논문 2005-42SC-3-1

다리 궤적을 조정하는 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새

(Fault Tolerant Gaits of a Hexapod Robot with a Foot Trajectory Adjustment)

양 정 민*

(Jung-Min Yang)

요 약

본 논문에서는 기구학적 구속조건을 고려한 육각 보행 로봇의 새로운 내고장성 걸음새를 제안한다. 본 논문에서 고려하고 있는 고장은 관절고착고장으로 로봇 다리의 관절 하나가 어떤 위치에 고착되어서 보행이 끝날 때까지 움직일 수 없는 상태를 말한다. 본 논문에서는 먼저 육각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 기존의 내고장성 걸음새가 고장 난 다리의 기구학적 구속조건에 따라서 교착 상태에 빠질 수도 있음을 해석적으로 증명한다. 그런 다음 이러한 교착 상태를 회피하기 위해서 새로운 내고장성 걸음새 계획을 제안한다. 제안하는 내고장성 걸음새는 다리의 궤적을 변경함으로써 고장 난 다리가 야기하는 교착 상태에서 벗어날 수 있으며, 기존 내고장성 걸음새의 다리 움직임 순서와 보폭을 그대로 유지한다. 제안한 걸음새 계획의 우수성을 입증하기 위해서 평탄 지형에서 정상적인 걸음새로 걷고 있는 육각 보행 로봇이 고장이 일어난 후 제안한 걸음새 계획을 이용하여 교착 상태에서 벗어나 내고장성 걸음새로 전이하는 사례 연구도 기술한다.

Abstract

This paper proposes a novel fault-tolerant gait planning of a hexapod robot considering kinematic constraints. 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. It is shown that the conventional fault-tolerant gait of a hexapod robot for forward walking on even terrain may be fallen into deadlock, depending on the configuration of the failed leg. For coping with such deadlock situation, a novel fault-tolerant gait planning is proposed. It can avoid deadlock by adjusting the position of the foot trajectory, and has the same leg sequence and stride length as those of the conventional fault-tolerant gait. To demonstrate the superiority of the proposed scheme, a case study is presented in which a hexapod robot, having walked over even terrain before a locked joint failure, could avoid deadlock and continue its walking by the proposed fault-tolerant gait planning.

Keywords: Hexapod robots, Gait study, Fault tolerance, Locked joint failure, Foot trajectory adjustment

I. 서 론

다각 보행 로봇의 고유 연구 분야인 걸음새 연구(gait study)는 로봇 몸체의 이동과 일련의 다리 움직임 순서 결정 등을 연구하는 영역이다. 걸음새 연구는 다각 보행 로봇의 움직임과 외부 지형 조건 등을 단순화시켜 컴퓨터상에서 특정 걸음새로 걷는 로봇의 움직임을 모사할 수 있고 로봇을 직접 제작하지 않고도 그 움직임을 분석하고 계획할 수 있는 기반을 조성한다[1]-[3]. 다각 보행 로봇의 내고장성 걸음새계획(fault-tolerant gait planning)은 이러한 걸음새 연구의 기반 위에서 로봇이 다리에 고장이 발생한 후에도 안정여유도(stability)를 유지하면서 보행을 계속할 수 있게 하는 걸음새를 설계하는 것을 말한다[4]. 정적 보행을 하는 다각 보행 로봇은 기구학적 특성상 다리 하나가 고장이 나서 정상적인 동작을 할 수 없어도 전체 시스템의 동역학이 마비되지 않고 제한적인 주행을 계속할 능력을 보유하고 있다. 따라서 여러 가지 종류의 다리 고장을 극복하면서 안정적인 고장 후 보행(post-failure walking)을 보장하는 걸음새를 찾는 일은 다각 보행 로

* 정회원, 대구가톨릭대학교 전자공학과
(Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu)
접수일자: 2004년8월4일, 수정완료일: 2005년4월4일

봇 내고장성 연구의 가장 핵심적인 부분이다[4]-[6].

저자의 선행연구[7]에서는 다각 보행 로봇에 발생하는 관절고착고장(locked joint failure)을 극복하기 위한 내고장성 걸음새 계획법을 육각 보행 로봇(hexapod robot)의 경우에 대해서 제안하였다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서 외부 작업을 하는 매니퓰레이터에서 흔히 발생할 수 있는 보편적인 종류의 고장이다[8]. 여유자유도 매니퓰레이터 한 대에 대한 내고장성 제어 문제[8][9]와는 달리 관절고착고장에 대한 다각 보행 로봇의 내고장성 보행 문제는 매니퓰레이터 구조를 가지는 다리 여러 개와 로봇 무게중심의 움직임을 함께 생각하고 로봇의 안정여유도를 항상 고려해야 하므로 걸음새 연구의 기반 위에서 해결되어야 한다.

본 논문에서는 기구학적 구속조건을 고려한 관절고착고장에 대한 새로운 내고장성 걸음새를 제안한다. 선행연구[7]의 문제점 중의 하나는 내고장성 걸음새를 계획할 때 고장 난 다리의 기구학적 구속조건을 고려하지 않았다는 점이다. 이전의 내고장성 걸음새는 고장 난 다리가 미리 정해진 다리 궤적의 한 지점에 항상 착지할 수 있다고 가정한 후 줄어든 다리의 작업 공간을 반영하여 다리 착지점(foothold position)과 보폭(stride length)을 결정하였다. 하지만 관절고착고장의 특성상 고장 난 다리가 주어진 궤적 위의 어떠한 지점에도 착지하지 못하는 경우가 발생할 수 있으며, 이 경우 내고장성 걸음새는 교착 상태(deadlock)에 빠지게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 육각 보행 로봇이 주어진 다리의 궤적을 변경한 후 내고장성 걸음새로 보행하는 기법을 제안한다. 걸음새의 다리 궤적 조정 방법은 지금까지 비평탄 지형 위의 보행에서 로봇이 장애물을 회피하기 위해서 몸체의 궤적을 계속 바꾸어 주는 데 주로 이용되어 왔다[10]-[12]. 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 이동한 후 내고장성 걸음새를 시작한다.

