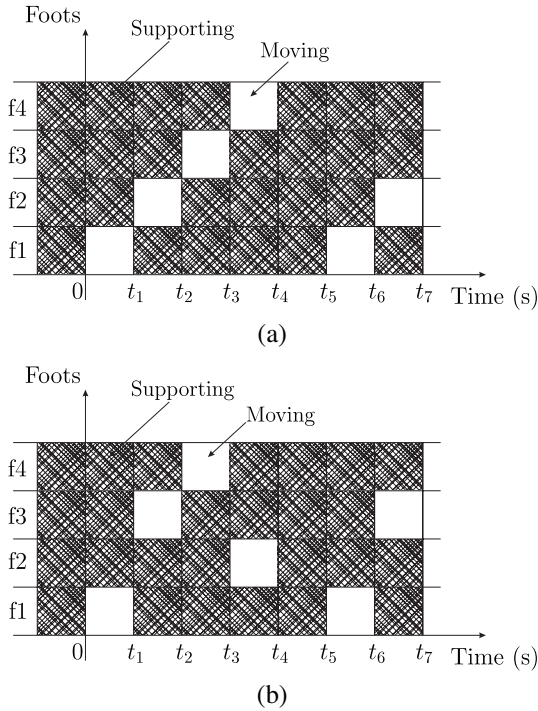


그림 4. 4족 로봇의 보행 패턴 예

Fig. 4. Walking patterns of a quadruped robot

표 1. 첫번째 발부터 이동하는 순차적인 보행 패턴
Table 1. Walking patterns starting from the first leg.

Case	Order of foot step	Remarks
I	f1 → f2 → f3 → f4 → f1	Fig. 4(a)
II	f1 → f2 → f4 → f3 → f1	
III	f1 → f3 → f4 → f2 → f1	Fig. 4(b)
IV	f1 → f3 → f2 → f4 → f1	
V	f1 → f4 → f2 → f3 → f1	
VI	f1 → f4 → f3 → f2 → f1	

시뮬레이션에서 고려한 그림 2와 같은 로봇의 보행 계획은 다음과 같다. 로봇은 초기에 네개의 다리 및 발로 평지에 정지해 있으며, 시간에 따라 로봇의 각 발은 순차적으로 현재 발 위치의 주위에 있는 임의의 가능한 위치로 이동하도록 계획하였다. 평면공간에서 x -와 y -방향으로 각 발의 경로는 각 다리에 의해 적절히 제

어될 수 있다는 가정하에 다음과 같이 계획하였다.

$$x_i(t + dt) = x_i(t) + p_i \text{rand}(1), \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (8)$$

$$y_i(t + dt) = y_i(t) + p_i \text{rand}(1), \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (9)$$

여기서, $\text{rand}(1)$ 함수는 0과 1사이 에 있는 임의의 값을 생성해 주는 랜덤(random)함수이다. 파라미터 p_i 은 보행의 보폭을 결정해 주는 역할을 하는데, 로봇의 동작 영역에 의해 조정될 수 있으며, 여기서는 0.05로 설정하였다. 어떤 발의 한 스텝(step)운동에 관련된 샘플링 시간 dt 는 5ms로 설정하였다.

5.2 4족 보행 시뮬레이션

다족 로봇의 보행 운동은 기본적으로 여러개의 다리에 의해 이루어지기 때문에 각 다리의 효과적인 조합이 안정된 보행을 위하여 매우 중요하다. 4족 로봇의 보행에서 정지해 있는 경우에는 네 다리의 다양한 조합에 따라 안정된 자세를 만들 수 있지만, 그림 4와 같이 보행이 시작되면, 나머지 세 다리의 조합에 의해 이 로봇의 밸런스가 결정된다. 결국, 세 다리의 조합이 적절하게 로봇의 밸런스를 잡아주지 못하는 상황에서는 보행 운동이 제대로 될 수 없게 된다. 이와 관련하여 지지다각형의 중심에 근거한 보행 전략을 고려하는 것은 보행 밸런스를 분석하는데 매우 유용할 수 있다. 구체적으로, 로봇의 무게중심점이 지지다각형의 내부에 투영되도록 조정되면, 로봇의 보행 밸런스는 잠재적으로 확보될 수 있다. 따라서, 로봇의 행동(behavior)을 파악하기 위하여 지지다각형의 중심의 이동 경로를 구하는 것은 매우 의미있는 일이 된다.

