

# 고장 난 다리가 있는 사족 보행 로봇의 평탄 직선보행을 위한 효율적인 다리 힘 배분 알고리즘

論 文  
57-5-25

## An Efficient Foot-Force Distribution Algorithm for Straight-Line Walking of Quadruped Robots with a Failed Leg

楊正敏<sup>†</sup>  
(Jung-Min Yang)

**Abstract** - This paper addresses the foot force distribution problem for quadruped robots with a failed leg. The quadruped robot has fault-tolerant straight-line gaits with one leg in locked-joint failure, and has discontinuous motion with respect to the robot body. The proposed method is operated in two folds. When the robot body stands still, 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. When the robot body moves, the conventional pseudo-inverse algorithm is applied to obtain the foot forces for supporting legs. Simulation results show the validity of the proposed scheme.

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

### 1. 서 론

다족 보행 로봇(multi-legged robot)이란 몸체에 기구학적(kinematic) 다리가 달려 있어 순수하게 다리의 움직임으로만 운동하는 형태의 로봇을 말한다. 다족 보행 로봇은 바퀴로 구동되는 이동 로봇(wheeled mobile robot)에 비해서 훨씬 더 나은 운동성과 지형 적응성을 지니고 있다. 로봇공학의 성장과 더불어 다족 보행 로봇에 대한 연구도 발전하여 이론과 제작 분야에서 다양한 방법들이 시도되어 왔다 [1]. 이 중 다족 보행 로봇이 다리 하나에 고장이 발생한 후에도 외부로부터 수리를 받지 않고 정적 안정 여유도(static stability)를 유지하면서 보행할 수 있게 만드는 내고장성 걸음새 연구도 최근 활발하게 진행되고 있다[2][3].

기존의 내고장성 걸음새 연구들이 내포하고 있는 가장 큰 문제점은 대부분의 연구 결과들이 걸음새의 동역학적 영향을 전혀 고려하지 않았다는 점이다. 실제로 고장이 발생하여 이동 능력이 훼손된 다리는 지면과의 접촉으로 마찰력을 일으키거나 몸체를 지지하지 못하게 되어 몸체 무게 중심을 바꾸는 등 동역학적인 변화도 일으키므로 기구학적 가정만으로 내고장성 걸음새를 유도하는 것은 충분하지 않다. 특히 다족 보행 로봇에 가해지는 기준 힘과 토크가 미리 주어졌을 때 각 다리가 가져야 하는 힘 성분을 구하는 다리 힘 배분(foot-force distribution)은 걸음새 연구 분야에서 동역학적 영향을 고려하는 대표적인 문제라고 말할 수 있다[4].

본 연구의 목적은 내고장성 걸음새를 가지는 사족 보행 로봇(quadruped robot)의 다리 힘 배분 문제를 푸는 일이다.

본 연구에서 고려하는 다리 고장은 관절고착고장(locked joint failure)[5]으로 다리의 관절 하나가 어떤 이유 때문에 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태를 말한다. 관절고착고장은 로봇 매니플레이터(manipulator)형 다리에서 일어날 수 있는 대표적인 고장 중의 하나이다. 본 논문에서는 또한 사족 보행 로봇이 완전 평탄한 지형에서 직선 보행을 한다고 가정한다.

다리 힘 배분은 보통 구해야 할 변수의 개수가 주어진 방정식보다 많은 부정(indeterminate) 문제로 표현되므로 다리 힘 벡터로 이루어진 어떤 목적 함수를 최소화하는 해를 구하는 최적화 문제로 해석되어 왔다[6][7]. 선형적으로 주어지는 힘 성분에 대한 방정식에 pseudo inverse를 적용한 풀이 기법도 사용되었다[8].

사족 보행 로봇이 가지는 내고장성 직선 걸음새는 로봇 몸체의 움직임이 불연속적이고 몸체를 받쳐주는 지지 다리(supporting legs)가 항상 세 개가 되는 특징이 있다[2]. 본 논문에서는 이러한 내고장성 직선 걸음새의 특징을 이용하여 효율적인 다리 힘 배분 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 힘 배분 기법의 구동 개요는 아래와 같다.

i) 먼저 로봇 몸체가 정지되어 있을 때는 최적화 알고리즘을 이용하지 않고 해석적으로 모든 다리 힘 성분을 구한다. Zero Interaction Force 원리[4]를 이용하여 수평 성분의 힘 성분을 우선 구한 후 걸음새의 안정여유도를 결정하는 지지 다각형 변(side)을 이루는 두 다리의 수직 힘 성분이 동일하다고 설정하여 나머지 힘 변수를 구한다.

ii) 로봇 몸체가 움직일 때는 pseudo inverse를 이용하여 힘 성분을 구한다.

기존 힘 배분 기법과 비교하여 본 논문이 가지는 장점은 다음과 같다.