본 논문에서는 먼저 내고장성 걸음새가 기존의 다리 궤적을 유지할 수 있도록 하는 고장 난 다리의 기구학적 구속조건을 구한다. 그런 다음 다리 궤적을 조정하는 새로운 내고장성 걸음새 계획을 제안하고 제안된 걸음새가 고장 난 다리가 야기하는 교착 상태를 회피할 수 있음을 해석적으로 보인다. 또한 제안된 방법의 우수성을 보이기 위해서 평탄 지형에서 정상적인 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로봇이 관절고착고장이 발생한 후 제안된 걸음새 계획을 이용하여 교착 상태에서 벗어나 내고장성 걸음새로 전이하는 사례 연구도 기술한다.

II. 보행 로봇 모델링

그림 1은 본 연구에서 다루는 육각 보행 로봇의 이차원 모델이다. 로봇의 몸체는 기하학적으로 좌우 대칭인 형태이며 몸체 무게중심(center of gravity) C와 기하학적 중심점이 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 여섯 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 몸체로부터 W만큼 떨어진 길이 R_x, 폭 R_y인 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)으로 투영된다고 정의한다. C_i는 다리 i의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이등분하는 중선(center line)이 C_i를 지나간다.

육각 보행 로봇의 다리는 그림 2와 같이 두 개의 링크(link)로 구성된 팔꿈치형(articulated-arm type) 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 1'이라고 정의하고 로봇 몸

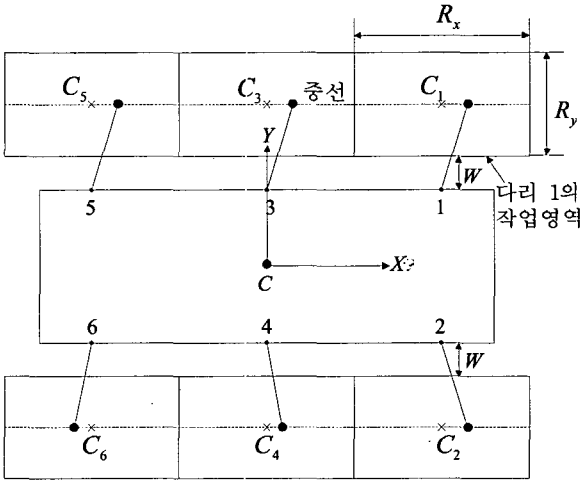


그림 1. 육각 보행 로봇의 이차원 모델
Fig. 1. Two-dimensional model of a hexapod robot.

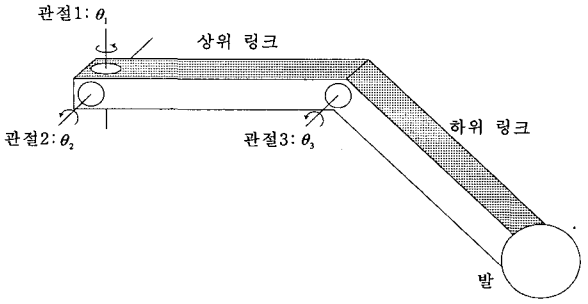


그림 2. 팔꿈치형 다리 모델
Fig. 2. Leg model of an articulated-arm type.

체의 상하 방향으로 회전하는 관절을 '관절 2'라고 정의한다. 또한 상위 링크와 하위 링크를 연결해주는 관절을 '관절 3'이라고 정의한다. 관절 1에는 다리가 로봇 몸체에 대해서 이동할 때 쓰이는 메인 엑츄에이터(main actuator)가 달려 있고, 관절 2와 관절 3은 다리가 지표면을 이륙하거나 착지할 때 사용된다. θ_1, θ_2, θ_3는 각각 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의한다. 그림 2의 모델에서 다리의 발은 삼차원 운동이 가능하므로 작업 영역의 어느 지점에서도 착지할 수 있다. 다각 보행 로봇에서 사용되는 다른 다리 모델들[13][14]도 형태는 다르나 모두 삼차원 운동을 하므로 그림 2의 모델은 일반적이라고 말할 수 있다.

내고장성 걸음새 계획의 명확한 서술을 위해 본 논문에서는 육각 보행 로봇이 완전 평탄한 지형에서 $+X$축 방향으로 직선 보행을 한다고 가정하고, 고장이 일어나기 전 보행에서 각 다리는 그림 1과 같이 항상 직사각형 작업 영역의 중선에 착지한다고 가정한다. 장애물이 없는 평탄 지형에서는 주기적 걸음새(periodic gait)로 걷는 것이 속도나 보행 모듈 구현 과정에서 유리하므로 본 논문에서도 로봇이 가지는 걸음새는 모두 주기적이라고 가정한다. 고장 발생 전 각 다리의 궤적이 작업 영역의 중선에 놓인다는 것은 육각 보행 로봇의 걸음새가 정상적인 상태에서 좌우 대칭인 정칙(regular) 형태를 가진다는 의미이다. 하지만 서론에서 기술했듯이 관절 고착고장은 이러한 정칙 걸음새를 교착 상태에 빠트릴 수 있으므로 다리 궤적을 조정하는 새로운 걸음새 계획이 필요하다.

