

## 자율 보행 로봇을 위한 내고장성 제어

### Fault Tolerance in Control of Autonomous Legged Robots

양 정 민\*  
(Jung-Min Yang)

**Abstract** : A strategy for fault-tolerant gaits of autonomous legged robots is proposed. A legged robot is considered to be fault tolerant with respect to a given failure if it is guaranteed to be capable of walking maintaining its static stability after the occurrence of the failure. 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. If a failed joint is locked, the workspace of the resulting leg is constrained, but legged robots have fault tolerance capability to continue static walking. An algorithm for generating fault-tolerant gaits is described and, especially, periodic gaits are presented for forward walking of a hexapod robot with a locked joint failure. The leg sequence and the formula of the stride length are analytically driven based on gait study and robot kinematics. The transition procedure from a normal gait to the proposed fault-tolerant gait is shown to demonstrate the applicability of the proposed scheme.

**Keywords** : legged robots, hexapod robots, gait study, fault tolerance, locked joint failure.

#### I. 서론

다각 보행 로봇은 다리가 닿을 수 있는 착지점들만 확보하면 보행이 가능하기 때문에 바퀴가 지면과 항상 맞닿아서 이동해야 하는 바퀴 구동 이동 로봇에 비해서 더 우수한 이동성과 지형 적응성을 지니고 있다[1]. 다각 보행 로봇의 또 하나의 장점은 정적 보행(static walking)을 할 때 다리의 고장에 대해서 내고장성(fault tolerance)을 지닌다는 사실이다[2]. 바퀴 구동 이동 로봇의 경우에는 바퀴 하나의 고장이 로봇의 이동성에 심각한 훼손을 초래한다. 하지만 다각 보행 로봇은 기구학적 특성상 정적 안정여유도(static stability margin)를 유지하는 데 필요한 개수보다 더 많은 다리가 달렸으므로 다리 하나가 제대로 동작을 하지 못해도 정적 보행을 계속할 수 있다.

다각 보행 로봇이 지니고 있는 다리에 대한 내고장성은 그 중요도에 비해서 지금까지 별로 주목을 받지 못했다. [3]에서는 신경회로망을 바탕으로 내고장성을 지니는 육각 보행 로봇(hexapod robot)의 제어가 제안되었고, [4]에서는 고장이 일어난 후의 로봇 운동에너지 변화치를 나타내는 새로운 안정성 척도가 제안되었다. 하지만 이러한 연구들은 다각 보행 로봇의 고유 분야인 걸음새 연구(gait study)를 바탕으로 하지 않았기 때문에 내고장성을 고려한 몸체 이동이나 다리 움직임 순서의 결정 같은 근본적인 걸음새 계획법이라고 말할 수 없다. 한편 저자의 선행연구 [5]에서는 걸음새 연구의 틀에서 다각 보행 로봇의 고장 발견(fault detection)과 내고장성(fault tolerance)에 대한 초기 연구가 수행되었으며, 내고장성 게 걸음새(crab gait)[6], 비평탄 지형에서의 내고장성 걸음새 계획 [7] 등으로 확대되었다.

본 논문에서는 관절고착고장(locked joint failure)에 대한 다각 보행 로봇의 내고장성 걸음새 계획 방법을 제안한다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태를 말한다[8]. 다각 보행 로봇의 다리 구조는 세 개의 회전 관절(revolute joint)로 이루어진 팔꿈치 형 매니플레이터(articulated arm manipulator)[9]라고 가정한다. 이러한 구조를 가지는 매니플레이터의 말단장치(end-effector), 즉 다리의 발(foot)은 삼차원 작업 공간을 지니며 작업 공간 내의 어느 지점이든 도달할 수 있다. 다리의 관절 하나가 고장을 일으켜 고착이 된다면 작업공간은 이차원으로 줄어들어 다리가 제대로 동작을 할 수 없게 된다. 여유자유도 매니플레이터(redundant manipulator)에 대해서는 이러한 관절고착고장을 감내할 수 있는 제어 기법에 대한 연구가 발표되었다[8],[10]. 하지만 다각 보행 로봇의 걸음새 계획 문제는 매니플레이터 구조를 가지는 여러 개의 다리와 로봇 무게 중심의 움직임을 함께 생각해야 하므로 여유자유도 매니플레이터 한 대에 국한된 내고장성 제어 문제에 비해서 더 상위 수준의 문제라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 관절고착고장의 특징과 고장이 발생한 후 생기는 다리 작업 공간의 변화에 대해서 기술한다. 또한 관절고착고장이 발생해도 다각 보행 로봇이 안정여유도를 유지하면서 정적 보행을 계속하도록 하는 내고장성 걸음새의 일반적인 알고리즘을 제안하며, 특히 육각 보행 로봇에 대한 내고장성 주기 걸음새(periodic gait) 생성 계획 방법을 제안한다. 내고장성 주기 걸음새의 존재는 중요한 의의가 있는데, 고장이 발생한 후에도 컴퓨터 프로그래밍으로 다각 보행 로봇의 걸음새를 자동으로 계획할 수 있다는 사실을 의미하기 때문이다. 제안된 방법의 응용성을 보이기 위해서 물결 걸음새(wave gait)로 보행하고 있는 육각 보행 로봇이 다리에 관절고착고장이 발생한 후 논문에서 제안한 내고장성 주기 걸음새로 전이하는 과정도 기술한다. 참고로 본 논문에서 사용하고 있는 한글 걸음새 용어는 [11]의 명명법(命名法)을 따르기로 한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 3. 17., 채택확정 : 2003. 7. 18.

양정민: 대구가톨릭대학교 전자공학과(jmyang@cu.ac.kr)

※ 본 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2001-002-E00117).

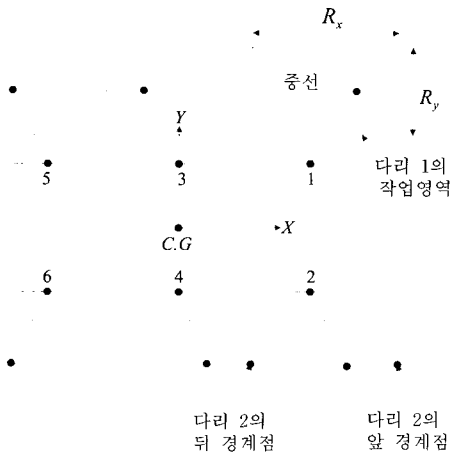


그림 1. 육각 보행 로봇 모델.  
Fig. 1. Hexapod robot model.

