

## 평판 발을 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새

# Fault Tolerant Straight-Line Gaits of a Quadruped Robot with Feet of Flat Shape

양 정 민, 곽 성 우\*

(Jung-Min Yang<sup>1</sup> and Seong Woo Kwak<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>Catholic University of Daegu

<sup>2</sup>Keimyung University

**Abstract:** This paper proposes fault tolerant gaits of a quadruped robot with feet of flat shape. Fault tolerant gaits make it possible for a legged robot to continue static walking against a leg failure. In the previous researches, it was assumed that a legged robot had feet that have point contact with the surface. When the robot is endowed with feet having flat shape, fault tolerant gaits can show better performance compared with the former gaits, especially in terms of the stride length and gait stability. In this paper, fault tolerant gaits of a quadruped robot against a locked joint failure are addressed in straight-line motion and crab walking, respectively.

**Keywords:** gait study, fault tolerant gaits, quadruped robots, static walking, flat type feet

### I. 서론

다족 보행 로봇(multi-legged robot)은 강체로 이루어진 로봇 몸체에 매니퓰레이터(manipulator) 형 다리 여러 개가 부착되어 주로 지표면에서 이동하는 다중 결합 로봇 시스템(multiple-chain robotic system)을 말한다. 바퀴 구동 이동 로봇(wheeled mobile robot)에 비해 선천적으로 이동성과 지형 적응성이 뛰어난 다족 보행 로봇은 지난 몇 십년간 이동 로봇 연구의 핵심 분야로 자리 잡았다[1,2]. 최근 여러 가지 상용 보행 로봇들도 많이 등장하고 있고 국내 연구도 활발한 편이다[3-5].

현재 다족 보행 로봇 연구를 주도하는 것은 이족 보행 로봇(biped robot)이다. 이족 보행 로봇은 완전한 동적 걸음새(dynamic walking)를 가지는 인간형(humanoid) 로봇을 만들기 위한 토대가 되므로 로봇의 걸음새 연구(gait study)부터 시작해서 영상, 음성 인식, 로봇 손(hand) 등 로봇이 가지는 여러 가지 부가 기술까지 많이 연구되고 있다. 네 개 이상의 다리를 가지며 정적 걸음새(static walking)로 걷는 다족 보행 로봇은 속도나 인간 친화성 면에서 분명히 이족 보행 로봇보다 뒤진다. 하지만 정적 걸음새를 가지는 다족 보행 로봇은 이족 보행 로봇보다 탁월한 안정성을 보이기 때문에 여전히 중요한 연구 테마로 다루어지고 있다. 짝수 개의 다리를 가지는 대칭형  $2n$ -족 보행 로봇은 ( $n \geq 2$ ) 그 자체가 곤충의 형태에서 따온 생체 모방의 일종이다. 현재 정립된 보행 로봇의 기구학과 동역학도 과거 곤충의 운동

을 모사하면서 결정되었으며[6,7], 로봇이 안정적으로 보행할 수 있는 최적의 걸음새도 곤충의 걸음새와 유사한 물결 걸음새(wave gait)라는 사실이 밝혀졌다[8].

안정성 외에 다족 보행 로봇이 가지는 또 하나의 장점은 내고장성(fault tolerance)이다. 로봇의 구조상 다족 보행 로봇은 다리 하나에 고장이 발생하여 정상적인 움직임을 하지 못하는 경우에도 나머지 다리를 이용하여 보행을 계속할 수 있는 능력을 지닌다. 이것 역시 곤충의 움직임에서 관찰되며, 목발을 사용한 인간의 걸음새도 유사하다고 말할 수 있다. 보행 로봇의 내고장성 연구는 1990년대 중반부터 주로 걸음새 연구의 틀에서 시작되었으며[9,10], 최근까지도 정적 걸음새를 가지는 보행 로봇을 기반으로 계속 관심을 끌어들였다[11,12].

이번 연구에서는 관절 고착 고장(locked joint failure)이 존재하는 다족 보행 로봇의 내고장성 걸음새를 다룬다. 관절 고착 고장은 다리의 관절 하나가 어떤 이유로 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태를 말한다. 고장이 발생한 다리는 자유도(degree of freedom)를 하나 상실하므로 작업 공간이 줄어들고 로봇 몸체에 대해서 능동적 스윙(active swing)을 하지 못한다. 하지만 관절이 고착되어도 다리가 몸체를 지탱하는 능력은 사라지지 않는다. 이러한 특성을 이용하여 고장 난 다리를 로봇 몸체를 지지하는 과정에서만 사용하고 몸체를 이동시키는 동작에서는 사용하지 않으므로써 내고장성 걸음새를 구현된다. 저자들의 이전 연구에서 사족 보행 로봇[13] 및 육족 보행 로봇[14]을 위한 내고장성 걸음새가 제안되었으며, 최근 다른 연구자들에 의한 후속 연구가 발표되었다[15,16].

본 논문의 목적은 평판 모양의 발을 가지는 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새를 제안하는 것이다. 이전 연구들에서 다족 보행 로봇은 모두 지면과 점접촉(point

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.

양정민: 대구가톨릭대학교 전자공학과(jmyang@cu.ac.kr)

곽성우: 계명대학교 전자공학과(ksw@kmu.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0027705).

contact)을 하는 다리들로만 이루어졌다고 가정하였다. 그러나 최근 다족 보행 로봇 설계 기술의 발달 덕분에 평판 모양(flat shape)의 발을 가지는 로봇들이 많이 등장하였다. 다족 보행 로봇, 특히 이족 보행 로봇의 입목(立木) 균형을 구현하기 위한 사각형 발[17], 평판형 발에 곡선형 보조면이 달린 형태[18], 유연한(flexible) 성질을 가지는 발[19] 등이 그 예이다. 이번 연구에서는 사족 보행 로봇이 평판 모양의 발을 가질 때 내고장성 걸음새의 성능이 좋아진다는 사실을 보인다. 특히 발의 기하학적 수치에 따라서 내고장성 걸음새의 보폭(stride length)이 증가하는 관계를 밝히며, 평판 모양 발은 내고장성 걸음새의 안정도도 높일 수 있다는 것을 입증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 논문에서 다루는 사족 보행 로봇과 다리를 모델링한다. 또한 평판 모양 발을 설정하고 발의 기하학적 구조에서 유도되는 매개 변수를 정의한다. III 장에서는 선행 연구에서 제안했던 점접촉 발에 대한 내고장성 걸음새를 요약한다. IV 장에서는 평판 발이 부착된 사족 보행 로봇이 가지는 내고장성 걸음새를 제안한다. 평판 발의 존재가 걸음새의 정적 안정도와 보폭에 어떤 순영향을 주는가를 분석한다. 사족 보행 로봇은 완전 평탄 지형 위로 직선형 주기적 걸음새(periodic gait)로 걷는다고 설정한다. V 장에서는 평판 발을 가지고 게 걸음새(crab walking)로 보행하는 사족 보행 로봇의 운동을 분석한다. 마지막으로 VI 장에서 본 논문의 결론을 내린다.

II. 사족 보행 로봇 및 다리 모델링

그림 1은 본 논문에서 고려하는 사족 보행 로봇의 삼차원 모델이다. 로봇은 좌우대칭의 모양이며 그림과 같이 좌우측에 두 개의 다리가 각각 부착된다. 그림 2는 그림 1의 사족 보행 로봇의 운동을 분석하기 위한 이차원 모델이다. 다리 1과 다리 3이 로봇 몸체의 좌측, 다리 2와 다리 4가 우측에 붙어 있다.  $C_0$ 은 로봇 몸체의 무게중심(center of gravity)으로 로봇 몸체의 기하학적 중심과 일치한다고 설정한다. 또  $C_0$ 을 원점으로 하는 로봇의 기준 좌표계 X-Y를 그림과 같이 정의한다. 각도  $\alpha$ 는 ( $0 \leq \alpha < 90^\circ$ ) 사족 보행 로봇이 게 걸음새(crab gait) [20]로 걸을 때의 걸음새 각도(crab angle)이다.  $\alpha=0$ 이면 로봇은 완전 직선 걸음새(perfect straight-line motion)를 가진다.

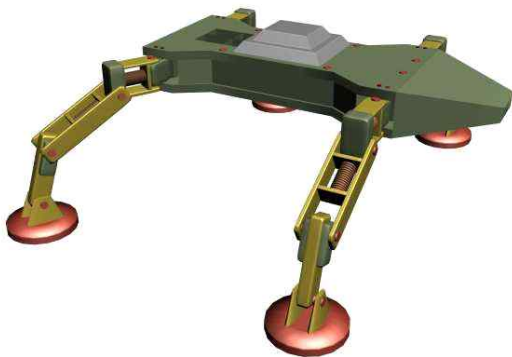


그림 1. 사족 보행 로봇의 삼차원 모델.  
Fig. 1. Three dimensional model of a quadruped robot.

