기하학적 탐색을 이용한 4각 보행로봇의 지그재그 걸음새 계획

Zigzag Gait Planning of a Quadruped Walking Robot Using Geometric Search Method

박 세 훈, 이 승 하, 이 연 정
(Se Hoon Park, Seung Ha Lee, and Yun Jung Lee)

Abstract : This paper presents a systematic method of the zigzag gait planning for quadruped walking robots. When a robot walks with a zigzag gait, its body is allowed to move from side to side, while the body movement is restricted along a moving direction in conventional continuous gaits. The zigzag movement of the body is effective to improve the gait stability margin. To plan a zigzag gait in a systematic way, the relationship between the center of gravity(COG) and the stability margin is firstly investigated. Then, a new geometrical method is introduced to plan a sequence of the body movement which guarantees a maximum stability margin as well as monotonicity along a moving direction. Finally, an optimal swing-leg sequence is chosen for a given arbitrary configuration of the robot. To verify the proposed method, computer simulations have been performed for both cases of a periodic gait and a non-periodic gait.

Keywords : zigzag gait planning, geometrical method, optimal-swing leg sequence, monotonicity

I. 서론

보행로봇은 바퀴 달린 로봇에 비해 습지, 사막과 같이 비평탄 지형에서 이동성이 뛰어나, 이에 관하여 지난 한 세기 동안 많은 연구가 되었다. 보행로봇연구는 크게 기구적 설계, 구동 및 제어, 환경인식, 걸음새 계획으로 나눌 수 있다. 이중 보행로봇의 고유 연구분야인 걸음새 계획은 몸체이동과 일련의 다리움직임을 계획하는 것으로 안전한 보행에 매우 중요한 역할을 담당한다.

기존의 주요 걸음새 관련 연구들을 살펴보면 1968년에 Mcghee와 Frank[1]에 의해 보행로봇 걸음새연구의 기틀이 마련되었으며, 1987년 Song[2]-[4]은 Local phase 개념을 도입하여 체계적인 걸음새 해석방법을 제안하였으며, 이를 토대로 세로 안정여유도를 최대로 하는 직선 주기 걸음새는 물결 걸음새임을 증명했다. 또한 비평탄 지형에서 보다 안정하게 걸을 수 있는 걸음새가 꾸준히 연구되었는데, 1979년 Mcghee와 Iswandhi의 free gait, 1984년 Ozguner의 Follow-the-leader gait 등이 그 예라 할 수 있다.

이와 같이 걸음새는 크게 주기와 비주기 걸음새, 2가지 부류로 나눌 수 있다[5]. 비주기 걸음새는 험난 지형에서도 큰 안정여유도를 가지고 보행할 뿐 아니라, 자연 생태계의 걸음새를 보다 사실적으로 구현할 수 있지만 비교적 구현 알고리즘이 복잡하다. 반면 주기 걸음새는 평지 보행시 효율적인 걸음새로서, 해석이 쉽고 구현이 용이하나 몸체이동이 직선이고 등속으로 움직임으로써 제한된 안정여유도를 갖는 단점이 있다.

그래서 최근에는 주기와 비주기 걸음새의 단점을 보완하고 두 걸음새에 모두 적용가능한 불연속 걸음새(discontinuous gait)[6]가 연구되고 있다. 보행시 몸체 이동속도를 변화시키면서 이동하는 불연속 걸음새는 1995년 Pablo[6]에 의해 물결 걸음새의 다리이동순서를 가지는 걸음새에 적용시켜 등속으로 이동하는 연속 걸음새에 비하여 높은 걸음새 안정여유도를 가짐을 보였으며, 이듬해 1996년 Tsukagoshi [7]는 경사면에서 보행시 물결걸음새 다리 이동순서로 보다 안정하게 걷기 위해 몸체를 지그재그로 이동하는 Intermittent Crawl Gait(ICG)를 제안했다. 또한 1999년 Cheng[8]는 한 주기를 균일한 구간으로 나누어 보다 안정한 방향으로 몸체를 좌우로 움직이는 E-sway, Y-sway 움직임을 추가하여 걸음새 안정여유도를 향상시킨 걸음새를 제안했다. 그러나 위와 같은 불연속 걸음새는 제한된 다리이동순서에 국한되어 있을 뿐 아니라 다리착지위치가 불규칙적으로 주어지는 로봇의 걸음새에 적용하기에는 어려운 제한점을 가지고 있다. 따라서 4각 로봇의 경우, 4!(=24)개의 다리 이동순서를 가진 걸음새가 존재하는데, 각각에 대한 몸체 이동경로 및 안정여유도를 비교하고 최적의 걸음새를 결정하는 걸음새 계획을 필요로 한다.

본 논문은 기하학적 탐색을 통해 체계적인 지그재그 걸음새 계획방법을 제안한다. 이 걸음새 계획방법은 몸체무게중심 이동범위를 단방향 직선이동에서 좌우 폭을 가진 영역으로 확대시킨 경우, 불필요한 몸체무게중심 이동을 자제함으로써 진행방향으로 몸체무게중심의 단조증가성(monotonicity)[5]을 보장하고 걸음새 안정여유도를 향상시키는 불연속 걸음새 계획방법이다.

본 논문의 효율적인 기술을 위하여 2장에서는 로봇 모델 및 가정을 설정하고 3장에서는 불연속 걸음새의 몸체 무게중심 이동경로와 안정여유도와의 관계를 규명한 후 기하학적 탐색방법을 통하여 이벤트 발생시, 지지 다각형 내에서 최대 안정여유도를 가지는 몸체무게중심 위치를 구한다. 이때 몸체무게중심 이동시 진행방향으로 단조증가성을 보장하기 위해 단조증가 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 본 논

접수일자 : 2001. 5. 4., 수정완료 : 2001. 11. 20.
박세훈,이승하, 이연정 : 경북대학교 전자공학과(mbb@palgong.knu.ac.kr/shalee@ee.kyungpook.ac.kr/yjlee@palgong.knu.ac.kr)

문에서 제안된 걸음새 계획방법의 타당성을 살펴보기 위하여 몇가지 걸음새에 대한 걸음새 계획의 예를 컴퓨터 모의실험을 통해 나타낸다. 또한 보행시 보폭의 변화에 따른 안정여유도의 변화를 살피고 가장 큰 안정여유도를 가지는 보폭을 결정한다.

II. 로봇 모델 및 가정

걸음새 계획이란 보행로봇이 안정적으로 보행하기 위해 각 다리와 몸체무게중심(COG)의 이동궤적을 계획하는 것으로서, 각 다리의 착지위치와 이동순서, 몸체의 이동속도 및 방향, 그리고 몸체 자세 등 매우 많은 파라미터를 포함한다. 이처럼 복잡한 걸음새 계획문제를 명확하게 하기 위해서는 다루고자 하는 걸음새에 대한 가정을 해야 한다. 예를 들어 물결걸음새는 몸체이동이 연속이고 직선방향이며 정칙(regular)[4]이어야 하며, ICG 걸음새는 4점 지지상태에서 몸체를 이동하며 4다리 모두 일정한 보폭으로 보행하는 걸음새이다. 본 논문 역시 명확한 서술을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1 : 평탄한 지면에서 보행하며 몸체는 지면에 평행하고 가로축(x)에 평행하다.

가정 2 : 각 다리의 도달영역은 직사각형이며 모두 같은 영역의 크기를 가지고 있다.

가정 3 : 보행시 각 다리와 COG와의 초기위치와 최종위치는 주어진다.

