

## Fault-Tolerant Tripod Gaits Considering Deadlock Avoidance

魯智明\* · 楊正敏\*\*

(Ji-Myong Nho · Jung-Min Yang)

**Abstract** - Fault-tolerant gait planning in legged locomotion is to design gaits with which legged robots can maintain static stability and motion continuity against a failure in a leg. For planning a robust and deadlock-free fault-tolerant gait, kinematic constraints caused by a failed leg should be closely examined with respect to remaining mobility of the leg. In this paper, based on the authors's previous results, deadlock avoidance scheme for fault-tolerant gait planning is proposed for a hexapod robot walking over even 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. It is shown that for guaranteeing the existence of the previously proposed fault-tolerant tripod gait of a hexapod robot, the configuration of the failed leg must be within a range of kinematic constraints. Then, for coping with failure situations where the existence condition is not satisfied, the previous fault-tolerant tripod gait is improved by including the adjustment of the foot trajectory. The foot trajectory adjustment procedure is analytically derived to show that it can help the fault-tolerant gait avoid deadlock resulting from the kinematic constraint and does not make any harmful effect on gait mobility. The post-failure walking problem of a hexapod robot with the normal tripod gait is addressed as a case study to show the effectiveness of the proposed scheme.

**Key Words** : Hexapod Robots, Fault Tolerance, Deadlock Avoidance, Locked Joint Failure, Tripod Gaits

## 1. 서 론

인간이 일하기 위험하거나 힘든 환경에 주로 투입되는 다각 보행 로봇(multi-legged robot)이 지속적이고 강인한 작업 능력을 가지기 위해서는 다리에서 발생하는 여러 가지 고장을 감내할 수 있는 내고장성(fault-tolerance) 능력을 보유하는 것이 필수적이다[1]. 특히 한 번 고장 난 다리는 일반적으로 작업이 끝날 때까지 고치기 힘들기 때문에 다각 보행 로봇은 훼손된 다리를 유지한 채 걸을 수 있어야 한다. 이렇게 다각 보행 로봇이 다리 하나에 고장이 발생 한 후에도 외부로부터 수리를 받지 않고 정적 안정여유도(static stability)를 유지하면서 보행할 수 있게 만드는 걸음새를 내고장성 걸음새(fault-tolerant gait)라고 한다[2]. 다각 보행 로봇의 내고장성에 대한 기존 연구들도 주로 여러 가지 종류의 다리 고장을 극복하면서 보행하는 방법에 대해서 이루어져 왔다[2]-[5].

한편 저자의 선행연구 [6]에서는 걸음새 연구(gait study)의 틀에서 다각 보행 로봇에 발생하는 관절고착고장(locked joint failure)을 극복하기 위한 내고장성 걸음새 계획법을 육각 보행 로봇(hexapod robot)의 경우에 대해서 제안하였

다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서 외부 작업을 하는 매니플레이터에서 흔히 발생할 수 있는 보편적인 종류의 고장이다[7]. 다각 보행 로봇의 다리 구조는 세 개의 회전관절로 이루어진 팔꿈치형 매니플레이터(articulated arm manipulator)[8]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 작업 공간은 이차원으로 줄어들어 다리가 제대로 동작을 할 수 없게 된다. 여유자유도 매니플레이터에 대해서는 이러한 관절고착고장을 감내할 수 있는 제어 기법에 대한 몇몇 연구가 발표되었다[7],[9]. 하지만 다각 보행 로봇의 걸음새 계획 문제는 매니플레이터 구조를 가지는 다리 여러 개와 로봇 무게중심의 움직임을 함께 생각해야 하므로 매니플레이터 한 대에 국한된 내고장성 제어 문제에 비해서 더 상위 계층의 문제라고 말할 수 있다.

본 논문의 목적은 관절고착고장이 야기하는 교착 회피(deadlock avoidance)를 고려한 새로운 내고장성 걸음새를 제안하는 것이다. 선행연구 [6]의 문제점 중의 하나는 제안된 내고장성 걸음새가 고장 난 다리의 기구학적 구속조건으로 인해서 발생할 수 있는 교착 상태를 고려하지 않았다는 점이다. 즉 이전의 내고장성 걸음새는 고장 난 다리가 평탄지형 위에 미리 정해진 다리 궤적의 한 지점에 항상 착지할

\* 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 專任講師 · 工博

\*\* 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2004年 5月 19日

最終完了 : 2004年 7月 20日

수 있다고 가정한 후 줄어든 다리의 작업 공간을 반영하여 다리 착지점과 보폭을 결정하였다. 하지만 관절고착고장의 특성상 고장 난 다리가 주어진 궤적 위의 어떠한 지점에도 착지하지 못하는 교착 상태에 빠질 수도 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 관절고착고장이 일어난 다리를 걸음새에 이용하는 방법뿐만 아니라 고장 난 다리로 인해서 생기는 기구학적 교착 상태를 회피하는 방법도 함께 고려해야 한다. 선행연구와 마찬가지로 본 논문에서는 육각 보행 로봇을 표준 로봇 모델로 정한다. 또한 로봇은 완전 평탄 지형에서 주기적인(periodic) 직선 보행을 하며, 세다리 걸음새(tripod gait), 즉 보행할 때 지표면을 지지하고 있는 다리의 수가 항상 세 개인 걸음새로 걷는다고 가정한다.

본 논문에서는 먼저 관절고착고장이 발생한 다리의 작업 공간 변화에 대해서 기술한 후 교착 상태에 빠지지 않고 주어진 다리 궤적을 유지할 수 있는 기구학적 구속조건을 찾는다. 고장이 발생한 시점에서의 다리의 자세(configuration)가 이 구속조건을 만족하지 못하면 걸음새는 교착 상태에 빠지게 된다. 본 논문에서는 교착 상태를 극복하기 위해서 보행 로봇의 다리 궤적을 조정하는 방법을 제안한다. 고착이 된 관절은 보행이 끝날 때까지 다시 움직이지 못한다고 가정하므로 교착 상태를 극복하는 유일한 방법은 실제로 다리의 궤적을 조정하는 것뿐이다. 다리 궤적 조정 방법은 지금까지 비평탄 지형 위의 보행에서 로봇이 장애물을 회피하려고 몸체의 궤적을 계속 바꾸어 주기 위해서 주로 이용되어 왔다[10][11]. 하지만 본 논문에서 제안하는 방법은 로봇 몸체의 궤적은 바꾸지 않고 다리의 궤적만 조정하는 것이다. 즉 평탄 지형에서 직선 보행하는 육각 보행 로봇의 걸음새에서 로봇 몸체의 궤적은 그대로 유지한 채 관절고착고장이 발생한 다리가 착지할 수 있는 영역을 포함하도록 다리의 궤적만 평행 이동할 수 있음을 해석적으로 보인다. 또한 교착 상태를 회피하는 방법을 포함하는 일반적인 내고장성 걸음새 계획 알고리즘을 완성한다. 제안된 방법의 우수성을 보이기 위해서 본 논문에서는 표준 세다리 걸음새로 보행하고 있는 육각 보행 로봇의 다리 하나에 교착 상태를 일으키는 관절고착고장이 발생한 후 로봇이 논문에서 제안한 방법으로 교착 상태를 극복하고 내고장성 주기 걸음새로 변환하는 과정도 기술한다.

