

# 관절고착고장에 대한 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새 생성

論 文
54D-3-1

## Fault-Tolerant Gait Generation of Hexapod Robots for Locked Joint Failures

楊 正 敏<sup>†</sup>  
(Jung-Min Yang)

**Abstract** - Fault-tolerant gait generation of a hexapod robot with crab walking is proposed. 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. Due to the reduced workspace of a failed leg, fault-tolerant crab walking has a limitation in the range of heading direction. In this paper, an accessible range of the crab angle is derived for a given configuration of the failed leg and, based on the principles of fault-tolerant gait planning, periodic crab gaits are proposed in which a hexapod robot realizes crab walking after a locked joint failure, having a reasonable stride length and stability margin. The proposed crab walking is then applied to path planning on uneven terrain with positive obstacles. i.e., protruded obstacles which legged robots cannot cross over but have to take a roundabout route to avoid. The robot trajectory should be generated such that the crab angle does not exceed the restricted range caused by a locked joint failure.

**Key Words** : Hexapod Robots, Fault Tolerance, Locked Joint Failure, Crab Gaits, Kinematic Constraint

### 1. 서 론

최근 다각 보행 로봇의 성능이 더욱 강력해지고 정교해짐에 따라 그 응용 범위도 평탄 지형에서의 단순 보행에서 벗어나 점점 더 광범위하게 확대되었고, 인간이 작업하기에는 위험하거나 불가능한 지역에서 대신 일을 해주는 로봇까지 등장하였다[1]-[3]. 이러한 환경에서 작업하는 로봇은 고장을 빨리 발견하고 발생한 고장에 대해서 적절하게 대처하는 능력을 필수적으로 갖추어야 한다. 특히 다각 보행 로봇같이 내고장성 능력이 있는 시스템은 남아 있는 정상적인 부분만을 이용하여 계속 작업을 하도록 하여 파손된 고장을 사람이 직접 고치는 수고를 덜어야 훨씬 효율적으로 사용될 것이다.

저자의 선행연구 [4]에서는 걸음새 연구(gait study)의 틀에서 다각 보행 로봇에 발생하는 관절고착고장(locked joint failure)을 극복하기 위한 내고장성 걸음새 계획을 육각 보행 로봇(hexapod robot)의 경우에 대해서 제안하였다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로써, 외부 작업을 하는 매니플레이터에서 흔히 발생할 수 있는 보편적인 종류의 고장이다[5]. 선행연구의 의의는 다리 고장으로 생기는 로봇 작업 공간의 감소치를 걸음새에 정량적으로 반영하여 내고장성 보행 계획을 세웠다는 것이다. 한편 [6]에서는 완전 직선 보행

(straight-line walking)에서 관절고착고장이 야기하는 교착 상태를 회피할 수 있는 내고장성 걸음새 계획이 제안되었다.

본 논문에서는 관절고착고장에 대한 육각 보행 로봇의 내고장성 게 걸음새(crab gait)를 제안하고 장애물 회피를 위한 내고장성 걸음새 계획을 제시한다. 게 걸음새는 보행 방향이 로봇 몸체의 세로축(longitudinal axis) 방향과 다른 걸음새를 말한다. 게 걸음새는 로봇 몸체의 자세를 바꾸지 않고 경로 진행 방향을 변경할 수 있으므로 회전 걸음새(turning gait)보다 더 효율적이며 장애물 회피를 하는 경로 생성에서 많이 이용된다[7]. 관절고착고장이 발생하면 직선 보행의 경우와 마찬가지로 게 걸음새의 작업 공간은 축소되고 걸음새가 가질 수 있는 게걸음 각도(crab angle)도 한정된 범위로 줄어든다. 본 논문에서는 먼저 고착된 관절의 종류와 고장 난 다리의 자세에 따라서 결정되는 가능한 게걸음 각도의 범위를 구한다. 그런 다음 관절고착고장에 대한 내고장성 걸음새 알고리즘[8]을 바탕으로 주기성을 가지는 내고장성 게 걸음새를 육각 보행 로봇에 대해서 제안하고 걸음새의 보폭(stride length)과 안정여유도(stability margin) 사이의 정량적 관계를 규명한다. 내고장성 직선 보행과 마찬가지로 제안된 게 걸음새 안에서 관절고착고장이 발생한 다리는 전진 스윙(swing)을 하지 않고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적인 이동만 한다. 본 논문에서는 또한 제안된 게 걸음새를 이용하여 관절고착고장이 발생한 육각 보행 로봇이 평탄 지형에 놓여 있는 장애물을 회피하기 위한 걸음새 계획도 제안한다. 내고장성 게 걸음새가 가질 수 있는 게걸음 각도가 한정되어 있기 때문에 로봇은 고착된 관절 각도와 고장 난 다리의 종류를 바탕으로 직선 보행에서 게 걸음새로 전환하는 위치를 결정해야 한다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正 會 員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 助教授 · 工博  
E-mail : jmyang@cu.ac.kr  
接受日字 : 2004年 11月 25日  
最終完了 : 2005年 1月 13日

2. 로봇 모델링 및 가정

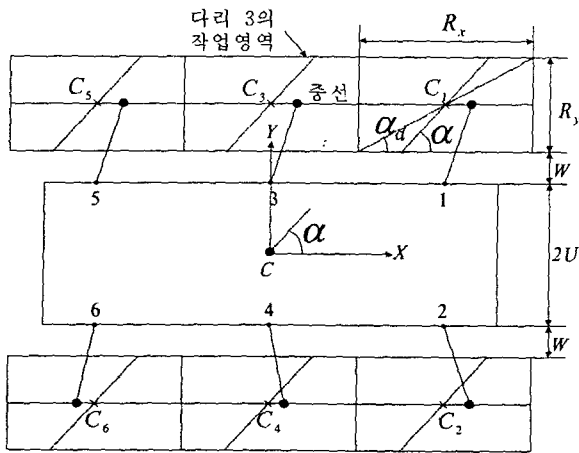


그림 1. 육각 보행 로봇의 이차원 모델.  
Fig. 1. Two-dimensional model of a hexapod robot.

그림 1은 본 논문에서 다루는 육각 보행 로봇의 이차원 모델이다. 로봇 몸체는 너비가  $2U$ 이고 기하학적으로 좌우 대칭인 형태를 가지며 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  $R_x$ ,  $R_y$ 인 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 이등분하는 중선(center line)이  $C_i$ 를 지나간다.  $\alpha$ 는 게걸음 각도이며 로봇 몸체의  $X$ 축과 게 걸음새 방향과의 각도로서 정의된다. 또  $\alpha_d$ 를 작업 영역의 대각선과 아래 경계선이 이루는 각도라고 정의한다.

