

고장 난 다리가 있는 사족 보행 로봇을 위한 최적 힘 배분

논문

58-3-27

Optimal Force Distribution for Quadruped Walking Robots with a Failed Leg

양 정 민^{*}
(Jung-Min Yang)

Abstract - The force distribution in multi-legged robots is a constrained, optimization problem. The solution to the problem is the set points of the leg contact forces for a particular system task. In this paper, an efficient and general formulation of the force distribution problem is developed using linear programming. The considered walking robot is a quadruped robot with a locked-joint failure, i.e., a joint of the failed leg is locked at a known place. For overcoming the drawback of marginal stability in fault-tolerant gaits, we define safety margin on friction constraints as the objective function to be maximized. Dynamic features of locked-joint failure are represented by equality and inequality constraints of linear programming. Unlike the former study, our result can be applied to various forms of walking such as crab and turning gaits. Simulation results show the validity of the proposed scheme.

Key Words : Quadruped walking robots, Foot force distribution, Linear programming, Fault-tolerant gaits

1. 서 론

정적 걸음새(static gait)를 가지는 다족 보행 로봇 시스템의 제어는 크게 기구학적(kinematic) 부분과 동역학적(dynamic) 부분으로 나누어진다. 기구학적 부분은 다리의 지지점과 몸체 무게 중심이 움직이는 궤적 및 순서를 결정하는 걸음새 연구(gait study)가 중심이다. 동역학적 부분은 다리들과 몸체 사이에서 일어나는 힘의 상호 작용(coordination)을 고려하는 일이 주를 이룬다. 이 중 다리가 지지하거나 들어 올리는 몸체에 가해지는 힘을 각 다리의 말단 장치(end-effector)에 효율적으로 전달하는 '힘 배분(force distribution)'은 다족 보행 로봇 시스템의 동역학 제어에서 가장 기본적이고 중요한 문제이다[1][2].

저자의 선행 연구[3]에서는 내고장성 걸음새(fault-tolerant gait)를 가지는 사족 보행 로봇(quadruped robot)의 다리 힘 배분 문제가 연구되었다. 다리의 관절 하나가 고착되는 관절고착고장(locked joint failure)이 발생한 사족 보행 로봇이 가지는 내고장성 걸음새[4]의 특이성을 이용하여 각 다리가 가져야 하는 힘 성분을 대수적으로 풀었다. 선행 연구결과[3]는 내고장성 걸음새를 가지는 보행 로봇을 위한 힘 배분 문제 해결을 시도했다는 점에서 의의를 가지나 다음과 같은 약점이 있다.

1) 힘 배분의 대수적 접근을 위해서 선행 연구에서는 사족 보행 로봇이 평탄 지형에서 직선 보행만 한다고 가정하

였다. 계 걸음새나 경사면 보행 등 그렇지 않은 걸음새에서는 선행 연구결과가 적용될 수 없다.

2) 발생한 고장이 관절을 고착시키는 형태임에도 불구하고 선행 연구에서는 각 다리의 관절 힘, 즉 토크(torque) 값을 고려하지 않았다. 관절고착고장이 보행 로봇에 주는 동역학적 영향을 반영하기 위해서는 힘 배분 알고리즘에서 관절 토크 값이 사용되어야 한다.

본 논문에서는 이러한 선행 연구의 약점을 보완한 새로운 힘 배분 알고리즘을 제안한다. 힘 배분 알고리즘의 일반성을 획득하기 위해서 본 연구에서는 선형계획법(linear programming, LP)을 이용하여 힘 배분 해를 구한다. 다리 힘 배분은 통상 구해야 할 변수의 개수가 주어진 방정식보다 많은 부정(indeterminate) 문제로 표현되므로 LP 등을 이용한 최적화 기법은 과거부터 많이 이용되어 왔다[5]-[7]. 본 논문의 기여도는 관절고착고장이 야기하는 로봇의 동역학적 제한 조건을 이러한 LP의 틀 내에서 구현했다는 점에 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 사족 보행 로봇의 동역학적 모델링을 설정하고 힘 성분 및 힘 배분 문제를 정의한다. 3장에서는 LP를 이용한 힘 배분 알고리즘을 제안한다. 마찰 계수의 여유도(safety margin)를 LP의 목적 함수로 정의한다. 이것은 다리의 미끄러짐을 최대한 방지하여 임계 안정여유도(marginal stability margin)를 가지는 내고장성 걸음새의 단점을 보완하기 위함이다. 또한 관절고착고장이 야기하는 동역학적 영향을 LP의 제한 조건으로 구현한다. 4장에서는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새에 대한 모의 실험을 통해서 제안된 힘 배분 알고리즘의 적용 가능성을 검증한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 내린다.