a) 대수적인 기법만을 사용하는 본 연구 기법은 복잡한 최적화 계산을 거치지 않기 때문에 적용하기 쉽고 계산 속

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 大邱가톨릭大 電子工學科 副教授 · 工博

E-mail : jmyang@cu.ac.kr

接受日字 : 2008年 1月 28日

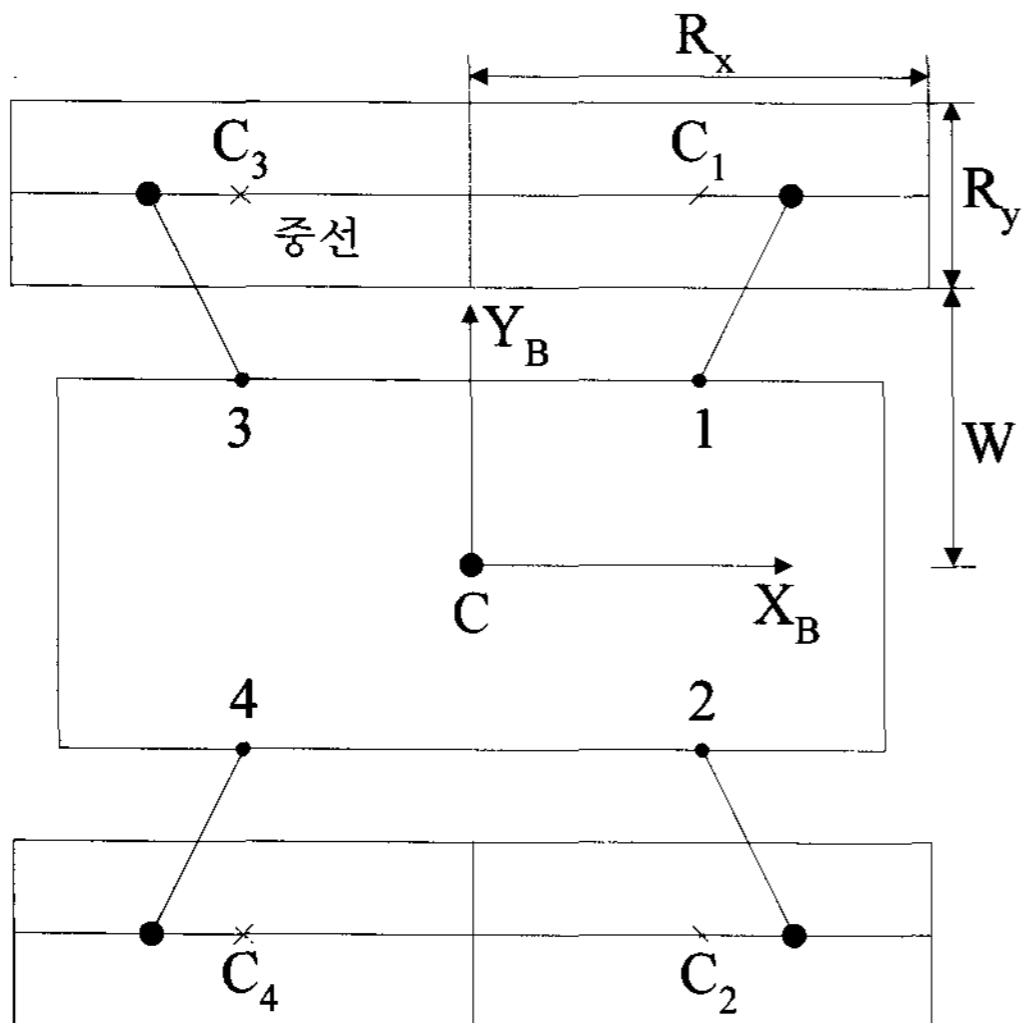
最終完了 : 2008年 3月 19日

도가 빠르다.

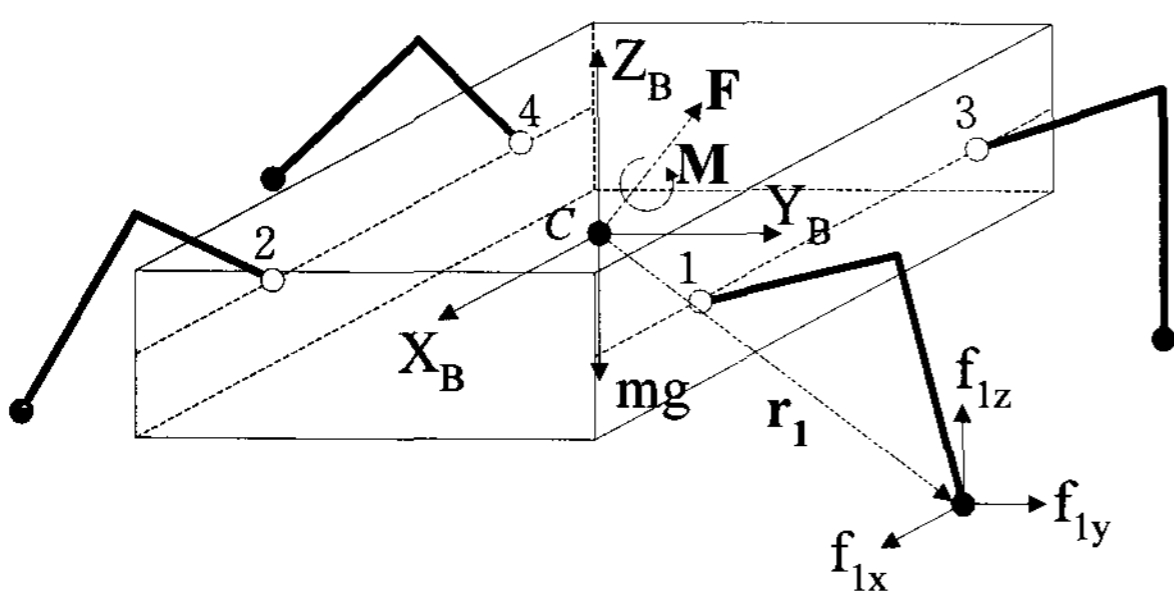
b) 사족 보행 로봇의 평탄 직선 걸음새는 고장 난 다리가 정지해 있을 때 몸체 무게중심의 투영점이 지지 다각형의 경계에 위치하는 임계 안정여유도를 나타내는 약점이 있다. 하지만 본 연구에서 제안된 힘 배분 기법은 임계 안정여유도를 가지는 걸음새가 불안정하게 될 수 있는 가능성을 최소화시킨다는 장점이 있다.

본 논문에서는 [2]에서 구한 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새를 사용하여 힘 배분 알고리즘을 구한다. 평탄 직선 보행을 하는 사족 보행 로봇의 걸음새에 대한 모의 실험을 통해서 제안된 힘 배분 알고리즘의 적용 가능성을 검증한다. 로봇 몸체가 정지하거나 움직일 때 모두 pseudo inverse 를 사용하여 힘 성분을 구하는 기존의 방법과 본 연구에서 제안된 방법의 비교 결과도 기술한다.

## 2. 내고장성 직선 걸음새



(a)



(b)

그림 1 사족 보행 로봇. (a) 이차원 모델, (b) 힘 성분.

Fig. 1 Quadruped robot. (a) two-dimensional model and (b) force elements.