육각 보행 로봇의 다리는 그림 2와 같이 두 개의 링크(link)로 구성된 팔꿈치형 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.  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의하고 상위 링크와 하위 링크의 길이를 각각  $l_1, l_2$ 로 표시한다. 그림 2의 팔꿈치형 다리는 다리의 발, 즉 말단 장치(end-effector)가 삼차원 운동이 가능하므로 일반적인 다리 모델이라고 말할 수 있다.

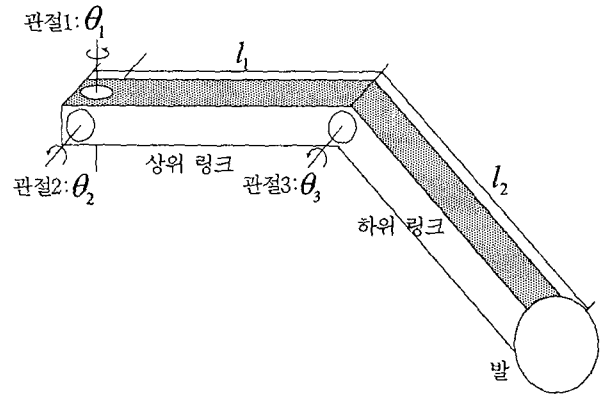


그림 2. 팔꿈치형 다리 모델.  
Fig. 2. Leg model of an articulated-arm type.

본 논문에서는 명확한 문제 설정을 하기 위해서 다음과 같은 걸음새 가정을 세운다.

- 1) 육각 보행 로봇은 게걸음 각도  $\alpha$  ( $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )인 직선 보행을 하며 다리 궤적은 각 다리 작업 영역의 중점을 지난다.
- 2)육각 보행 로봇은 P형 비평탄 지형[9]에서 보행한다.
- 3)로봇 몸체는 지표면과 평행하게 유지되며 보행 중 몸체의 고도(altitude)는 일정하다.
- 4)안정성 판단 시 로봇의 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려하며, 다리의 발은 지표면과 점(point)으로 접촉한다.

가정 1)은 육각 보행 로봇이  $+X$ 축 방향으로 정칙(regular) 전진 보행만을 한다는 의미이다.  $\alpha = 0$ 이면 완전 직선 보행이 되므로 로봇이 가지는 게 걸음새는 직선 보행의 일반화된 형태라고 말할 수 있다. 가정 2)에서 P형 지형은 돌출된 장애물, 즉 보행 로봇의 몸체나 다리가 넘어갈 수 없는 장애물을 포함하는 비평탄 지형을 말한다. P형 지형에서 로봇은 장애물을 피하기 위해 보행 방향을 바꾸어야 하므로 게 걸음새가 필요하다. 가정 4)는 로봇의 기구학적 특성만을 고려하여 걸음새 계획을 세운다는 의미로 기존의 주기 걸음새 연구[10],[11]에서 동일하게 가정된 것으로 실제 보행 실험에서도 허용 가능한 가정이다.

3. 기구학적 구속 조건

본 장에서는 관절고착고장의 특징을 살펴보고 게 걸음새에 대한 관절고착고장의 기구학적 구속 조건을 구한다. 유도 과정에서 사용되는 고장 난 다리는 로봇 몸체의 왼쪽에 부착된 다리, 즉 다리 1, 3, 5 중의 하나라고 가정한다. 몸체의 오른쪽에 부착된 다리에 대한 구속 조건은 아래의 결과를 응용하여 쉽게 유도될 수 있다.

3.1 관절고착고장

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도(degree of freedom)

가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다. 하지만 관절고착고장에서는 관절 하나가 특정 각도로 고정되기 때문에 자유회전고장(free-swinging failure)[12] 같은 관절의 지지 능력까지 없애는 고장과는 달리 로봇의 몸체를 지탱하는 능력은 계속 유지된다. 고장 난 다리를 보행에 이용하기 위해서는 고착된 관절의 종류에 따라 결정되는 다리의 운동 특성과 착지 가능 영역의 변화를 알아야 한다.

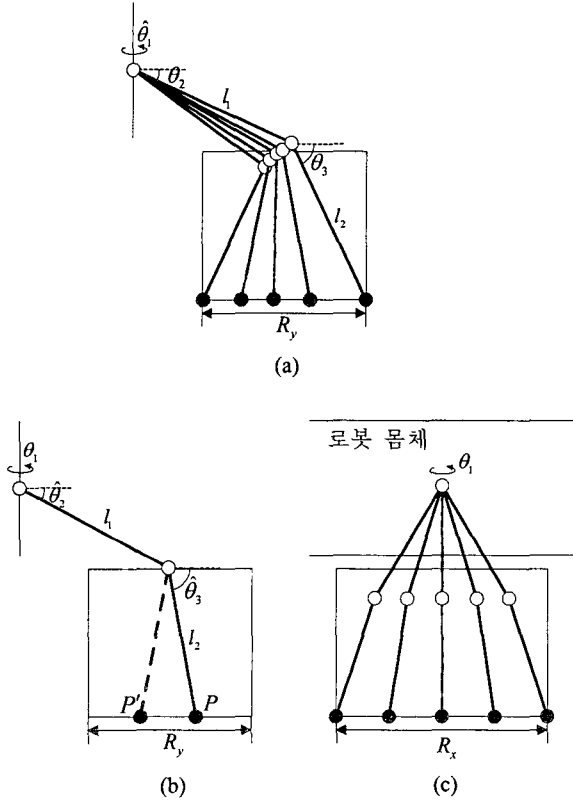


그림 3. 관절고착고장. (a) 관절 1의 고장(측면도), (b) 관절 2(관절 3)의 고장(측면도), (c) 관절 2(관절 3)의 고장(정면도)

Fig.3. Locked joint failure. (a) lateral view of locked failure at joint 1, (b) lateral view of locked failure at joint 2 (or joint 3), (c) front view of locked failure at joint 2 (or joint 3).

