

에너지 안정여유도를 이용한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새

論 文

55D-7-3

Designing Fault-Tolerant Gaits for Quadruped Robots Using Energy Stability Margins

楊 正 敏[†]
(Jung-Min Yang)

Abstract - This paper proposes a novel fault-tolerant gait for quadruped robots using energy stability margins. The previously developed fault-tolerant gaits for quadruped robots have a drawback of having marginal stability margin, which may lead to tumbling. In the process of tumbling, the potential energy of the center of gravity goes through a maximum. The larger the difference between the potential energy of the center of gravity of the initial position and that of this maximum, the less the robot tumbles. Hence this difference of potential energy, dubbed as Energy Stability Margin (ESM), can be regarded as the stability margin. In this paper, a novel fault-tolerant gait is presented which gives positive ESM to a quadruped robot suffering from a locked joint failure. Positive ESM is obtained by adjusting foot positions between leg swing sequences. The advantage of the proposed fault-tolerant gait is demonstrated in a case study where a quadruped robot with a failed leg walks on an even slope.

Key Words : Quadruped Robots, Fault Tolerance, Locked Joint Failure, Energy Stability Margin, Walking on Slope

1. 서 론

사족 보행 로봇(quadruped robots), 육족 보행 로봇(hexapod robots) 등 정적 보행(static walking)을 하는 다족 보행 로봇은 다리 개수의 여유도(redundancy) 때문에 내고장성(fault tolerance)을 가진다. 즉 다리의 관절(joint)이나 링크(link)에 고장이 발생해도 로봇의 기구학적 특성상 전체 시스템의 동역학 운동이 마비되지 않는다. 이것은 정적 안정여유도(static stability margin)를 유지하는 데 필요한 개수보다 더 많은 다리가 다족 보행 로봇에 달려 있기 때문이다. 다족 보행 로봇의 내고장성 걸음새 계획(fault-tolerant gait planning)은 걸음새 연구(gait study)의 기반 위에서 로봇이 다리에 고장이 발생한 후에도 안정여유도(stability margin)를 유지하면서 보행을 계속할 수 있게 하는 걸음새를 설계하는 일이다[1].

내고장성 걸음새 계획을 구현하기 위해서는 다족 보행 로봇의 모델과 다리 고장의 종류, 고장이 발생하는 시기 등이 먼저 결정되어야 한다. 다리 고장의 종류로써 과거의 연구들을 분류한다면 크게 자유회전고장(free-swinging failure)과 관절고착고장(locked joint failure)에 대한 연구로 나눌 수 있다. 자유회전고장은 다리 관절의 토크(torque)가 완전히 손상되어 수동 관절(passive joint)이 되어버리는 고장이다[2]. 자유회전고장을 극복하는 내고장성 걸음새는 고장이 발생하기 전에 다족 보행 로봇이 충분한 안정여유도를 가지

게 하여 고장 난 다리가 몸체를 지탱하지 못하게 되어도 로봇이 정적 안정도를 유지하도록 하는 방법을 사용하였다[3]-[5]. 한편 본 논문의 연구 대상인 관절고착고장은 관절 하나가 어떤 이유 때문에 고착되어서 더 이상 움직이지 못하는 상태로서, 로봇 매니퓰레이터에서 일어날 수 있는 대표적인 고장이다[6]. 관절고착고장은 다리의 이동성과 몸체 지탱 능력을 완전히 소멸시키지 않기 때문에 로봇이 다리에 남아 있는 이동 능력을 보행에 최대한 이용하도록 하는 내고장성 걸음새들이 제안되었다. 저자의 선행연구에서는 관절고착고장을 극복하는 내고장성 걸음새 계획법을 사족 보행 로봇[7]과 육족 보행 로봇[8]의 경우에 대해서 각각 제안하였다. 또한 내고장성 걸음새에서 일어날 수 있는 교착 상태를 회피하는 방법[9]과 비평탄 지형에서 운동하는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새[10] 등도 제안되었다.