그림 1은 본 논문에서 다루는 사족 보행 로봇의 이차원 모델과 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. 각 다리의 이동 가능 범위는 네 다리가 모두 같고 상호 겹쳐짐이 없으며, 그림 1(a)와 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 i의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이등분하는 중선(middle line)이  $C_i$ 를 지나간다. 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 로봇의 다리는 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니퓰레이터(articulated-arm manipulator) 구조로 되어 있다. 이러한 모델을 가지는 다리의 발은 자유도(degree of freedom) 3을 가지며 작업 영역 어디에라도 착지할 수 있다.

지표면을 지지하고 있는 다리 i의 발(foot)은 몸체 좌표계에서 표시된 힘 성분  $f_i = (f_{ix}, f_{iy}, f_{iz})$ 를 가진다. 또 몸체 무게 중심 C에는 다리의 지지력으로부터 생성된 힘  $F$ 와 모멘트  $M$ 이 존재하며, 몸체 질량 m이 만드는 중력  $mg$ 가  $-Z_B$  방향으로 존재한다.  $F$ 와  $M$  벡터는 모두 몸체 좌표계에서 정의된다.

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다[5]. 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. 사족 보행 로봇은 완전 평탄 지형에서 직선 보행을 하며 지표면에 대한 몸체의 고도(altitude)는 평행하고 일정하게 유지된다고 가정한다. 또한 각 다리의 지지점은 작업영역의 중선 위에 위치하도록 설정한다.

그림 2는 선행연구[2][9]에서 제안된, 관절고착이 발생한 사족 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새이다. 고장이 발생한 다리는 1이라고 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 관절고착고장을 위한 내고장성 걸음새는 일종의 불연속 걸음새로서, 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 고장후(post-failure) 보행에도 계속 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 움직임에 따라서 수동적인 이동만을 한다(그림 2(d) 참조). 그림에서  $x_1$ 은 다리 1 착지점의  $X_B$ 축 좌표로서 고착된 관절의 위치와 다리의 자세에 따라서 결정되는 값이다[2]. 그림 2는  $x_1$ 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 경우는 [2] 참조).

$\lambda(x_1)$ 는 다리 1 착지점이  $x_1$ 일 때의 내고장성 걸음새 보폭으로  $x_1$ 에 따라서 다음과 같이 유도된다.

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

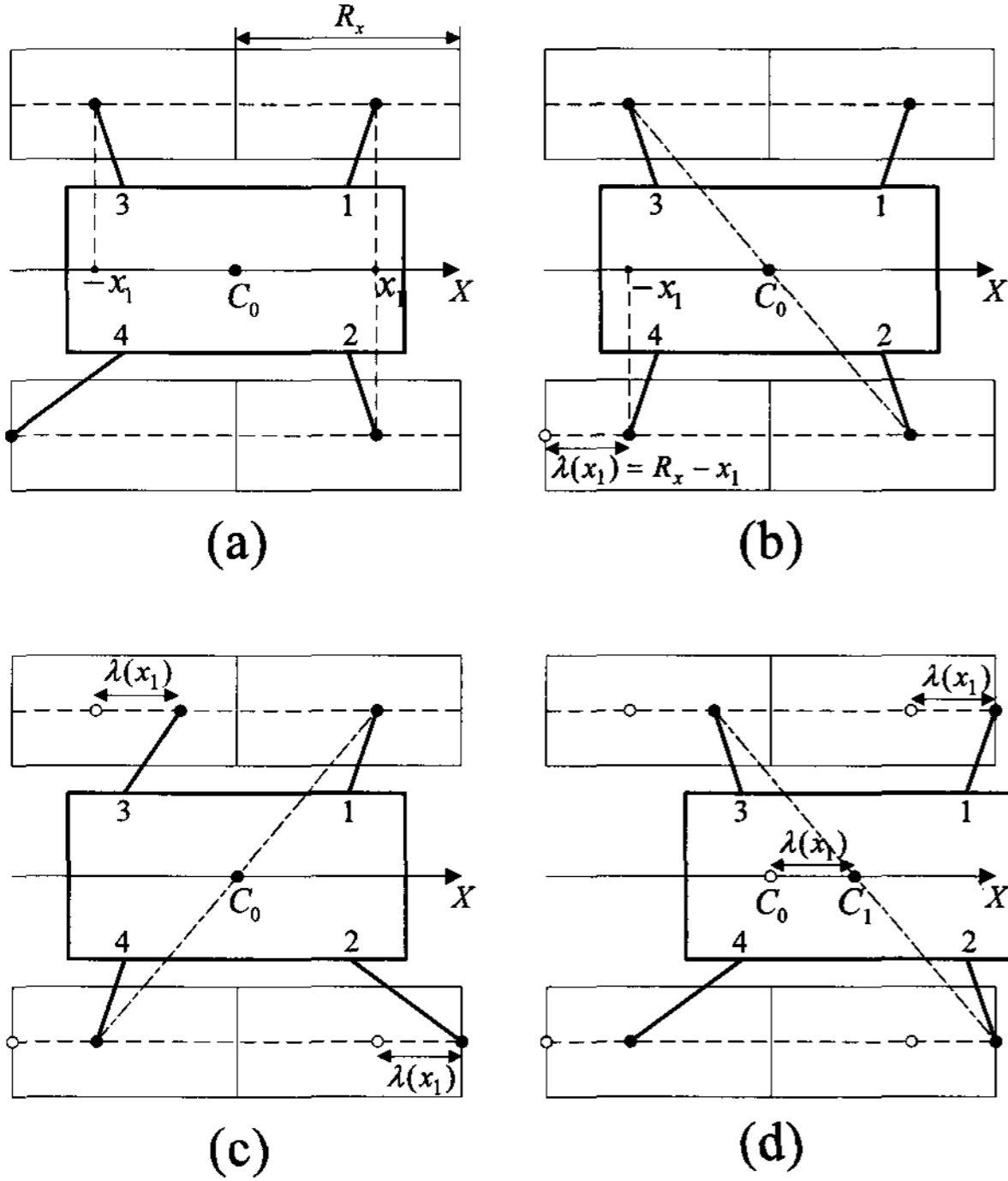


그림 2 다리 1에 관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 2, 다리 3 이동 (d) 다리 1 이륙 후 로봇 몸체 이동.