가정 4 : 비특이(non-singular) 기는 걸음새(crawl-gait)[2]만을 고려한다.

가정 5 : 안정성 판단시 로봇의 다리무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려한다.

위 가정을 바탕으로 보행로봇의 기구학적 특성을 기술하기 위한 기준 좌표계는 몸체 좌표계{B}와 세계 좌표계{W}로 나눌 수 있다. 그림 1에서와 같이 몸체 좌표계는 수평면상에 투영된 COG가 원점이 되며, 세계 좌표계는 평면상의 임의의 점을 원점으로 둔다. 몸체 좌표계에서 볼 때, 보행시 몸체가 이동함에 따라 몸체와 발의 상대적인 움직임 때문에 지지 다각형이 계속적으로 변하므로 걸음새 분석이 복잡해지고 몸체 이동경로를 파악하기가 어려운 반면, 세계 좌표계에서 로봇을 볼 때, 각 다리 위치는 주기 시작점에서의 위치와 다음 착지점의 위치 두 값으로 간단히 표현되며 몸체의 움직임 또한 쉽게 알 수 있으므로 몸체 무게중심의 안정여유도나 기구학적 구속조건 등을 표현하는 걸음새 분석에서 매우 효율적이다. 따라서 본 논문에서는 세계 좌표계에서 본 파라미터를 이용하여 걸음새 분석 및 계획을 한다.

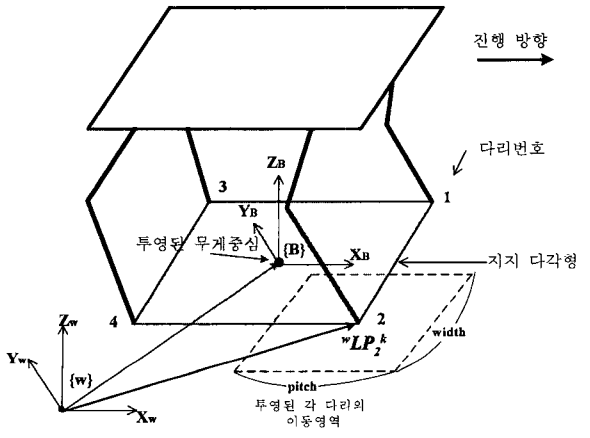


그림 1. 로봇모델 및 좌표계.
Fig. 1. Robot modeling and coordination.

일반적으로 걸음새 계획은 각 다리와 COG의 위치관계를 이용하여 가장 안정된 걸음새 구현을 목적으로 한다.

보행시 안정성의 평가척도는 세로 안정여유도(S_L), 안정여유도(S_M), 에너지 안정여유도(energy stability mar -gin)로 나눌 수 있다. 세로 안정여유도는 지지 다각형의 좌우 옆면과 COG와의 거리가 고려되지 않기 때문에 불규칙한 보행자세를 가진 로봇의 안정성을 판별하기에는 부적절하다. 그리고 에너지 안정여유도는 평지 보행 시 안정여유도와 같으므로 본 논문에서는 안정여유도를 보행 시 안정성의 평가척도로 사용한다.

안정여유도 계산을 위해서는 보행 시 각 다리 발끝의 위치좌표가 주어져야한다. 기존의 걸음새 분석은 첫 번째 이동다리가 이륙한 후 4번째 이동다리가 착지할 때까지를 한 주기로 하여 이륙 및 착지 이벤트 발생시점에서 다리위치만을 고려한다. 왜냐하면 안정여유도는 지지다리와 COG 위치와의 관계식으로 나타나고, 가정 5로부터 이동중인 다리는 정적으로 보행하는 로봇의 안정여유도에 아무런 영향을 미치지 않기 때문이다. 하지만 이러한 걸음새 분석은 첫 번째 이동다리의 이륙과 동시에 이동하는 보행로봇의 경우 유용하지만 첫 번째 이동다리 이륙직전 또는 4번째 이동다리 착지직후 4점 지지상태에서 COG를 이동하는 경우는 고려되어 있지 않다. 1번째 이벤트(이륙) 발생 후 3점 지지상태에서 COG를 이동하는 것보다, 1번째 이벤트 발생 전 4점 지지상태에서 COG를 미리 이동할 경우, 더 큰 안정여유도로 이동 할 수 있을 뿐 아니라, 4번째 이동다리의 착지이후 4점 지지상태에서 COG를 이동하면 다음 걸음새가 시작할 때보다 안전한 상태에서 보행할 수 있으므로 이를 고려할 경우 보다 큰 걸음새 안정여유도 향상을 가져올 수 있다.

본 논문에서는 위 경우를 고려하여 첫 번째 이동다리 이륙직전 몸체이동을 0번째 이벤트, 4번째 이동다리 착지직후 몸체이동을 9번째 이벤트로 표현하여 한 주기동안 10개의 이벤트 발생시점에서 각 다리위치를 고려하여 안정여유도를 판별한다.

세계 좌표계를 기준으로 k번째 이벤트에서 j번째 이동다리 순서가 되는 i다리의 위치를 $^wLP_i^k$(i=1, 2, 3, 4)로 표현할 때 매 이벤트 발생시 각 다리 위치는

$$^wLP_i^k = \begin{cases} ^wLP_i^0 & \text{if } 0 \le k \le 2j-1 \\ ^wLP_i^9 & \text{if } 2j \le k \le 9 \end{cases} \quad (1)$$

과 같다. $^wLP_i^0$와 $^wLP_i^9$는 다리 i의 초기위치와 다음 착지점을 나타낸다. 예를 들어 물결 걸음새의 다리이동순서(3-1-4-2)로 보행할 때, 2번째 이동다리가 되는 1번다리의 위치변화를 살펴보자. 1번다리는 3번째 이벤트에서 다리이동

을 시작하므로 이륙직후 1번 다리위치는 초기위치와 동일한 ${}^{w}LP_1{}^{0}$이므로 ${}^{w}LP_1{}^{3}={}^{w}LP_1{}^{0}$이다. 또한 4번째 이벤트에서는 1번다리가 다음 착지점에 위치하게 되고 그 이후 세계좌표계에서 본 착지위치는 변하지 않으므로 ${}^{w}LP_1{}^{4}={}^{w}LP_1{}^{9}$이 된다.

III. 지그재그 걸음새 계획

1. 안정여유도 향상을 위한 COG 이동

한 주기동안 보행로봇의 몸체이동은 각 다리의 이륙 및 착지 이벤트에 따라 4번의 3점지지 이동구간과 5번의 4점지지 이동구간(0번째 이벤트, 9번째 이벤트 포함)으로 나눌 수 있다. 3점지지 이동구간은 이륙 이벤트 발생 직후부터 착지 이벤트 발생 전까지 3점 지지상태에서 COG를 이동하는 구간이고, 4점지지 이동구간은 착지 이벤트 발생 직후부터 이륙 이벤트 발생 직전까지 4점 지지상태에서 COG를 이동하는 구간을 말한다.

3점지지 또는 4점지지 이동구간에서 몸체가 한방향으로 직선이동 할 경우 이동구간 내의 최소 안정여유도점은 COG 이동 시작점과 끝점 중 작은 안정여유도를 가지는 점이 된다 [5]. 그러므로 각각의 이동구간에서 몸체를 한방향으로 직선이동 시킬 경우, 한 주기동안 3점지지 이동구간에서 8개, 4점지지 이동구간에서 10개의 점들의 안정여유도를 조사함으로써 걸음새 안정여유도(gait stability margin)를 알 수 있다.