III. 기구학적 구속조건

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도(degree of freedom)가 하나 줄어들어 이차원 운동밖에 하지 못하므로[8] 이동 능력에 심각한 손실을 입게 된다. 하지만 free-swinging 고장[15]이나 링크의 기계적 파손 등의 고장과는 달리 로봇 몸체를 지탱하는 능력은 고장 난 다리에 계속 남아 있다. 선행 연구[7]에서는 이러한 관절고착고장의 특징을 이용하여 다리에 남아 있는 이동 능력을 최대한 발휘하도록 하는 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새 계획을 제안하였다. 그런데 선행 연구에서 제안된 내고장성 걸음새는 정상적인 직선 보행에서와 마찬가지로 걸음새의 대칭성과 정칙성(regularity)을 가지기 위해서 다리 궤적을 작업 영역의 중선으로 계속 유지하였다. 그러나 고장 난 다리의 자세(configuration)에 따라서 다리가 주어진 궤적 어느 곳에도 착지하지 못하는 경우가 존재한다. 본 장에서는 고장 난 다리가 작업 영역의 중선에 착지할 수 있기 위한 기구학적 구속조건을 구한다.

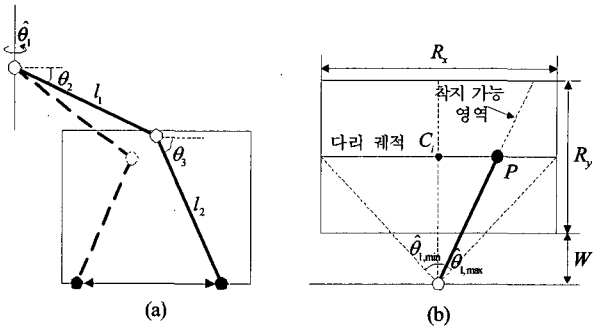


그림 3. 관절 1의 고착. (a)측면도, (b)기구학적 구속조건
Fig. 3. Locked joint failure at joint one. (a) lateral view and (b) kinematic constraint.

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 이차원 작업 영역에 투영된 착지 가능 영역은 그림 3(a)와 같이 직선이 된다. 그림에서 $\hat{\theta}_1$은 관절 1이 고착된 위치이다. 그림 3(b)는 고장이 발생한 후에도 작업 영역의 중선을 다리 궤적으로 계속 유지해야 할 때 생길 수 있는 교착 상태를 표시한 것이다. 만약 고장 난 다리가 그림 3(b)에 그려진 대로 착지 가능 영역을 가진다면 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 유일한 착지 영역은 점 P이다. 그러나 작업 영역의 수직 이등분선을 기준으로 해서 시계 방향으로 관절 1의 각도를 측정한다고 할 때

관절 1의 고착 위치가 그림 3(b)에 명기되어 있듯이 $\hat{\theta}_{1,\max}(>0)$보다 크거나 $\hat{\theta}_{1,\min}(<0)$보다 작으면 다리는 주어진 궤적 위의 어떠한 점에도 착지할 수 없게 된다. 따라서 정칙 걸음새로 직선 보행을 하는 육각 보행 로봇이 선행연구에서 제안된 내고장성 걸음새를 가지기 위해서는 관절 1의 고착 위치 $\hat{\theta}_1$이 아래 범위 안에 존재해야 한다.

$$\hat{\theta}_{1,\min} \le \hat{\theta}_1 \le \hat{\theta}_{1,\max} \tag{1}$$

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

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{1,\min} &= -\arctan\left(\frac{R_x}{R_y+2W}\right) \\ \hat{\theta}_{1,\max} &= \arctan\left(\frac{R_x}{R_y+2W}\right) \end{aligned} \tag{2}$$

2. 관절 2의 고장

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 4(a)에 그려진 대로 측면 방향, 즉 로봇 몸체 좌표계 $\pm Y$ 방향으로의 이동이 불가능하다. 따라서 작업 영역에 투영된 다리의 착지 가능 영역은 그림 4(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 4(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 그림에서 유추할 수 있듯이 r이 $R_y/2+W$보다 작으면 마찬가지로 착지 가능한 지점이 생기지 않는다. r이 만족해야 하는 조건을 식으로 나타내면 다음과 같다.

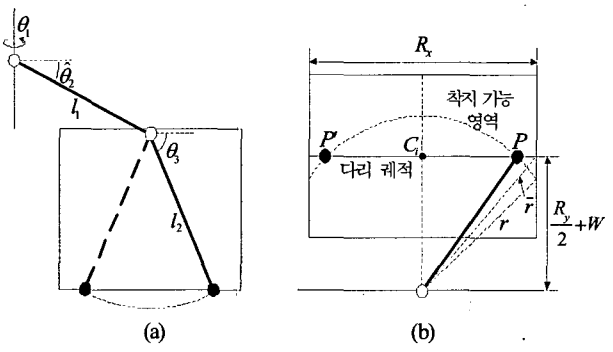


그림 4. 관절 2의 고착. (a) 측면도, (b) 기구학적 구속조건

Fig. 4. Locked joint failure at joint two. (a) lateral view and (b) kinematic constraint.

