

Post-Failure Walking of Quadruped Robots on a Rough Planar Terrain

楊正敏[†] · 朴鏞國^{*}

(Jung-Min Yang · Yong Kuk Park)

Abstract - A fault-tolerant gait of multi-legged robots with static walking is a gait which can maintain gait stability and continue its walking against an occurrence of a leg failure. This paper proposes fault-tolerant gait planning of a quadruped robot walking over a rough planar terrain. The considered fault is a locked joint failure, which prevents a joint of a leg from moving and makes it locked in a known position. In this paper, two-phase discontinuous gaits are presented as a new fault-tolerant gait for quadruped robots suffering from a locked joint failure. By comparing with previously developed one-phase discontinuous gaits, it is shown that the proposed gait has great advantages in gait performance such as the stride length and terrain adaptability. Based on the two-phase discontinuous gait, quasi follow-the-leader(FTL) gaits are constructed which enable a quadruped robot to traverse two-dimensional rough terrain after an occurrence of a locked joint failure. During walking, two front legs undergo the foot adjustment procedure for avoiding stepping on forbidden areas. The proposed gait planning is verified by using computer graphics simulations.

Key Words : Quadruped Robots, Fault Tolerance, Locked Joint Failure, Discontinuous Gait, Rough Terrain, FTL

1. 서 론

정적 보행 로봇 연구에서 내고장성 걸음새(fault-tolerant gaits)는 다리 고장이 발생한 후에도 로봇이 안정여유도(stability margin)를 유지하면서 보행을 계속할 수 있게 만드는 걸음새를 말한다[1],[2]. 내고장성 걸음새 계획에서 다리의 고장은 일종의 제한 조건으로 해석되는데, 이러한 제한 조건이 있는 상황에서 성능을 최대한으로 가지는 걸음새를 어떻게 계획하는가가 내고장성 걸음새 연구의 핵심이다.

본 연구에서 고려하고 있는 다리 고장은 관절고착고장(locked joint failure)으로 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태를 말하며, 외부 작업을 하는 로봇 매니퓰레이터(manipulator)에서 흔히 발생할 수 있는 보편적인 종류의 고장이다[3]. 관절고착고장의 특징은 고장이 발생한 다리의 자유도(degree of freedom)가 하나 줄어들어 다리의 작업 공간이 감소되지만, 고장 난 관절이 자유 회전(free-swinging)을 하지 않고 일정 위치에 고착되기 때문에 다리가 로봇 몸체를 지탱해주는 능력은 계속 유지한다는 사실이다. 저자의 선행연구에서는 걸음새 연구(gait study)의 틀에서 사각 보행 로봇에 발생하는 관절고착고장을 극복하기 위한 일반적인 내고장성 걸음새 계획을 사각 보행 로봇(quadruped robot)[4]과 육각 보행 로봇

(hexapod robot)[5]의 경우에 대해서 각각 제안하였다. 선행 연구에서 제안된 걸음새는 일종의 불연속 걸음새(discontinuous gait)로서[6], 보편적인 걸음새처럼 로봇 몸체가 연속적으로 움직이는 것이 아니라 다리의 움직임과 몸체의 움직임을 불연속적으로 함으로써 관절고착고장이 야기하는 특이성을 극복하도록 하였다.

본 논문에서는 관절고착고장이 일어난 사각 보행 로봇이 이차원 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형에서 보행하기 위한 내고장성 걸음새 계획을 제시한다. 다리의 고장은 장애물이나 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형에서 더 발생하기 쉽기 때문에 보행 로봇이 고장 발생 후에도 비평탄 지형에서 계속 보행하도록 하는 걸음새를 가질 수 있다는 사실을 밝히는 것은 로봇의 내고장성 연구에서 필수적인 일이다. 하지만 저자의 선행연구에서 제안된 사각 보행 로봇의 내고장성 걸음새[4]는 고장 난 다리의 자세(configuration)에 따라서 보폭(stride)이 지나치게 짧게 나올 수 있고 다리의 착지점 개수도 많이 요구되므로 되도록 적은 개수의 착지점만을 확보해서 착지 불가능 영역을 뛰어넘어야 하는 비평탄 지형 보행에 맞지 않다. 또한 저자의 또 다른 선행연구 [7]에서는 관절고착고장이 발생한 육각 보행 로봇이 평탄 지형에서 존재하는 삼차원 장애물을 회피하도록 하는 경로 계획을 제시하였으나 본 논문에서 고려하고 있는 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 내고장성 보행에서는 적용될 수 없다.

본 논문에서는 내고장성 걸음새의 이동성과 지형 적응성(terrain adaptability)을 높이기 위해서 2상 불연속 걸음새(two-phase discontinuous gait)를 새로운 내고장성 걸음새로 제안한 후 비평탄 지형에서의 고장후 보행(post-failure

[†] 교신저자, 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 助敎授 · 工博

E-mail : jmyang@cu.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 大邱가톨릭대 機械自動車工學部 副敎授 · 工博

接受日字 : 2005年 6月 24日

最終完了 : 2005年 7月 28日

walking)에 적용한다. 2상 불연속 걸음새는 한 주기 동안 몸체의 움직임이 두 번 있는 불연속 걸음새로서[6], 기존의 1상 불연속 걸음새(one-phase discontinuous gait)에 비해서 보폭을 더 크게 할 수 있다는 장점이 있다. 특히 2상 불연속 걸음새를 응용하면 사각 보행 로봇이 FTL(follow-the-leader) 걸음새, 즉 앞다리가 밟은 착지점들을 뒷다리가 따라서 밟는 걸음새로 견도록 할 수 있다. FTL 걸음새는 잘 알려진 대로 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형 보행에서 매우 효과적인 능력을 발휘한다[8],[9]. 본 논문에서는 먼저 2상 불연속 걸음새의 생성 과정을 보여 주고 다리 움직임 순서, 보폭 등 걸음새 성능 지수를 분석하여 기존 결과보다 더 우수하다는 사실을 증명한다. 그런 다음 2상 불연속 걸음새를 기반으로 사각 보행 로봇이 고장 난 다리의 자세에 따라서 최적의 이동성을 가지는 FTL 걸음새를 가지도록 하는 내고장성 걸음새 계획을 제안한다. 또한 컴퓨터 모의실험을 통해서 제안된 내고장성 걸음새 계획의 우수성을 검증한다.

2. 기존 연구 결과

2.1 로봇 모델링

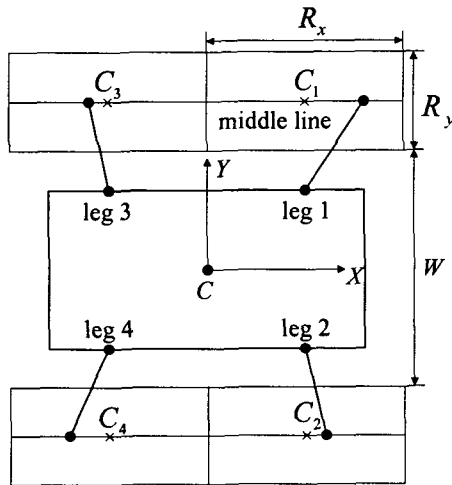


그림 1. 사각 보행 로봇의 이차원 모델.
Fig. 1. Two-dimensional model of a quadruped robot.