기존에 제안된 내고장성 보행 중 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새는 다리가 이동할 때 걸음새의 안정여유도가 항상 0, 즉 임계 안정여유도(marginal stability margin)가 된다는 약점을 지닌다. 예상하지 못한 동역학적 영향이 외부로부터 가해진다면 지표면에 굴곡이 존재하여 내고장성 걸음새로 보행하고 있던 사족 보행 로봇의 몸체 무게중심(center of gravity) 위치가 바뀔 때에는 걸음새가 순간적으로 불안정해질 수 있으며, 최악의 경우 로봇이 넘어질 수도 있다. 비평탄 지형에서의 내고장성 보행을 위해서 FTL(Follow-The-Leader) 걸음새가 [10]에서 제안되었으나 역시 임계 안정여유도를 가지기 때문에 이러한 문제점을 해결하지 못한다.

본 논문의 목적은 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새가 가지는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 에너지 안정여유도 ESM(Energy Stability Margin)에 근거한 새로운 내고장

[†] 교신저자, 正會員 : 大邱가톨릭대 電子工學科 助教授 · 工博

E-mail : jmyang@cu.ac.kr

接受日字 : 2006年 3月 15日

最終完了 : 2006年 4月 15日

성 걸음새를 제안하는 것이다. ESM은 무게중심의 현재 위치 에너지와 로봇이 넘어질 수 있는 자세에서 무게중심이 가지는 위치 에너지와의 차이를 크기로 삼는 안정도 척도의 하나로서 앞서 언급한 무게중심의 동적 변화를 반영하는 장점이 있다[11]. 양(陽)의 ESM 값을 가지는 내고장성 걸음새를 설계하면 무게중심 위치의 변화 때문에 로봇이 불안정해지는 상황을 최대한 막을 수 있다. 또 안정여유도, 세로 안정여유도(longitudinal stability margin) 등 기존 연구에서 사용되었던 기구학적 안정도 척도가 0의 값을 가지면 ESM도 0의 값을 가지므로 ESM은 기구학적 안정도 척도를 포함하는 일반적인 안정도라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 기구학적 안정여유도를 소개하고 임계 안정여유도를 가지는 기존 내고장성 걸음새의 약점을 서술한다. 그런 다음 ESM을 정의하고 걸음새의 현재 상태에서 ESM을 구하는 공식을 유도한다. 또한 본 논문의 주요 연구 결과인 양의 ESM을 가지는 새로운 내고장성 걸음새를 제안한다. 제안된 내고장성 걸음새는 기존 걸음새와 마찬가지로 로봇 몸체와 다리가 불연속적인 움직임을 보이는 불연속 걸음새(discontinuous gaits)의 형태를 가진다. 하지만 걸음새가 양의 ESM 값을 가지기 위해서 다리나 몸체가 이동하기 전에 지지 상태(support phase)에 있는 다리들이 착지 위치를 조정하는 과정을 거친다. 관절고착고장이 발생한 다리도 고장의 특성상 착지 위치 조정 과정에 참여할 수 있다는 사실도 증명한다. 제안된 걸음새의 우수성을 보이기 위해서 관절고착고장이 일어난 사족 보행 로봇이 경사면(slope)을 걷는 사례 연구를 싣는다. ESM의 장점 중의 하나가 경사면을 보행하는 로봇의 안정도를 표시할 수 있다는 것이다. 기존 내고장성 걸음새로 보행하기 불가능한 경사면을 사족 보행 로봇이 안정여유도를 가지면서 제안된 걸음새로 걸을 수 있다는 사실을 ESM 그래프를 보임으로써 입증한다.

2. 기구학적 안정여유도

2.1 사족 보행 로봇 모델링

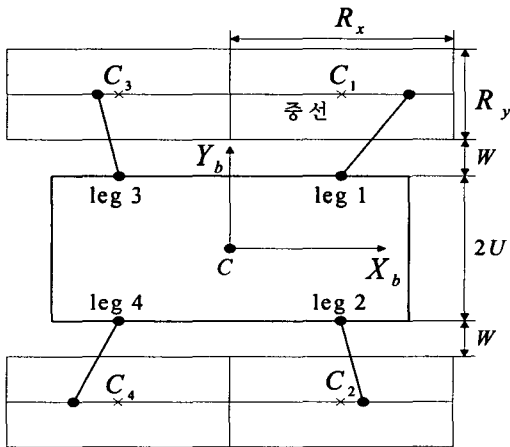


그림 1. 사족 보행 로봇의 이차원 모델.
Fig. 1. Two-dimensional model of a quadruped robot.

