

논문 2006-43SC-5-3

사족 보행 로봇의 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새의 안정여유도에 관한 연구

(Stability Margin of Fault-Tolerant Gaits to Joint Jam for Quadruped Robots)

양 정 민*

(Jung-Min Yang)

요 약

본 논문은 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새의 안정여유도를 개선하는 방법을 논한다. 기존에 제안되었던 내고장성 걸음새는 사족 보행 로봇이 다리 고장이 발생한 후에도 보행을 계속할 수 있게 하였다. 하지만 내고장성 걸음새가 임계 안정여유도를 가지므로 몸체 무게중심의 위치가 순간적으로 바뀔 때에는 걸음새가 불안정해질 수 있다는 약점을 지니고 있다. 본 논문에서는 이러한 약점을 극복하기 위해서 양(陽)의 안정여유도를 가지는 내고장성 걸음새를 관절고착고장에 대해서 제안한다. 관절고착고장은 로봇 다리의 관절 하나가 한 지점에 고착되어 더 이상 움직일 수 없는 상태를 말한다. 양의 안정여유도는 걸음새 동작 과정에서 한 다리가 이동하기 전에 지지 다리들의 위치를 조정함으로써 얻어질 수 있다. 제안된 걸음새의 우수성을 입증하기 위해서 안정여유도, 보폭 등의 매개 변수들을 중심으로 기존 걸음새와 성능 비교를 수행한다.

Abstract

Improvement in gait stability of fault-tolerant gaits for quadruped robots is addressed in this paper. The previously developed fault-tolerant gait gives a quadruped robot the ability to continue its walk against the occurrence of a leg failure. But it has a drawback of having marginal gait stability, which may lead to tumbling when the robot body's center of gravity is perturbed. To overcome such a drawback, a novel fault-tolerant gait is presented in this paper that generates positive stability margin against a locked joint failure, in which a joint of a leg is locked in a known place. Positive stability margin is obtained by adjusting foot positions of supporting legs between leg swing sequences. The advantages of the proposed fault-tolerant gait are discussed by comparing with the previous gait in terms of gait stability, stride length and gait velocity.

Keywords : Gait study, Fault tolerance, Locked joint failure, Positive gait stability

I. 서 론

바퀴 구동 이동 로봇에 비해서 우수한 지형 적응성을 가지는 다족 보행 로봇을 효율적으로 작동시키기 위해서는 다리 움직임 순서와 몸체 이동 시간 등을 결정하는 걸음새 제어(gait control)가 필수적이다. 내고장성 걸음새 계획(fault-tolerant gait planning)은 다족 보행

로봇이 다리 부위에 발생하는 고장을 극복하는 과정을 걸음새 제어의 틀 안에서 연구하는 분야이다. 최근 다족 보행 로봇의 성능이 우수해지고 그 응용 범위도 비평탄 지형 보행 등으로 계속 확대되어 가고 있으므로 로봇의 고장 극복 능력을 규명하고 활용하는 연구는 정적 보행 로봇 분야에서 연구할 가치가 크다고 하겠다^[1].

본 논문의 목적은 관절고착고장을 가지는 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새의 안정여유도를 개선하는 것이다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태에서 외부 작업을 하는 매니플레이터에서 흔히 발생할 수 있는 보

* 정회원, 대구가톨릭대학교 전자공학과
(Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu)
접수일자: 2006년5월25일, 수정완료일: 2006년8월30일

편적인 종류의 고장이다^[2]. 저자의 선행연구에서는 사족 보행 로봇이 다리 하나에 관절고착고장이 발생해도 보행을 계속할 수 있게 하는 걸음새를 직선 보행^[3]과 게 걸음새(crab walking)^[4]에서 각각 제안하고 그 응용성을 검증하였다. 하지만 기존에 제안되었던 내고장성 걸음새는 다리가 이동할 때 걸음새의 안정여유도가 항상 0, 즉 임계 안정여유도(marginal stability margin)가 된다는 약점을 지닌다. 예상하지 못한 동역학적 영향이 외부로부터 가해진다든가 지표면에 굴곡이 존재하여 내고장성 걸음새로 보행하고 있던 사족 보행 로봇의 무게무게중심(center of gravity) 위치가 바뀔 때에는 걸음새가 순간적으로 불안정해질 수 있으며, 최악의 경우 로봇이 넘어질 수도 있다.

본 논문에서는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새가 가지는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 양(陽)의 안정여유도를 가지는 새로운 내고장성 걸음새를 제안한다. 사족 보행 로봇은 정적 보행에 필요한 최소한의 개수인 네 개의 다리가 달렸으므로 다리 하나가 이동하고 나머지 세 개의 다리가 지지 상태(support phase)로 있는 걸음새 형태만을 가질 수 있다^[5]. 따라서 본 논문에서 제안하는 걸음새의 다리 이동 순서는 기존 걸음새와 동일하다. 하지만 걸음새가 양의 안정여유도를 가지기 위해서 다리나 몸체가 이동하기 전에 지지 상태에 있는 다리들이 착지 위치를 조정하는 과정을 거친다. 관절고착고장이 발생한 다리도 고장의 특성상 착지 위치 조정 과정에 참여할 수 있다는 사실도 본 논문에서 증명한다. 제안된 걸음새의 우수성을 보이기 위해서 관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇이 기존 직선 보행 걸음새와 제안된 새로운 걸음새를 각각 가지면서 보행할 때 나타내는 걸음새 성능 지수를 구해서 서로 비교해본다. 안정여유도와 걸음새 보폭에 대한 시간 변화치를 얻은 후 제안된 걸음새가 안정여유도 면에서 우수하다는 사실을 입증한다.