그림 1은 본 논문에서 다루는 사각 보행 로봇의 이차원 모델이다. 몸체 무게중심 C를 원점으로 하는 몸체 좌표계 X-Y가 달려 있으며 X축은 몸체의 세로축(longitudinal)과 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림과 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 길이 R_x , 폭 R_y 인 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)이 된다고 정의한다. C_i 는 다리 i 의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이동분하는 중선(middle line)이 C_i 를 지나간다. 로봇의 다리는 그림 1에서처럼 착지점과 로봇 몸체 연결점 사이의 직선으로 표시하지만 실제로는 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니퓰레이터(articulated manipulator) 구조로 되어 있다고 가정한다. 따라서 다리의 발(foot)은 자유도 3을 가지며 작업 영역 어

디라도 착지할 수 있다. 본 논문에서는 명확한 문제 설정을 하기 위해서 모든 다리의 궤적들이 그림 1에서 표시된 작업 영역 중선과 일치한다고 가정한다. 즉 게 걸음새와 회전 걸음새(turning gait) 등 비-직선 걸음새를 제외함으로써 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 직선 보행 계획에만 연구의 초점을 맞추기로 한다.

2.2 기존 내고장성 걸음새

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다. 하지만 관절고착고장에서는 관절 하나가 특정 각도로 고정되기 때문에 자유회전고장(free-swinging failure)[10]이나 링크 파손 고장 같은 관절의 지지 능력까지 없애는 고장과는 달리 로봇의 몸체를 지탱하는 능력은 계속 유지된다. 선행연구에서는 이러한 관절고착고장의 특징을 바탕으로 고장 난 다리를 몸체를 지탱하는 동작에서만 이용하고 지지 상태에서 몸체를 앞으로 밀어주는 운동에서는 제외시킴으로써 고장 난 다리의 남아 있는 능력을 최대한 발휘하도록 하였다. 기존 내고장성 걸음새를 기술하기 전에 본 논문에서는 먼저 관절고착고장이 다리 1에서만 발생한다는 가정을 세운다. 사각 보행 로봇은 무게 중심을 중심으로 각 다리가 대칭적으로 달려 있기 때문에 다른 다리에서 발생하는 고장에 대한 내고장성 걸음새는 다리 1에 대한 걸음새로부터 쉽게 유도될 수 있을 것이다.

그림 2는 선행연구 [4]에서 제안된, 관절고착이 발생한 사각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새이다. 그림에서 알 수 있듯이 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새는 일종의 불연속 걸음새로서 다리의 움직임과 몸체의 움직임이 각각 불연속적으로 이루어진다. 즉 다리가 이동할 때는 로봇 몸체가 움직이지 않으며, 로봇 몸체가 이동할 때는 다리가 움직이지 않는다. 하지만 그림 2의 걸음새는 내고장성을 가지기 위해서 보편적인 불연속 걸음새와는 다른 특이성을 보인다. 즉 고장 난 다리(다리 1)는 로봇 몸체와 상대적인 위치를 항상 동일하게 유지하도록 한다. 따라서 다리 1은 능동적인 스윙(swing) 동작을 하지 않고 이륙을 한 뒤 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적인 이동만을 한다(그림 2(d) 참조). 앞에서 설명했듯이 이러한 특이 동작은 관절고착고장 때문에 자유도가 줄어든 다리를 계속 고장후 보행에 사용하기 위해서 제안된 방법이다. 그림 2에서 x_1 은 다리 1 착지점의 X축 좌표로서 고착된 관절의 위치와 다리의 자세에 따라서 결정되는 값이다. 그림 2는 x_1 가 $R_x/2 \leq x_1 < R_x$ 의 범위에 있을 때 로봇이 가지는 내고장성 걸음새를 나타내었다. $0 \leq x_1 < R_x/2$ 인 경우도 다리의 초기 착지점만 틀려질 뿐 그림 2와 동일한 다리 움직임 순서를 가진다([4] 참조). $\lambda(x_1)$ 는 다리 1의 착지점이 x_1 일 때의 내고장성 걸음새 보폭으로 x_1 에 따라서 다음과 같이 유도된다[4].

$$\lambda(x_1) = \begin{cases} R_x/2 & 0 \leq x_1 < R_x/2 \\ R_x - x_1 & R_x/2 \leq x_1 < R_x \end{cases} \quad (1)$$

지형의 보행에서 더 문제가 될 수 있다.

3. 2상 불연속 걸음새

3.1 걸음새 구성

본 장에서는 관절고착고장을 위한 사각 보행 로봇의 새로운 내고장성 걸음새로서 2상 불연속 걸음새를 제안하고 그 성능을 검증한다. 사각 보행 로봇의 일반적인 2상 불연속 걸음새의 작동 순서는 다음과 같다[11]. 먼저 로봇 몸체의 오른쪽에 붙어 있는 다리 2와 다리 4가 각각 이동을 한다. 이때 로봇 몸체는 움직이지 말아야 한다. 로봇이 +X 축 방향으로 직선 보행을 한다고 가정하므로 다리 4가 먼저 앞으로 이동한 후 다리 2가 이동하는 +X 타입(+X-type)의 순서를 가진다. 두 다리의 이동이 끝난 후에는 모든 다리를 지지 상태로 두고 로봇 몸체가 보폭의 반만큼 전진한다. 그런 다음 다른 쪽에 붙어 있는 다리 3과 다리 1이 각각 이동을 한 후 마지막으로 로봇 몸체가 나머지 보폭의 반을 전진함으로써 한 주기가 끝나게 된다. 따라서 2상 불연속 걸음새의 다리 움직임 순서는 다음과 같이 나온다.

$$\text{다리4} \rightarrow \text{다리2} \rightarrow \text{로봇몸체} \rightarrow \text{다리3} \rightarrow \text{다리1} \rightarrow \text{로봇몸체} \quad (2)$$

다리 하나에 관절고착고장이 발생한 경우에는 고장 난 다리가 몸체를 앞으로 밀어주는 동작을 하지 못하므로 2상 불연속 걸음새는 위와 같은 다리 움직임 순서를 가지지 못한다. 더구나 내고장성 걸음새 원칙에 따라서 고장 난 다리는 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적 이동을 해야 하므로 식 (2)의 다리 움직임 순서는 이러한 고장 극복 과정을 포함하도록 수정되어야 한다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 관절고착고장을 위한 사각 보행 로봇의 2상 불연속 걸음새의 일반적인 구성을 나타낸 것이다. 그림에서 x_i 는 초기 상태에서 다리 i 착지점의 X 좌표를 가리킨다. 그림 3(a)의 초기 상태에서 다리 1은 관절고착고장이 발생하여 x_1 에 착지하도록 결정되었다. 다리 2와 다리 3은 그림에서 볼 수 있듯이 각각 작업 영역의 바깥쪽 경계로부터 λ , 즉 걸음새의 보폭만큼 떨어진 위치에 착지해 있다. 또한 다리 4는 다리 궤적 상에서 다리 1 착지점의 원점에 대한 대칭점 $-x_1$ 보다 뒤편에 착지되어 있어야 한다. 다리 4의 착지점이 이 위치에 있어야 다리 4가 이륙하고 전진 스윙을 함으로써 걸음새의 최초 동작이 시작될 수 있다. 초기 상태에서 고장 난 다리를 제외한 각 다리의 착지점 위치를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_2 &= R_x - \lambda \\ x_3 &= -(R_x - \lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

$$-R_x \leq x_4 \leq -x_1$$

그림 3(b)는 다리 4와 다리 2가 각각 보폭 λ 만큼 이동한 후 나오는 걸음새의 상태를 나타낸다. 그림에서 표시된 두 개의 일점쇄선은 다리 하나가 이동 상태가 되었을 때 걸음새의 안정여유도를 결정하는 지지 다각형의 변을 각각 가리킨다. 안정여유도가 음수 값이 되지 않으려면 무게 중심 C_0

