

Fault-Tolerant Tripod Gaits for Hexapod Robots

楊正敏* · 魯智明**
(Jung-Min Yang · Ji-Myong Nho)

Abstract - Fault-tolerance is an important design criterion for robotic systems operating in hazardous or remote environments. This paper addresses the issue of tolerating a locked joint failure in gait planning for hexapod walking machines which have symmetric structures and legs in the form of an articulated arm with three revolute joints. A locked joint failure is one for which a joint cannot move and is locked in place. If a failed joint is locked, the workspace of the resulting leg is constrained, but hexapod walking machines have the ability to continue static walking. A strategy of fault-tolerant tripod gait is proposed and, as a specific form, a periodic tripod gait is presented in which hexapod walking machines have the maximum stride length after a locked failure. The adjustment procedure from a normal gait to the proposed fault-tolerant gait is shown to demonstrate the applicability of the proposed scheme.

Key Words : walking robots, hexapod robots, fault tolerance, tripod gaits

1. 서 론

바퀴 구동 이동 로봇(wheeled mobile robot)에 비해서 우수한 운동성과 지형 적응성을 지니는 다각 보행 로봇(multi-legged robot)은 로봇공학 기술의 발전과 더불어 로봇 산업계의 중심으로 자리 잡았다[1]. 다각 보행 로봇이 가지고 있는 중요한 장점 중의 하나는 다리에 발생하는 여러 가지 고장에 대해서 내고장성(fault tolerance)을 지닌다는 사실이다. 바퀴 구동 이동 로봇은 바퀴가 지표면과 항상 접촉해야 하므로 바퀴 하나만 고장이 나도 전체 로봇 시스템의 운동성에 치명적인 결함이 생겨 제대로 주행하기가 불가능하다. 그러나 정적 보행(static walking)을 하는 다각 보행 로봇은 다리의 관절(joint)이나 링크(link)에 고장이 발생해도 로봇의 기구학적 특성상 전체 시스템의 동역학 운동이 마비되지 않는다. 이것은 정적 안정여유도(static stability margin)를 유지하는 데 필요한 개수보다 더 많은 다리가 다각 보행 로봇에 달렸기 때문이다. 고장이 발생한 다리의 활동력이 저하되거나 최악의 경우 고장 난 다리를 전혀 사용하지 못하게 되어도 다각 보행 로봇은 나머지 정상적인 다리를 이용하여 제한적인 주행을 계속할 능력이 있다. 최근 다각 보행 로봇의 성능이 더욱 강력해지고 정교해짐에 따라 그 응용 범위도 평탄 지형에서의 단순 보행에서 벗어나 점점 더 광범위하게 확대되고 있으므로[2] 다각 보행 로봇의 이러한 고장 극복 능력은 로봇이 새로운 환경에서 더 나은 성능을 보이기 위해서 필수적으로 개발되어야 할 부분이다.

본 논문의 목적은 관절고착고장(locked joint failure)에 대한 다각 보행 로봇의 내고장성 걸음새(fault-tolerant gait) 계획 방법을 제안하는 것이다. 본 논문에서 정의하는 내고장성 걸음새란 고장이 발생한 후에도 다각 보행 로봇이 외부로부터의 수리나 보수를 받지 않고 안정여유도를 유지하면서 주어진 경로를 따라 보행을 계속할 수 있게 만드는 걸음새를 말한다. 다각 보행 로봇이 보행을 할 때 발생하는 고장의 종류는 매우 다양하나 대표적인 것으로는 보행 로봇이 외부 환경과 접촉하여 생기는 기구학적 파손, 로봇 센서의 고장으로 인한 오동작, 다리와 제어기 사이의 통신 두절, 다리의 말단장치(end-effector) 및 관절의 고장, 다리 링크의 파손 등이 있다[3]. 이러한 고장들 중에서 다리에 발생하는 고장은 로봇의 보행 능력과 안정여유도 변화에 직접적인 영향을 미치므로 우선적으로 극복되어야 할 대상이다. 관절고착고장이란 다리의 관절 하나가 어떤 이유 때문에 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서, 매니플레이터(manipulator)형 다리에서 일어날 수 있는 대표적인 고장이다[4]. 관절고착고장은 관절에 대한 직접적 기계 파손 때문에 일어나거나, 관절 액츄에이터(actuator)의 고장으로 인한 멈춤 장치[5]의 작동 때문에 간접적으로 발생하며, 로봇에 여러 가지 고장 발견 소프트웨어(fault-detection software)[6]가 부착되어 고장을 감지한 후 관절 위치를 고정시키라는 명령이 작동되어 생기기도 한다. 대부분의 다각 보행 로봇의 다리는 매니플레이터 구조를 지니고 있으므로 이러한 관절고착고장에 쉽게 노출된다. 여유자유도 매니플레이터(redundant manipulator)에 대해서는 이러한 관절고착고장을 감내할 수 있는 제어 기법에 대한 몇 가지 연구가 발표되었다[4],[7]. 하지만 다각 보행 로봇의 걸음새 계획 문제는 매니플레이터 구조를 가지는 여러 개의 다리와 로봇 무게중심의 움직임을 함께 생각해야 하므로 여유자유도 매

* 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 助敎授 · 工博
 ** 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 專任講師 · 工博
 接受日字 : 2003年 8月 19日
 最終完了 : 2003年 10月 30日

