

고장이 존재하는 육족 보행 로봇을 위한 대수적 힘 분배

Algebraic Force Distribution in Hexapod Walking Robots with a Failed Leg

양정민

Jung-Min Yang

대구가톨릭대학교 전자공학과

요 약

본 논문에서는 육족 보행 로봇의 새로운 힘 분배 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 고려하는 육족 보행 로봇은 다리 하나에 관절고착고장이 발생하여 내고장성 정적 세다리 걸음새로 보행한다. 제안되는 힘 분배 알고리즘의 핵심은 내고장성 세다리 걸음새는 정상 걸음새보다 안정도가 떨어진다는 약점이 있다. 본 논문에서 제안하는 힘 분배 알고리즘은 이러한 약점을 고려하여 내고장성 걸음새의 지지 다리가 세 개라는 성질과 Zero-Interaction Force 원리를 이용하여 최적화 기법을 쓰지 않고 대수적으로 모든 다리의 힘 성분을 구한다. 컴퓨터 시뮬레이션 사례 연구를 통해서 제안된 힘 분배 알고리즘과 기존 방법의 비교 분석을 실시하고 제안된 방법의 효용성을 입증한다.

키워드 : 걸음새 연구, 육족 보행 로봇, 힘 분배, 내고장성 걸음새

Abstract

In this paper, a novel foot force distribution algorithm for hexapod walking robots is presented. The considered hexapod robot has fault-tolerant tripod gaits with a failed leg in locked-joint failure. The principle of the proposed algorithm is to minimize the slippage of the leg that determines the stability margin of the fault-tolerant gaits. The fault-tolerant tripod gait has a drawback that it has less stability margin than normal gaits. Considering this drawback, we use the feature that there are always three supporting legs, and by incorporating the theory of Zero-Interaction Force, we calculate the foot forces analytically without resort to any optimization technique. In a case study, the proposed algorithm is compared with a conventional foot force distribution method and its applicability is demonstrated.

Key Words : Gait study, Hexapod robots, Foot force distribution, Fault-tolerant gaits.

1. 서 론

다중결합 로봇 시스템(multi-chain robotic systems)은 매니퓰레이터(manipulator) 여러 개가 서로 연쇄적으로 연결되어 유기적인 기능을 하는 로봇 시스템을 말한다. 대표적인 다중결합 로봇 시스템인 다족 보행 로봇(multi-legged walking robots)의 경우 결합된 매니퓰레이터는 다리 역할을 맡아 몸체를 지탱하거나 운반하는 일을 한다[1, 2].

정적 걸음새(static gait)를 가지는 다족 보행 로봇 시스템을 제어하기 위해서는 결합된 각 매니퓰레이터(=다리)에 대한 기구학 및 동역학, 힘/위치 제어 문제를 풀어야 할 뿐 아니라 연결된 다수의 매니퓰레이터들 사이에서 일어나는 상호 작용(coordination)을 고려해야 한다. 이 중 매니퓰레이터들이 지지하거나 들어 올리는 몸체에 가해지는 힘을 각 매니퓰레이터 말단 장치(end-effector)에 효율적으로 전달하는 '힘 분배(force distribution)'는 다중결합 로봇 시스템 제어에서 가장 기본적이고 중요한 문제이다[3].

힘 분배 문제는 정적 보행을 하는 다족 보행 로봇의 기구학적 특성상 미지 변수보다 방정식의 개수가 더 적은 부정방정식(indeterminate equation)의 형태가 된다. 즉 각 좌표축에 대해서 힘과 토크의 평형 방정식이 여섯 개 세워지지만, 몸체를 지지하는 매니퓰레이터의 개수가 세 개 이상일 때에는 미지수의 개수가 항상 더 많아진다[3].

본 연구의 목적은 고장이 존재하는 육족 보행 로봇(hexapod robot)의 다리 힘 분배 문제를 정의하고 그 해결 방법을 해석적으로 제시하는 것이다. 다중결합 로봇 시스템의 힘 분배 문제는 보행 로봇 제작에 대한 연구가 활발해지기 시작한 1980년대 초부터 주목을 받아왔다[4, 5]. 현재까지 발표된 힘 분배 문제에 대한 연구 결과들은 주로 정상적인 동작을 하는 로봇에 대한 힘 분배를 제한 최적화 문제(constrained optimization problem)로 해석하여 풀었다[6-9]. 하지만 고장이 발생해도 보행을 계속할 수 있는 내고장성 걸음새(fault-tolerant gait)[10, 11]를 가지는 다족 보행 로봇에 대한 힘 분배 문제에 대해서는 아직 연구 결과가 미미한 실정이다. 로봇 시스템의 동역학까지 고려해야 하는 힘 분배 문제에서 매니퓰레이터의 기계적인 고장이 존재한다면 로봇이 취할 수 있는 내고장성 걸음새의 특성에 맞는

접수일자 : 2008년 11월 7일

완료일자 : 2009년 7월 1일

접근 방법이 필요하다.

본 논문에서 고려하는 다중결합 로봇 시스템은 다리 하나에 관절고착고장(locked joint failure)이 발생하여 내고장성 세다리 걸음새(fault-tolerant tripod gait)로 보행하는 육족 보행 로봇이다. 관절고착고장이란 관절 하나가 어떤 이유 때문에 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서 로봇 매니플레이터에서 일어날 수 있는 대표적인 고장이다 [12].

