

논문 2006-43SC-3-3

비평탄 지형 보행을 위한 내고장성 FTL 걸음새 (Fault Tolerant FTL Gaits for Walking over Irregular Terrain)

양 정 민*

(Jung-Min Yang)

요 약

본 논문에서는 비평탄 지형을 보행하기 위한 육족 보행 로봇의 내고장성 걸음새 계획을 제안한다. 본 논문에서 고려하고 있는 고장은 관절고착고장으로 로봇 다리의 관절 하나가 어떤 위치에 고착되어서 보행이 끝날 때까지 움직일 수 없는 상태를 말한다. 기존에 제안되었던 평탄 지형 보행을 위한 내고장성 세다리 걸음새 계획을 바탕으로 본 논문에서는 육족 보행 로봇이 관절고착고장이 발생한 후에도 이차원 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형을 걸을 수 있도록 하는 내고장성 FTL(Follow-The-Leader) 걸음새를 구현한다. 제안된 FTL 걸음새는 고장 난 다리의 착지점에서 로봇이 가질 수 있는 최대한의 보폭을 낼 수 있으며, 기존 내고장성 걸음새보다 착지 불가능 영역을 뛰어넘는 능력이 더 우수하다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 제안된 FTL 걸음새의 응용가능성을 검증한다.

Abstract

In this paper, fault-tolerant gait planning of a hexapod robot for walking over irregular terrain is presented. The failure concerned in this paper is a locked joint failure for which a joint in a leg cannot move and is locked in place. Based on the previously proposed fault-tolerant tripod gait for walking over even terrain, fault-tolerant follow-the-leader(FTL) gaits are proposed for a hexapod robot with a failed leg to be able to walk over two-dimensional rough terrain, maintaining static stability and fault tolerance. The proposed FTL gait can have maximum stride length for a given foot position of a failed leg, and yields better ditch crossing ability than the previously developed gaits. The applicability of the proposed FTL gait is verified by using computer graphics simulations.

Keywords : Gait study, Fault tolerance, Locked joint failure, Follow-The-Leader(FTL) gait

I. 서 론

다족 보행 로봇의 내고장성 걸음새 계획(fault-tolerant gait planning)은 로봇이 다리 부분에 고장이 발생한 후에도 안정여유도(stability margin)를 유지하면서 보행을 계속할 수 있게 하는 걸음새를 설계하는 것을 말한다^[1]. 내고장성 걸음새는 다리의 기구학적 고장이 미치는 영향을 보폭(stride length), 안정 여유도, 디듀티(duty factor) 등 걸음새의 성능 지수로 표현할 수 있기 때문에 정적 보행 로봇 분야에서는 연구할 가치가 크다^[2].

저자의 선행연구^[3,4]에서는 다족 보행 로봇에 발생하는 관절고착고장(locked joint failure)을 극복하기 위한 내고장성 걸음새 계획법을 육족 보행 로봇(hexapod robot)의 경우에 대해서 제안하였다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서 외부 작업을 하는 매니퓰레이터에서 흔히 발생할 수 있는 보편적인 종류의 고장이다^[5]. 직선 보행에서 관절고착고장이 야기할 수 있는 교착 상태를 회피하기 위해서 다리 궤적을 조정하는 새로운 걸음새도 최근 제안되었다^[6].

위 연구들에서 제안된 육족 보행 로봇의 내고장성 걸음새는 관절고착고장이 발생한 다리의 자세(configuration)와 로봇이 가질 수 있는 고장 후 보행(post-failure walking) 등을 걸음새 연구의 틀에서 정량적으로 잘 표현했으나 로봇이 보행하는 지형이 완

* 정회원, 대구가톨릭대학교 전자공학과
(Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu)
접수일자: 2005년9월30일, 수정완료일: 2006년5월3일

전 평탄하다는 제한 조건이 있다. 즉 로봇의 다리가 디딜 수 없는 착지 불가능 영역이 지형 내에 존재할 때에는 내고장성 걸음새가 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 능력을 최대한으로 발휘해야 한다. 하지만 기존 걸음새는 고장 난 다리의 자세에 따라서 보폭 등이 고정되기 때문에 비평탄 지형 보행에 바로 적용하기가 어렵다.

본 논문에서는 선행연구의 이러한 약점을 극복하기 위한 방안으로서 비평탄 지형을 보행할 수 있는 육족 보행 로봇의 내고장성 세다리 걸음새(fault-tolerant tripod gait) 계획을 제안한다. 본 논문에서 고려하고 있는 지형은 완전 평탄 지형 안에 이차원 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형이라고 가정한다. 본 논문에서 제안되는 내고장성 걸음새는 일종의 FTL (Follow-The-Leader) 걸음새,^[7] 즉 앞다리의 디딜 곳을 선정 후 뒷다리들이 앞다리가 디딘 곳을 따라서 걷는 걸음새이다. FTL 걸음새를 도입하는 이유는 관절고착고장에 대한 내고장성 걸음새를 FTL 걸음새 형태로 만들면 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 능력을 최대한으로 낼 수 있기 때문이다. 또한 FTL 걸음새는 다리의 착지점의 개수를 최소한으로 줄이는 걸음새이므로 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형을 보행할 수 있는 효과적인 알고리즘을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 논문에서 사용되는 육족 보행 로봇을 모델링하고 평탄 지형에서 제안되었던 기존의 내고장성 세다리 걸음새를 기술한다. III장에서는 본 논문의 주요 결과인 FTL 걸음새를 제안하고 고장 난 다리를 지닌 보행 로봇이 제안된 걸음새로 비평탄 지형을 보행하는 데 적합하다는 사실을 해석적으로 보인다. IV장에서는 제안된 방법의 적용가능성을 보여주기 위해서 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇이 제안된 내고장성 걸음새 계획을 이용하여 비평탄 지형 위에서 성공적으로 보행하는 모의실험을 기술한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