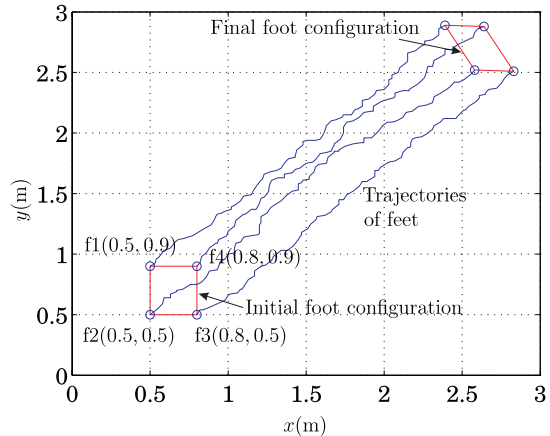
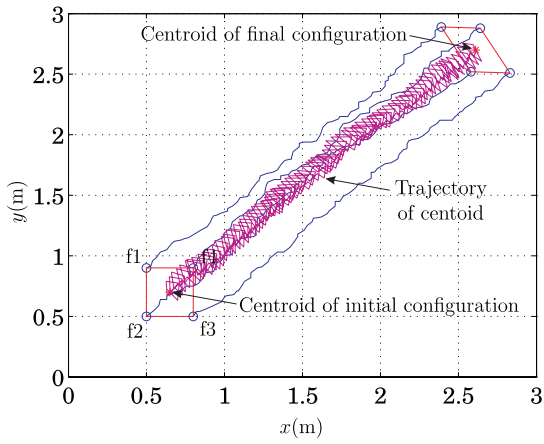


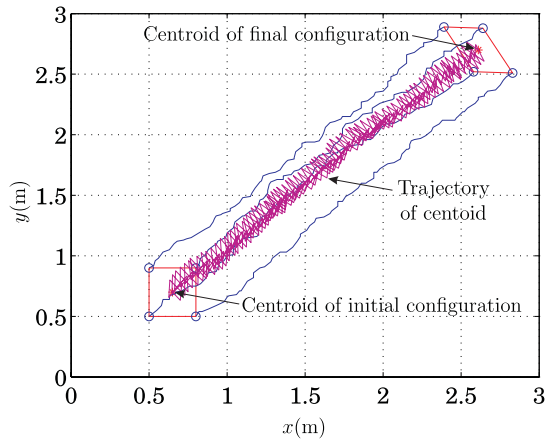
그림 5. 주어진 보행 로봇의 발 이동 경로

Fig. 5. Reference foot trajectory for the walking task

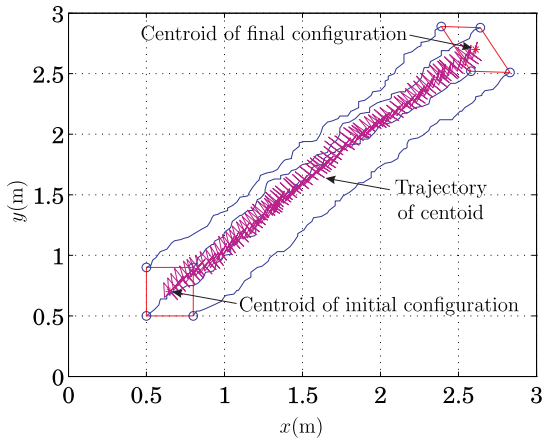
이러한 관점에서, 그림 2에 제시한 로봇 모델을 대상으로 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 구체적으로, 보다 효과적인 로봇의 보행 운동을 위하여 어떤 보행 패턴이 유용할 것인지를 파악하기 위하여 표 1에 제시한 모든 경우에 대한 비교분석을 시도하였다. 이를 위하여 어떤 대표적인 보행 경로를 설정할 필요가 있으며, 그림 5에 보인 경로를 공통으로 사용하였다. 이 경로는 식 (8)와 식 (9)에 의해 생성된 것이다.