II. 기존 연구 결과

1. 사족 보행 로봇 모델링

그림 1은 본 논문에서 다루는 사족 보행 로봇의 이차원 모델이다. 몸체 무게중심 C 를 원점으로 하는 몸체 좌표계 $X_b - Y_b - Z_b$ 가 달려 있으며 X_b 축은 몸체의 세로축(longitudinal axis)과 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없

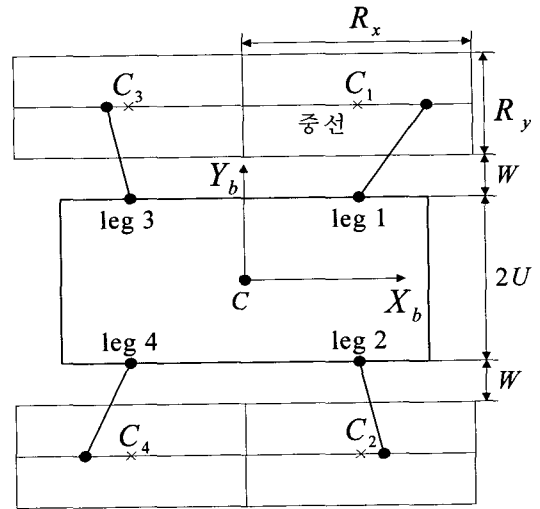


그림 1. 사족 보행 로봇의 이차원 모델.
Fig. 1. Two-dimensional model of a quadruped robot.

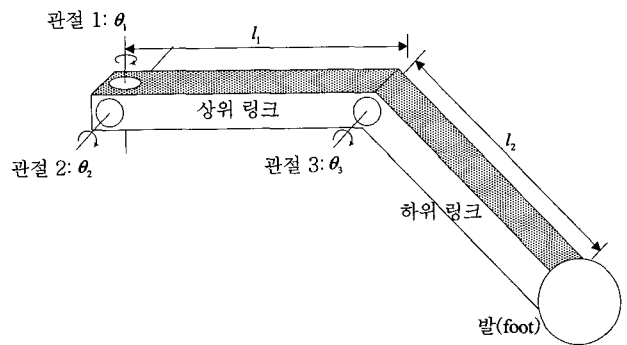


그림 2. 팔꿈치형 다리 모델.
Fig. 2. Leg model of an articulated-arm type.

며, 그림과 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 길이 R_x , 폭 R_y 인 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)이 된다고 정의한다. C_i 는 다리 i 의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이등분하는 중선(middle line)이 C_i 를 지나간다.

그림 1에서 로봇의 다리는 착지점과 로봇 몸체 연결점 사이의 직선으로 표시되지만 실제로는 그림 2와 같이 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니퓰레이터(articulated-arm manipulator) 구조로 되어 있다고 가정한다. 상위 링크(upper link)는 로봇 몸체와 두 개의 회전 관절로 연결되어 있고, 하위 링크(lower link)는 상위 링크와 회전 관절 하나로 연결되어 있다. 상위 링크에 달린 회전 관절 중 로봇 몸체의 세로 방향으로 회전하는 관절을 관절 1이라고 정의하고 로봇 몸체의 상하 방향으로 회전하는 관절을 관절 2라고 정의한다. 또 상위 링크와 하위 링크를 연결해주는 관절을 관절 3이

라고 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 각각 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의하고 l_1, l_2 를 상위 링크와 하위 링크의 길이라고 정의한다. 그림 2의 모델을 가지는 다리의 발(foot)은 자유도(degree of freedom) 3을 가지며 작업 영역 어디에라도 착지할 수 있다.

2. 내고장성 직선 걸음새

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다^[2]. 하지만 관절고착고장에서는 관절 하나가 특정 각도로 고정되기 때문에 자유회전고장(free-swinging failure)이나 링크파손고장(broken-link failure) 같은 관절의 지지 능력까지 없애는 고장과는 달리 로봇의 몸체를 지탱하는 능력은 계속 유지된다. 선행연구에서는 이러한 관절고착고장의 특징을 바탕으로 고장 난 다리를 몸체를 지탱하는 동작에서만 이용하고 지지 상태에서 몸체를 앞으로 밀어주는 운동에서는 제외시킴으로써 고장 난 다리에 남아 있는 능력을 최대한 발휘하도록 하였다. 기존 내고장성 걸음새를 기술하기 전에 본 논문에서는 먼저 관절고착고장이 다리 1에서만 발생한다는 가정을 세운다. 그림 1의 사족 보행 로봇은 무게중심을 중심으로 각 다리가 대칭적으로 달려 있기 때문에 다른 다리에서 발생하는 고장에 대한 내고장성 걸음새는 다리 1에 대한 걸음새로부터 쉽게 유도될 수 있다. 또한 사족 보행 로봇은 완전 평탄 지형에서 직선 보행을 하며 지표면에 대한 몸체의 고도(altitude)는 일정하게 유지된다고 가정한다.

그림 3은 선행연구^[3]에서 제안된, 관절고착이 발생한 사족 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새이다. 그림에서 알 수 있듯이 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새는 일종의 불연속 걸음새로서^[6], 다리의 움직임과 몸체의 움직임이 각각 불연속적으로 이루어진다. 즉 다리가 이동할 때는 로봇 몸체가 움직이지 않으며, 로봇 몸체가 이동할 때는 다리가 움직이지 않는다. 관절고착고장 때문에 자유도가 줄어든 다리를 계속 고장후(post-failure) 보행에 사용하기 위해서 고장 난 다리(다리 1)는 로봇 몸체와 상대적인 위치를 항상 동일하게 유지하도록 한다. 즉 다리 1은 능동적인 스윙(swing) 동작을 하지 않고 이륙을 한 뒤 로봇 몸체의