$$\frac{R_y}{2} + W \le r \le \bar{r} \tag{3}$$

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

$$r = l_1\cos\hat{\theta}_2 + l_2\cos\theta_3 \tag{4}$$

위 식에서 $\hat{\theta}_2$는 관절 2의 고착 위치이며 l_1, l_2는 다리의 상위 링크와 하위 링크의 길이를 각각 가리킨다. $\bar{r}$도 아래와 같이 로봇의 매개 변수로 표시될 수 있으므로

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

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

$$\begin{aligned} \frac{R_y}{2} + W &\le l_1\cos\hat{\theta}_2 + l_2\cos\theta_3 \\ &\le \frac{1}{2}\sqrt{R_x^2 + (R_y+2W)^2} \end{aligned} \tag{6}$$

3. 관절 3의 고장

관절 3에 관절고착고장이 발생하면 다리는 회전 관절 두 개로 이루어진 단일 링크 매니퓰레이터의 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.

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

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

IV. 교착 상태 회피

1. 다리 궤적 조정

선행연구[7]에서 제안된 내고장성 걸음새를 적용할 때 관철고착고장이 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 5는 교착 상태를 회피하기 위한 다리 궤적 조정 방법을 관절 1과 관절 2(또는 관절 3)의 고장에 대해서 각각 나타낸 것이다. 먼저 그림 5(a)는 고장이 발생한 시점에서 관절 1의 각도 $\hat{\theta}_1$이 구속조건 식 (1)을 만족하지 못해서 주어진 다리 궤적 q_0위에 착지하지 못하는 상황을 보여준다. 이 경우 관절고착고장이 발생한 다리를 내고장성 걸음새에서 계속 사용하기 위해서는 고장 난 다리가 착지할 수 있도록 다리 궤적의 위치를 변경하는 수밖에 없다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 q_0가 $-Y$ 방향으로 거리 h_1 이상으로 평행이동하면 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_0와 가장 가까운 것을 새로운 다리 궤적으로 정하기로 한다. 그림 5(a)에서는 q_1이 새로운 다리 궤적이 되고 고장 난 다리의 새로운 착지점 P_1은 작업 영역의 앞 경계에 생기게 된다. 한편 관절고착고장이 발생한 순간 관절 1의 각도 $\hat{\theta}_1$이 음수일 경우, 즉 고장 난 다리가 작업 영역의 수직 이등분선을 기준으로 왼편에 있을 경우에는 새로운 착지점은 작업 영역의 뒤 경계에 존재하게 될 것이다.

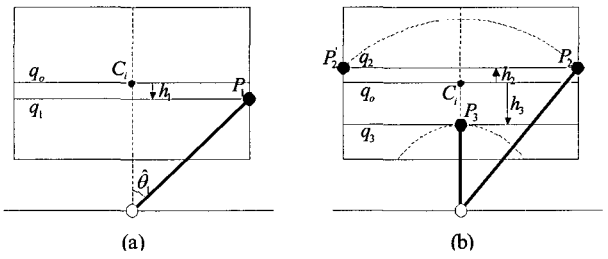


그림 5. 다리 궤적 조정. (a) 관절 1의 고장, (b) 관절 2 (또는 관절 3)의 고장

Fig. 5. Foot trajectory adjustment. (a) locked failure at joint one and (b) locked failure at joint two (or joint three).

그림 5(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 영역이 초래하는 교착 상태를 극복하기 위해서는 q_0를 $+Y$ 방향으로 h_2만큼 이동하면 되며, 아래쪽 착지 영역에 대해서는 q_0를 $-Y$ 방향으로 h_3만큼 이동하면 된다. 평행이동의 결과로 생기는 새로운 다리 궤적은 각각 q_2와 q_3가 된다. 그런데 다리의 착지 가능 영역이 q_0보다 위쪽에 있을 때는 새로운 다리 궤적 위에 착지할 수 있는 지점이 두 개 생긴다(그림 5(b)의 P_2와 P_2'). 이것은 관절 2(관절 3)가 고착되었을 때 작업 영역에 투영되는 착지 가능 영역이 원호 모양이기 때문이다. 주기 걸음새를 만들기 위해서는 고장 난 다리를 두 지점 중 어디에 착지할 것인가를 결정해야 하는데, 육각 보행 로봇이 $+X$ 방향으로 보행할 때에는 P_2, 즉 로봇 진행 방향을 기준으로 더 앞쪽에 있는 착지점을 이용하는 것이 더 유리하다. 따라서 본 논문에서도 이러한 경우 P_2를 새로운 착지점으로 정한다.

2. 주기 걸음새 계획

앞에서 제안한 다리 궤적 조정 방법을 적용하면 교착 상태를 회피할 수 있는 내고장성 주기 걸음새 계획은 다음과 같이 구성된다.

1) 관절고착고장이 발생하면 육각 보행 로봇은 보행을 중지한다.
2) 고장 난 다리가 기구학적 구속조건 식 (1), (6), 또는 (7)을 만족하는지 검사한다.
   a) 기구학적 구속조건이 만족되지 못하면 고장 난 다리가 착지점을 가질 수 있도록 그림 5에 나와 있는 방법을 이용하여 다리의 궤적을 조정한다.
   b) 기구학적 구속조건이 만족되면 기존의 다리 궤적

위에서 고장 난 다리의 착지점을 결정한다.

3) 육각 보행 로봇은 걸음새 변환을 하여 내고장성 주기 걸음새로 보행을 계속한다.