니플레이터 한 대에 국한된 내고장성 제어 문제에 비해서 더 상위 수준의 문제라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 관절고착고장의 특징과 고장이 야기하는 다리 작업 공간의 변화에 대해서 기술한다. 그런 다음 관절고착고장이 발생해도 다각 보행 로봇이 안정여유도를 유지하면서 정적 보행을 계속하도록 하는 내고장성 걸음세의 일반적인 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서는 육각 보행 로봇(hexapod robot)을 보행 로봇 모델로 사용하고 세다리 걸음세(tripod gait), 즉 보행할 때 지표면을 지지하고 있는 다리의 수가 항상 세 개인 걸음세에 대한 내고장성 보행을 제안한다. 육각 보행 로봇은 정적 안정여유도를 유지하는 데 필요한 최소 다리 수(=4)보다 두 개 더 많은 다리를 가지고 있으므로 사각 보행 로봇(quadruped robot)보다 관절고착고장에 대한 내고장성 능력이 더 우수하다. 세다리 걸음세에 대한 내고장성 걸음세를 유도하기로 한 이유는 세다리 걸음세가 육각 보행 로봇의 표준 걸음세로 사용되고 있으며 최소한의 안정여유도를 가지고 가장 빠른 속도를 보이기 때문이다[8]. 가장 불안정한 세다리 걸음세에 대한 내고장성 걸음세 계획이 존재하면 안정여유도가 더 큰 다른 걸음세에 대한 내고장성 걸음세 계획은 저절로 보장될 것이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 육각 보행 로봇 모델과 로봇 다리의 기구학적 모델에 대해서 기술한다. 3장에서는 관절고착고장의 특징과 고장이 발생한 관절 위치에 따른 다리 작업 공간 변화를 설명한다. 4장에서는 관절고착고장에 대한 일반적인 내고장성 걸음세 알고리즘을 제안하고 제안한 알고리즘을 바탕으로 주기성을 가지는 내고장성 주기 걸음세(fault-tolerant periodic gait)를 생성한다. 5장에서는 정상적인 걸음세로 보행을 하고 있는 육각 보행 로봇이 관절고착고장이 발생한 후 내고장성 주기 걸음세로 전환하는 과정을 예시하여 제안된 걸음세 계획이 육각 보행 로봇의 일반적인 보행에 잘 적용될 수 있음을 보인다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 내린다. 참고로 본 논문에서 논의하고 있는 걸음세 연구(gait study)에 대한 개괄적 지식은 [8],[9]에서 얻을 수 있다.

2. 모델링

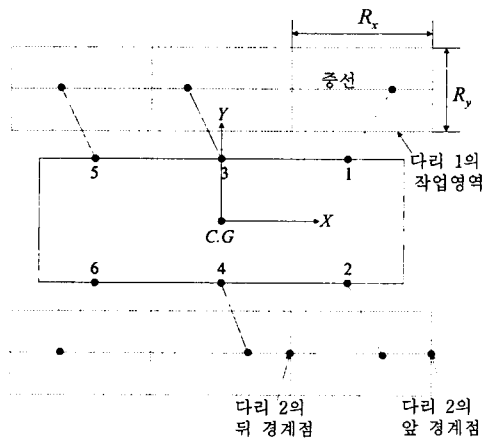


그림 1 육각 보행 로봇의 이차원 모델.
Fig. 1 Two-dimensional model of a hexapod robot.

그림 1은 육각 보행 로봇의 이차원 모델이다. 로봇의 몸체는 기하학적으로 좌우 대칭인 형태이며 몸체 무게중심 CG(center of gravity)와 기하학적 중심점이 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 여섯 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며 이차원 평면상에 길이 R_x , 폭 R_y 인 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)으로 투영된다고 정의한다. 작업 영역과 중선(center line)이 만나는 앞뒤 점을 각각 '앞 경계점'과 '뒤 경계점'이라고 정의한다. 또한 무게중심 CG를 원점으로 하는 몸체 좌표계 X-Y에 따라 1번부터 6번까지 각 다리에 번호를 부여한다. 내고장성 걸음세 계획의 명확한 서술을 위해 본 논문에서는 [10]에서 제안된 설정과 마찬가지로 육각 보행 로봇이 완전 평탄한 지형에서 +X축 방향으로 직선 보행을 한다고 가정한다. 또한 각 다리는 그림 1과 같이 항상 직사각형 작업 영역의 중선에 착지하며 안정성 판단 시 로봇의 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려하기로 한다.

육각 보행 로봇의 다리는 그림 2와 같이 두 개의 링크(link)로 구성된 팔꿈치형(articulated-arm type) 매니플레이터[5] 구조로 되어 있다. 상위 링크는 로봇 몸체와 두 개의 회전 관절로 연결되어 있고 하위 링크는 상위 링크와 회전 관절 하나로 연결되어 있다. 상위 링크에 달린 회전 관절 중 로봇 몸체의 세로(longitudinal) 방향으로 회전하는 관절을 관절 1이라고 정의하고 로봇 몸체의 상하 방향으로 회전하는 관절을 관절 2라고 정의한다. 또한 상위 링크와 하위 링크를 연결해주는 관절을 관절 3이라고 정의한다. 관절 1에는 다리가 로봇 몸체에 대해서 이동할 때 쓰이는 메인 액츄에이터(main actuator)가 달려 있고, 관절 2와 관절 3은 다리가 지표면을 이룩하거나 착지할 때 사용된다. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각각 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의한다.

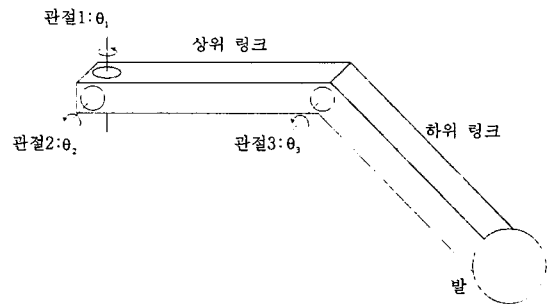


그림 2 팔꿈치형 다리 모델.
Fig. 2 Leg model of an articulated-arm type.