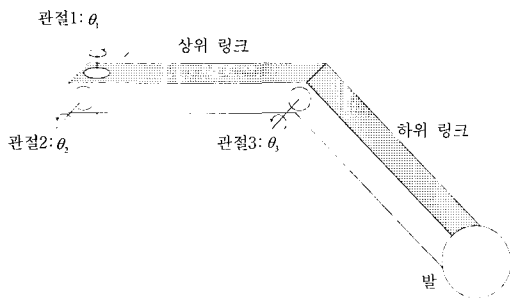


그림 2. 다리 모델.  
Fig. 2. Leg model.

**II. 다각 보행 로봇 모델**

본 논문에서는 다각 보행 로봇 모델로서 그림 1과 같은 육각 보행 로봇을 사용하기로 한다. 로봇 몸체는 기하학적으로 좌우 대칭인 형태이며 몸체 무게중심 C.G(center of gravity)와 기하학적 중심점이 일치한다고 가정한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 여섯 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림과 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 길이  $R_x$ , 폭  $R_y$ 인 직사각형 형태의 작업 영역이 된다고 정의한다. 작업 영역과 중선(center line)이 만나는 앞뒤 점을 각각 ‘앞 경계점’과 ‘뒤 경계점’이라고 정의한다. 또한 무게중심 C.G를 원점으로 하는 몸체 좌표계 X-Y에 따라 1번부터 6번까지 각 다리에 번호를 부여한다.

육각 보행 로봇의 다리는 그림 2와 같이 두 개의 링크(link)로 구성된 매니플레이터 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 이륙하거나 착지할 때 사용된다.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각각 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의한다.

내고장성 걸음새 계획의 명확한 서술을 위해 본 논문에서는 육각 보행 로봇이 다음과 같은 기구학 및 동역학 조건을 만족한다고 가정한다.

- 1) 육각 보행 로봇은 평탄한 지형에서 직선 보행을 하며 로봇 몸체는 지면에 평행하다.
- 2)각 다리는 그림 1과 같이 항상 직사각형 작업 영역의 중선에 착지한다.
- 3)안정성 판단 시 로봇의 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려한다.
- 4)다리의 발은 지표면과 점(point)으로 접촉한다.

가정 1)과 2)는 육각 보행 로봇이 평탄 지형에서 게 걸음새나 회전 걸음새(turning gait)를 가지지 않고 한 방향으로 직선 평행 보행을 한다는 의미이다. 게 걸음새나 회전 걸음새 등의 걸음새나 비평탄 지형에서의 내고장성 보행도 중요한 문제들이지만, 일단 본 논문에서는 단순 직선 보행만을 고려하여 제안하고자 하는 내고장성 걸음새의 특징을 명확히 보인 다음 차후의 연구에서 이러한 문제들을 다루기로 한다.

**III. 관절고착고장**

다리에 관절고착고장이 발생하면 고장 난 관절은 위치를 알 수 있는 어떤 값으로 고착되어 움직이지 않게 된다. 관절고착고장은 관절에 대한 직접적 기계 파손 때문에 일어나거나, 관절 액츄에이터의 고장으로 인한 멈춤 장치[12]의 작동 때문에 간접적으로 발생하며, 로봇에 고장 발견 소프트웨어(fault detection software)[13]가 부착되어 여러 가지 고장을 감지한 후 관절 위치를 고정시키라는 명령이 작동되어 생길 수도 있다. 관절고착고장이 일어나면 고장이 발생한 다리는 자유도(degree of freedom)가 줄어들어 이차원 운동밖에 하지 못한다. 본 논문에서는 관절고착고장이 다리의 세 관절에 각각 발생했을 경우 초래되는 다리의 이동 가능 범위의 변화를 걸음새 연구의 관점에서 조사한다. 한편 한 다리의 두 개 이상의 관절에 관절고착고장이 동시에 발생할 때에는 다리의 자유도가 1 이하로 줄어든다. 이 경우는 기계적 파손으로 다리의 지지 능력이 완전히 상실되는 고장 사건과 동일하게 취급할 수 있으므로 [5]에서 제안된 내고장성 주행 기법을 적용하여 해결할 수 있다.

**1. 관절 1의 고장**

관절고착고장이 발생하여 관절 1이 움직이지 못하게 되면 다리는 두 개의 회전 관절로 이루어진 2-링크 평면 매니플레이터와 동일한 기구학을 가지게 된다. 따라서 다리의 이동 가능 범위는 평면이 되고 지표면에 투영된 범위는 그림 3과 같은 직선이 된다. 그림에서  $\hat{\theta}_1$ 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 3의 점 P밖에 없다. 관절 1이 움직이지 못하면 다리는 전후 이동을 하지 못하고 관절 2와 관절 3을 이용하여 제자리에서 이륙과 착지 동작만을 취할 수 있다.

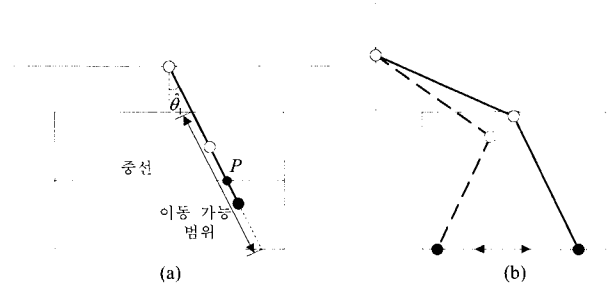


그림 3. 관절 1이 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도

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

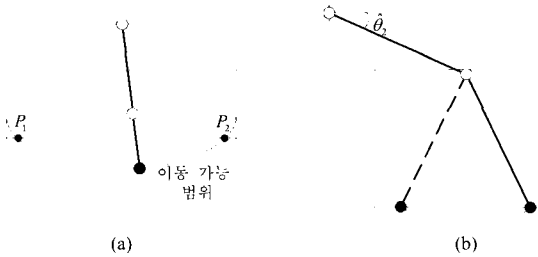


그림 4. 관절 2가 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도

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

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 방향으로서는 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.