위 걸음새 계획 중 2.a)에서 다리 궤적을 조정할 때 주의해야 할 사항은 다리 궤적이 로봇 몸체 좌표계의 X축을 중심으로 항상 대칭적으로 위치해야 한다는 것이다. 예를 들어 그림 5(a)에 그려져 있는 고장 난 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_1만큼 평행이동 하여 q_1이 된다. 하지만 반대쪽에 있는 다리 2, 다리 4, 다리 6의 궤적은 이 경우 $+Y$ 방향으로 거리 h_1만큼 평행이동 해야 한다. 즉 평탄 지형에서 직선 보행하는 경우 항상 로봇 몸체의 궤적을 중심으로 상하 대칭의 다리 궤적을 유지해야 걸음새의 정칙성을 보존할 수 있으며 안정여유도면에서도 가장 유리하다[16].

그림 6은 선행 연구[7]에서 제안된 걸음새 계획을 바탕으로 다리 궤적이 조정된 내고장성 네다리(quadruped) 주기 걸음새를 다리 1의 관절고착고장에 대해서 구현한 것이다. 다리 1 외의 다리에서 발생한 고장에 대한 주기 걸음새도 대칭성을 이용하여 그림 6으로부터 쉽게 유도할 수 있다. 그림에서 흰 원은 초기 상태의 다리의 착지점을, 검은 원은 현재 상태의 다리의 착지점을 각각 가리킨다. 그림 6(a)에 나와 있는 대로 육각 보행 로봇은 기존의 다리 궤적(중선) q_0 대신에 다리 1의 착지점을 P_1으로 만드는 q_1을 새로운 궤적으로 삼았다. 그림 5(a)에서 유추할 수 있듯이 이 경우 관절고착고장이 다리 1의 관절 1에 발생하여 기존의 다리 궤적 q_0에 착지할 수 없는 상태가 되었다. 교착 상태에서 벗어나기 위해 다리 궤적 조정 방법을 쓴 다음에는 기존의 다리 움직임 순서 및 로봇 몸체 이동 규칙을 그대로 적용한다. 즉 다리 움직임 순서는 (2, 5)−(3, 4)−(1, 6)이며, 로봇 몸체는 고장 난 다리가 지지 상태(support phase)에 있을 때는 정지해 있고(그림 6(a)~(c)) 고장 난 다리가 이륙한 후 이동하는(그림 6(d)) 불연속적 운동을 한다. 또한 고장 난 다리는 전진하기 위한 스윙(swing) 동작은 취하지 않고 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로만 이동한다. 이렇듯 다리 궤적 조정 방법이 적용된 내고장성 걸음새의 형태는 기존의 주기 걸음새와 동일하며 단지 다리 궤적이 기존의 궤적보다 Y축 방향을 기준으로 더 안쪽, 혹은 바깥쪽에 존재하게 된다. 본 논문에서 제안하는 내고장성 걸음새 계획은 기존의 걸음새 계획에 기구학적 구속조건 검증 부분과 다리 궤적 조정 부분만 추가하면 쉽게 얻을 수 있기

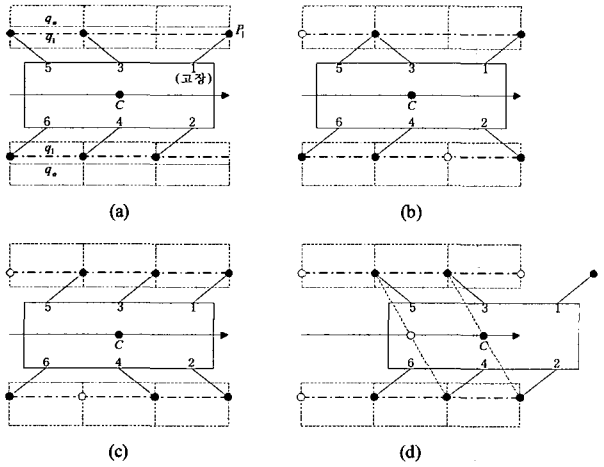


그림 6. 다리 궤적을 조정한 네다리 주기 걸음새. (a) 초기 상태(다리 궤적 조정), (b) 다리 2, 다리 5 이동, (c) 다리 3, 다리 4 이동, (d) 다리 1, 다리 6 이륙 후 로봇 몸체 이동

Fig. 6. fault-tolerant quadruped periodic gait with the foot trajectory adjustment. (a) initial state (adjust the foot trajectory), (b) swing leg 2 and leg 5, (c) swing leg 3 and leg 4 and (d) lift leg 1 and leg 5 and move the robot body.

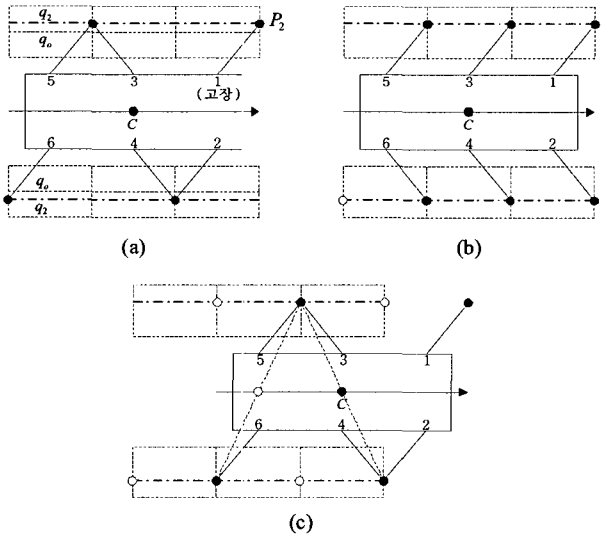


그림 7. 다리 궤적을 조정한 세다리 주기 걸음새. (a) 초기 상태(다리 궤적 조정), (b) 다리 2, 다리 3, 다리 6 이동, (c) 다리 1, 다리 4, 다리 5 이륙 후 로봇 몸체 이동

Fig. 7. fault-tolerant tripod periodic gait with the foot trajectory adjustment. (a) initial state (adjust the foot trajectory), (b) swing leg 2, leg 3 and leg 6 and (c) lift leg 1, leg 4 and leg 5 and move the robot body.