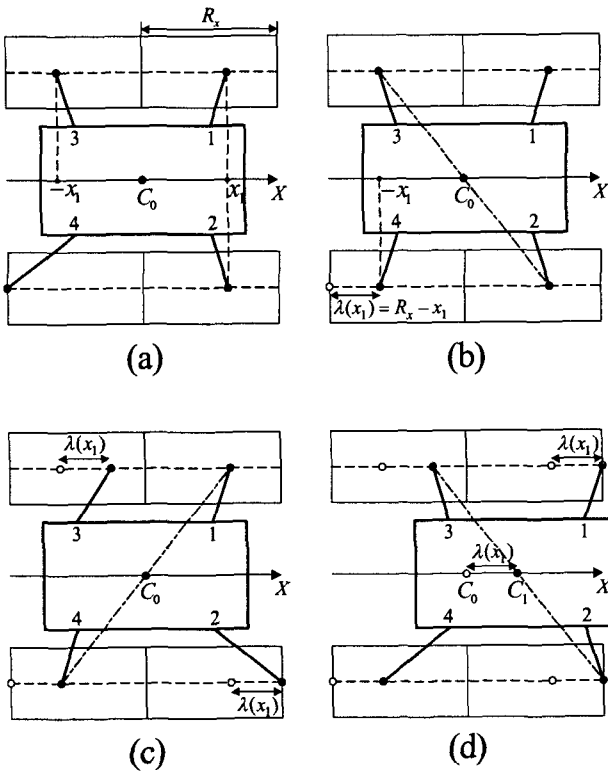


그림 2. 다리 1에 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새[4]. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 2, 다리 3 이동 (d) 다리 1 이륙 후 로봇 몸체 이동.

Fig. 2. Fault-tolerant gait for straight-line motion of a quadruped robot with a locked joint failure at leg 1[4]. (a) initial state, (b) swing leg 4, (c) swing leg 2 and leg 3 and (d) lift off leg 1 and move the body.

그림 2의 기존 내고장성 걸음새는 임의의 다리에서 발생하는 관절고착고장에 대해서 사각 보행 로봇이 교착상태(deadlock)에 빠지지 않고 고장후 보행을 계속할 수 있게 보장하고 있으나 다음과 같은 약점을 지니고 있다.

- 1) 다리 하나가 이동 상태(transfer phase)에 있을 때 걸음새는 항상 몸체 무게중심이 지지 다각형(support pattern)의 한 변 위에 있게 되는 임계 안정여유도(marginal stability margin)를 가진다(그림 2(b)-(d) 참조). 따라서 보행 시 발생할 수 있는 외부 충격 등에 의한 몸체의 흔들림, 착지 위치 오차 등에 의해서 걸음새가 불안정한(unstable) 상태에 진입할 수 있는 위험이 있다.
- 2) 내고장성 걸음새의 보폭이 고장 난 다리의 착지점 위치에 따라서 전적으로 결정되므로 문제가 생길 수 있다. 예를 들어 $x_1 \cong R_x$, 즉 x_1 이 R_x 근처 좌표로 결정된다고 가정하면 식 (1)에서 $\lambda(x_1)$ 는 0에 가까운 값이 나오므로 걸음새의 이동성이 매우 떨어진다. 이렇게 보폭이 작은 값으로 결정될 수 있다는 약점은 착지 불가능 영역을 뛰어넘기 위해서 가능한 한 큰 보폭이 요구되는 비평탄

는 지지 다각형을 벗어나지 말아야 하므로 다리 4의 초기 착지점 x_4 는 아래와 같은 부등식을 만족시켜야 한다.

$$-x_1 \leq x_4 + \lambda \leq 0 \quad (4)$$

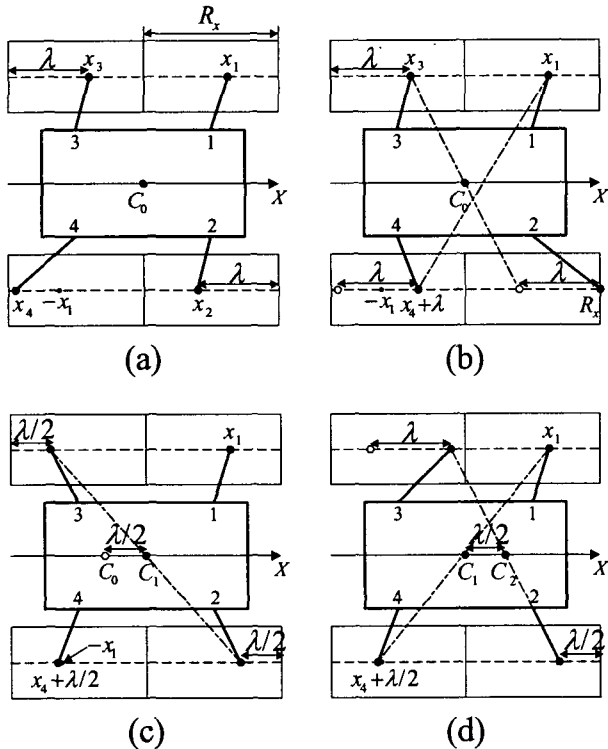


그림 3. 다리 1에 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 2상 불연속 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 4와 다리 2 이동, (c) 다리 1 이륙 후 로봇 몸체 이동, (d) 다리 3 이동.

Fig. 3. Two-phase discontinuous gait for straight-line motion of a quadruped robot with a locked joint failure at leg 1. (a) initial state, (b) swing leg 4 and leg 2, (c) lift off leg 1 and move the body and (d) swing leg 3.