그림 3은 그림 2의 구조로 된 다리가 관절고착고장이 일어난 후 나타내는 운동 특성을 도시한 것이다. 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 링크 두 개가 만드는 평면상으로 국한되며 착지 가능 영역은 그림 3(a)와 같이 작업 영역 내에서 Y축 방향으로 놓여진 직선이 된다. 그림에서  $\theta_1$ 은 관절 1이 고착된 위치이고  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 는 착지점에 따라서 결정된다. 그림 3(b)와 (c)는 관절 2 또는 관절 3에 고착고장이 발생했을 때의 운동 특성을 나타낸 것이다. 관절 2 또는 관절 3에 고착고장이 발생하면 다리는 회전 관절 두 개로 이루어진 단일 링크 매니퓰레이터의 특성을 보인다. 또한 로봇 몸체의 고도가 일정하

다고 가정하였으므로 두 개의 관절 중 하나가 고착되면 다리가 착지했을 때 가질 수 있는 나머지 관절의 위치도 유일하게 결정된다. 예를 들어 그림 3(b)에서 관절 2가 각도  $\hat{\theta}_2$ 에서 고착되어 다리가 P 지점에 착지한다고 가정하자. 기구학적으로는 다리가 P' 지점에도 착지할 수 있지만 로봇 몸체의 고도가 일정하다고 했으므로 불가능하다. 따라서 관절 3의 위치는  $\hat{\theta}_3$ 로 고정되고 다리는 관절 1의 값을 바꾸면서 그림 3(c)과 같은 운동 특성을 보인다.

3.2 관절 1의 교착

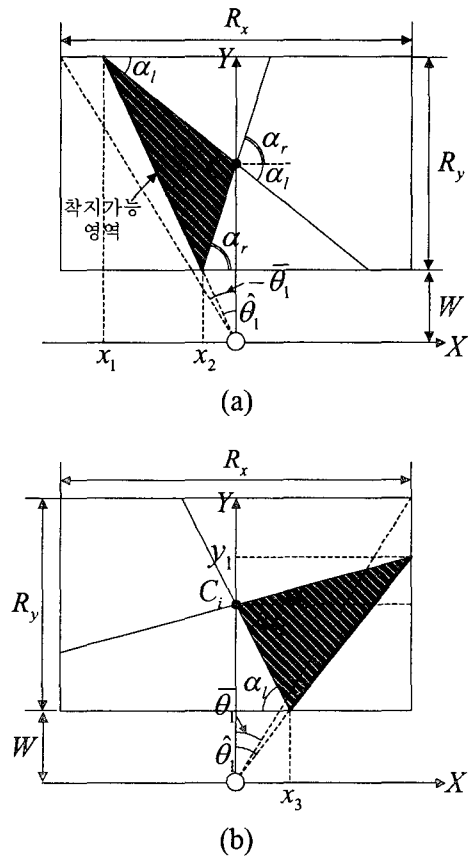


그림 4. 관절 1이 고착되었을 때의 기구학적 구속 조건. (a)  $\hat{\theta}_1 < 0$ , (b)  $\hat{\theta}_1 \geq 0$ .

Fig.4. Kinematic constraint for locked failure at joint one. (a)  $\hat{\theta}_1 < 0$  and (b)  $\hat{\theta}_1 \geq 0$ .

선행 연구[6]에서는 완전 직선 보행을 하는 로봇이 교착 상태에 빠지지 않고 보행을 계속할 수 있도록 하는 관절고착고장의 기구학적 구속 조건을 규명하였다. 본 논문에서는 일반적인 계 걸음새에 대한 기구학적 구속 조건을 알아보고 관절 각도에 따라서 로봇이 가질 수 있는 계걸음 각도의 범위를 구한다. 그림 4는 관절 1이 고착되었을 때 생기는 계 걸음새에 대한 기구학적 구속 조건을 그린 것이다. 작업 영역의 수직 이동분선을 기준으로 해서 시계 방향으로 관절 1의 각도를 측정한다고 할 때 그림 4(a)는  $\hat{\theta}_1 < 0$ , 그림

4(b)는  $\hat{\theta}_1 \geq 0$ 인 경우를 나타낸다. 관절 1이 각도  $\hat{\theta}_1$ 에서 고착되었을 때 줄어든 착지 가능 영역은 그림 3에서 설명한 바와 같이 작업 영역의 위아래를 가로지르는 직선이 된다. 고장 발생 후 로봇이 게 걸음새로 걷기 위해서는 다리의 궤적이 착지 가능 영역을 통과해야 하므로 게걸음 각도는 그림 4에서 음영으로 표시된 영역 내부에 존재해야 한다. 따라서 게걸음 각도  $\alpha$ 가 만족시켜야 하는 기구학적 구속 조건은 다음과 같다.

$$\alpha_l \leq \alpha \leq \alpha_r \quad (1)$$

작업 영역이 직사각형이므로  $\hat{\theta}_1$ 과  $\bar{\theta}$ 과의 상대적 크기 여부에 따라서  $\alpha_l$ 과  $\alpha_r$ 이 다르게 표현된다.  $\bar{\theta}$ 는 착지 가능 영역이 작업 영역의 모서리를 지나는 경우에 해당하는 관절 1의 고착 각도이다.

i)  $|\hat{\theta}_1| < |\bar{\theta}|$

관절 각도가 이 범위 안에 있으면 착지 가능 영역이 작업 영역의 위 경계와 만난다. 이 경우 그림 4(a)에 나타나 있듯이  $\alpha_l$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_y}{2x_1}\right)$$

$x_1 = (R_y + W)\tan\hat{\theta}_1$ 로 구할 수 있으므로  $\alpha_l$ 을 로봇 매개 변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_y}{2(R_y + W)\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (2)$$

$\alpha_r$ 도  $\alpha_l$ 과 마찬가지로

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{R_y}{2x_2}\right)$$

로 표현되고  $x_2 = W\tan\hat{\theta}_1$ 로 구해지므로 다음과 같은 형태로 나타내어진다.

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{R_y}{2W\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 모두  $\hat{\theta}_1 > -\bar{\theta}$ 일 때 구한 식들이므로  $\hat{\theta}_1 < \bar{\theta}$ 인 경우는 대칭성에 의해서 다음과 같이 간단하게 유도된다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_y}{2W\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (\hat{\theta}_1 < \bar{\theta}) \quad (4)$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{R_y}{2(R_y + W)\tan\hat{\theta}_1}\right)$$

ii)  $|\hat{\theta}_1| \geq |\bar{\theta}|$

관절 각도가 이 범위 안에 있으면 착지 가능 영역은 작업 영역의 옆 경계와 만난다. 그림 4(b)로부터  $\alpha_l$ 과  $\alpha_r$ 을 각각 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_y}{2x_3}\right)$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{y_1 - (R_y/2 + W)}{R_x/2}\right)$$

그림 4(b)에서  $x_3$ 와  $y_1$ 은 각각

$$x_3 = W\tan\hat{\theta}_1$$

$$y_1 = \frac{R_x}{2\tan\hat{\theta}_1}$$

와 같이 유도되므로 로봇의 매개 변수로  $\alpha_l$ 과  $\alpha_r$ 을 나타내면 아래와 같다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_y}{2W\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (\hat{\theta}_1 \geq \bar{\theta}) \quad (5)$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{R_x - (R_y + 2W)\tan\hat{\theta}_1}{R_x\tan\hat{\theta}_1}\right)$$

앞의 경우와 마찬가지로 대칭성을 이용하여  $\hat{\theta}_1 \leq -\bar{\theta}$ 일 때의  $\alpha_l$ 과  $\alpha_r$ 의 공식을 구하면 다음과 같다.