제안되는 힘 분배 알고리즘의 핵심은 내고장성 걸음새가 가지는 안정여유도(stability margin)를 결정하는 지지 다리의 미끄러짐을 최소화시키는 것이다. 불연속적으로 움직이는 내고장성 세다리 걸음새는 안정여유도가 정상적인 걸음새보다 작으며 임계 안정여유도, 즉 로봇 몸체의 투영점이 지지 다각형의 경계에 존재하는 상태가 존재한다는 약점이 있다[13]. 본 논문에서 제안하는 힘 분배 알고리즘은 내고장성 세다리 걸음새의 지지 다리가 항상 세 개라는 성질과 Zero Interaction Force 원리[7]를 이용하여 최적화 기법을 쓰지 않고 대수적으로 모든 다리의 힘 성분을 구한다. 알고리즘을 통해서 얻어진 결과는 걸음새의 안정여유도를 결정하는 지지 다리들의 미끄러짐을 최소화시켜 현재의 안정도를 최대한 유지하도록 한다. 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션 사례 연구를 통해서 제안된 힘 분배 알고리즘과 pseudo-inverse를 이용한 기존 방법[7, 9]의 비교 분석을 실시하고 제안된 방법의 효용성을 입증한다.

2. 육족 보행 로봇의 내고장성 걸음새

2.1 로봇 모델링 및 힘 성분 설정

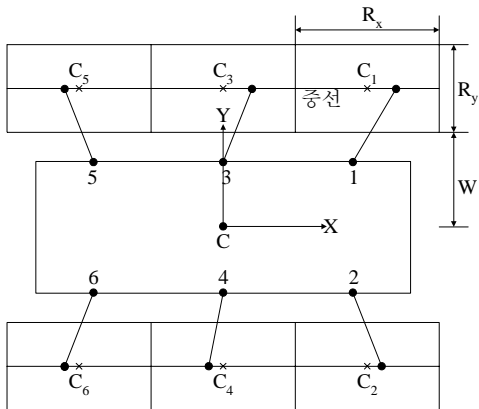


그림 1. 육족 보행 로봇 이차원 모델

Fig. 1. Two-dimensional model of a hexapod robot.

(그림 1 크기 조절: 맨 아래선이 보이게 높이 약간 키움)

그림 1은 본 논문에서 다루는 육족 보행 로봇의 이차원 모델이다. 몸체 무게중심 C를 원점으로 하는 몸체 좌표계 X-Y-Z가 달려 있으며 X축은 몸체의 세로축(longitudinal axis)과 일치한다. 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림과 같이 이차원 평면 상에 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 이동분하는 중선(middle line)이 C_i 를 지나간다. 본 논문에서는 명확한 문제 설정을 하기 위해서 모든 다

리의 궤적들이 그림 1에서 표시된 작업 영역 중선과 일치한다고 가정한다. 즉 게 걸음새와 회전 걸음새(turning gait) 등 비직선 걸음새(non-straight line gait)에 대한 힘 분배 문제는 제외한다.

그림 1에서 로봇의 다리는 착지점과 로봇 몸체 연결점 사이의 직선으로 표시되지만 실제로는 그림 2와 같이 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니플레이터(articulated manipulator)[14] 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. 관절 1(θ_1)에는 다리가 로봇 몸체에 대해서 이동할 때 쓰이는 메인 액츄에이터(main actuator)가 달려 있고, 관절 2(θ_2)와 관절 3(θ_3)은 다리가 지표면을 이륙하거나 착지할 때 사용된다. 그림 2의 모델을 가지는 다리의 발(foot)은 자유도(degree of freedom) 3을 가지며 작업 영역 어디에라도 착지할 수 있다.

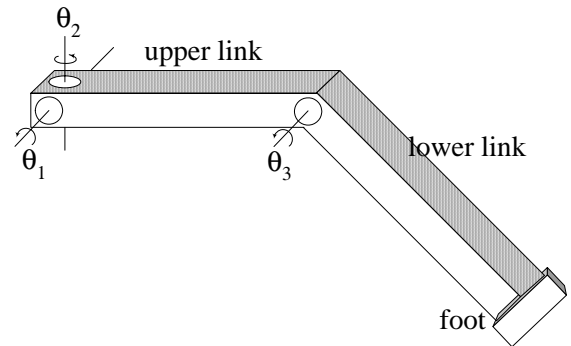


그림 2. 팔꿈치형 다리 모델.

Fig. 2. Leg model of an articulated-arm type.

그림 3은 육족 보행 로봇이 움직일 때 고려해야 하는 힘 성분을 나타낸 것이다. 지표면을 지지하고 있는 다리 i ($1 \leq i \leq 6$)의 발은 몸체 좌표계에서 표시된 힘 성분 $\mathbf{f}_i = [f_{ix}, f_{iy}, f_{iz}]^T$ 를 가진다. 그림에서 \mathbf{r}_i 는 무게중심으로부터 측정된 다리 i 착지점의 위치 벡터이다. 또 몸체 무게중심 C에는 다리의 지지력으로부터 생성된 힘 \mathbf{F} 와 모멘트 \mathbf{M} 이 각각 존재하며, 몸체 질량 m 이 만드는 중력 mg 가 $-Z$ 방향으로 존재한다. \mathbf{F} 와 \mathbf{M} , 그리고 중력 벡터는 모두 몸체 좌표계에서 정의된다.

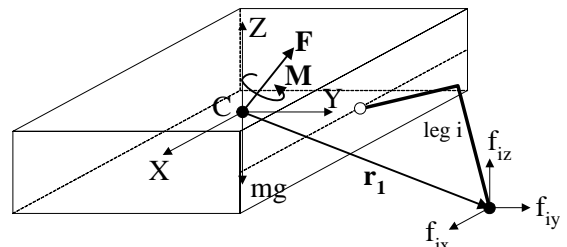


그림 3. 힘 성분.