3. 관절고착고장의 특징

다리에 관절고착고장이 발생하면 고장 난 관절은 위치를 알 수 있는 어떤 값으로 고착되어 움직이지 않게 된다. 관절고착고장이 일어나면 고장이 발생한 다리는 자유도(degree of freedom)가 줄어들어 이차원 운동밖에 하지 못한다[7]. 본 장에서는 관절고착고장이 다리의 세 관절에 각각 발생했을 경우 초래되는 다리의 이동 가능 범위의 변화를 걸음세 연구와 로봇 기구학의 관점에서 조사한다.

3.1 관절 1의 고장

관절고착고장이 발생하여 관절 1이 움직이지 못하게 되면 다리는 두 개의 회전 관절로 이루어진 2-링크 평면 매니퓰레이터와 동일한 기구학을 가지게 된다. 따라서 다리의 이동 가능 범위는 평면이 되고 지표면에 투영된 범위는 그림 3과 같은 직선이 된다. 그림에서 θ_1 은 관절 1이 고착된 위치이다. 본 논문에서 고려하고 있는 직선 보행에서 다리의 궤적은 작업 영역의 중선 위에만 있어야 하므로 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 착지 영역은 그림 3(a)의 점 P밖에 없다. 관절 1이 움직이지 못하면 다리는 전후 이동을 하지 못하고 관절 2와 관절 3을 이용하여 제자리에서 이륙과 착지 동작만을 취할 수 있다.

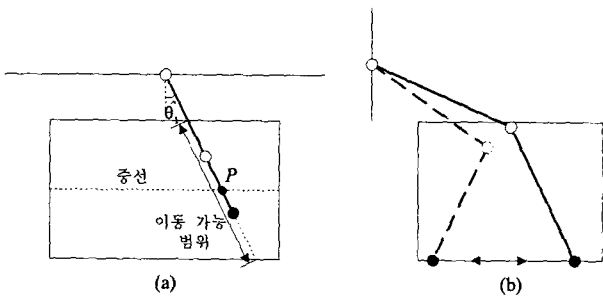


그림 3 관절 1이 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도.

Fig. 3 Workspace with a locked joint failure at joint one. (a) plane view and (b) lateral view.

3.2 관절 2의 고장

관절 2에 관절고착고장이 발생하면 다리의 전후 이동은 관절 1에 의해서 이루어지지만 다리의 상하 운동은 관절 3만을 이용해야 하므로 제한을 받는다. 따라서 지표면에 대한 로봇 몸체의 고도(altitude)가 일정하다고 하면 지표면에 투영된 다리의 이동 가능 범위는 그림 4(a)와 같이 원호(arc) 모양이 되고, 측면 방향으로로는 그림 4(b)처럼 관절 3의 값을 변화시켜도 착지가 가능한 점을 하나 이상 찾을 수 없다. 로봇이 직선 평행 보행을 한다면 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 착지 영역은 그림 4(a)의 점 P_1 과 P_2 가 된다.

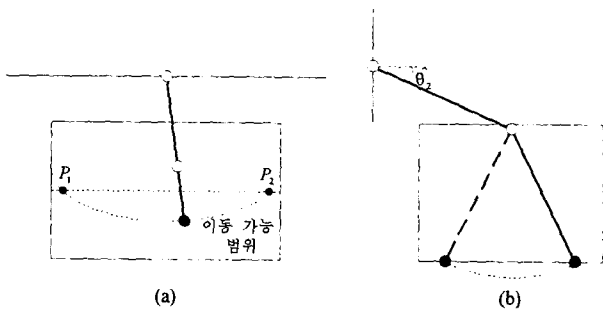


그림 4 관절 2가 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도.

Fig. 4 Workspace with a locked joint failure at joint two. (a) plane view and (b) lateral view.

3.3 관절3의 고장

관절 3에 관절고착고장이 발생하면 다리는 회전 관절 두 개로 이루어진 단일 관절 매니퓰레이터의 특성을 가지게 된다. 그림 5는 관절 3이 고장 난 후 작업 영역의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 관절 3의 고장은 관절 2에 고장이 일어난 경우와 거의 똑같은 변화를 가져온다. 관절 3이 고착되었으므로 다리의 하위 링크는 상위 링크가 움직임에 따라서 수동적으로 들어 올려지고 내려지게 된다.

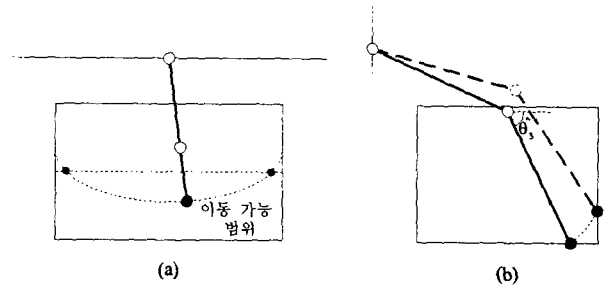


그림 5 관절 3이 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도.

Fig. 5 Workspace with a locked joint failure at joint three. (a) plane view and (b) lateral view.