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{R_x - (R_y + 2W)\tan\hat{\theta}_1}{R_x\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (\hat{\theta}_1 \leq -\bar{\theta})$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{R_y}{2W\tan\hat{\theta}_1}\right) \quad (6)$$

### 3.3 관절 2, 관절 3의 교차

그림 3에서 고찰한 바와 같이 관절 2 또는 관절 3에 관절 고착고장이 발생하면 관절 1에 의한 다리의 전후 운동은 가능하지만 로봇 몸체 좌표계의  $\pm Y$ 축 방향으로의 이동은 불가능하다. 따라서 작업 영역에 투영된 다리의 착지 가능 영역은 원호(arc) 모양이 된다. 그림 5는 관절 2 또는 관절 3이 고착되었을 때 생기는 게 걸음새에 대한 기구학적 구속 조건을 그린 것이다. 착지 가능 영역이 원호 모양이므로 원호 반지름  $r$ 의 크기에 따라서 기구학적 구속 조건이 다르게 표현된다.

i)  $r < R_y/2 + W$

$r$ 이 위와 같은 범위에 있을 때는 착지 가능 영역이 작업 영역 중점  $C_i$ 를 감싸지 못한다. 따라서 게 걸음새의 다리 궤적이 착지 가능 영역과 교차하기 위해서는 그림 5(a)에 음영으로 표시된 영역 내에 게걸음 각도가 존재해야 하므로 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\alpha \leq \alpha_b, \alpha \geq \alpha_r \quad (7)$$

그림 5(a)로부터  $\alpha_l$ 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\alpha_l = -\arccos\left(\frac{r}{R_y/2 + W}\right)$$

$r$ 은 이차원 평면에 투영된 로봇 몸체의 접점과 다리 착지

점 사이의 길이이므로 아래와 같이 계산된다.

$$r = l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \hat{\theta}_3.$$

위 식을 대입해서  $\alpha_l$ 을 다시 쓰면

$$\alpha_l = -\arccos\left(\frac{l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \hat{\theta}_3}{R_y/2 + W}\right) \quad (8)$$

와 같다. 한편 착지 가능 영역이 작업 영역의 중심에서 대칭인 원호 모양이므로  $\alpha_r$ 은  $\alpha_l$ 과 절대값이 같고 부호만 다른 값이다.

$$\alpha_r = \arccos\left(\frac{l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \hat{\theta}_3}{R_y/2 + W}\right). \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 (7)에 대입하면  $r < R_y/2 + W$ 일 때 생기는 계걸음 각도에 대한 기구학적 구속 조건이 완성된다.

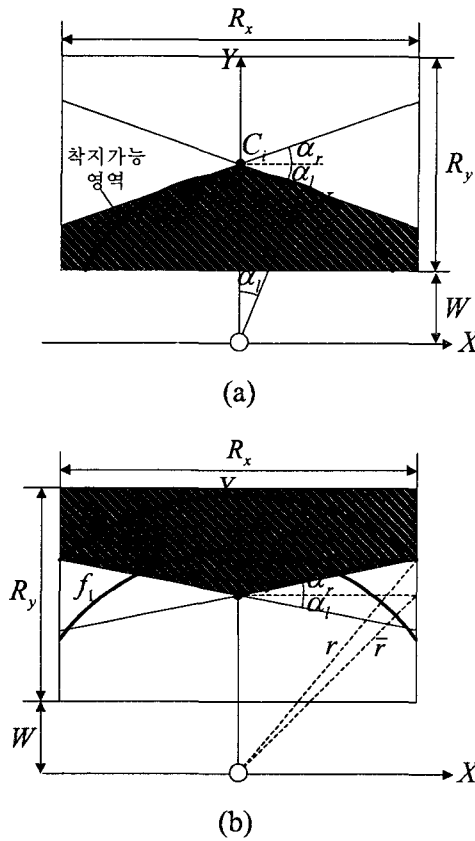


그림 5. 관절 2 또는 관절 3이 고착되었을 때의 기구학적 구속 조건. (a)  $r < R_y/2 + W$ , (b)  $r \geq R_y/2 + W$ .

Fig. 5. Kinematic constraint for locked failure at joint two or three. (a)  $r < R_y/2 + W$  and (b)  $r \geq R_y/2 + W$ .

$$\alpha_l = -\arctan\left(\frac{\sqrt{4(l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \sin \hat{\theta}_3)^2 - R_x^2} - (R_y + 2W)}{R_x}\right) \quad (\bar{r} \leq r), \quad (12)$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{\sqrt{4(l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \sin \hat{\theta}_3)^2 - R_x^2} - (R_y + 2W)}{R_x}\right)$$

$$ii) R_y/2 + W \leq r < \bar{r}$$

$\bar{r}$ 는 그림 5(b)에 명기된 대로 이차원 평면에 투영된 다리 와 로봇 몸체의 접점(junction)으로부터 작업 영역 앞 경계 점까지의 거리를 가리킨다.  $r$ 이 위와 같은 범위에 존재할 때는 가장 보편적인 경우로서 계걸음 각도에 상관없이 다리 궤적과 착지 가능 영역 사이에 교점이 존재하므로 육각 보행 로봇은 임의의 계걸음 각도  $\alpha$  ( $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )를 가질 수 있다. 그림 5(b)의  $f_1$ 이 이 범위에 속하는 착지 가능 영역의 한 예이다.

$$iii) \bar{r} \leq r$$

$r$ 이  $\bar{r}$ 보다 큰 경우에는 착지 가능 영역이 그림 5(b)의  $f_2$ 와 같이 그려지고 그림에서 음영으로 표시된 영역 내에 계걸음 각도가 존재해야 고장 난 다리가 착지할 수 있는 지점을 찾을 수 있다. 따라서 기구학적 구속 조건은 식 (7)과 동일하게 구해진다. 또한 그림 5(b)에서  $\alpha_r$ 은

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{y_1 - (R_y/2 + W)}{R_x/2}\right) \quad (10)$$

와 같이 표현되고  $y_1$ 은 아래와 같이 유도된다.

$$y_1 = \sqrt{r^2 - (R_x/2)^2} = \sqrt{(l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \hat{\theta}_3)^2 - (R_x/2)^2} \quad (11)$$

앞의 경우와 마찬가지로  $\alpha_l$ 은  $\alpha_r$ 과 절대값이 같고 부호만 다른 값이다. 따라서 식 (10)과 (11)을 이용하여  $\alpha_l$ 과  $\alpha_r$ 을 구하면 식 (12)와 같이 나온다.