3. 관절 3의 고장

관절 3에 관절고착고장이 발생하면 다리는 회전 관절 두 개로 이루어진 단일 관절 매니플레이터의 특성을 가지게 된다. 그림 5는 관절 3이 고장 난 후 작업 영역의 변화를 보여 준다. 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.

IV. 내고장성 걸음새 계획

육각 보행 로봇이 보행을 할 때 지지 상태(support state)에 있는 다리는 착지점의 위치를 그대로 유지하기 위해서 몸체의 이동에 따라서 끊임없이 자세(configuration)를 바꾼다. 그러나 관절고착고장이 발생하면 고장 난 다리의 자코비안

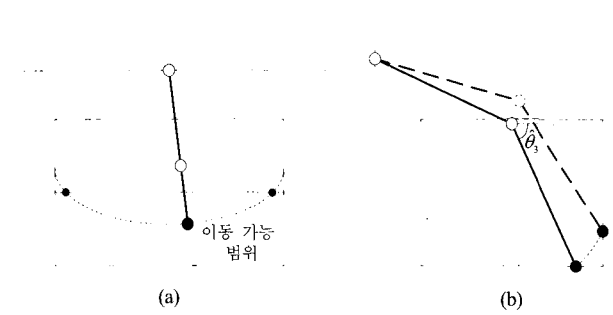


그림 5. 관절 3이 고장 난 후의 작업 영역. (a) 평면도, (b) 측면도

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

(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]. 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. 관절고착고장이 초래하는 이와 같은 제한을 극복하기 위해서 본 논문에서는 다음과 같은 조건을 만족하는 걸음새 계획을 제안한다.

**조건 1)** 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때는 로봇 몸체의 이동이 없어야 한다.

**조건 2)** 고장 난 다리는 이륙을 한 후 전진하기 위한 스윙(swing) 동작을 취하지 않고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로만 이동한다.

위 조건을 만족하기 위해서 로봇 몸체는 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 동안 정지해 있다가 다리가 이륙한 후에만 움직여야 하므로 제안한 내고장성 걸음새는 불연속 걸음새(discontinuous gait)[14]의 범주에 속한다. 위 조건들이 의미하는 바는 관절고착고장이 발생한 다리는 로봇 몸체를 지지하여 안정여유도를 유지하는 역할만 하며(조건 1), 보행 중 보폭(stride length)을 늘리는 동작은 하지 않는다는 것이다(조건 2). 즉, 관절고착고장 때문에 소실된 다리의 이동 능력은 제외하고 다리에 남아 있는 지지 능력을 최대한 이용한다는 뜻이다. 발생한 고장이 다리의 이동 능력과 지지 능력 모두를 소멸시키는 종류라면 보행 로봇의 안정여유도가 직접적으로 감소하지만[6], 관절고착고장은 다리의 이동 능력에만 영향을 줄 뿐 지지 능력은 없애지 않는다.

한편 조건 2)가 만족되어야 하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 관절 1에 고장이 발생하면 다리의 스윙 자체가 불가능해진다. 둘째, 관절 2나 관절 3에 고장이 발생하면 관절 1을 이용한 다리의 스윙은 가능하지만, 앞 장에서 기술한 대로 다리가 디딜 수 있는 착지점이 몸체의 위치에 따라서 한 두개로 한정되어버리기 때문에 고장 난 다리가 이동 상태에서 전진하더라도 착지할 때 다시 후진해야 하는 상황이 생긴다.

위 조건들은 고장 난 다리의 움직임과 로봇 몸체의 이동의 일반적인 규칙에 대해서만 말하였을 뿐 나머지 다리들의

움직임 순서와 보폭 등에 대해서는 규정하지 않았다. 다음 장에서는 위 조건들을 만족하면서 주기성을 가지는 내고장성 걸음새를 제안한다.

**V. 내고장성 주기 걸음새**

내고장성 주기 걸음새의 존재는 고장이 발생한 후에도 컴퓨터 프로그래밍으로 다각 보행 로봇의 걸음새를 자동으로 계획할 수 있다는 사실을 의미하기 때문에 중요하다. 본 장에서는 육각 보행 로봇의 관절고착고장에 대한 내고장성 주기 걸음새를 제안하고 각 걸음새의 보폭과 다리의 움직임 순서 등을 설명한다. 본 논문에서는 육각 보행 로봇이 가질 수 있는 주기 걸음새의 세 가지 형태 중 네다리 걸음새(quadruped gait)와 세다리 걸음새(tripod gait)에 대해서 기술한다.

**1. 네다리 걸음새(Quadruped Gait)**

네다리 걸음새란 두 다리가 항상 이동 상태에 있는 걸음새를 말한다. 그림 6은 내고장성 걸음새 계획을 만족하는 네다리 주기 걸음새 계획이다. 그림 6의 걸음새 계획에서 다리 한 쌍의 이착륙이 동시에 일어나므로 제안된 주기 걸음새는 특이(singular) 걸음새의 일종이다. 또한 이동 상태에 있는 다리 한 쌍이 착지한 후 다른 다리 한 쌍이 이륙하기까지의 시간차가 없다고 가정한다면 지지 다리의 숫자는 항상 네 개가 유지된다. 그림에서 알 수 있듯이 한 주기 동안 다리 한 쌍의 이착륙은 세 번 일어나고 로봇 몸체는 고장 난 다리가 이륙한 동안만 이동한다. 내고장성 걸음새 조건에 따라서 로봇 몸체가 움직이는 동안 이동 상태에 있는 두 다리(고장 난 다리와 정상 다리 하나)는 전진 스윙을 하지 않는다.

그림 6의 알고리즘을 바탕으로 주기 걸음새의 다리 움직임 순서와 보폭을 결정해보자. 육각 보행 로봇의 네다리 주기 걸음새에서 몸체의 무게중심이 안정여유도를 가장 많이 가질 수 있게 하는 다리 움직임 순서는 (2, 5)→(3, 4)→(1, 6)이다[15]. 즉 무게중심을 기준으로 서로 대칭인 다리 두 개를 한 쌍으로 들어올릴 때 세로 안정여유도(longitudinal stability margin)가 최대가 된다. 또한 로봇 몸체가 불연속 이동을 하는 주기 걸음새에서 다리의 스트로크(stroke), 즉 다리가 지지 상태에 있는 동안 몸체의 무게중심을 이동시킨 거리는 보폭과 일치해야 한다[16]. 따라서 로봇 몸체의 이동 거리가 결정되면 다리의 스트로크는 함께 결정된다. 본 논문에서는 관절고착고장이 일어난 후 육각 보행 로봇은 최대한 보폭을 크게 해서 걷는다고 가정한다. 이것은 고장 때문에 부분적으로 손상된 다리를 지니고 로봇이 얼마만큼의 이동 능력을 보여줄 수 있는지를 확인하기 위함이다.