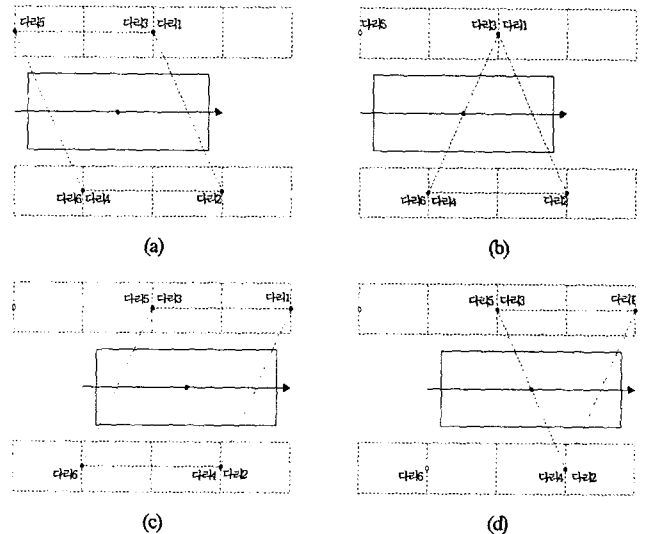


그림 6 표준 세다리 걸음새. (a) 초기 상태(다리 2, 다리 3, 다리 6 이동 후 착지), (b) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동 후 착지, (d) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이륙.

Fig. 6 The standard tripod gait. (a) initial state (swing and place legs 2, 3 and 6), (b) lift off legs 1, 4 and 5, (c) swing and place legs 1, 4 and 5 and d) lift off legs 2, 3 and 6.

4. 내고장성 세다리 걸음새

4.1 표준 세다리 걸음새

세다리 걸음새는 육각 보행 로봇의 표준 걸음새로서 가장

빠른 속도와 가장 낮은 안정여유도를 가진다. 육각 보행 로봇은 평탄 지형에서 직선 보행을 한다고 가정하였기 때문에 정상적인 상태에서 로봇은 주기 걸음새(periodic gait)를 가질 수 있다. 본 논문에서는 육각 보행 로봇이 고장이 발생하기 전 그림 6에 나와 있는 주기성을 가지는 표준 세다리 걸음새[11]로 보행하고 있다고 설정한다. 그림 6의 걸음새는 로봇 몸체가 연속적으로 이동하는 물결 걸음새(wave gait)[8]의 일종으로 디듀티(duty factor), 즉 다리가 지지 상태(support phase)에 있는 시간을 주기 시간으로 나눈 값이 1/2이다. 그림에서 알 수 있듯이 세 개의 다리가 항상 지지 상태에 있으며 로봇은 (1, 4, 5)-(2, 3, 6)의 다리 움직임 순서를 가진다.

4.2 내고장성 걸음새 계획

본 절에서는 세다리 걸음새로 보행하는 육각 보행 로봇에 관절고착고장이 발생해도 로봇이 안정여유도를 유지하면서 보행을 계속하게 하는 내고장성 걸음새 계획의 일반적인 알고리즘을 제안한다.

육각 보행 로봇이 보행을 할 때 지지 상태에 있는 다리는 착지점의 위치를 그대로 유지하기 위해서 몸체의 이동에 따라서 끊임없이 자세(configuration)를 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[4]. 그리고 이동 상태(transfer phase)에 있는 다리에 고장이 발생하면 다리는 예정된 착지점에 정상적으로 착지하지 못하고 앞 장에서 기술한 바와 같은 한정된 지점에만 착지할 수 있으며, 착지한 후에도 몸체가 이동하면 역시 현재 착지점을 그대로 유지하지 못한다. 이와 같은 제한 조건을 만족하기 위해서 로봇은 몸체가 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 동안에는 정지해 있다가 다리가 이륙한 후에만 움직이는 불연속 걸음새(discontinuous gait)[12]를 가져야 한다. 이러한 걸음새는 인간이 목발을 짚고 걸을 때의 움직임과 유사한 것으로 곤충 등 다각 보행 시스템 형태를 지닌 동물들의 운동에서도 관찰할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 내고장성 세다리 걸음새의 일반적 걸음새 계획은 다음과 같다.

- 1) 관절고착고장이 발생했을 때 고장 난 다리가 지지 상태에 있으면 로봇 몸체는 이동을 멈추어야 한다.
- 2) 관절고착고장이 발생했을 때 고장 난 다리가 이동 상태에 있으면 다리는 전진 스윙(forward swing)을 하지 못하고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로만 이동한다.
- 3) 따라서 육각 보행 로봇은 몸체의 이동이 불연속한 걸음새를 가진다. 세다리 걸음새를 위한 일반적 내고장성 걸음새 계획은 아래와 같다.
 - a) 관절고착고장이 발견되면 육각 보행 로봇은 몸체의 이동을 멈춘다.
 - b) 고장 난 다리가 이동 상태에 있으면 현재 자세에서 가능한 착지점을 찾아 착지한다(그림 3~5 참조).
 - c) 고장 난 다리를 제외한 다리들 중 세 개의 다리가 이

동한다. 이때 로봇 몸체는 정지해 있어야 하고 걸음새의 안정여유도가 항상 0 이상의 값으로 유지되어야 한다.

- d) c)에서 이동한 다리가 착지한 후 고장 난 다리를 포함한 나머지 세 개의 다리가 이륙한 후 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 이동한다. c)와 마찬가지로 이동 시 걸음새의 안정여유도가 보장되어야 한다.