Fig. 3. Force elements.

2.2 내고장성 세다리 걸음새

육족 보행 로봇이 보행을 할 때 지지 상태(support phase)에 있는 다리는 착지점의 위치를 그대로 유지하기 위

해서 몸체의 이동에 따라서 끊임없이 자세를 바꾼다. 그러나 관절고착고장이 발생하면 그림 2에서 표시된 관절 중 하나가 고정되기 때문에 고장 난 다리의 자코비안(Jacobian) 계수(rank)가 하나 줄어들고, 몸체의 이동에 따라 현재 착지점을 유지하도록 하는 관절 각도를 찾는 역기구학(inverse kinematics) 문제를 풀 수가 없다[10, 12]. 이동 상태(transfer phase)에 있는 다리에 고장이 발생해도 다리는 예정된 착지점에 정상적으로 착지하지 못하고 한정된 지점에만 착지할 수 있으며, 착지한 후에도 몸체가 이동하면 역시 현재 착지점을 그대로 유지하지 못한다.

관절고착고장이 초래하는 이와 같은 제한을 극복하기 위해서 기존 연구에서는 고장 난 다리가 로봇 몸체를 지지하는 역할만 할 뿐 몸체를 앞으로 밀어주거나 전진 스윙(swing)을 하지 않도록 하면서 보행에 계속 참여하는 걸음새 계획을 제안하였다[11, 13]. 앞서 말했듯이 고장 난 다리는 로봇 몸체의 임의의 위치에 따른 역기구학 문제를 풀 수 없기 때문에 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때 로봇 몸체는 정지해 있어야 한다. 이 걸음새 계획은 관절고착고장이 발생한 다리에 남아 있는 몸체 지지 능력은 계속 사용하면서 고착된 관절이 야기하는 자유도 감소 문제를 해결하기 때문에 효율적이라고 말할 수 있다.

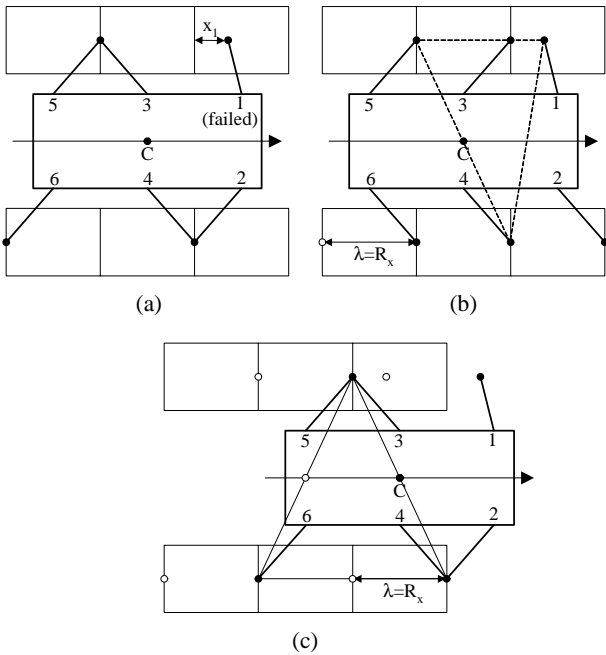


그림 4. 관절고착고장이 다리 1에 발생한 육족 보행 로봇의 내고장성 주기 세다리 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 (2, 3, 6) 이동(로봇 몸체 정지), (c) 다리 (1, 4, 5) 이동(로봇 몸체 이동).

Fig. 4. Fault-tolerant tripod periodic gait of a hexapod robot with leg 1 in locked joint failure. (a) initial state, (b) swing legs 2, 3 and 6 and (c) swing and place legs 1, 4 and 5 with body moving.

그림 4는 육족 보행 로봇이 평탄 지형을 보행할 때 이러한 내고장성 걸음새 계획을 구현해주는 세다리 주기 걸음새(tripod periodic gait)이다. 그림 4에서 관절고착고장이 발생한 다리 1은 위치 x_1 에 착지해 있다. (본 논문에서 관절고착고장은 다리 1에서 발생한다고 가정한다.) 그림 4(a)는

초기 상태이며 그림 4(b)에서 정상적인 다리의 tripod (2, 3, 6)이 보폭(stride length) $\lambda = R_x$ 를 가지면서 먼저 이동하는데, 고장 난 다리가 지지 상태에 있으므로 위에서 설명했듯이 로봇 몸체는 정지해 있어야 한다. 정상 다리 세 개가 이동한 후에는 그림 4(c)에서 정상적인 다리 두 개와 고장이 발생한 다리로 이루어진 나머지 tripod (1, 4, 5)가 로봇 몸체와 함께 이동한다. 이때 중요한 것은 고장 난 다리는 역기구학 문제를 풀 수 없기 때문에 몸체의 움직임에 따라서 수동적인 이동만 할 뿐 전진 스윙은 하지 않는다는 사실이다.

그림 4는 내고장성 세다리 걸음새의 한 주기(one cycle) 모습이다. 따라서 로봇은 초기 상태에서 그림 4(c)까지 몸체 무게 중심이 보폭만큼 이동하여 한 주기의 운동을 끝낸 다음 다시 그림 4(a)의 상태부터 시작하여 걸음새를 반복한다.

그림 4에서 표시된 삼각형은 현재 걸음새의 지지 다각형을 표시한다. 그림 4(b), (c)에서 알 수 있듯이 이 내고장성 걸음새는 몸체 무게중심의 투영점 C가 지지 다각형의 경계에 위치하는 임계 안정여유도를 가지는 상태가 존재한다.