II. 평탄 지형 보행

1. 육족 보행 로봇 모델링

그림 1은 본 논문에서 다루는 육족 보행 로봇의 이차원 모델이다. 몸체 무게중심 C 를 원점으로 하는 몸체 좌표계 X - Y 가 달려 있으며 X 축은 몸체의 세로축(longitudinal axis)과 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림과 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 길이

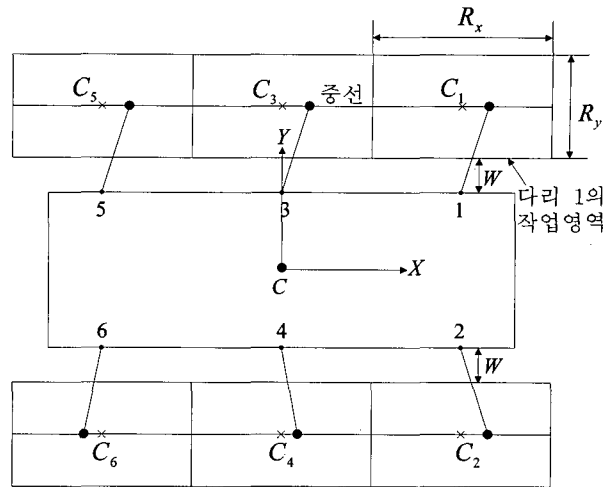


그림 1. 육족 보행 로봇 모델

Fig. 1. Two-dimensional model of a hexapod robot.

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 이등분하는 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(degree of freedom) 3을 가지며 작업 영역 어디에라도 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 비직선 걸음새(non-straight line gait)를 제외함으로써 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 직선 보행 계획에만 연구의 초점을 맞추기로 한다.

2. 내고장성 세다리 걸음새

육족 보행 로봇이 보행을 할 때 지지 상태(support phase)에 있는 다리는 착지점의 위치를 그대로 유지하기 위해서 몸체의 이동에 따라서 끊임없이 자세를 바꾼다. 그러나 관절고착고장이 발생하면 고장 난 다리의 자코비안(Jacobian)의 계수(rank)가 하나 줄어들기 때문에 몸체의 이동에 따라 현재 착지점을 유지하도록 하는 관절 각도를 찾는 역기구학(inverse kinematics) 문제를 풀 수가 없다^[8]. 이동 상태(transfer phase)에 있는 다리에 고장이 발생해도 다리는 예정된 착지점에 정상적으로 착지하지 못하고 한정된 지점에만 착지할 수 있으며, 착지한 후에도 몸체가 이동하면 역시 현재 착지점을 그대로 유지하

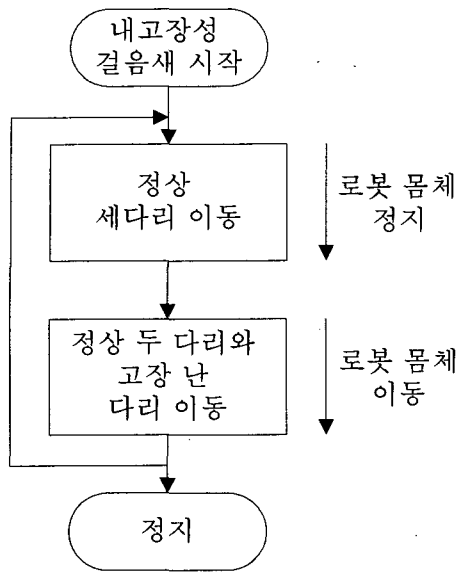


그림 2. 내고장성 세다리 걸음새 계획
Fig. 2. Fault-tolerant tripod gait planning.

지 못한다.

관절고착고장이 초래하는 이와 같은 제한을 극복하기 위해서 기존 연구에서는 고장 난 다리가 로봇 몸체를 지지하는 역할만 할 뿐 몸체를 앞으로 밀어주거나 전진 스윙(swing)을 하지 않도록 하면서 보행에 계속 참여하는 걸음새 계획을 제안하였다^[3,4]. 앞서 말했듯이 고장 난 다리는 로봇 몸체의 임의의 위치에 따른 역기구학 문제를 풀 수 없기 때문에 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때 로봇 몸체는 정지해 있어야 한다. 이 걸음새 계획은 관절고착고장이 발생한 다리에 남아 있는 몸체 지지 능력은 계속 사용하면서 고착된 관절이 야기하는 자유도 감소 문제를 해결하기 때문에 효율적이라고 말할 수 있다.