^{*} 교신저자, 정회원 : 대구가톨릭대 전자공학과 부교수 · 공학

E-mail : jmyang@cu.ac.kr

접수일자 : 2008년 11월 27일

최종완료 : 2009년 1월 16일

2. 모델링 및 문제 설정

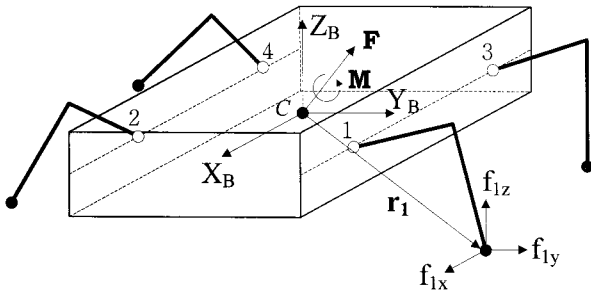


그림 1 사족 보행 로봇의 힘 성분.
Fig. 1 Force elements in a quadruped robot.

그림 1은 본 논문에서 다루는 사족 보행 로봇의 힘 성분을 나타낸다. 몸체 무게중심 C를 원점으로 하는 몸체 좌표계 $X_B-Y_B-Z_B$ 가 달려 있으며 X_B 축은 몸체의 세로축(longitudinal axis)과 일치한다.

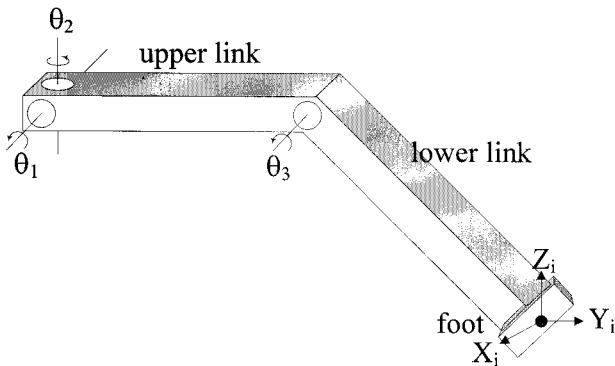


그림 2 팔꿈치형 다리 모델.
Fig. 2 Leg model of an articulated-arm type.

로봇의 다리는 그림 2와 같이 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니퓰레이터(articulated manipulator) 구조로 되어 있다. 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. 다리의 말단 장치들을 원점으로 하는 지역(local) 다리 좌표계 $X_i-Y_i-Z_i$ ($i=1, \dots, 4$)가 달려 있다.

지표면을 지지하고 있는 다리 i 의 발(foot)은 그림 1에 나와 있듯이 지역 좌표계 $X_i-Y_i-Z_i$ 에서 표시된 힘 성분 ${}^i\mathbf{f}_i = [f_{ix} \ f_{iy} \ f_{iz}]^T$ 를 가진다. $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]$ 는 몸체 좌표계에서 표시된 다리 i 의 위치 벡터이다. 또 몸체 무게 중심 C에는 다리의 지지력으로부터 생성된 힘 $\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ 와 모

멘트 $\mathbf{M} = [M_x \ M_y \ M_z]^T$ 이 존재한다. \mathbf{F} 와 \mathbf{M} 벡터는 모두 몸체 좌표계 $X_B-Y_B-Z_B$ 에서 정의된다.

다리 힘 배분 문제는 몸체 무게 중심에 걸리는 힘 \mathbf{F} 와 모멘트 \mathbf{M} 이 주어질 때 이러한 힘과 모멘트를 생성하는 각 지지 다리의 힘 성분 ${}^i\mathbf{f}_i$ 를 결정하는 일이다. 뉴턴-오일러(Newton-Euler) 방정식을 이용하여 다리 힘 성분과 \mathbf{F} , \mathbf{M} 사이의 관계를 구하면 다음과 같다[2],[8].

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ R_1 C_1 & R_2 C_2 & \dots & R_n C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1f_1 \\ {}^2f_2 \\ \vdots \\ {}^n f_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 C_i 는 지역 좌표계 $X_i-Y_i-Z_i$ 에서 몸체 좌표계 $X_B-Y_B-Z_B$ 까지의 3×3 회전 행렬(rotation matrix)이며 n 은 지지 다리의 개수이다. 사족 보행 로봇의 경우에는 $n=3$ 또는 4 가 된다. R_i 는 모멘트 계산 시 필요한 아래와 같은 3×3 비대칭 행렬(skew-symmetric matrix)이다.

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

벡터를 정의하여 (1)의 행렬식을 다음과 같이 간단하게 기술한다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{G} \quad (3)$$

\mathbf{F} 는 무게 중심에서의 힘 \mathbf{F} 와 모멘트 \mathbf{M} 을 합친 6×1 벡터이며 $\mathbf{G} = [{}^1\mathbf{f}_1^T \ \dots \ {}^n\mathbf{f}_n^T]^T$ 는 지지 다리의 힘 성분들을 합친 $3n \times 1$ 벡터, \mathbf{W} 는 \mathbf{F} 와 \mathbf{G} 사이의 관계를 표현하는 $6 \times 3n$ 벡터이다. (2)는 방정식 여섯 개를 포함하고 있으나 $n \geq 3$ 일 때 \mathbf{G} 의 성분은 아홉 개 이상이므로 (2)식은 일반적으로 부정 방정식이 된다[1][8].