제안된 네다리 주기 걸음새의 한 주기 동안의 모습은 그림 7에 나와 있다. 관절고착고장은 다리 1에 발생하였다고 가정하고, 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 유도할 수 있다. 그림에서 검은 원은 각 다리의 현재 착지점을, 흰 원은 이전 착지점을 가리킨다. 점선으로 이루어진 사각형은 다리 한 쌍이 이륙했을 때 로봇이 가지는 지지 다각형(support pattern)이다. 초기

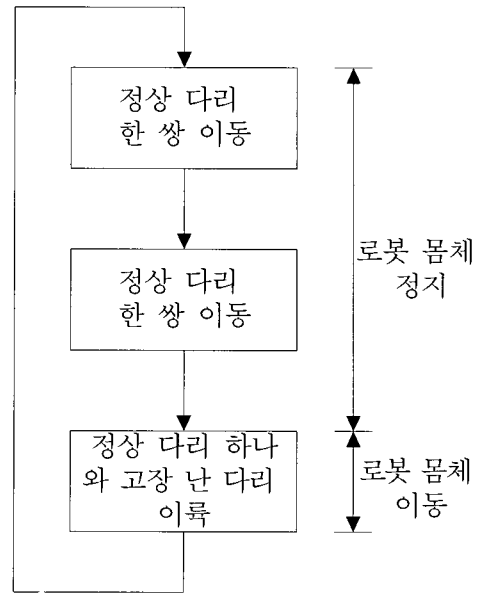


그림 6. 네다리 주기 걸음새 계획.  
Fig. 6. Periodic quadruped gait planning.

상태에서 고장 난 다리 1을 제외하고 모든 다리는 자신의 작업 영역의 뒤 경계점에 착지해 있다(그림 7(a)). 다리 2와 다리 5가 먼저 이륙하여 이동한 뒤 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다(그림 7(b)). 그 다음으로 다리 3과 다리 4가 이륙하여 이동한 뒤 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다(그림 7(c)). 마지막으로 고장 난 다리 1과 다리 6이 이륙한 뒤 로봇 몸체가 이동하여 한 주기를 완성한다(그림 7(d)). 그림 7(d)에서 로봇 몸체의 이동과 더불어 다리 작업 영역도 같이 이동해야 하나 보폭의 길이를 명확하게 보여주기 위해서 작업 영역의 위치를 고정시켰다. 그림 7(d)에서 알 수 있듯이 육각 보행 로봇은 최저 세로 안정여유도(marginal longitudinal stability margin)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.

한편 좀더 나은 안정여유도를 얻기 위해서는 보폭과 스트로크를  $R_x$ 보다 짧게 하면 될 것이다. 그림 8은 네다리 주기 걸음새에서 보폭이  $\lambda (< R_x)$ 일 때 한 주기의 초기 상태와 마지막 상태를 나타낸 것이다. 그림에서 흰 원은 초기 상태의 다리 착지점을, 검은 원은 마지막 상태의 다리 착지점을 각각 가리키고  $x_1$ 은 다리 1의 뒤 경계점과 초기 상태 착지점 사이의 거리를 가리킨다. 그림에 나와 있듯이 보폭이  $\lambda$ 일 때 정상적인 다리의 초기 상태 착지점은 작업 영역 뒤 경계점으로부터  $(R_x - \lambda)/2$ 만큼 떨어져 있도록 설정하였다. 이것은 주어진 보폭에서 최대한의 안정여유도를 얻기 위함이다. 다리 이동 순서는 그림 7과 동일하다. 그림 8의 걸음새에서 세로 안정여유도는 다리 2와 다리 5가 이동할 때의 안정여유도  $S_{25}$ 와 다리 1과 다리 6이 이동할 때의 안정여유도  $S_{16}$  중 적은 값으로 결정된다. 그림에서  $S_{25}$ 와  $S_{16}$ 을 구하면

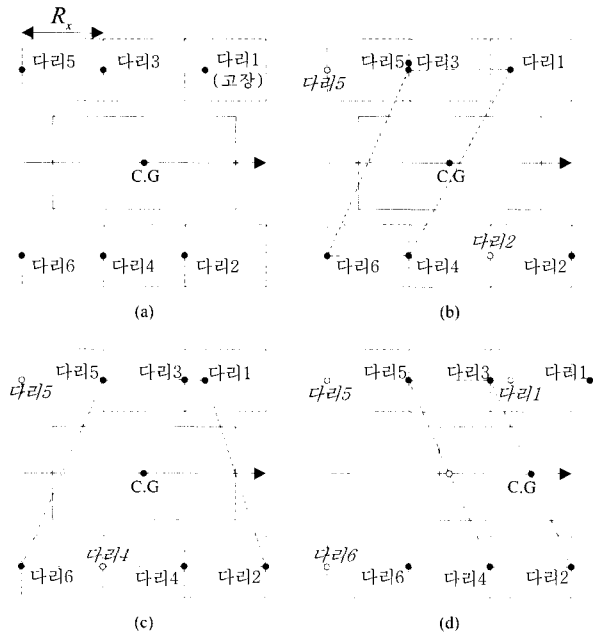


그림 7. 네다리 주기 걸음새의 다리 움직임 순서. (a) 초기 상태, (b) 다리 2, 다리 5 이동, (c) 다리 3, 다리 4 이동, (d) 다리 1, 다리 6 이륙 후 로봇 몸체 이동.