그림 2는 이러한 내고장성 걸음새 계획을 만족하는 세다리 주기 걸음새(tripod periodic gait)의 알고리즘이다. 정상적인 다리 세 개가 먼저 이룩한 후 이동하는데, 로봇 몸체는 위에서 설명했듯이 고장 난 다리가 지지 상태에 있으므로 정지해 있어야 한다. 정상 세 다리가 이동한 후에는 정상적인 다리 두 개와 고장이 발생한 다리로 이루어진 나머지 tripod가 로봇 몸체와 함께 이동한다. 이때 중요한 것은 고장 난 다리는 역기구학 문제를 풀 수 없기 때문에 몸체의 움직임에 따라서 수동적인 이동만 할 뿐 전진 스윙은 하지 않는다는 사실이다.

그림 3은 평탄 지형에서 보행하는 육족 보행 로봇이 다리 1에 관절고착고장이 발생한 후 가지는 주기적 세다리 걸음새의 한 주기 동안의 모습을 나타낸 것이다^[4]. 그림 3의 걸음새는 최저 세로 안정여유도(longitudinal

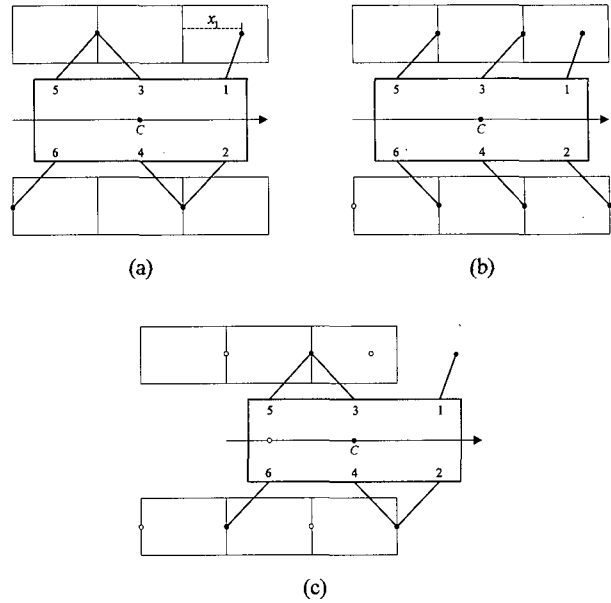


그림 3. 관절고착고장이 다리 1에 발생한 육족 보행 로봇의 내고장성 주기 세다리 걸음새 (a) 초기 상태, (b) 다리 (2, 3, 6) 이동(로봇 몸체 정지), (c) 다리 (1, 4, 5) 이동(로봇 몸체 이동).

Fig. 3. Fault-tolerant tripod periodic gait of a hexapod robot with leg 1 in locked joint failure. (a) initial state, (b) swing legs 2, 3 and 6 and (c) swing and place legs 1, 4 and 5 with body moving.

stability margin)와 최대 보폭 $\lambda = R_x$ 을 가진 것이다. 그림 3(a)에서 표시한 x_1 은 관절고착고장에 의해서 결정되는 다리 1의 고정된 착지점^[3]의 위치를 작업 영역 뒤 경계로부터 측정한 값을 말한다. 전진 스윙을 하지 않기 때문에 내고장성 주기 걸음새의 보폭은 작업 영역의 길이 R_x 보다 클 수 없다. 다리 1외의 다리에 고장이 발생했을 경우의 걸음새와 0보다 큰 세로 안정여유도를 가지는 걸음새는 그림 3으로부터 쉽게 유도될 수 있다. 육족 보행 로봇에서 정적 안정여유도를 유지하기 위한 세다리 걸음새의 표준 다리 움직임 순서는 항상 (2, 3, 6)--(1, 4, 5)이므로^[9] 그림 3의 걸음새도 동일한 다리 움직임 순서를 가진다. 하지만 내고장성 걸음새 계획의 원칙에 따라서 고장 난 다리는 스스로 움직이지 않고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 이동하므로 다리 1과 항상 같은 상태에 있는 다리 4와 다리 5도 이룩만 하고 전진 스윙은 하지 않는다.

III. 비평탄 지형 보행

1. 기존 걸음새의 문제점

그림 3의 내고장성 세다리 걸음새는 최대 보폭을 가지

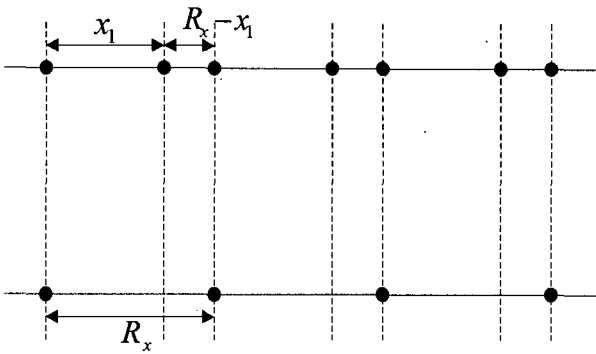


그림 4. 그림 3 걸음새 다리 궤적 위의 착지점들
Fig. 4. Foot positions on the foot trajectory of the gait in Fig. 3.