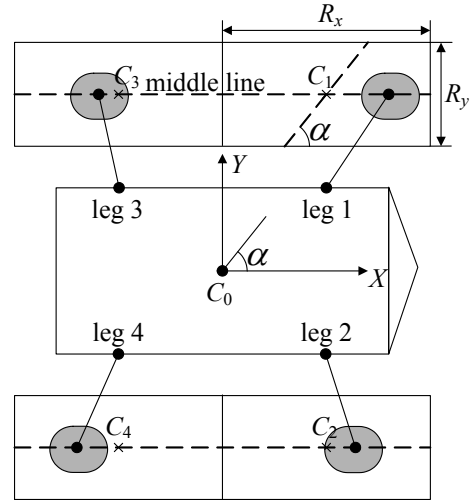


그림 2. 사족 보행 로봇의 이차원 모델.  
Fig. 2. Two dimensional model of a quadruped robot.

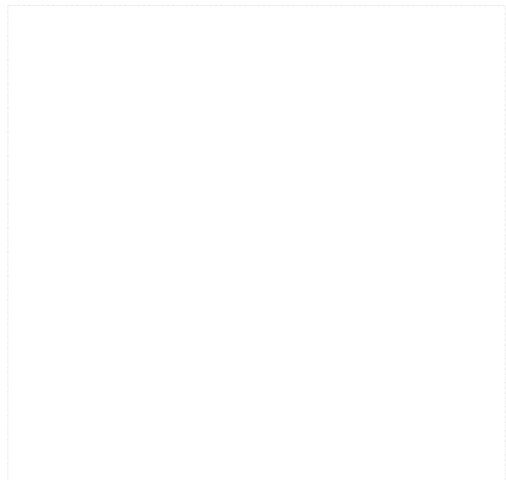


그림 3. 평판 발이 달린 3-관절 다리 모델.  
Fig. 3. Three-joint leg with the flat foot.

평판 발이 달린 각 다리는 길이  $R_x$ , 폭  $R_y$ 인 작업 영역(working area)을 가지며, 다리의 중심이 이 작업 영역을 벗어날 수 없다고 가정한다. (하지만 평판 발 부분은 작업 영역 밖까지 지지할 수 있다.)  $C_i$ 는 leg  $i$ 가 가지는 작업 영역의 중심을 가리킨다. 평탄 지형 위로 완전 직선 보행을 하는 사족 보행 로봇의 걸음새에서 로봇 무게중심  $C_0$ 은 +X축 위로 가는 궤적을 가지며, 각 다리의 지지점의 중심은 작업 영역의 중선(middle line)과 일치하는 궤적으로 걷는다.

사족 보행 로봇의 다리는 그림 3과 같이 두 개의 링크(link)와 액추에이터(actuator)가 달린 세 개의 관절(joint)로 구성된 매니플레이터 구조로 되어 있다. 상위 링크(upper link)  $l_1$ 은 로봇 몸체와 두 개의 회전 관절  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 로 연결되고 하위 링크(lower link)  $l_2$ 는 상위 링크와 회전 관절  $\theta_3$ 으로 연결되어 있다.  $F_1$ 는 하위 링크와 평판 발을 연결하는 수동 관절(passive joint)이다. 다리가 지지 상태에 있을 때  $F_1$ 는 다리 지지면의 중심 역할을 한다. 그림 3의 모델에서 다리의 발은 삼차원 운동이 가능하므로 작업 영역의 어느

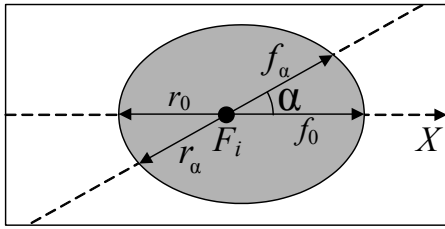


그림 4. 평판 발에 대한 매개 변수.  
Fig. 4. Parameters of the flat foot.

지점에서도 착지가 가능하다. 다족 보행 로봇에서 사용되는 다른 다리 모델들도 형태는 다르나 모두 삼차원 운동을 하므로 그림 3의 모델로 일반화할 수 있다.

그림 4는 평판 모양의 발로부터 유도되는 매개 변수를 나타낸 것이다. 기준 좌표계의 X축과 각도  $\alpha$ 를 이루면서 발의 중심  $F_i$ 를 지나는 직선을 그은 후,  $F_i$ 로부터 이 직선과 발의 앞 경계(boundary) 교점까지의 거리를  $f_a$ , 뒤 경계까지의 거리를  $r_a$ 로 각각 정의한다. 게 걸음새 각도가  $\alpha$ 라면 내고장성 걸음새 생성에서 사용될 매개 변수가  $f_a$ 와  $r_a$ 가 된다. 본 논문에서는  $\alpha=0$ , 즉 로봇 진행 방향이 기준 좌표계의 +X축 방향과 일치하는 완전 직선 보행을 먼저 다루며 이를 바탕으로  $\alpha \neq 0$ 인 게 걸음새도 알아본다. 따라서 그림 4에 나타난  $f_0$ 과  $r_0$ 을 주로 사용할 것이다. 이 매개 변수들은 나중에 내고장성 걸음새의 안정도와 보폭을 결정할 때 중요하게 활용된다. 다족 보행 로봇에 부착되는 대부분의 평판 발은 사각형이나 원형 같은 정칙(定則) 도형이다 [17-19]. 하지만 그림 4의 정의는 평판의 형태와는 상관없이 일반적으로 적용될 수 있다.

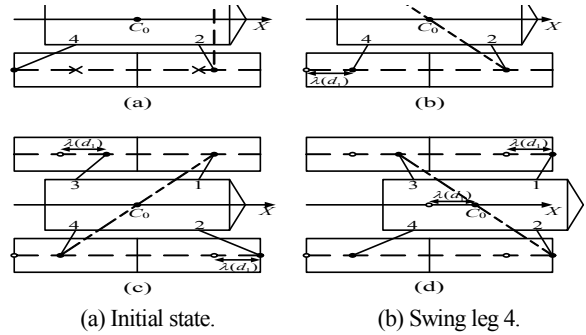
평판 발은 발이 달린 다리의 작업 영역보다 크면 안 되며 또한 발의 세로(longitudinal) 방향 길이  $f_0$ 이 폭  $r_0$ 보다 지나치게 길어도 안 된다. 이번 연구에서는  $f_0$ 과  $r_0$ 이 다음과 같은 길이 조건을 준수한다고 설정한다.

$$0 < f_0 \leq R_x/4, \quad 0 < r_0 \leq R_y/4 \quad (1)$$

### III. 선행 연구: 점접촉 발에 대한 내고장성 걸음새

이번 장에서는 선행 연구 [13,14]에서 제안된, 점접촉을 하는 다리가 달린 사족 보행 로봇의 내고장성 직선 걸음새를 요약한다. 앞서 기술했듯이 관절 고착 고장이 발생한 다리에 대한 내고장성 걸음새의 핵심은 고장 난 다리를 로봇 몸체를 지지하는 데만 사용한다는 것이다. 따라서 내고장성 걸음새에서 고장 난 다리가 로봇 몸체에 대해서 가지는 상대적인 좌표는 고정된다(자세한 기구학적 분석은 [13,14] 참조).

그림 5는 관절 고착 고장이 다리 1에 발생한 경우에 대한 내고장성 직선 걸음새이다. 기준 좌표계에 대한 다리 1의 고정 X 좌표는  $d_1$ 이라고 정의하였다. 다른 다리에 고장이 일어나는 경우도 로봇의 대칭성을 이용하여 그림 5로부터 쉽게 유도된다. 또 그림 5는  $d_1$ 의 크기가  $R_x/2 < d_1 \leq R_x$ 인 경우에 대한 걸음새이다.  $0 < d_1 \leq R_x/2$ 일 때는 다리와 로봇 몸체 움직임 순서는 동일하나 다리의 초기 지지점이 약간 변경된다[13].



(a) Initial state. (b) Swing leg 4. (c) Swing leg 2 and leg 3. (d) Lift off leg 1 and move the body.

그림 5. 점접촉 발에 대한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새: 다리 1에 고장 발생, 다리 1의 X 좌표 =  $d_1$ .

Fig. 5. Fault tolerant gait of the quadruped robot where the feet have point contact with the surface and a locked joint failure occurs to leg 1 with the X coordinate  $d_1$ .

그림 5(a)의 초기 상태에서 네 개의 다리가 모두 지지 상태에 있으며 지지점의 X 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{다리 1} &= d_1, & \text{다리 2} &= d_1, \\ \text{다리 3} &= -d_1, & \text{다리 4} &= -R_x. \end{aligned} \quad (2)$$

그림 5(b)는 다리 4가 보폭  $\lambda(d_1)$ 만큼 이동하는 모습이다. 이때 사족 보행 로봇은 tripod, 즉 지지 다리가 세 개인 걸음새를 가진다. 다리 4가 이동 상태(transfer phase)로 진입하면 지지 다각형(support polygon)은 삼각형이 되고 몸체 무게중심의 투영점  $C_0$ 은 그림에서 보듯이 다리 2와 다리 3의 착지점으로 구성되는 지지 다각형 변(side) 위에 놓인다. 따라서 걸음새는 임계 안정도(marginal stability)를 가진다. 그림 5(c)는 다리 4가 착지한 이후 다리 2와 다리 3이 차례로 이동하는 모습이다. 다리 4의 경우와 마찬가지로 다리 2와 다리 3이 이동 상태로 들리는 순간 무게중심  $C_0$ 은 다리 1과 다리 4로 만들어지는 지지 다각형 변 위에 놓이고 걸음새는 임계 안정도를 가진다. 즉 다리 4는 작업 영역의 뒤 경계에서부터 다리 1 지지점과 원점 대칭인 지점까지 이동할 수 있으며, 이때 이동한 거리가 걸음새의 보폭  $\lambda(d_1)$ 이 된다. 그림 5는 주기 걸음새이므로 다리 2와 다리 3도 한 주기 내에서 보폭  $\lambda(d_1)$ 만큼 이동한다.