Fig. 7. Leg sequence of the quadruped gait planning. (a) initial state, (b) swing leg 2 and leg 5, (c) swing leg 3 and leg 4 and (d) lift leg 1 and leg 6 and move the robot body.

$$S_{25} = \frac{1}{4}(2x_1 + R_x - \lambda)$$

$$S_{16} = \frac{1}{2}(R_x - \lambda)$$

이므로 보폭이  $\lambda$  일 때의 세로 안정여유도  $S_\lambda$  는 다음과 같다.

$$S_\lambda = \min\left(\frac{1}{4}(2x_1 + R_x - \lambda), \frac{1}{2}(R_x - \lambda)\right)$$

위 식을 고장 다리 1의 착지점 위치에 따라서 다시 표현하면 다음과 같다.

$$S_\lambda = \begin{cases} \frac{1}{4}(2x_1 + R_x - \lambda), & x_1 < \frac{1}{2}(R_x - \lambda) \\ \frac{1}{2}(R_x - \lambda), & x_1 \geq \frac{1}{2}(R_x - \lambda) \end{cases}$$

즉 보폭이  $\lambda$  일 때의 안정여유도는 고장 다리의 착지점이 작업영역 뒤 경계점과 가까울 수록 줄어들고  $\lambda$  이 클 수록 늘어난다.  $\lambda = R_x$  을 대입하면 안정여유도는 0이 되므로 위 식은 그림 7의 주기 걸음새에도 적용되는 일반적인 안정여유도 공식이라고 말할 수 있다.

2. 세다리 걸음새(Tripod Gait)

세다리 걸음새는 육각 보행 로봇의 표준 걸음새로서 가장 빠른 속도와 가장 낮은 안정여유도를 가진다[17]. 그림 9는

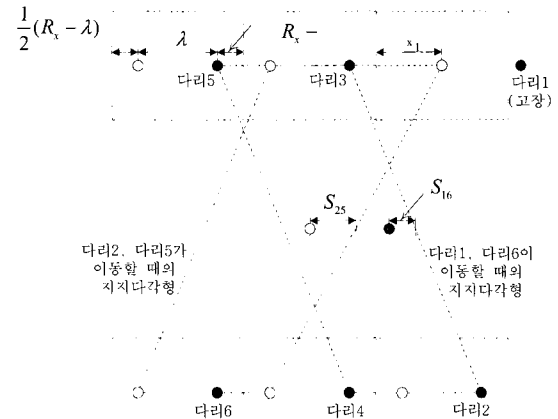


그림 8. 보폭  $\lambda (< R_x)$  인 네다리 주기 걸음새.

Fig. 8. The quadruped gait with the stride length  $\lambda (< R_x)$ .

관절고착고장이 다리 1에 발생한 후 육각 보행 로봇이 가지는 세다리 주기 걸음새의 다리 움직임 순서를 나타낸 것이다. 걸음새 초기 상태에서 모든 다리는 지지 상태에 있으며 그림 9(a)의 착지점을 가진다. 다리 움직임 순서는 (2, 3, 6)→(1, 4, 5)로서 표준 세다리 걸음새[18]와 동일하나 내고장성 걸음새 조건에 따라서 로봇 몸체는 불연속 이동을 한다. 네다리 주기 걸음새와 마찬가지로 로봇은 최대 보폭  $R_x$  를 가지며 세로 안정여유도는 0이다(그림 9(b), (c) 참조).

본 논문에서 제안한 내고장성 주기 걸음새에서 육각 보행 로봇은 특정한 초기 상태(그림 7(a) 또는 그림 9(a))에서 보행을 시작한다고 가정하였다. 하지만 대부분의 경우 보행 중 관절고착고장이 일어나는 순간 육각 보행 로봇의 상태는 제안된 주기 걸음새와는 다를 것이다. 따라서 로봇이 고장 발생 후 주기 걸음새를 가지기 위해서는 다리의 착지 위치와 몸체의 위치를 바꾸어 주기 걸음새의 한 단계로 전환하는 과정이 필요하다. 다음 장에서는 그러한 걸음새 변경 과정에 대해서 기술한다.

VI. 걸음새 변경 과정

1. 물결 걸음새

육각 보행 로봇은 관절고착고장이 일어나기 전 물결 걸음새(wave gait)로 보행을 하고 있다고 가정한다. 물결 걸음새는 주기 걸음새의 일종으로 로봇 몸체가 연속적으로 이동하면서 한 다리의 이착륙이 몸체 반대편에 있는 다리의 이착륙과 반 주기의 위상차를 보인다. 물결 걸음새는 곤충의 움직임을 모사해서 만들어졌으며 다각 보행 로봇의 직선 보행에서 가장 많이 사용되고 있는 보편적 걸음새이다[16]. 물결 걸음새의 보행은 걸음새 도표(gait diagram)와 고정 걸음새 양식(stationary gait pattern)을 이용하여 도식적으로 분석될 수 있다. 그림 10은 디듀티(duty factor)  $\beta$ , 즉 다리가 지지 상태에 있는 시간을 주기 시간으로 나눈 값이  $\beta = 2/3$  인 물결 걸음새의 도표이다. 그림에서 직선 부분은 다리가 한 주기 내에서 지지 상태로 있는 시간을 가리킨다. 그림 11은 그림 10의

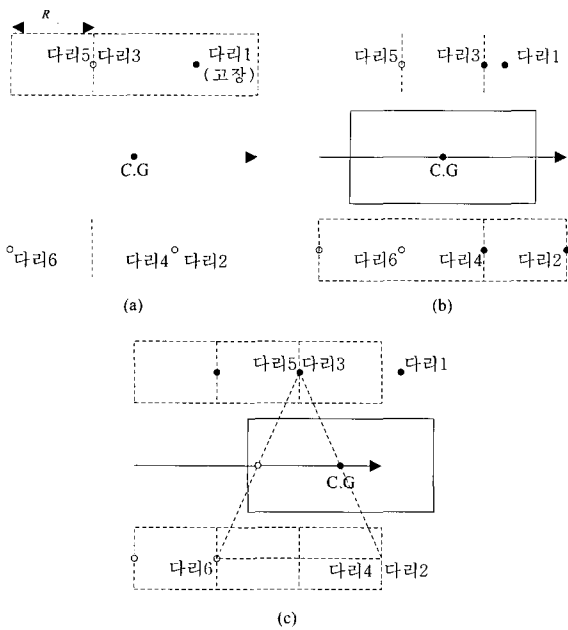


그림 9. 세다리 주기 걸음세의 다리 움직임 순서. (a) 초기 상태, (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙 후 로봇 몸체 이동.