그러나 3점지지 이동구간에서 COG 이동끝점은 이동다리가 착지 후 4점지지 이동구간에서 COG 이동시작점과 같고, 4점지지 이동구간에서 COG 이동끝점은 다음 이동다리 이륙후의 3점지지 이동구간에서 COG 이동시작점과 같으므로, 3점지지 이동구간의 COG 이동시작점과 끝점들의 안정여유도만 조사함으로써 걸음새 안정여유도를 알 수 있다. 이와 같은 사실을 바탕으로 본 절에서는 3점지지 이동구간의 COG 이동시작점과 끝점의 안정여유도를 증가시켜 걸음새 안정여유도 향상을 위해 COG 이동방법을 제안한다.

그림 2는 3점 지지상태에서 COG 이동경로 및 COG 이동범위를 나타낸다. 이륙 이벤트 발생직후 3점 지지상태에서 최대 안정여유도점을 a, 착지 이벤트 발생직전 최대 안정여유도점을 b라고 할 때 3점지지 이동구간에서 COG를 $\overline{ab}$를 따라 이동할 경우 COG 이동경로는 한방향으로 직선이동함으로써 $\overline{ab}$내의 한 점을 p라고 할 때 $S^k(p) \geq \min(S^k(a), S^k(b))$임을 알 수 있다. 이때 $S^k(p)$는 k번째 이벤트 발생시점에서 점 p의 안정여유도이다.

또한 그림 3은 4점지지 이동구간에서 몸체이동으로서 이전 3점지지 이동구간에서의 COG 이동끝점과 다음 3점지지 이동구간에서의 COG 이동시작점을 연결한 선분($\overline{cd}$)을 따

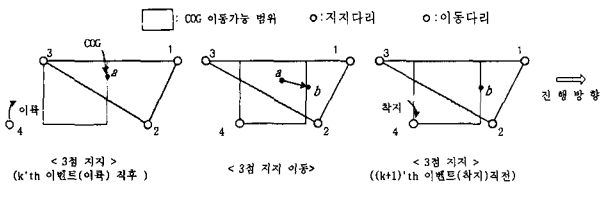


그림 2. 3점 지지상태에서 COG 이동.
Fig. 2. The movement of COG in 3-leg support state.

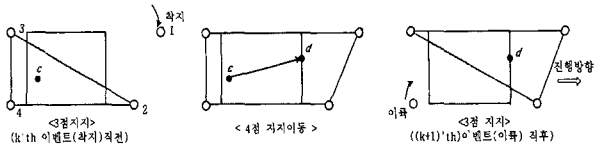


그림 3. 4점 지지상태에서 COG 이동.
Fig. 3. The movement of COG in 4-legged support state.

라 4점 지지상태에서 COG를 이동함으로써 항상 두점 c, d의 안정여유도보다 큰 안정여유도를 가진다. 따라서 3점지지 이동구간의 COG 이동 시작점과 끝점을 이은 선분을 따라 3점지지 이동과 4점지지 이동을 반복함으로써 많은 걸음새 안정여유도 향상을 가져올 수 있다.

지금까지 걸음새 안정여유도 증가를 위해 3점, 4점 지지상태에서의 COG 이동방법을 알아보았다. 그러나 이러한 몸체이동은 보행시 높은 안정성을 보장하지만 진행방향으로의 단조증가성을 결코 보장할 수 없기 때문에 COG가 앞뒤로 움직여서 효율성이 떨어질 수 있다. 따라서 3점지지 이동구간에서 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 찾을 필요가 있다.

2. 단조증가성과 최대 안정여유도를 보장하는 COG 이동

보행시 로봇의 진행방향은 $\pm x$, $\pm y$방향으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 진행방향이 x축 방향인 걸음새만 고려한다. 왜냐하면 진행방향이 x축이 아닐 경우 그 축이 x축이 되도록 좌표계를 재설정 함으로써 x방향 걸음새 계획을 모든 방향에 대해 쉽게 확장할 수 있기 때문이다. 또한 보행시 한 주기 걸음새 분석에 있어서 이륙직후 및 착지직전의 3점 지지상태를 일관성 있게 표현하기 위해 이착륙 시점으로 간주한다. 예를 들면 1번째 이벤트 발생직후(이륙직후)는 1번째 이착륙 시점이 되고 2번째 이벤트 발생직전(착지직전)은 2번째 이착륙 시점이 된다.

한 주기 동안 걸음새 안정여유도를 향상시키는 COG 이동경로는 3점지지 이동구간에서 발생한 COG 이동 시작점과 끝점을 연결한 선분들의 조합이다. 즉 이착륙 시점에서 발생한 3점 지지 다각형 내에서 구한 최대 안정여유도점의 값들이 이벤트 발생순으로 단조증가할 경우 COG는 x진행방향으로 단조증가성을 보장하면서 이동할 수 있다.

본 절에서는 한 주기 동안 각 이착륙 시점에서 발생한 3점 지지 다각형 내 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용하여 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 찾는 기하학적 탐색 알고리즘을 제안한다. 기하학적 탐색 알고리즘은 다음과 같이 3단계로 나누어 구현한다.

단계 1 : 지지 다각형 내에서 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용하여 같은 x값을 가지는 점들 중 최대 안정여유도 값을 가지는 점을 구한다(수직탐색).

단계 2 : 단계 1에서 구한 점들 중 가장 큰 안정여유도 값을 가지는 점을 구한다(수평탐색).

단계 3 : 단계 2에서 구한 점이 단조증가성을 만족하지 않을 때, 단조증가를 만족하는 최대 안정여유도점을 구한다.

2.1 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용한 최대 안정여유도점

본 절에서는 지지 다각형내의 COG 이동가능영역에서 안

정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용하여 쉽고 빠르게 최대 안정여유도 점을 찾는 방법을 제시한다. 이때 COG 이동가능영역은 주어진 각 다리에 대하여 COG 이동영역이 존재할 때 4다리에 대하여 공통으로 포함되는 COG 이동영역을 말한다. 2.2절에서 언급했듯이 걸음새 안정여유도를 높이기 위한 COG 이동경로는 이착륙 시점에서 발생한 3점 지지 다각형 내의 최대 안정여유도점만 고려하여 구할 수 있으므로 4점 지지상태에서 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 고려하지 않는다.

3점 지지상태에서 안정여유도 분포는 그림 4와 같이 삼각뿔 형태를 하고 있다. 그림 4의 점 A, B, D는 지지다리의 위치좌표이고 c는 지지 다각형(ΔABD)의 내접원의 중심점으로 최대 안정여유도를 가진다. 이때 선분 $\overline{Ac}$, $\overline{cB}$는 지지 다각형 내에서 같은 x값을 가지는 점들 중 가장 큰 안정여유도를 가지는 점들의 모임으로 '최대 안정 여유선'이라 정의한다.

따라서 COG 이동 가능영역이 $\overline{Ac}$, $\overline{cB}$를 포함할 경우 같은 x값을 가지는 점들 중 최대 안정여유도값을 가지는 점은 두 선분 위의 점이 되므로 단계 1은 쉽게 구할 수 있다. 그러나 COG 이동 가능영역이 이 선분을 포함하지 않을 경우, 영역 내 점들의 안정여유도를 모두 조사해야 되므로 많은 계산량을 필요로 한다. 그래서 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 잘 나타낼 수 있는 아래 용어들을 정의한 후 이를 이용하여 보다 효율적으로 안정여유도를 비교하여 단계 1을 쉽게 구현하는 방법을 제안한다.