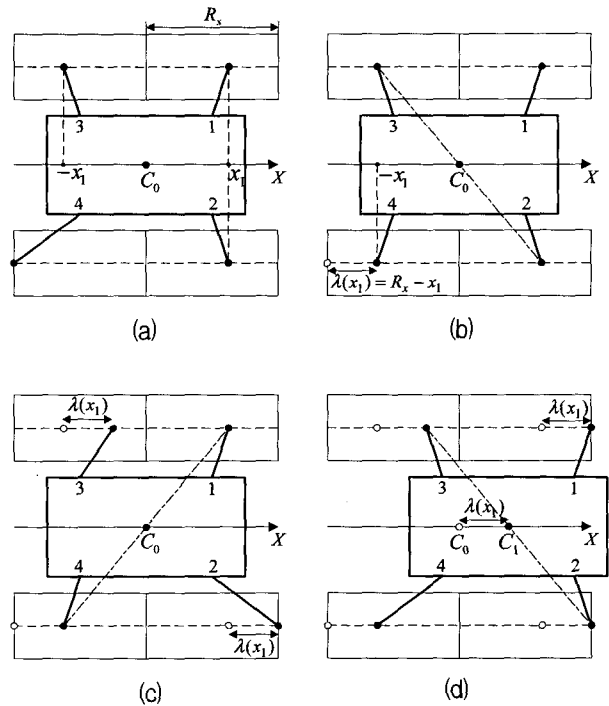


그림 3. 다리 1에 관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새^[3]. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 2, 다리 3 이동 (d) 다리 1 이륙 후 로봇 몸체 이동.

Fig. 3. Fault-tolerant gait for straight-line motion of a quadruped robot with a locked joint failure at leg 1^[3]. (a) initial state, (b) swing leg 4, (c) swing leg 2 and leg 3 and (d) lift off leg 1 and move the body.

움직임에 따라서 수동적인 이동만을 한다(그림 3(d) 참조). 그림 3에서 x_1 은 다리 1 착지점의 X_b 축 좌표로서 고착된 관절의 위치와 다리의 자세에 따라서 결정되는 값이다^[3]. 그림 3은 x_1 가 $R_x/2 < x_1 \leq R_x$ 의 범위에 있을 때 로봇이 가지는 내고장성 걸음새를 나타내었다. $0 < x_1 \leq R_x/2$ 인 경우도 다리의 초기 착지점만 틀려질 뿐 그림 3과 동일한 다리 움직임 순서를 가진다. $\lambda(x_1)$ 는 다리 1 착지점이 x_1 일 때의 내고장성 걸음새 보폭으로 x_1 에 따라서 다음과 같이 유도된다^[3].

$$\lambda(x_1) = \begin{cases} R_x/2 & 0 < x_1 \leq R_x/2 \\ R_x - x_1 & R_x/2 < x_1 \leq R_x \end{cases} \quad (1)$$

그림 3의 기존 내고장성 걸음새는 임의의 다리에서 발생하는 관절고착고장에 대해서 사족 보행 로봇이 교착상태(deadlock)에 빠지지 않고 고장후 보행을 계속하는 것을 보장하고 있으나 안정도 면에서 심각한 약점을 지닌다. 즉 다리 하나가 이동 상태(transfer phase)에 있

을 때 걸음새는 항상 몸체 무게중심이 지지 다각형 (support pattern)의 한 변 위에 있게 되는 임계 안정여유도를 가진다(그림 3(b) ~ (d) 참조). 따라서 보행 시 발생할 수 있는 외부 충격 등에 의한 몸체의 흔들림, 착지 위치 오차 등에 의해서 걸음새가 불안정해져서 로봇이 넘어질 수 있는 위험이 존재한다.

III. 개선된 내고장성 걸음새

1. 착지점 조정

본 장에서는 양의 안정여유도를 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새를 제안한다. 로봇이 직선 보행을 하므로 본 논문에서는 세로 안정여유도(longitudinal stability margin)^[7], 즉 보행 로봇 이동 방향으로 측정된 몸체 무게중심과 지지 다각형 앞뒤 경계점까지의 최소 거리를 안정여유도 척도로 사용한다.

보행 로봇이 임계 안정여유도를 피하고 양의 안정여유도를 가지기 위해서는 다리나 몸체가 이동하기 전에 지지 상태에 있는 다리들의 착지점을 조정하여 무게중심과 지지 다각형 변 사이의 간격을 넓히는 일이 수반되어야 한다. 정상적인 다리의 착지점 조정은 아무 문제가 없으나 관절고착고장이 발생한 다리는 이동성에 제한을 가지므로 착지점 조정이 가능한지 확인해야 한다. 본 절에서는 먼저 기존 연구에서 기술된 관절고착고장의 작업 공간 변화를 바탕으로 고장 난 다리도 양의 안정여유도 값을 가지기 위한 착지점 조정 과정에 참여할 수 있다는 사실을 규명한다.

그림 4는 직선 보행에서 고장 난 다리가 착지점을 조정하는 모습을 그린 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 평면이 되고 지표면에 투영된 범위는 그림 4(a)와 같은 직선이 된다. $\hat{\theta}_1$ 은 관절 1이 고착된 위치를 가리킨다. 다리 궤적이 작업 영역의 중선일 때 다리는 그림 4(a)의 점 P에 착지해야 한다. 하지만 다른 다리가 이동할 때 양의 안정여유도를 주기 위해서 현재 착지점을 일시적으로 바꾸어야 할 때에는 그림에서 표시되었듯이 착지가능선의 양 끝단인 P_1 과 P_2 까지 다리의 발을 옮길 수 있다. X_b 축 방향으로 측정된 중점 C_i 와 P_1, P_2 사이의 거리 D_1, D_2 를 로봇 매개 변수로 표시하면 다음과 같다.