2. 문제 설정

본 논문에서는 다각 보행 로봇 모델로서 그림 1과 같은 육각 보행 로봇을 사용하기로 한다. 로봇 몸체는 기하학적으로 좌우 대칭인 형태이며 몸체 무게중심(center of gravity)  $C$ 와 기하학적 중심점이 일치한다고 가정한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 여섯 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림과 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 로봇 몸체와  $W$ 만큼 떨어진 길이  $R_x$ , 폭  $R_y$ 의 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)이 된다고 정의한다. 또한 무게중심  $C$ 를 원점으로 하는 몸체 좌표계  $X$ - $Y$ 에 따라 1번부터 6번까지 각 다리에 번호를 부여한다.  $C_i$ 는 다리  $i$ 의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이동분하는 중선(center line)이  $C_i$ 를 지나간다.

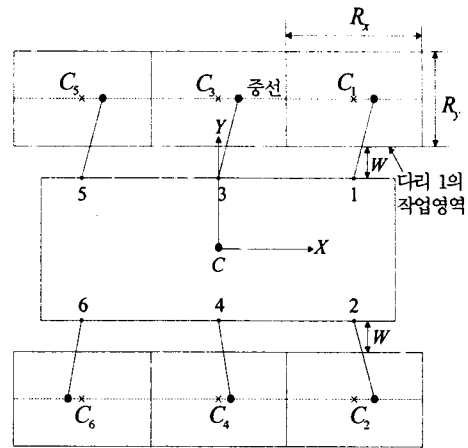


그림 1 육각 보행 로봇의 이차원 모델  
Fig. 1 Two-dimensional model of a hexapod robot

육각 보행 로봇의 다리는 그림 2와 같이 두 개의 링크(link)로 구성된 팔꿈치형 매니퓰레이터 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 액추에이터(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 2의 모델에서 다리의 발은 삼차원 운동이 가능하므로 작업 영역의 어느 지점에서든 착지할 수 있다. 다각 보행 로봇에서 사용되는 다른 다리 모델들[12][13]도 형태는 다르나 모두 삼차원 운동을 하므로 그림 2의 모델은 일반적이라고 말할 수 있다.

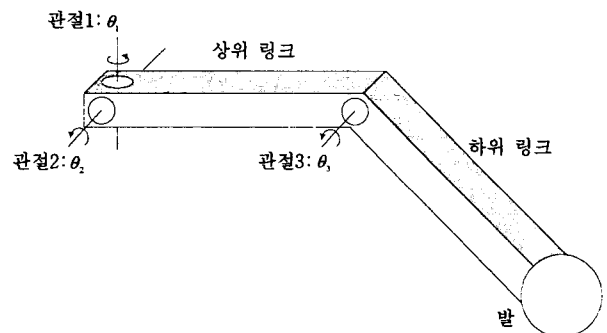


그림 2 팔꿈치형 다리 모델  
Fig. 2 Leg model of an articulated-arm type

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 주기적 세다리 걸음새로 직선 보행을 하며 로봇 몸체는 지면에 평행하다.
- 2) 정상(normal) 보행에서 각 다리는 그림 1과 같이 항상 직사각형 작업 영역의 중심에 착지한다.
- 3) 안정성 판단 시 로봇의 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려한다.
- 4) 다리의 발은 지표면과 점(point)으로 접촉한다.

가정 1)은 육각 보행 로봇이 평탄 지형에서 게 걸음새(crab gait)나 회전 걸음새(turning gait)를 가지지 않고 한 방향으로 직선 평행 보행만을 한다는 의미이다. 또한 장애물이 없는 평탄 지형에서는 주기적 걸음새로 걷는 것이 속도나 보행 모듈 구현 과정에 유리하므로 본 논문에서도 로

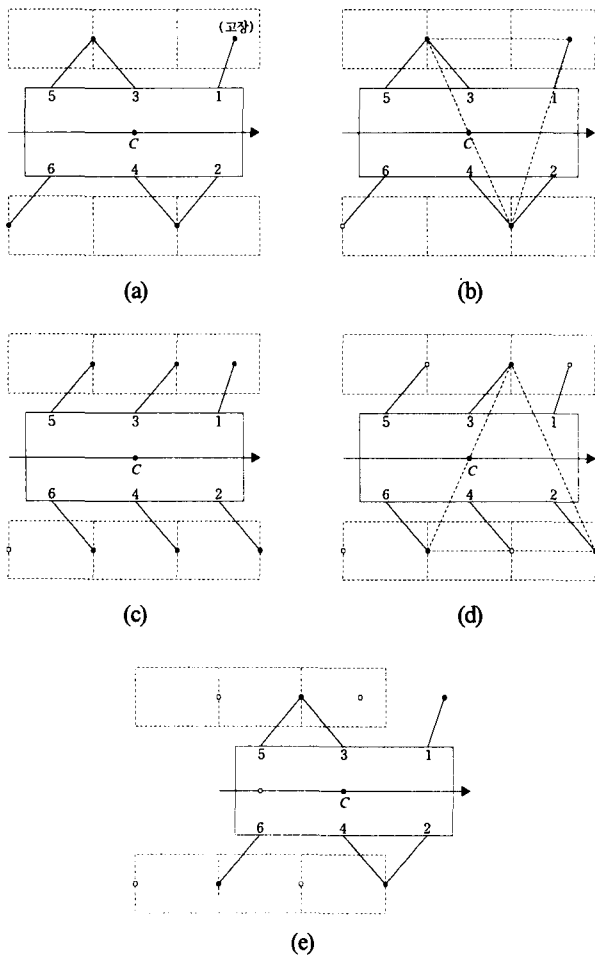


그림 3 내고장성 주기 세다리 걸음새[6]. (a) 초기 상태, (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이륙, (c) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동 후 착지(로봇 몸체 정지), (d) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙, (e) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동 후 착지(로봇 몸체 이동)