마지막으로 그림 5(d)는 로봇 몸체와 다리 1이 이동함으로써 걸음새의 한 주기가 완성되는 모습이다. 능동적 스윙을 할 수 없는 고장 난 다리 1은 일단 제자리에서 이동 상태로 들린 다음 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 전진한다. 주기 걸음새를 만들기 위해서 로봇 몸체가 움직

이는 거리도  $\lambda(d_1)$ 이다. 또 그림 5(d)에서 볼 수 있듯이 다리 1이 다시 착지하기 직전 걸음새는 임계 안정도를 가진다.

그림 5(a),(b)로부터 내고장성 걸음새의 보폭은  $\lambda(d_1) = R_x - d_1$ 임을 알 수 있다. 그런데 본 내고장성 걸음새의 특성상 주기 걸음새의 보폭은  $R_x/2$ 보다 클 수 없다.  $0 < d_1 \leq R_x/2$ 인 경우는  $d_1$  값에 상관없이  $R_x/2$ 의 보폭을 가진다[13]. 요약하면 다리 1의 고정 X 좌표  $d_1$ 을 가지는 내고장성 걸음새의 보폭은 다음과 같다.

$$\lambda(d_1) = \begin{cases} R_x - d_1 & R_x/2 < d_1 \leq R_x \\ R_x/2 & 0 < d_1 \leq R_x/2 \end{cases} \quad (3)$$

점접촉 발에 대한 내고장성 걸음새가 가지는 약점은 그림 5에서 잘 드러난다. 먼저 위에서 유도했듯이 걸음새의 보폭이 다리 작업 영역 길이의 절반보다 클 수가 없다. 따라서 다리의 착지와 들림(lift-off) 사이의 시간 간격을 최소화 하여 디뎀율(duffy factor) [8]을 크게 하더라도 제한된 보폭 때문에 걸음새가 속도를 내기 어렵다. 다음으로는 걸음새가 tripod로 동작할 때 임계 안정도를 보이는 현상이다. 이 때문에 선행 연구에서 제안된 내고장성 걸음새는 외부 영향으로 로봇 몸체가 흔들리거나 다리의 지지점이 변하는 경우 정적 안정도(static stability)가 무너질 수 있는 위험을 내포한다.

**IV. 평판 발에 대한 내고장성 걸음새**

**1. 지지 도형**

정적 보행에 대한 걸음새 연구에서 로봇 다리가 평판 발을 가지면 지지 다각형의 정의부터 수정해야 한다. 점접촉 발은 이차원 평면상에 꼭지점(vertex)을 만들지만 평판 발은 지면을 달는 발 면적이 전부 로봇 몸체를 지탱하는 역할에 참여할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 평판 발이 달린 다족 보행 로봇의 걸음새의 정적 안정도를 판별하기 위해서 지지 다각형을 확장시켜 ‘지지 도형(support pattern)’ 개념을 적용한다. 지지 도형은 지지 상태에 있는 발의 둘레(perimeter)를 연결하여 만든 이차원 형태로 정의된다. 그림 6은 사족 보행 로봇 tripod 걸음새의 지지 다각형과 지지 도형을 비교한 그림이다.

평판 발 때문에 지지 도형의 면적이 증가하면 필연적으로 내고장성 걸음새의 성능도 좋아진다. 앞서 밝혔듯이 우리는 개선된 걸음새 성능 중 정적 안정도와 보폭에 대해서

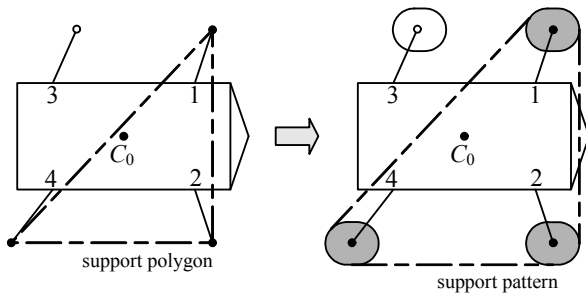


그림 6. 지지 다각형과 지지 도형과의 비교.  
Fig. 6. Comparison between the support polygon and the support pattern.

정량적으로 분석한다.

**2. 정적 안정도 최대화**

본 논문에서는 정적 안정도의 척도(measure)로서 세로 안정 여유도(longitudinal stability margin) [8]를 사용한다. 세로 안정 여유도는 로봇 몸체의 진행 방향으로 측정된, 무게중심 투영점으로부터 지지 다각형(여기서는 지지 도형) 경계까지의 최소 거리이다.

먼저 점접촉 발 대신 평판 발이 달렸을 때 그림 5의 내고장성 걸음새의 정적 안정도를 최대화 하는 문제를 생각하자. 그림 5에서 원점에 대칭인 두 지지 다리의 위치로 인해 걸음새는 임계 안정도를 가진다. 하지만 그림 5에서 점접촉 발 대신 그림 4의 평판 발이 있으면 세로 안정 여유도는  $f_0$  또는  $r_0$  만큼 증가한다. 또 평판 발이 존재하는 상황에서 그림 5 걸음새의 임의 다리의 지지점 위치를 +X축 혹은 -X축 방향으로 조정한다면 세로 안정 여유도는 오히려 줄어들 것이다. 그러므로 평판 발이 달린 사족 보행 로봇의 내고장성 직선 걸음새의 안정도를 최대화 하려면 그림 5의 다리 지지점과 다리 움직임 순서를 그대로 유지하면 된다.

다리  $i$ 가 이동 상태에 있을 때 내고장성 걸음새가 가지는 최소 안정도를  $S_i$ 라고 정의하자( $i=1, \dots, 4$ ). 그림 4의 매개 변수를 가지는 평판 발이 달릴 때 그림 5의 내고장성 걸음새가 보이는 안정도는 다음과 같이 쉽게 유도된다.

$$S_1 = S_2 = f_0, S_3 = S_4 = r_0 \quad (4)$$

또 걸음새 한 주기 동안 측정된 최소 안정도를  $S_m$ 이라 하면

$$S_m = \min[f_0, r_0] \quad (5)$$

이다. 만약 로봇이  $\alpha \neq 0$ 인 계 걸음새로 걷는다면 위 공식에서  $f_0$ 과  $r_0$ 을  $f_\alpha$ 와  $r_\alpha$ 로 각각 치환하면 될 것이다.

**3. 보폭 최대화**

다음으로는 평판 발이 존재할 때 최대 보폭을 내는 내고장성 걸음새를 제안한다. 걸음새가 보폭을 크게 내면 상대적으로 정적 안정도는 떨어진다. 최대 보폭을 가지려면 각 다리를 걸음새가 임계 안정도를 보일 때까지, 즉 지지 도형의 경계까지 이동시키면 된다. 또한 초기 상태에서도 고장난 다리를 제외한 모든 다리는 각자의 작업 영역 안에서 최대의 도달 가능성(reachability)을 보유하도록 착지해야 한다.