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

### 3. 힘 배분 기법

#### 3.1 문제 설정

다리 힘 배분 문제를 풀기 위해서 로봇 몸체의 무게 중심에서의 Newton-Euler 방정식을 구한다. 몸체 무게 중심이 받는 힘은 중력을 제외하면 모두 다리의 지지력으로부터 나오므로 다음과 같은 표준 힘 방정식이 성립한다[4].

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i = \mathbb{F} + m\mathbf{g} \quad (2)$$

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

위 식에서  $n$ 은 지지 다리의 개수이며  $\mathbf{g}$ 는 중력 가속도 벡터, 그리고  $\mathbf{r}_i$ 는  $C$ 에 대한 다리  $i$  착지점의 위치 벡터이며 몸체 좌표계에서 표시된다(그림 1(b) 참조). 힘과 모멘트는 모두 삼차원 벡터이므로 식 (2)는 여섯 개의 방정식을 가진다. 구해야 하는 다리 힘 성분은 모두  $3n$ 개이고 정적 보행을 하는 다족 보행 로봇에서 항상  $n \geq 3$ 이므로 (2)는 통상 부

정 방정식이 되어 대수적으로 해결할 수 없다. 하지만 본 논문에서는 그림 2의 내고장성 걸음새의 특이성을 활용하여 부분적으로 대수적 풀이가 가능한 기법을 제안한다. 식 (2)를 그림 2의 걸음새에 적용시키는 과정을 설명하면 아래와 같다.

- 1) 그림 2의 걸음새 동작에서 이동 상태에 있던 다리가 착지한 후부터 지지 다리 하나가 새롭게 이륙하기까지의 시간이 무시할 정도로 짧다고 하면 이 걸음새의 디듀티(duty factor)[10]은 3/4이 되고, 지지 다리가 항상 세 개인 걸음새(tripod gait)로 동작한다고 말할 수 있다. 즉 식 (2)에서  $n=3$ 이 된다.
- 2) 사족 보행 로봇은 완전 평탄 지형에서  $X_B$  방향으로 직선 보행을 한다고 설정하였으므로 몸체 무게 중심에 작용하는 기준 힘  $\mathbb{F}$ 의  $y$ 축 성분은 0이어야 하고 모멘트  $\mathbb{M}$ 은  $y$ 축 성분만 보유해야 한다.
- 3) 마찬가지로 직선 보행 성질을 다리에 적용하면 지지 다리가 행사하는 힘 벡터의  $y$ 축 성분  $f_{iy}$ 는 항상 0이어야 한다. 즉 구해야 하는 힘 벡터 성분은  $3 \times 2$ 로 총 여섯 개가 된다.

1) ~ 3)의 결과를 표준 힘 방정식에 적용해보자. 편의상 사족 보행 로봇은 다리 4가 이동 상태에 있는 그림 2(b)의 걸음새를 가진다고 가정하자. 식 (2)는 아래와 같이 정리된다[8].

$$\sum_{i=1}^3 f_{ix} = F_x(t) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^3 f_{iz} = F_z(t) + mg \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^3 f_{ix} z_i - \sum_{i=1}^3 f_{iz} x_i = \Phi_y(t) \quad (5)$$

위 식에서  $x_i, z_i$ 는 몸체 좌표계에서 표시된 다리  $i$ 의 위치 벡터 성분, 즉  $\mathbf{r}_i := (x_i, y_i, z_i)$ 이며  $F_x(t), F_z(t)$ 와  $\Phi_y(t)$ 는 몸체 좌표계에서 표시된  $\mathbb{F}$ 의  $x$ 축,  $z$ 축 성분과  $\mathbb{M}$ 의  $y$ 축 성분을 각각 가리킨다.

그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새는 몸체가 정지되어 있을 때 무게 중심의 투영점이 지지 다각형(support pattern)의 변 위에 위치하는 임계 안정여유도(marginal stability)를 가진다는 약점이 있다. (그림 2(b)에서는 투영점  $C_0$ 가 다리 2와 다리 3이 이루는 선분 위에 위치해 있다.) 마찰이나 기타 외란에 의해서 변의 위치가 순간적으로 바뀌면 걸음새가 불안정하게 될 수도 있다. 본 논문에서는 이러한 약점을 고려하여 걸음새의 안정여유도를 최대한 보존하는 데 목표를 두고 힘 배분 알고리즘을 제안한다.

#### 3.2 힘 배분 기법

먼저 다리 힘의  $x$ 축 성분은 Zero Interaction Force 원리를 이용하여 구한다. Zero Interaction Force 원리는 두 지지 다리의 지지점 사이를 연결하는 벡터 방향으로 힘 성분이 없어야 한다는 조건으로서 다리 사이의 상호 작용력으로 발

생할 수 있는 미끄러짐을 최소화시킨다[4][11]. Zero Interaction Force 원리의 기본 식은 다음과 같다.

$$(f_i - f_j) \cdot (r_i - r_j) = 0, \forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j$$

본 논문에서 고려하고 있는 내고장성 걸음새에서 지지 다각형 평면 위에 있는 다리 힘의 수평 성분은  $f_{ix}$  뿐이므로 위 식과 식 (3)을 이용하면 아래와 같은 결과를 얻는다.

$$f_{ix} = F_x(x)/\beta, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (6)$$

식 (6)을 (4)와 (5)에 대입하면 남은 미지 변수  $f_{iz}$  에 대한 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Af_z = B$$

$$f_z = [f_{1z} \ f_{2z} \ f_{3z}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{1x} & x_{2x} & x_{3x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} F_z(t) + mg \\ \sum_{i=1}^3 f_{ix} z_i - \Phi_y(t) \end{bmatrix}$$

위 결과는 몸체가 정지되었을 때 유도된 것이지만 몸체가 움직이는 걸음새(그림 2(d))에도 그대로 적용된다. 다시 말하면 지지 다리의 x축 힘 성분은 Zero Interaction Force 원리로부터 모두 동일하게 설정되며 세 개의 z축 힘 성분은 식 (7)에 나온 두 개의 방정식으로 표현된다.