3. LP를 이용한 힘 배분 기법

3.1 제한 조건

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다[9]. 하지만 관절고착고장에서는 관절 하나가 특정 각도로 고정되기 때문에 자유회전 고장(free-swinging failure)이나 링크파손고장 같은 관절의 지지 능력까지 없애는 고장과는 달리 로봇의 몸체를 지탱하는 능력은 계속 유지된다. 내고장성 걸음새는 이러한 관절고착고장의 성질을 바탕으로 제안된 주행 방법으로서, 몸체의 운동과 다리의 이동이 불연속적인 특성을 보인다[4][10].

사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새의 약점은 다리 하나가 이동 상태에 있을 때 무게 중심의 투영점이 지지 다각형 변(side) 상에 존재하는 임계 안정여유도를 가진다는 사실이다[4]. 따라서 지지 다리가 미끄러진다면 무게 중심 투영점이 지지 다각형의 바깥쪽에 있게 되는 불안정 상태에 빠질 수도 있다. 힘 배분 문제를 풀기 위한 LP도 이러한 성질을 고려해서 정의해야 한다.

지지 다리의 힘 성분 ${}^i\mathbf{f}_i$, 즉 식 (3)에서 정의한 벡터 \mathbf{G}

를 풀기 위한 LP를 설정할 때 식 (3)는 LP의 등식 제한 조건(equality constraint)의 하나가 된다. 그림 2에 표시된 다리의 관절에 걸리는 토크 값의 범위도 제한 조건의 하나로 표현할 수 있다. 다리 i 의 관절 토크 3×1 벡터를 $\tau_i = [\tau_{i1} \ \tau_{i2} \ \tau_{i3}]^T$ 라 하자. 물리적으로 취할 수 있는 최소 및 최대 토크 값의 범위를 다음과 같이 표시한다.

$$\tau_{i\min} \leq \tau_i \leq \tau_{i\max} \quad (4)$$

위 식에서 $\tau_{i\min}$ 과 $\tau_{i\max}$ 는 양의 상수로 이루어진 3×1 벡터이다. τ_i 와 다리 말단 장치에 걸리는 힘 성분 ${}^i f_i$ 사이의 관계는 자코비안(Jacobian) 행렬 ${}^i J$ 를 이용하여 다음과 같이 기술된다[5].

$$\tau_i = {}^i J^T \cdot {}^i f_i + t_i \quad (5)$$

t_i 는 다리가 몸체와 연결되지 않았을 때 생성되는 (unconstrained) 토크 성분이다. t_i 와 τ_i , ${}^i J$ 는 모두 지역 좌표계 $X_i - Y_i - Z_i$ 에서 정의된 값이다. 식 (5)를 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} {}^i J^T \cdot {}^i f_i &\leq \tau_{i\max} - t_i \\ -{}^i J^T \cdot {}^i f_i &\leq -\tau_{i\min} + t_i \end{aligned} \quad (6)$$

$i=1, \dots, n$ 에 대한 식 (6)을 모두 결합하여 다음과 같이 표시한다.

$$A_1 \cdot G \leq B_1 \quad (7)$$

A_1 은 $6n \times 3n$ 행렬, B_1 은 $6n \times 1$ 벡터이다. 그런데 지지 다리 중 한 개가 관절고착고장이 발생한 다리라면 세 개의 관절 토크 중 하나는 고착되므로 식 (6)의 범위 제한을 받지 않는다. 따라서 최적화 계산 시 (6)에서 표현된 여섯 개의 부등식 중 두 개는 제외되어야 한다. 즉 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때에는 고착된 관절과 곱해지는 A_1 과 B_1 의 행(row)을 모두 0으로 해주면 된다.

관절고착고장이 일어난 다리의 관절은 식 (7)의 제한 조건으로부터 영향을 받지 않지만 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 경우에는 여전히 다리에 걸리는 하중(payload)을 받는다. 무거운 하중이 걸릴 때에는 고착된 관절에 무리가 가서 심할 경우 관절 파손이 일어날 수도 있다. 본 논문에서는 지지 상태에 있는 고장 난 다리가 정상적인 지지 다리가 받는 수직 항력보다 항상 작은 값의 항력을 받도록 제한 조건을 꾸밈으로써 고장 난 다리의 기구부를 보호한다.

n 개의 지지 다리 중 고장 난 다리의 번호를 k 라고 하면 ($1 \leq k \leq n$) 각 다리의 수직 항력은 그림 2에 나와 있듯이 z 축 힘 성분이므로 아래와 같은 $n-1$ 개의 관계를 얻는다.

$$f_{iz} \leq f_{iz}, \quad i=1, \dots, n, \quad i \neq k \quad (8)$$

식 (7)과 유사하게 위 식을 행렬식으로 다시 쓰면 아래와 같다.

$$A_2 \cdot G \leq B_2 \quad (9)$$

A_2 는 $(n-1) \times 3n$ 행렬이고 B_2 는 $(n-1) \times 1$ 영행렬이다. A_2 는 식 (8)을 만드는 ${}^k f_k$, ${}^i f_i$ 의 z 축 성분과 곱해지는 계수를 제외하고는 모두 0을 채워 넣어 만든다.