#### 4. 내고장성 계 걸음새

본 장에서는 선행연구의 결과를 확장하여 주기적인 내고장성 계 걸음새를 제안하고 그 성능을 분석한다. 선행연구와 마찬가지로 계 걸음새는 세 개의 다리가 항상 지지 상태에 있는 세다리 걸음새(tripod gait)를 가진다고 가정한다. [4]에서 제안한 관절고착고장에 대한 내고장성 세다리 걸음새 계획은 다음과 같다.

- 1) 관절고착고장이 발견되면 육각 보행 로봇은 몸체의 이동을 멈춘다.
- 2) 고장 난 다리가 이동 상태에 있으면 현재 자세에서 가능한 착지점을 찾아 착지한다.
- 3) 고장 난 다리를 제외한 다리들 중 세 개의 다리가 이동

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

- 4) 3)에서 이동한 다리가 착지한 후 고장 난 다리를 포함한 나머지 세 개의 다리가 이륙한 후 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 이동한다. 3)과 마찬가지로 이동 시 걸음새의 안정여유도가 보장되어야 한다.

위 걸음새 계획 중 3)과 4)의 동작은 관절고착고장이 일어난 다리가 로봇 몸체에 대해서 전·후진 스윙(swing) 동작을 취하지 않는다는 제한 조건에서 나온 것들이다. 즉 관절고착고장이 발생하면 고장 난 다리는 삼차원 운동을 하지 못하기 때문에 몸체의 직선 이동에 따라 현재 착지점을 그대로 유지하기가 불가능하다[5],[8]. 따라서 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 동안에는 로봇 몸체가 정지해 있다가 고장 난 다리가 이륙한 후에만 로봇 몸체의 이동에 따라 수동적으로 움직이는 방법으로 내고장성을 구현한다.

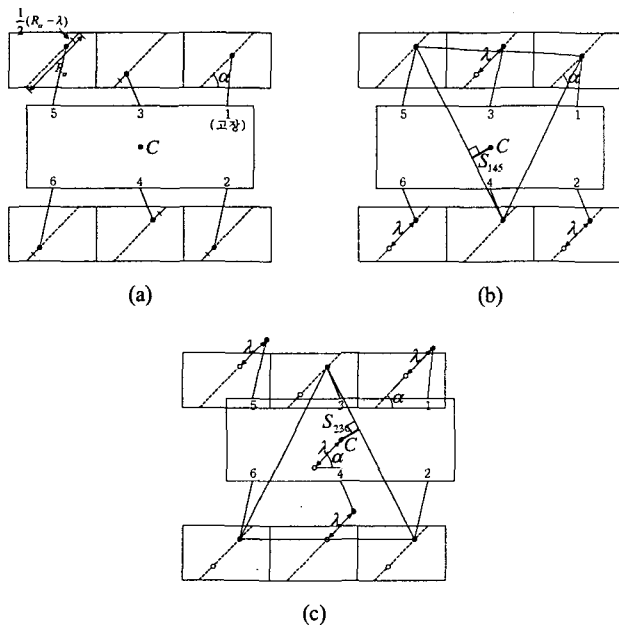


그림 6. 내고장성 주기 게 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이동(로봇 몸체 이동).

Fig. 6. Fault-tolerant periodic crab gait. (a) initial state, (b) swing legs 2, 3 and 6 and (c) swing legs 1, 4 and 5 with body moving.

주기 게 걸음새(periodic crab gait)도 위와 같은 내고장성 세다리 걸음새 계획을 이용하여 구할 수 있다. 하지만 완전 직선 보행과는 달리 로봇이 게걸음 각도를 가지면서 보행해야 하므로 각 다리의 착지점과 안정여유도 등은 달라진다. 그림 6은 관절고착고장이 다리 1에 발생한 후 로봇이 가지는 세다리 게 걸음새의 한 주기 동안의 모습을 나타낸 것이다. 다른 다리에 발생한 고장에 대한 걸음새는 대칭성을 이용하여 그림 6으로부터 쉽게 유도할 수 있다. 게걸음 각도  $\alpha$ 는 앞 장에서 구한 기구학적 구속 조건을 만족시켜야 한다. 그림 6(a)의 초기 상태에서 다리 2, 다리 3, 다리 6은 작

업 영역의 아래 경계점으로부터 다리 궤적 위에서  $(R_\alpha - \lambda)/2$ 만큼 떨어진 지점에 착지해 있고, 다리 4와 다리 5는 작업 영역의 위 경계점으로부터  $(R_\alpha - \lambda)/2$ 만큼 떨어진 지점에 착지해 있다.  $R_\alpha$ 는 작업 영역 내에서 게걸음 각도  $\alpha$ 를 가지는 다리 궤적의 길이로서  $\alpha$ 에 따라서 다음과 같은 값을 가진다.

$$R_\alpha = \begin{cases} \frac{R_y}{\sin\alpha} & \alpha_d < \alpha \leq 90^\circ \\ \frac{R_x}{\cos\alpha} & 0 \leq \alpha \leq \alpha_d \end{cases}$$

$\lambda$ 는 걸음새가 한 주기 동안 걷는 보폭(stride length)이다. 고장 난 다리가 수동적인 이동만을 하기 때문에 내고장성 게 걸음새의 보폭은  $R_\alpha$ 를 넘을 수 없고  $\lambda$ 의 범위는  $0 < \lambda \leq R_\alpha$ 이 된다. 세다리 걸음새의 표준 다리 이동 순서 [13]에 따라서 먼저 다리 2, 다리 3, 다리 6이 동시에 이륙한 후  $\lambda$ 만큼 이동한다(그림 6(b)). 그런 다음 다리 1, 다리 4, 다리 5가 이륙하여 역시  $\lambda$ 만큼 이동한 후 착지한다(그림 6(c)). 내고장성 걸음새 계획에 따라서 그림 6(b)에서는 몸체의 움직임이 없어야 하며 그림 6(c)에서 고장 난 다리 1은 전진 스윙을 하지 않고 몸체에 따라서 수동적으로 이동해야 한다. 그림 6(c)에서 로봇 몸체가 움직이므로 작업 영역도 함께 이동해야 하나 걸음새의 한 주기 경과를 명확하게 도시하기 위해서 작업 영역의 위치를 고정시켜 그렸다. 그림 6(b)와 (c)에서 일점쇄선으로 그려진 삼각형은 세 다리가 이동 상태에 있을 때 얻어지는 지지 다각형(support pattern)이다. 주기 걸음새의 안정여유도는 한 주기 동안 얻어지는 지지 다각형과 무게 중심과의 거리의 최소값으로 정의되므로 그림 6(b)의  $S_{145}$ 와 그림 6(c)의  $S_{236}$  중 더 작은 값으로 결정된다. 하지만  $S_{145}$ 와  $S_{236}$ 은 같은 값이므로 보폭  $\lambda$ 인 내고장성 게 걸음새의 안정여유도는 아래와 같이 유도된다(부록 참조).