본 논문에서는 로봇 몸체가 정지된 걸음새(그림 2(a)~(c))와 몸체가 움직이는 걸음새(그림 2(d))에서 각각 다른 방법을 이용하여  $f_{iz}$  를 구한다. 먼저 로봇 몸체가 정지된 걸음새에서는 앞에서 언급했듯이 무게 중심의 투영점이 지지 다각형 변 상에 존재한다. 임계 안정 상태에 있는 이러한 걸음새에서 중요한 것은 무게 중심 투영점이 있는 다각형 변의 위치를 그대로 유지시키는 일이다. 그런데 식 (6)에서 지지 상태에 있는 다리의 x축 힘 성분은 모두 동일하게 구했다. 지표면은 평탄하다고 설정했으므로 모든 다리의 지지점에서의 정지 마찰 계수는 같다. 따라서 지지 다각형 변을 만드는 두 다리의 z축 힘 성분 값을 똑같다고 설정하면 두 다리가 가지는 미끄러짐(slippage) 정도의 차이는 동일하게 되고 결과적으로 정적 안정여유도를 그대로 유지시키는 최적의 조건을 만들어준다. 그림 2(b)에서 무게 중심 투영점이 놓여진 변은 다리 2와 다리 3이 생성하므로 다음과 같은 추가 방정식을 얻는다.

$$f_{2z} = f_{3z} \quad (8)$$

식 (8)과 (7)을 연립하여 풀면 세 개의 미지 변수를 대수적으로 얻을 수 있다. 이 결과는 다리 2 또는 다리 3이 이동 상태에 있는 걸음새에도 그대로 적용된다. 다리 2 또는 다리 3이 이동 상태에 있을 때 무게 중심 투영점을 포함하는 변은 그림 2(c)에서 확인할 수 있듯이 다리 1과 다리 4가 만든다. 따라서 식 (8) 대신  $f_{1z} = f_{4z}$  로 놓고 방정식을 풀어 z축 힘 성분을 구한다.

다음으로 몸체가 움직이는 걸음새에서  $f_{iz}$  를 구하는 방법을 제안한다. 내고장성 걸음새에서 로봇 몸체는 고장 난 다리 1과 함께 그림 2(d)의  $C_0$ 에서  $C_1$ 까지 이동한다. 몸체가 움직일 때 무게 중심 C는 지지 다각형의 내부에 투영되므로 양(陽)의 안정여유도를 가진다[10]. 따라서 지지 다각형 변을 만드는 다리의 미끄러짐 정도를 같게 하는 위의 방법을 그대로

로 적용할 필요가 없다. 본 논문에서는 Moore-Penrose pseudo-inverse를 이용하여 다리의 z 성분 힘을 구한다. pseudo-inverse 기법을 통해서 구한 해는 힘 벡터의 놈(norm) 합을 최소화시키므로[12] 효율적인 다리 힘 배분을 이룬다. 또한 Linear Programming이나 Quadratic Programming 등 계산 시간이 많이 필요한 최적화 기법을 사용하는 대신 pseudo-inverse 기법을 적용하여 신속한 결과를 얻는 것이 앞에서 제안한 대수적 해결 기법의 장점을 승계한다고 말할 수 있다.

식 (7)에서 행렬 A의 pseudo-inverse를 이용하여  $f_z$  를 구하면 다음과 같이 나온다.

$$f_z = A^T(AA^T)^{-1}B \quad (9)$$

기존 연구 [4][12]에서는 식 (9)를 전체 힘 벡터에 적용하여 x, y, z 성분을 한꺼번에 구했고, 본 논문에서는 z 성분 힘에 대해서만 적용하였다. 하지만 pseudo-inverse를 이용하여 구한 전체 다리 힘 벡터의 수평 성분들은 자동적으로 Zero Interaction Force 원리를 만족시킴이 증명되었다[4]. 즉 식 (9)를 전체 힘 벡터에 적용해도 x축 힘 성분  $f_{ix}$  는 식 (6)과 동일하게 나온다. 따라서 x축 힘 성분을 먼저 구하고 나머지 z 성분을 pseudo-inverse에 의해서 계산하는 본 논문의 기법도 힘 벡터의 놈(norm) 합을 최소화시키는 결과를 도출한다.

#### 4. 예 제

본 논문에서 제안한 다리 힘 배분 기법의 효용성을 검증하기 위해서 내고장성 걸음새에 대한 모의 실험을 실시한다. 완전 평탄한 지형을 걷는 사족 보행 로봇의 다리 1에 관절고착고장이 발생하였다고 가정하자. 로봇은 그림 2와 같은 내고장성 직선 걸음새를 가지며  $+X_B$  방향으로 보행한다. 본 모의 실험에서는  $m=30$ ,  $R_x=1$ ,  $R_y=0.5$ ,  $W=1.5$ ,  $g=9.8$ ,  $m=3$  등으로 로봇 매개 변수를 설정하였고,  $Z_B$  축으로 측정된 다리 지지점부터 무게 중심 C까지의 높이는 4로 두었다. 모의 실험에서는 모두 MKS 단위를 사용한다. 그리고 관절고착고장이 발생한 다리 1은  $x_1=0.6$ 의 착지점을 가진다고 설정한다. 로봇이 가지는 내고장성 걸음새의 보폭은 식 (1)로부터  $\lambda(0.6) = 0.4$ 으로 구해진다.

앞 장에서 설정했듯이 내고장성 걸음새의 디딤울은 3/4이고 다리 하나가 항상 이동 상태에 있다. 그림 2에서 이동 상태에 있는 다리의 순서는 4→2→3→1임을 알 수 있다. (다리 1이 이동 상태에 있을 때 로봇 몸체 이동). 본 모의 실험에서는 내고장성 걸음새의 한 주기를 12초로 설정한다. 따라서 한 주기 내에서 몸체가 정지되는 시간은 0~9초이며 몸체가 움직이는 시간은 9~12초이다.

로봇 몸체가 시간 t에 대해서 가져야 하는 힘 및 모멘트는 아래와 같다고 정의한다.

$$F_x(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 9 \\ ma(t) & 9 \leq t \leq 12 \end{cases} \quad (10)$$

$$F_z(t) = \Phi_y(t) = 0$$

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

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

본 모의 실험에서는  $\alpha = 0.2$ 로 설정하였다.