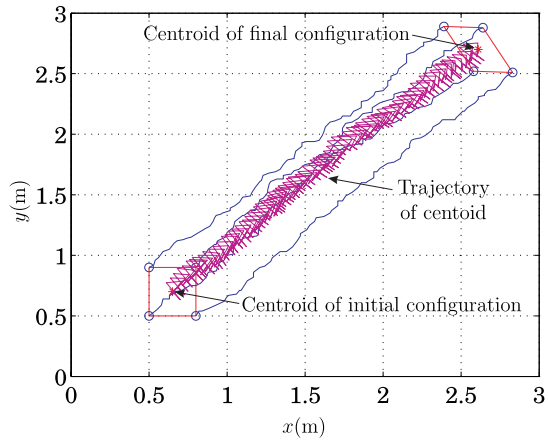
(a) Case I: $f1 \rightarrow f2 \rightarrow f3 \rightarrow f4 \rightarrow f1$



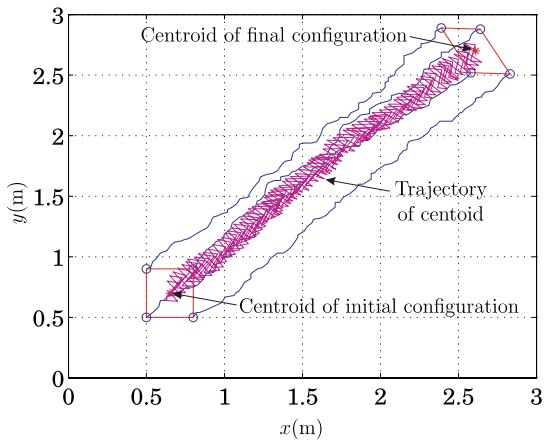
(b) Case II: $f1 \rightarrow f2 \rightarrow f4 \rightarrow f3 \rightarrow f1$



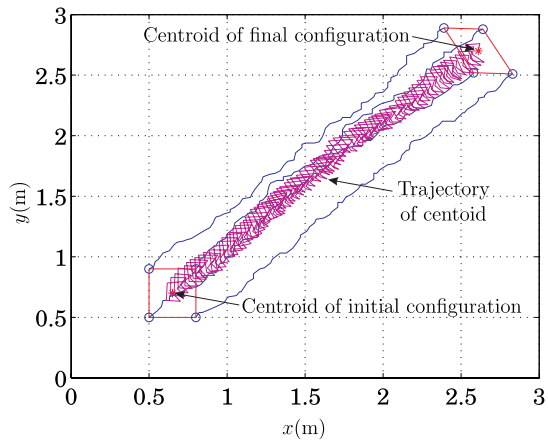
(c) Case III: $f1 \rightarrow f3 \rightarrow f4 \rightarrow f2 \rightarrow f1$



(d) Case IV: $f1 \rightarrow f3 \rightarrow f2 \rightarrow f4 \rightarrow f1$



(e) Case V: $f1 \rightarrow f4 \rightarrow f2 \rightarrow f3 \rightarrow f1$



(f) Case VI: $f1 \rightarrow f4 \rightarrow f3 \rightarrow f2 \rightarrow f1$

그림 6. 주어진 보행 과정에 대한 지지다각형의 중심 경로

Fig. 6. Centroid trajectory of foot polygons during the walking task

그림 6은 표 1에서 제시된 각 보행 패턴을 이용한 보행이 진행되는 동안 확인된 지지다각형의 중심 경로를 나타낸다. 여기서, 매 샘플링 시간동안에 정해지는 지지다각형의 중심은 식 (1) ~ (4)에 의해 구해진 것이다. 특히, 그림 6(a)는 첫번째 경우(Case I: $f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3 \rightarrow f_4 \rightarrow f_1$)에 대한 결과를 나타낸다. 즉, 이 경우는 보행 로봇의 각 발의 이동 순서가 첫번째, 두번째, 세번째, 그리고 네번째로 순차적으로 반복되는 보행을 의미한다. 초기상태에서는 로봇이 네 발에 의해 정지해 있으므로, 형성되는 지지다각형의 중심은 사각형의 중심이 됨을 확인할 수 있다. 로봇이 첫번째 발부터 시작하여 보행을 시작하게 되면, 매 순간 형성되는 지지다각형의 중심 경로는 이리저리로 불규칙하게 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 지지다각형의 중심 경로가 보행순서, 즉 디딤발의 순서에 따라 다르게 형성됨을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 기본적으로 지지다각형의 형태가 매 샘플링 시간마다 다르기 때문이다. 이러한 요동치는 경로로부터, 4족 로봇은 뒤뚱거리며 보행하고 있다는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 이와 같이 걷는 모습은 다족 보행 로봇이 구조적인 밸런스를 조정하기 위하여 취하는 자연스러운 행동으로 받아들여진다. 즉, 보행 로봇이 넘어지지 않으면서 원하는 경로를 따라 적절히 보행하기 위해서는 기본적으로 그러한 조정행동이 필요하다고 볼 수 있다. 그림에도 불구하고, 그러한 행동 패턴이 과도한 경우에는 안정된 보행 및 추가적인 조작 행위를 실행하는데 있어서 큰 오차를 발생시키는 원인이 될 수 있기 때문에 바람직하지는 않다. 실제 응용에 있어서, 급격하게 변화하는 지지다각형의 중심 경로를 추종하기 위해서는 유연한 보행을 기대할 수 없게 되며, 그러한 운동 패턴은 지나치게 큰 에너지가 요구된다. 결과적으로, 그림 6에 나타난 다양한 지지다각형의 경로를 분석해 보면, 보행 패턴에 따라 다족 로봇의 보행 밸런스가 달라질 수 있다는 사실을 확인할 수 있고, 이는 보행 패턴이 보다 더 안정화된 보행과 밀접한 관련이 있다는 의미를 갖는다.