그림 5(a)는 그림 4에 나타난 안정여유도 분포의 3점 지지 다각형이고, 그림 5(b)는 그림 4를 xz평면으로 수직투영한 그림으로 안정 여유 그래프(Stability Margin Graph: SMG)라고 정의한다. 그림 5(a)에서 g가 COG 이동가능 영역일 때, 이 영역내에서 최대 안정 여유선은 점 p_1, p_2, p_3, p_4를 연결한 선분의 모임이다. 이때 이 점들을 이동 가능점이라 정의하고, 이동 가능점들의 안정여유도를 연결한 선분을 최대 안정 여유 그래프(Maximum Stability Margin Graph: MSMG)라 정의한다.

최대 안정 여유선을 구하는 데 유용한 안정여유도 분포의 기하학적 특징은 그림 4에서 알 수 있듯이 최대 안정여유

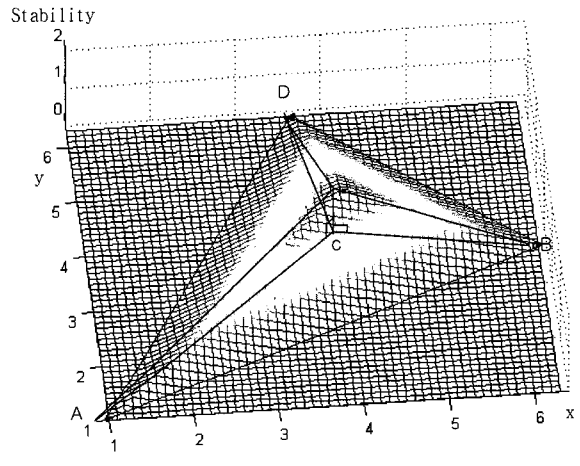


그림 4. 지지 다각형 내의 안정여유도 분포.
Fig. 4. Stability margin distribution of a support pattern.

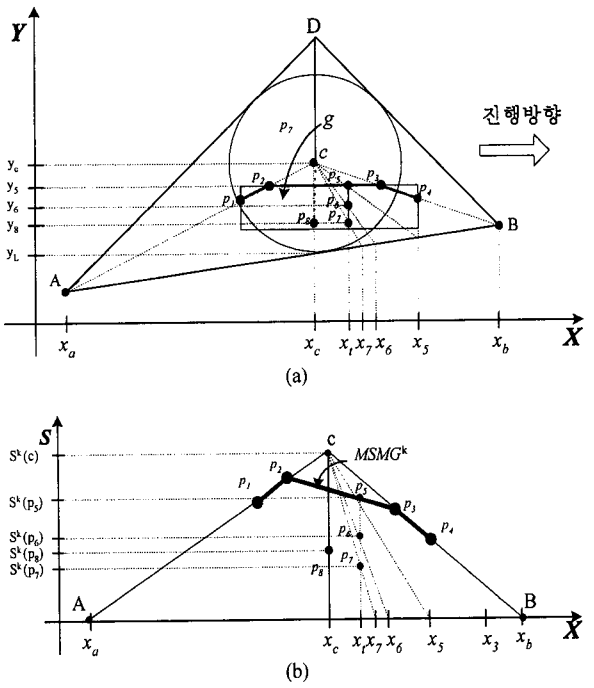


그림 5. 지지 다각형 (a) COG 이동가능 영역, (b) 안정 여유 그래프.
Fig. 5. Support pattern. (a) movable range of COG, (b) stability Margin graph.

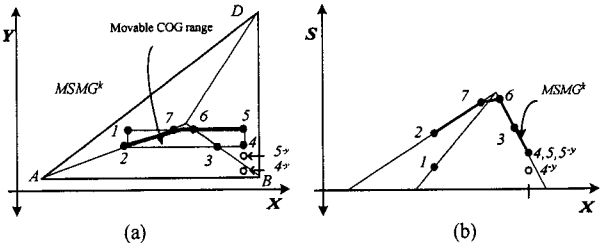


그림 6. 외력에 강인한 COG위치. (a) COG 이동가능 영역, (b) 안정 여유 그래프.
Fig. 6. COG movable position which strong with external force. (a) movable range of COG, (b) stability Margin graph.

도점 c에서 각 변으로 갈수록 안정여유도는 삼각뿔의 한 면을 따라 단조감소하며, 그림 5(b)에서도 쉽게 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 특징을 가진다.

특징 1 : 내접원의 중심에서 지지 다각형의 각 변으로 갈수록 안정여유도는 선형 감소한다.

그리고, 그림 5(a)에서 x_5, x_6, x_7는 내접원의 중심에서 같은 x값을 가지는 점 p_5, p_6, p_7을 향하여 각각 그은 직선이 지지 다각형의 한 변과 만나는 점의 x값으로서, 위 점의 안정여유도는

$$
\begin{aligned}
S^k(p_5) &= \frac{|x_t - x_5|}{|x_c - x_5|} \times S^k(c), \\
S^k(p_6) &= \frac{|x_t - x_6|}{|x_c - x_6|} \times S^k(c), \\
S^k(p_7) &= \frac{|x_t - x_7|}{|x_c - x_7|} \times S^k(c), \\
\therefore\ & S^k(p_5) > S^k(p_6) > S^k(p_7).
\end{aligned}
\tag{3}
$$

과 같고 그림 5(b)에서 쉽게 알 수 있다. 만일 변과 만나는 점의 x값이 내접원의 중심의 x값과 일치할 경우 분모가 0이 되므로 위 식에 적용될 수 없다. 이 경우 점의 y값을 이용하여

$$S^k(p_8)=\frac{y_8-y_L}{y_c-y_L}\times S^k(c) \tag{4}$$

와 같이 구할 수 있다. 따라서 다음의 특징을 가진다.

특징 2 : 몸체 이동가능 영역이 최대 안정 여유선을 포함하지 않는 영역에서 같은 x 값을 가지는 점들 중 최대 안정 여유선에 가까운 점일수록 먼 거리에 있는 점보다 안정여유도는 크거나 같다.

예외적으로 그림 6에서와 같이 지지 다각형의 한 변($\overline{BD}$)이 y축과 평행할 때, 같은 x 값을 가지는 임의의 점들이 모두 같은 안정여유도를 가지는 경우가 있다. 이때에는 보행시 로봇에 가해지는 외력(external force)[9]으로 인한 안정여유도 감소를 줄이기 위해 내접원의 중심점의 y 값과의 차가 가장 적은 y값을 가지는 점이 선택된다. 예를 들어 그림 6(a)에서 $-y$쪽으로 외력이 가해질 때 COG가 점 5에 위치할 경우 5^{-y}로, 점 4에 위치할 경우 4^{-y}로 이동한다. 이때 $S(5^{-y})\geq S(4^{-y})$이므로 점 5를 선택한다(그림 6(a)에서 최대 안정 여유선은 이동 가능점 p_2, p_7, p_6, p_5를 연결한 선분이 된다).

지금까지 이착륙 시점에서 발생한 3점 지지 다각형 내에서 같은 x값을 가지는 점 중 최대 안정여유도를 가지는 점들(최대 안정 여유선)을 구하였다. 최대 안정 여유선의 안정여유도를 나타내는 최대 안정 여유 그래프는 선분의 조합으로 나타난다. 이러한 기하학적 특징은 최대 안정 여유선 위의 모든 점에 대한 안정여유도를 조사하지 않고도 쉽게 최대 안정여유도점을 찾을 수 있게 한다. 즉 최대 안정 여유선을 이루는 각 선분사이에서의 안정여유도는 단조증가 또는 단조감소하므로 선분을 이루는 두 점 사이에서의 최대 안정여

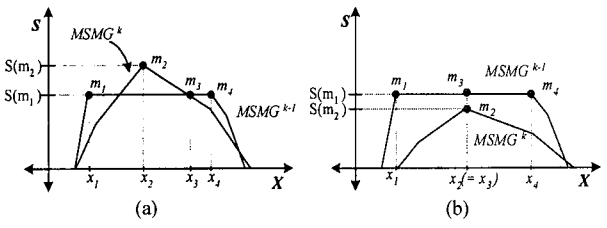


그림 7. 최대 안정 여유도점이 2개 이상일 때 걸음새 안정 여유도.