다음으로는 지지 다리 i 가 미끄러지지 않도록 하는 제한 조건을 부등식으로 표현한다. 앞서 기술했듯이 지지 다리가 가지는 수직 항력은 ${}^i f_i$ 의 z 축 성분 f_{iz} 이며 지표면 방향으

로의 힘 성분(tangent force)의 크기는 $\sqrt{f_{ix}^2 + f_{iy}^2}$ 이다. 지표면의 정지 마찰 계수를 μ 라고 하면 지지 다리가 미끄러지지 않을 조건은 아래와 같다.

$$\sqrt{f_{ix}^2 + f_{iy}^2} \leq \mu |f_{iz}| \quad (10)$$

그런데 위 식은 비선형식이므로 LP에 사용될 수 없다. 본 논문에서는 [11]에서 제안한 보다 제한적인 'friction cone' 기법을 사용하여 위 조건을 선형 근사화한다.

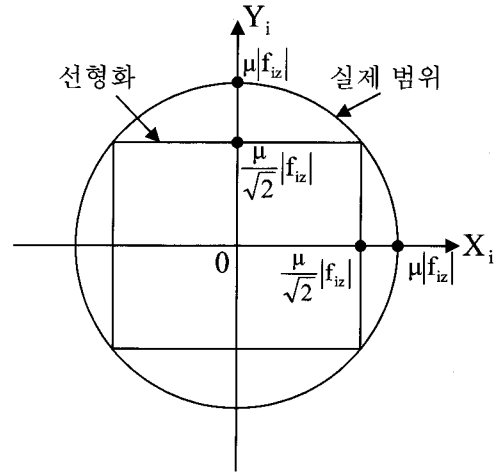


그림 3 마찰 제한 조건의 선형 근사화.

Fig. 3 Linear approximation of friction constraint.

그림 3은 마찰 제한 조건의 선형 근사화를 도식한 것이다. 그림에서 $\mu |f_{iz}|$ 을 반지름으로 하는 원은 ${}^i f_i$ 의 f_{ix} 와 f_{iy} 성분이 식 (10)을 만족시키기 위해서 가져야 하는 값의 범위이다. f_{ix} 와 f_{iy} 를 이 원 대신에 그림에 표시된 원과 내접(內接)하는 정사각형을 벗어나지 않도록 하면 식 (10)을 만족하는 동시에 아래와 같은 선형화가 이루어진다.

$$\begin{aligned} -\frac{\mu}{\sqrt{2}} f_{iz} &\leq f_{ix} \leq \frac{\mu}{\sqrt{2}} f_{iz} \\ -\frac{\mu}{\sqrt{2}} f_{iz} &\leq f_{iy} \leq \frac{\mu}{\sqrt{2}} f_{iz} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & -\frac{\mu}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & -\frac{\mu}{\sqrt{2}} \\ 0 & -1 & -\frac{\mu}{\sqrt{2}} \\ 0 & -1 & -\frac{\mu}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ f_{iz} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

앞서와 마찬가지로 $i=1, \dots, n$ 에 대한 식 (12)를 결합하면 아래와 같이 정리된다.

$$A_3 \cdot G \leq B_3 \quad (13)$$

A_3 는 $4n \times 3n$ 행렬이고 B_3 는 $4n \times 1$ 영행렬이다.

3.2 목적 함수 및 최적화 공식

다족 보행 로봇의 힘 배분을 구하는 최적화 문제의 목적 함수는 다양한 형태로 제안되었다. 다리의 수직 방향 힘 성분의 합을 최소화하거나[12] 수직 방향 힘 성분의 최대값을 최소화했으며[1][8], 다리가 소비하는 에너지를 최소화하는 목적 함수[7]도 제안되었다. 앞 절에서 기술하였듯이 관절 고착고장에 대한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새는 지지 다리가 세 개일 때($n=3$) 임계 안정여유도를 가진다[4][5]. 이러한 약점을 최대한 보완하는 해를 구하기 위해서 이번 연구에서는 Cheng 등이 제안한 ‘마찰 계수의 여유도’[5][6]를 최대화시키는 것을 목적 함수로 정한다.

먼저 $1 \times 3n$ 행 벡터 C 를 정의하고 식 (3)과 (7), (9), (13)을 결합하여 아래와 같은 표준 LP 최적화 형태를 형성한다.

$$\text{Maximize } C \cdot G \tag{14}$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} W \cdot G &= F \\ A \cdot G &\leq B \\ G &\text{ unrestricted} \end{aligned} \tag{15}$$

위 식에서 A 와 B 는 식 (7), (9), (13)에 있는 A_1, A_2, A_3 와 B_1, B_2, B_3 를 각각 결합한 행렬로서 A 는 $(11n-1) \times 3n$, B 는 $(11n-1) \times 1$ 의 차원을 가진다. 전술한 대로 A_1, A_2 , 그리고 B_1 은 고장 난 다리가 지지 상태에 있을 때와 그렇지 않을 때에 따라서 그 값이 변경된다.