다음은 표 1에 제시된 각 보행 패턴에 대하여 어떤 보행 패턴이 보다 더 안정화된 보행 밸런스를 제공할 수 있는지를 분석하기 위하여 제안한 보행 밸런스 지수를 확인하였다. 즉, 식 (5)에 의하면, 다양한 보행 패턴에 따른 로봇의 보행 밸런스를 평가하는 경우에 있어서 보다 더 큰 I_B 값을 갖는 경우가 잠재적으로 더 좋은 보행 밸런스를 갖게 된다.

그림 7은 표 1의 각 보행 패턴을 이용한 보행이 진행되는 동안 확인된 보행 밸런스 지수를 나타낸다. 이 그림을 살펴 보면, 전반부 보행에서는 세번째 보행 패턴(Case III: $f_1 \rightarrow f_3 \rightarrow f_4 \rightarrow f_2 \rightarrow f_1$)의 경우가 가장 좋은 보행 밸런스를 보이고 있다. 후반부에서는 다섯번째 보행 패턴(Case V: $f_1 \rightarrow f_4 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3 \rightarrow f_1$)의 경우가 상대적으로 우수한 것으로 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 전반적인 경향에 의하면, 두번째 보행 패턴(Case II: $f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_4 \rightarrow f_3 \rightarrow f_1$)의 경우가 가장 낮은 밸런스를 보이고 있다.

한편, 사전학습이 없는 아기의 기는 모습을 면밀히 관찰해 보면, 일반적으로, 세번째 보행 패턴을 사용하여 기어가는 행동을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 보행

로봇을 생체모방 관점에서 연구하는데 있어서 매우 흥미로운 사실이다.