Fig. 3 The fault-tolerant periodic tripod gait[6]. (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

봇이 가지는 걸음새는 모두 주기적이라고 가정한다. 가정 2)는 정상 상태에서 보행 로봇의 걸음새가 좌우 대칭인 정칙(regular) 형태를 가진다는 의미이다. 하지만 앞 장에서 기술했듯이 관절고착고장은 이러한 정칙 걸음새를 교착 상태에 빠트릴 수 있으므로 내고장성 걸음새에서 다리 궤적을 조정할 필요가 있다.

### 3. 내고장성 세다리 걸음새

본 장에서는 관절고착고장의 특징과 [6]에서 제안된 내고장성 세다리 걸음새 계획법을 간략하게 설명한다. 육각 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 문제를 풀 수가 없다[7]. 그리고 이동 상태(transfer phase)에 있는 다리에 고장이 발생하면 다리는 예정된 착지점에 정상적으로 착지하지 못하고 한정된 지점에만 착지할 수 있으며, 착지한 후에도 몸체가 이동하면 역시 현재 착지점을 그대로 유지하지 못한다. 이와 같은 제한 조건을 만족하기 위해서는 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 동안에는 로봇 몸체가 정지해 있다가 고장 난 다리가 이륙한 후에만 움직이는 불연속 걸음새(discontinuous gait)[14]를 가져야 한다. 관절고착고장에 대한 내고장성 걸음새 계획의 원칙은 다음과 같다.

- 1) 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때는 로봇 몸체의 이동이 없어야 한다.
- 2) 고장 난 다리는 이륙을 한 후 전진하기 위한 스윙(swing) 동작을 취하지 않고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로만 이동한다.

그림 3은 관절고착고장이 다리 1에 발생한 후 로봇이 가지는 주기적 세다리 걸음새의 한 주기 동안의 모습을 나타낸다. 그림 3의 걸음새는 최저 세로 안정여유도(longitudinal stability margin)[11]와 최대 보폭  $R_x$ 을 가진 것이다. 고장 난 다리 1이 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 좀더 나은 세로 안정여유도를 가지는 걸음새는 그림 3으로부터 쉽게 유도될 수 있다. 육각 보행 로봇에서 정적 안정여유도를 유지하기 위한 세다리 걸음새의 표준 다리 움직임 순서는 항상 (1, 4, 5)--(2, 3, 6)이므로[15] 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 이륙만 하고 전진 스윙은 하지 않는다. 위 걸음새의 한 주기 과정을 다시 요약하면 다음과 같다.

- i) 고장 난 다리 1의 착지점을 결정하고 초기 상태에 진입

한다(그림 3(a)).

ii) 다리 2, 다리 3, 다리 6이 보폭  $R_x$ 으로 전진 스윙을 한다. 이때 로봇 몸체는 정지해 있다(그림 3(b), (c)).

iii) 다리 1, 다리 4, 다리 5가 이륙한 후 로봇 몸체가  $R_x$ 만큼 이동한다. 이때 이륙한 다리는 전진 스윙을 하지 않는다(그림 3(d), (e)).

그림 3의 걸음새를 고장이 없을 때 육각 보행 로봇이 가지는 표준 세다리 걸음새와 비교하면 디듀티(duty factor), 즉 한 주기에 대해서 다리가 지지 상태에 있는 시간의 비율은 1/2로 동일한 값이 유지되고 단지 보폭만 절반으로 줄어든다[6]. 이 결과는 관절고착고장으로 인해서 다리가 잃어버리는 자유로운 스윙 및 착지 능력 손실이 정량적으로 나타난 것이라고 말할 수 있다.

### 4. 교착 상태

#### 4.1 관절 1의 교착

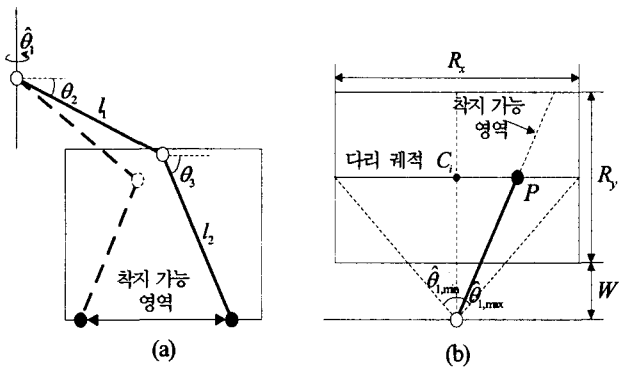


그림 4 관절 1의 교착. (a) 측면도, (b) 기구학적 구속조건  
Fig. 4 Locked joint failure at joint one. (a) lateral view and (b) kinematic constraint

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 이차원 작업 영역에 투영된 착지 가능 영역은 그림 4(a)와 같이 직선이 된다. 그림에서  $\hat{\theta}_1$ 은 관절 1이 고착된 위치이다. 그림 4(b)는 고장이 발생한 후에도 작업 영역의 중선을 다리 궤적으로 계속 유지해야 할 때 생길 수 있는 교착 상태를 나타낸 것이다. 만약 고장난 다리가 그림 4(b)에 그려진 대로 착지 가능 영역을 가진다면 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 유일한 착지 영역은 점 P이다. 그러나 작업 영역의 수직 이동분선을 기준으로 해서 시계 방향으로 관절 1의 각도를 측정한다고 할 때 관절 1의 교착 위치가 그림 4(b)에 명기되어 있듯이  $\hat{\theta}_{1,max}$ 보다 크거나  $\hat{\theta}_{1,min}$ 보다 적으면 다리는 주어진 궤적 위의 어떠한 점에도 착지할 수 없게 된다. 따라서 정칙 걸음새로 직선 보행을 하는 육각 보행 로봇이 선형연구에서 제안된 내고장성 걸음새를 가지기 위해서는 관절 1의 교착