Fig. 9. Leg sequence of the tripod gait planning. (a) initial state, (b) swing leg 2, leg 3 and leg 6 and (c) lift leg 1, leg 4 and leg 5 and move the robot body.

물결 걸음새를 고정 걸음새 양식으로 표현한 것이다. 각 다리의 작업 영역에서 나뉘어진 구간은 걸음새 도표에서 다리가 지지 상태로 있는 구간을 옮겨 그린 것이다. 로봇의 현재 걸음새 상태는 고정 걸음새 양식에서 쉽게 찾을 수 있다. 예를 들어 다리 1이 이륙한 직후의 걸음새를 얻기 위해서는 먼저 그림 10의 걸음새 도표에서 해당되는 지점을 찾는다(지점 4). 그런 다음 각 다리의 작업 영역에서 해당 지점과 일치하는 지점을 찾으면 원하는 걸음새를 얻는다. 다리 네 개가 지지 상태에 있으므로 지지 다각형은 그림 11과 같은 사각형이 된다.

2. 네다리 걸음새로의 변경

물결 걸음새의 디딤율이 2/3라고 가정하고 걸음새 변경 과정을 기술한다. 고장이 일어난 후 육각 보행 로봇은 네다리 주기 걸음새나 세다리 주기 걸음새 중 한 걸음새로 자유롭게 변경할 수 있다. 하지만 그림 10에서 알 수 있듯이 디딤율 2/3인 물결 걸음새는 네다리 걸음새의 일종이므로 육각 보행 로봇은 관절고착고장이 일어난 후 네다리 주기 걸음새로 전환한다고 규정한다. 앞 장에서와 마찬가지로 관절고착고장은 다리 1에서 발생한다고 하고 로봇 몸체는 등속도로 이동한다고 가정한다. 걸음새 변경 과정을 명확하게 기술하기 위해서 물결 걸음새의 주기를  $T$ 라고 하고 다리 1이 착지한 후 관절고착고장이 발생하기까지의 시간을  $t_f$  ( $0 \leq t_f < T$ ) 라고 정의하자.

2.1 고장 난 다리가 지지 상태일 때

관절고착고장이 발생했을 때 다리 1이 지지 상태에 있으면 고장 발생 시간  $t_f$  는  $0 \leq t_f < 2T/3$  의 범위 안에 있다.

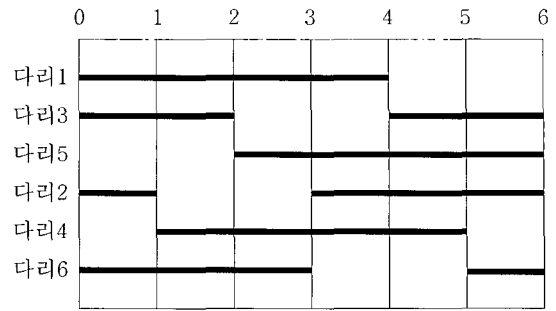


그림 10.  $\beta = 2/3$  인 물결 걸음새 도표.

Fig. 10. Gait diagram of the wave gait with  $\beta = 2/3$ .

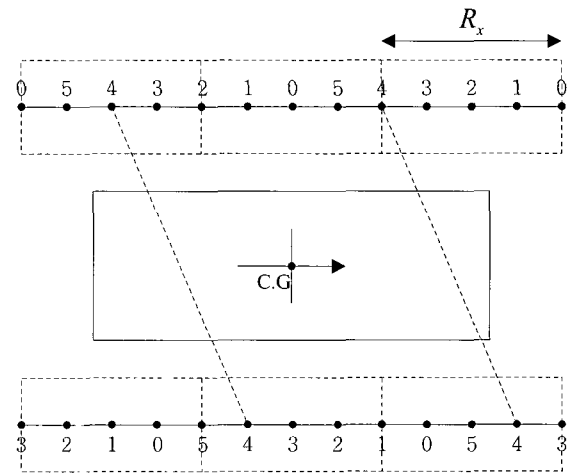


그림 11.  $\beta = 2/3$  인 물결 걸음새의 고정 걸음새 양식.

Fig. 11. Stationary gait pattern of the wave gait with  $\beta = 2/3$ .

그림 10의 걸음새 도표에서 알 수 있듯이 이 구간에서 다리 두 개는 항상 이동 상태에 있다. 주기 걸음새로 변경하는 과정은 다음과 같이 이루어진다.

- 1) 로봇 몸체는 이동을 멈춘다.
- 2) 이동 상태에 있는 다리가 다리 6이면 작업 영역의 뒤 경계점에 착지하고 그 외 다리는 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다.
- 3) 현재 상태에서 최소의 다리 움직임으로 도달할 수 있는 네다리 주기 걸음새의 상태를 찾아서 걸음새를 변경한다.

네다리 주기 걸음새에서 고장 난 다리 1과 다리 6은 함께 맨 마지막에 이륙하고 나머지 다리는 로봇 몸체의 이동 전에 모두 작업 영역의 앞 경계점으로 전진 스윙을 한다고 규정하였다. 따라서 고장이 발생했을 때 다리 6을 제외한 정상 다리가 이동 상태에 있다면 2)번과 같이 작업 영역의 앞 경계점에 착지해야 주기 걸음새로 전환하기 위한 다리 움직임을 최소로 할 수 있다. 그림 12는  $T/6 < t_f < T/3$  일 때 네다리 주기 걸음새로의 변경 과정을 나타낸 것이다. 고장이 발생했을 때 이동 상태에 있던 다리 2와 다리 5는 작업 영역의 앞 경계점에 착지하고 다리 3과 다리 4도 앞 경계점으로 이동하면 육각 보행 로봇의 상태는 네다리 주기 걸음새에서 고장 난 다리가 이륙하기 직전, 즉 그림 7(c)와 같이 된다. 그림 12(b)에서 다리 6의 착지점은 그림 7(c)와 같이 작업 영역의

뒤 경계점에 있지 않으나, 이동 과정에서 다리 6이 전진 스텝을 하여 다음 착지점을 조정하면 주기 걸음새로 완전하게 전환될 것이다. 다른 구간에서 고장이 발생해도 그림 12와 비슷한 과정을 통해 걸음새 변경이 가능하다.