그림 1은 본 논문에서 다루는 사족 보행 로봇의 이차원

모델이다. 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, 그림과 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 i 의 작업 영역의 중점이며 각 작업 영역을 이등분하는 중선(middle line)이 C_i 를 지나간다.

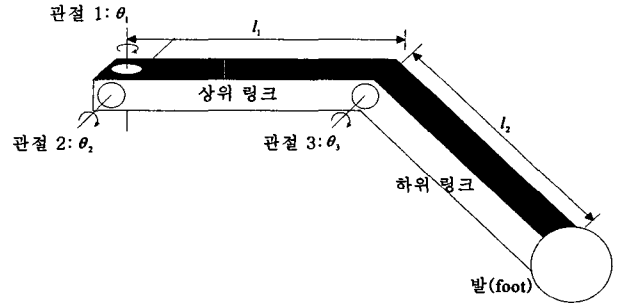


그림 2. 팔꿈치형 다리 모델.
Fig. 2. Leg model of an articulated-arm type.

그림 1에서 로봇의 다리는 착지점과 로봇 몸체 연결점 사이의 직선으로 표시되지만 실제로는 그림 2와 같이 세 개의 회전 관절을 지닌 팔꿈치형 매니퓰레이터(articulated manipulator) 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. 상위 링크에 달린 회전 관절 중 로봇 몸체의 세로 방향으로 회전하는 관절을 관절 1이라고 정의하고 로봇 몸체의 상하 방향으로 회전하는 관절을 관절 2라고 정의한다. 또한 상위 링크와 하위 링크를 연결해주는 관절을 관절 3이라고 정의한다. 관절 1에는 다리가 로봇 몸체에 대해서 이동할 때 쓰이는 메인 액츄에이터(main actuator)가 달려 있고, 관절 2와 관절 3은 다리가 지표면을 이륙하거나 착지할 때 사용된다. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 각각 관절 1, 관절 2, 관절 3의 회전 각도라고 정의하고 l_1, l_2 를 상위 링크와 하위 링크의 길이라고 정의한다. 그림 2의 모델을 가지는 다리의 발(foot)은 자유도(degree of freedom) 3을 가지며 작업 영역 어디에라도 착지할 수 있다.

2.2 관절고착고장

관절고착고장이 발생한 다리는 자유도가 하나 줄어들어 이동 능력에 심각한 손실을 입는다. 하지만 관절고착고장에서는 관절 하나가 특정 각도로 고정되기 때문에 자유회전고장이나 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. 기존 내고장성 걸음새를 기술하기 전에 본 논문에서는 먼저 관절고착고장이 다리 1에서만

발생한다는 가정을 세운다. 사각 보행 로봇은 무게 중심을 중심으로 각 다리가 대칭적으로 달려 있기 때문에 다리에서 발생하는 고장에 대한 내고장성 걸음새는 다리 1에 대한 걸음새로부터 쉽게 유도될 수 있다.

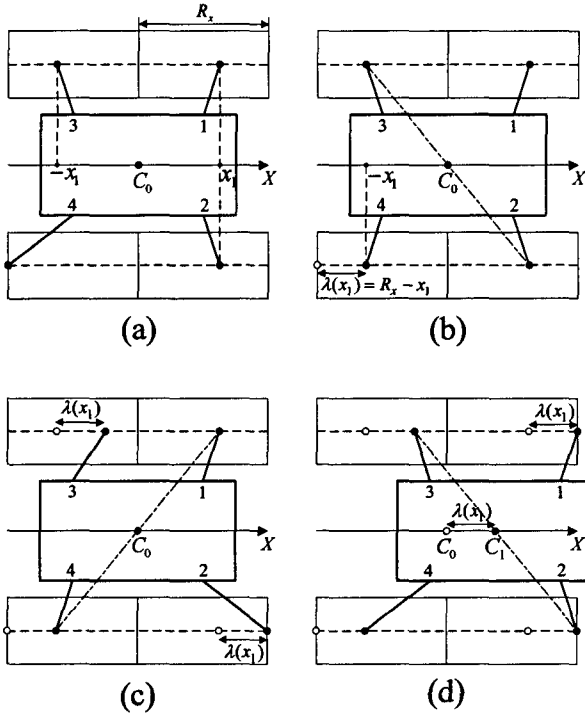


그림 3. 다리 1에 관절고착고장이 발생한 사각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 2, 다리 3 이동 (d) 다리 1 이륙 후 로봇 몸체 이동.