위치  $\hat{\theta}_1$ 이 아래 범위 안에 존재해야 한다.

$$\hat{\theta}_{1,min} \leq \hat{\theta}_1 \leq \hat{\theta}_{1,max} \quad (1)$$

$\hat{\theta}_{1,min}$ 과  $\hat{\theta}_{1,max}$ 를 로봇의 매개 변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{1,min} = -\arctan\left(\frac{R_x}{R_y + 2W}\right)$$

$$\hat{\theta}_{1,max} = \arctan\left(\frac{R_x}{R_y + 2W}\right) \quad (2)$$

#### 4.2 관절 2의 교착

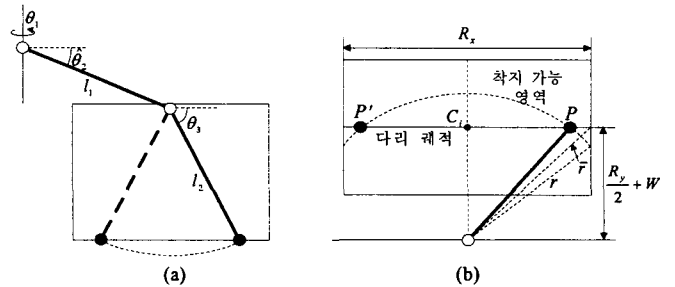


그림 5 관절 2의 교착. (a) 측면도, (b) 기구학적 구속조건  
Fig. 5 Locked joint failure at joint two. (a) lateral view and (b) kinematic constraint

관절 2에 관절고착고장이 발생하면 관절 1에 의해서 이루어지는 다리의 전후 이동은 영향을 받지 않지만, 관절 2와 관절 3에 의해서 이루어지는 다리의 상하 운동은 고장 발생 후 관절 3만을 이용해서 수행되어야 하므로 제약을 받는다. 지표면에 대한 로봇 몸체의 고도(altitude)가 일정하다고 하면 고장 난 다리는 작업 영역 위에서 그림 5(a)에 그려진 대로 측면 방향, 즉 로봇 몸체 좌표계의 ±Y 방향으로의 이동이 불가능하다. 따라서 작업 영역에 투영된 다리의 착지 가능 영역은 그림 5(b)와 같이 원호(arc) 모양이 되고 작업 영역의 중선을 다리 궤적으로 하는 걸음새에서 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 착지 영역은 점 P와 P'가 된다. 고장 발생 후 걸음새가 교착 상태에 빠지는지 여부는 원호의 반지름 r의 값에 따라 결정된다. 먼저 r이 그림 5(b)에 명기된  $\bar{r}$ , 즉 이차원 평면에 투영된 다리와 로봇 몸체의 접점(junction)으로부터 작업 영역 앞 경계점까지의 거리보다 크다면 주어진 다리 궤적과 착지 가능 영역 사이에는 교점이 생기지 않는다. 또한 r이  $R_y/2 + W$ 보다 작으면 마찬가지로 착지 가능한 지점이 생기지 않는다. r이 만족시켜야 하는 조건을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{R_y}{2} + W \leq r \leq \bar{r} \quad (3)$$

r은 이차원 평면에 투영된 로봇 몸체의 접점과 다리 착지점 사이의 길이이므로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$r = l_1 \cos\theta_2 + l_2 \cos\theta_3 \quad (4)$$

위 식에서  $\hat{\theta}_2$ 는 관절 2의 교착 위치이며  $l_1, l_2$ 는 다리의

상위 링크와 하위 링크의 길이를 각각 가리킨다.  $\bar{r}$ 도 아래와 같이 로봇의 매개 변수로 표시될 수 있으므로

$$\bar{r} = \frac{1}{2} \sqrt{R_x^2 + (R_y + 2W)^2} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 식 (3)에 치환하면 관절 2가 만족시켜야 할 기구학적 구속조건은 아래와 같이 유도된다.

$$\frac{R_y}{2} + W \leq l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \sin \theta_3 \leq \frac{1}{2} \sqrt{R_x^2 + (R_y + 2W)^2} \quad (6)$$

### 4.3 관절 3의 교착

관절 3에 관절교착고장이 발생하면 다리는 회전 관절 두 개로 이루어진 단일 링크 매니플레이터의 특성을 가지게 된다. 다리의 상하 운동을 담당하는 두 개의 관절 중 한 개가 고착되어 다리의 자유도가 하나 줄어들게 되므로 걸음새 연구의 관점에서 보면 관절 3의 고장은 관절 2에 고장이 일어난 경우와 거의 똑같은 변화를 가져온다. 따라서 고장이 일어난 후에도 교착 상태에 빠지지 않고 주어진 다리 궤적을 유지하기 위해서 만족되어야 할 기구학적 구속조건도 다음과 같이 식 (6)과 동일하게 유도된다.

$$\frac{R_y}{2} + W \leq l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \hat{\theta}_3 \leq \frac{1}{2} \sqrt{R_x^2 + (R_y + 2W)^2} \quad (7)$$

위 식에서  $\hat{\theta}_3$ 는 관절 3의 고착 위치이다.

## 5. 다리 궤적 조정

선행연구 [6]에서 제안된 내고장성 걸음새를 적용할 때 관절교착고장이 발생한 다리의 자세가 기구학적 구속조건 (1), (6), 또는 (7)을 만족하지 못하면 육각 보행 로봇은 주어진 다리 궤적(작업 영역의 중선)을 유지하지 못하고 교착 상태에 빠지게 된다. 본 장에서는 다리 궤적 조정을 통해서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 내고장성 걸음새를 제안한다.