그림 4에서는 다리 1에 관절고착고장이 발생했다고 가정하였다. 육족 보행 로봇의 대칭성에 따라서 그림 4의 걸음새는 걸음새 순서만 바꾸면 다리 1 대신 다리 2, 5, 6에 각각 관절고착고장이 발생했을 경우에도 그대로 적용된다. 또한 육족 보행 로봇의 중간 부분 다리, 즉 다리 3 또는 다리 4에 고장이 일어난 경우에 대한 내고장성 걸음새도 그림 4를 응용하여 쉽게 만들 수 있다. tripod의 조합 (1, 4, 5)와 (2, 3, 6)은 바뀌지 않으며 대신 로봇 몸체가 이동하는 phase가 고장 난 다리에 따라서 바뀐다. 예를 들어 다리 3에 관절고착고장이 발생하면 “tripod (1, 4, 5) 이동(로봇 몸체 정지)” 후 “tripod (2, 3, 6) 이동(로봇 몸체 이동)”의 순서를 가진다.

3. 대수적 힘 분배 기법

3.1 문제 설정

육족 보행 로봇의 힘 분배 문제는 그림 3에 표시된 무게 중심에서의 힘 \mathbf{F} 와 모멘트(moment) \mathbf{M} 이 시간 t 에 대해서 미리 주어졌을 때 각 지지 다리의 힘 벡터 \mathbf{f}_i 를 구하는 일이다. 다리 힘 분배 문제를 풀기 위해서 몸체 무게중심에서의 Newton-Euler 방정식을 구한다. 몸체 무게중심이 받는 힘은 중력을 제외하면 모두 다리의 지지력으로므로 다음과 같은 표준 힘 방정식이 성립한다[7].

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i = \mathbf{F} + m\mathbf{g} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i = \mathbf{M} \mathbf{s}$$

위 식에서 n 은 지지 다리의 개수이며 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ 는 중력 가속도 벡터이다. 힘과 모멘트는 모두 삼차원 벡터이므로 식 (1)은 여섯 개의 방정식을 가진다. 구해야 하는 다리 힘 성분은 모두 $3n$ 개이고 정적 보행을 하는 다족 보행 로봇에서 항상 $n \geq 3$ 이므로 식 (1)은 통상 부정방정식이 되어 대수적으로 해결할 수 없다. 하지만 본 논문에서는 육족 보행 로봇이 그림 4에 주어진 내고장성 직선 걸음새로 걷는다는 특성을 이용하여 대수적 풀이가 가능한 기법을 제안한다.

먼저 그림 4에서 볼 수 있듯이 내고장성 걸음새는 세다

리 걸음새(tripod gait)이므로 각 tripod의 이륙과 착지 사이의 시간을 무시한다면 지지 다리가 항상 세 개이다. 즉 식 (1)에서 $n=3$ 이다. 또한 그림 4의 걸음새를 가지는 육족 보행 로봇은 +X 방향으로 직선 보행을 하므로 몸체 무게중심에 작용하는 기준 힘 \mathbf{F} 의 Y축 성분은 0이어야 하며, 반대로 모멘트 \mathbf{M} 은 Y축 성분만 보유해야 한다. 마찬가지로 직선 보행 성질을 다리에 적용하면 지지 다리가 행사하는 힘 벡터의 Y축 성분 f_{iy} 는 항상 0이어야 한다. f_{iy} 가 항상 0이고 $n=3$ 이므로 값을 구해야 하는 다리 힘 성분 변수는 여섯 개로 줄어든다.

다리 1에 관절고착고장이 발생한 육족 보행 로봇 걸음새의 현재 상태가 그림 4(b), 즉 현재 지지 다리가 (1, 4, 5)라고 가정하고 위에서 밝힌 특성들을 식 (1)에 적용해본다. 기준 힘 \mathbf{F} 의 Y축 성분이 0이고 다리 힘 벡터의 Y축 성분도 없으므로 식 (1)의 힘에 대한 방정식은 다음과 같이 풀어진 다.

$$f_{1x}+f_{4x}+f_{5x} = F_x(t) \quad (2)$$

$$f_{1z}+f_{4z}+f_{5z} = F_z(t)+mg \quad (3)$$

위 식에서 $F_x(t)$ 와 $F_z(t)$ 는 \mathbf{F} 의 X축, Z축 성분을 각각 가리킨다.

몸체 좌표계에서 표시된 다리 i의 위치 벡터 성분을 $\mathbf{r}_i=[x_i \ y_i \ z_i]^T$ 라고 하고 \mathbf{M} 의 Y축 성분을 $\Phi_y(t)$ 라 하면 식 (1)의 모멘트 부분은 다음과 같이 정리된다.

$$(f_{1x}z_1-f_{1z}x_1)+(f_{4x}z_4-f_{4z}x_4)+(f_{5x}z_5-f_{5z}x_5) = \Phi_y(t) \quad (4)$$

그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 내고장성 걸음새는 현재 상태에서 무게중심의 투영점이 지지 다각형(support pattern)의 변 위에 위치하는 임계 안정여유도를 가진다. (그림 4(b)에서 무게중심 투영점 C가 다리 4와 다리 5가 이루는 선분 위에 위치해 있다.) 그런데 임계 안정여유도를 가지는 이러한 상태에서는 마찰이나 기타 외란에 의해서 다리가 미끄러질 때 변의 위치가 순간적으로 바뀌어 무게중심이 지지 다각형 바깥에 존재하게 되는 불안정 상태가 생길 수 있다.