내고장성 걸음새 계획이 위와 같이 나온 이유는 관절고착고장이 발생한 다리는 관절의 고착 때문에 자유로운 스윙 및 착지는 할 수 없지만 로봇 몸체를 지지하는 능력은 여전히 보유하고 있다는 사실 때문이다. 즉 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때는 몸체를 지지하여 안정여유도를 유지하는 일만 하고(3.c), 이동할 때에는 이륙을 한 후 전진 스윙을 하지 않는다(3.d). 자유회전관절고장(free-swinging joint failure)[13] 등 관절의 지지 능력까지 소멸시키는 고장이 발생하면 고장 난 다리는 내고장성 걸음새에서 완전히 제외되어야 하지만[14], 관절고착고장이 일어난 다리는 이와 같이 부분적인 지지 능력 때문에 보행에 계속 사용될 수 있다. 한편 고착된 관절의 종류에 따라서 다리의 부분적인 전·후진 스윙이 가능하기도 하지만 앞 장에서 기술한 대로 다리가 디딜 수 있는 착지점이 현재 자세에 따라서 한정되어버리기 때문에 3.d와 같은 동작을 취해야 일반적인 걸음새 계획이 된다.

4.3 내고장성 주기 걸음새

본 절에서는 앞 절에서 제안한 내고장성 걸음새 계획으로 구현된 내고장성 주기 걸음새를 기술한다. 육각 보행 로봇은 고장이 일어나기 전 그림 6과 같은 주기 걸음새로 보행하고 있다고 설정하였기 때문에 고장이 발생한 후에도 주기적인 걸음새를 가질 수 있다면 실제 걸음새 프로그래밍이 매우 간편하게 될 것이다. 그림 7은 관절고착고장이 다리 1에 발생한 후 로봇이 가지는 세다리 주기 걸음새의 한 주기 동안의 모습을 나타낸 것이다. 걸음새의 초기 상태는 모든 다리가 그림 7(a)와 같은 착지점에 착지한 상태라고 정한다. 다리 1 외의 다리에서 발생한 관절고착고장에 대한 내고장성 주기 걸음새는 대칭성을 이용하여 그림 7에서 쉽게 유도된다. 그림에서 검은 원은 각 다리의 현재 착지점을, 흰 원은 이전 착지점을 가리킨다. 점선으로 이루어진 다각형은 현재 상태에서 로봇이 가지는 지지 다각형(support pattern)이다. 초기 상태에서 다리 1은 고장이 일어난 후 착지 가능한 점에 착지해 있고(또는 현재 착지점에 있을 때 고장이 발생했으며) 다리 4, 다리 5는 자신의 작업 영역의 앞 경계점에, 다리 2, 다리 3, 다리 6은 작업 영역의 뒤 경계점에 각각 착지해 있다(그림 7(a)). 뒤 경계점에 착지해 있는 다리 2, 다리 3, 다리 6이 먼저 이륙하여(그림 7(b)) 이동한 후 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다(그림 7(c)). 이 때 로봇 몸체는 정지해 있어야 한다. 다음으로 다리 1, 다리 4, 다리 5가 이륙하여(그림 7(d)) 이동한 뒤 다리 1은 이전 착지점에서 R_x , 즉 작업 영역의 길이만큼 떨어진 곳에 착지하고 다리 4, 다리 5는 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다(그림 7(e)). 그림 7(d)와 그림 7(e) 단계 사이에서 로봇 몸체는 이

동해야 하며 내고장성 걸음새 계획에 따라서 다리 1은 전진 스윙을 하지 않고 몸체에 따라서 수동적으로 이동한다. 그림 7(e)에서 로봇 몸체가 움직이므로 다리들의 작업 영역도 함께 이동해야 하나 걸음새 보폭(stride length)의 길이를 명확하게 보여주기 위해서 작업 영역의 위치를 고정시켜 그렸다. 그림 7(b)와 그림 7(d)에서 알 수 있듯이 육각 보행 로봇은 최저 세로 안정여유도(longitudinal stability margin)[9]를 가지며 따라서 최대 보폭 R_x 를 가진다. 고장 난 다리 1이 전진 스윙을 하지 않기 때문에 내고장성 주기 걸음새의 보폭은 작업 영역의 길이 R_x 보다 클 수 없다. 그림 7의 주기 걸음새보다 좀더 나은 안정여유도를 얻기 위해서는 보폭을 R_x 보다 짧게 하면 될 것이다. 하지만 보폭을 짧게 하면 안정여유도는 커지지만 속도가 느려지는 단점이 생긴다.