그림 3(c)에서 로봇 몸체는 보폭의 반만큼 전진을 하고 다리 1은 이륙 후 몸체 이동에 따라서 수동적인 이동을 한다. 다리 2와 다리 3이 (3)에서 기술된 초기 착지점을 가지므로 걸음새의 반주기 동작 직후에는 그림 3(c)에서 나타난 것처럼 몸체 무게중심의 새로운 위치 C_1 가 항상 지지 다각형의 한 변 위에 존재하는 임계 안정여유도 상태가 된다. 또한 걸음새의 다음 동작인 다리 3의 이동 시 안정여유도를 보장해 주기 위해서 몸체의 첫 번째 이동 직후 다리 4의 착지점은 다리 1의 원점에 대한 대칭점 $-x_1$ 보다 더 뒤쪽에 위치해야 한다. 따라서 그림 3(c)의 상태에서 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$x_4 + \lambda/2 \leq -x_1 \quad (5)$$

식 (3)~(5)는 다리 4의 초기 착지점 x_4 을 결정하는 기준

으로 해석될 수 있다. 그림 3(d)에서는 다리 3이 이동함으로써 걸음새의 나머지 반주기가 시작된다. 다리 3이 λ 만큼 이동하면 몸체 무게중심이 앞으로 이동할 기구학적 여유가 $\lambda/2$ 만큼 더 생긴다는 사실이 그림 3(d)에 나타나 있다. 다리 3이 착지한 후에는 앞에서와 마찬가지로 다리 1이 이륙한 후 로봇 몸체가 보폭의 나머지 반만큼 전진하여 걸음새의 한 주기를 완성하게 된다. 몸체 무게중심의 종착지는 그림 3(d)에 표기된 C_2 가 되며, 걸음새는 다시 그림 3(a)의 초기 상태와 동일한 상태가 된다. 그림 3에서 제안된 2상 불연속 걸음새의 다리 움직임 순서를 요약하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{다리4} \rightarrow \text{다리2} \rightarrow (\text{로봇 몸체, 다리1}) \rightarrow \text{다리3} \\ & \rightarrow (\text{로봇 몸체, 다리1}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (2)와 달리 이 다리 움직임 순서는 로봇 몸체의 이동과 고장 난 다리의 이동이 동시에 일어나는 동작을 포함하고 있다. 즉 위의 결과는 기존에 제안되었던 관절고착고장이 일어난 다리에 대한 고장 극복 과정을 2상 불연속 걸음새 동작에 결합시켜 새로운 내고장성 걸음새를 구성한 것이다.

3.2 평탄 지형 보행

제안된 2상 불연속 걸음새를 적용하기 위해서는 보폭 λ 과 다리 4의 초기 착지점 x_4 의 값을 결정해야 한다. 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇이 평탄 지형에서 보행을 한다고 가정한다면, 로봇은 최대한 보폭을 크게 내면서 주기 걸음새로 걷는 것이 이동성 면에서 유리하다. 따라서 2상 불연속 걸음새도 최대 보폭을 가지도록 설정되어야 한다. 보폭 λ 의 한계치는 그림 3(d)에서 유추할 수 있다. 그림 3(d)에서 알 수 있듯이 다리 3이 이륙한 후 착지되는 지점의 X 좌표는 $-R_x + 3\lambda/2$ 이다. 그런데 다리 3의 착지점이 작업 영역 내부에 존재해야 하므로 착지점의 X 좌표는 다음과 같이 0 이하의 값을 가져야 한다.

$$-R_x + 3\lambda/2 \leq 0$$

따라서 보폭 λ 의 한계치는 위 식에서 $\lambda = 2R_x/3$ 으로 유도된다. 이제 고장 난 다리의 착지점 x_1 의 값에 따라서 걸음새가 가능한 한 최대의 보폭을 가지도록 다리 4의 초기 착지점 x_4 을 결정하는 일이 남았다.

$$i) 0 < x_1 < R_x/3$$

x_1 가 이 범위 안에 존재한다면 제안된 2상 불연속 걸음새는 한계 보폭 $\lambda = 2R_x/3$ 을 가질 수 있다. x_4 을 x_1 의 원점에 대한 대칭점 $-x_1$ 에서 $-X$ 축 방향으로 $2R_x/3$ 만큼 더 뒤된 지점, 즉 $x_4 = -(x_1 + 2R_x/3)$ 으로 초기 착지점을 설정하면 x_4 는 조건 (3)~(5)를 모두 만족시키므로 걸음새가 완성된다. 그림 4(a)는 x_1 가 $0 < x_1 < R_x/3$ 의 범위에

있을 때의 2상 불연속 걸음새를 나타낸 것이다. 그림에서 검은 원은 다리의 초기 착지점을 가리키고 흰 원은 한 주기가 지난 후 옮겨질 다리의 착지점들을 가리킨다. 그림에서 알 수 있듯이 고장 난 다리 1과 로봇 몸체는 2상 (two-phase)의 이동을 하므로 초기 착지점에서 $\lambda/2$ 떨어진 곳에 각각 기착점을 하나씩 가진다.

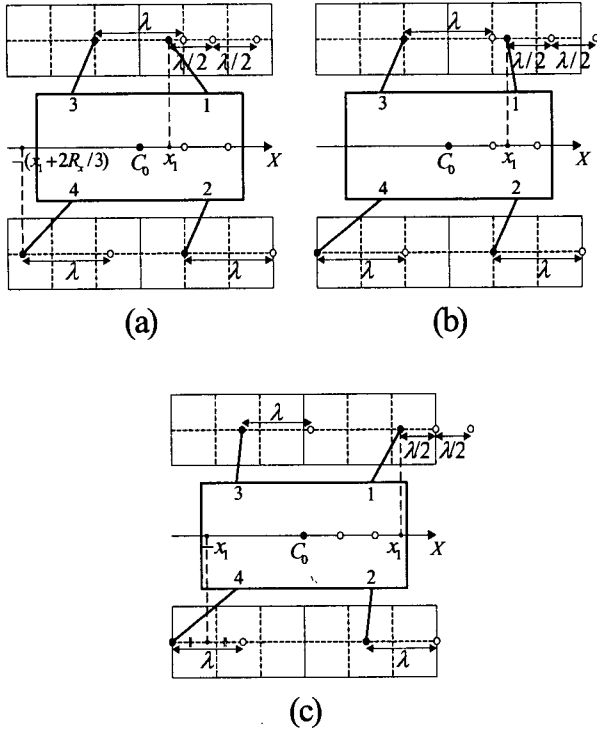


그림 4. 2상 불연속 걸음새. (a) $0 < x_1 < R_x/3$, (b) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$, (c) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$.

Fig. 4. Two-phase discontinuous gait. (a) $0 < x_1 < R_x/3$, (b) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$ and (c) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$.

ii) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$

x_1 가 이 범위 안에 존재할 때에도 제안된 2상 불연속 걸음새는 한계 보폭 $\lambda = 2R_x/3$ 을 가질 수 있다. $x_4 = -R_x$ 즉 다리 4의 초기 착지점을 작업 영역 뒤 경계점에 설정하면 조건 (3)~(5)는 모두 만족된다. 그림 4(b)는 이 경우에서 생성되는 2상 불연속 걸음새의 모습을 나타낸 것이다.

iii) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$

x_1 이 $2R_x/3$ 보다 큰 경우 2상 불연속 걸음새의 보폭은 $2R_x/3$ 가 될 수 없다. 조건 (3)을 만족시키면서 걸음새가 최대 보폭을 가지게 하는 다리 4의 초기 착지점은 $x_4 = -R_x$ 이다. 그런데 조건 (5)는 x_4 에서 보폭의 반만큼 더해진 위치가 $-x_1$ 보다 뒤쪽에 존재해야 한다는 것을 의

미하므로 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭은 $-x_1$ 에서 x_4 까지 거리의 두 배, 즉 $\lambda = 2(R_x - x_1)$ 이 된다. 이 결과는 다리 1의 착지점이 작업 영역의 앞 경계점에 가까울수록 내고장성 걸음새의 이동성은 저하된다는 뜻이며, 기존 1상 불연속 걸음새의 보폭 공식 (1)과 유사하다. 그림 4(c)는 x_1 가 $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$ 의 범위에 있을 때 얻어지는 2상 불연속 걸음새를 나타낸 것이다.