2.2 고장 난 다리가 이동 상태일 때

관절고착고장이 발생했을 때 다리 1이 이동 상태에 있으면 고장 발생 시간  $t_f$ 는  $2T/3 < t_f \leq T$  의 범위 안에 있다. 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때와 마찬가지로 로봇 몸체는 일단 이동을 멈추고 이동 상태에 있는 다리는 알맞은 착지점에 착지한다. 그림 13은  $2T/3 < t_f < 5T/6$  일 때 네다리 주기 걸음새로의 변경 과정을 나타낸 것이다. 고장이 발생했을 때 다리 1과 다리 6이 이동 상태에 있으므로 로봇의 초기 조건은 그림 13(a)와 같다. 그림 13(b)는 이동 상태에 있는 다리가 착지한 상태를 보여준다. III장에서 기술했듯이 고장 난 다리 1은 한정된 지점에만 착지가 가능하고 다리 6은 네다리 주기 걸음새에서 고장 난 다리 1과 함께 이동하기 때문에 작업 영역의 뒤 경계점에 착지한다. 마지막으로

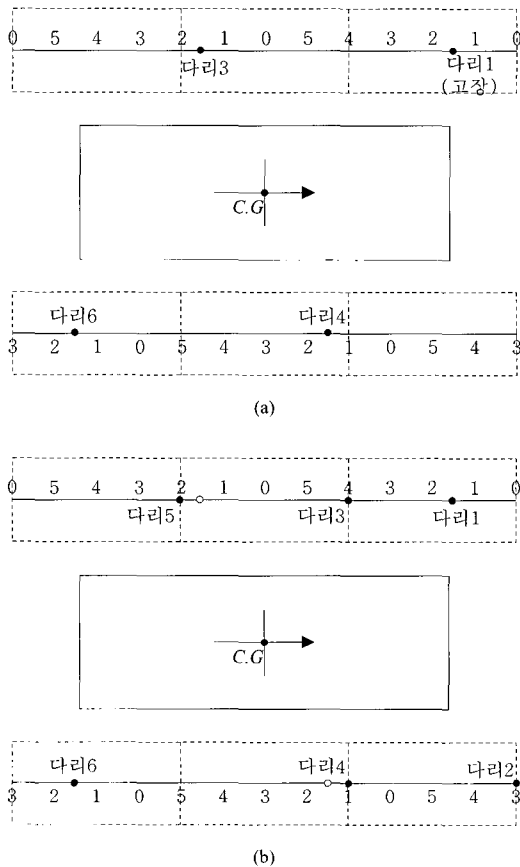


그림 12.  $T/6 < t_f < T/3$  일 때 네다리 주기 걸음새로의 변경 과정. (a) 고장이 발생했을 때의 상태, (b) 다리 2, 다리 5 착지 후 다리 3, 다리 4 이동.

Fig. 12. Adjustment procedure to the periodic quadruped gait when  $T/6 < t_f < T/3$ . (a) the moment of the fault occurrence and (b) place leg 2 and leg 5 and swing leg 3 and leg 4.

지지 상태에 있는 정상 다리들의 착지점을 조정하면 육각 보행 로봇의 자세는 그림 13(c)와 같이 되어 내고장성 주기 걸음새로의 전환이 완료된다.

2.3 걸음새 성능 비교

고장이 발생한 뒤 네다리 주기 걸음새로 전환하는 과정에서

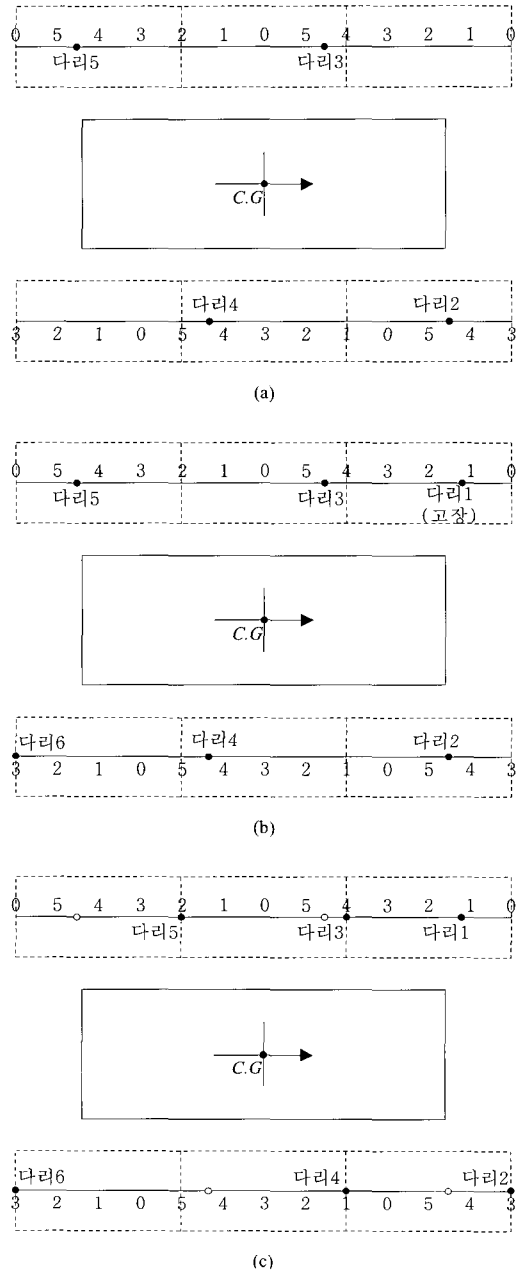


그림 13.  $2T/3 < t_f < 5T/6$  일 때 네다리 주기 걸음새로의 변경 과정. (a) 고장이 발생했을 때의 상태, (b) 다리 1, 다리 6 착지, (c) 다리 2, 다리 5 이동 후 다리 3, 다리 4 이동.

Fig. 13. Adjustment procedure to the periodic quadruped gait when  $2T/3 < t_f < 5T/6$ . (a) the moment of the fault occurrence and (b) place leg 1 and leg 6 and (c) swing leg 2 and leg 5 and swing leg 3 and leg 4.