Fig. 3. 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.

그림 3은 선행연구 [7]에서 제안된, 관절고착이 발생한 사각 보행 로봇의 직선 보행을 위한 내고장성 걸음새이다. 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 계속 고장후(post-failure) 보행에 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 3(d) 참조). 그림 3에서 \$x_1\$은 다리 1 착지점의 X축 좌표로서 고착된 관절의 위치와 다리의 자세에 따라서 결정되는 값이다. 그림 3은 \$x_1\$이 \$R_x/2 \le x_1 < R_x\$의 범위에 있을 때 로봇이 가지는 내고장성 걸음새를 나타내었다. \$0 \le x_1 < R_x/2\$인 경우도 다리의 초기 착지점만 틀려질 뿐 그림 2와 동일한 다리 움

직임 순서를 가진다([7] 참조). \$\lambda(x_1)\$는 다리 1의 착지점이 \$x_1\$일 때의 내고장성 걸음새 보폭으로 \$x_1\$에 따라서 다음과 같이 유도된다[7].

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

그림 3의 기존 내고장성 걸음새는 임의의 다리에서 발생하는 관절고착고장에 대해서 사각 보행 로봇이 교착상태(deadlock)에 빠지지 않고 고장후 보행을 계속하는 것을 보장하고 있으나 안정도 면에서 심각한 약점을 지닌다. 즉 다리 하나가 이동 상태(transfer phase)에 있을 때 걸음새는 항상 몸체 무게중심이 지지 다각형(support pattern)의 한 변 위에 있게 되는 임계 안정여유도를 가진다(그림 3(b) ~ (d) 참조). 따라서 보행 시 발생할 수 있는 외부 충격 등에 의한 몸체의 흔들림, 착지 위치 오차 등에 의해서 걸음새가 불안정해져서 로봇이 넘어질 수 있는 위험이 있다. [10]에서 제안된 FTL 걸음새 및 2상 불연속 걸음새에서는 양의 안정여유도를 가지는 상태가 일부 존재하지만 몸체가 이동할 때에는 역시 임계 안정여유도 상태가 되므로 이러한 안정도 문제를 완전히 해결했다고 말할 수 없다.

3. 에너지 안정여유도: ESM

에너지 안정여유도 ESM은 보행 로봇이 지지 다각형의 한 변을 축으로 넘어지기 위해서 필요한 위치 에너지의 최소값으로 정의된다[11]. 로봇 몸체의 질량을 \$m\$, 중력 가속도를 \$g\$라고 하면 ESM은 다음과 같이 정의된다.

$$ESM = \min \{mgh_1, \dots, mgh_n\} \quad (2)$$

위 식에서 \$n\$은 착지 상태에 있는 다리의 개수이며 \$h_i\$는 무게중심의 현재 높이와 무게중심이 지지 다각형의 한 변 edge \$i\$ 위로 넘어지는 순간 가지는 최대 높이와의 차이를 말한다. ESM은 위치 에너지 값이므로 로봇의 동역학적 영향을 안정도 척도에 반영할 수 있다는 장점을 지닌다. 무게중심을 이차원 평면상에 투영시켜서 안정도를 구하는 기존의 기구학적 안정여유도와는 달리 ESM은 무게중심의 높이까지 고려하므로 경사면 보행 등 삼차원에서 걸음새 안정도를 고려해야 하는 문제에 유용하게 쓰일 수 있다. ESM 값을 쉽게 구하기 위해서 본 논문에서는 [12]에서 제안된 방법을 참고로 하여 ESM 공식을 유도한다.