기존의 1상 불연속 걸음새와 제안된 걸음새와의 성능 비교를 명확하게 하기 위해서 고장 난 다리 1의 착지점 x_1 이 주어졌을 때 생성되는 최대 보폭 λ 을 그림 5에 도시하였다. 그림에서 '+' 그래프는 본 논문에서 제안된 2상 불연속 걸음새의 보폭을 가리키며 'o' 그래프는 기존의 1상 불연속 걸음새의 보폭을 표시한다. 또한 x_1 과 보폭 λ 는 작업 영역 길이 R_x 에 대해서 정규화 되었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 동일한 x_1 에 대해서 2상 불연속 걸음새의 보폭이 1상 불연속 걸음새의 값보다 더 크게 나오므로 제안된 걸음새는 기존 걸음새보다 이동성이 더 우수하다고 말할 수 있다.

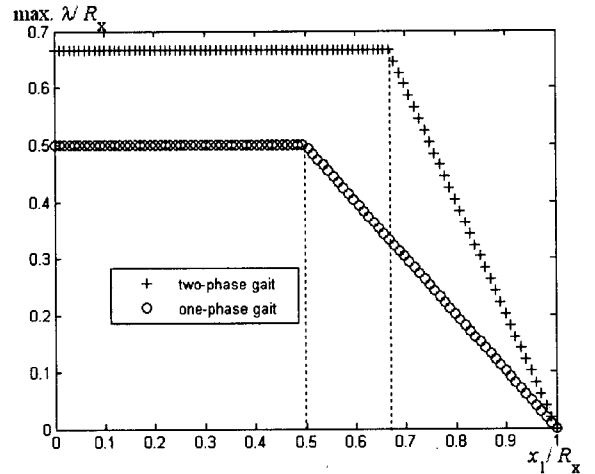


그림 5. 불연속 걸음새의 최대 보폭. Fig. 5. The maximum stride length of discontinuous gaits.

제안된 2상 불연속 걸음새는 안정여유도 면에서도 1상 불연속 걸음새보다 더 우수한 성능을 보인다. 그림 3(b)와 (d)에서 다리 2와 다리 3이 이동 상태에 있을 때 걸음새가 가지는 세로 안정여유도(longitudinal stability margin) S_2 와 S_3 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$S_2 = (x_1 + x_4 + \lambda) / 2$$

$$S_3 = -(x_1 + x_4 + \lambda / 2) / 2$$

식 (4)와 (5)에 의해서 위 안정여유도는 모두 0 이상의 값을 가지며, x_4 의 값에 따라서 양수 값을 가질 수도 있다(그림 4 참조). 이것은 다리 하나가 이동 상태에 있을 때 항상 임계 안정여유도를 가지는 1상 불연속 걸음새의 결과보다 안정여유도 면에서 더 우수하다고 말할 수 있다.

한편 2상 불연속 걸음새는 에너지 소비 면에서는 1상 불연속 걸음새보다 더 불리하다. 불연속 걸음새 자체는 로봇 몸체가 움직일 때에만 각 다리의 액추에이터(actuator)가 에너지를 소비하므로 일반적인 연속 걸음새보다 에너지 소비 면에서 더 유리하다[11]. 하지만 2상 불연속 걸음새는 몸체의 이동 동작을 두 번 취해야 하기 때문에 1상 불연속 걸음새에 비해서는 더 에너지를 소비해야 한다. 즉 앞에서 규명한 2상 불연속 걸음새의 이동성 개선 효과는 에너지 소비를 더함으로써 얻어진 결과라고 해석될 수 있을 것이다.

4. FTL 걸음새

본 장에서는 앞 장에서 제안된 2상 불연속 걸음새를 바탕으로 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇이 비평탄 지형에서 보행하게 하는 내고장성 걸음새 계획을 제안한다. 본 논문에서 고려하고 있는 지형은 2차원 착지 불가능 영역이 존재하는 H형 비평탄 지형[12]이라고 가정하며, 사각 보행 로봇은 출발점에서 +X 축 방향으로 직선 보행을 한다고 설정한다. 따라서 고장이 발생한 상황에서 로봇이 착지 불가능 영역에 다리의 발을 착지하지 않고 뛰어 넘으면서 보행을 계속 할 수 있게 하는 걸음새를 찾는 것이 목표가 된다.

본 논문에서는 앞에서 제안된 2상 불연속 걸음새의 다리 착지점들을 조정하여 FTL 걸음새, 즉 앞다리의 디딜 곳을 선택한 후 뒷다리들이 앞다리가 디딘 곳을 따라서 걷는 걸음새로 만든 후 비평탄 지형 보행에 적용하기로 한다. FTL 걸음새는 다리의 착지점의 개수를 최소한으로 줄이는 걸음새이므로 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형 보행에서 매우 효과적인 능력을 발휘한다. 내고장성 2상 불연속 걸음새를 FTL 걸음새로 만들 때 주의해야 할 사항은 고장 난 다리 1이 반주기마다 기착점에 한 번 착지를 한다는 사실이다. 따라서 다리 1과 같은 쪽에 붙어 있는 다리 3은 다리 1이 먼전 디딘 일련의 착지점 두 군데 중 한 군데에 착지를 하도록 만들면 될 것이다. 또 FTL 걸음새가 뛰어 넘을 수 있는 착지 불가능 영역이 많도록 하기 위해서는 걸음새가 되도록 큰 보폭을 가지도록 해야 한다. 본 논문에서는 그림 5에서 나타낸 2상 불연속 걸음새의 보폭 그래프를 기준으로 하여 고장 난 다리의 착지점 x_1 에 따라서 최대 보폭을 가지는 FTL 걸음새를 생성하도록 한다.

i) $0 < x_1 < R_x/3$

그림 5에서 알 수 있듯이 2상 불연속 걸음새는 평탄 지형에서 $0 < x_1 < R_x/3$ 일 때 한계 보폭 $2R_x/3$ 을 가진다. 그림 6(a)는 $0 < x_1 < R_x/3$ 에서 보폭 λ 이 $2R_x/3$ 을 넘지 않는 범위에서 최대값을 가지는 FTL 걸음새를 생성하는 다리의 초기 착지점을 보여준다. 그림과 같이 다리 3 작업 영역의 뒤 경계점부터 x_1 까지를 2λ 로 잡고 다리 3의 착지점을 작업 영역 뒤 경계점에서 λ 만큼 떨어진 위치에 놓으면 다리 3은 한 주기 후 다리 1의 기 착지점에 착지하게 될 것이다. 또한 다리 2는 다리 3의 착지점과 원점에 대하여 대칭인 지점에 착지시키고 다리 4는 다리 2와 2λ 만큼 떨어진 곳에 착지시키면 x_4 는 조건 (3)~(5)를 모두 만족시키게