므로 평탄 지형 보행에서는 속도 면에서 우수한 주기적 보행을 보장할 수 있으나 고장 난 다리가 다리 궤적 위에 착지점들을 많이 남기게 되므로 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형 보행에서는 적합하지 않다. 본 논문에서는 내고장성 걸음새가 비평탄 지형 보행에 적합한 정도를 정량적으로 나타내기 위해 다음과 같은 성능 지수를 도입한다. 그림 4는 그림 3의 내고장성 걸음새가 가지는 다리 궤적 위에 남게 되는 다리의 착지점들을 다시 그린 것이다. 본 논문에서는 고장 난 다리가 속해 있는 다리 궤적 위 착지점들 사이의 평균 거리를 ‘평균 착지점 거리’ d_{avg} 라 하고 인접한 착지점 사이의 거리 중 최대값을 ‘최대 착지점 거리’ d_{max} 라고 각각 정의한다. 그림 4에서 고장 난 다리가 속해 있는 다리 궤적은 위쪽 직선이므로 d_{avg} 와 d_{max} 는 각각 다음과 같다.

$$d_{avg} = (x_1 + R_x - x_1) / 2 = R_x / 2 \tag{1}$$

$$d_{max} = \max [x_1, R_x - x_1]$$

기존 내고장성 세다리 걸음새의 약점을 위 식에서 찾을 수 있다. 즉 고장 난 다리의 착지점에 상관없이 평균 착지점 거리 d_{avg} 는 작업 영역의 절반으로 고정되기 때문에 착지 불가능 영역이 조밀하게 퍼져 있는 지형에서는 기존 내고장성 걸음새를 가진 육족 보행 로봇이 보행을 하지 못하고 교착 상태에 빠질 위험이 있다. 또한 d_{max} 식에서 알 수 있듯이 x_1 이 0이나 R_x 근처 값을 가지면 최대 착지점 거리가 길어져서 폭이 넓은 착지 불가능 영역을 뛰어넘을 능력이 커지지만, x_1 이 $R_x/2$ 근처에 있게 되면 최대 착지점 거리도 $R_x/2$ 정도밖에 되지 않아 이동성이 오히려 줄어들게 된다. 따라서 주어진 관철고 착고장의 자세에서 평균 착지점 거리와 최대 착지점 거

리를 동시에 늘일 수 있는 새로운 내고장성 걸음새를 구성하는 일이 필요하다.

2. FTL 걸음새

본 논문에서는 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇의 비평탄 지형 보행을 위한 새로운 걸음새로서 내고장성 FTL 걸음새를 제안한다. 제안되는 FTL 걸음새도 기존 걸음새와 마찬가지로 세 다리가 항상 이동 상태에 있는 세다리 걸음새의 형태를 가진다. FTL 걸음새는 다리의 착지점의 개수를 최소한으로 줄이는 걸음새이므로 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형 보행에서 매우 효과적인 능력을 발휘한다. 앞서와 마찬가지로 관절고착고장은 다리 1에 발생한다고 가정하고 작업 영역 내에서의 다리 1의 고정된 착지점 위치를 x_1 이라고 정의한다.

걸음새를 구성하기 전에 내고장성 세다리 FTL 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭은 $0 < x_1 < R_x$ 일 때 $3R_x/4$ 라는 사실을 먼저 증명한다. $x_1 = 0$ 또는 $x_1 = R_x$ 일 때에는 그림 4에서 유추할 수 있듯이 FTL 걸음새가 보폭 $\lambda = R_x$ 을 가지는 이상적인 걸음새가 된다.

정리1> 관절고착고장이 다리 1에 발생한 육족 보행 로봇의 내고장성 세다리 FTL 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭은 $0 < x_1 < R_x$ 일 때 $3R_x/4$ 이다.

증명> $0 < x_1 < R_x$ 일 때 내고장성 세다리 FTL 걸음새의 보폭이 $3R_x/4$ 보다 크다고 가정하자. 다리 (2, 3, 6)이 먼저 이동한다고 하면 보폭이 $3R_x/4$ 보다 크므로 다리 6은 그림 5에서 A로 표시된 부분 궤적 위에 착지해야 하고 다리 2는 B로 표시된 부분 궤적 위의 한 점에서 지지 상태로 있다가 이륙해야 한다. 그런데 FTL 걸음새를 구성하기 위해서는 다리 6의 착지점과 다리 2의 이륙점 사이의 거리가 보폭의 정수배가 되어야 다리 4의 착지점을 정할 수 있는데 보폭이 $3R_x/4$ 을 초과하면 그렇게 되도록 하는 착지점과 이륙점을 찾을 수 없다. 따라서 FTL 걸음새의 보폭은 $3R_x/4$ 을 넘을 수 없다. 그림 5에서 표시된 검은 점들은 보폭이 최대값 $3R_x/4$ 을 가질 때의 다리 (2, 3, 6)의 착지점들을 각각 표기한 것이다. □

착지점 x_1 의 값에 따라서 내고장성 FTL 걸음새의 보폭이 틀리므로 고장 난 다리의 착지점 x_1 에 따라서 최대 보폭을 가지는 FTL 걸음새를 생성하도록 한다.