그림 7은 최대 보폭을 가지는 내고장성 걸음새의 초기 상태와 초기 상태에서 다리 4가 이동한 모습을 그린 것이다. 최대 보폭을 가지는 내고장성 걸음새의 다리 움직임 순서도 그림 5의 이전 걸음새와 동일하다. 하지만 그림 7에서 알 수 있듯이 다리의 초기 지지점과 보폭은 달라진다. 고장난 다리 1은 X 좌표  $d_1$ 에 있으며, 다리 4는 최대의 도달 가능성을 가지기 위해 전과 마찬가지로 작업 영역과 다리의 궤적(중선)이 만나는 점 P에 위치한다. 점 Q는 다리 1의 평판 발의 중심  $F_1$ 과  $F_2$ 과  $F_3$ 과  $F_4$ 과  $F_5$ 과  $F_6$ 과  $F_7$ 과  $F_8$ 과  $F_9$ 과  $F_{10}$ 과  $F_{11}$ 과  $F_{12}$ 과  $F_{13}$ 과  $F_{14}$ 과  $F_{15}$ 과  $F_{16}$ 과  $F_{17}$ 과  $F_{18}$ 과  $F_{19}$ 과  $F_{20}$ 과  $F_{21}$ 과  $F_{22}$ 과  $F_{23}$ 과  $F_{24}$ 과  $F_{25}$ 과  $F_{26}$ 과  $F_{27}$ 과  $F_{28}$ 과  $F_{29}$ 과  $F_{30}$ 과  $F_{31}$ 과  $F_{32}$ 과  $F_{33}$ 과  $F_{34}$ 과  $F_{35}$ 과  $F_{36}$ 과  $F_{37}$ 과  $F_{38}$ 과  $F_{39}$ 과  $F_{40}$ 과  $F_{41}$ 과  $F_{42}$ 과  $F_{43}$ 과  $F_{44}$ 과  $F_{45}$ 과  $F_{46}$ 과  $F_{47}$ 과  $F_{48}$ 과  $F_{49}$ 과  $F_{50}$ 과  $F_{51}$ 과  $F_{52}$ 과  $F_{53}$ 과  $F_{54}$ 과  $F_{55}$ 과  $F_{56}$ 과  $F_{57}$ 과  $F_{58}$ 과  $F_{59}$ 과  $F_{60}$ 과  $F_{61}$ 과  $F_{62}$ 과  $F_{63}$ 과  $F_{64}$ 과  $F_{65}$ 과  $F_{66}$ 과  $F_{67}$ 과  $F_{68}$ 과  $F_{69}$ 과  $F_{70}$ 과  $F_{71}$ 과  $F_{72}$ 과  $F_{73}$ 과  $F_{74}$ 과  $F_{75}$ 과  $F_{76}$ 과  $F_{77}$ 과  $F_{78}$ 과  $F_{79}$ 과  $F_{80}$ 과  $F_{81}$ 과  $F_{82}$ 과  $F_{83}$ 과  $F_{84}$ 과  $F_{85}$ 과  $F_{86}$ 과  $F_{87}$ 과  $F_{88}$ 과  $F_{89}$ 과  $F_{90}$ 과  $F_{91}$ 과  $F_{92}$ 과  $F_{93}$ 과  $F_{94}$ 과  $F_{95}$ 과  $F_{96}$ 과  $F_{97}$ 과  $F_{98}$ 과  $F_{99}$ 과  $F_{100}$ 과  $F_{101}$ 과  $F_{102}$ 과  $F_{103}$ 과  $F_{104}$ 과  $F_{105}$ 과  $F_{106}$ 과  $F_{107}$ 과  $F_{108}$ 과  $F_{109}$ 과  $F_{110}$ 과  $F_{111}$ 과  $F_{112}$ 과  $F_{113}$ 과  $F_{114}$ 과  $F_{115}$ 과  $F_{116}$ 과  $F_{117}$ 과  $F_{118}$ 과  $F_{119}$ 과  $F_{120}$ 과  $F_{121}$ 과  $F_{122}$ 과  $F_{123}$ 과  $F_{124}$ 과  $F_{125}$ 과  $F_{126}$ 과  $F_{127}$ 과  $F_{128}$ 과  $F_{129}$ 과  $F_{130}$ 과  $F_{131}$ 과  $F_{132}$ 과  $F_{133}$ 과  $F_{134}$ 과  $F_{135}$ 과  $F_{136}$ 과  $F_{137}$ 과  $F_{138}$ 과  $F_{139}$ 과  $F_{140}$ 과  $F_{141}$ 과  $F_{142}$ 과  $F_{143}$ 과  $F_{144}$ 과  $F_{145}$ 과  $F_{146}$ 과  $F_{147}$ 과  $F_{148}$ 과  $F_{149}$ 과  $F_{150}$ 과  $F_{151}$ 과  $F_{152}$ 과  $F_{153}$ 과  $F_{154}$ 과  $F_{155}$ 과  $F_{156}$ 과  $F_{157}$ 과  $F_{158}$ 과  $F_{159}$ 과  $F_{160}$ 과  $F_{161}$ 과  $F_{162}$ 과  $F_{163}$ 과  $F_{164}$ 과  $F_{165}$ 과  $F_{166}$ 과  $F_{167}$ 과  $F_{168}$ 과  $F_{169}$ 과  $F_{170}$ 과  $F_{171}$ 과  $F_{172}$ 과  $F_{173}$ 과  $F_{174}$ 과  $F_{175}$ 과  $F_{176}$ 과  $F_{177}$ 과  $F_{178}$ 과  $F_{179}$ 과  $F_{180}$ 과  $F_{181}$ 과  $F_{182}$ 과  $F_{183}$ 과  $F_{184}$ 과  $F_{185}$ 과  $F_{186}$ 과  $F_{187}$ 과  $F_{188}$ 과  $F_{189}$ 과  $F_{190}$ 과  $F_{191}$ 과  $F_{192}$ 과  $F_{193}$ 과  $F_{194}$ 과  $F_{195}$ 과  $F_{196}$ 과  $F_{197}$ 과  $F_{198}$ 과  $F_{199}$ 과  $F_{200}$ 과  $F_{201}$ 과  $F_{202}$ 과  $F_{203}$ 과  $F_{204}$ 과  $F_{205}$ 과  $F_{206}$ 과  $F_{207}$ 과  $F_{208}$ 과  $F_{209}$ 과  $F_{210}$ 과  $F_{211}$ 과  $F_{212}$ 과  $F_{213}$ 과  $F_{214}$ 과  $F_{215}$ 과  $F_{216}$ 과  $F_{217}$ 과  $F_{218}$ 과  $F_{219}$ 과  $F_{220}$ 과  $F_{221}$ 과  $F_{222}$ 과  $F_{223}$ 과  $F_{224}$ 과  $F_{225}$ 과  $F_{226}$ 과  $F_{227}$ 과  $F_{228}$ 과  $F_{229}$ 과  $F_{230}$ 과  $F_{231}$ 과  $F_{232}$ 과  $F_{233}$ 과  $F_{234}$ 과  $F_{235}$ 과  $F_{236}$ 과  $F_{237}$ 과  $F_{238}$ 과  $F_{239}$ 과  $F_{240}$ 과  $F_{241}$ 과  $F_{242}$ 과  $F_{243}$ 과  $F_{244}$ 과  $F_{245}$ 과  $F_{246}$ 과  $F_{247}$ 과  $F_{248}$ 과  $F_{249}$ 과  $F_{250}$ 과  $F_{251}$ 과  $F_{252}$ 과  $F_{253}$ 과  $F_{254}$ 과  $F_{255}$ 과  $F_{256}$ 과  $F_{257}$ 과  $F_{258}$ 과  $F_{259}$ 과  $F_{260}$ 과  $F_{261}$ 과  $F_{262}$ 과  $F_{263}$ 과  $F_{264}$ 과  $F_{265}$ 과  $F_{266}$ 과  $F_{267}$ 과  $F_{268}$ 과  $F_{269}$ 과  $F_{270}$ 과  $F_{271}$ 과  $F_{272}$ 과  $F_{273}$ 과  $F_{274}$ 과  $F_{275}$ 과  $F_{276}$ 과  $F_{277}$ 과  $F_{278}$ 과  $F_{279}$ 과  $F_{280}$ 과  $F_{281}$ 과  $F_{282}$ 과  $F_{283}$ 과  $F_{284}$ 과  $F_{285}$ 과  $F_{286}$ 과  $F_{287}$ 과  $F_{288}$ 과  $F_{289}$ 과  $F_{290}$ 과  $F_{291}$ 과  $F_{292}$ 과  $F_{293}$ 과  $F_{294}$ 과  $F_{295}$ 과  $F_{296}$ 과  $F_{297}$ 과  $F_{298}$ 과  $F_{299}$ 과  $F_{300}$ 과  $F_{301}$ 과  $F_{302}$ 과  $F_{303}$ 과  $F_{304}$ 과  $F_{305}$ 과  $F_{306}$ 과  $F_{307}$ 과  $F_{308}$ 과  $F_{309}$ 과  $F_{310}$ 과  $F_{311}$ 과  $F_{312}$ 과  $F_{313}$ 과  $F_{314}$ 과  $F_{315}$ 과  $F_{316}$ 과  $F_{317}$ 과  $F_{318}$ 과  $F_{319}$ 과  $F_{320}$ 과  $F_{321}$ 과  $F_{322}$ 과  $F_{323}$ 과  $F_{324}$ 과  $F_{325}$ 과  $F_{326}$ 과  $F_{327}$ 과  $F_{328}$ 과  $F_{329}$ 과  $F_{330}$ 과  $F_{331}$ 과  $F_{332}$ 과  $F_{333}$ 과  $F_{334}$ 과  $F_{335}$ 과  $F_{336}$ 과  $F_{337}$ 과  $F_{338}$ 과  $F_{339}$ 과  $F_{340}$ 과  $F_{341}$ 과  $F_{342}$ 과  $F_{343}$ 과  $F_{344}$ 과  $F_{345}$ 과  $F_{346}$ 과  $F_{347}$ 과  $F_{348}$ 과  $F_{349}$ 과  $F_{350}$ 과  $F_{351}$ 과  $F_{352}$ 과  $F_{353}$ 과  $F_{354}$ 과  $F_{355}$ 과  $F_{356}$ 과  $F_{357}$ 과  $F_{358}$ 과  $F_{359}$ 과  $F_{360}$ 과  $F_{361}$ 과  $F_{362}$ 과  $F_{363}$ 과  $F_{364}$ 과  $F_{365}$ 과  $F_{366}$ 과  $F_{367}$ 과  $F_{368}$ 과  $F_{369}$ 과  $F_{370}$ 과  $F_{371}$ 과  $F_{372}$ 과  $F_{373}$ 과  $F_{374}$ 과  $F_{375}$ 과  $F_{376}$ 과  $F_{377}$ 과  $F_{378}$ 과  $F_{379}$ 과  $F_{380}$ 과  $F_{381}$ 과  $F_{382}$ 과  $F_{383}$ 과  $F_{384}$ 과  $F_{385}$ 과  $F_{386}$ 과  $F_{387}$ 과  $F_{388}$ 과  $F_{389}$ 과  $F_{390}$ 과  $F_{391}$ 과  $F_{392}$ 과  $F_{393}$ 과  $F_{394}$ 과  $F_{395}$ 과  $F_{396}$ 과  $F_{397}$ 과  $F_{398}$ 과  $F_{399}$ 과  $F_{400}$ 과  $F_{401}$ 과  $F_{402}$ 과  $F_{403}$ 과  $F_{404}$ 과  $F_{405}$ 과  $F_{406}$ 과  $F_{407}$ 과  $F_{408}$ 과  $F_{409}$ 과  $F_{410}$ 과  $F_{411}$ 과  $F_{412}$ 과  $F_{413}$ 과  $F_{414}$ 과  $F_{415}$ 과  $F_{416}$ 과  $F_{417}$ 과  $F_{418}$ 과  $F_{419}$ 과  $F_{420}$ 과  $F_{421}$ 과  $F_{422}$ 과  $F_{423}$ 과  $F_{424}$ 과  $F_{425}$ 과  $F_{426}$ 과  $F_{427}$ 과  $F_{428}$ 과  $F_{429}$ 과  $F_{430}$ 과  $F_{431}$ 과  $F_{432}$ 과  $F_{433}$ 과  $F_{434}$ 과  $F_{435}$ 과  $F_{436}$ 과  $F_{437}$ 과  $F_{438}$ 과  $F_{439}$ 과  $F_{440}$ 과  $F_{441}$ 과  $F_{442}$ 과  $F_{443}$ 과  $F_{444}$ 과  $F_{445}$ 과  $F_{446}$ 과  $F_{447}$ 과  $F_{448}$ 과  $F_{449}$ 과  $F_{450}$ 과  $F_{451}$ 과  $F_{452}$ 과  $F_{453}$ 과  $F_{454}$ 과  $F_{455}$ 과  $F_{456}$ 과  $F_{457}$ 과  $F_{458}$ 과  $F_{459}$ 과  $F_{460}$ 과  $F_{461}$ 과  $F_{462}$ 과  $F_{463}$ 과  $F_{464}$ 과  $F_{465}$ 과  $F_{466}$ 과  $F_{467}$ 과  $F_{468}$ 과  $F_{469}$ 과  $F_{470}$ 과  $F_{471}$ 과  $F_{472}$ 과  $F_{473}$ 과  $F_{474}$ 과  $F_{475}$ 과  $F_{476}$ 과  $F_{477}$ 과  $F_{478}$ 과  $F_{479}$ 과  $F_{480}$ 과  $F_{481}$ 과  $F_{482}$ 과  $F_{483}$ 과  $F_{484}$ 과  $F_{485}$ 과  $F_{486}$ 과  $F_{487}$ 과  $F_{488}$ 과  $F_{489}$ 과  $F_{490}$ 과  $F_{491}$ 과  $F_{492}$ 과  $F_{493}$ 과  $F_{494}$ 과  $F_{495}$ 과  $F_{496}$ 과  $F_{497}$ 과  $F_{498}$ 과  $F_{499}$ 과  $F_{500}$ 과  $F_{501}$ 과  $F_{502}$ 과  $F_{503}$ 과  $F_{504}$ 과  $F_{505}$ 과  $F_{506}$ 과  $F_{507}$ 과  $F_{508}$ 과  $F_{509}$ 과  $F_{510}$ 과  $F_{511}$ 과  $F_{512}$ 과  $F_{513}$ 과  $F_{514}$ 과  $F_{515}$ 과  $F_{516}$ 과  $F_{517}$ 과  $F_{518}$ 과  $F_{519}$ 과  $F_{520}$ 과  $F_{521}$ 과  $F_{522}$ 과  $F_{523}$ 과  $F_{524}$ 과  $F_{525}$ 과  $F_{526}$ 과  $F_{527}$ 과  $F_{528}$ 과  $F_{529}$ 과  $F_{530}$ 과  $F_{531}$ 과  $F_{532}$ 과  $F_{533}$ 과  $F_{534}$ 과  $F_{535}$ 과  $F_{536}$ 과  $F_{537}$ 과  $F_{538}$ 과  $F_{539}$ 과  $F_{540}$ 과  $F_{541}$ 과  $F_{542}$ 과  $F_{543}$ 과  $F_{544}$ 과  $F_{545}$ 과  $F_{546}$ 과  $F_{547}$ 과  $F_{548}$ 과  $F_{549}$ 과  $F_{550}$ 과  $F_{551}$ 과  $F_{552}$ 과  $F_{553}$ 과  $F_{554}$ 과  $F_{555}$ 과  $F_{556}$ 과  $F_{557}$ 과  $F_{558}$ 과  $F_{559}$ 과  $F_{560}$ 과  $F_{561}$ 과  $F_{562}$ 과  $F_{563}$ 과  $F_{564}$ 과  $F_{565}$ 과  $F_{566}$ 과  $F_{567}$ 과  $F_{568}$ 과  $F_{569}$ 과  $F_{570}$ 과  $F_{571}$ 과  $F_{572}$ 과  $F_{573}$ 과  $F_{574}$ 과  $F_{575}$ 과  $F_{576}$ 과  $F_{577}$ 과  $F_{578}$ 과  $F_{579}$ 과  $F_{580}$ 과  $F_{581}$ 과  $F_{582}$ 과  $F_{583}$ 과  $F_{584}$ 과  $F_{585}$ 과  $F_{586}$ 과  $F_{587}$ 과  $F_{588}$ 과  $F_{589}$ 과  $F_{590}$ 과  $F_{591}$ 과  $F_{592}$ 과  $F_{593}$ 과  $F_{594}$ 과  $F_{595}$ 과  $F_{596}$ 과  $F_{597}$ 과  $F_{598}$ 과  $F_{599}$ 과  $F_{600}$ 과  $F_{601}$ 과  $F_{602}$ 과  $F_{603}$ 과  $F_{604}$ 과  $F_{605}$ 과  $F_{606}$ 과  $F_{607}$ 과  $F_{608}$ 과  $F_{609}$ 과  $F_{610}$ 과  $F_{611}$ 과  $F_{612}$ 과  $F_{613}$ 과  $F_{614}$ 과  $F_{615}$ 과  $F_{616}$ 과  $F_{617}$ 과  $F_{618}$ 과  $F_{619}$ 과  $F_{620}$ 과  $F_{621}$ 과  $F_{622}$ 과  $F_{623}$ 과  $F_{624}$ 과  $F_{625}$ 과  $F_{626}$ 과  $F_{627}$ 과  $F_{628}$ 과  $F_{629}$ 과  $F_{630}$ 과  $F_{631}$ 과  $F_{632}$ 과  $F_{633}$ 과  $F_{634}$ 과  $F_{635}$ 과  $F_{636}$ 과  $F_{637}$ 과  $F_{638}$ 과  $F_{639}$ 과  $F_{640}$ 과  $F_{641}$ 과  $F_{642}$ 과  $F_{643}$ 과  $F_{644}$ 과  $F_{645}$ 과  $F_{646}$ 과  $F_{647}$ 과  $F_{648}$ 과  $F_{649}$ 과  $F_{650}$ 과  $F_{651}$ 과  $F_{652}$ 과  $F_{653}$ 과  $F_{654}$ 과  $F_{655}$ 과  $F_{656}$ 과  $F_{657}$ 과  $F_{658}$ 과  $F_{659}$ 과  $F_{660}$ 과  $F_{661}$ 과  $F_{662}$ 과  $F_{663}$ 과  $F_{664}$ 과  $F_{665}$ 과  $F_{666}$ 과  $F_{667}$ 과  $F_{668}$ 과  $F_{669}$ 과  $F_{670}$ 과  $F_{671}$ 과  $F_{672}$ 과  $F_{673}$ 과  $F_{674}$ 과  $F_{675}$ 과  $F_{676}$ 과  $F_{677}$ 과  $F_{678}$ 과  $F_{679}$ 과  $F_{680}$ 과  $F_{681}$ 과  $F_{682}$ 과  $F_{683}$ 과  $F_{684}$ 과  $F_{685}$ 과  $F_{686}$ 과  $F_{687}$ 과  $F_{688}$ 과  $F_{689}$ 과  $F_{690}$ 과  $F_{691}$ 과  $F_{692}$ 과  $F_{693}$ 과  $F_{694}$ 과  $F_{695}$ 과  $F_{696}$ 과  $F_{697}$ 과  $F_{698}$ 과  $F_{699}$ 과  $F_{700}$ 과  $F_{701}$ 과  $F_{702}$ 과  $F_{703}$ 과  $F_{704}$ 과  $F_{705}$ 과  $F_{706}$ 과  $F_{707}$ 과  $F_{708}$ 과  $F_{709}$ 과  $F_{710}$ 과  $F_{711}$ 과  $F_{712}$ 과  $F_{713}$ 과  $F_{714}$ 과  $F_{715}$ 과  $F_{716}$ 과  $F_{717}$ 과  $F_{718}$ 과  $F_{719}$ 과  $F_{720}$ 과  $F_{721}$ 과  $F_{722}$ 과  $F_{723}$ 과  $F_{724}$ 과  $F_{725}$ 과  $F_{726}$ 과  $F_{727}$ 과  $F_{728}$ 과  $F_{729}$ 과  $F_{730}$ 과  $F_{731}$ 과  $F_{732}$ 과  $F_{733}$ 과  $F_{734}$ 과  $F_{735}$ 과  $F_{736}$ 과  $F_{737}$ 과  $F_{738}$ 과  $F_{739}$ 과  $F_{740}$ 과  $F_{741}$ 과  $F_{742}$ 과  $F_{743}$ 과  $F_{744}$ 과  $F_{745}$ 과  $F_{746}$ 과  $F_{747}$ 과  $F_{748}$ 과  $F_{749}$ 과  $F_{750}$ 과  $F_{751}$ 과  $F_{752}$ 과  $F_{753}$ 과  $F_{754}$ 과  $F_{755}$ 과  $F_{756}$ 과  $F_{757}$ 과  $F_{758}$ 과  $F_{759}$ 과  $F_{760}$ 과  $F_{761}$ 과  $F_{762}$ 과  $F_{763}$ 과  $F_{764}$ 과  $F_{765}$ 과  $F_{766}$ 과  $F_{767}$ 과  $F_{768}$ 과  $F_{769}$ 과  $F_{770}$ 과  $F_{771}$ 과  $F_{772}$ 과  $F_{773}$ 과  $F_{774}$ 과  $F_{775}$ 과  $F_{776}$ 과  $F_{777}$ 과  $F_{778}$ 과  $F_{779}$ 과  $F_{780}$ 과  $F_{781}$ 과  $F_{782}$ 과  $F_{783}$ 과  $F_{784}$ 과  $F_{785}$ 과  $F_{786}$ 과  $F_{787}$ 과  $F_{788}$ 과  $F_{789}$ 과  $F_{790}$ 과  $F_{791}$ 과  $F_{792}$ 과  $F_{793}$ 과  $F_{794}$ 과  $F_{795}$ 과  $F_{796}$ 과  $F_{797}$ 과  $F_{798}$ 과  $F_{799}$ 과  $F_{800}$ 과  $F_{801}$ 과  $F_{802}$ 과  $F_{803}$ 과  $F_{804}$ 과  $F_{805}$ 과  $F_{806}$ 과  $F_{807}$ 과  $F_{808}$ 과  $F_{809}$ 과  $F_{810}$ 과  $F_{811}$ 과  $F_{812}$ 과  $F_{813}$ 과  $F_{814}$ 과  $F_{815}$ 과  $F_{816}$ 과  $F_{817}$ 과  $F_{818}$ 과  $F_{819}$ 과  $F_{820}$ 과  $F_{821}$ 과  $F_{822}$ 과  $F_{823}$ 과  $F_{824}$ 과  $F_{825}$ 과  $F_{826}$ 과  $F_{827}$ 과  $F_{828}$ 과  $F_{829}$ 과  $F_{830}$ 과  $F_{831}$ 과  $F_{832}$ 과  $F_{833}$ 과  $F_{834}$ 과  $F_{835}$ 과  $F_{836}$ 과  $F_{837}$ 과  $F_{838}$ 과  $F_{839}$ 과  $F_{840}$ 과  $F_{841}$ 과  $F_{842}$ 과  $F_{843}$ 과  $F_{844}$ 과  $F_{845}$ 과  $F_{846}$ 과  $F_{847}$ 과  $F_{848}$ 과  $F_{849}$ 과  $F_{850}$ 과  $F_{851}$ 과  $F_{852}$ 과  $F_{853}$ 과  $F_{854}$ 과  $F_{855}$ 과  $F_{856}$ 과  $F_{857}$ 과  $F_{858}$ 과  $F_{859}$ 과  $F_{860}$ 과  $F_{861}$ 과  $F_{862}$ 과  $F_{863}$ 과  $F_{864}$ 과  $F_{865}$ 과  $F_{866}$ 과  $F_{867}$ 과  $F_{868}$ 과  $F_{869}$ 과  $F_{870}$ 과  $F_{871}$ 과  $F_{872}$ 과  $F_{873}$ 과  $F_{874}$ 과  $F_{875}$ 과  $F_{876}$ 과  $F_{877}$ 과  $F_{878}$ 과  $F_{879}$ 과  $F_{880}$ 과  $F_{881}$ 과  $F_{882}$ 과  $F_{883}$ 과  $F_{884}$ 과  $F_{885}$ 과  $F_{886}$ 과  $F_{887}$ 과  $F_{888}$ 과  $F_{889}$ 과  $F_{890}$ 과  $F_{891}$ 과  $F_{892}$ 과  $F_{893}$ 과  $F_{894}$ 과  $F_{895}$ 과  $F_{896}$ 과  $F_{897}$ 과  $F_{898}$ 과  $F_{899}$ 과  $F_{900}$ 과  $F_{901}$ 과  $F_{902}$ 과  $F_{903}$ 과  $F_{904}$ 과  $F_{905}$ 과  $F_{906}$ 과  $F_{907}$ 과  $F_{908}$ 과  $F_{909}$ 과  $F_{$