되며 다리 4 역시 두 주기가 지난 후 다리 2가 디딘 곳을 따라서 걷게 될 것이다. 이 경우 보폭 λ 은 다음과 같은 공식으로 나온다.

$$\lambda = (R_x + x_1)/2 \quad (0 < x_1 < R_x/3)$$

ii) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$

x_1 이 이 범위 안에 존재할 때에는 그림 6(b)에 표시된 대로 다리 3 작업 영역의 뒤 경계점부터 x_1 까지를 $5\lambda/2$ 로 잡으면 최대 보폭을 가질 수 있다. 또 다리 3을 작업 영역 뒤 경계점에서 λ 만큼 떨어진 위치에서 시작하게 하면 두 주기 후 다리 1이 디딘 착지점을 지나게 된다. 다리 2와 다리 4의 초기 착지점은 $0 < x_1 < R_x/3$ 인 경우와 동일하게 설정하면 FTL 걸음새가 완성된다. 보폭 λ 은 다음과 같은 공식으로 나온다.

$$\lambda = 2(R_x + x_1)/5 \quad (R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3) \quad (7)$$

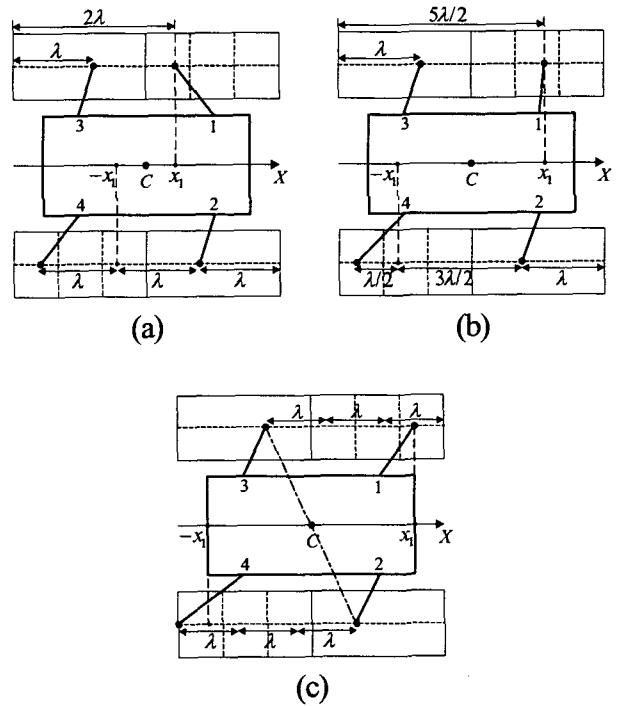


그림 6. FTL 걸음새. (a) $0 < x_1 < R_x/3$, (b) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$, (c) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$.

Fig. 6. FTL gait.

(a) $0 < x_1 < R_x/3$, (b) $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$ and (c) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$.

iii) $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$

x_1 이 이 범위 안에 있을 때 2상 불연속 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭은 $2(R_x - x_1)$ 이므로 FTL 걸음새도 보폭이 $2(R_x - x_1)$ 가 되게 각 다리의 착지점을 조정해야 한

다. 그림 6(c)는 $2R_x/3 \leq x_1 < R_x$ 일 때 조정된 다리의 착지점들을 보여준다. 다리 3은 다리 1 착업 영역의 앞 경계점에서 3λ 만큼 떨어진 곳에 위치시키고 다리 4는 자신의 착업 영역의 뒤 경계점에, 다리 2는 다리 4로부터 역시 3λ 만큼 떨어진 곳에 각각 위치시키면 뒷다리들이 세 주기가 지난 후에 앞 다리들의 기 착지점에 착지하게 된다. 그림에서 표시된 대로 다리 2와 다리 3은 원점에 대해서 대칭인 지점에 있고 다리 4는 조건 (3)~(5)를 모두 만족시키므로 이 FTL 걸음새의 안정여유도가 항상 보장됨을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 FTL 걸음새의 보폭을 x_1 에 대해서 도시한 것이다. 그림 7을 그림 5의 평탄 지형에서의 보폭과 비교해보면, $0 < x_1 < 2R_x/3$ 일 때 FTL 걸음새가 한계 보폭 $2R_x/3$ 을 가지지 못하고 x_1 값의 변화에 따라서 그 보폭도 함께 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 이 차이는 앞 다리의 착지점을 뒷다리가 따라서 착지하는 동작을 만들기 위해서 각 다리의 착지점 사이의 간격을 보폭의 배수에 맞추어 조절했기 때문에 생기는 필연적인 결과이다.

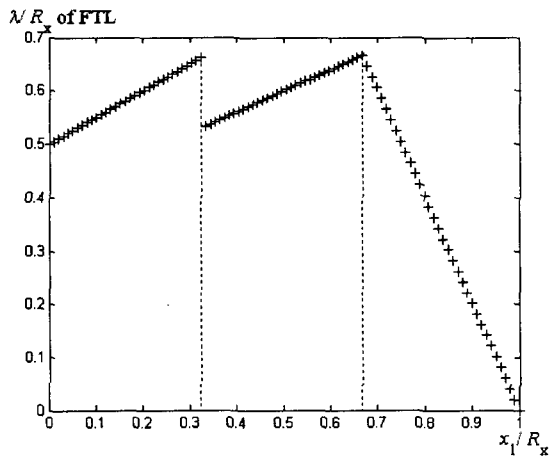


그림 7. FTL 걸음새의 보폭.
Fig. 7. Stride length of the FTL gait.

5. 모의실험

본 장에서는 관절 고착 고장이 발생한 사각 보행 로봇이 제안된 FTL 걸음새를 이용하여 비평탄 지형에서 보행하는 과정을 모의실험을 통해서 확인한다. 그림 8은 모의실험에서 사용되는 비평탄 지형 모델과 내고장성 걸음새를 시작할 때 사각 보행 로봇이 가지는 기구학적 상태를 보여준다. 각 다리의 착업 영역의 길이는 그림에서 표시된 것처럼 $R_x = 90(\text{unit})$ 이며, 관절 고착 고장이 발생한 다리 1은 $x_1 = 50$ 지점에 착지되어 있다. 그림에서 사선으로 칠해진 사각형들은 모두 착지 불가능 영역을 가리킨다. x_1 이 $R_x/3 \leq x_1 < 2R_x/3$ 의 범위 안에 속하므로 식 (7)에 의해서 FTL 걸음새가 가지는 최대 보폭은 $\lambda = 2(90 + 50)/5 = 56$ 이다. 따라서 다리 2와 다리 4의 궤적 위에 존재하는 착지 불가능 영역의 길이는 56을 넘지

말아야 걸음새가 교착 상태에 빠지지 않게 된다. 또한 고장난 다리 1은 반주기마다 착지해야 하므로 다리 1과 다리 3의 궤적 위에 존재하는 착지 불가능 영역의 길이는 $56/2 = 28$ 을 넘지 말아야 한다. 본 모의실험에서는 그림 8에 나온 대로 각각 20, 40, 22의 길이를 가지는 착지 불가능 영역을 사용하여 교착 상태에 빠지는 경우를 제외시켰다. 만약 앞에서 구한 길이보다 더 긴 착지 불가능 영역이 다리 궤적 위에 존재하는 경우에는 사각 보행 로봇은 [7] 등에서 제안된 장애물 회피 경로 계획 등을 이용하여 보행 궤적 자체를 변경해야 할 것이다.