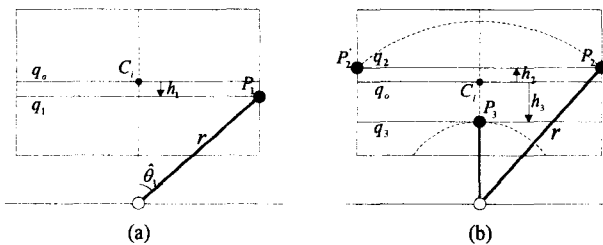


그림 6 다리 궤적 조정. (a) 관절 1의 고장, (b) 관절 2(또는 관절 3)의 고장

Fig. 6 Foot trajectory adjustment. (a) locked failure at joint 1 and (b) locked failure at joint 2 (or joint 3)

그림 6은 교착 상태를 회피하기 위한 다리 궤적 조정 방법을 관절 1과 관절 2(또는 관절 3)의 고장에 대해서 각각 나타낸 것이다. 먼저 그림 6(a)는 고장이 발생한 시점에서의

관절 1의 각도  $\hat{\theta}_1$ 이 구속조건 식 (1)을 만족하지 못해서 주어진 다리 궤적  $q_0$  위에 착지하지 못하는 상황을 보여준다. 이 경우 관절교착고장이 발생한 다리를 내고장성 걸음새에서 계속 사용하기 위해서는 고장 난 다리가 착지할 수 있도록 다리 궤적의 위치를 변경하는 수밖에 없다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이  $q_0$ 가  $-Y$  방향으로 거리  $h_1$  이상으로 평행 이동하면 다리의 착지 가능 영역과 교점이 생겨 다리가 새로운 궤적 위에 발을 디딜 수 있게 된다. 본 논문에서는 다리 궤적 이동을 최소화하기 위해서 착지 가능 영역과 교점을 가지는 궤적들 중 원래의 궤적  $q_0$ 과 가장 가까운 것을 새로운 다리 궤적으로 정하기로 한다. 그림 6(a)에서는  $q_1$ 이 새로운 다리 궤적이 되고 고장 난 다리의 착지점은  $P_1$ 이 된다. 관절 각도와 매개 변수로  $h_1$ 을 표시하면 아래와 같다.

$$h_1 = \frac{R_y}{2} + W - r \cos \hat{\theta}_1.$$

작업 영역에 투영된 다리의 길이  $r$ 은 식 (4)에서 구한 값과 동일하므로 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$h_1 = \frac{R_y}{2} + W - (l_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_3) \cos \hat{\theta}_1. \quad (8)$$

그림 6(b)는 관절 2(또는 관절 3)가 고장 난 교착 상태를 극복하는 모습을 보여준다. 관절 2(또는 관절 3)가 야기하는 교착 상태는 그림과 같이 착지 가능 영역이 원래의 다리 궤적과 교점을 가질 수 없을 정도로 너무 위에 있거나 또는 너무 아래에 있을 때 생긴다. 위쪽 착지 영역을 가지는 교착 상태를 극복하기 위해서는  $q_0$ 를  $+Y$  방향으로  $h_2$ 만큼 이동하면 되며, 아래쪽 착지 영역에 대해서는  $q_0$ 를  $-Y$  방향으로  $h_3$ 만큼 이동하면 된다. 평행 이동의 결과로 생기는 새로운 다리 궤적은 각각  $q_2$ 와  $q_3$ 가 된다. 그런데 다리의 착지 가능 영역이  $q_0$ 보다 위쪽에 있을 때는 새로운 다리 궤적 위에 착지할 수 있는 지점이 두 개 생긴다(그림 6(b)의  $P_2$ 와  $P_2'$ ). 이것은 관절 2(관절 3)가 고착되었을 때 작업 영역에 투영되는 착지 가능 영역이 원호 모양이기 때문이다. 주기 걸음새의 형태를 고려해서 고장 난 다리를 두 지점 중 어디에 착지할 것인가를 결정해야 하는데 내고장성 걸음새의 한 주기 형태가 그림 3과 같을 때에는  $P_2$ , 즉 육각 보행 로봇 진행 방향을 기준으로 더 앞쪽에 있는 착지점을 이용하는 것이 더 유리하다. 식 (8)을 이용해서 관절 2가 고착된 경우의  $h_2$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$h_2 = (l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \theta_3) \cos \theta_1 - \left( \frac{R_y}{2} + W \right).$$

이때  $\theta_1$ 은 고장 난 다리가  $P_2$  또는  $P_2'$ 에 착지했을 때 관절 1이 가지는 각도를 말한다.  $h_3$ 를 구하는 공식은 식 (8)에서  $\hat{\theta}_1$ 에 0을 대입하면 아래와 같이 쉽게 구해진다.

$$h_3 = \frac{R_y}{2} + W - (l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \theta_3).$$

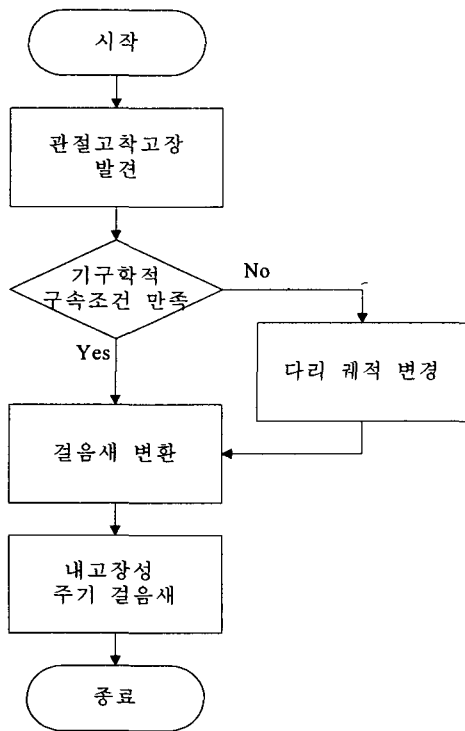


그림7 교착 상태를 고려한 내고장성 세다리 걸음새 계획.  
Fig. 7 Fault-tolerant tripod gait planning considering deadlock avoidance.

그림 7은 교착 상태를 고려한 내고장성 세다리 걸음새 계획 알고리즘을 나타낸 것이다. 육각 보행 로봇이 보행 중 관절고착고장을 발견하면 걸음을 멈추고 고장 난 다리가 앞장에서 구한 기구학적 구속조건을 만족하는지를 먼저 검사한다. 기구학적 구속조건이 만족되면 육각 보행 로봇은 그림 3의 내고장성 주기 세다리 걸음새를 가지고 보행을 계속한다. 만약 기구학적 구속조건이 만족되지 못하면 본 논문에서 제안한 방법을 적용하여 로봇의 다리 궤적의 위치를 변경시킨 후 걸음새 변환을 통해 내고장성 주기 걸음새를 시작한다. 다리 궤적 조정 방법을 적용할 때 주의해야 할 사항은 다음과 같다.

