

사각보행로봇의 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새

양 정 민(楊正敏)

한국전자통신연구원 컴퓨터소프트웨어
기술연구소 멀티미디어연구부
전화:(042)860-6611/팩스:(042)860-6671

김 종 환(金鍾煥)

한국과학기술원
전기 및 전자공학
전화:(042)869-3448/팩스:(042)869-8010

Fault Tolerant Gaits of Quadruped Robots for Locked Joint Failures

Jung-Min Yang

Multimedia Dept., C/S Tech. Lab., ETRI
E-mail : jmyang@etri.re.kr

Jong-Hwan Kim

Dept. Electrical Engineering, KAIST
johkim@vivaldi.kaist.ac.kr

Abstract

In this paper, an algorithm of fault tolerant gaits for a quadruped robot is proposed for the purpose of tolerating a locked joint failure. The robot can continue its walking after a locked failure occurs to a joint of a leg by the proposed algorithm. In particular, a periodic gait is proposed as a special form of the proposed algorithm and its existence and efficiency are analytically proven.

[3]. 관절고착고장이 발생하면 다리의 자유도가 줄어들어 활동 가능 공간이 축소되지만 다리의 지지력은 부분적으로 보존된다. 본 논문에서는 고장이 발생한 후에도 다각 보행 로봇이 보행을 계속할 수 있게 하는 내고장성 기법을 제안한다. 관절고착고장을 감내할 수 있는 걸음새의 일반적인 형태를 사각 보행 로봇의 평탄 지형 직선 주행에 대해서 제안한다. 또한 제안한 내고장성 걸음새 형태 내에서 주기 걸음새가 존재한다는 사실을 증명하고, 그 효율성을 물결 걸음새 주행 예를 들어서 보인다.

I. 서론

정적 걸음새(static gait)로 걷는 다각 보행 시스템은 기구학적 특성상 다리 개수에서 여유도(redundancy)를 가진다. 즉, 다리 하나가 고장이 나서 정상동작을 할 수 없을 경우에도 다각 보행 시스템은 안정도(stability)를 유지하면서 걸을 수 있는 능력이 있다. 하지만 이러한 다각 보행 시스템의 내고장성(fault tolerance)에 대한 이론적 규명과 체계에 대한 연구는 별로 되어 있지 않다. [1]과 [2]에서는 다각 보행 로봇 다리의 링크(link)가 파손되는 고장이 발생했을 때 고장과 보행 로봇 안정도와의 관계를 이론적으로 정립하고 링크파손고장(broken link failure)에 대한 내고장성 걸음새를 제안하였다.

본 논문에서는 [1-2]의 내용을 확장하여 "관절고착고장(locked joint failure)"을 극복하기 위한 내고장성 걸음새를 제안한다. 논문에서 고려하고 있는 보행 로봇은 네 개의 다리가 달린 대칭적 구조로 이루어져 있고 정적 걸음새를 가진다. 로봇의 다리는 세 개의 회전관절(revolute joint)과 두 개의 링크로 이루어져 삼차원 운동을 할 수 있다. 관절고착고장은 다리의 관절 하나가 고착되어서 제어를 할 수 없게 되는 고장이다

II. 사각 보행 로봇의 구조

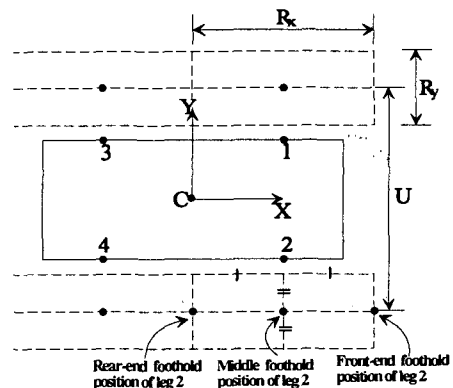


그림 1: 사각 보행 로봇의 이차원 모델.

그림 1은 논문에서 고려하는 사각 보행 로봇의 단순화된 이차원 모델이다. 보행 로봇은 직사각형의 몸체를 지닌 대칭적 구조로 이루어져 있다. C는 보행 로봇의 무게중심점(center of gravity)이며, 점선으로 나타낸 직사각형들은 로봇의 현재 위치에서 각 다리가 지

면에 디딜 수 있는 작업영역(working area)이다. 모든 다리의 작업영역은 동일한 크기를 가진다. R_x 와 R_y 를 작업영역의 길이와 너비라고 정의한다.