그림 3은 로봇 몸체가 정지하는 구간( $0 \leq t < 9$ )에서의 다리 힘 배분 결과를 나타낸 것이다. 다리의 x축 성분은 식 (6)과 같이 항상 일정하게 구해지므로 그 도서를 생략하고 z축 성분만 출력하였다. 편의상 다리가 이동 상태에 있으면 0의 z축 힘 성분을 가진다고 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 임계 안정여유도를 이루는 지지 다각형 변을 만드는 다리의 힘 성분은 모두 동일한 값으로 할당되었다. 또한 임계 안정여유도를 결정하는 변을 만들지 않는 나머지 다리의 힘 성분이 변을 만드는 두 다리의 힘 성분보다 항상 적게 나왔다. 이것은 무게 중심이 치우친 쪽에 힘을 더 분배함으로써 안정여유도를 보호하는 본래의 목적에 부합하는 결과라고 해석될 수 있다.

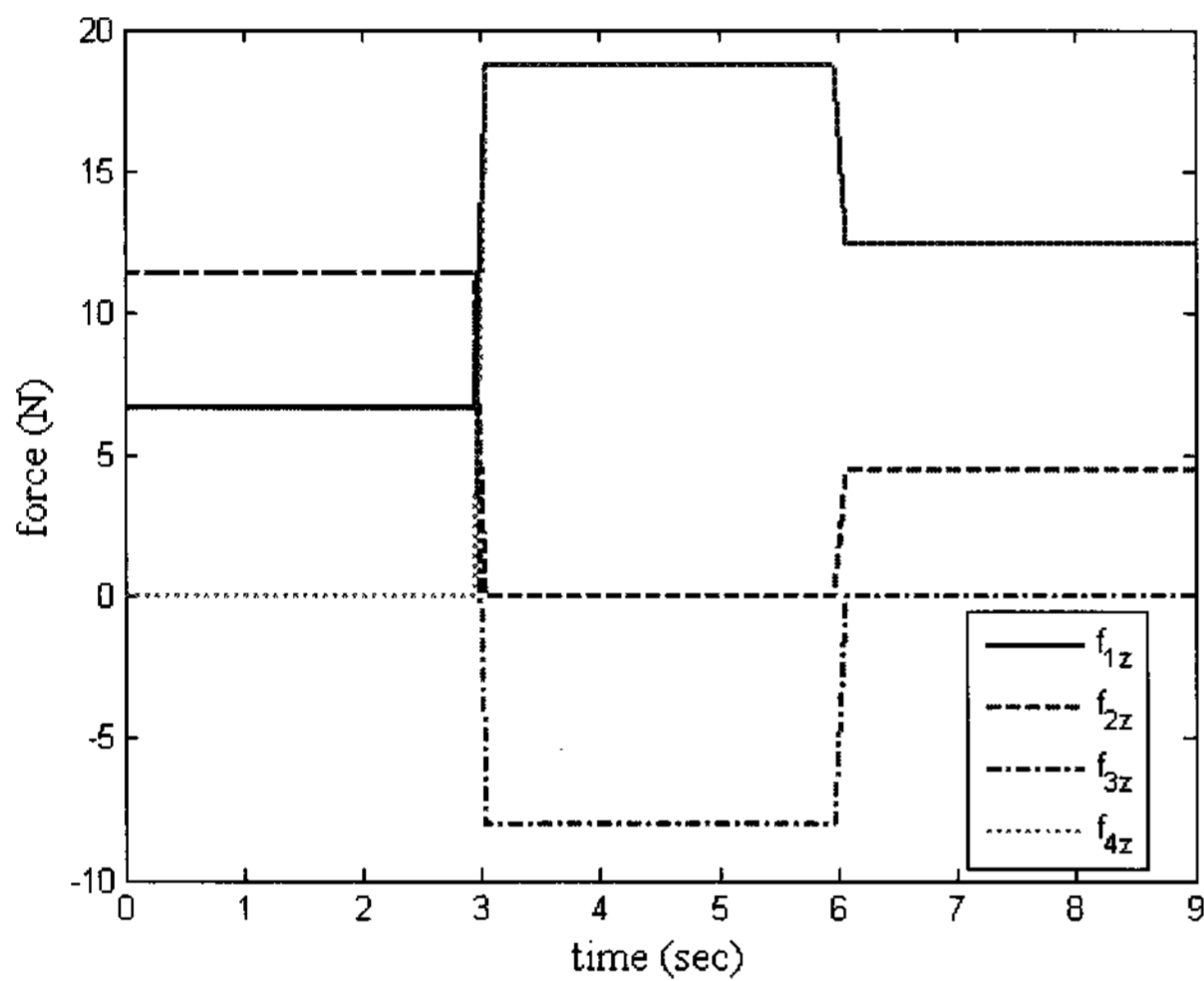


그림 3 로봇 몸체가 정지하는 구간에서의 다리 힘 배분 결과.  
Fig. 3 Result of foot force distribution when the robot body stands still.