지지 다리가 미끄러지지 않도록 하는 정지 마찰력 식은 식 (11)로부터 $f_{ix} - \mu f_{iz} / \sqrt{2} \leq 0$ 와 같이 표현할 수 있다. 그런데 f_{ix} 와 $\mu f_{iz} / \sqrt{2}$ 의 크기 차이가 더 나도록 하면 지지 다리의 미끄러짐은 보다 확실하게 방지할 수 있다. 이러한 마찰 계수의 여유도를 나타내는 새로운 변수를 s 라고 명명하고 다리 힘 성분이 아래와 같은 부등식을 만족시키도록 설정한다(s 의 단위는 뉴턴(N)이다).

$$f_{ix} - \mu f_{iz} / \sqrt{2} + s \leq 0, s \geq 0 \tag{16}$$

변수 s 를 미지 벡터 G 에 포함시켜 새로운 해 벡터 \hat{G} 를 정의한다.

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} G \\ s \end{bmatrix}_{(3n+1) \times 1} \tag{17}$$

또 식 (16)을 모든 지지 다리의 f_{ix}, f_{iy} 성분애 적용시키고 식 (15)의 제한 조건을 벡터 \hat{G} 에 대해서 정리하면 최종적으로 아래와 같은 LP 최적화 형태가 완성된다.

$$\text{Maximize } [C \mid \rho] \cdot \hat{G} \tag{18}$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} \hat{W} \cdot \hat{G} &= \hat{F} \\ \hat{A} \cdot \hat{G} &\leq \hat{B} \\ \hat{G} &\text{ unrestricted} \end{aligned} \tag{19}$$

위 식에서 ρ 는 마찰 계수 여유도 s 에 곱해지는 가중치이다. $\hat{W}, \hat{F}, \hat{A}, \hat{B}$ 는 식 (15)의 W, F, A, B 에서 열 또는 행을 1 증가시켜 만든 행렬이다.

식 (18), (19)는 일반화된 최적화 형태이다. 식 (18)의 C 벡터를 이용하면 기존에 제안되었던 최적화 목적 함수의 일부를 본 식에서도 구현할 수 있다. 예를 들어 f_{iz} 성분의 계수를 -1 , 나머지 계수를 0으로 정하면 (18)의 목적 함수는 마찰 계수 여유도 s 를 최대화하면서 힘의 수직 성분 합을 최소화시키는 효과를 낸다. 하지만 이번 연구의 주요 목표가 임계 안정여유도를 가지는 내고장성 걸음새를 위해서 지지 다리의 미끄러짐을 최소화시키는 것이므로 본 논문에서는 $C = 0_{1 \times 3n}, \rho = 1$ 와 같이 설정하고 LP를 푼다.

식 (18), (19)의 최적화 기법은 대수적 방법으로 힘 분배 문제를 푼 선행 연구 [3]과 뚜렷한 차이점을 지닌다. 사족 보행 로봇이 평탄 직선 보행을 하는 경우에만 적용 가능했던 지난 연구와는 달리 본 논문에서 제안된 LP 기법은 게 걸음새(crab gait), 회전 걸음새(turning gait) 같은 일반적인 걸음새에[13]에도 적용될 수 있다. 또한 마찰 계수 여유도를 목적 함수로 둬으로써 지지 다리의 미끄러짐을 최대한 억제하는 해를 찾는다.

4. 모의 실험

본 논문에서 제안한 다리 힘 배분 기법의 효용성을 검증하기 위해서 내고장성 걸음새에 대한 모의 실험을 실시한다. 힘 분배 알고리즘을 포함하는 사족 보행 로봇의 구동 과정[6][12]은 그림 4에 나와 있다. v 와 v_d 는 실제 속도 벡터와 기준 속도 벡터로서 사족 보행 로봇의 몸체가 가지는 실제 궤적과 기준 궤적을 각각 의미한다. ‘Body motion controller’는 v 와 v_d 사이의 오차를 입력 받아 몸체가 가져야 할 wrench(힘과 토크) F 를 생성한다(식 (1), (3) 참조). ‘Force distribution’은 본 연구 결과가 들어가는 모듈로서 F 를 받고 LP를 풀어 각 지지 다리가 가지는 힘 성분 벡터 G 를 만드는 일을 한다(식 (18), (19) 참조). G 와 자코비안 행렬 J^T 로부터 다리의 관절 토크 벡터 τ 를 구하고(식 (5)) ‘Actuator & robot dynamics’ 모듈에서 사족 보행 로봇을 작동시켜 v 를 구한 후 다시 피드백(feedback)하면 한 단계의 로봇 운동이 완료된다.

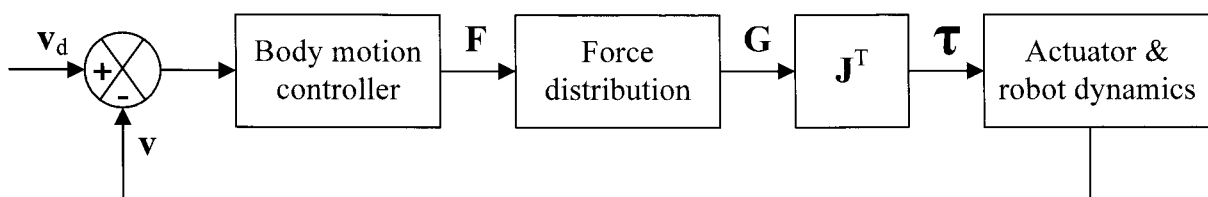


그림 4 사족 보행 로봇의 힘 분배 블록선도.