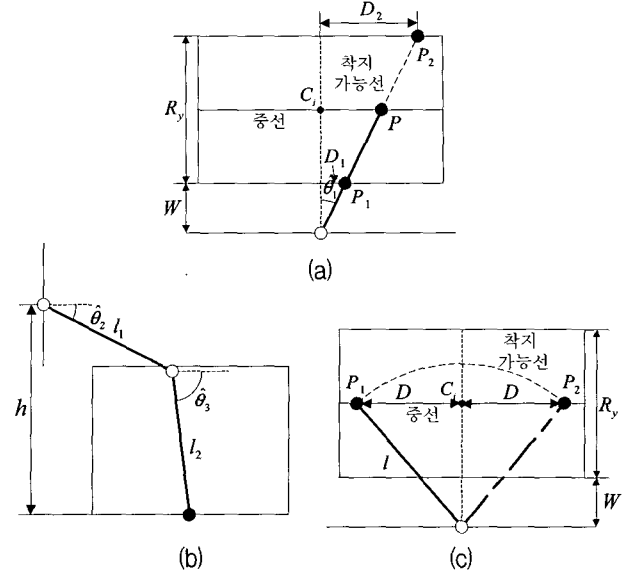


그림 4. 고장 난 다리의 착지점 조정. (a) 관절 1의 고착, (b) 관절 2 또는 3의 고착(측면도), (c) 관절 2 또는 3의 고착(평면도).

Fig. 4. Foot point adjustment of a failed leg. (a) locked failure at joint 1, (b) locked failure at joint 2 or joint 3 (lateral view) and (c) locked failure at joint 2 or joint 3 (plane view).

$$D_1 = W \tan \hat{\theta}_1$$

$$D_2 = (W + R_y) \tan \hat{\theta}_1 \tag{2}$$

한편 관절 2(또는 관절 3)에 관절고착고장이 발생하면 다리의 전후 이동은 관절 1에 의해서 이루어지지만 다리의 상하 운동은 관절 3(또는 관절 2)만을 이용해야 하므로 이동성에 제한을 받는다. 또 지표면에 대한 무게중심의 고도가 일정하다고 가정하였으므로 관절 2와 관절 3 중 하나가 고착되면 다른 하나의 값도 일정한 고도를 맞추기 위해서 자동적으로 결정된다. 그림 4(b)는 이러한 다리의 고장 상태를 측면에서 바라본 그림이다. 그림에서 h 는 무게중심의 고도, $\hat{\theta}_2$ 와 $\hat{\theta}_3$ 은 관절 2와 관절 3이 고착된 각도를 각각 표시한다. 고장 난 다리는 로봇 몸체 좌표계의 $\pm Y_b$ 방향으로의 이동이 불가능하므로 작업 영역에 투영된 다리의 착지 가능 영역은 그림 4(c)와 같이 원호(arc) 모양이 되며^[3], 작업 영역의 중선을 다리 궤적으로 하는 걸음새에서 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 착지 영역은 점 P_1 또는 P_2 가 된다. P_1 과 P_2 중 하나가 현재 착지점이라면 다른 하나는 다리 이동을 위해서 옮겨갈 수 있는 조정 지점이 된다. 중점 C_i 와 P_1, P_2 사이의 거리 D 는 다음과 같이 구해진다.

$$D = \sqrt{l^2 - (W + R_y/2)^2}$$

$$= \sqrt{(l_1 \cos \hat{\theta}_2 + l_2 \cos \hat{\theta}_3)^2 - (W + R_y/2)^2} \quad (3)$$

2. 관절 1의 고장

그림 5는 본 논문에서 제안된 양의 안정여유도를 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새이다. 사족 보행 로봇은 평탄 지형에서 직선 보행을 하며 관절고착고장이 다리 1의 관절 1에 발생하였으며 다리 1의 기본 착지 위치 x_1 이 $0 < x_1 \leq R_x/2$ 의 범위에 있다고 가정한다. 관절 2 또는 관절 3에 발생한 고장에 대해서는 다음 절에서 논하기로 한다. 본 걸음새는 그림 3의 기존 내고장성 걸음새와 다리 이동 순서가 4→2→3→1로 동일하다. 하지만 앞에서 설명했듯이 걸음새가 양의 안정여유도를 가지게 하기 위해서 한 다리가 이륙하기 전에 지지 상태에 있는 다리의 착지점을 조정하는 과정이 먼저 실행된다. 걸음새의 생성 과정을 각 단계별로 설명한다.

i) 그림 5(a): 그림 5(a)는 초기 상태에서 다리 4가 먼저 보폭 λ 만큼 이동하는 과정을 보여준다. 그림 3의 기존 걸음새와 본 걸음새와의 가장 큰 차이점은 초기 상태에서 다리 3이 다리 2의 원점에 대한 대칭점(C_3)에 있지 않고 $-X_b$ 축으로 $2d$ ($0 < d < R_x/4$)만큼 떨어진 지점에 있다는 것이다. 이렇게 함으로써 다리 4가 이륙한 후 무게 중심이 지지 다각형의 변 E_1 안쪽에 위치하게 되어 양의 안정여유도를 가지게 된다. 또 고장 난 다리 1도 다음 다리의 이동을 위해서 그림 4에서 정의된 두 착지점 중 P_2 지점에 놓여져 있다.

ii) 그림 5(b): 다음 이동 다리 2가 이륙하기 전에 걸음새가 양의 안정여유도를 가지게 하기 위해서 다리 1의 착지점을 P_2 에서 P_1 으로 미리 조정하는 과정이다. 그런데 그림 5(a)의 상태에서 다리 1이 이륙하면 걸음새는 불안정 상태가 되므로 다리 3이 $+X_b$ 축 방향으로 $4d$ 만큼 착지점을 먼저 조정해야 한다.

iii) 그림 5(c): 다리 2가 보폭 λ 만큼 앞으로 이동한다. 앞에서 다리 1의 착지점을 조정하였기 때문에 무게 중심의 위치가 지지 다각형 변 E_4 의 안쪽에 머무른다는 사실을 확인할 수 있다.