$$S = \left( \frac{R_x}{2} - \frac{\lambda}{2} \left( \cos\alpha + \frac{R_x}{R_x + 2W + 2U} \sin\alpha \right) \right) \times \frac{R_y + 2W + 2U}{\sqrt{(R_y + 2W + 2U)^2 + R_x^2}} \tag{13}$$

위 식에서  $\alpha = 0$ 이고 걸음새가 최대 보폭을 가진다고 하면  $\lambda = R_\alpha|_{\alpha=0} = R_x$ 이므로  $S = 0$ 이 된다. 이 결과는 내고장성 완전 직선 보행에서 최대 보폭을 가질 때 걸음새가 임계 안정여유도(marginal stability margin)를 가진다는 기존의 결과[4]와 일치한다. 또 식 (13)에서  $\alpha > 0$ 이면  $S$ 는 항상 양의 값을 가지므로 내고장성 게 걸음새가 완전 직선 보행보다 안정여유도면에서 더 우수하다는 사실을 알 수 있다.

그림 6(a)~(c)의 걸음새 사이에 시간 지연이 하나도 없다고 가정하면 제안된 내고장성 게 걸음새도 완전 직선 걸음새와 마찬가지로 1/2의 디듀티(duty factor)를 가진다. 즉 내고장성 게 걸음새는 내고장성 완전 직선 보행의 걸음새의

이동 성능을 그대로 유지한다. 또 식 (13)에서 알 수 있듯이 안정여유도는 보폭과 상관없이 항상 양의 값이고 고장 난 다리의 착지점과 상관없이 결정되므로 제안된 게 걸음새는 내고장성 보행에 안정적으로 적용될 수 있다.

5. 장애물 회피

본 장에서는 제안된 게 걸음새를 이용하여 관절고착고장이 일어난 육각 보행 로봇이 장애물을 회피하는 걸음새 계획을 제안한다. 2장에서 설정한 대로 로봇이 보행하는 지형은 넘을 수 없는 장애물이 존재하는 비평탄 지형이며 다리 1에 관절고착고장이 발생한 상태이다. 육각 보행 로봇은 다음과 같은 원칙을 가지고 보행을 한다고 설정한다.

- 1) 장애물이 없으면 +X축 방향으로 완전 직선 보행을 하고 장애물을 만나면 게 걸음새로 방향 전환을 한다.
- 2) 장애물과 충돌하지 않으면서 장애물과 가장 가까운 경로로 보행해야 한다.

2)번 원칙을 설정한 근거는 로봇이 장애물과 가장 가깝게 보행하면 다른 장애물을 회피할 수 있는 공간적 여지가 더 많이 생겨서 효율적이라는 데 있다. 고장이 일어나지 않은 정상적인 상태에서 2번 원칙대로 걸음새 계획을 세우면 육각 보행 로봇은 충돌하지 않는 범위 내에서 장애물의 최대 근접 지점까지 직선 보행을 한 후 방향 전환을 해서 장애물 주위를 보행해야 한다. 하지만 다리 하나가 관절고착고장을 일으켰기 때문에 3장에서 규명한 바와 같이 로봇은 기구학적 구속 조건을 가지고 한정된 게 걸음 각도만으로 보행할 수 있다. 고장 난 관절의 종류에 따라서 기구학적 구속 조건이 달라지기 때문에 본 논문에서도 고착된 관절의 종류에 따라서 각각 다른 장애물 회피 걸음새 계획을 세운다.

5.1 관절 1의 교착

다리 1에 관절고착고장이 일어난 육각 보행 로봇이 그림 7과 같이 장애물 앞을 보행하고 있다고 가정하자. 장애물은 편의상 직사각형 모양이라고 정하고 로봇의 초기 위치 ①로부터 +X축 방향으로  $x_0$ 만큼 떨어져 있으며, +Y축 방향으로 폭이  $y_0$ , -Y축 방향으로 폭이 무한대라고 가정한다. 즉 로봇은 장애물을 피하기 위해서 양의 게 걸음 각도를 가지면서 +Y축 쪽으로 방향 전환을 해야 한다. 또 로봇이 장애물과 충돌하지 않으려면 다리의 작업 영역이 장애물과 겹치면 안 되기 때문에 ①에서 굵은 실선으로 표시된 작업 영역 외곽을 연결한 사각형이 장애물 영역을 침범하지 않도록 걸음새 계획을 세워야 한다.

관절 1이 교착되면 육각 보행 로봇은 식 (1)의 범위 안에서 게 걸음 각도를 정해야 한다. 또 장애물과 가장 가까운 경로로 보행한다는 원칙을 지키려면 로봇은 장애물에 가장 가까이 다가간 후 게 걸음 각도를 최대한 크게 해서 방향 전환을 해야 하므로 그림 7에 표시된 위치 ①까지 완전 직선 보행을 하고 ①에서  $\alpha_r$ 의 각도로 게 걸음새를 시작하여 ②→③→④의 경로를 취한다. 이때 위치 ①은 다음과 같이 결정된다. 먼저 장애물의 좌상 꼭지점에서 X축과 각도  $\alpha_r$ 을 가지도록 직선을 그어 X축과의 교점을  $x_s'$ 라 하고 로봇의 무게 중심이  $x_s'$ 에 놓이는 위치를 ①'라 하자. 작업 영역 사각형이 장애물 영역과 겹치지 않도록 로봇이 ①'에서 왼쪽으로 평행 이동해야 하는 거리를  $d$ 라고 하면 위치 ①의 좌표  $x_s$ 는  $x_s = x_s' - d$ 로 결정된다. 그림 7에서  $x_s'$ 를 장애물 좌표와 로봇 매개 변수로 표시하면 다음과 같다.