Fig. 7. Gait stability margin in case of more than two maximum stability marginal points.

표 1. 그림 7에서의 걸음새 안정 여유도.

Table 1. Gait stability margin in Fig. 7.

		k-1	k	gait stability margin
그림 7(a)	경우 1	$Sk^{-1}(m^1)$	$S^k(m_2)$	$S^{k-1}(m_1)$
	경우 2	$Sk^{-1}(m^4)$	$S^k(m_2)$	$S^{k-1}(m_1)$
그림 7(b)	경우 1	$Sk^{-1}(m^1)$	$S^k(m_2)$	$S^k(m_2)$
	경우 2	$Sk^{-1}(m^4)$	$S^k(m_2)$	$S^k(m_2)$

유도점은 선분의 두 끝점 중 하나가 된다. 따라서 선분의 끝점을 나타내는 이동 가능점들 중에서 가장 큰 안정여유도를 가지는 점이 지지 다각형 내에서 가장 큰 안정여유도를 가지는 점이 된다.

그러나 이동 가능점들을 연결한 선분의 두 끝점이 같은 안정여유도를 가지면 그 선분내의 모든 점들도 같은 안정여유도 값을 가진다. 이때에는 선분 내에서 어느 점을 선택해도 걸음새 안정여유도에는 아무런 영향을 끼치지 않으므로 두 점 사이의 임의의 점을 최대 안정여유도점으로 선택할 수 있다.

예를 들어 그림 7은 최대 안정여유점이 여러개인 경우일 때 안정 여유 그래프 및 걸음새 안정여유도이다. 걸음새 안정여유도가 k, $k-1$번째 이착륙 시점에서 일어난다고 가정할 때, $k-1$번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x 값은 $\overline{m_1m_3}$ 위의 모든 점의 x가 될 수 있다. 이때 위 2가지 경우에 대하여 각 이착륙 시점에서의 최대 안정여유도 및 걸음새 안정여유도는 그림 7에서 알 수 있듯이 $k-1$번째 이착륙 시점에서 어떤 점을 선택하더라도 표 1, 2에서 알 수 있듯이 그림 7(a)에서는 걸음새 안정여유도가 $S(m_1)$, 그림 7(b)에서는 $S(m_2)$가 됨을 알 수 있다.

경우 1 : $k-1$번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값을 x_1, k번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값을 x_2로 선택할 때.

경우 2 : $k-1$번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값을 x_4, k번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x 값을 x_2 를 선택할 때.

2.2 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점

걸음새 안정여유도를 증가시키기 위한 COG 이동경로는 한 주기동안 이착륙 시점에서 구한 각각의 최대 안정여유도점들을 연결한 선분의 조합이다. 이때 COG가 진행방향으로 단조증가성을 만족하면서 이동하기 위해서는 각각의 최대 안정여유도점의 x값들이 이륙 또는 착지 이벤트 발생 순서에 따라 점점 증가해야 한다.

본 절에서는 이착륙 시점에서 발생한 3점 지지 다각형내의 최대 안정 여유 그래프를 이용하여 COG가 진행방향으로 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 구하고자 한다. 이착륙 시점에서 구한 최대 안정여유도점의 x값이 바로 이전 이착륙 시점에서 구한 최대 안정여유도점의 x 값보다 작을 때 두 이착륙 시점에서의 안정 여유 그래프는 그림 8과 같이 3가지 경우 중 하나로 나타난다. 따라서 각 경우에 따라 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도점의 x 값은 다음과 같이 구할 수 있다(x^k, x^{k-1}은 단조증가성를 만족하지 않은 상태에서의 최대 안정여유도점의 x값이고, $S^k(x^k)$는 최대 안정여유 그래프에서 x^k에 해당하는 안정여유도값이다).

경우 1 : 그림 8(a)에서와 같이 연속된 이착륙 시점($k-1$, k번째 이착륙 시점)에서 발생한 최대 안정여유도점의 관계가 $S^k(x^k)\leq S^{k-1}(x^k)$이면 x^k는 $k-1$, k번째 이착륙 시점에서 단조증가성의 보장하는 최대 안정여유도점의 x 좌표로 선택된다.

경우 2 : 그림 8(b)에서와 같이 연속된 이착륙 시점

($k-1$, k번째 이착륙 시점)에서 발생한 최대 안정여유도점의 관계가 $S^k(x^{k-1}) \geq S^{k-1}(x^{k-1})$이면 x^{k-1}은 $k-1$, k번째 이착륙 시점에서 단조증가성의 보장하는 최대 안정여유도점의 x좌표로 선택된다.

경우 3 : 그림 8(c)에서와 같이 연속된 이착륙 시점($k-1$, k번째 이착륙 시점)에서 발생한 최대 안정여유도점의 관계가 경우 1, 2 가 아닐 때, 최대 안정 여유 그래프가 만나는 점의 x 값이 선택된다.

또한 한 주기 동안 8개의 이착륙 시점이 발생하므로 3개 이상의 최대 안정여유도점들이 단조증가성을 만족하지 않을 수 있다. 이러한 경우 단조증가를 만족할 때까지 위 3가지 경우를 순차적으로 반복적용한다.

예를 들어 그림 9(a)는 1, 2, 3번째의 각 이착륙 시점에서 단조증가성을 만족하지 않는 최대 안정여유도점과 최대 안정 여유 그래프($MSMG$)이다. 먼저 9(a)에서 2번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값(x^2)과 1번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값(x^1)이 단조증가성을 만족하지 않는다. 이때 $MSMG^1$, $MSMG^2$의 관계가 경우 3에 해당하므로 그림 9(b)와 같이 1번째와 2번째 이착륙 시점에서 최대 안정여유도점의 x값은 둘 다 x^{12}가 된다. 그러나 x^{12}는 3번째 이착륙 시점에서의 최대 안정여유도점의 $x(x^3)$값과 단조증가성을 보장하지 않는다. 이때 $S^3(x^{12}) \geq S^2(x^{12})$이므로 $MSMG^2$, $MSMG^3$의 관계는 경우 2에 해당하므로 2번째와 3번째 이착륙 시점에서 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도점의 x값은 x^{12}로 바뀐다. 결과적으로 1번째, 2번째, 3번째 이착륙 시점에서 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도점의 x값은 x^{12}가 된다. 따라서 1번째와 이착륙 시점에서 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도는 $S^1(x^{12})$, 2번째 이착륙 시점에서는 $S^2(x^{12})$, 3번째 이착륙 시점에서는 $S^3(x^{12})$가 된다.