본 논문에서는 내고장성 세다리 걸음새가 가지는 이러한 약점을 고려하여 걸음새가 안정여유도를 최대한 유지하도록 하는 것을 목표로 두고 대수적으로 힘 성분을 구할 수 있는 분배 알고리즘을 제안한다.

3.2 대수적 힘 분배 기법

지지 다리의 미끄러짐을 최소화하기 위해서 본 논문에서는 Zero Interaction Force 원리를 이용하여 모든 다리의 X축 힘 성분을 먼저 구한다. Zero Interaction Force 원리는 두 지지 다리의 착지점 사이를 연결하는 방향으로 힘 벡터 성분이 없어야 한다는 조건으로서 다리 사이의 상호 작용력으로 발생할 수 있는 미끄러짐을 최소화시킨다[3, 7]. Zero Interaction Force 원리의 기본 식은 다음과 같다.

$$(\mathbf{f}_i - \mathbf{f}_j) \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) = 0, \forall i, j \in \{1, 4, 5\}, i \neq j$$

본 논문에서 고려하고 있는 내고장성 걸음새에서 지지 다각형 평면 위에 있는 다리 힘의 수평 성분은 f_{ix} 뿐이므로 위 식과 식 (2)를 결합하면 아래와 같은 간단한 결과를 얻는다.

$$f_{ix} = \frac{F_x(t)}{3}, \forall i = \{1, 4, 5\} \quad (5)$$

f_{ix} 값을 모두 구했으므로 남은 미지 변수는 f_{1z} , f_{4z} , f_{5z} 세 개이다. f_{ix} 값을 알고 있으므로 식 (3)과 (4)는 f_{1z} , f_{4z} , f_{5z} 에 대한 방정식으로 해석될 수 있다. 만약 f_{1z} , f_{4z} , f_{5z} 에 대한 방정식을 하나 더 꾸민다면 이 변수들을 대수적으로 풀 수 있게 된다.

앞에서 언급했듯이 안정여유도를 결정하는 두 지지 다리, 즉 무게중심 투영점에 가깝게 존재하는 두 지지 다리들의 미끄러짐을 방지하는 일이 내고장성 세다리 걸음새의 안정여유도를 유지하기 위한 가장 중요한 작업이다. 그런데 지지 상태에 있는 다리들의 X축 힘 성분은 식 (5)에서처럼 모두 동일한 값으로 유도되었다. 보행 로봇이 걷는 지표면은 평탄하다고 설정했으므로 모든 다리의 착지점에서의 정지 마찰 계수는 같다. 따라서 무게중심 투영점에 가까운 두 다리의 Z축 힘 성분 값을 똑같이 설정하면 두 다리가 가지는 미끄러짐 정도의 차이는 동일하게 되고 결과적으로 정적 안정여유도를 그대로 유지시키는 최적의 조건이 만들어진다.

현재의 걸음새 상태가 그림 4(b)와 같다고 가정했으므로 무게중심 투영점에 가까운 지지 다리는 다리 4와 다리 5이다. 이 다리들의 Z축 힘 성분이 같다고 설정하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$f_{4z} = f_{5z} \quad (6)$$

식 (3), (4), (6)을 결합하면 다음과 같은 연립 방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_4 & x_5 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{1z} \\ f_{4z} \\ f_{5z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z(t)+mg \\ f_{1x}z_1+f_{4x}z_4+f_{5x}z_5-\Phi_y(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)을 풀면 다리의 Z축 방향 힘 성분을 대수적으로 얻을 수 있다.

이 결과는 로봇 몸체가 움직이는 그림 4(c)의 상태에도 유사하게 적용된다. 하지만 이 경우 로봇 몸체가 움직이므로 무게중심의 투영점도 이동하기 때문에 걸음새의 안정여유도를 결정하는 두 지지 다리가 변한다. 그림 4(c)의 상태에서 로봇의 지지 다리는 (2, 3, 6)이고 로봇 몸체가 움직이기 시작한 직후 안정여유도를 결정하는 지지 다리는 다리 3과 다리 6이다. (그림 4(c)에서 흰 원으로 표시된 무게중심 투영점 최초 위치가 다리 3과 다리 6이 만드는 선분 위에 있다.) 따라서 식 (6) 대신 아래 식을 이용하여 Z축 방향 힘 성분을 구해야 한다.

$$f_{3z} = f_{6z} \quad (8)$$

육족 보행 로봇이 그림 4(c)의 걸음새로 걷는 동안 무게중심은 다리 3과 다리 6이 만드는 선분에서 출발하여(그림 4(c)의 지지 다각형 위에 있는 흰 원) +X 축 방향으로 이동한 후 다리 2와 다리 3이 만드는 선분에 도달한다(그림 4(c)의 지지 다각형 위에 있는 검은 원). 따라서 안정여유도를 결정하는 두 지지 다리도 다리 3과 다리 6에서 다리 2와 다리 3으로 변한다. 이 경우 식 (8) 대신 아래 식을 이용하여 연립 방정식을 풀어야 한다.

$$f_{2z} = f_{3z} \quad (9)$$

본 논문에서 제안하는 힘 분배 기법은 이 같이 지지 다각형 내에 존재하는 무게중심 투영점의 상대적인 위치에 따라

서 지지 다리의 Z축 방향 힘 성분을 대수적으로 구해주는 연립 방정식을 제공한다. 이 방법은 고장 난 다리를 가지고 보행하기 위해서 안정여유도 값을 줄여야 하는 내고장성 걸음새에 동역학적으로 안정도를 보정(補正)해준다고 말할 수 있다. 다음 장의 모의실험을 통해서 제안된 힘 분배 기법이 내고장성 걸음새에 제공해주는 동역학적 안정도 기여를 확인한다.