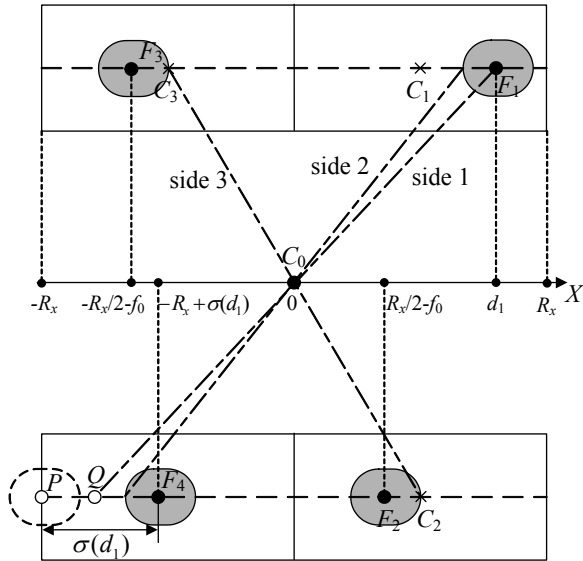


그림 7. 최대 보폭을 가지는 내고장성 걸음새의 초기 상태와 다리 4 이동.

Fig. 7. Initial state and movement of leg 4 of the fault tolerant gait with flat feet.

하지만 표기서 과 을 때에 작그림 6에서 도시한 바대로 지지 도형이 평판 발 들레까지 확대된다. 따라서 다리 4는 점 Q 함께 점 F4까지 이동할 수 있으며, 이때 C0은 다리 1과 다리 4 평판 발의 뒤 경계가 이루는 지지 도형의 변 'side 2' 위와 위치하게 된다. 본 논문에서는 평판 발점접촉을서 표서 내고장성 걸음새의 보폭을  $\sigma(d_1)$ 라 정의한다. 그림 7에서  $d_1$ 의 범위는  $R_x/2 < d_1 \leq R_x$ 이고 이 범위에 대한 새로운 보폭  $\sigma(d_1)$ 은 아래와 같이 유도된다.

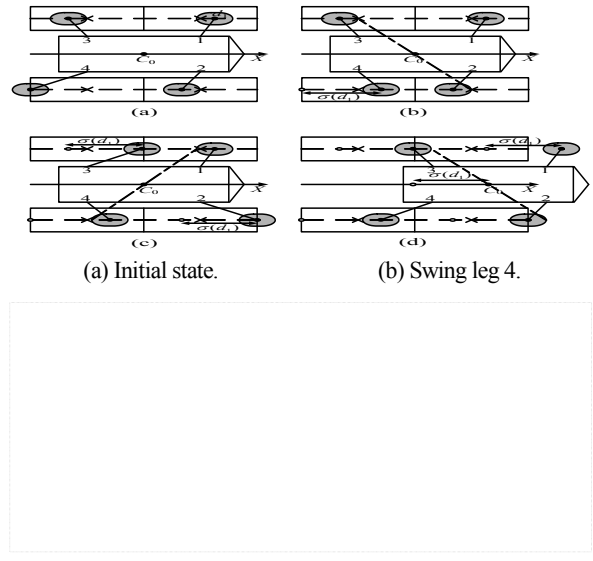
$$\sigma(d_1) = PQ + QF_4 = R_x - d_1 + 2r_0 \quad (R_x/2 < d_1 \leq R_x) \quad (6)$$

평판 발의 존재와 함께 다리 2와 다리 3의 초기 지지점도 바뀐다. 점접촉을 하는 발이 달린 경우 다리 2와 다리 3이 최대 도달 가능성을 가지도록 하기 위해서는 각 다리를 작업 영역의 중점 C2와 C3에 위치시켜야 했다(이 경우 최대 보폭은  $R_x/2$ ). 하지만 평판 발이 있을 때에는 각 발의 들레로 만들어지는 지지 도형의 경계 위에 무게중심 C0이 놓이면 되므로 그림 7에 나타난 바대로 중점보다  $f_0$ 만큼 떨어진 지지점에 평판의 중심 F2와 F3이 놓일 수 있다. 이 경우 생성되는 지지 도형의 경계는 'side 3'이다.