- 1) 다리 궤적은 로봇 몸체 좌표계의 X축을 중심으로 항상 대칭적으로 위치해야 한다. 예를 들어 그림 6(a)에 그려져 있는 다리가 육각 보행 로봇의 다리 1이라면 다리 1과 같은 쪽에 붙어 있는 다리 3, 다리 5의 궤적도 다리 1의 궤적과 동일하게 -Y 방향으로 거리  $h_1$ 만큼 평행이동하여  $q_1$ 이 된다. 하지만 반대쪽에 있는 다리 2, 다리 4, 다리 6의 궤적은 +Y 방향으로 거리  $h_1$ 만큼 평행이동해야 대칭성을 유지할 수 있고 로봇의 안정여유도에 아무런 영향을 미치지 않는다[11].
- 2) 교착 상태에서 벗어나기 위해 다리 궤적 조정 방법을 쓴 다음에는 기존의 다리 움직임 순서를 그대로 적용한다. 즉 다리 궤적 조정 방법이 적용된 내고장성 걸음새의 다리 움직임 순서는 그림 3과 동일하며 단지 다리 궤적이 기존의 궤적보다 Y축 방향을 기준으로 더 안쪽, 혹은 바

깎쪽에 존재하게 된다.

위에서 제안한 다리 궤적 조정 방법은 비평탄 지형에서 장애물 회피를 하는 데 적용되는 적응 걸음새(adaptive gaits)[10],[16]에서 주로 이용되어 왔다. 하지만 그림 6의 다리 궤적 조정은 고장 난 다리가 야기하는 교착 상태에서 벗어나기 위해서 쓰이고 있으므로 적응 걸음새에서 사용되는 것과는 그 목적이 다른 독자적인 기법이라고 말할 수 있다. 또한 걸음새의 안정여유도를 높이기 위해서 다각 보행 로봇의 무게중심이나 몸체를 이동하는 방법 등이 제안되었으나 [3],[17],[18] 본 논문에서 제안된 다리 궤적 조정 방법은 위에서 설명했듯이 로봇의 안정여유도에는 영향을 미치지 않고 고장 난 다리가 직선 보행을 하기 위해서 필요한 이동능력을 최대한 획득하는 역할을 한다.

### 6. 걸음새 변환: 사례 연구

본 장에서는 그림 7에 나와 있는 걸음새 계획 알고리즘 중 '걸음새 변환' 부분을 사례 연구(case study)를 통해서 기술한다. 관절고착고장이 발생한 순간 육각 보행 로봇이 가지는 자세는 대부분의 경우 내고장성 주기 걸음새의 상태와는 다르다. 따라서 육각 보행 로봇이 고장 발생 후 내고장성 주기 걸음새로 보행하기 위해서는 다리의 착지 위치와 몸체의 위치를 바꾸어 주기 걸음새의 한 상태로 전환하는

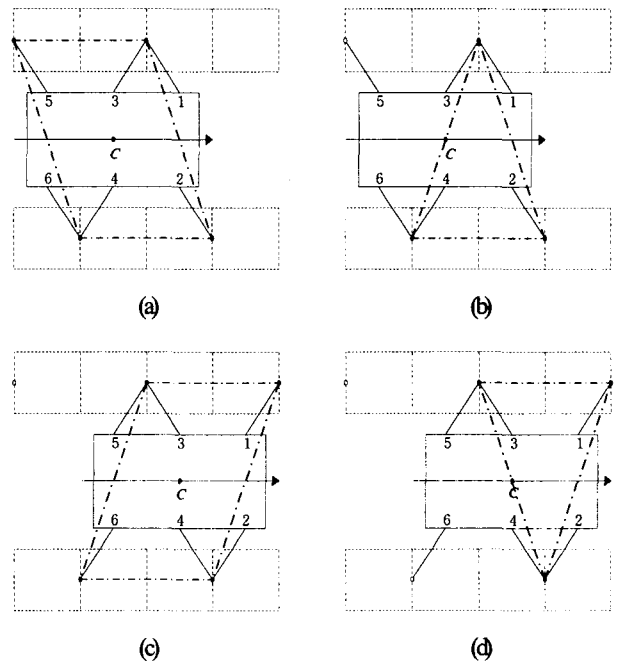


그림8 표준 세다리 걸음새. (a) 초기 상태(다리 2, 다리 3, 다리 6 이동 후 착지), (b) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동 후 착지, (d) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이륙.

Fig.8 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.

걸음새 변환 과정이 필요하다. 또한 본 논문에서는 교착 상태를 벗어날 수 있는 새로운 기법을 제안하였으므로 표준 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로봇에 관절고착고장이 하나 발생하여 작업 영역의 중심과 일치하는 다리 궤적을 유지하지 못하는 교착 상태에 빠지는 경우를 사례 연구의 상황으로 잡아서 걸음새 변환 과정을 기술하기로 한다.

육각 보행 로봇은 평탄 지형 위에서 고장이 발생하기 전 그림 8에 나와 있는 표준 주기적 세다리 걸음새[19]로 보행하고 있다고 가정한다. 그림 8의 걸음새는 로봇 몸체가 연속적으로 이동하는 물결 걸음새(wave gait)[20] 중 가장 빠른 속도와 가장 낮은 안정여유도를 가지는 것이다. 그림에서 검은 원은 현재 지지 상태에 있는 다리의 착지점을, 흰 원은 과거 다리가 착지했던 지점을 가리키며 일점쇄선으로 나타낸 모양은 지지 다각형(support polygon)[11], 즉 다리의 착지점들을 서로 연결한 도형이다. 그림에서 알 수 있듯이 걸음새 안에서 세 개의 다리(tripod)가 항상 지지 상태에 있으며 로봇은 (1, 4, 5)--(2, 3, 6)의 표준 다리 움직임 순서를 가진다. 또한 걸음새의 디딤올은 1/2이며 최저 세로 안정여유도를 가진다(그림 8(b), (d) 참조). 그림 9는 그림 8의 표준 주기 세다리 걸음새의 걸음새 도표(gait diagram)이다. 그림에서 직선으로 나타낸 구간은 정규화된 걸음새 한 주기 동안 각 다리가 지지 상태에 있는 시간을 가리킨다.