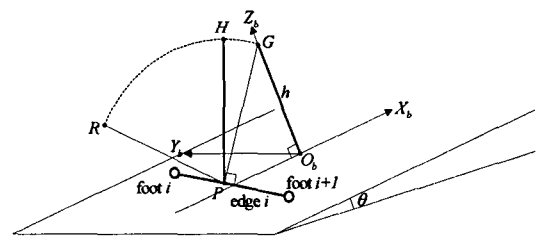


그림 4. ESM 유도를 위한 걸음새 상태 설정. Fig. 4. Gait configuration for deriving ESM.

그림 4는 ESM을 유도하기 위해서 걸음새 상태를 몸체 좌표계로 표시한 것이다. 보행 지형의 일반화를 위해서 사족 보행 로봇은 그림과 같이 각도 θ 를 가지는 경사면 위를 보행한다고 설정한다. X_b 축, 즉 몸체의 세로방향은 경사면의 최대 기울기선(maximum gradient line)과 평행하고 Y_b 축은 X_b 축과 수직을 이루며 Z_b 축은 그림과 같이 $X_b - Y_b$ 평면과 수직이 되게 설정된다. O_b 는 몸체 좌표계의 원점, G 는 몸체 무게중심의 좌표를 각각 가리킨다. 본 논문에서는 다른 걸음새 연구에서와 마찬가지로 무게중심의 높이는 보행 시 항상 일정한 값 h 로 유지된다고 가정한다. 그림 4에서 착지 상태에 있으며 서로 인접한 임의의 다리 i 와 다리 $i+1$ 이 만드는 지지 다각형의 한 변 edge i 가 표시되어 있다. ESM을 구하기 위해서는 먼저 지지 다각형의 한 변에서 무게중심과 가장 가까운 지점을 찾아야 한다. 그림에서 표시된 P 가 그러한 점이라고 가정하자. 로봇 몸체가 edge i 위로 넘어진다고 하면 무게중심은 호 \widehat{GR} 의 궤적을 그릴 것이다. 이때 가장 고도(altitude)가 높은 지점 H 에서 무게중심은 최대 위치 에너지를 가지므로 H 지점과 G 지점의 고도 차이를 구하면 ESM을 찾을 수 있다. 몸체 좌표계에서 지점 G 와 P 를 각각 다음과 같은 벡터로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{O_b G} &= [0 \ 0 \ h]^T \\ \vec{O_b P} &= [x \ y \ 0]^T \end{aligned}$$

edge i 방향을 가지는 단위 벡터를 \vec{PQ} 라고 정의하면 \vec{PG}, \vec{PQ} 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \vec{PG} &= [-x \ -y \ h]^T \\ \vec{PQ} &= -\frac{\vec{O_b P} \times \vec{O_b G}}{|\vec{O_b P} \times \vec{O_b G}|} = -\frac{1}{\sqrt{y^2 + x^2}} [-y \ x \ 0]^T \end{aligned} \quad (3)$$

벡터 \vec{PG} 가 P 를 중심으로 edge i 주위를 90° 회전하면 새로운 벡터 \vec{PR} 을 다음과 같이 얻는다.

$$\vec{PR} = \vec{PQ} \times \vec{PG} \quad (4)$$

최대 고도 지점 H 는 \vec{PG} 와 \vec{PR} 로부터 구할 수 있다. 그런데 이 벡터들은 모두 경사면 위에서 정의된 값들이므로 벡터를 회전하여 지표면과 평행하게 변환한 다음 H 를 구하는 것 더 용이할 것이다. 몸체 좌표계 $X_b - Y_b - Z_b$ 를 Y_b 축을 중심으로 각도 $-\theta$ 만큼 회전한 후 얻어지는 좌표계를 $X_w - Y_w - Z_w$ 라 하면 최대 고도는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} ESM &= mg \{ \vec{PH}_w(z) - \vec{PG}_w(z) \} \\ &= mg \{ (\cos \phi R_Y(-\theta) \vec{PG} + \sin \phi R_Y(-\theta) \vec{PR})(z) - (R_Y(-\theta) \vec{PG})(z) \} \\ &= mg \left\{ (-x \sin \theta + h \cos \theta) \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} (hx \sin \theta + (x^2 + y^2) \cos \theta) \sin \phi + x \sin \theta - h \cos \theta \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\vec{PH}_w = (\cos \phi) \vec{PG}_w + (\sin \phi) \vec{PR}_w \quad (5)$$