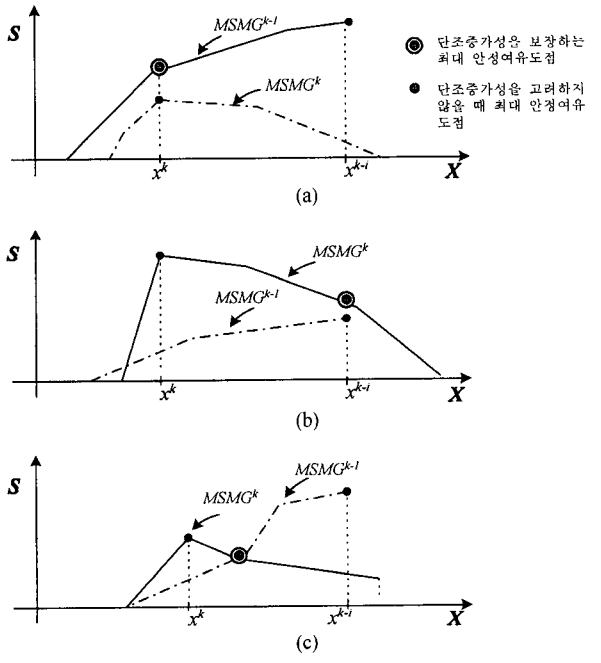


그림 8. 각 경우에 따른 최대 안정 여유 그래프 및 최대 안정여유도점.

Fig. 8. Maximum stability margin graph and points in each case.

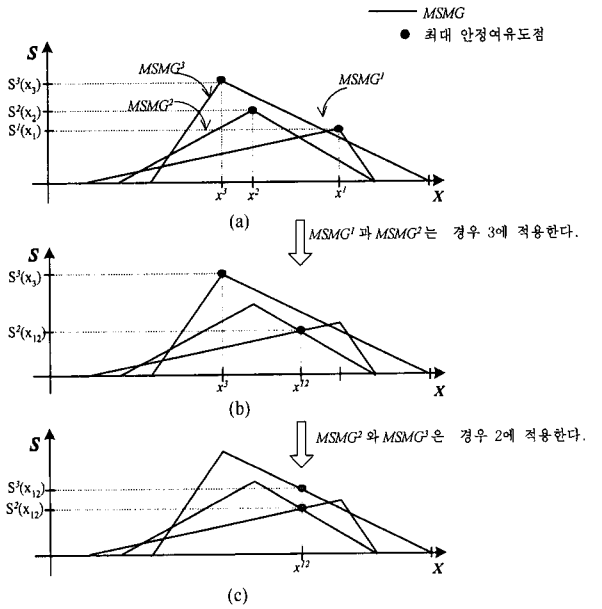


그림 9. 단조증가성을 보장하는 최대 안정 여유그래프.

Fig. 9. Maximum stability margin graphs which guarantee monotonicity.

이처럼 최대 안정 여유 그래프를 이용하면 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점의 x값을 쉽게 찾을 수 있다. 따라서 이착륙 시점에서 단조증가성을 만족하는 COG가 실제 이동할 위치는 안정 여유그래프에서 구한 x값과 같은 x값을 가지는 최대 안정여유도선 위의 점이 된다. 최대 안정 여유 그래프와 최대 안정여유도선은 1:1 대응관계에 있으므로 각 이착륙 시점에서 단 하나의 최대 안정여유도점을 구할 수 있다.지금까지 본 논문에서는 불연속 지그재그 걸음새의 걸음새 안정여유도를 향상시키기 위해 COG 이동경로 및 기하학적 탐색을 이용하여 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 구하였다. 따라서 전체적인 걸음새 알고리즘은 그림 10와 같다.

그림 11, 12는 물결 걸음새 다리이동순서(3-1-4-2)로 보행 시 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 따라 몸체를 이동하기 위해 다리 이착륙 발생시점에 따른 최대 안정여유 그래프 및 안정여유도이다. 그림 12(a)에서 알 수 있듯이 1, 2번째 이착륙 시점에서의 최대 안정여유도점과 3, 4번째 이착륙 시점에서의 최대 안정여유도점은 단조증가성을 만족하지 않는다. 또한 5, 6번째 이착륙 시점에서의 최대 안정여유도점과 7, 8번째의 최대 안정여유도점이 단조증가성을 만족하지 않으므로 단조증가 알고리즘의 경우 3을 적용하면 그림 12(b)와 같이 한 주기 동안 2개의 몸체 무게중심 이동위치가 존재한다. 따라서 단조증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 따라 COG 및 다리이동은

초기자세 → **COG 이동** → 3번다리 이륙 → 3번다리 착지 → 1번다리 이륙 → 1번다리 착지 → **COG 이동** → 4번다리 이륙 → 4번다리 착지 → 2번다리 이륙 → 2번 다리 착지 → **최종위치로 COG 이동**

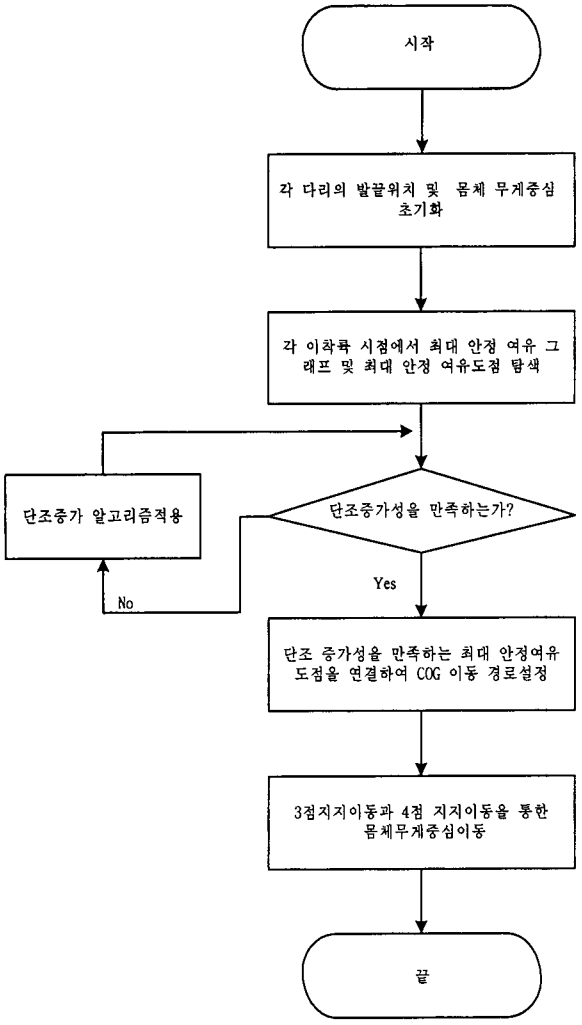


그림 10. 불연속 걸음새 계획.
Fig. 10. Discontinuous gait planning.

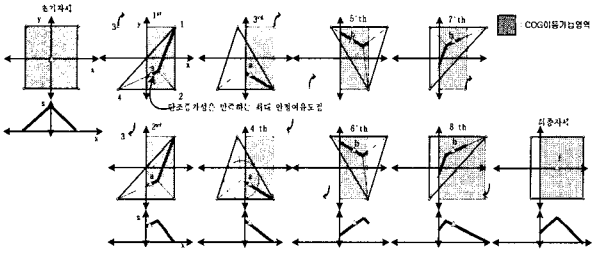


그림 11. 각 이착륙 시점에서 최대 안정 여유선과 최대안정 여유 그래프.
Fig. 11. Maximum stability margin line and *MSMG* at lift-and-landing instant.

과 같이 한 주기 동안 3번의 몸체 무게중심이동으로 최종위치까지 도달할 수 있다.