iv) 그림 5(d): 다리 1이 다시 P_2 로 위치를 옮긴 후 다리 3의 이동을 수행한다. 다리 4가 다리 1의 기본 착지점 x_1 의 대칭 위치($-x_1$)에 착지해 있으므로 다리 1의 위치

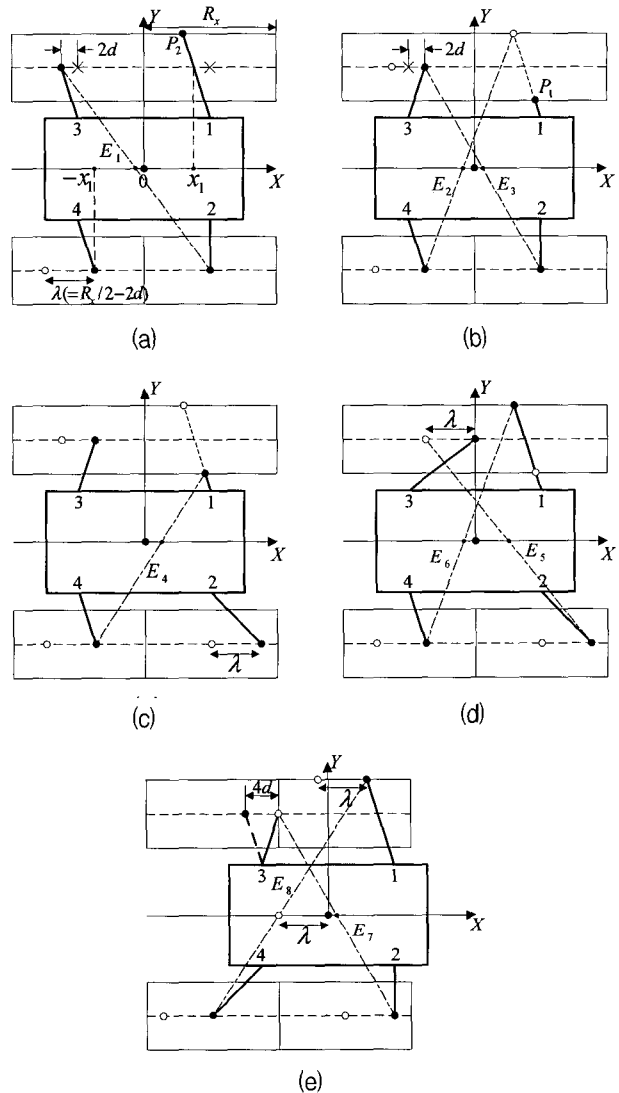


그림 5. 개선된 안정여유도를 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새: 다리 1의 관절 1 고착, $0 < x_1 \leq R_x/2$. (a) 초기 상태, 다리 4 이동, (b) 다리 3, 다리 1 착지점 조정, (c) 다리 2 이동, (d) 다리 1 착지점 조정, 다리 3 이동, (e) 다리 1 이륙 후 무게 이동, 다리 3 착지점 조정.

Fig. 5. Fault-tolerant gait of quadruped robots having positive stability margin: locked failure at joint 1 of leg 1, $0 < x_1 \leq R_x/2$. (a) initial state and swing leg 4, (b) adjust leg 3 and leg 1, (c) swing leg 2, (d) adjust leg 1 and swing leg 3, (e) lift off leg 1 and move the body, and adjust leg 3.

를 P_2 로 다시 조정하면 다리 3이 이륙한 후 걸음새가 양의 안정여유도를 얻을 수 있다.

v) 그림 5(e): 마지막으로 그림 5(e)에서 다리 1이 이륙한 후 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 이동하

는 내고장성 걸음새가 완성된다. 또 다음 주기를 시작하기 위해서 다리 3의 착지점을 $-X_b$ 축 방향으로 $4d$ 만큼 조정하면 걸음새 자세가 다시 그림 5(a)의 초기 상태가 된다. 그림 5(e)에서 로봇 몸체가 움직였으므로 작업 영역도 $+X_b$ 축 방향으로 옮겨져야 하지만, 로봇의 전진을 명확하게 보여주기 위해서 작업 영역의 위치를 고정시켜 그렸다.

x_1 이 $0 < x_1 \leq R_x/2$ 의 범위에 있을 때에는 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 다리 3이 최대로 이동할 수 있는 거리는 $R_x/2 - 2d$ 이다. 따라서 걸음새의 보폭 $\lambda = R_x/2 - 2d$ 와 같이 정의된다. 그림 5의 각 단계에서 안정여유도를 결정하는 지지 다각형 변 $E_1 \sim E_8$ 와 무게 중심의 상대적인 위치를 관찰하면 제안된 걸음새가 항상 양의 안정여유도를 유지하고 있다는 사실을 알 수 있다.

한편 x_1 이 $R_x/2 < x_1 \leq R_x$ 의 범위에 있을 때에도 내고장성 걸음새의 다리 이동 순서는 그림 5와 동일하게 나온다. 하지만 다리 1의 기본 착지점에 대한 원점 대칭 위치가 $[-R_x, -R_x/2]$ 사이에 놓여지므로 다리 4가 초기 위치에서 이동할 수 있는 거리가 제한된다. 본 논문에서는 그림 6에 나타낸 것과 같이 다리 4의 초기 위치를 작업 영역 뒤 경계점으로 설정하여 사족 보행 로봇이 기존 내고장성 걸음새와 동일하게 최대 보폭 $\lambda = R_x - x_1$ 을 가지게 하였다(식 (1) 참조). 그림에서 E_1 과 E_2 는 다리 2와 다리 3이 이동 상태가 될 때 안정여

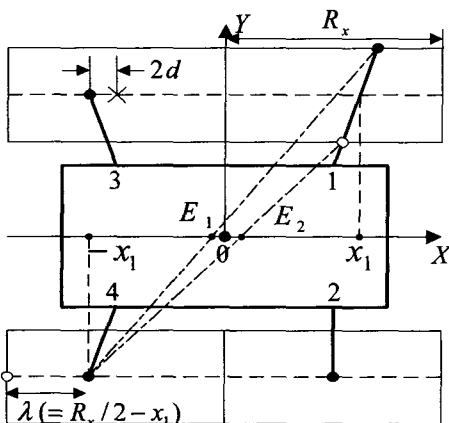


그림 6. 개선된 안정여유도를 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새: 다리 1의 관절 1 고착, $R_x/2 < x_1 \leq R_x$ 에서의 초기 상태.