때문에 효율적으로 교착 회피 능력을 구현했다고 말할 수 있다.

그림 7은 다리 궤적이 조정된 내고장성 세다리(tripod) 주기 걸음새를 다리 1의 관절고착고장에 대해서 구현한 것이다. 그림 7(a)에서 새로운 다리 궤적 q_2는 q_0의 바깥쪽에 존재하므로 다리 1의 관절고착고장은 관절 2(또는 관절 3)에 발생한 것이다(그림 5(b) 참조). 네다리 주기 걸음새와 마찬가지로 세다리 주기 걸음새는 표준 다리 움직임 순서[17] (2, 3, 6)−(1, 4, 5)를 유지하며 로봇 몸체가 불연속적으로 이동한다.

그림 6과 그림 7의 걸음새는 내고장성 주기 걸음새 중 최대 보폭 R_x를 가지도록 구현한 것들이므로 최저 세로 안정여유도(marginal longitudinal stability margin)를 가진다(그림 6(d), 그림 7(c)). $0 < \lambda < R_x$인 임의의 보폭 λ 에 대한 일반적인 주기 걸음새도 기존 연구[7][17]에서 쉽게 유도할 수 있다.

V. 걸음새 변환

본 장에서는 평탄 지형에서 정상적인 걸음새로 걷고 있는 육각 보행 로봇이 고장 난 다리가 기존의 다리 궤적에 착지할 수 없게 만드는 교착 상태를 야기하는 관절고착고장이 발생한 후 제안된 걸음새로 고장 후 보행을 계속하는 과정을 기술한다.

1. 정상 보행: 물결 걸음새

육각 보행 로봇은 관절고착고장이 일어나기 전 완전 평탄 지형에서 물결 걸음새(wave gait)로 직선 보행을 하고 있다고 가정한다. 물결 걸음새는 직선 보행에서 최대 안정여유도를 보장하는 주기적 걸음새로서, 로봇 몸체가 연속적으로 이동하면서 한 다리의 이착륙이 몸체 반대편에 있는 다리의 이착륙과 반주기의 위상(phase) 차이를 낸다[18]. 또한 로봇이 직선 보행을 하므로 다리의 궤적은 항상 작업 영역의 중선이 된다. 본 논문에서는 육각 보행 로봇이 디딤율(duty factor) β, 즉 다리가 지지 상태에 있는 시간을 주기 시간으로 나눈 값이 2/3인 물결 걸음새로 보행하고 있다고 가정한다. 그림 8은 β=2/3인 물결 걸음새의 걸음새 도표(gait diagram)이다[16]. 그림에서 굵은 직선 부분은 다리가 한 주기 내에서 지지 상태로 있는 시간을 가리키며 주기 T는 6등분되어 표시되어 있다. 그림 8에서 네 개의 다리가 항상 지지 상태에 있으므로 β=2/3인 물결 걸음새는 네다리 걸음새(quadruped gait)의 일종이다. 따라서 고장이 일어난 후에도 지지 다리 숫자를 동일하게 유지하기 위해서는 육각 보행 로봇이 내고장성 네다리 주기 걸음새로 변환해야 한다.

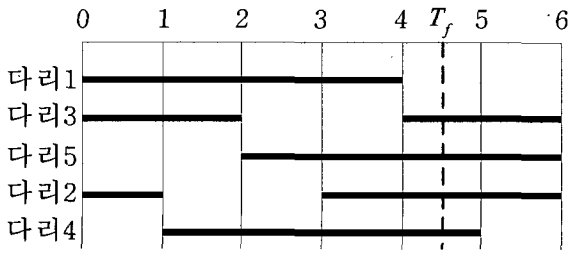


그림 8. β=2/3인 물결 걸음새 도표
Fig. 8. Gait diagram of the wave gait with β=2/3.

2. 고장 발생 및 교착 상태

본 사례 연구에서는 육각 보행 로봇의 다리 1이 이동 상태(transfer phase)에 있는 동안 관절 1에 고장이 발생하여 교착 상태에 빠진다고 가정한다. 다리가 이동 상태에 있을 때 고장이 일어난다고 가정한 이유는 그림 3 ~ 그림 5에 나타난 교착 상태가 다리가 이륙한 후 전진 스윙을 할 때 주로 발생하기 때문이다. 다리가 지지 상태에 있을 때는 다리의 착지점이 기존의 다리 궤적 위에 항상 존재하기 때문에 고장이 발생해도 다리 궤적을 그대로 유지할 수 있다.