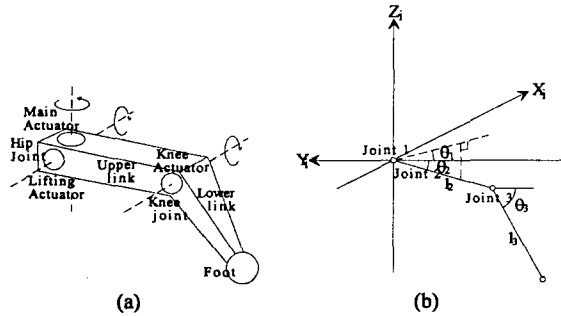


그림 2: 2축 다리: (a) 투시도. (b) 다리 좌표축.

그림 2는 사각 보행 로봇에 달린 다리의 기구학적 구조이다. 그림에 나와 있는 것처럼 다리는 두 개의 축과 세 개의 회전관절(관절1, 관절 2, 관절3)로 이루어진 매니퓰레이터 형태이다. 그림 2(b)는 각 다리의 관절1을 원점으로 하는 다리 좌표축이다. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 은 각 관절의 각도(joint angle)를 표시한다.

III. 관절고착고장

관절고착고장은 다리의 관절 하나가 어떤 원인에 움직이지 못 해서 관절각도가 고정되는 고장이다. 관절고착고장이 다리의 관절에 발생하면 다리의 자유도(degree of freedom)는 줄어들게 되어 운동 영역이 축소된다.

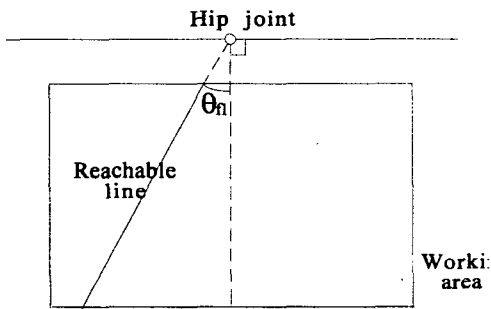


그림 3: 관절1에서 관절고착고장 발생.

그림 3은 관절고착고장이 관절1에서 발생하였을 때 줄어든 다리의 운동영역을 지표면에 투시한 모습이다. 관절1의 각도는 θ_1 에 고정되어 있고 고장이 일어난 다리는 두 개의 축이 이루는 평면 위에서 마치 2축 회전 매니퓰레이터(revolute manipulator)와 같은 동작을 취한다. 따라서 지표면에 투시된 다리의 운동영역은 그림과 같이 직선이 된다. 그림 4는 관절고착고장이

관절2에서 발생하였을 때 줄어든 다리의 운동영역을 표시한 것이다. 이 경우 관절1에 의해서 다리의 전후 스윙(swing)은 자유롭게 할 수 있으나 관절2가 고착되어 있으므로 다리의 지지점은 지표면의 특정 원호를 그리면서 지지할 수밖에 없게 된다(그림 4(a)). 또한 지지점을 지표면에서 떼어 내는 동작을 취할 때에도 관절2가 고장이 났기 때문에 관절3만을 이용해야 한다(그림 4(b)). 관절3이 고장난 후의 다리 운동영역 변화는 관절2의 경우와 비슷하기 때문에 그 설명을 생략한다.

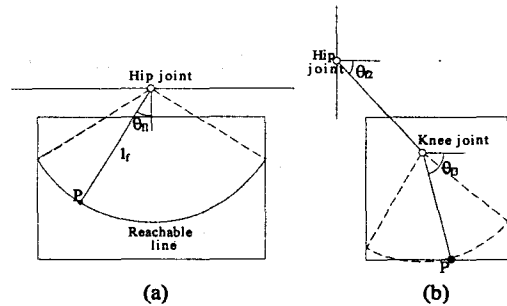


그림 4: 관절2에서 관절고착고장 발생: (a) 평면도. (b) 측면도.

IV. 내고장성 걸음새

본 절에서는 관절고착고장이 다리의 관절 하나에 발생했을 때 주행을 계속할 수 있도록 하는 사각 보행 로봇의 내고장성 걸음새를 제안한다. 문제를 단순화시키기 위해 사각 보행 로봇은 아래와 같은 동작을 취한다고 가정한다.