Fig. 6. Fault-tolerant gait of quadruped robots having positive stability margin: locked failure at joint 1 of leg 1 and $R_x/2 < x_1 \leq R_x$ at its initial state.

유도를 결정하는 지지 다각형 변을 각각 가리킨다.

3. 관절 2, 관절 3의 고장

다리 1의 관절 2, 또는 관절 3이 고착되는 고장 사건에서는 관절 1의 경우와 달리 고장 난 다리의 기본 착지점 x_1 의 상대적인 위치와 상관없이 내고장성 걸음새가 동

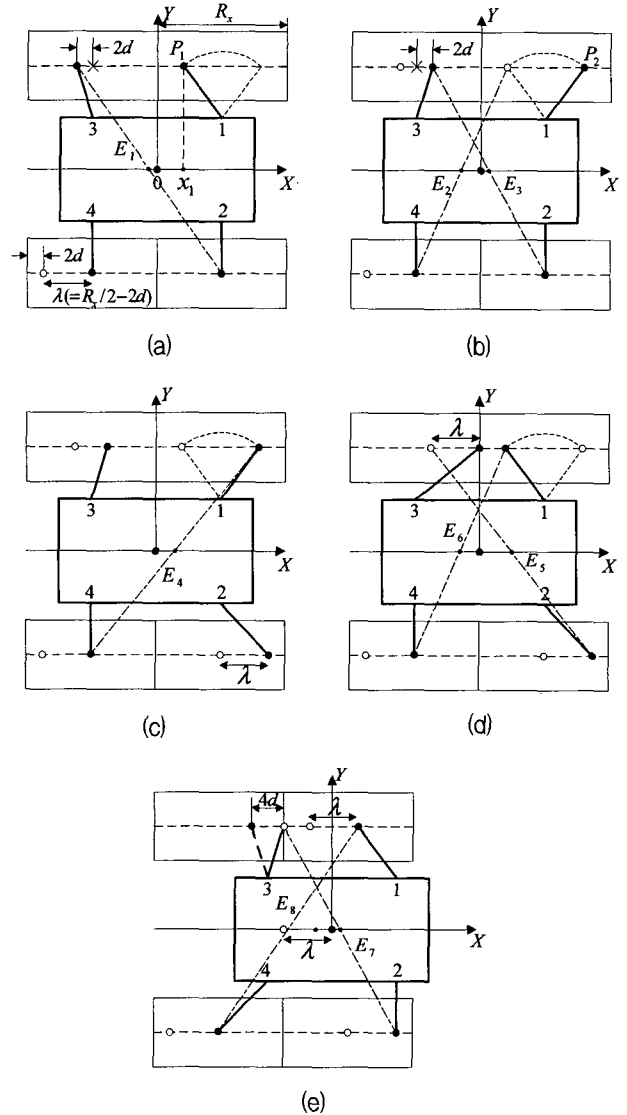


그림 7. 개선된 안정여유도를 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새: 다리 1의 관절 2 (또는 관절 3) 고착. (a) 초기 상태, 다리 4 이동, (b) 다리 3, 다리 1 착지점 조정, (c) 다리 2 이동, (d) 다리 1 착지점 조정, 다리 3 이동, (e) 다리 1 이륙 후 몸체 이동, 다리 3 착지점 조정.

Fig. 7. Fault-tolerant gait of quadruped robots having positive stability margin: locked failure at joint 2 (or joint 3) of leg 1. (a) initial state and swing leg 4, (b) adjust leg 3 and leg 1, (c) swing leg 2, (d) adjust leg 1 and swing leg 3, (e) lift off leg 1 and move the body, and adjust leg 3.

일하게 결정된다. 이것은 고장 난 다리가 그림 4(c)에서 표시된 것처럼 정상적으로 작동하는 관절 1을 움직여 중선 위에 존재하는 가능한 두 개의 착지점 P_1, P_2 중 하나에 자유롭게 착지할 수 있기 때문이다(P_1 과 P_2 가 중선 위에 존재할 기구학적 조건은 이전 연구^[8] 참조). 그림 7은 다리 1의 관절 2 또는 관절 3에 고착고장이 발생한 사족 보행 로봇이 양의 안정여유도를 가지면서 걷는 내고장성 걸음새의 한 주기를 나타낸다. 본 걸음새는 다리 1의 착지점 P_1 과 P_2 의 위치만 다를 뿐 그림 5에 표시된 관절 1이 고장 난 경우와 일치된 동작을 보인다. 또 보폭도 $\lambda = R_x/2 - 2d$ 로 그림 5의 걸음새와 동일하게 결정된다.