Fig. 4 Block diagram of force distribution in a quadruped robot.

본 논문에서는 제안된 LP 알고리즘이 직선 보행 이외의 내고장성 걸음새에도 적용 가능하다는 사실을 입증하기 위해서 [13]에서 제안된 내고장성 게 걸음새(crab gait)를 가지는 사족 보행 로봇의 힘 배분 문제를 계산하였다. 그림 5는 내고장성 게 걸음새의 한 주기 이동 모습이다.

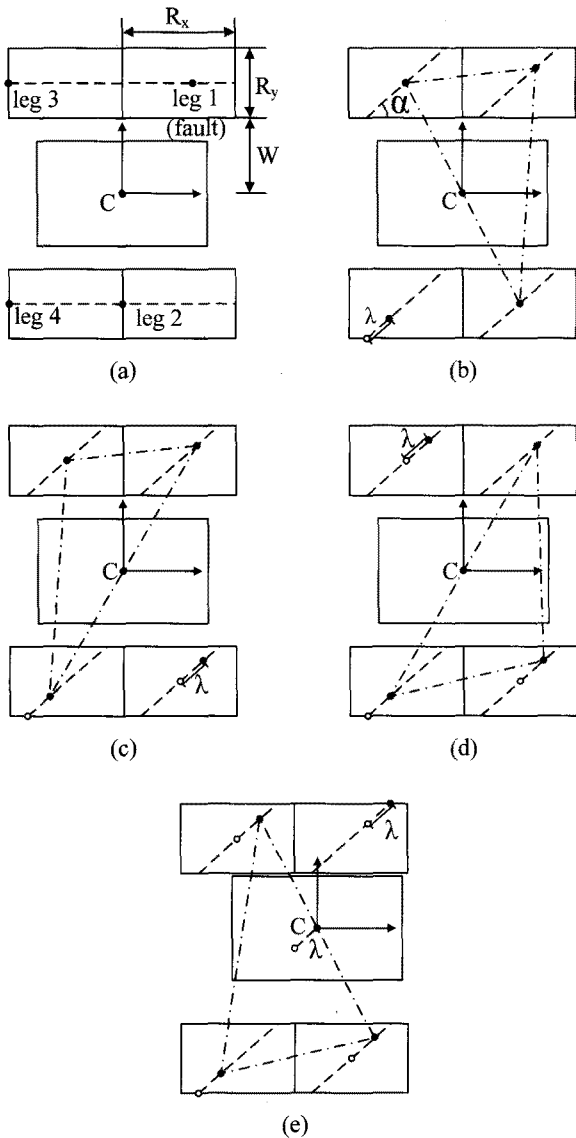


그림 5 내고장성 게 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 2 이동, (d) 다리 3 이동, (e) 다리 1 및 몸체 이동.

Fig. 5 Fault-tolerant crab gait. (a) initial state, (b) swing leg 4, (c) swing leg 2, (d) swing leg 3, (e) lift leg 1 and move body.

평면에서 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림 5(a)와 같이 이차원 평면상에 투영된 로봇 모델에서 길이 R_x , 폭 R_y 인 직사각형 형태의 작업 영역(workspace)이 된다고 정의한다. 다리 1의 관절 3에서 관절고착장이 발생했다고 가정한다. 본 모의 실험에서는 $m=10$, $R_x=1$ (unit), $R_y=0.5$, $W=1.5$ (그림 5(a)

참조), $g=9.8$ (중력 가속도), $m=3$ (몸체 질량), $\mu=0.09$ (정지 마찰 계수) 등으로 로봇 매개 변수를 설정하였다. 또한 그림 5(b)에서 표시된 게 걸음새 각도는 $\alpha=41^\circ$, 걸음새의 보폭(stride length)은 $\lambda=0.3$ 으로 설정하였다. 이밖에 식 (6)에서 정의된 관절 토크의 한계치는 모든 다리에 대해서 $\tau_{i\min}=-35.0$ (Nm)과 $\tau_{i\max}=35.0$ (Nm)로 정하였다. 매개 변수 값은 모두 MKS 단위로 표시된다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 내고장성 걸음새는 4→2→3→1의 다리 움직임 순서에 따라서 4개의 구간을 거친다. 본 모의 실험에서는 걸음새의 디듀티(duty factor)를 3/4라 두고 걸음새의 한 주기를 12초로 설정한다. 따라서 한 주기 내에서 몸체가 정지되는 시간은 0~9초이며(그림 5(b) ~ (d)) 몸체가 다리 1과 함께 움직이는 시간은 9~12초이다(그림 5(e)). 디듀티가 3/4이므로 로봇은 지지 다리가 항상 세 개인($n=3, \forall t$) tripod 걸음새를 가진다. 로봇 몸체가 시간 t 에 대해서 가져야 하는 힘 및 모멘트는 아래와 같다고 정의한다.