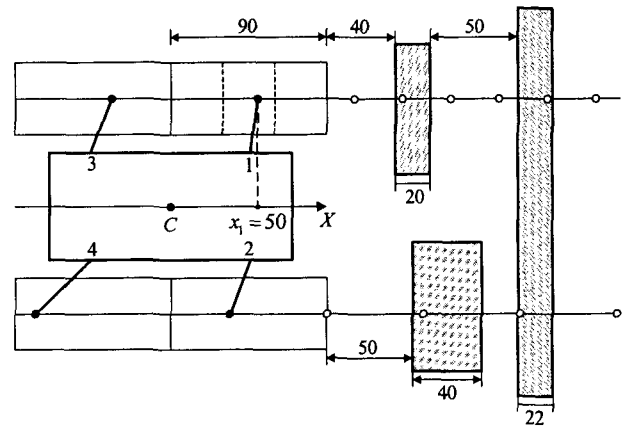


그림 8. 다리 1에 관절 고착 고장이 발생한 사각 보행 로봇의 비평탄 지형 보행을 위한 모의실험 모델.
Fig. 8. Simulation model for a quadruped robot with a locked joint failure at leg 1 walking over a rough planar terrain.

본 논문에서는 FTL 걸음새의 다리 착지점 위치 및 보폭 값을 조정하는 방법[8],[13]을 이용하여 다음과 같은 비평탄 지형 보행 계획을 세운다.

- 1) 사각 보행 로봇이 시작 위치에서 출발하여 최대 보폭을 내면서 FTL 걸음새로 걷는다고 가정하고 예상 착지점들을 미리 지정한다.
- 2) 1)에서 지정된 착지점들 중 하나 이상이 착지 불가능 영역 위에 놓였다면 아래와 같은 알고리즘으로 착지점을 조정한다.
 - a) 착지 불가능 영역 위에 놓인 착지점들 중 시작 위치와 제일 가까운 착지점의 위치를 걸음새의 보폭 값을 줄임으로써 조정하여 착지 불가능 영역 바깥에 놓이게 만든다.
 - b) a)에서 조정된 착지점 이후의 착지점들 사이의 간격은 그대로 최대 보폭으로 유지한다.
 - c) 착지 불가능 영역 위에 놓인 착지점들이 없어질 때까지 (a), (b)의 조정을 반복한다.

그림 9는 위에서 기술한 걸음새 계획에 따라서 그림 8의 모의실험 모델에서 FTL 걸음새의 착지점을 찾는 과정을 보여준다. 그림에서 흰 원으로 표기된 착지점들은 최대 보폭 $\lambda = 56$ 의 간격으로 나열된 초기 예상 착지점들이다(다리 1

과 다리 3의 궤적은 $\lambda/2 = 28$ 의 간격으로 나열됨). 그림에서 볼 수 있듯이 모든 착지 불가능 영역 위에 초기 착지점이 하나 이상 놓여 있다. 따라서 그 중 시작 위치와 제일 가까운 착지점(길이 20의 착지 불가능 영역 위에 있는 착지점) 직전의 걸음새 보폭을 줄여서 그 착지점이 착지 불가능 영역 밖에 놓이도록 조절을 한다. 회색 원으로 표시된 착지점들이 이러한 1차 조정 후에 나온 결과들이다. 하지만 다리 1과 다리 3의 궤적 위에 존재하는 길이 22의 착지 불가능 영역 위에 조정된 착지점 하나가 역시 놓이게 되므로 2차 조정을 거쳐야 한다. 그림에서 검은 색 원으로 표시된 착지점들이 2차 조정을 한 후 얻어진 최종 착지점들이다. FTL 걸음새는 이 착지점 위에 다리를 착지하면서 작동된다.

그림 10은 그림 9에서 구한 착지점들을 사용하여 비평탄 지형에서 내고장성 FTL 걸음새로 걷는 사각 보행 로봇의 자세한 동작 모습을 도시한 것이다. 그림 9에서 구한 착지점들은 그림 10에서 흰 원으로 표시되어 있으며 사각 보행 로봇의 실제 착지점들은 검은 원으로 표시되어 있다. 또 각 걸음새 좌하단에 표기된 숫자는 지금까지 경과된 걸음새의 이벤트(event) 개수를 말한다. 제안된 2상 불연속 걸음새는 다리 움직임 순서 (6)에서 알 수 있듯이 다섯 개의 이벤트가 한 주기를 형성하므로 표기된 숫자를 5로 나눈 나머지를 보고 현재 어떤 동작이 실행되는가를 유추할 수 있다. 그림에서 '7'번과 '13'번 이벤트 직후에 걸음새 보폭의 조정이 실행되며, 보폭이 조정된 이후에는 다시 앞에서 계산된 $\lambda = 56$ 수치를 유지하면서 FTL 걸음새가 작동된다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 제안된 걸음새를 적용하면 관절고착과 장애 발생한 사각 보행 로봇이 정적 안정여유도를 유지하면서 착지 불가능 영역을 뛰어넘는 고장후 보행을 계속 할 수 있다는 사실이 검증된다.

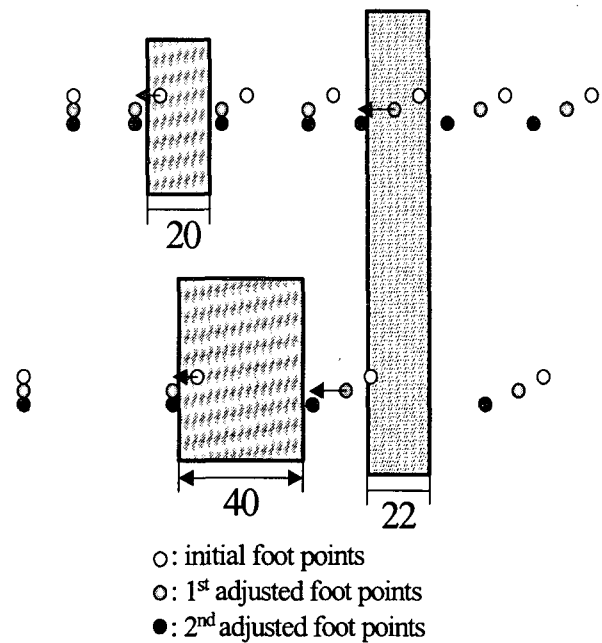


그림 9. FTL 걸음새의 다리 착지점 위치 및 보폭 값 조정.
Fig. 9. Adjustment of foot points and the stride length of the FTL gait.