IV. 걸음새 성능 비교

1. 보폭

본 장에서는 제안된 내고장성 걸음새의 우수성을 입증하기 위해서 기존 걸음새와 성능 비교를 실시한다. 성능 비교 과정을 간단하게 하기 위해서 사족 보행 로봇의 몸체 이동과 다리 움직임은 모두 일정한 속력으로 이루어진다고 가정한다. 먼저 그림 5와 그림 7에서 제안된 걸음새의 보폭을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\lambda = \begin{cases} \begin{matrix} R_x/2 - 2d, & 0 < x_1 \leq R_x/2 \\ R_x - x_1, & R_x/2 < x_1 \leq R_x \end{matrix} & : \text{관절 1 고착} \\ R_x/2 - 2d & : \text{관절 2 고착} \end{cases} \quad (4)$$

위 식과 기존 걸음새의 보폭 식 (1)을 비교해보면 고장 난 다리 1의 기본 착지점 위치 x_1 이 $0 < x_1 \leq R_x/2$ 의 범위에 있을 때에는 제안된 새로운 걸음새의 보폭이 $2d$ 만큼 줄어든다는 사실을 알 수 있다. 이것은 내고장성 걸음새가 양의 안정여유도를 가지게 하기 위해서 다리 3의 착지점이 미리 $2d$ 만큼 앞으로 조정되었기 때문이다(그림 5(b) 참조). 즉 제안된 걸음새는 보폭의 감소를 희생하면서 걸음새 안정여유도 개선에 초점을 맞추도록 설계되었다고 말할 수 있다.

2. 안정여유도

한 주기 동안의 걸음새 안정여유도 변화를 알아보기 위해서 각 단계에서 걸음새가 가지는 세로 안정여유도를 구한다. 지지 다각형 변 E_i ($i = 1, \dots, 8$)가 만드는 세로

안정여유도 $S(E_i)$ 를 로봇 매개 변수들로 표시하면 식 (5)와 같이 계산된다(유도 과정은 생략).

i) 관절 1의 고착:

$$\begin{aligned} S(E_1) &= d \\ S(E_2) &= \frac{R_y(R_x/2 - U \tan \hat{\theta}_1)}{4U + 4W + 3R_y} \\ S(E_3) &= d \\ S(E_4) &= \frac{R_y(R_x/2 - U \tan \hat{\theta}_1)}{4U + 4W + R_y} \\ S(E_5) &= \frac{\lambda + 2d}{2} \\ S(E_6) &= \frac{R_y(R_x/2 - U \tan \hat{\theta}_1)}{4U + 4W + 3R_y} \\ S(E_7) &= \lambda \left(1 - \frac{t}{t_b}\right) + d, \quad 0 \leq t \leq t_b \\ S(E_8) &= \frac{R_y(R_x/2 - U \tan \hat{\theta}_1) + 2\lambda(U + W + R_y)}{4U + 4W + 3R_y} \end{aligned}$$

ii) 관절 2(관절 3)의 고착

$$\begin{aligned} S(E_1) &= d \\ S(E_2) &= D/2 \\ S(E_3) &= d \\ S(E_4) &= D/2 \\ S(E_5) &= R_x/4 \\ S(E_6) &= D/2 \\ S(E_7) &= \lambda \left(1 - \frac{t}{t_b}\right) + d, \quad 0 \leq t \leq t_b \\ S(E_8) &= (\lambda + D)/2 \end{aligned}$$

위 식에서 t_b 는 로봇 몸체가 초기 위치에서 보폭 λ 만큼 이동한 후 정지하는 데 걸리는 시간을 가리키며, D 는 식 (3)에서 정의된 값이다.

관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇이 제안된 내고장성 걸음새로 평탄 지형을 걷는 사례 연구를 들어서 시간에 대한 안정여유도 변화를 명확하게 확인해본다. 먼저 사족 보행 로봇이 가지는 매개 변수를 $R_x = 40\text{cm}$, $R_y = 20\text{cm}$, $W = 5\text{cm}$, $U = 15\text{cm}$, $l_1 = 30\text{cm}$, $l_2 = 30\text{cm}$ 라고 설정한다. 또 사족 보행 로봇의 관절 1이 $\hat{\theta}_1 = -18^\circ$, 관절 2가 $\hat{\theta}_2 = 65^\circ$ 지점에서 고착되는 고장이 각각 발생한다고 정한다. 로봇 몸체와 다리의 이동 속력은 모두 5cm/s 로 일정하며, 걸음새 각 단계

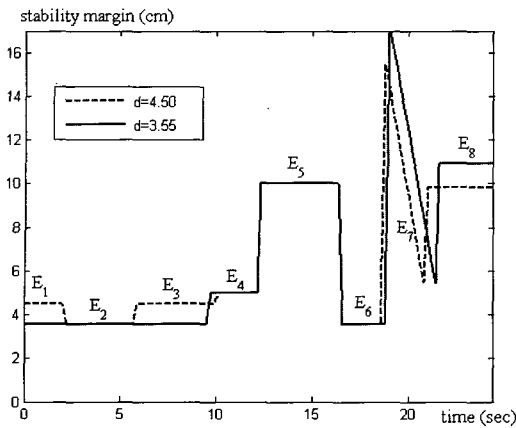


그림 8. 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음세의 안정여유도: 다리 1의 관절 1 고착, $\hat{\theta}_1 = -18^\circ$.

Fig. 8. Stability margin of the fault-tolerant gait for a quadruped robot: locked failure at joint 1 of leg 1 with $\hat{\theta}_1 = -18^\circ$.

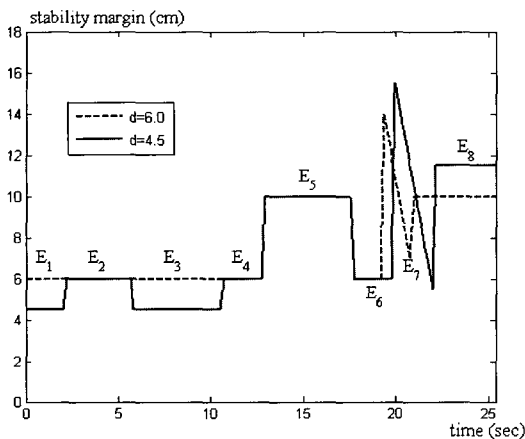


그림 9. 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음세의 안정여유도: 다리 1의 관절 2 고착, $\hat{\theta}_2 = 65^\circ$.

Fig. 9. Stability margin of the fault-tolerant gait for a quadruped robot: locked failure at joint 2 of leg 1 with $\hat{\theta}_2 = 65^\circ$.