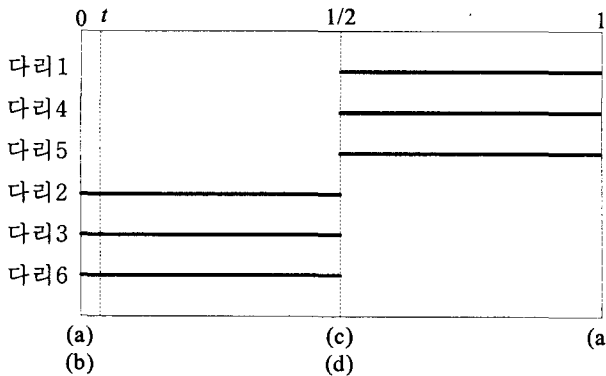


그림 9 그림 8의 표준 주기 세다리 걸음새의 걸음새 도표 ((a)~(d)는 그림 8(a)~(d)의 상태를 가리킨다).

Fig. 9 Gait diagram of the standard tripod gait in Fig. 8.

본 사례 연구에서는 육각 보행 로봇의 다리 1이 이동 상태에 있는 동안 다리의 관절 2에 관절고착고장이 발생하여 교착 상태에 빠진다고 가정한다. 다리가 이동 상태에 있을 때 고장이 일어난다고 가정할 이유는 그림 4~그림 6에 나타난 교착 상태가 다리가 이륙한 후 전진 스윙을 할 때 주로 발생하기 때문이다. 다리 1이 이륙한 후 그림 9에서 표기된 시각  $t$ 에서 관절 2에 고착고장이 일어났다고 하자. 그림 9에서 알 수 있듯이 시각  $t$ 에서 다리 4와 다리 5 역시 이동 상태에 있으며 다리 2, 다리 3, 다리 6은 지지 상태에 있다. 또한 시각  $t$ 는 각 다리가 이륙한 직후, 즉 그림 8(b) 상태의 직후이므로 고장이 발생했을 때의 걸음새 상태는 그림 10과 같다. 다리 1이 이동 상태에 있음에도 불구하고 작업 영역에 투영된 다리의 현재 자세를 기준으로 하여 다리의 착지 가능 영역은 쉽게 구할 수 있다. 그림에서 다리 1의 착지 가능 영역이 최초 다리 궤적  $q_0$ 의 위쪽에 위치하고

있으므로 다리 궤적 조정 방법에 의해서  $q_0$ 를  $+Y$  방향으로 이동시켜 새로운 다리 궤적  $q_1$ 을 구한다. 반대편에 있는 다리들에 대해서는  $q_0$ 를  $-Y$  방향으로 평행 이동시켜야 한다.  $q_1$ 과 착지 가능 영역의 교점 중 로봇 진행 방향 앞쪽에 있는  $P$ 를 다리 1의 착지점으로 정한다.

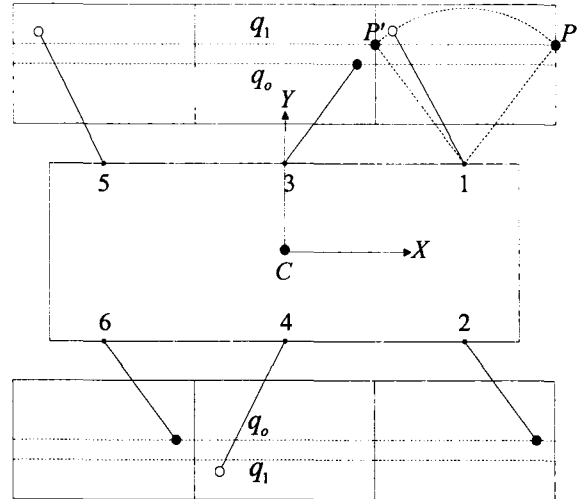


그림 10 다리 1의 관절 2에 관절고착고장이 발생했을 때의 상태.

Fig. 10 Gait state when joint 2 of leg 1 is locked from failure.

그림 11은 육각 보행 로봇이 관절고착고장 발생 후 내고장성 주기 걸음새로 변환하는 과정을 보여준다. 그림 11(a)는 로봇에 고장이 발생하여 몸체의 이동을 멈춘 후 고장 난 다리의 착지점  $P$  및 다리 궤적을 결정하는 과정으로서 그림 10과 동일하다. 그림 11(b)에서는 이동 상태에 있던 다리 1, 다리 4, 다리 5가 새로운 다리 궤적  $q_1$ 에 착지한다. 이때 다리 1은  $P$ 에 착지하고 고장이 일어나지 않은 정상적인 다리 4와 다리 5는 최대한 전진 스윙을 하여 각 작업 영역의 앞 경계점에 착지한다. 그림 11(c)와 (d)에서는 마찬가지로 다리 2, 다리 3, 다리 6이 이륙한 후 새로운 다리 궤적 위에 착지한다. 마지막 상태인 그림 11(d)는 내고장성 주기 세다리 걸음새의 상태 중 그림 3(c)와 일치하므로 걸음새 변환이 성공적으로 이루어졌다고 말할 수 있다. 그림 11의 걸음새 변환 과정은 본 논문에서 제안한 다리 궤적 조정 방법이 그림 10의 경우와 같이 기존의 내고장성 걸음새 계획으로는 빠져나오기 불가능한 교착 상태를 회피하는 능력을 가진다는 사실을 보여준다. 또한 그림 11의 걸음새는 그림 3에 나와 있는 기존의 내고장성 걸음새와 다리 움직임 순서와 보폭이 똑같으므로 속도나 디딤올 등 걸음새의 성능을 그대로 유지하면서 교착 상태 회피 기능을 추가되었다고 말할 수 있다. 본 사례 연구는 관절 2에 대해서만 기술하였지만 다른 관절에 발생하는 고착고장이 야기하는 교착 상태를 회피하는 걸음새 변환 과정도 그림 11의 과정을 바탕으로 쉽게 유도할 수 있을 것이다.