4. 모의실험

본 논문에서 제안한 다리 힘 분배 기법의 효용성을 검증하기 위해서 내고장성 걸음새에 대한 모의실험을 실시한다. 완전 평탄한 지형을 걷는 육족 보행 로봇의 다리 1에 관절 고착고장이 발생하였다고 가정하자. 로봇은 그림 4와 같은 내고장성 세다리 걸음새를 가지며 +X 방향으로 직선 보행한다. 본 모의실험에서 설정한 로봇 매개 변수는 아래와 같다(모든 값은 MKS 단위이다).

표 1. 육족 보행 로봇의 매개 변수.

Table 1. Parameters of the hexapod robot.

매개 변수	값	매개 변수	값
m	30	g	9.8
R _x	1	x ₁	0.6
R _y	0.5	λ	1
W	1.5	H	4

위 표에서 H는 Z축에서 측정한 다리 착지점부터 무게중심 C까지의 높이이며 다리 착지점의 위치 벡터 \mathbf{r}_i 를 결정하는 데 사용된다.

본 모의실험에서는 그림 4의 내고장성 걸음새의 한 주기를 6(sec)로 설정한다. 본 내고장성 걸음새는 정칙 걸음새(regular gait)이므로 tripod (2, 3, 6)이 이동하는 시간과 (1, 4, 5)가 이동하는 시간이 같아야 한다. 따라서 로봇이 그림 4(b)의 걸음새를 걷는 데 3초가 소요되며 나머지 3초 동안 몸체를 움직이며 걷는 그림 4(c)의 걸음새를 가진다.

로봇 몸체가 시간 t에 대해서 가져야 하는 힘 및 모멘트는 아래와 같다고 정의한다(단위는 N 및 Nm).

$$F_x(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 3 \\ ma(t) & 3 \leq t \leq 6 \end{cases} \quad (10)$$

$$F_z(t) = \Phi_y(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq 6$$

위 식에서 a(t)는 몸체가 이동하기 위한 가속도 함수이며 다음과 같은 일반적인 궤적을 가진다.

$$a(t) = \begin{cases} a_0 & 3 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 5 \\ -a_0 & 5 \leq t \leq 6 \end{cases}$$

본 모의실험에서는 $a_0=0.5$ 로 설정한다. $a_0=0.5$ 이면 로봇 몸체가 $3 \leq t \leq 6$ 동안 이동한 거리는 보폭과 동일한 1m가 되므로 위와 같은 궤적 계획은 그림 4의 걸음새 움직임에 적합하다 하겠다.

그림 5(a)는 tripod (2, 3, 6)이 이동하는 구간 $0 \leq t < 3$ 에서의 다리 힘 분배 결과를 나타낸 것이다. 다리의 X축 성분은 식 (5)과 같이 항상 일정하게 구해지므로 그 도시(圖示)

를 생략하고 Z축 성분만 출력하였다. 이 구간에서 로봇 몸체는 정지해 있으므로 힘 성분은 모두 일정하게 나온다. 또 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 걸음새는 몸체 무게중심 투영점이 다리 4와 다리 5가 만드는 선분 위에 놓이는 임계 안정여유도를 가지므로 다리 4와 다리 5의 Z축 힘 성분은 동일하게 얻어진다.

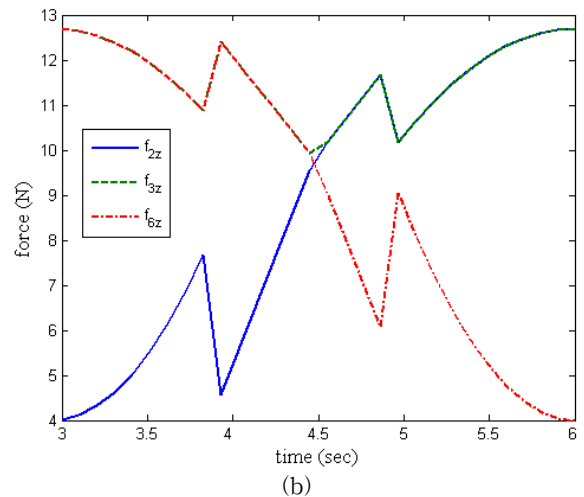
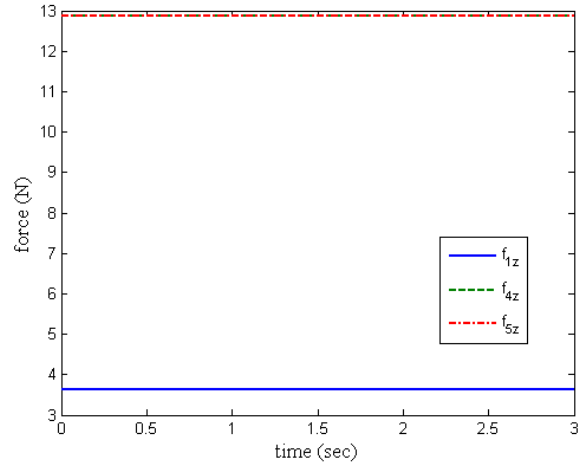


그림 5. 제안된 알고리즘을 이용한 다리 힘 분배 결과 (a) $0 \leq t < 3$ (로봇 몸체 정지), (b) $3 \leq t < 6$ (로봇 몸체 이동)

Fig. 5. Result of foot force distribution using the proposed algorithm. (a) $0 \leq t < 3$ (the robot body stands still) and (b) $3 \leq t < 6$ (the robot body moves forward).