- 1) 사각 보행 로봇은 완전 평탄 지형에서 로봇 몸체의 경도좌표(longitudinal axis)를 따라 직선 운동을 한다.
- 2) 다리의 지지점 궤적(foohold trajectories)은 각 다리 작업영역의 중선 위에 있다.
- 3) 로봇 몸체는 지표면과 평행하다.
- 4) 보행 로봇의 주행 중 관절고착고장은 한 번만 발생한다.

본 논문에서는 관절1에서 발생하는 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새를 제안한다. 다른 관절에 발생하는 고장을 위한 걸음새도 관절1의 경우와 비슷하게 유도할 수 있을 것이다.

관절고착고장이 어떤 다리의 관절1에 발생하면 그 다리는 로봇 몸체를 지탱할 수는 있으나 스스로 전후 이동을 하지 못 하게 된다. 또한 고장이 발생한 다리의 지지점이 지표면을 딛고 있을 때에도 관절1이 고착되어 있으므로 다리가 몸체의 이동에 맞게 관절각도를 바꿀 수 없게 된다. 따라서 관절1에 발생한 관절고착고장을 감내하기 위해서 보행 로봇은 몸체의 이동 시 고장난 다리를 관절2와 관절3을 이용해서 항상 들어주

어야 한다. 이때 고장난 다리는 몸체의 운동에 따라서 전진하는 수동적 이동(passive swing)을 함으로써 로봇이 주행을 계속할 수 있게 한다.

그림 5는 관절1에서 발생한 관절고착고장을 감내하기 위한 사각 보행 로봇의 내고장성 주행 알고리즘을 도식한 것이다. 그림5의 알고리즘은 다음과 같은 흐름을 가진다.

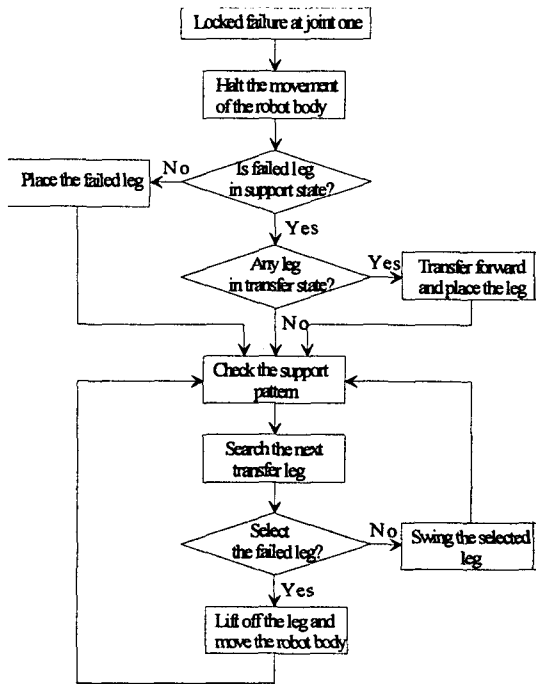


그림 5: 관절고착고장을 위한 사각 보행 로봇의 내고장성 걸음새 알고리즘.

관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새 알고리즘:

- 1) 관절1에 발생한 관절고착고장이 발견되면 사각 보행 로봇은 몸체의 이동을 멈춘다.
- 2) 고장이 발생했을 때 고장난 다리의 지지점이 지표면을 떠난 이동상태(transfer state)에 있었으면 그 다리를 지표면에 놓아 지지상태(support state)로 둔다. 고장난 다리가 지지상태에 있었으면 이동상태에 있는 다리가 있는지 확인한다.
- 3) 이동상태에 있는 다리가 존재하면 그 다리를 끝까지 이동한 다음 지지시킨다. 이동상태에 있는 다리가 존재하지 않으면 현재의 지지다각형(support pattern)[4]을 구해서 다음 이동할 다리를 결정한다.
- 4) 다음 이동할 다리가 고장난 다리가 아니면 몸체를 움직이지 않고 다리를 이동한다. 만약 다음 이동할 다리가 고장난 다리라면 그 다리를 지표면에서 들어올린 다음 몸체를 이동한다.

2)에서 알 수 있듯이 고장난 다리는 더 이상 전진을 할 수 없으므로 고장이 발생한 즉시 그 자리에 지지점을 내려놓아야 한다. 또한 앞에서 언급했듯이 4)에서

고장난 다리는 몸체의 이동에 따라서 수동적인 이동을 함으로써 로봇의 주행을 계속하게 한다.