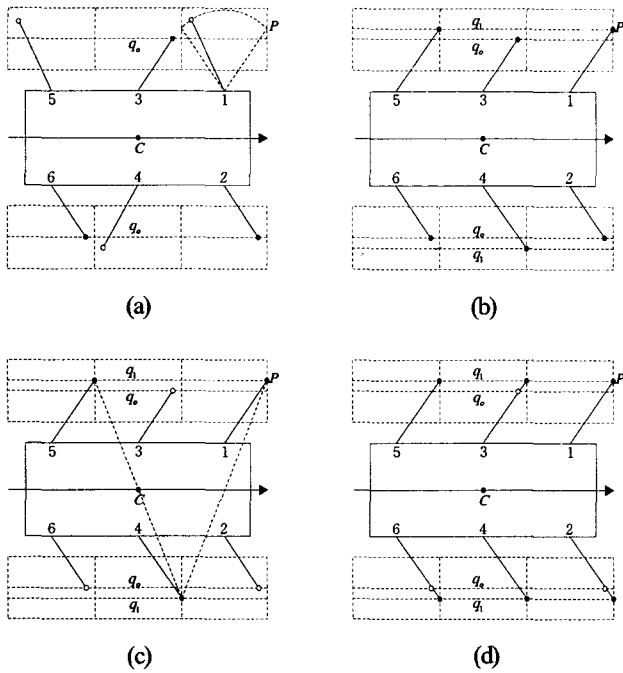


그림 11 걸음새 변환 과정. (a) 로봇 몸체 정지 및 다리 1의 착지점 결정, (b) 다리 궤적 조정 후 다리 1, 다리 4, 다리 5 착지, (c) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이륙, (d) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동 후 착지.

Fig. 11 Gait transition procedure. (a) halt the body movement and determine the foothold position of leg 1, (b) adjust the foot trajectory and place legs 1, 4 and 5, (c) lift off legs 2, 3 and 6 and (d) swing and place legs 2, 3 and 6 on the new foot trajectory.

7. 결 론

본 논문에서는 관절고착고장이 초래할 수 있는 교착 상태를 회피하는 방법을 추가한 새로운 내고장성 걸음새 계획을 육각 보행 로봇의 직선 보행에 대해서 제안하였다. 관절고착고장이 발생한 후 육각 보행 로봇이 기존의 다리 궤적을 그대로 유지하면서 내고장성 걸음새로 걸으려면 고장 난 다리가 특정한 기구학적 구속조건을 만족시켜야 한다. 본 논문에서는 삼차원 운동을 하고 지표면에 직사각형 모양의 작업 영역을 가지는 팔꿈치형 다리 모델에 대해서 이러한 기구학적 구속조건을 규명하였다. 그런 다음 육각 보행 로봇이 고장이 일어난 후 기구학적 구속조건을 만족시키지 못하고 교착 상태에 빠지는 상황을 극복하기 위해서 다리 궤적 조정 방법을 추가한 새로운 내고장성 걸음새 계획을 제안하였다. 다리 궤적 조정 방법은 고장 난 다리가 착지할 수 있도록 다리 궤적을 평행 이동시키는 방법으로서 걸음새의 속도와 다리 움직임 순서에는 영향을 미치지 않으면서 고장 난 다리를 계속 보행에 이용할 수 있게 한다. 마지막으로 본 논문에서는 제안된 내고장성 걸음새 계획의 효용성을 보이기 위하여 표준 세다리 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로

봇이 내고장성 주기 세다리 걸음새로 전환하는 사례 연구를 들었다. 육각 보행 로봇은 관절고착고장이 일어난 후 주어진 다리 궤적을 유지하지 못하고 교착 상태에 빠지지만 본 논문에서 제안한 다리 궤적 조정 방법을 이용하여 교착 상태를 성공적으로 극복하고 내고장성 주기 걸음새로 변환할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] C. Carreras and I. D. Walker, "Interval methods for fault-tree analysis in robotics," IEEE Transactions on Reliability, vol. 50, no. 1, pp. 3-11, 2001.  
 [2] 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.  
 [3] 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.  
 [4] S. K. Ralpa and D. K. Pai, "Fault tolerant locomotion for walking robots," in Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 130-137, 1997.  
 [5] Y. J. Lee and S. Hirose, "Three-legged walking for fault-tolerant locomotion of demining quadruped robots," Advanced Robotics, vol. 16, no. 5, pp. 415-426, 2002.  
 [6] 양정민, 노지명, "육각 보행 로봇의 내고장성 세다리 걸음새," 대한전기학회논문지, 제52D권, 제12호, pp. 689-695, 2003.  
 [7] 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.  
 [8] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, Control of Robot Manipulators, Macmillan, NY, 1993.  
 [9] 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.  
 [10] V. R. Kumar and K. J. Waldron, "Adaptive gait control for a walking robot," Journal of Robotic Systems, vol. 6, no. 1, pp. 49-76, 1989.  
 [11] S. M. Song and K. J. Waldron, Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.  
 [12] X. Chen, K. Watanabe, K. Kiguchi and K. Izumi, "A real-time kinematics of the translational crawl motion of a quadruped robot," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 29, no. 2, pp. 111-131, 2000.  
 [13] J. Estremera, E. Garcia, and P. Gonzalez de Santos, "A multi-modal and collaborative human-machine interface for a walking robot," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 35, no. 4, pp. 397-425, 2002.



- [14] 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.
- [15] S. Miao and D. Howard, "Optimal tripod turning gait generation for hexapod walking machines," *Robotica*, vol. 18, pp. 639-649, 2000.
- [16] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 4, pp. 176-182, 1979.
- [17] Y. Ding and E. Scharf, "Deadlock avoidance for a quadruped with free gait," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 143-148, 1994.
- [18] W. Chen, K. H. Low and S. H. Yeo, "Adaptive gait planning for multi-legged robots with an adjustment of center-of-gravity," *Robotica*, vol. 17, pp. 391-403, 1999.
- [19] 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.
- [20] M. A. Jimenez, P. G. de Santos and J. Tabera, "An omnidirectional control algorithm for walking machines based on a wave-crab gait," *Microprocessor Based and Intelligent Systems Engineering*, vol. 18, pp. 355-380, 1999.

저 자 소 개



**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(공학). 2000년 3월~2002년 2월 한국전자통신연구원 네트워크 기술연구소 선임연구원. 2002년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 전임강사. 주 관심분야: 비선형 제어, 통신망 트래픽 제어, 혼잡 제어, 로봇제어, 정보보안 등.  
 Tel : 053-850-2737, Fax : 053-850-2704  
 E-mail : jmnho@cu.ac.kr



**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(공학). 1999년 3월~2001년 2월 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어연구소 선임연구원. 2001년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수. 주 관심분야: 로봇 제어, 보행 로봇 시스템, 컴퓨터 보안 등.  
 Tel : 053-850-2736, Fax : 053-850-2704  
 E-mail : jmyang@cu.ac.kr