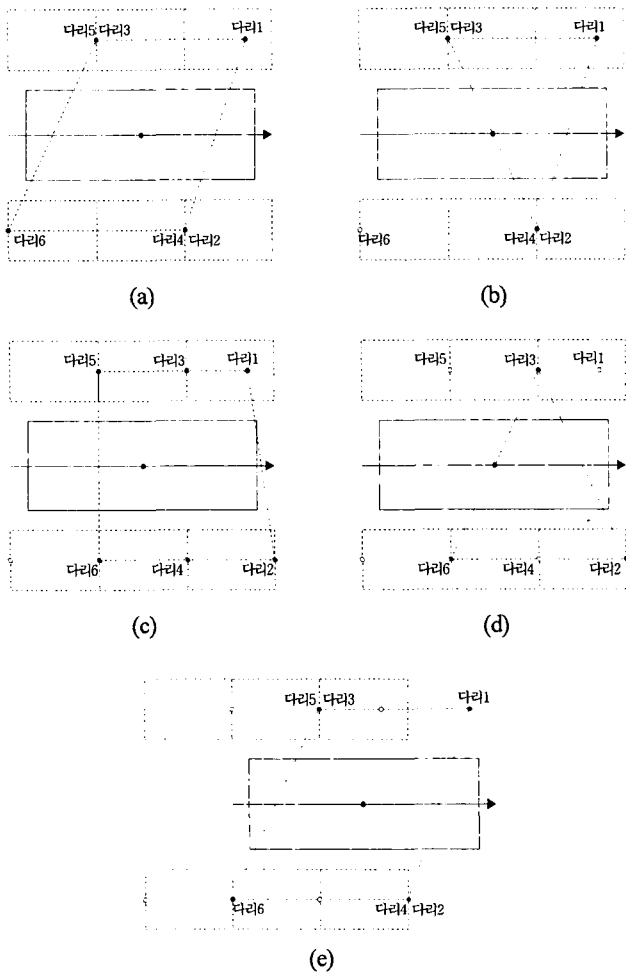


그림 7 내고장성 주기 세다리 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이륙, (c) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동 후 착지(로봇 몸체 정지), (d) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙, (e) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동 후 착지(로봇 몸체 이동).

Fig. 7 The fault-tolerant periodic tripod gait. (a) initial state, (b) lift off legs 2, 3 and 6, (c) swing and place legs 2, 3 and 6, (d) lift off legs 1, 4 and 5 and (e) swing and place legs 1, 4 and 5 with body moving.

그림 7의 주기 걸음새는 다리 움직임 순서가 그림 6의 표준 세다리 걸음새와 동일하다. 즉 제안된 내고장성 주기 걸음새를 이용하면 육각 보행 로봇은 고장이 발생해도 다리 움직임 순서를 바꿀 필요가 없고 보폭과 로봇 몸체의 움직임만 조정해주면 된다. 그림 7의 걸음새와 표준 세다리 걸음새와의 구체적인 성능 비교를 위해서 걸음새 도표(gait diagram)[8]를 사용하기로 한다. 걸음새 도표는 정규화(normalized)된 한 주기(period) 동안 각 다리의 지지 상태와 이동 상태 구간을 도식적으로 표현한 도표로서 주로 주기 걸음새의 디딤울을 계산하는 데 편리하게 이용된다. 그림 8은 그림 7의 걸음새 도표이다. 그림에서 직선으로 나타낸 구간은 각 다리의 지지 상태를 가리킨다. 그림 7(a)~(e)의 걸음새 사이에 시간 지연이 하나도 없다고 가정하면 걸음새 도표는 그림과 같이 반주기(half-period) 사이에서 지지 상태에 있는 다리 조합이 바뀐다. 즉 그림 7의 걸음새의 디딤울은 1/2이 되고 보폭은 위에서 설명한대로 R_x 이다. 한편 그림 6의 표준 세다리 걸음새는 디딤울이 1/2이고 보폭이 $2R_x$ 이다[11]. 따라서 제안된 내고장성 걸음새 계획으로 생성된 주기 걸음새에서 디딤울은 고장이 일어나기 전과 동일하나 보폭은 반으로 줄어든다. 앞 절에서도 설명했듯이 보폭의 감소는 관절고착고장이 야기하는 필연적인 성능 저하이다. 고착이 된 관절의 위치에 따라서 고장 난 다리가 최대 보폭을 가지도록 일시적으로 스윙을 할 수는 있겠지만 다리의 자유도가 하나 줄어들었기 때문에 그림 7과 같은 주기성을 가지는 일반적인 걸음새를 유도하기가 불가능하고 경우에 따라서는 고장 난 다리가 최대 보폭으로 움직인 후에 로봇이 더 이상 전진하지 못하는 교착상태(dead-lock)에 빠질 수도 있다. 본 논문에서 제안된 내고장성 걸음새 계획과 내고장성 주기 걸음새는 이러한 문제점들을 자동적으로 없애 주면서 로봇이 보행을 계속하도록 한다는 점에서 우수하다고 말할 수 있다.

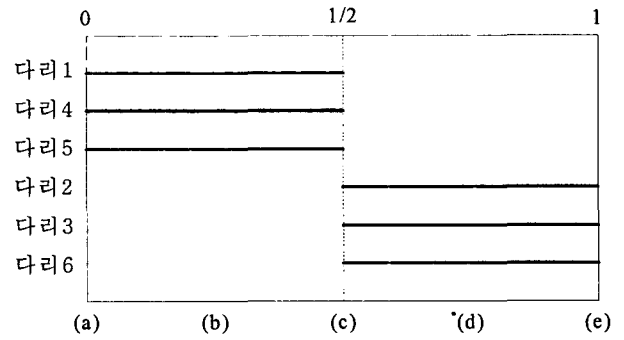


그림 8 그림 7의 세다리 주기 걸음새의 걸음새 도표((a)~(e)는 그림 7(a)~(e)의 상태를 가리킨다).

Fig. 8 Gait diagram of the periodic tripod gait in Fig. 7.

5. 걸음새 변환

앞 장에서 제안된 내고장성 주기 걸음새에서 육각 보행 로봇은 특정한 초기 상태(그림 7(a))에서 보행을 시작한다고 가정하였다. 하지만 대부분의 경우 보행 중 관절고착고장이 일어나는 순간 육각 보행 로봇의 상태는 제안된 주기 걸음

새의 초기 상태와는 다를 것이다. 따라서 로봇이 고장 발생 후 주기 걸음새로 보행하기 위해서는 다리의 착지 위치와 몸체의 위치를 바꾸어 주기 걸음새의 한 단계로 전환하는 과정이 필요하다. 본 장에서는 그러한 걸음새 변환 과정에 대해서 기술한다. 앞 장과 마찬가지로 관절고착고장은 다리 1에 발생한다고 가정한다. 본 장에서는 다리 1이 이동 상태와 지지 상태에 있는 경우에 대한 걸음새 변환 과정을 각각 기술한다.