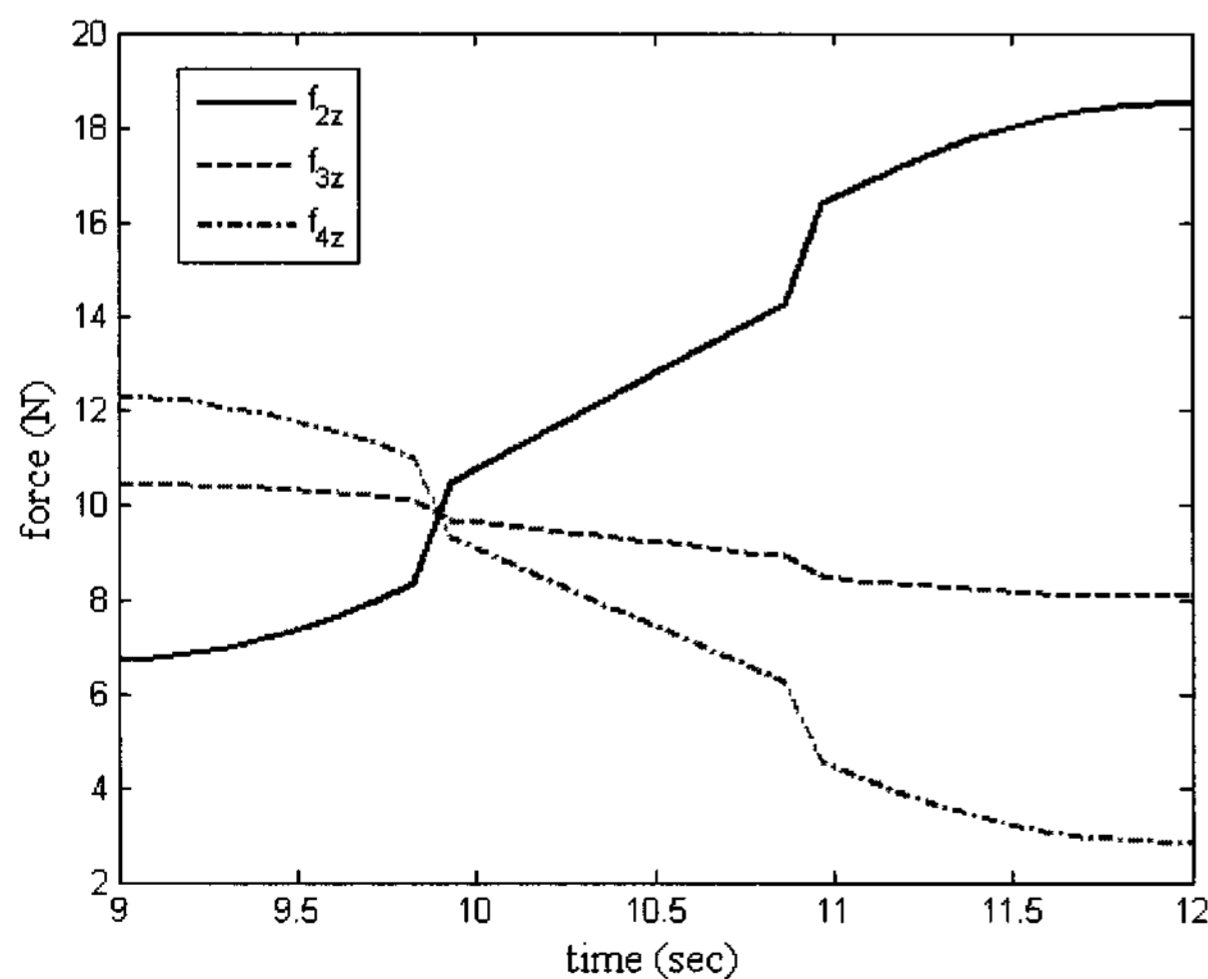


그림 4 로봇 몸체가 움직이는 구간에서의 다리 힘 배분 결과.  
Fig. 4 Result of foot force distribution when the robot body moves forward.

그림 4는 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. 위 결과는 식 (9)의 pseudo-inverse를 이용한 것이지만 내고장성 걸음새의 정적 안정여유도를 보호한다는 목적과도 일치한다. 그림 4에서 다리 2의 z축 힘 성분은 시간에 따라서 증가하고 다리 4의 힘 성분은 점점 감소함을 관찰할 수 있다. 그림 2(d)를 보면 무게 중심은  $C_0$ 에서 시작하여 한 주기가 끝날 무렵  $C_1$ 으로 접근한다. 이때 다리 2는 무게 중심과 가까운 지지 다각형 변을 만들고 다리 4는 그렇지 않으므로 몸체의 진행에 맞추어 다리 4보다 다리 2에 힘을 점점 더 분배하는 그림 4의 결과가 안정여유도 면에서 더 유리하다.