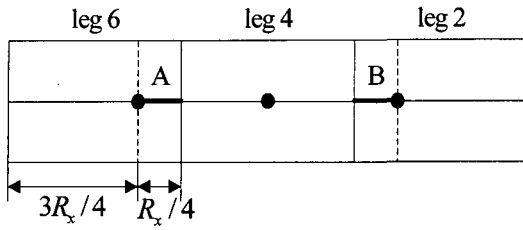


그림 5. 내고장성 세다리 FTL 걸음새의 최대 보폭

Fig. 5. Maximum stride length of the fault-tolerant tripod FTL gait.

i) $0 < x_1 \leq R_x/2$

$0 < x_1 \leq R_x/2$ 일 때에는 그림 6(a)에 나와 있듯이 다리 3이 초기 상태에서 작업 영역의 뒤 경계에 착지해 있으면 FTL 걸음새는 최대한의 보폭을 가질 수 있다. 이때 보폭 λ 은 아래와 같이 구해진다.

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

위 식으로부터 λ 은 $R_x/2 < \lambda \leq 3R_x/4$ 의 범위에 있으므로 그림 6(a)의 걸음새처럼 초기 상태에서 다리 6을 작업 영역의 뒤 경계에 착지시키고 다리 4와 다리 2를 다리 6의 착지점으로부터 각각 2λ 과 3λ 앞에 착지시키면 교착 상태 없이 내고장성 세다리 FTL 걸음새가 완성된다. 걸음새의 다리 움직임 순서는 그림 3에 나와 있는 기존 내고장성 걸음새와 동일하다.

ii) $R_x/2 < x_1 \leq 3R_x/4$

x_1 이 이 범위에 있을 때 i)의 경우와 동일하게 초기 착지점을 잡으면 식 (1)에서 λ 가 $3R_x/4$ 를 초과하기 때문에 성립되지 않는다. 따라서 그림 6(b)에 표기되어 있듯이 x_1 을 보폭 λ 로 정하고 다리 3이 이동하여 작업 영역의 앞 경계로 착지하도록 초기 착지점을 잡으면 최대 보폭을 가지는 FTL 걸음새를 구성할 수 있다. FTL 걸음새를 완성하기 위해서 다리 5의 초기 착지점은 다리 3의 초기 착지점보다 λ 만큼 후방에 위치시킨다. 걸음새 보폭의 공식을 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = x_1 \quad (R_x/2 < x_1 \leq 3R_x/4) \quad (3)$$

iii) $3R_x/4 < x_1 < R_x$

이 범위에서는 $x_1 > 3R_x/4$ 이므로 ii)와 같은 방법은

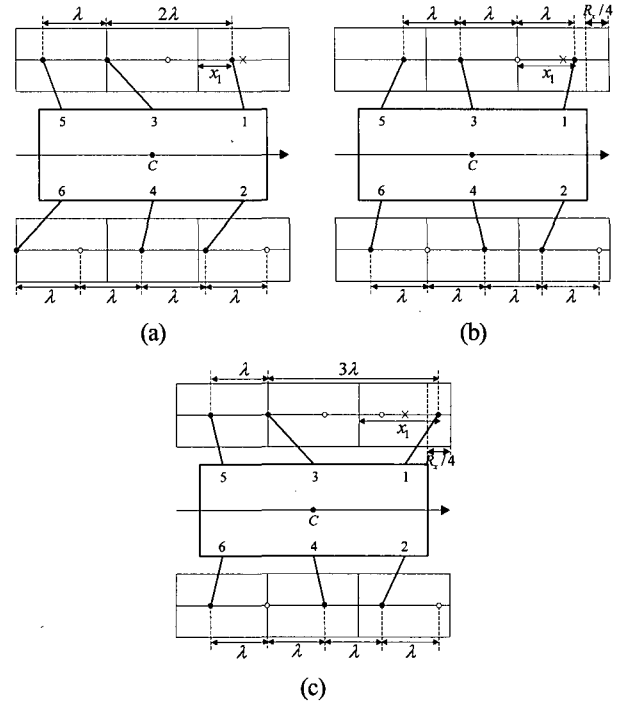


그림 6. 내고장성 세다리 FTL 걸음새. (a) $0 < x_1 \leq R_x/2$, (b) $R_x/2 < x_1 \leq 3R_x/4$, (c) $3R_x/4 < x_1 < R_x$

Fig. 6. Fault-tolerant tripod FTL gait. (a) $0 < x_1 \leq R_x/2$, (b) $R_x/2 < x_1 \leq 3R_x/4$, (c) $3R_x/4 < x_1 < R_x$.

사용될 수 없고 i)과 유사하게 다리 3 작업 영역의 뒤 경계로부터 다리 1 착지점까지 거리를 정수배로 하는 보폭을 찾아야 한다. $3R_x/2 < R_x + x_1 < 9R_x/4$ 이므로 그림 6(c)에서처럼 다리 3과 다리 1의 착지점 사이의 거리가 보폭의 세 배가 되도록 λ 를 잡아야 FTL 걸음새가 최대 보폭을 가질 수 있게 된다. 보폭 λ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda = (R_x + x_1)/3 \quad (3R_x/4 < x_1 < R_x) \quad (4)$$

3. FTL 걸음새 성능 분석

앞 절에서 정의한 d_{avg} 와 d_{max} 을 이용하여 기존 내고장성 걸음새와 제안된 FTL 걸음새와의 성능을 비교해보자. FTL 걸음새는 앞다리의 디딜 곳을 선정한 후 뒷다리가 앞다리가 디딘 곳을 따라서 걸으므로 주기적 보행을 한다면 항상 $d_{avg} = d_{max} = \lambda$ 인 관계를 유지한다. 그림 7은 식 (1) ~ (4)를 이용하여 기존 내고장성 세다리 걸음새와 제안된 내고장성 FTL 걸음새의 d_{avg} 와 d_{max} 을 그린 것이다. 그래프에서 x_1 , d_{avg} , d_{max} 값을 각각 작업