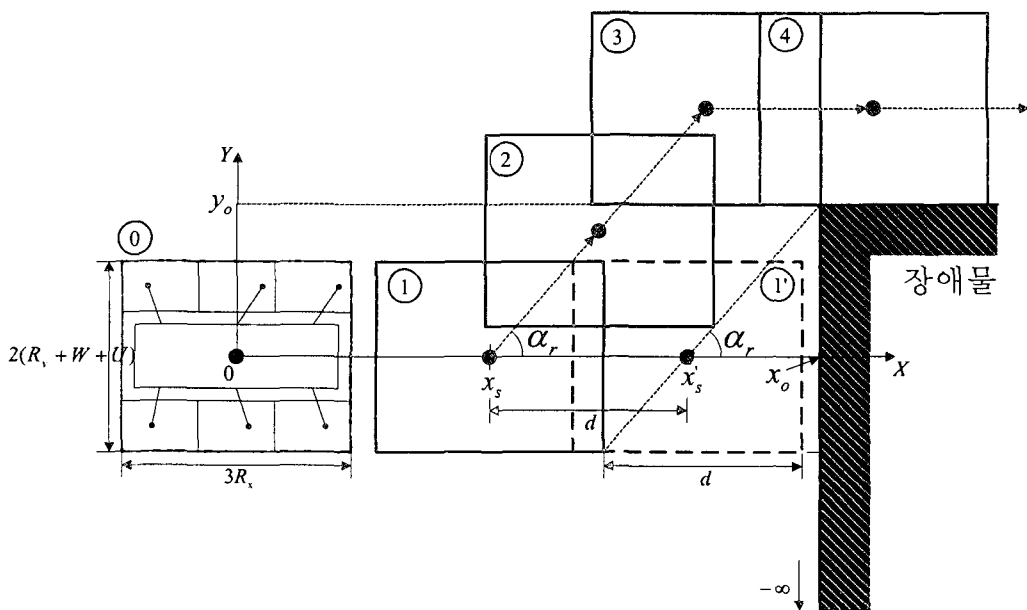


그림 7. 관절 1이 고장 난 경우의 장애물 회피 걸음새 계획.

Fig. 7. Gait planning for obstacle avoidance with locked failure at joint 1.

$$x_s = x_o - \frac{y_o}{\tan\alpha_r}$$

또  $d$ 를 구하면 아래와 같다.

$$d = \frac{R_y + W + U}{\tan\alpha_r} + \frac{3R_x}{2}$$

따라서 장애물 좌표가 주어졌을 때 게 걸음새를 시작하는 위치  $x_s$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$x_s = x_o - \left( \frac{y_o + R_y + W + U}{\tan\alpha_r} + \frac{3R_x}{2} \right)$$

### 5.2 관절 2, 관절 3의 교착

그림 5와 식 (7)에서 알 수 있듯이 관절 2(또는 관절 3)가 고장 났을 때에는 게걸음 각도를 자유롭게 잡을 수 있거나 직각으로 방향 전환을 할 수 있다. 따라서 P형 지형에서 육각 보행 로봇은 그림 8과 같이 장애물에 최대한으로 근접한 후(위치 ①) 각도  $90^\circ$ 의 게 걸음새를 시작하여 장애물을 피하고(위치 ②) 다시  $-90^\circ$ 로 전환하여 보행을 계속한다. 따라서 관절 2(관절 3)의 고장이 관절 1의 고장보다 X축 방향에 놓여진 장애물을 회피하는 데 더 유리하다고 말할 수 있다. 하지만 관절 2(관절 3)의 고장은 각도  $0^\circ$ 인 게 걸음새, 즉 완전 직선 보행을 하지 못하게 되는 특이성(singularity)이 생길 수 있으므로(3.3절 i, iii) 참조) 일반적인 내고장성 측면에서는 관절 1의 고장보다 더 좋지 않다.

본 논문에서 제안된 장애물 하나에 대한 걸음새 계획은 복수 개의 장애물이 존재하는 일반적인 P형 지형에서의 내고장성 걸음새 계획으로 확장될 수 있다. 비평탄 지형 보행을 위한 기존의 경로 생성 방법[7],[14]과 지형 평가 방법(terrain evaluation)[15] 등은 본 논문에서 제시한 기구학적 구속 조건을 고려하는 걸음새 계획을 결합하면 내고장성 보

행을 위한 경로 계획법으로 응용될 수 있을 것이다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 관절고착고장을 위한 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새의 확장으로서 내고장성 게 걸음새를 제안하였다. 제안된 내고장성 게 걸음새는 완전 직선 걸음새와 마찬가지로 고장 난 다리의 작업 영역이 줄어들어 이동성에 심각한 손실을 입으며 특히 고장 난 다리의 자세에 따라서 구현 가능한 게걸음 각도가 제한된다. 본 논문에서는 먼저 이러한 게걸음 각도의 제한 범위를 해석적 방법으로 구한 다음 주기적인 내고장성 게 걸음새를 제안하였다. 제안된 주기 게 걸음새는 완전 직선 걸음새와 동일한 다리 이동 순서를 가지나 게 걸음새의 특성에 따른 보폭과 안정여유도 공식을 가진다. 마지막으로 제안된 게 걸음새를 적용하여 관절고착고장이 발생한 육각 보행 로봇의 장애물 회피 걸음새 계획도 제시하였다. 내고장성 게 걸음새가 가질 수 있는 게걸음 각도가 한정되어 있기 때문에 로봇은 고착된 관절 각도와 고장 난 다리의 종류에 따라서 완전 직선 보행에서 게 걸음새로 전환하는 위치를 결정해야 한다. 본 논문에서는 고장이 발생한 관절의 위치에 따라서 장애물을 회피하는 내고장성 걸음새 계획을 각각 제시하고 그 장단점을 분석하였다.

본 논문에서 제안된 장애물 회피를 위한 내고장성 걸음새 계획은 모두 건널 수 없는 장애물만이 존재하는 비평탄 지형에 대해서 제안된 것이다. 보행 로봇이 디딜 수는 없으나 건널 수 있는 착지 금지 구역(forbidden area)이 존재하는 일반적인 비평탄 지형에 대한 내고장성 걸음새 계획을 구하는 문제가 추후 연구 대상으로 남아 있다.