먼저 고장이 발생했을 때 다리 1이 이동 상태에 있는 경우를 알아본다. 육각 보행 로봇은 고장이 일어나기 전 표준 세다리 걸음새로 걷고 있었으므로 다리 1이 이동 상태에 있다면 다리 4와 다리 5도 이동 상태에 있으며 고장이 발생한 순간 로봇은 그림 6(b)와 그림 6(c) 사이의 어떤 상태에 있게 된다. 이 경우 로봇 몸체는 고장 난 다리가 착지할 때까지 계속 움직일 수 있으므로 걸음새 변환은 쉽게 이루어진다. 다리 4와 다리 5를 작업 영역의 앞 경계점에 착지시키고 고장 난 다리 1을 현재 상태에서 착지 가능한 점에 착지시키면 육각 보행 로봇의 상태는 그림 7(a)와 동일하게 되어 바로 내고장성 주기 걸음새를 시작할 수 있다.

다음으로 고장이 발생했을 때 다리 1이 지지 상태에 있는 경우를 알아본다. 육각 보행 로봇은 그림 6(c)와 그림 6(d) 사이의 어떤 상태에 있게 된다. 그림 9는 표준 세다리 걸음새의 걸음새 도표이고 t 는 초기 상태(그림 6(a))에서 고장이 일어나기까지의 시간을 가리킨다. $1/2 \leq t < 1$ 이므로

$$t = t_1 + 1/2 \quad (0 < t_1 \leq 1/2) \tag{1}$$

이라 하자. 로봇 몸체가 일정한 속도로 움직인다고 가정하면 로봇 몸체의 속도 v_b 는 아래와 같이 유도된다.

$$v_b = \frac{2R_x}{T} = 2R_x \tag{2}$$

위 식에서 T 는 걸음새의 주기로서 1로 정규화 한다. 식 (1)과 (2)에서 고장이 발생했을 때 지지 상태에 있는 다리의 착지점과 각 다리의 작업 영역의 앞 경계점 사이의 거리 λ 는 아래와 같이 유도된다.

$$\lambda = 2R_x t_1$$

그림 10(a)은 λ 의 위치에서 지지 상태에 있던 다리 1에 관절고착고장이 발생한 후 로봇 몸체가 움직임을 멈춘 상태를 나타낸 것이다. 이동 상태에 있는 다리들은 최대한 전진 스윙을 한 후 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다(그림 10(b)). 그런 다음 다리 1은 다리 4와 다리 5와 함께 이륙한 후 로봇 몸체의 움직임에 따라서 이동한다(그림 10(c)). 다리 1은 수동적으로 이동하지만 고장이 일어나지 않은 다리 4와 다리 5는 전진 스윙을 하여 작업 영역의 앞 경계점까지 이동한다. 마지막 상태 그림 10(d)는 내고장성 주기 걸음새의 초기 상태(그림 7(a))와 일치하므로 걸음새 변환이 성공적으로 이루어졌다고 말할 수 있다. 그림 10의 걸음새 변환은 고장 난 다리의 착지점 위치 λ 와 상관없이 항상 구현되며, 로봇 몸체의 후진이나 다리의 후진 스윙(backward swing)이 필요하지 않으므로 효율적이라고 말할 수 있다.

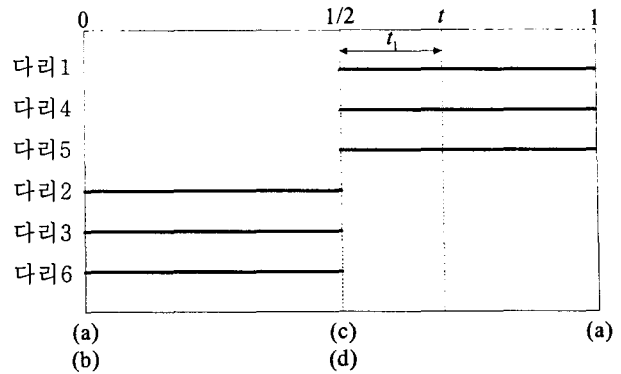


그림 9 그림 6의 표준 세다리 걸음새의 걸음새 도표((a)~(d)는 그림 6(a)~(d)의 상태를 가리킨다).

Fig. 9 Gait diagram of the standard tripod gait in Fig. 6.

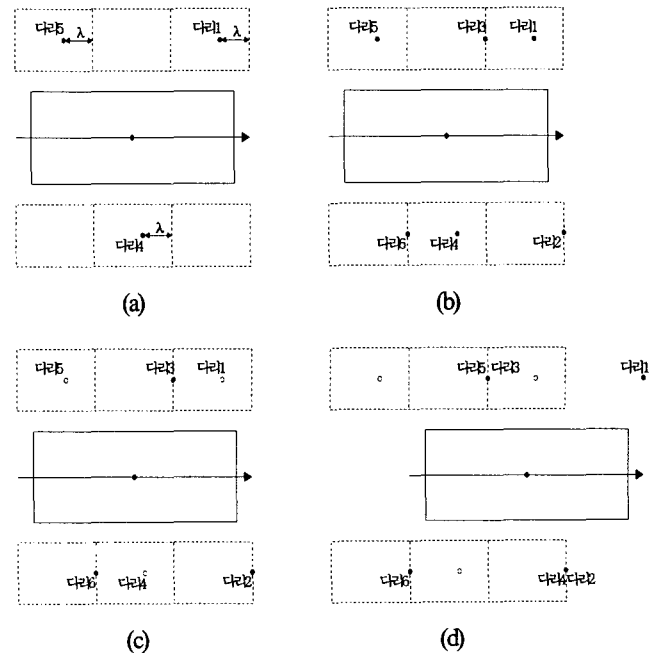


그림 10 걸음새 변환 과정. (a) 로봇 몸체 정지, (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 착지, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙, (d) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동 후 착지(로봇 몸체 이동).