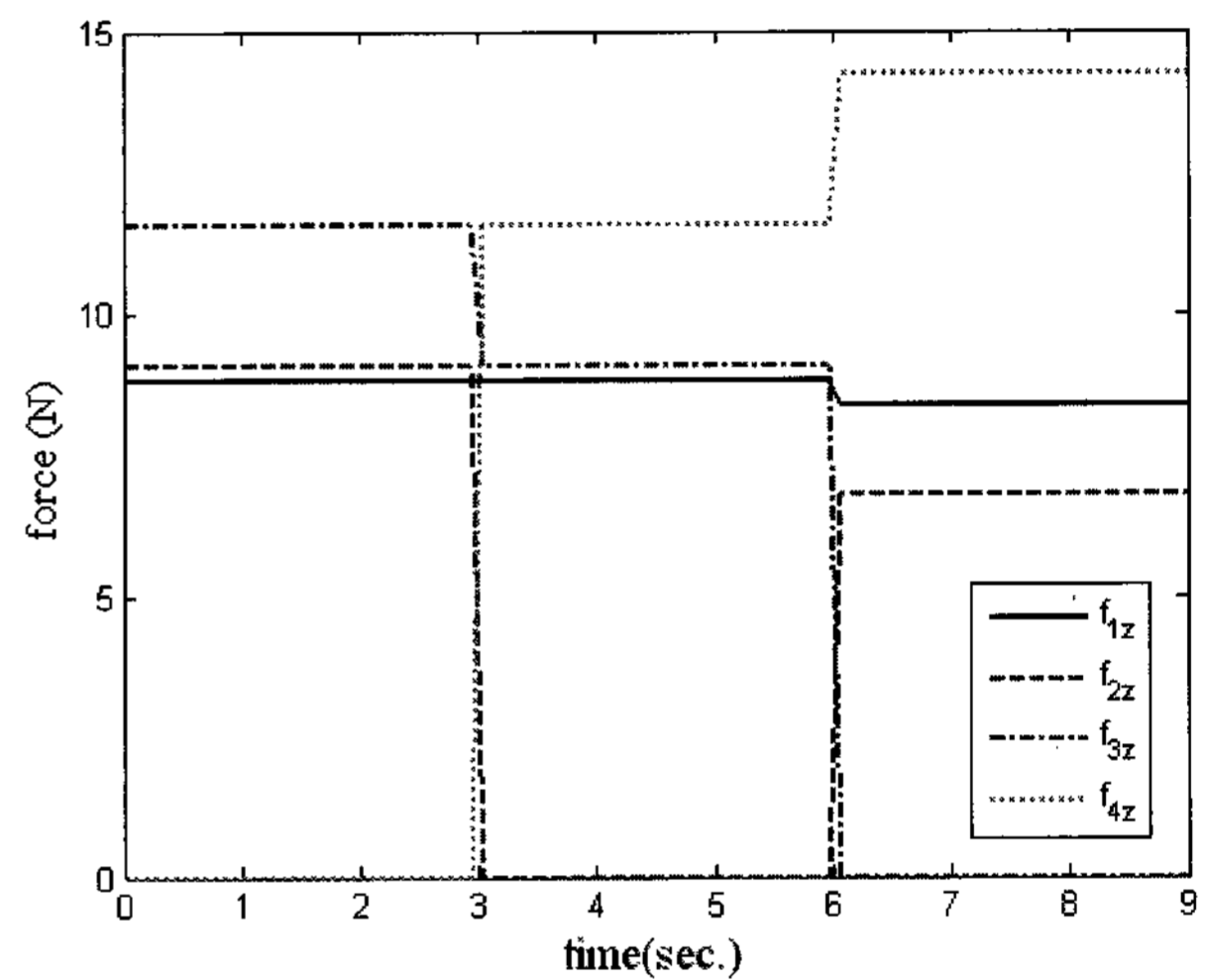


그림 5 Pseudo-inverse를 사용한 다리 힘 배분 결과.  
Fig. 5 Result of foot force distribution using pseudo-inverse only.

내고장성 걸음새 전 구간( $0 \leq t < 12$ )에서 pseudo-inverse만을 사용하는 기존의 방법[8]과 논문에서 제안된 방법을 정지 마찰력 측면에서 비교해본다. 그림 5는 걸음새의 전 구간에서 pseudo-inverse만을 사용하여 z축 다리 힘 성분을 구한 결과이다. ( $9 \leq t < 12$  구간은 그림 4와 일치하므로  $0 \leq t < 9$  구간 결과만을 나타내었다.) 그림 3과 달리 그림 5에서는 무게 중심 투영점이 있는 지지 다각형 변을 만드는 두 다리의 힘 성분이 서로 다르며 특히 그 값들이 그림 3의 결과보다 적다. 이런 경우 정지 마찰계수에 따라서 다리가 미끄러져 걸음새가 불안정해질 수도 있다. 예를 들어 사족보행로봇이 운동하고 있는 지표면의 정지마찰계수가  $\mu = 0.03$ 이라고 가정하고 구간  $0 \leq t < 3$ 에서의 힘 배분 결과를 고찰한다. 이 구간에서 무게 중심 투영점이 있는 지지 다각형 변을 만드는 두 다리는 다리 2와 다리 3이다. 본 논문에서 제안된 기법을 사용하여 구한 두 다리의 수직 성분 힘은 그림 3에서  $11.37(N)$ 으로 동일하게 나온다. 하지만 pseudo-inverse만을 이용한 기존의 방법으로 나온 값은 그림 5에서 알 수 있듯이  $f_{2z} = 9.03(N)$ ,  $f_{3z} = 11.58(N)$ 이다. 식 (6)과 (10)에서 x축 힘 성분은  $f_x = 0.33(N)$ 이다. 따라서 pseudo-inverse

기법을 이용한 기존의 방법에서는 다리 2에서  $\frac{f_x}{f_{2z}} > \mu$ , 즉 수직 항력이 정지마찰력보다 적게 나오므로 미끄러움이 발생하게 된다.  $\mu=0.03$ 일 경우 다른 구간에서도 유사한 비교 결과가 나오므로 제안된 연구 결과는 임계 안정여유도를 가지는 내고장성 걸음새의 안정여유도를 최대한 보전하고 미끄러움을 방지한다고 말할 수 있다.

본 모의 실험의 결과는 어떠한 최적화 계산 과정도 거치지 않았으므로 다리 힘 성분을 실시간으로 결정하고 역-동역학(inverse dynamics)을 거쳐 다리 관절 토크(torque)를 계산해야 하는 실제 구동 과정에도 시간 지연 없이 바로 적용될 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 평탄 직선 보행을 하는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새에 대한 다리 힘 배분 알고리즘을 제안하였다. 다리 힘 배분 알고리즘은 걸음새에 동역학적 영향을 고려하기 위한 기본적인 문제로서 사족 보행 로봇의 기구학적 설계와 구동 계획을 세우는 데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 내고장성 걸음새의 특이성을 이용하여 빠른 계산 시간을 가지는 다리 힘 배분 알고리즘을 제안하는 데 중점을 두었고 부분적으로 대수적 해결을 하는 데 성공하였다. 본 논문에서 완전 평탄한 지형에서 몸체 세로 방향으로 운동하는 내고장성 걸음새에 대한 힘 배분 기법을 제안하였지만 본 논문의 결과는 게 걸음새(crab gait)나 경사면(slide)을 직선 보행하는 걸음새에 대해서도 적용 가능하다. Y축 방향으로 힘 성분이 존재하는 내고장성 걸음새에 대한 다리 힘 배분 기법을 제안하는 일이 추후 과제로 남아 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년 대구가톨릭대학교 교비해외파견 연구지원금에 의한 것임.

### 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] 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.  
 [3] S. K.-K. Chu and G. K.-H. Pang, "Comparison between different model of hexapod robot in fault-tolerant gait," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics A, vol. 32, no. 6, pp. 752-756, 2002.  
 [4] V. Kumar and K. J. Waldron, "Force distribution in walking vehicles," Transactions on ASME: Journal of Mechanical Design, vol. 112, pp. 90-99, 1990.

[5] 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.  
 [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] 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.  
 [8] 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  
 [9] 양정민, "에너지 안정여유도를 이용한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새," 대한전기학회논문지, 제55D권, 제 7호, pp. 319-326, 2006.  
 [10] S. M. Song and K. J. Waldron, Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.  
 [11] V. J. 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.  
 [12] J. F. Gardner, "Efficient computation of force distributions for walking machines on rough terrain," Robotica, vol. 10, pp. 427-433, 1992.

### 저 자 소 개



#### 양 정 민 (楊 正 敏)

1971년 3월 31일생. 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 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