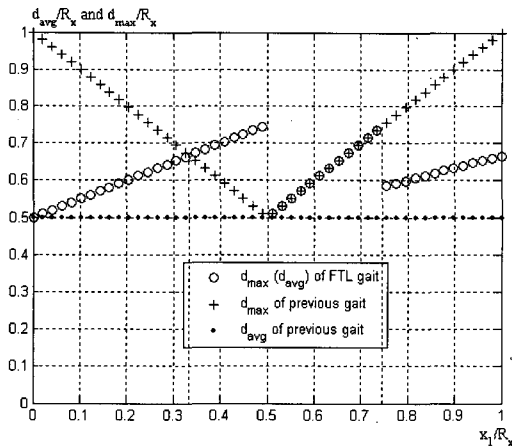


그림 7. 내고장성 FTL 걸음새의 최대 보폭.
Fig. 7. Maximum stride length of the fault-tolerant FTL gait.

영역의 길이 R_x 에 대해서 정규화한 후 도시하였다. FTL 걸음새는 x_1 가 $R_x/2$ 과 $3R_x/4$ 일 때 각각 $d_{avg}(=d_{max})$ $3R_x/4$ 을 가지며 항상 $R_x/2$ 보다 크거나 같은 값을 가짐을 알 수 있다.

이 그래프로부터 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다. 첫째, 기존 내고장성 걸음새의 d_{avg} 는 $R_x/2$ 로 고정된 값이므로 제안된 내고장성 FTL 걸음새는 기존 걸음새보다 평균 착지점 거리 면에서 항상 더 우수하다. 둘째, 최대 착지점 거리를 비교해보면 $R_x/3 \leq x_1 \leq 3R_x/4$ 구간에서는 FTL 걸음새의 d_{max} 가 더 크게 나오며 나머지 구간에서는 기존 걸음새의 d_{max} 가 더 크게 나온다. 이것은 제안된 FTL 걸음새가 육족 보행 로봇의 최대 보폭 구사 능력을 제한하면서 평균 착지점 거리를 늘이게끔 설계되었기 때문이다. 착지 불가능 영역이 한두 개로 고립되어 있는 비평탄 지형에서는 이러한 최대 보폭값이 보행 로봇의 이동능력을 가능할 수도 있다. 하지만 착지점 간의 평균 거리를 얼마나 늘일 수 있는가가 일반적인 비평탄 지형 보행에서의 성능을 결정하는 중요한 잣대가 되므로 [10] 내고장성 FTL 걸음새의 제안은 의의가 있다고 말할 수 있다.

IV. 모의실험

1. 비평탄 지형 보행 계획

본 장에서는 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇이 제안된 내고장성 FTL 걸음새를 이용하여 착지 불가능 영역을 포함하는 비평탄 지형을 보행하는 과정을 모의실

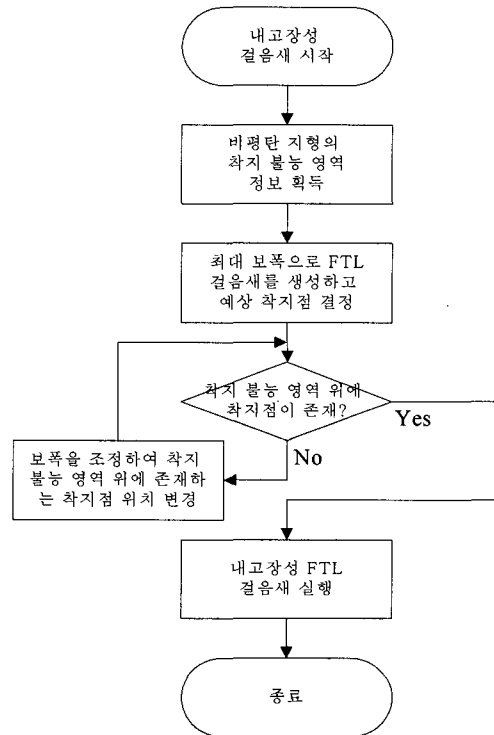


그림 8. 내고장성 FTL 걸음새를 이용한 비평탄 지형 보행 알고리즘
Fig. 8. Algorithm for walking over irregular terrain using fault-tolerant FTL gait.

험으로 검증한다. 그림 6에 나타낸 FTL 걸음새는 주기적 동작을 하므로 착지 불가능 영역이 불규칙적으로 분포된 비평탄 지형에 바로 적용하기는 어렵다. 본 논문에서는 비평탄 지형의 정보를 육족 보행 로봇이 미리 알고 있다고 가정하고 최대 보폭을 가지는 FTL 걸음새를 적용시킬 때 나오는 예상 착지점들을 구한 후 착지점 위치 및 보폭 등을 조정하여 실제 착지점을 구하는 방법을 사용한다. 본 논문에서 사용되는 비평탄 지형 보행 계획의 흐름도는 그림 8에 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이 예상 착지점 중 하나가 착지 불가능 영역 위에 놓인다면 그 직전 걸음새의 보폭을 조정하여 착지 불가능 영역 바깥으로 착지점을 옮긴다. 옮겨진 착지점 뒤에 나오는 착지점들의 위치도 함께 바뀌므로 이러한 과정을 되풀이하여 착지 불가능 영역 위에 놓인 착지점들이 없어질 때까지 조정을 반복한다.