사이에 시간 지연이 하나도 없다고 가정한다.

그림 8은 관절 1이 $\hat{\theta}_1 = -18^\circ$ 에 고착되었을 때 내고장성 걸음새가 가지는 안정여유도를 시간에 대한 그래프로 나타낸 것이다. 양의 안정여유도를 만들기 위해서 다리 3의 착지점이 조정되는 거리 d 는 임의로 변경할 수 있는 값이다. 따라서 안정여유도와 걸음새 보폭을 적절한 값으로 결정하는 d 를 찾을 수 있다. 그림 8에서 점선으로 표시된 함수는 d 를 4.50cm로 설정했을 때 걸음새가 가지는 세로 안정여유도 변화이다. 그림에서 알 수 있듯이 안정여유도의 최소값은 $S(E_2) = S(E_6) = 3.55$ (cm)

이다. 그런데 앞서 나와 있듯이 $S(E_2)$ 는 d 에 상관없이 로봇 매개 변수와 관절 변수로만 이루어지는 값이므로 d 를 더 작게 해서 $S(E_2)$ 값과 똑같이 되도록 하면 최소 안정여유도는 그대로 유지하면서 걸음새의 보폭을 더 늘릴 수 있다(식 (4) 참조). 그림 8에서 실선으로 표시된 값들이 바로 $d = S(E_2) = 3.55$ cm로 설정한 후 측정된 걸음새 안정여유도이다. 즉 최소 안정여유도가 3.55cm인 내고장성 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭은 아래와 같이 나온다.

$$\begin{aligned} \lambda &= R_x/2 - 2d \\ &= 40/2 - 2 \cdot 3.55 = 12.9 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

제한된 내고장성 걸음새가 한 주기 내내 일정 값 이상의 안정여유도를 가지고 관절고착고장을 극복하는 동작을 보인다는 사실을 그림 8에서 확인할 수 있다.

그림 9는 다리 1의 관절 2가 $\hat{\theta}_2 = 65^\circ$ 각도에서 고착되었을 때 사족 보행 로봇이 가지는 내고장성 걸음새의 안정여유도를 도시한 그래프이다. $S(E_2) = 6$ cm이므로 관절 1 고착의 경우와 마찬가지로 d 를 6cm로 설정하면 점선으로 표시된 안정여유도 변화를 얻을 수 있으며, 이때 걸음새 보폭은 $\lambda = 8$ cm가 된다. d 를 $S(E_2)$ 보다 더 작은 값으로 설정하면 걸음새 안정여유도는 줄어들고 보폭을 늘어날 것이다. 그림 9에서 실선으로 표시된 그래프는 d 를 4.5cm로 설정한 후 얻어지는 안정여유도이다. 그림 8과 마찬가지로 그림 9의 결과도 제안된 내고장성 걸음새가 보폭을 희생하면서 양의 안정여유도를 유지한다는 사실을 입증한다.

한편 사족보행로봇이 양의 안정여유도를 얻기 위해서 필요한 다리 이동 횟수와 걸음새의 속도는 임계 안정여유도를 가지는 기존 걸음새에 비해서 더 늘어난다. 기존 걸음새^[3]는 한 주기 동안 고장 난 다리의 수동적인 이동을 포함해서 네 번의 다리 이동을 수행한다. 하지만 제안된 새로운 걸음새는 그림 8, 9에서 확인할 수 있듯이 8번의 다리 이동을 가진다. 다리 이동 횟수가 늘어나므로 걸음새의 속도도 필연적으로 떨어질 것이다. 즉 제안된 걸음새는 양의 안정여유도를 가지기 위해서 보폭뿐만 아니라 속도의 성능도 떨어진다는 사실을 알 수 있다.

V. 결 론

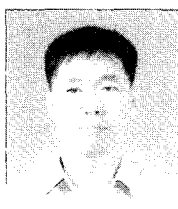
본 논문은 사족 보행 로봇을 위한 내고장성 걸음새의

약점 중의 하나로 지적받아 왔던 임계 안정여유도 문제를 해결하였다. 제안된 내고장성 걸음새는 기존 걸음새와 동일한 다리 이동 순서를 가지나 다리가 이동하기 전에 걸음새가 양의 안정여유도를 가지도록 지지 상태에 있는 다리들의 착지점을 조정하는 과정을 거친다. 본 논문에서는 관절고착고장의 고장 후 특성을 분석하여 사족 보행 로봇이 이러한 다리 착지점 조정 과정을 성공적으로 수행한다는 사실을 검증하였다. 또한 고착 고장이 발생한 관절의 위치에 따라 내고장성 걸음새의 다리 움직임 순서, 착지점 위치 등을 정의하고 동작 과정을 상세히 기술하였다. 또한 사례 연구를 통해서 새로운 내고장성 걸음새와 기존 걸음새 사이의 성능 비교를 수행하여 제안된 걸음새의 적용 가능성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Pratt, "Legged robots at MIT: what's new since raibert," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 15-19, 2000.
- [2] M. Hassan and L. Notash, "Design modification of parallel manipulators for optimum fault tolerance to joint jam," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 5, pp. 559-577, 2005.
- [3] 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, 2002.
- [4] J.-M. Yang, "Crab walking of quadruped robots with a locked joint failure," *Advanced Robotics*, vol. 17, no. 9, pp. 863 - 878, 2003.
- [5] C.-L. Shih and C. A. Klein, "An adaptive gait for legged walking machines over rough terrain," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 4, pp. 1150-1155, 1993.
- [6] P. Gonzalez de Santos and M. A. Jimenez, "Path tracking with quadruped walking machines using discontinuous gaits," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 383-396, 1995.
- [7] S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
- [8] 양정민, "다리 꺾음을 조정하는 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새," *전자공학회 논문지*, 제42권, SC 제3호, pp. 105-114, 2005.

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>