IV. 모의실험

지금까지 지지 다각형내 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용하여 진행방향으로 단조증가성을 보장하고 각 이벤트별 최대 안정여유도를 만족하는 몸체 무게중심 이동경로를 탐색하였다. 본장에서는 주기 걸음새(모의실험 1)와 불

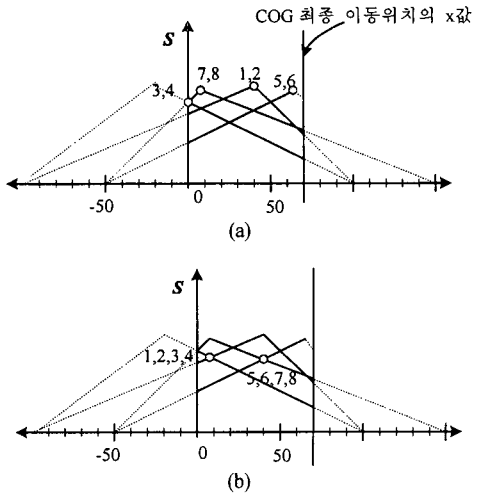


그림 12. 단조증가를 보장하는 최대 안정여유점. (a) 단조증가 알고리즘 적용 전, (b) 단조증가 알고리즘 적용 후.
Fig. 12. Maximum stability margin point guarantee monotonicity. (a) Ignoring monotonocity, (b) Considering monotonocity.

불규칙적인 자세가 주어지는 비주기 걸음새(모의실험 2)로 나누어 제안한 기하학적 탐색방법을 이용한 걸음새 계획방법을 모의실험한다. 제안된 알고리즘은 Visual C++로 구현하여 24개의 기는 걸음새에 대하여 최적의 걸음새 안정여유도를 갖는 COG 이동경로 및 다리이동순서를 결정할 수 있음을 보인다.

1. 모의실험 1

그림 13은 보행로봇의 초기자세와 최종자세가 주기걸음새의 초기 및 최종자세의 한 예이다. 보폭이 0.7m일 때 그림 4.2의 상단부는 한 주기동안 24개의 다리 이동순서에 따른 걸음새 안정여유도를 나타낸 것이고 하단부는 진행방향(x)으로 단조증가성을 보장하고 최대 걸음새 안정여유도를 가지는 COG 이동경로를 나타낸다. 이때 소요시간은 Pentium MMX 166 CPU를 내장한 IBM-PC에서 약 100ms이다. 그림 14의 모의실험 결과로부터 몸체의 좌우 이동을 허용한 직선보행에 있어 물결 걸음새 다리 이동순서, 즉 3-1-4-2 또는 4-2-3-1순서로 보행 시 가장 큰 걸음새 안정여유도를 가짐을 알 수 있다. 또한 각 다리의 도달영역폭이 1.3m에서 2m로 증가함에 따라 걸음새 안정여유도는 32.9cm에서 47.5cm로 증

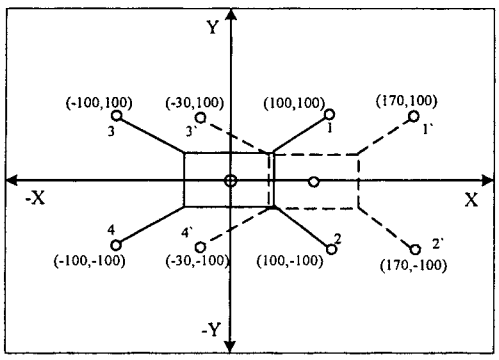
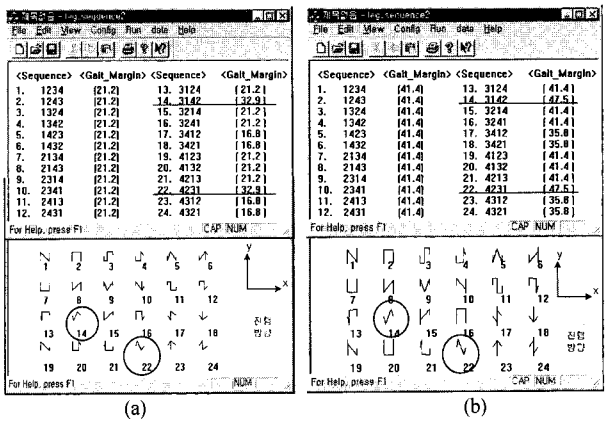


그림 13. 각 다리 및 COG의 초기 위치와 최종 위치.
Fig. 13. Initial and final positions of each leg and COG.



(a) (b)

그림 14. 각 다리의 도달영역 폭에 따른 걸음새 안정여유도 및 COG 이동경로. (a) 도달영역 폭이 1.3m일 때, (b) 도달영역 폭이 2m일 때.

Fig. 14. Gait stability margin and COG movable path according to the width of reachable range at each leg. (a) A width is 1.2m, (b) a width is 2m.

가함을 알 수 있다. 이때의 COG 이동경로는 지그재그형태로서 기존의 불연속 걸음새 연구결과[9]와 일치함을 알 수 있다. 그림 15는 물결 걸음새 보행시 각 다리의 도달영역폭과 걸음새 안정여유도와의 관계를 나타내는 그래프로서, 각 다리의 도달영역폭이 일정한 값 이상이 되면 걸음새 안정여유도는 더이상 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 16은 물결 걸음새 다리이동순서로 보행시 보폭의 변화에 따른 걸음새 안정여유도와의 관계 그래프로서 걸음새 안정여유도를 최대로 하는 보폭(125cm)이 존재함을 알 수 있다.

위 모의실험 결과로부터 주기걸음새로 보행시 걸음새 안정여유도를 최대로 하기 위해서는 물결 걸음새 다리이동순서로 최적의 보폭으로 보행해야 함을 알 수 있다.

2. 모의실험 2

그림 17은 불규칙한 다리 착지점을 가지는 비주기 걸음새의 초기자세와 최종자세의 한 예이다. 보폭이 0.7m일 때 그림 18의 상단부는 한 주기동안 24개의 다리 이동순서에 따른 걸음새 안정여유도를 나타낸 것이고 하단부는 진행방

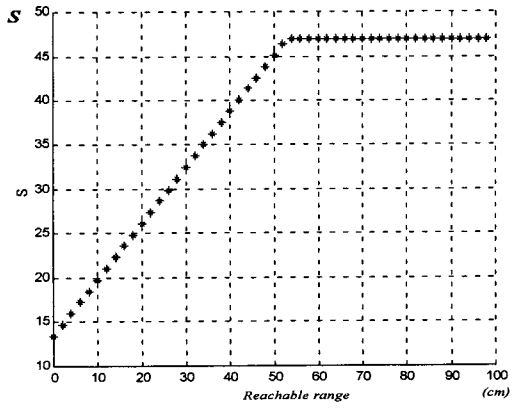


그림 15. 각 다리 도달영역의 좌우 이동가능폭 변화에 따른 안정여유도.

Fig. 15. Stability margin according to the width of reachable range at each leg.

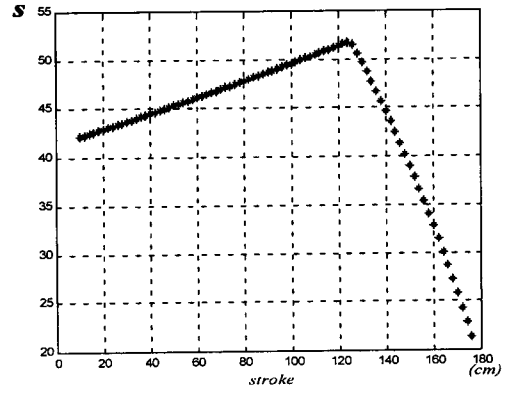


그림 16. 보폭변화에 따른 안정여유도.

Fig. 16. Stability margin according to stroke.