Fig. 10 Adjustment procedure. (a) halt the body movement, (b) place legs 2, 3 and 6, (c) lift off legs 1, 4 and 5 and (d) swing and place legs 1, 4 and 5 with body moving.

6. 결 론

본 논문에서는 육각 보행 로봇이 다리 하나에 관절고착고장이 발생해도 평탄 지형에서 직선 보행을 계속할 수 있도록 하는 내고장성 세다리 걸음새 계획을 제안하였다. 먼저 관절고착고장이 지지하는 특징과 영향을 로봇 기구학과 걸음새 연구 관점에서 분석하였다. 관절고착고장이 발생한 다리는 로봇

몸체를 지지하는 능력은 유지하나 작업 영역 안에서 제한된 곳에서만 착지할 수 있으며 자유로운 삼차원 운동을 하지 못한다. 본 논문에서는 이러한 관절고착고장의 영향을 고려한 내고장성 세다리 걸음새 계획을 제안하였으며, 특히 제안된 걸음새 계획을 만족하는 세다리 주기 걸음새가 존재함을 보였다. 내고장성 걸음새 계획에서 고장 난 다리는 로봇 몸체를 지지하기만 하고 이동할 때에는 전진 스윙을 하지 않는다. 제안된 내고장성 걸음새 계획의 효용성을 보이기 위해서 표준 세다리 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로봇이 관절고착고장이 일어난 후 제안된 내고장성 세다리 주기 걸음새로 전환하는 과정을 기술하였다. 표준 걸음새와 내고장성 주기 걸음새 사이의 성능 변화를 정량적으로 해석하였고, 고장이 발생한 후 표준 세다리 걸음새에서 제안된 내고장성 주기 걸음새로의 변환 과정이 항상 존재함을 보였다.

본 논문에서는 보행 로봇이 가지는 가장 불편적인 걸음새인 평탄 직선 보행에 대한 내고장성 걸음새를 제안하였다. 제안된 내고장성 걸음새 계획을 게 걸음새(crab gait), 회전 걸음새(turning gait), 비평탄 지형에서의 적응 걸음새(adaptive gait) 등 다른 걸음새에 적용하기 위해서는 보폭과 디딤술, 다리 움직임 순서, 착지 가능 지형 데이터 등 걸음새 특징에 따르는 여러 가지 변수를 함께 고려해야 할 것이다. 이와 같이 다른 형태의 보행에 대한 내고장성 걸음새를 정립하는 일이 후속 연구로 남아 있다.

참 고 문 헌

[1] G. A. Pratt, "Legged robots at MIT: what's new since raibert," IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 7, no. 3, pp. 15-19, 2000.
 [2] S. L. Laubach and J. W. Burdick, "An autonomous sensor-based path-planner for planetary microrovers," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 347-354, 1999.
 [3] M. L. Visinsky, J. R. Cavallaro, and I. D. Walker, "A dynamic fault tolerance framework for remote robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 11, no. 4, pp. 477-490, 1995.
 [4] 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.
 [5] J. G. Keramas, 이만형 외 역, 로봇공학 (Robot Technology Fundamentals), 사이텍미디어, 서울, 2000.
 [6] L. E. Parker, "L-ALLIANCE: Task-oriented multirobot learning in behavior-based systems," Advanced Robotics, vol. 11, no. 4, pp. 305-322, 1997.
 [7] K. N. Groom, A. A. Maciejewski and V. Balakrishnan, "Real-time failure-tolerant control of kinematically redundant manipulators," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 6, pp. 1109-1116, 1999.
 [8] S. M. Song, K. J. Waldron, Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
 [9] 이수영, 홍예선, "4족 보행 로봇의 걸음새 안정화를 위한 몸체 임피던스 제어", 대한전기학회논문지, 제49D권, 제5호,

pp. 257-263, 5월, 2000.
 [10] P. K. Pal, K. Jayarajan, "Generation of free gait-a graph search approach," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 299-305, 1991.
 [11] T. T. Lee, C. M. Liao, T. K. Chen, "On the stability properties of hexapod tripod gait," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 4, no. 4, pp. 427-434, 1988.
 [12] 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.
 [13] J. D. English and A. A. Maciejewski, "Fault tolerance for kinematically redundant manipulators: anticipating free-swinging joint failures," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 4, pp. 566-575, 1998.
 [14] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "A fault tolerant gait for a hexapod robot over uneven terrain," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part:B, vol. 30, no. 1, pp. 172-180, 2000.

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 한국전

자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어연구소 선임연구원. 2001년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수. 주관심분야: 로봇 제어, 보행 로봇 시스템, 초음파 모터 제어 등.

Tel : 053-850-2736, Fax : 053-850-2704

E-mail : jmyang@cu.ac.kr



노 지 명 (魯 智 明)

1968년 1월 5일생. 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1994년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2000년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 2000년 3월~2002년 2월 한국전자통신

연구원 네트워크기술연구소 선임연구원. 2002년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 전임강사. 주관심분야: 비선형 제어, 통신망 트래픽 제어, 혼잡 제어 등.

Tel : 053-850-2737, Fax : 053-850-2704

E-mail : jmnho@cu.ac.kr