그림 9는 고장이 발생한 순간의 걸음새 상태를 고정 걸음새 양식(stationary gait pattern)으로 나타낸 것이다. 고정 걸음새 양식은 걸음새 도표에서 다리가 지지 상태로 있는 구간을 작업 영역에 옮겨 그린 것으로 한 주기 시작 후의 경과 시간에 따라 걸음새 상태를 쉽게 표현한

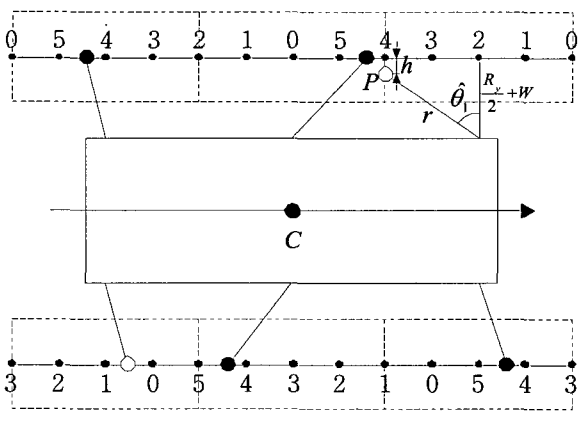


그림 9. 고장이 발생한 순간 물결 걸음새의 고정 걸음새 양식
Fig. 9. Stationary gait pattern of the wave gait at the moment of fault occurrence.

다[16]. 본 사례 연구에서는 관절고착고장이 그림 8에 표시된 대로 한 주기 시작 후 시간 T_f가 경과했을 때 발생하였다고 가정한다. 시각 T_f는 걸음새 도표의 구간 4와 5 사이에 있으므로 지지 상태에 있는 다리 2, 3, 4, 5도 각 작업 영역 다리 궤적의 구간 4와 5 사이에 착지해 있다. T_f에서 다리 1은 이륙한 직후이므로 관절고착고장이 발생했을 때는 다리 1이 작업 영역의 뒤 경계점에서 이륙한 직후 앞으로 전진 스윙을 하려는 순간이다. 따라서 고장이 발생한 순간 다리 1의 상태를 작업 영역에 투영하면 그림 9와 같이 나온다. P는 본 논문에서 제안된 방법에 의해서 다리 1이 가져야 할 새로운 착지점이다.

다리 1의 새로운 착지점 P를 지나도록 다리 궤적을 옮기려면 그림 9에 표시된 조정 거리 h를 구해야 한다. 관절 1의 고착 각도 $\hat{\theta}_1$으로 h를 나타내면 아래와 같다.

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

위 식에 식 (4)에서 구한 r을 대입하면 다음과 같이 정리된다.

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

따라서 $\hat{\theta}_1$을 측정하고 새로운 착지점 P에 다리 1이 착지하기 위한 관절각도 θ_2와 θ_3을 역기구학(inverse kinematics)으로 구한 다음 위 식에 대입하면 다리 궤적 조정 거리를 구할 수 있다.

3. 걸음새 변환 과정

그림 10은 육각 보행 로봇이 관절고착고장 발생 후 내고장성 네다리 주기 걸음새로 변환하는 과정을 보여준다. 그림 10(a)는 로봇에 고장이 발생하여 몸체의 이동을 멈춘 후 고장 난 다리의 착지점 P 및 새로운 다리 궤적을 결정하는 과정으로서 그림 9와 동일하다. 식 (8)을 이용하여 다리 궤적 조정 거리 h를 계산한 후 그림 10(b)에서 이동 상태에 있던 다리 1과 다리 6은 새로운 다리 궤적 q_1에 착지한다. 다리 6은 고장 난 다리 1과 항상 함께 수동 이동을 해야 하므로 작업 영역의 뒤 경계점에 착지한다. 마찬가지로 그림 10(c)와 (d)에서는 (다리 2, 다리 5), (다리 3, 다리 4) 두 쌍이 각각 이륙한 후 새로운 다리 궤적 q_1 위에 착지한다. 마지막 상태인 그림 10(d)는 그림 6의 내고장성 네다리 주기 걸음새의 상태 중 그림 6(c)와 일치하므로 걸음새 변환이 성공적으로 이루어졌다고 말할 수 있다. 또한 그림 10(c)와 (d)에서 명기된 지지 다각형(support polygon)이 무게 중심 C를 포함하고 있으므로 걸음새 변환 과정에서 정적 안정여유도는 계속 유지된다. 그림 10(d) 이후 육각 보행 로봇은 다리 1과 다리 6을 들고 로봇 몸체를 보폭 R_x만큼 이동시켜 내고장성 직선 보행을 시작한다.

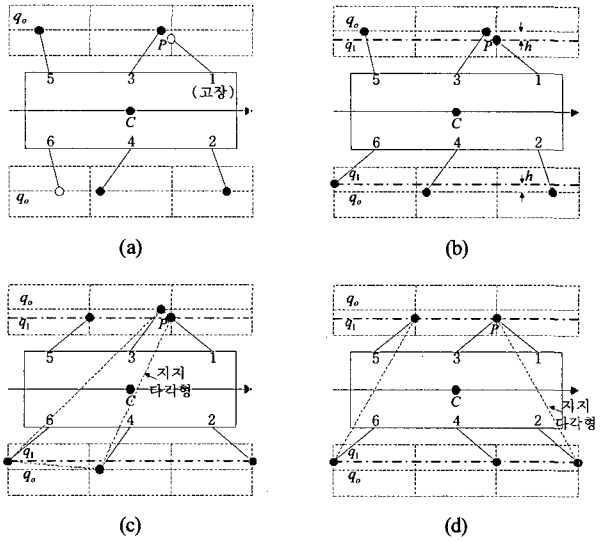


그림 10. 걸음새 변환 과정. (a) 로봇 몸체 정지 및 다리 1의 착지점 결정, (b) 다리 궤적 조정 후 다리 1, 다리 6 착지, (c) 다리 2, 다리 5 이동 후 착지, (d) 다리 3, 다리 4 이동 후 착지

Fig. 10. 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 and 6, (c) swing and place legs 2 and 5 on the new foot trajectory, and (d) swing and place legs 3 and 4 on the new foot trajectory.