6. 결 론

본 논문에서는 관절고착고장이 일어난 사각 보행 로봇이 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형에서 보행하기 위한 내고장성 걸음새 계획을 제안하였다. 제안된 내고장성 걸음새의 기본 형태는 2상 불연속 걸음새로서 한 주기 내에

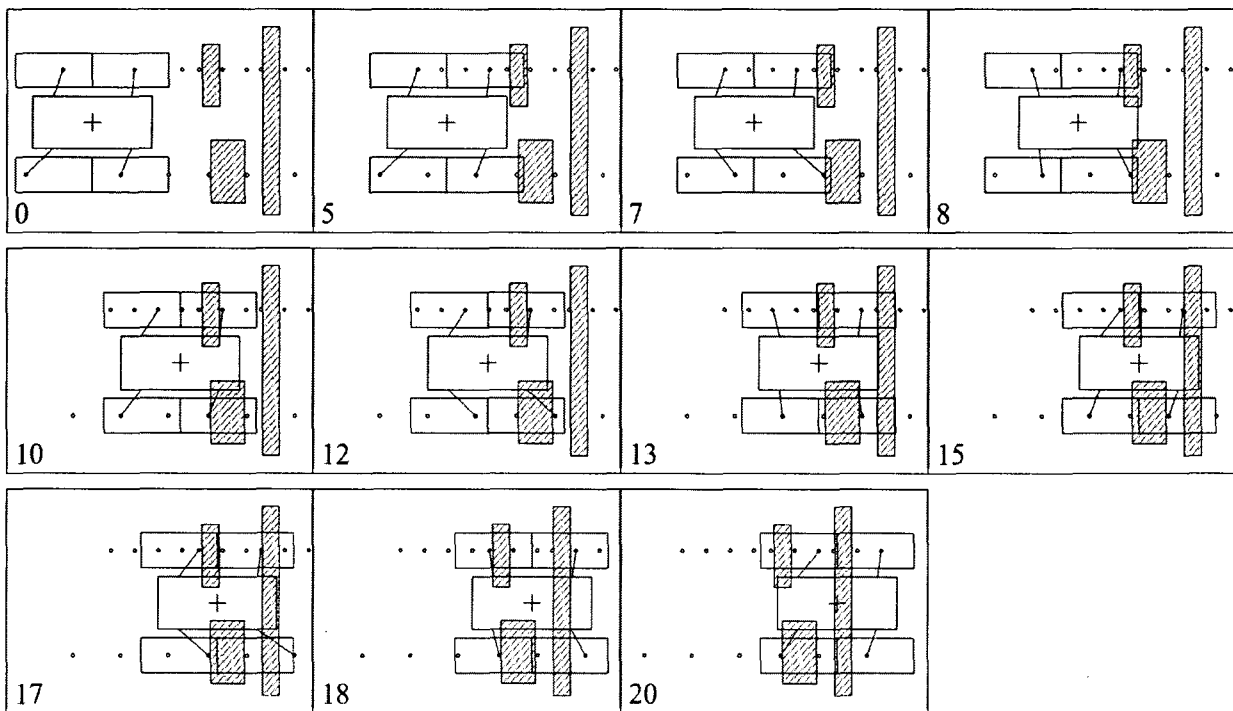


그림 10. 비평탄 지형을 보행하는 내고장성 FTL 걸음새의 모의실험 결과.
Fig. 10. Simulation result of the fault-tolerant FTL gait for walking over a rough planar terrain.

로봇 몸체의 이동을 두 번 포함하고 있는 불연속 걸음새이다. 고장 난 다리의 내고장성 보행을 위해서 로봇 몸체의 이동과 고장 난 다리의 이동을 동기화시켰으며, 그 결과로 기존에 제안되었던 1상 불연속 걸음새보다 이동성과 안정여유도 측면에서 더 우수하다는 성능을 보였다. 또한 2상 불연속 걸음새를 바탕으로 다리의 착지점 개수를 최소한으로 만드는 FTL 걸음새를 생성하여 비평탄 지형의 내고장성 보행에 적용하였다. FTL 걸음새는 2상 불연속 걸음새의 다리 움직임 순서를 유지하면서 고장 난 다리의 기구학에 따라서 최대한의 보폭을 낼 수 있도록 설계되었다. 제안된 내고장성 걸음새 계획의 효용성을 보이기 위해서 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇이 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형에서 고장후 보행을 하는 모습을 모의실험을 통해서 구현하였고, FTL 걸음새가 안정여유도를 유지하면서 내고장성 보행을 한다는 사실을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] T. C. Lueth, U. M. Nassal and U. Rembold, "Reliability and integrated capabilities of locomotion and manipulation for autonomous robot assembly," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 185-198, 1995.

[2] J. M. Yang and J. H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics B*, vol. 28, no. 1, pp. 109-116, 1998.

[3] M. Goel, A. A. Maciejewski and V. Balakrishnan, "Analyzing unidentified locked-joint failures in kinematically redundant manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 15-29, 2005.

[4] J. M. Yang, "Fault tolerant gaits of quadruped robots for locked joint failures," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics C*, vol. 32, no. 4, pp. 507-516, 2002.

[5] 양정민, 노지명, "육각 보행 로봇의 내고장성 세다리 걸음새," *대한전기학회논문지*, 제52D권, 제12호, pp. 689-695, 2003.

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

[7] 양정민, "관절고착고장에 대한 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새 생성," *대한전기학회논문지*, 제54D권, 제3호, pp. 131-140, 2005.

[8] X. D. Qiu and S. M. Song, "A strategy of wave gait for a walking machine traversing a rough planar terrain," *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, vol. 111, no. 4, pp. 471-478, 1989.

[9] J.-N. Lin and S.-M. Song, "Modeling gait transitions of quadruped based on gait kinematics and CMAC neural networks," in *Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence*, vol. 3 pp. 2075-2080, 1998.

[10] J. D. English and A. A. Maciejewski, "Robotic workspaces after a free-swinging failure," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 55-72,

1997.

[11] P. Gonzalez de Santos and M. A. Jimenez, "Path tracking with quadruped walking machines using discontinuous gaits," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 383-396, 1995.

[12] S. Hirose, "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," *International Journal of Robotics Research*, vol. 3, no. 2, pp. 113-133, 1984.

[13] F. Ozguner, S. J. Tsai and R. B. McGhee, "An approach to the use of terrain-preview information in rough-terrain locomotion by a hexapod walking machine," *International Journal of Robotics Research*, vol. 3, no. 2, pp. 134-146, 1984.

저 자 소 개



양 정 민 (楊 正 敏)

1971년 3월 31일생. 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1999년 3월~2001년 2월 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어연구소 선임연구원. 2001년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야: 로봇 제어, 보행 로봇 시스템, 컴퓨터 보안 등.
Tel : 053-850-2736
Fax : 053-850-2704
E-mail : jmyang@cu.ac.kr



박 용 국 (朴 鎬 國)

1964년 11월 25일생. 1987년 2월 서울대학교 졸업. 1988년 12월 미취건대학교 졸업(석사). 1995년 12월 오하이오주립대학교 졸업(공학박사). 1997년 7월~1998년 2월 삼성자동차 생산기술연구소 선임연구원. 1998년 3월~현재 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 부교수. 주관심분야: 자동차부품설계, 금형설계, 로봇제어, 생산공학 등.
Tel : 053-850-2723
Fax : 053-850-2710
E-mail : ykpark@cu.ac.kr