모든 다리의 초기 지지점과 새로운 보폭  $\sigma(d_1)$ 이 결정되면 사족 보행 로봇은 그림 5의 다리 움직임 순서, 즉

$$\text{다리 4} \rightarrow \text{다리 2} \rightarrow \text{다리 3} \rightarrow (\text{다리 1, 로봇 몸체}) \quad (7)$$

의 순서로 주기적 내고장성 직선 걸음새를 구현한다. 그림 8은 조정된 지지점과 보폭을 가지는 내고장성 직선 걸음새가 한 주기 동안 실행되는 모습이다. 한 주기가 끝날 때의 걸음새인 그림 8(d)는 초기 상태 그림 8(a)와 동일하므로 본 걸음새가 주기적으로 정의되었음을 알 수 있다. 설계된 대로 이 걸음새는 임계 안정도를 보이며  $d_1$ 에 대한 최대 보폭  $\sigma(d_1)$ 을 가진다.



(c) Swing leg 2 and leg 3. (d) Lift off leg 1 and move the body.

그림 8. 평판 발에 대한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새: 다리 1에 고장 발생, 다리 1의 X 좌표 =  $d_1$ .

Fig. 8. Fault tolerant gait of the quadruped robot where the feet have flat shape with the surface and a locked joint failure occurs to leg 1 with the X coordinate  $d_1$ .

식 (6)은 다리 1의 고정 좌표  $d_1$ 이  $R_x/2 < d_1 \leq R_x$ 인 경우에 대한 보폭 공식이다.  $d_1$ 의 범위가  $0 < d_1 \leq R_x/2$ 일 때의 공식을 유도하기 위해서 그림 7을 다시 보자. 그림 7에서 보폭의 한계는 보자.(또는 보자3)의 도달 가능성에 의해서 정해진다. 보자.의 초기 위치가  $R_x/2 - f_0$ 이고 작업 영역의 앞 경계, 즉 X 좌표 값  $R_x$ 까지 이동할 수 있으므로 최대 보폭은  $R_x/2 + f_0$ 을 넘길 수 없 수 있런데 이 제한 조건은 임의의  $d_1$  값에 대해서 모두 적용되어야 한다. 식 (6)의 새로운 보폭이  $R_x/2 + f_0$ 보다 큰 조건을 구하면

$$R_x/2 + f_0 < R_x - d_1 + 2r_0 \Leftrightarrow d_1 < R_x/2 + 2r_0 - f_0 \quad (8)$$

이다. 이 결과는  $d_1$ 이  $R_x/2 + 2r_0 - f_0$ 보다 작을 때에는 보폭을 더 키울 수 없고  $R_x/2 + f_0$ 로 고정시켜야 한다는 사실을 의미한다. 식 (6)을 포함한 지금까지의 해석을 종합하여 새로운 보폭  $\sigma(d_1)$ 의 공식을 완성하면 아래와 같다.

$$\sigma(d_1) = \begin{cases} R_x - d_1 + 2r_0 & R_x/2 + 2r_0 - f_0 < d_1 \leq R_x \\ R_x/2 + f_0 & 0 < d_1 \leq R_x/2 + 2r_0 - f_0 \end{cases} \quad (9)$$

위 식에서 알 수 있듯이 평판 발이 존재하면 내고장성 걸음새의 보폭은 고장 난 다리의 좌표  $d_1$ 뿐만 아니라 평판 발의 기하학적 구조와 수치에도 영향을 받는다. 그림 9는  $d_1$ 에 대한  $\sigma(d_1)$ 의 변화 그래프이다. 로봇의 매개 변수 값은  $R_x=20(\text{unit})$ ,  $r_0=3$ 으로 설정하였으며,  $f_0$  값을 1.5, 3, 그리고 4.5로 각각 변화시켜 가면서 그래프를 그렸다. 그림 9의 그래프에서 알 수 있듯이 로봇이 +X 축 방향으로 완전 직선 보행할 때에는 평판 발의 앞부분  $f_0$ 이 길수록 보폭이 크게 나왔는데, 이것은 인간이나 곤충의 걸음새에서도 유추할 수 있는 자연스러운 결과이다. 하지만  $d_1$ 이 14.5보다 클 경우

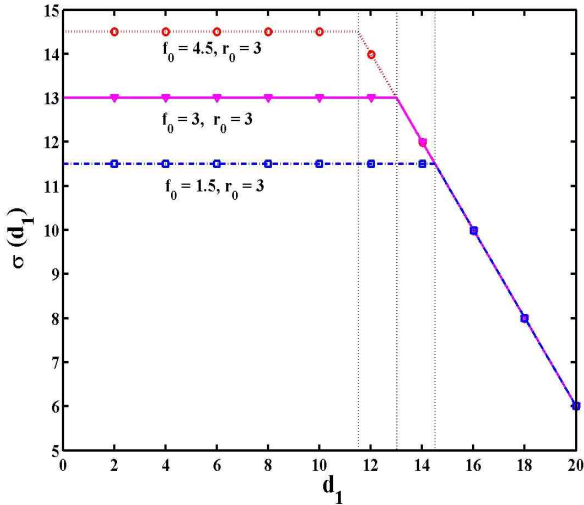


그림 9.  $\sigma(d_1)$  vs.  $d_1$  그래프:  $R_x = 20, r_0 = 3$ .  
 Fig. 9.  $\sigma(d_1)$  vs.  $d_1$  graph:  $R_x = 20, r_0 = 3$ .

에는 보폭  $\sigma(d_1)$ 이 평판 발의 앞부분 길이에 상관없이  $d_1$  값에만 좌우됨을 알 수 있다.

**V. 내고장성 게 걸음새**

게 걸음새는 보행 방향이 로봇 몸체의 세로축 방향과 다른 걸음새를 말한다. 게 걸음새는 로봇 몸체의 자세를 바꾸지 않고 경로 진행 방향을 변경할 수 있으므로 장애물 회피 등에 효과적으로 이용될 수 있다[20]. 평판 발이 달린 사족 보행 로봇의 내고장성 게 걸음새는 완전 직선 걸음새와 동일한 다리 움직임 순서를 가지나 보폭과 기하학적 매개 변수가 바뀐다.

본 논문에서는 그림 8과 유사하게 최대 보폭을 가지는 내고장성 게 걸음새를 유도한다. 그림 10은 최대 보폭을 가지는 내고장성 게 걸음새의 초기 상태와 첫 번째 이동 다리인 다리 4의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 7과 비교하면 다리의 궤적이 작업 영역의 중심이 아니라 기준 좌표계 X축과 각도  $\alpha$ 를 이루며 각 작업 영역의 중심  $C_i$ 를 지나가는 직선으로 변경되었다. 완전 직선 걸음새에서는 작업 영역의 길이  $R_x$ 를 주요 매개 변수로 사용하였지만 게 걸음새에서는  $R_x$  대신 그림에서 표시한  $R_\alpha$ 를 사용한다.  $R_\alpha$ 는 게 걸음새 각도  $\alpha$ 에 따라서 다음과 같이 구해진다.

$$R_\alpha = \begin{cases} R_y/\sin\alpha & \arctan(R_y/R_x) \leq \alpha < 90^\circ \\ R_x/\cos\alpha & 0^\circ \leq \alpha < \arctan(R_y/R_x) \end{cases} \quad (10)$$

앞서와 마찬가지로 관절 고착 고장은 다리 1에 발생했다고 가정한다. 본 연구에서는 게 걸음새에서 다리 1의 고정 위치를 표현하는 데 기준 좌표계를 사용하지 않고 작업 영역 안의 다리 궤적 시작점부터 다리 1 지지점까지의 거리를 사용한다. 내고장성 게 걸음새에서 다리 1의 고정 위치를  $d_2$ 라 정의하면  $d_2$ 는 그림 10에서 선분  $EF_1$ 의 길이이다. 또 고정점  $d_2$ 에 대해서 사족 보행 로봇의 내고장성 게 걸음새가 가질 수 있는 최대 보폭  $\sigma(d_2)$ 는 그림 10에서 다음과 같이 유도된다.