$$\begin{aligned}
 F_x(t) &= \begin{cases} 0.85 & 0 \leq t < 9 \\ ma(t) & 9 \leq t \leq 12 \end{cases} & (20) \\
 F_y(t) &= \tan(41^\circ) F_x(t) \\
 M_x(t) = M_y(t) &= 0.5 \cos\left(\frac{5\pi t}{2}\right) \\
 F_z(t) = M_x(t) &= 0
 \end{aligned}$$

그림 5의 걸음새는 직선 보행을 하므로 몸체 무게 중심의 모멘트 M 은 0으로 할 수 있다. 하지만 다리 힘 분배 알고리즘을 검증하기 위해서 위 식과 같이 y 축과 z 축 방향으로 약간의 모멘트가 걸리게 정의하였다. 식 (20)에서 $a(t)$ 는 몸체가 이동하기 위한 가속도 함수이며 다음과 같은 일반적인 가감속 궤적을 가진다.

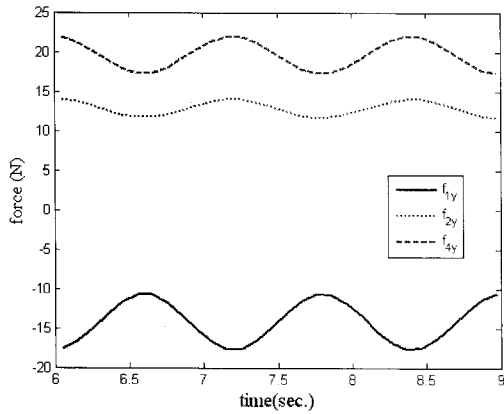
$$a(t) = \begin{cases} \alpha & 9 \leq t < 10 \\ 0 & 10 \leq t < 11 \\ -\alpha & 11 \leq t \leq 12 \end{cases} & (21)$$

본 모의 실험에서는 $\alpha=0.25$ 로 설정하였다.

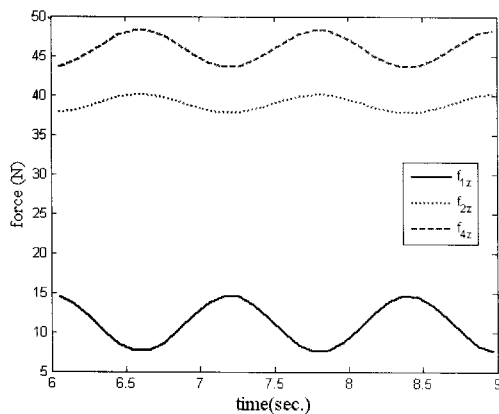
그림 6은 로봇 몸체가 정지하는 구간 $6 \leq t < 9$ 에서의 다리 힘 배분 결과를 나타낸 것이다. 다리의 x 축 성분은 y 축 성분과 유사하게 나오므로 그 도시를 생략하고 y 축과 z 축 성분만 출력하였다. 이 구간에서 로봇 몸체가 정지해 있으므로 힘 성분들은 식 (20)의 모멘트 변화에 대응하여 정현파 같은 변화를 보인다. 또 그림 6(b)에 표시된 대로 고장 난 다리 1의 z 축 힘 성분이 다른 지지 다리의 z 축 힘 성분보다 적은 값으로 구해졌다. 즉 고장 난 다리의 부하를 상대적으로 최소화시키는 식 (8)의 조건이 만족됨을 알 수 있다.

그림 7은 로봇 몸체가 움직이는 구간($9 \leq t \leq 12$)에서의 다리 힘 배분 결과를 나타낸 것이다. 로봇 몸체가 움직이므로 지지 다리의 위치 벡터도 시간에 대해서 변하며 힘 분배 결과도 시간에 따라서 다르게 나온다. 하지만 몸체 무게 중심에서 서로 대각선상에 있는 다리 2와 다리 4의 힘 성분들은 대칭적인 값을 가진다. 그림 7 결과의 단점은 힘 성분들이 시간에 따라서 급격하게 변한다는 사실이다. 이것은 LP 최적화를 이용한 힘 배분 알고리즘 결과가 나타내는 성질 중의 하나이다[5][6]. Temporal continuity[5]나 smoothing 함수[6] 등을 이용하면 부드러움 힘 분배 결과를 얻을 수 있다.

선행 연구 [3]에서는 사족 로봇이 평탄 지형에서 완전 직선 보행만 하며 항상 세 개의 지지 다리를 가지는 조건을 이용하여 힘 배분 문제를 대수적으로 풀었다. 하지만 그림 5의 게 걸음새 주행은 걸음새 각도가 도중에 변한다면 로봇이 직선 주행을 하지 않을 수도 있으며 지지 다리가 네 개가 될 수도 있다. 따라서 [3]의 연구 결과를 적용할 수가 없으므로 본 논문에서 제안한 바와 같은 일반적인 접근 방법이 필요하다.