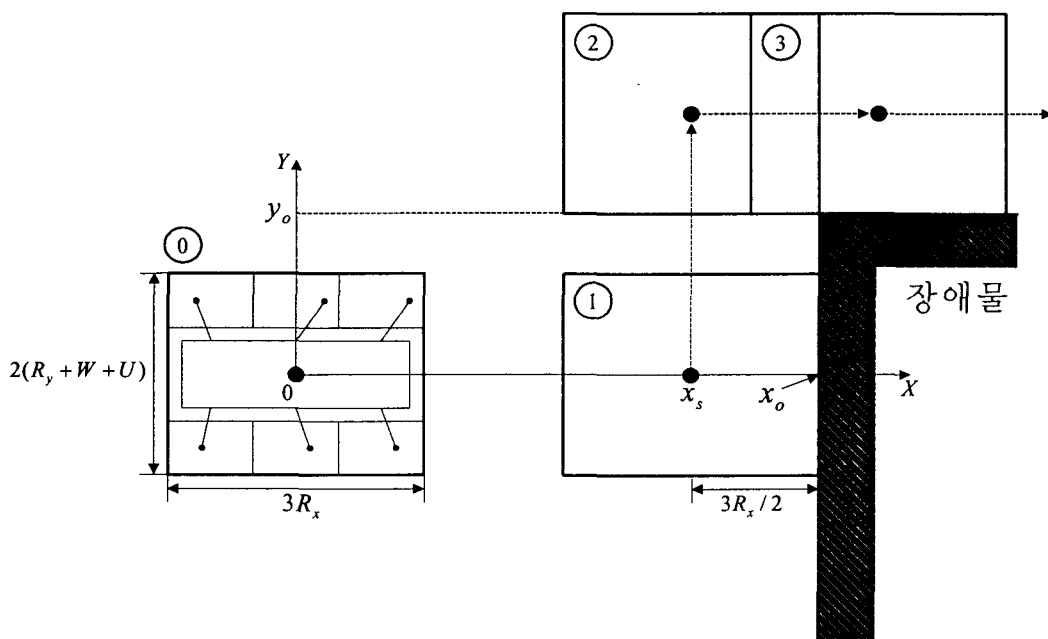


그림 8. 관절 2(관절 3)가 고장 난 경우의 장애물 회피 걸음새 계획.

Fig. 8. Gait planning for obstacle avoidance with locked failure at joint 2 (or joint 3).



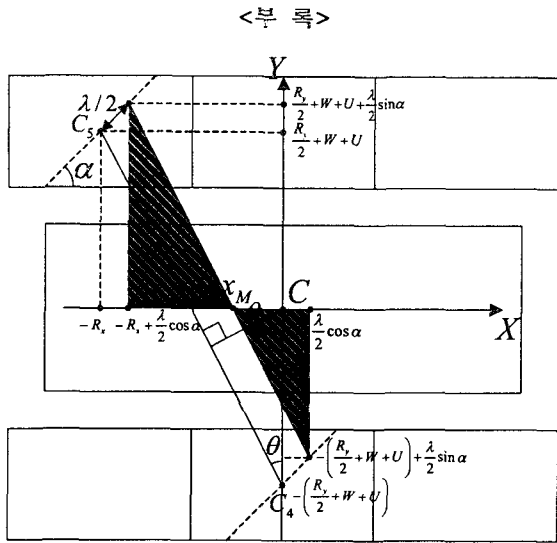


그림 9. 안정여유도.  
Fig. 9. Stability margin.

그림 6에서 제안된 내고장성 주기 계 걸음새의 안정여유도를 구한다. 그림 9는 그림 6(b)의 걸음새 상태를 다리 4와 다리 5의 착지점 좌표들을 삽입하여 다시 그린 것이다. 다리 4와 다리 5의 착지점들이 이루는 지지 다각형 변과 몸체 좌표계 X축과의 교점을  $-x_M$ 이라 하면 안정여유도  $S_{145}$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$S_{145} = x_M \cos \theta. \quad (14)$$

위 식에서  $\theta$ 는  $C_4$ 와  $C_5$ 를 연결한 직선과 Y축이 이루는 각도와 동일하므로 다음과 같이 유도된다.

$$\theta = \arctan \left( \frac{R_x}{R_y + 2W + 2U} \right). \quad (15)$$

$x_M$ 은 그림 9에서 음영으로 표시된 두 직각삼각형의 비례 관계로부터 구한다. 두 직각삼각형의 높이와 밑변의 비를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{R_x - \lambda/2 \cos \alpha - x_M}{R_y/2 + W + U + \lambda/2 \sin \alpha} = \frac{\lambda/2 \cos \alpha + x_M}{R_y/2 + W + U - \lambda/2 \sin \alpha}$$

위 식을 정리해서  $x_M$ 을 구하면 아래와 같다.

$$x_M = \frac{R_x}{2} - \frac{\lambda}{2} \left( \cos \alpha + \frac{R_x}{R_x + 2W + 2U} \sin \alpha \right) \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 (14)에 대입하면 아래와 같은 안정여유도 공식이 유도된다.

$$S = \left( \frac{R_x}{2} - \frac{\lambda}{2} \left( \cos \alpha + \frac{R_x}{R_x + 2W + 2U} \sin \alpha \right) \right) \times \frac{R_y + 2W + 2U}{\sqrt{(R_y + 2W + 2U)^2 + R_x^2}}$$

그림 6(c)에서 표시된  $S_{236}$ 을 구해도 위 식과 동일한 결과가 나온다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00148).

참고 문헌

- [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] R. Washington, K. Golden, J. Bresina, D. E. Smith, C. Anderson and T. Smith, "Autonomous rovers for mars exploration," in Proceedings of IEEE Aerospace Conference, pp. 237-251, 1999.
- [4] 양정민, 노지명, "육각 보행 로봇의 내고장성 세다리 걸음새," 대한전기학회논문지, 제52D권, 제12호, pp. 689-695, 2003.
- [5] 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.
- [6] 노지명, 양정민, "교착 회피를 고려한 내고장성 세다리 걸음새," 대한전기학회논문지, 제53D권, 제8호, pp. 585-593, 2004.
- [7] J. K. Lee and S. M. Song, "Path planning and gait of walking machine in an obstacle-strewn environment," Journal of Robotic Systems, vol. 8, no. 6, pp. 801-827, 1991.
- [8] 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, 2003.
- [9] S. Hirose and O. Kunieda, "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," International Journal of Robotics Research, vol. 3, no. 2, pp. 113-133, 1984.
- [10] S. M. Song and K. J. Waldron, Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
- [11] 이연정, 비평탄 지형에서 사각 보행 로봇의 계걸음새 제어 및 경로 계획에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 2월, 1994년.
- [12] 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.
- [13] R. D. Quinn, J. T. Offi, D. A. Kingsley and R. E. Ritzmann, "Improved mobility through abstracted biological principles," in Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 2652-2657, 2002.

- [14] C.-H. Chen, V. Kumar and Y.-C. Luo, "Motion planning of walking robots using ordinal optimization," IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 22-32, 1998.
- [15] S. Bai and K. H. Low, "Terrain evaluation and its application to path planning for walking machines," Advanced Robotics, vol. 15, no. 7, pp. 729-748, 2001.

## 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