위 알고리즘은 내고장성 걸음새의 일반적인 특징을 나타냈을 뿐 보폭(stride length)이나 다리의 이동 순서 등은 결정하지 않는다. 본 논문에서는 위 알고리즘을 만족하는 걸음새 중 주기적 걸음새(periodic gait)를 제안하여 그 효율성을 보인다. 논문에서 제안하는 주기적 걸음새는 주기성을 가지기 때문에 관절고착고장이 발생하여도 절대 dead-lock 상태에 빠지지 않는 장점을 지닌다. 또한 다리가 몸체의 이동에 대해 항상 전진하면서 최대의 보폭을 내기 때문에 내고장성 걸음새 중 속도와 보폭면에서 가장 좋은 특성을 지닌다. 그림 6은 제안된 내고장성 주기적 걸음새를 나타낸 것이다. 그림6은 관절고착고장이 다리1에서 발생했을 경우이다. 다른 다리에서 발생하는 고장을 위한 걸음새는 대칭성을 이용해서 그림6으로부터 도출할 수 있다.

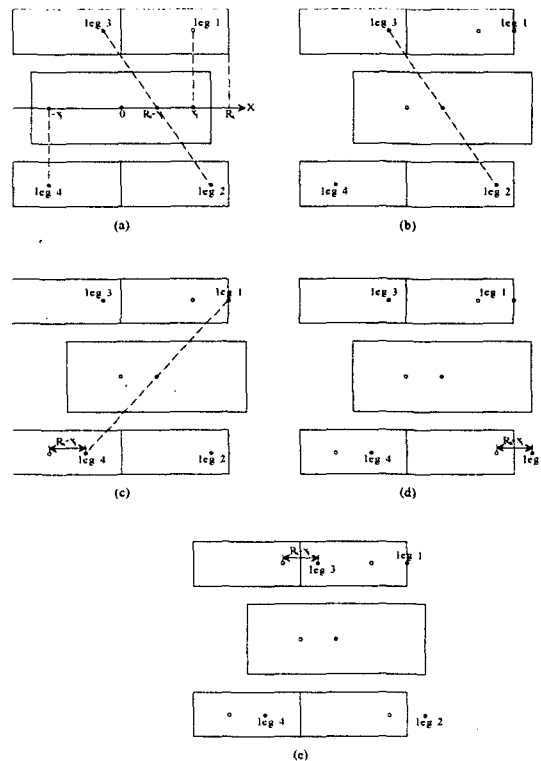


그림 6: $R_x/2 \leq x_1 \leq R_x$ 일 때 관절1에 발생한 관절고착고장을 감내하기 위한 내고장성 주기적 걸음새: (a) 다리1 들기. (b) 몸체 이동. (c) 다리4 이동. (d) 다리2 이동. (e) 다리3 이동.

그림6에서 x_i 는 다리 i 의 지지점의 X축 좌표를 표시한다. 그림6(a)을 보면 알 수 있듯이 다리의 지지점들은 로봇의 무게중심점 C를 원점으로 하는 X-Y 좌표계에서 표시된다. 이때 x_i 의 범위는 아래와 같이 결정된다.

$$0 \leq x_1, x_2 \leq R_x, \\ -R_x \leq x_3, x_4 \leq 0.$$

정의 1: 관절1에서 발생하는 관절고착고장을 위한 내고장성 주기적 걸음새

1) 초기 지지점:

$$i) R_x/2 \leq x_1 \leq R_x \quad \begin{cases} x_2 + x_3 = 2(R_x - x_1) \\ x_4 = -x_1 \end{cases}$$

$$ii) 0 \leq x_1 \leq R_x/2 \quad \begin{cases} x_2 = R_x \\ x_3 = 0 \\ x_4 = -x_1 \end{cases}$$

2) 보폭

$$\lambda = \begin{cases} R_x - x_1 & \text{if } R_x/2 \leq x_1 \leq R_x \\ R_x/2 & \text{if } 0 \leq x_1 < R_x/2 \end{cases}$$

3) 다리 이동 순서

- a) 다리1을 들어올려 이동상태로 변경
- b) 보폭 λ 로 몸체 이동
- c) 보폭 λ 로 다리4 이동
- d) 보폭 λ 로 다리2(또는 다리3) 이동
- e) 보폭 λ 로 다리3(또는 다리2) 이동

정리1: 정의1에서 정의된 주기적 걸음새는 다리1의 관절1에 발생하는 관절고착고장을 감내하는 내고장성 걸음새 중 유일한 주기적 걸음새이며, 이때 사각 보행 로봇의 보폭은 최대가 된다.

증명: [5] 참조.