그림 10의 걸음새 변환 과정은 본 논문에서 제안한 다리 궤적 조정 방법이 그림 9의 경우와 같이 기존의 내고장성 걸음새 계획으로는 빠져 나오기 불가능한 교착 상태를 회피하는 능력을 가진다는 사실을 보여준다. 또한 그림 6의 걸음새는 기존 내고장성 네다리 주기 걸음새의 다리 움직임 순서와 보폭을 그대로 가지므로 기존 걸음새의 속도나 디딤율 등의 성능은 훼손하지 않고 교착 상태 회피 기능을 추가하였다고 말할 수 있다. 본 사례 연구 외에 관절 2(또는 관절 3)에 발생하는 고착고장이 야기하는 교착 상태를 회피하는 걸음새 변환 과정도 그림 5에서 도시한 다리 궤적 조정 방법과 그림 6의 주기 걸음새를 바탕으로 쉽게 유도할 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 관절고착고장이 야기하는 기구학적 구속조건을 고려한 새로운 내고장성 걸음새 계획을 육각 보행 로봇의 직선 보행에 대해서 제안하였다. 선행 연구에서 제안된 내고장성 걸음새 계획은 관절고착고장이 발생한 다리가 가지고 있는 제한적인 보행 능력을 최대한 발휘하도록 설계되었으나 기존의 다리 궤적을 그대로 유지하지 못 하게 하는 교착 상태가 생길 수 있다.

본 논문에서는 이러한 교착 상태에 빠지지 않기 위해서 고장 난 다리가 만족해야 하는 기구학적 구속조건을 팔꿈치 형 매니퓰레이터 구조를 가지는 다리에 대해서 유도하였다. 그런 다음 고장 난 다리가 이러한 기구학적 구속조건을 만족시키지 못해서 육각 보행 로봇의 걸음새가 교착 상태에 빠지는 상황을 극복하기 위하여 다리 궤적 조정 방법을 추가한 새로운 내고장성 걸음새 계획을 제안하였다. 다리 궤적 조정 방법은 고장 난 다리가 착지할 수 있도록 다리 궤적을 평행이동 시키는 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 물결 걸음새로 걷고 있던 육각 보행 로봇이 내고장성 네다리 주기 걸음새로 변환하는 과정을 제시하였다. 기존의 내고장성 걸음새를 적용해서는 주어진 다리 궤적을 유지하지 못하고 교착 상태에 빠지게 되는 관절고착고장이 발생하였지만, 육각 보행 로봇은 본 논문에서 제안한 걸음새 계획을 이용하여 새로운 다리 궤적을 찾아서 내고장성 주기 걸음새를 시작할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.

[2] B. Goodwine and J. Burdick, "Gait controllability for legged robots," *Proc. of IEEE International Conference on Robotic and Automation*, pp. 484-489, 1998.

[3] 이지홍, 전봉환, "4족 보행 로봇의 동적 조작도 해석," *대한전자공학회 2003 하계종합학술대회 논문집*, 2721-2724쪽, 2003년 7월

[4] 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, 1999.

[5] S. Srinivasan, R. E. Gander and H. C. Wood, "A movement pattern generator model using artificial neural networks," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 716-722, 1992.

[6] S. K. Ralph and D. K. Pai, "Fault tolerant locomotion for walking robots," *Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 130-137, 1997.

[7] 양정민, "자율 보행 로봇을 위한 내고장성 제어," *제어자동화시스템공학 논문지*, 제9권, 제11호, 943-951쪽, 2003년 11월

[8] C. L. Lewis and A. A. Maciejewski, "Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for locked joint failures," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 4, pp. 622-629, 1997.

[9] 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 Y.-D. Chen, "A free gait algorithm for quadrupedal walking machines," *Journal of Terramechanics*, vol. 28, no. 1, pp. 33-48, 1991.

[12] 이덕영, 권동수, 이형기, 홍예선, "4족 보행 로봇의 원격 조종을 위한 걸음새 제어," *한국자동제어학술회의논문집(KACC)*, 1564-1567쪽, 1998.

[13] 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.

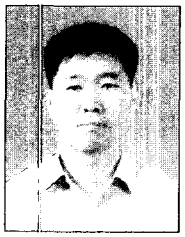
[14] J. Estremera, E. Garcia, and P. Gonzalez de Santos, "A multi-modal and collaborative human-machine interface for a walking robot," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 397-425, 2002.

[15] 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.

[16] S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, MIT

Press, Cambridge, MA, 1989.
[17] 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, 1988.
[18] S. M. Song and B. S. Choi, "The optimally stable ranges of 2n-legged wave gaits," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 4, pp. 888-902, 1990.

저 자 소 개



양 정 민(정회원)
1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사 졸업
1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업
1999년~2001년 한국전자통신연구원 선임연구원
2001년~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수
<주관심분야 : 로봇 제어, 보행 로봇 시스템 등>