(a)



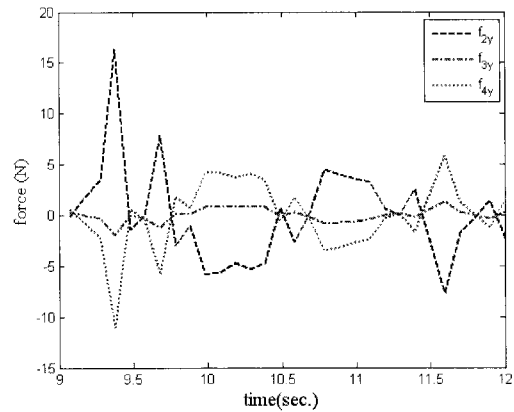
(b)

그림 6 $6 \leq t < 9$ 에서의 다리 힘 배분 결과. (a) y축 성분, (b) z축 성분.

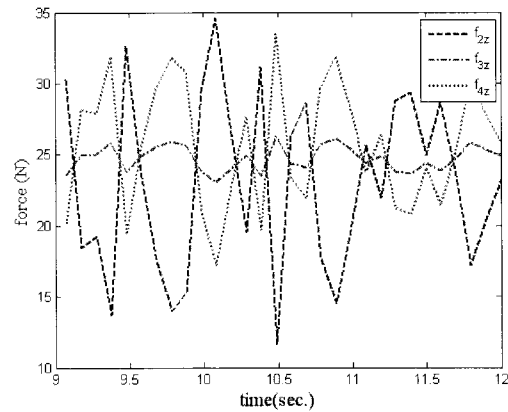
Fig. 6 Result of foot force distribution when $6 \leq t < 9$. (a) y-axis element and (b) z-axis element.

5. 결 론

이번 연구에서는 관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새에 대한 일반적인 다리 힘 배분 알고리즘을 제안하였다. 임계 안정여유도를 가지는 내고장성 걸음새의 약점을 극복하기 위해서 본 논문에서는 마찰 계수 여유도를 최대화하는 것을 목적 함수로 정의하고 다리 힘 배분 문제를 선형계획법(LP)으로 모델링하였다. 관절고착고장이 야기하는 동역학적 특징들을 LP의 제한 조건을 이용하여 효과적으로 정량화한 것이 본 논문이 가지는 주요한 기여도이다. 모의 실험을 통하여 제안된 힘 배분 기법의 효율성을 검증하였다.



(a)



(b)

그림 7 $9 \leq t < 12$ 에서의 다리 힘 배분 결과. (a) y축 성분, (b) z축 성분.

Fig. 7 Result of foot force distribution when $9 \leq t < 12$. (a) y-axis element and (b) z-axis element.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-521-D00026)

참 고 문 헌

[1] V. Kumar and K. J. Waldron, "Force distribution in closed kinematic chains," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 4, no. 6, pp. 657-664, 1988.
 [2] P. Gonzalez de Santos, M. A. Jimenez, and M. A. Armada, "Dynamic effects in statically stable walking machines," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 23, pp. 71-85, 1998.
 [3] 양정민, "고장 난 다리가 있는 사족 보행 로봇의 평탄 직선보행을 위한 효율적인 다리 힘 배분 알고리즘," 전기학회논문지, 제57A권, 6호, pp. 896-901, 2008.

- [4] J.-M. Yang, "Fault tolerant gaits of legged robots for locked joint failures," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics C*, vol. 32, no. 4, pp. 507-516, 2002.
- [5] F.-T. Cheng and D. E. Orin, "Optimal force distribution in multiple-chain robotic systems" *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 21, no. 1, pp. 13-24, 1991.
- [6] 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.
- [7] D. C. Kar, K. K. Issac, and K. Jayarajan, "Minimum energy force distribution for a walking robot," *Journal of Robotic Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 47-54, 2001.
- [8] V. Kumar and K. J. Waldron, "Force distribution in walking vehicles," *Transactions on ASME: Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp. 90-99, 1990.
- [9] R. S. Jamisola, A. A. Maciejewski, and R. G. Roberts, "Failure-tolerant path planning for kinematically redundant manipulators anticipating locked-joint failures," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 4, pp. 603-612, 2006.
- [10] 양정민, "에너지 안정여유도를 이용한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새," *전기학회논문지*, 제55D권, 제7호, pp. 319-326, 2006.
- [11] C. A. Klein and S. Kittivatcharapong, "Optimal force distribution for the legs of a walking machine with friction cone constraints," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 1, pp. 73-85, 1990.
- [12] 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.
- [13] J.-M. Yang, "Crab walking of quadruped robots with a locked joint failure," *Advanced Robotics*, vol. 17, no. 9, pp. 863-878, 2003.

저 자 소 개



양 정 민 (楊 正 敏)

1971년 3월 31일생. 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(학사). 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 부교수. 주관심분야: 비동기 순차 머신 제어, 걸음새 연구 등.
Tel : 053-850-2736, Fax : 053-850-2704
E-mail : jmyang@cu.ac.kr