정의1의 1)에서 알 수 있듯이 $R_x/2 \leq x_1 \leq R_x$ 일 때 다리2와 다리3의 지지점의 초기 위치는 두 지지점을 연결하는 선의 중점이 원점으로부터 $R_x - x_1$ 만큼 떨어져서 설정되어 있다. 그 상태에서 몸체가 $R_x - x_1$ 만큼 이동하면 그림6(b)에서처럼 고장난 다리1은 작업영역의 우측 경계점까지 수동 이동되어 최대의 보폭 $\lambda = R_x - x_1$ 을 가지게 된다. 또한 그림6(c)~(e)에서처럼 나머지 다리들도 로봇의 안정도를 유지하면서 λ 만큼 이동할 수 있고 주기성도 보존된다. 한편 $0 \leq x_1 \leq R_x/2$ 일 때에는 다리2와 다리3의 지지점의 중점이 가지는 값이 $R_x/2$ 보다 클 수 없게 되므로 보폭은 $\lambda = R_x/2$ 로 고정된다. 따라서 관절고착고장이 발생했을 경우 고장난 다리의 위치가 몸체의 무게중심점과 가까울수록 로봇이 가지는 내고장성 주기적 걸음새의 보폭은 더 커진다는 사실을 알 수 있다.

V. 물결 걸음새에서의 내고장성 걸음새

본 논문에서 제안한 내고장성 걸음새의 효율성을 보이기 위해서 물결 걸음새(wave gait)를 가지는 사각 보행 로봇이 다리1의 관절1에서 관절고착고장이 발생한 후 제안된 내고장성 주기적 걸음새로 변환하는 과정을 설명한다. 지면관계상 일반적인 경우의 변환과정

은 생략하고([5] 참조) 그림7에서처럼 디듀티(duty factor)[4] 5/6을 가지는 물결 걸음새에서 다리1의 지지점이 작업영역 길이의 1/6만큼 되게 로봇 몸체가 이동한 순간 고장이 발생한 경우에 대해서만 도시한다. 먼저 보행 로봇의 안정도를 확보하기 위해 다리4는 무게중심점이 다리1의 지지점과 이루는 직선의 중점에 오도록 이동한다(그림8(a)). 다리가 이동한 후에는 다리2와 다리3이 보폭 λ 만큼 이동한다(그림8(b)). 이후 다리1을 든 다음 로봇 몸체가 이동하여(그림8(c)) 한 주기를 마치게 된다(그림8(d)).

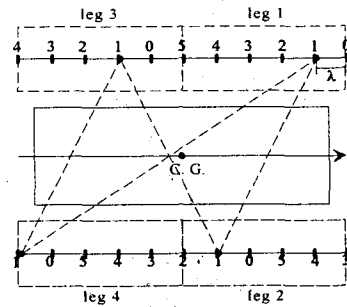


그림 7: 물결 걸음새.

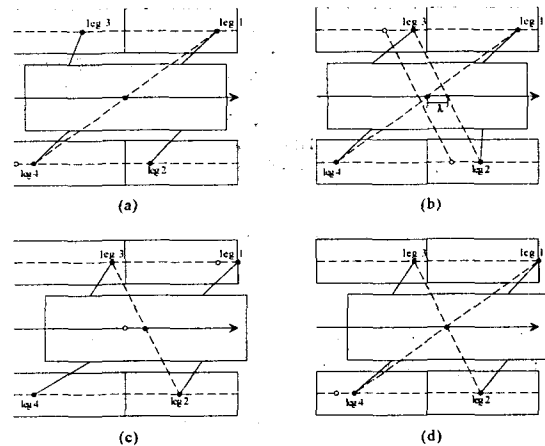


그림 8: 관절고착고장의 발생 후 내고장성 주기적 걸음새로의 변환.

참고문헌

- [1] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B, vol. 28, no. 1, pp. 109-116, Feb. 1998.
- [2] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Optimal fault tolerant gait sequence of the hexapod robot with overlapping reachable areas and crab walking," IEEE Trans. Syst. Man Cybern. A, vol. 29, no. 2, pp. 224-235, Mar. 1999.

- [3] C. L. Lewis and A. A. Maciejewski, "Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for locked joint failures," IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 13, no. 4, pp. 622-629, Aug. 1997.
- [4] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. SMC-9, no. 4, pp. 176-182, Apr. 1979.
- [5] 양정민, "다각 보행 로봇의 내고장성 걸음새," 한국과학기술원 박사학위 논문, 1999.