2. 모의실험 결과

그림 9는 모의실험에서 사용되는 비평탄 지형 모델과 내고장성 FTL 걸음새를 시작할 때 육족 보행 로봇이 가지는 기구학적 상태를 보여준다. 각 다리의 작업 영역의 길이는 $R_x = 80(\text{unit})$ 이며, 관절고착고장이 발

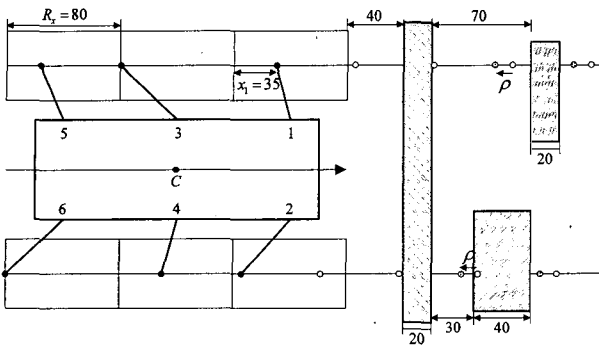
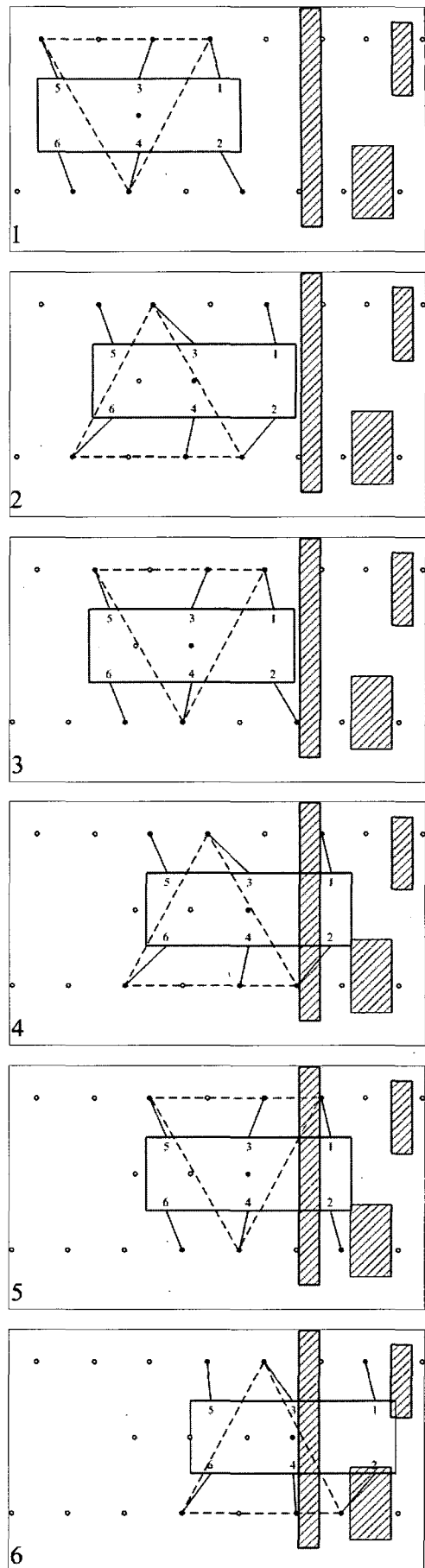


그림 9. 모의실험을 위한 비평탄 지형 모델
Fig. 9. Model of irregular terrain for simulation.

생한 다리 1의 착지점은 $x_1 = 35$ 이다. 그림에서 사선으로 칠해진 사각형들은 모두 착지 불가능 영역을 가리킨다. x_1 이 $0 < x_1 \leq R_x/2$ 의 범위 안에 속하므로 식 (2)에 의해서 FTL 걸음새가 가지는 최대 보폭은 $\lambda = (80 + 35)/2 = 57.5$ 이다. 따라서 존재하는 착지 불가능 영역의 길이가 최소한 57.5를 넘지 말아야 걸음새가 교착 상태에 빠지지 않게 된다. 본 모의실험에서는 그림 9에 나온 대로 각각 20, 40, 20의 길이를 가지는 착지 불가능 영역을 사용하여 교착 상태에 빠지는 경우를 제외시켰다. 만약 FTL 걸음새의 최대 보폭보다 더 긴 착지 불가능 영역이 다리 궤적 위에 존재하는 경우에는 제안된 걸음새 계획을 사용할 수 없고 장애물 회피 경로 계획 등을 이용하여 보행 궤적 자체를 변경해야 할 것이다.

그림 9에서 다리 (2, 4, 6)이 가지는 다리 궤적 위의 예상 착지점 하나가 길이 40의 착지 불가능 영역 위에 놓여 있으므로 보폭 조정 과정을 거쳐야 한다. 그림에서 표기되었듯이 모의실험에서는 이 착지점을 가지는 걸음새의 보폭을 $\rho = 14$ 만큼 앞으로 조정하여 착지 불가능 영역을 벗어나게 하였다.