그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 임계 안정여유도를 결정하는 변을 만들지 않는 나머지 다리(다리 1)의 힘 성분이 변을 만드는 두 다리(다리 4, 다리 5)의 힘 성분보다 작은 값을 가진다. 이것은 무게중심이 치우친 쪽에 힘을 더 분배함으로써 안정여유도를 보호하는 본래의 목적에 부합하는 결과라고 해석될 수 있다.

그림 5(b)는 tripod (1, 4, 5)가 이동하는 구간 $3 \leq t < 6$ 에서의 다리 힘 분배 결과를 나타낸 것이다. 이 구간에서 로봇 몸체가 가속도를 가지면서(식 (10)) 연속적으로 움직이므로 다리 힘 분배도 시간에 따라서 변하는 결과가 나온다. 그림 5(b)에서 주목해야 할 부분은 $t=4.5$ (sec) 이후, 즉 몸체가 보폭의 반을 이동한 후에는 안정여유도를 결정하는 지

지 다리가 (3, 6)에서 (2, 3)으로 바뀐다는 사실이다. 따라서 그래프에서 알 수 있듯이 각 다리 쌍들의 Z축 힘 성분이 $3 \leq t < 4.5$ 와 $4.5 \leq t < 6$ 에서 각각 동일하게 나온다. 그림 5(a)와 마찬가지로 임계 안정여유도를 결정하는 변을 만들지 않는 다리의 힘 성분이 변을 만드는 두 다리의 힘 성분보다 항상 작게 나옴을 알 수 있다.

또한 $t=3.8, 3.95, 4.8, 5$ (sec) 부분에서 힘 성분의 급격한 변화도 관찰된다. 이것은 가속도 함수 $a(t)$ 가 불연속적이어서 식 (7)의 2번째 행 식의 변수 값 f_{2x}, f_{3x}, f_{6x} 이 바뀌기 때문에 발생하는 현상이다. (몸체가 이동하는 구간이기 때문에 지지 다리는 1, 4, 5가 아니라 2, 3, 6이 된다.)

제안된 힘 분배 방법과 기존 방법과의 차이점을 비교하기 위해서 pseudo-inverse를 이용한 힘 분배 알고리즘 결과를 도시한다. pseudo-inverse 기법을 이용한 힘 분배 알고리즘도 일종의 대수적 다리 힘 분배 기법으로서 힘 벡터의 놈(norm) 합을 최소화시키는 결과를 낸다[7, 9]. 그림 6은 pseudo-inverse를 사용하여 내고장성 세다리 걸음세의 Z축 다리 힘 성분을 구한 결과이다.

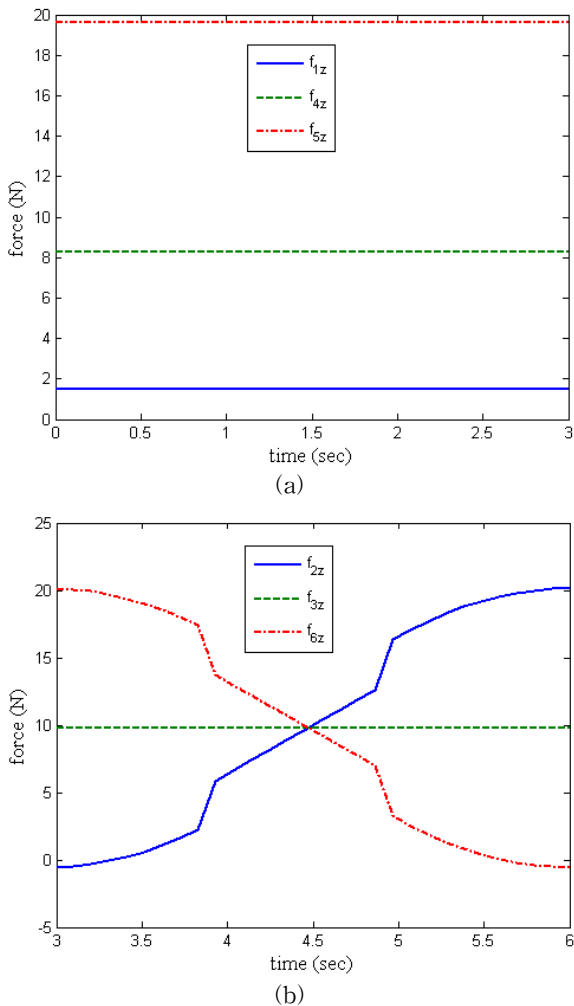


그림 6. pseudo-inverse를 이용한 다리 힘 분배 결과 (a) $0 \leq t < 3$ (로봇 몸체 정지), (b) $3 \leq t < 6$ (로봇 몸체 이동)

Fig. 6. Result of foot force distribution using pseudo-inverse method. (a) $0 \leq t < 3$ (the robot body stands still) and (b) $3 \leq t < 6$ (the robot body moves forward).