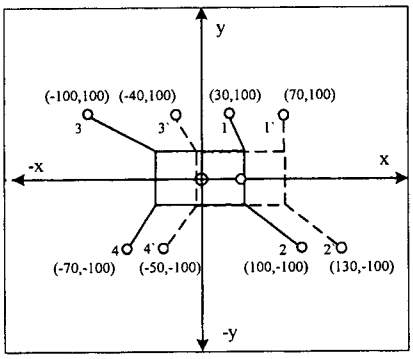
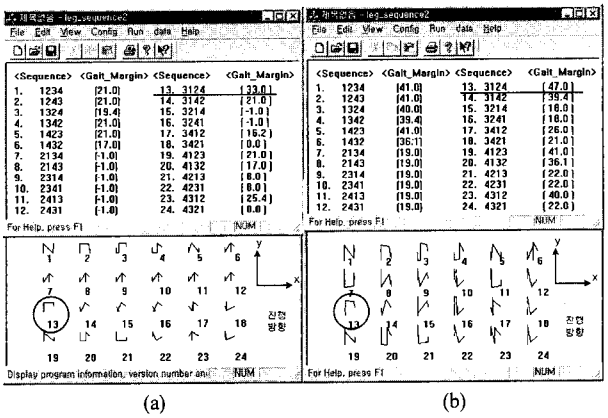


그림 17. 각 다리 및 COG의 초기 위치와 최종 위치.

Fig. 17. Initial and final position of each leg and body COG.

향(x)으로 단조증가성을 보장하고 최대 걸음새 안정여유도를 가지는 COG 이동경로를 나타낸다. 이때 소요시간은 모의실험 1과 같이 약 100ms이다. 그림 18의 모의실험 결과로부터 불규칙한 다리착지점이 주어질 경우 각 다리의 도달영역폭이 1.3m에서 2m로 증가함에 따라 걸음새 안정여유도는 33cm에서 47cm로 증가하며 가장 큰 안정여유도를 가



(a) (b)

그림 18. 각 다리의 도달영역 폭에 따른 걸음새 안정여유도 및 COG 이동경로. (a) 도달영역 폭이 1.3m일 때, (b) 도달영역 폭이 2m일 때.

Fig. 18. Gait stability margin and COG movable path according to the width of reachable range of each leg. (a) A width is 1.3m, (b) a width is 2m.

지는 최적의 다리이동순서는 3-1-2-4로서 물결 걸음새 다리 이동순서가 아님을 알 수 있다. 이처럼 제안된 알고리즘을 사용하면 불규칙적으로 주어진 보행자세에서도 가장 큰 걸음새 안정 여유도를 가지는 다리이동순서를 쉽게 구할 수 있을 뿐 아니라 24개의 다리 이동순서에 대한 COG 이동경로 및 안정여유도를 비교함으로써 주어진 환경에 알맞은 걸음새를 구현할 수 있다. 특히 COG 이동경로가 복잡할 경우 한정된 범위 내에서 걸음새 안정여유도를 줄이고 COG 이동경로가 간단한 걸음새를 구현할 수 있다. 예를 들어 그림 18(b)에서 다리이동순서가 3-1-2-4 인 경우 걸음새 안정여유도는 47cm로 크지만 COG 이동경로가 3-1-4-2 로 이동하는 걸음새보다 복잡하다. 따라서 큰 걸음새 안정여유도를 필요로하지 않을 경우 3-1-4-2 다리이동순서로 보행할 경우 보다 효율적으로 보행할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 임의로 주어진 보행자세에서 걸음새 안정여유도를 향상시키기 위해 지그재그 걸음새 계획방법을 제안하였다. 이 걸음새 계획은 4각 보행로봇의 경우 24개의 기는 걸음새에 대하여 지지 다각형내의 안정여유도 분포의 기하학적 특징을 이용하므로 각각의 다리이동순서에 따른 걸음새 안정여유도 및 COG 이동경로를 쉽게 찾을 수 있다. 이로부터 일정한 보폭을 가진 지그재그 주기 걸음새는 물결 걸음새 다리이동순서로 보행시 가장 큰 걸음새 안정여유도를 가짐을 보였다. 또한 보행로봇의 기구학적 모델링이 주어졌을 때, 물결 걸음새로 보행시 최적의 걸음새 안정여유도를 가지는 보폭을 구현하였다.

그리고 불규칙적으로 주어진 보행자세에서도 제안한 알고리즘을 적용하여 가장 큰 걸음새 안정여유도를 가지는 걸음새를 구할 수 있음을 보였다. 특히 COG 이동경로가 복잡할 경우 한정된 범위 내에서 걸음새 안정여유도를 줄이고 COG 이동경로가 간단한 걸음새를 구현할 수 있으므로 같은 환경에서 사용목적에 따라 다양한 걸음새를 구현할 수 있다.

하지만 아직 3차원 공간상에서의 불규칙한 걸음새 계획이 미진하므로 3차원 공간상에서 최적의 걸음새 안정여유도를 가지고 지그재그로 보행할 수 있는 걸음새 계획이 절실히 요구된다.

참고문헌

[1] R. B. Mcghee and A. Frank, "On the stability properties of quadruped creeping gaits," *Mechanical Biosciences*, vol. 3, pp. 331-351, 1968.

[2] S. M. Song and K. J. Waldron, "An analytical approach for gait study and its applications on wave gait," *International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 60-71, 1987.

[3] C. D. Zhang and S. M. Song, "Stability analysis of wave-crab gait of a quadruped," *Journal of Robotic System*, vol. 7, no. 2, pp. 243-276, 1990.

[4] S. M. Song and B. S. Choi, "The optimally stable range of 2n-legged wave gaits," *IEEE Transections on System, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 4, pp. 888-902, 1990.

[5] Y. J. Lee and Z. Bien, "A hierarchical strategy for planning crab gaits of a quadruped walking robot," *Robotica*, vol. 12, pp. 23-31. 1994.

[6] P. G de Santos and M. A. Jimenez, "Generation of discontinuous gait for quadruped walking vehicles," *Journal of Robotic System*, vol. 12, no. 9, pp. 599-611, 1995.

[7] H. Tsukagoshi, S. Hirose, and K. Yoneda, "Maneuvering operation of the quadruped walking robot on the slope," *Proc. of IROS*, pp. 863-869, 1996.

[8] F. T. Chen, H. L. Lee, and D. E. Orin, "Increasing the locomotive stability margin of multilegged vehicles," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1708-1714, 1999.

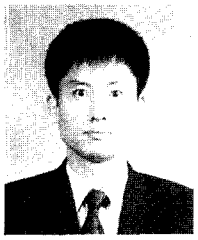
[9] D. H. Kang, Y. J. Lee, S. H. Lee, Y. S. Hong, and Z. N. Bien, "A Study on an adaptive a gait for a quadruped walking robot under external forces," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2777-2782, 1995.

박 세 훈

1972년 8월 15일생. 1998년 경북대 전자공학과 졸업. 2000년 동대학원 석사 2000년~현재 동대학원 박사 과정. 관심분야는 걸음새 제어 및 지능제어.

이 연 정

1961년 9월 10일생. 1984년 한양대 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사,동대학원 박사(1994). 현재 경북대학교 전자전기 컴퓨터 학부 조교수. 관심분야는 로보틱스, 산업 자동화 및 지능제어.



이 승 하

1966년 7월 30일생. 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 동대학원 박사(1995). 현재 경북대학교 전자전기공학부 국책계약교수, 관심분야는 자동화시스템, 지능제어, 로보틱스.