생기는 걸음새 성능 변화를 분석한다. 그림 14는 그림 7의 네다리 주기 걸음새의 다리 움직임 순서를 걸음새 도표로 나타낸 것이다. 성능 비교를 명확하게 하기 위해서 이동 상태에 있는 다리 한 쌍이 착지한 후 다른 다리 한 쌍이 이륙하기까지의 시간차가 없다고 가정하였다. 그림 14에서 알 수 있듯이 네다리 주기 걸음새의 디딤울은 2/3으로 물결 걸음새의 디딤울과 차이가 없다. 하지만 네다리 주기 걸음새의 보폭은  $R_x$ 으로 디딤울 2/3인 물결 걸음새의 보폭  $3R_x/2$ 보다  $R_x/2$ 만큼 줄어든다. 즉 디딤울 2/3인 물결 걸음새로 걷고 있는 육각 보행 로봇에 관절고착고장이 발생하여 내고장성 네다리 주기 걸음새로 전환했을 때, 디딤울은 그대로 유지될 수 있으나 보폭은 줄어들어야 한다. 상기한 성능 비교에서 알 수 있듯이 제안한 내고장성 걸음새 계획을 적용하면 관절고착고장이 야기하는 이동성 손실 때문에 보폭은 감소하나 디딤울을 그대로 유지할 수 있는 강인성을 획득할 수 있다.

**VII. 결론**

본 논문에서는 육각 보행 로봇이 직선 보행을 할 때 관절고착고장이 발생해도 보행을 계속할 수 있게 하는 내고장성 걸음새 계획을 제안하였다. 다리의 관절 하나가 고착되는 관절고착고장을 정의하고 관절고착고장이 다리 이동 능력에 미치는 악영향을 걸음새 연구의 관점에서 분석하였다. 직선 보행 중 관절고착고장이 발생한 다리는 로봇 몸체를 지지하는 역할은 수행할 수 있으나 로봇 몸체를 이동시키는 능력은 상실한다. 본 논문에서는 이러한 관절고착고장의 영향을 고려한 내고장성 걸음새 계획을 제안하였으며, 특히 제안한 걸음새 계획을 만족하는 주기 걸음새가 존재함을 보였다. 내고장성 걸음새 계획에서 고장 난 다리는 로봇 몸체를 지지하기만 하고 이동할 때에는 전진 스윙을 하지 않는다. 제안한 내고장성 걸음새 계획의 효용성을 보이기 위해서 물결 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로봇이 관절고착고장이 일어난 후 제안한 내고장성 주기 걸음새로 전환하는 과정을 기술하였다. 제안한 내고장성 주기 걸음새를 이용하면 보폭은 고장이 일어나기 전보다 줄어들지만 디딤울은 그대로 유지할 수 있다.

다각 보행 로봇이 실제 작업 환경 내에서 일어나는 고장에

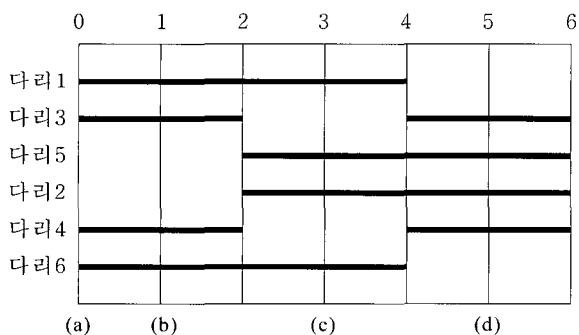


그림 14. 네다리 주기 걸음새의 걸음새 도표 ((a)~(d)는 그림 7(a)~(d)의 상태를 가리킨다).

Fig. 14. Gait diagram of the periodic quadruped gait.

대한 대처 능력을 가지기 위해서는 후진 보행, 계 걸음새, 회전 걸음새 등 다양한 형태의 보행에 대한 내고장성을 모두 갖추어야 한다. 본 논문에서 제안한 직선 보행에서의 내고장성 걸음새를 응용하여 다른 형태의 보행에 대한 내고장성 걸음새를 정립하는 일이 후속 연구로 남아 있다.

**참고문헌**

- [1] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [2] K. Inagaki, "On leg arrangement of a hexapod walking machine with a disable leg," *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 1495-1499, 1996.
- [3] H. J. Chiel, R. D. Beer, R. D. Quinn, and K. S. Espenshied, "Robustness of a distributed neural network controller for locomotion in a hexapod robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 293-303, 1992.
- [4] P. V. Nagy, S. Desa, and W. L. Whittaker, "Energy based stability measures for reliable locomotion of statically stable walkers: theory and application," *International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 3, pp. 272-287, 1994.
- [5] 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, Feb. 1998.
- [6] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Optimal fault tolerant gait sequence of the hexapod robot with overlapping reachable areas and crab walking," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part:A*, vol. 29, no. 2, pp. 224-235, Mar. 1999.
- [7] 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, Feb. 2000.
- [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, Aug. 1997.
- [9] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, NY, 1993.
- [10] 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.
- [11] 이연정, 비평탄 지형에서 사각 보행 로봇트의 계걸음새 제어 및 경로 계획에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 2월, 1994년.
- [12] J. G. Keramas, 이만형 외 역, *로봇공학 (Robot Technology Fundamentals)*, pp. 35, 사이텍미디어, 서울, 2000.
- [13] L. E. Parker, "L-ALLIANCE: Task-oriented multirobot learning in behavior-based systems," *Advanced Robotics*, vol. 11, no. 4, pp. 305-322, 1997.
- [14] 박세훈, 이승하, 이연정, "기하학적 탐색을 이용한 4각 보행로봇의 지그재그 걸음새 계획," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제8권, 제2호, pp. 142-150, 2월, 2002.
- [15] 양정민, 다각 보행 로봇의 내고장성 주행, 한국과학기술원 박사학위논문, 2월, 1999년.
- [16] S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.



[17] D. K. Pratihar, K. Deb and A. Ghosh, "Optimal path and gait generations simultaneously of a six-legged robot using a ga-fuzzy approach," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 41, pp. 1-20, 2002.

[18] T. T. Lee, C. M. Liao and T. K. Chen, "On the stability properties of hexapod tripod gait," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 4, no. 4, pp. 427-434, Aug. 1988.



**양정민**

1971년 3월 31일 생. 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학사). 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2001년 ~ 현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조

교수. 관심분야는 로봇 제어, 초음파 모터 제어 및 컴퓨터 보안.