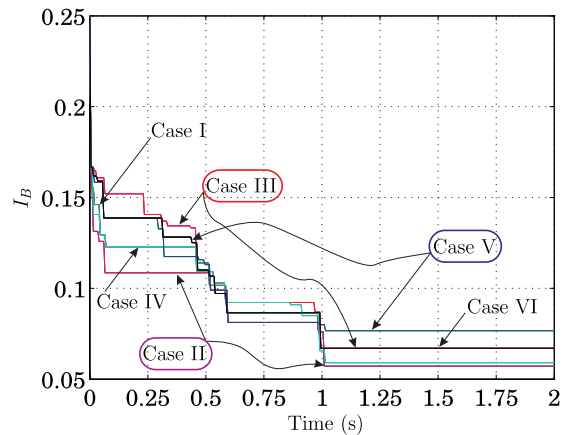


그림 7. 보행 밸런스 지수
Fig. 7. Balance index for the walking task

결과적으로, 그림 7에 나타난 보행 밸런스 지수와 생체모방 관점에 볼 때, 세번째 보행 패턴(Case III)이 4족 로봇의 순차적인 보행을 위하여 유용하게 활용될 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 다족 로봇을 위한 효과적인 보행 패턴을 확인하기 위하여 네개의 발로 이동하는 로봇을 대상으로 지지다각형의 중심 경로 및 보행 밸런스를 분석하였다. 다양한 보행 패턴을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 4족 로봇의 보행 밸런스는 로봇이 사용하고 있는 보행 패턴에 따라 다를 수 있다는 것을 확인하였다. 보행 밸런스는 오락용 로봇뿐만 아니라 다기능의 복잡한 일을 수행하는 다족 로봇의 안정된 성능을 위한 여러 다리의 건설한 운동계획 [13] [9] [16]과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 주어진 작업 및 작업공간에 따라 보다 효과적인 보행 패턴의 설정이 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 본 연구를 통하여 확인한 4족 로봇의 보행 밸런스와 아기의 기어가는 모습에서 관찰한 생체모방 관점에서 볼 때, 다리를 번갈아 가면서 보행하는 패턴중의 하나인 세번째 보행 패턴(Case III)이 실질적으로 4족 로봇의 순차보행을 위하여 매우 유용하게 활용될 수 있다고 판단된다.

향후, 다족 로봇을 활용한 다양한 작업을 위해서는 다족 보행 메커니즘의 최적 운동계획, 에너지 배분 및 효과적인 성능지수 등에 관한 연구와 랜덤 보행(random walking)에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, *Introduction to autonomous mobile robots*, The MIT Press, 2004.

- [2] Y. Hada, H. Gakuhari, K. Takase, and E. I. Hemeldan, "Delivery service robot using distributed acquisition, actuators and intelligence," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2997-3002, 2004.
- [3] J. Estremera and P. G. deSantos, "Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 6, pp. 1067-1076, 2005.
- [4] S. Nakajima, E. Nakano, and T. Takahashi, "Motion control technique for practical use of a leg-wheel robot on unknown outdoor rough terrains," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1353-1358, 2004.
- [5] M. Takahashi, K. Yoneda, and S. Hirose, "Rough terrain locomotion of a leg-wheel hybrid quadruped robot," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1090-1095, 2006.
- [6] S. Cordes, K. Berns, and I. Leppanen, "Sensor components of the six-legged walking machine LAURON II," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 71-76, 1997.
- [7] U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek, "RHex: a simple and highly mobile hexapod robot," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 616-631, 2001.
- [8] J. G. Cham, S. A. Bailey, J. E. Clark, R. J. Full, and M. R. Cutkosky, "Fast and robust: hexapedal robots via shape deposition manufacturing," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 21, no. 10-11, pp. 869-882, 2002.
- [9] P.-C. Lin, H. Komsuoglu, and D. E. Koditschek, "A leg configuration measurement system for full-body pose estimates in hexapod robot," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 411-422, 2005.
- [10] K. Arikawa and S. Hirose, "Development of quadruped walking robot TITAN-VIII," in *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 208-214, 1996.
- [11] B.-H. Kim, "Centroid-based analysis of quadruped-robot walking balance," in *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, FD1: Humanoid and Walking Robots Session, 2009.
- [12] M. Fujita and H. Kitano, "Development of an autonomous quadruped robot for robot entertainment," *Autonomous Robots*, vol. 5, pp. 7-18, 1998.
- [13] G. S. Hornby, S. Takamura, T. Yamamoto, and M. Fujita, "Autonomous evolution of dynamic gaits with two quadruped robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 402-410, 2005.
- [14] [Http://www.bostondynamics.com/](http://www.bostondynamics.com/), Boston Dynamics company, USA.
- [15] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the BigDog Team, "BigDog, the rough-terrain quadruped robot," in *Proc. of the 17th World Congress The Int. Federation of Automatic Control*, pp. 10822-10825, 2008.
- [16] K. Seo, J. Choi, and Y.-W. Cho, "Automatic gait generation for quadruped robot using GA with an enhancement of performance," *Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 4, pp.555-561, 2008.

저 자 소 개

김병호(Byoung-Ho Kim)



2001년 : 한양대 전자공학과(공학박사)
 1995년 ~ 2001년 : 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 학생연구원
 2002년 ~ 2004년 : Ritsumeikan대학(일본) 로봇공학과 JSPS Post-Doctoral Fellow
 2004년 ~ 2005년 : RIKEN 생체모방연구센터(일본) 연구원
 2005년 ~ 현재 : 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부 조교수
 2006년 ~ 2008년 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 국제이사
 2009년 ~ 현재 : 한국지능시스템학회 홍보이사

관심분야 : intelligent mobile manipulation, walking algorithm, humanoid robots, biomimetic mechanism modeling and control, multi-fingered robot/artificial hands and multiple arm control, macro/micro mechanism and intelligent control, and neural network applications.

E-mail : kimbh@ks.ac.kr