그림 5와 달리 그림 6에서는 무게중심 투영점이 있는 지지 다각형 변을 만드는 두 다리의 힘 성분 값이 서로 다르며 특히 그림 5의 결과보다 작은 값들이 존재한다. 이런 경우 정지 마찰계수에 따라서 다리가 미끄러져 걸음새가 불안정해질 수도 있다. 예를 들어 육족 보행 로봇이 운동하고 있는 지표면의 정지마찰계수가 $\mu=0.036$ 이라고 가정하고 구간 $0 \leq t < 3$ 에서의 힘 분배 결과를 고찰한다. 이 구간에서 무게중심 투영점이 있는 지지 다각형 변을 만드는 두 다리는 다리 4와 다리 5이다. 본 논문에서 제안된 기법을 사용하여 구한 두 다리의 수직 성분 힘은 그림 5(a)에서 약 12.95(N)으로 동일하게 나온다. 하지만 pseudo-inverse를 이용한 기존의 방법으로 나온 값은 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 $f_{4z}=8.31$ (N)과 $f_{5z}=19.75$ (N)이다. 식 (5)와 (10)에서 X축 힘 성분은 $f_{1x}=0.33$ (N)이다. 따라서 pseudo-inverse 기법을 이용한 기존의 방법에서는 다리 4에서

$$\frac{f_{4x}}{f_{4z}} = \frac{0.33}{8.31} = 0.04 > \mu$$

즉 수직 항력과 정지마찰계수의 곱이 +X축 힘 성분보다 적게 나오므로 미끄러짐이 발생하게 된다. f_{1x}의 방향은 +X이므로 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 다리 4가 이 방향으로 미끄러진다면 무게중심 투영점은 지지 다각형 외부에 있게 되어 걸음새는 불안정해진다.

pseudo-inverse를 이용한 결과가 가지는 또 하나의 문제점은 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 몸체가 이동하기 시작한 직후와(t=3초 경) 몸체의 이동이 끝나기 직전(t=6초 경)에 Z축 힘 성분이 음수가 나온다는 사실이다. Z축 힘 성분이 음수이면 지지 다리는 지표면을 지탱할 수 없으며 정상적인 tripod를 형성하지 못한다. 이러한 결과는 본 논문에서 고려하는 육족 보행 로봇을 위한 내고장성 세다리 걸음새가 불연속 걸음새이기 때문이다. 따라서 pseudo-inverse 최적화 방법은 내고장성 걸음새와 같은 특이 걸음새(singular gait)에는 바로 적용할 수 없다.

다른 구간에서도 그림 5, 6과 유사한 비교 결과가 나오므로 제안된 연구 결과는 임계 안정여유도를 가지는 내고장성 걸음새의 안정여유도를 최대한 보전하고 미끄럼을 방지한다고 말할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 고장이 존재하는 육족 보행 로봇 시스템을 위한 새로운 힘 분배 알고리즘을 제안하였다. 관절고착 고장이 발생한 육족 보행 로봇이 내고장성 세다리 걸음새로 걸을 때는 고장이 없을 때보다 안정여유도가 작아지며 임계 안정 상태가 될 수 있는 약점이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 내고장성 걸음새의 약점을 극복하기 위하여 안정여유도를 결정하는 지지 다리의 미끄러짐을 최소화시킬 수 있는 힘 분배 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 최적화 기법을 쓰지 않으므로 계산 시간이 짧고 실시간 제어에 적용되기에 유리하다. pseudo-inverse를 이용한 기존 방법과의 비교 모의실험을 통해서 제안된 기법은 내고장성 세다리 걸음새의 동적 안정여유도를 최대한 보전한다는 사실을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] 이연정, 강동오, 이승하, “사각보행로봇의 걸음새 안정화를 위한 퍼지 보상 방법,” *퍼지및지능시스템학회 논문지*, 제9권, 제1호, pp. 48-56, 1999.

[2] 이희진, 김용태, 김동연, “멀티센서망을 이용한 4족 보행로봇에 관한 연구,” *퍼지및지능시스템학회 추계학술대회 학술발표논문집*, 제16권, 제2호, pp. 327-331, 2006.

[3] K. J. Waldron, “Force and motion management in legged locomotion,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, no. 4, pp. 214-220, 1986.

[4] R. B. McGhee, K. W. Olson and R. L. Briggs, “Electronic coordination of joint motions for terrain-adaptive robot vehicles,” in *Proceedings of SAE Automotive Engineering Congress*, 1980.

[5] J. K. Salisbury and B. Roth, “Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands,” *Journal of Mechanisms, Transmissions, Automation in Design*, vol. 105, no. 1, pp. 35-41, 1983.

[6] C. A. Klein and T.-S. Chung, “Force interaction and allocation for the legs of a walking vehicle,” *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 214-220, 1987.

[7] V. Kumar and K. J. Waldron, “Force distribution in walking vehicles,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp. 90-99, 1990.

[8] J.-S. Chen, F.-T. Cheng, K.-T. Yang, F.-C. Kung and Y.-Y. Sun, “Optimal force distribution in multilegged vehicles,” *Robotica*, vol. 17, no. 2, pp. 159-172, 1999.

[9] W. Y. Jiang, A. M. Liu and D. Howard, “Optimization of legged robot locomotion by control of foot-force distribution,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 26, no. 4, pp. 311-323, 2004.

[10] 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.

[11] 양정민, “다리 궤적을 조정하는 육각 보행 로봇의 내고장성 걸음새,” *전자공학회 논문지*, 제42권, SC 제3호, pp. 105-114, 2005.

[12] 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.

[13] J.-M. Yang, “Gait synthesis for hexapod robots with a locked joint failure,” *Robotica*, vol. 23, pp. 701-708, 2005.

[14] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, New York, 1993.

저 자 소 개



양정민(Jung-Min Yang)

1993년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학사)
 1995년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
 1999년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
 2001년~현재 : 대구가톨릭대학교 전자공학과 부교수

관심분야 : 비동기 머신 교정 제어, 보행로봇 걸음새 연구
 E-mail : jmyang@cu.ac.kr