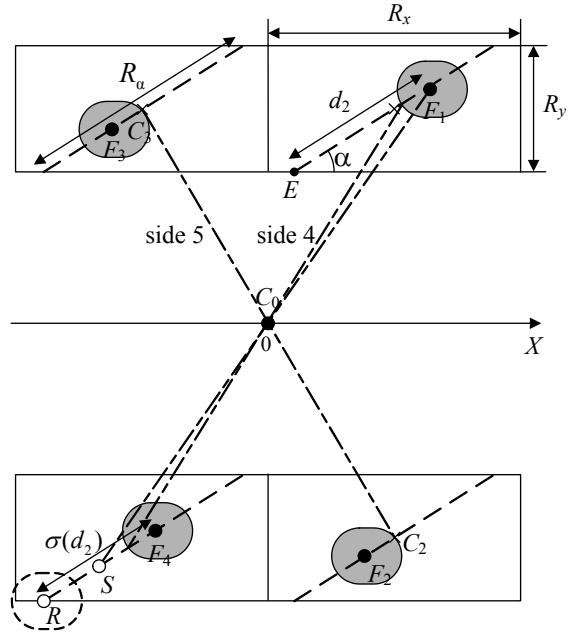


그림 10. 최대 보폭을 가지는 내고장성 게 걸음새의 초기 상태와 다리 4 이동.  
 Fig. 10. Initial state and movement of leg 4 of the fault tolerant crab gait with flat feet.

$$\sigma(d_2) = RS + SF_4 = R_\alpha - d_2 + 2r_\alpha \quad (R_\alpha/2 < d_2 \leq R_\alpha) \quad (11)$$

식 (11)은 완전 직선 보행에 대한 식 (6)을  $0^\circ$ 가 아닌 게 걸음새 각도  $\alpha$ 로 일반화한 결과라고 말할 수 있다.  $d_2$ 의 전체 범위  $0 < d_2 \leq R_\alpha$ 에 대한 완전한 보폭 공식도 식 (9)를 확장하여 다음과 같이 구한다.

$$\sigma(d_2) = \begin{cases} R_\alpha - d_2 + 2r_\alpha & R_\alpha/2 + 2r_\alpha - f_\alpha < d_2 \leq R_\alpha \\ R_\alpha/2 + f_\alpha & 0 < d_2 \leq R_\alpha/2 + 2r_\alpha - f_\alpha \end{cases} \quad (12)$$

다리 4부터 시작하여 다리 1까지 움직임 동안 로봇 몸체는 그림 10에 표시된 지지 도형의 변 ‘side 4’와 ‘side 5’에 각각 투영되어 임계 안정도를 가진다. 내고장성 게 걸음새의 한 주기 운동 모습을 그린 그림은 표기를 생략한다.

앞에서 완전 직선 걸음새에 관여하는 평판 발의 매개 변수  $f_0$ 과  $r_0$ 의 크기에 대한 제한 조건을 규정하였다. 하지만 본 논문에서 제안한 내고장성 걸음새가 가지는 새로운 보폭  $\sigma(d_1)$ 과  $\sigma(d_2)$ 의 공식이 성립하기 위해서는 평판 발이 만족시켜야 할 기하학적 제한 조건이 더 필요하다. 새로운 보폭  $\sigma(d_1)$ 과  $\sigma(d_2)$ 의 공식이 성립되기 위한 조건은 식 (9)와 (12)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$-R_\alpha/2 < 2r_\alpha - f_\alpha \leq R_\alpha/2, \quad 0^\circ \leq \alpha < 90^\circ \quad (13)$$

식 (13)은 고장이 발생한 다리를 유지한 채 보폭을 최대한으로 하여 보행을 계속하려는 사족 보행 로봇을 제작할 때 평판 발의 설계 기준으로 쓰일 수 있다.

예제 1: 사족 보행 로봇의 다리 작업 영역 매개 변수가  $R_x = 20, R_y = 16$ 이라고 하자. 이 로봇이 게 걸음새 각도  $\alpha = 0^\circ$ 와  $30^\circ$ 를 가지면서 직선 보행을 할 때 다리 1에 고장이

발생한다고 하자. 로봇이 최대 보폭을 가지는 내고장성 걸음새로 걷기 위해서 필요한 평판 발의 기하학적 제한 조건을 구해보자. 계 걸음새 각도를 식 (13)에 각각 적용하면  $f_a$  와  $r_a$ 에 대한 조건이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} -R_x/2 < 2r_0 - f_0 \leq R_x/2, \alpha = 0^\circ \\ \Rightarrow -10 < 2r_0 - f_0 \leq 10, \alpha = 0^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} -R_{30}/2 < 2r_{30} - f_{30} \leq R_{30}/2, \alpha = 30^\circ \\ R_{30} = R_x/\cos(30^\circ) = 23.1 \\ \Rightarrow -11.6 < 2r_{30} - f_{30} \leq 11.6, \alpha = 30^\circ \end{aligned} \quad (15)$$

또한 매개 변수  $f_0$ 과  $r_0$ 은 조건 (1)을 만족시켜야 하므로

$$0 < f_0 \leq 5, \quad 0 < r_0 \leq 4 \quad (16)$$

이어야 한다. 따라서 평판 발은 조건 (14)~(16)을 만족시키는 기하학적 수치를 가져야 한다. 예를 들어 평판 발이 원형(circle)이라면 조건 (14)~(16)에 의해서 반지름  $r$ 의 길이가  $0 < r \leq 4$  이어야 한다. 또한 이 구간 중 최대 보폭을 가지는 값은 식 (9)에 의해서  $r=4$ 로 유도된다.

### VI. 결론

이번 연구에서는 평판 발이 달린 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 직선 걸음새를 제안하였다. 보행 로봇의 정적 걸음새는 그 자체로 생체 모방의 일종이며, 고장이 발생한 후에도 남은 기구학적 능력을 이용하여 보행을 계속하는 내고장성 걸음새도 곤충이나 인간의 운동으로부터 모사한 것이다. 평판 발이 존재할 때 관절 고착 고장이 발생한 로봇은 점접촉을 할 때보다 더 우수한 성능의 내고장성 걸음새로 걸을 수 있다. 본 논문에서는 평판 발이 걸음새의 안정도와 보폭에 어떠한 운영향을 끼치는지 정량적으로 분석하였다. 완전 직선 내고장성 걸음새의 경우 식 (3)과 식 (9)를 비교하면 고장 난 다리X(3점 위치에 따라서 최대 보폭은  $2r_0$  또는  $f_0$  만큼 더 늘어났음을 알 수 있다. 또한 내고장성 걸음새의 성능과 평판 발의 기하학적 구조 사이의 상관관계를 식 (13)에서 규명하였으며, 이 결과는 향후 로봇을 설계하는 데 지침으로 쓰일 수 있다.

### 참고문헌

[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, Mar. 2000.

[2] M. F. Silva and J. A. Tenreiro Machado, "A historical perspective of legged robots," *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, no. 9-10, pp. 1447-1486, Sep. 2007.

[3] S. Y. Yi, D. S. Choi, and B. W. Choi, "Walking motion planning for quadruped pet robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 6, pp. 626-633, Jun. 2009.

[4] S. H. Park and Y.-J. Lee, "Discontinuous zigzag gait control to increase the stability during walking in slope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 9, pp. 959-966, Sep. 2009.

[5] H.-K. Shin and B. K. Kim, "Energy-efficient reference walking trajectory generation using allowable ZMP (zero moment point) region for biped robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 10, pp. 1029-1036, Oct. 2011.

[6] R. B. McGhee and A. Frank, "On the stability of quadruped creeping gait," *Mathematical Biosciences*, vol. 3, no. 314, pp. 331-351, Oct. 1968.

[7] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-9, no. 4, pp. 176-182, Apr. 1979.

[8] S. M. Song and B. S. Choi, "The optimally stable ranges of  $2n$ -legged wave gaits," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 4, pp. 888-902, July/Aug. 1990.

[9] P. V. Nagy, S. Desa, and W. L. Whittaker, "Energy based stability measures for reliable locomotion of statically stable walkers: theory and application," *International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 3, pp. 272-287, Jun. 1994.

[10] K. Inagaki, "On leg arrangement of a hexapod walking machine with a disable leg," in *Proc. of International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 1495-1499, 1996.

[11] D. Spennenberg, K. McCullough, and F. Kirchner, "Stability of walking in a multilegged robot suffering leg loss," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2159-2165, 2004.

[12] 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, May 2005.

[13] J. M. Yang, "Fault tolerant gaits of quadruped robots for locked joint failures," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part:C*, vol. 32, no. 4, pp. 507-516, Nov. 2002.

[14] J.-M. Yang, "Fault tolerance in control of autonomous legged robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 9, no. 11, pp. 943-951, Nov. 2003.

[15] C. F. Pana, I. C. Resceanu, and D. M. Patrascu, "Fault-tolerant gaits of quadruped robot on a constant-slope," in *Proc. of IEEE International Conference on Terrain Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR2008)*, pp. 222-226, 2008.

[16] Z. Y. Wang, X. L. Ding, and A. Rovetta, "Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot," *Robotica*, vol. 28, no. 6, pp. 893-907, 2010.

[17] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, A. Morishima, H. Lim, and A. Takanishi, "Development of a new human-

oid robot WABIAN-2,” in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 76-81, 2006.

- [18] K. Yamane and L. Trutoiu, “Effect of foot shape on locomotion of active biped robots,” in *Proc. of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 230-236, 2009.

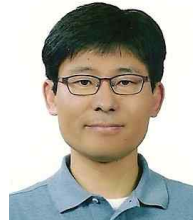
- [19] F. B. Oueddou, S. Alfayad, and B. Almasri, “Comparison of several kinds of feet for humanoid robot,” *Proc. of 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 123-128, 2005.

- [20] J.-M. Yang, “Fault-tolerant crab gaits and turning gaits for a hexapod robot,” *Robotica*, vol. 24, no. 2, pp. 269-270, 2006.



#### 양 정 민

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사). 1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1999년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1999년~2001년 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어 기술연구소 선임연구원. 2001년~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 비동기 순차 머신 제어, 실시간 시스템, 걸음새 연구.



#### 곽 성 우

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사). 1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 2000년~2002년 인공위성연구센터 선임연구원, 연구교수. 2003년~현재 계명대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 위성 탑재 컴퓨터, 실시간 시스템, 비동기 시스템 설계, 내고장성 시스템 설계.