그림 10은 모의실험 결과를 tripod의 이동 단계별로 도시한 것이다. 그림에서 홀수 번째 단계는 정상 다리 (2, 4, 6)이 이동할 때의 모습이며 짝수 번째 단계는 고장 난 다리 1을 포함한 다리 (1, 4, 5)가 이동할 때의 모습이다. 그림 9에서 구한 조정 착지점들은 그림 10에서 흰 원으로 표시되어 있으며 육족 보행 로봇의 실제 착지점들은 검은 원으로 표시되어 있다. 그림에서 '4' 단계에서 '5' 단계로 넘어갈 때 착지 불가능 영역을 피하기 위해서 걸음새 보폭의 조정이 실행되며, 보폭이 조정된 이후에는 다시 앞에서 계산된 $\lambda = 57.5$ 의 값을 유지하면서 FTL 걸음새가 작동된다. 그림에서 점선 삼



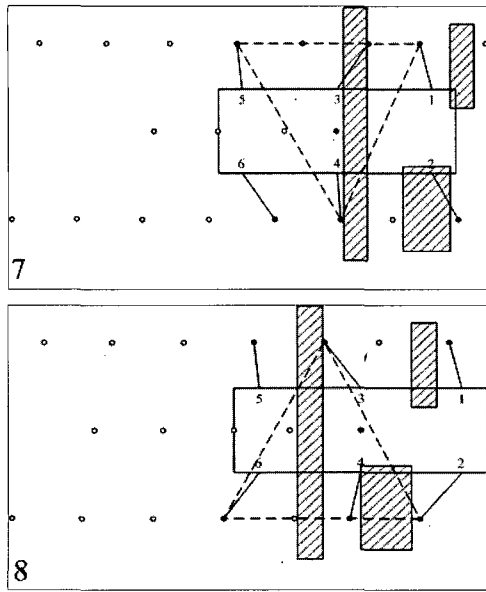


그림 10. 모의실험 결과
Fig. 10. Simulation results.

각형은 각 걸음새가 가지는 지지 다각형(support pattern)을 말한다. 그림에서 볼 수 있듯이 무게중심이 항상 지지 다각형의 내부에 존재한다. 따라서 제안된 FTL 걸음새는 비평탄 지형에서 관절고착고장이 발생한 다리를 위한 내고장성 보행을 하면서 걸음새의 안정 여유도도 계속 유지한다는 사실을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 비평탄 지형 보행을 위한 내고장성 걸음새를 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇에 대해서 제안하였다. 제안된 내고장성 걸음새는 일종의 FTL 걸음새로서 보행 로봇이 착지 불가능 영역을 뛰어 넘는 능력을 가지며 교착 상태에 빠지지 않고 비평탄 지형 보행을 할 수 있는 효과적인 알고리즘을 제공한다. 본 논문에서는 기존 내고장성 걸음새의 문제점과 FTL 걸음새의 중요성을 기술한 후 제안된 FTL 걸음새의 보폭 공식과 다리 이동 순서 등을 해석적으로 유도하였다. 제안된 내고장성 FTL 걸음새 계획의 효용성을 보이기 위해서 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇이 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형에서 고장후 보행을 하는 모습을 모의실험을 통해서 구현하였고, FTL 걸음새가 안정여유도를 유지하면서 내고장성 보행을 성공적으로 수행한다는 사실을 검증하였다.

추후 연구 과제로는 비직선 걸음새를 가지는 내고장성 걸음새 계획, 삼차원 착지 불가능 영역이 존재하는 비평탄 지형을 위한 내고장성 걸음새 연구 등이 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part:B*, vol. 28, no. 1, pp. 109-116, 1998.
- [2] S. K.-K. Chu and G. K.-H. Pang, "Comparison between different model of hexapod robot in fault-tolerant gait," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part:A*, vol. 32, no. 6, pp. 752-756, 2002.
- [3] 양정민, "자율 보행 로봇을 위한 내고장성 제어," *제어자동화시스템공학 논문지*, 제9권, 제11호, pp. 943-951, 2003.
- [4] J.-M. Yang, "Tripod gaits for fault tolerance of hexapod walking machines with a locked joint failure," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 52, no. 2/3, pp. 180-189, 2005.
- [5] M. Hassan and L. Notash, "Design modification of parallel manipulators for optimum fault tolerance to joint jam," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 5, pp. 559-577, 2005.
- [6] 양정민, "다리 궤적을 조정하는 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새," *전자공학회 논문지*, 제42권, SC 제3호, pp. 105-114, 2005.
- [7] 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.
- [8] C. L. Lewis and A. A. Maciejewski, "Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for locked joint failures," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 4, pp. 622-629, 1997.
- [9] S. Miao and D. Howard, "Optimal tripod gait generation for hexapod walking machines," *Robotica*, vol. 18, no. 6, pp. 639-649, 2000.
- [10] 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.

— 저 자 소 개 —



양 정 민(정회원)

1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사 졸업

1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업

1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업

1999년~2001년 한국전자통신연구원 선임연구원

2001년~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수

<주관심분야 : 로봇 제어, 보행 로봇 시스템 등>