위 식에서 첨자 w 는 $X_w - Y_w - Z_w$ 좌표계에서 표현된 벡터라는 것을 의미한다. 각도 ϕ 는 그림 5에 표시된 사잇각으로 다음과 같이 쉽게 유도된다.

$$\phi = \arctan(\vec{PR}_w(z), \vec{PG}_w(z)) \quad (6)$$

$\vec{PR}_w(z), \vec{PG}_w(z)$ 는 각각 벡터의 z 원소를 말한다. 또 $X_w - Y_w - Z_w$ 는 몸체 좌표계에서 아래와 같은 회전 행렬을 곱하면 구해진다[13].

$$R_Y(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (3) ~ (7)을 이용하여 edge i 에서의 ESM을 점 P 의 좌표값 x, y 와 몸체 높이 h 로 표시하면 식 (8)과 같다.

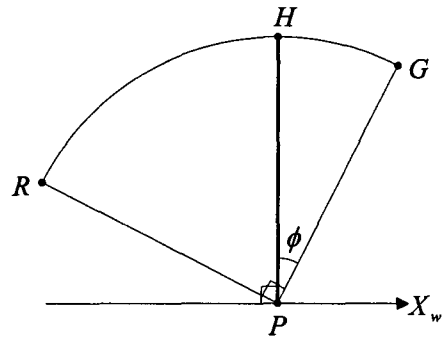
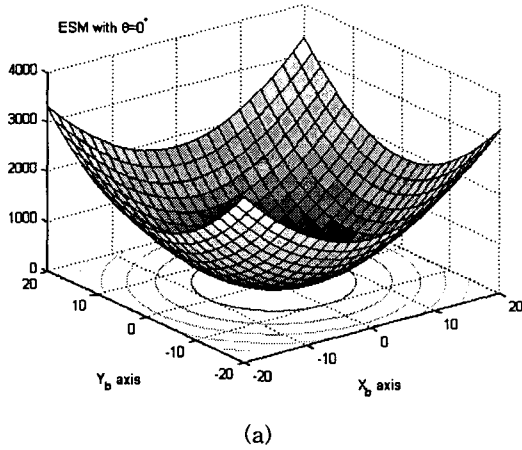
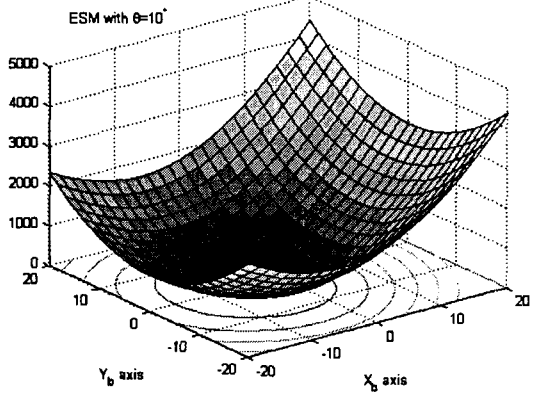


그림 5. 좌표계 변환.
Fig. 5. Coordinate transform.

식 (8)에서 알 수 있듯이 ESM은 edge와 무게중심의 거리뿐만 아니라 보행면의 경사각 θ 와도 밀접한 관련이 있다. 그림 6은 각각 다른 경사면에서 P 의 위치가 바뀔 때 ESM을 구하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 경사각이 0° 일 때에는 원점으로부터 동일한 거리에 있는 지점에서의 ESM 값은 모두 같게 나온다. 이것은 세로 안정여유도 등 기구학적 안정도 척도와 유사한 성질이다. 하지만 X_b 축으로 각도 10° 를 가지는 경사면에서는 ESM이 한쪽으로 치우치게 나온다. 이것은 로봇이 고도가 높은 지점에 있는 지지 다각형 변보다 낮은 지점에 있는 변 쪽으로 넘어지기 더 쉽기 때문이다. 즉 ESM은 로봇이 보행하는 지형을 고려한 안정도 척도를 가지게 하므로 기구학적 안정여유도보다 더 실제적이라고 말할 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 에너지 안정여유도 그래프. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=10^\circ$.
Fig. 6. Energy stability margin graph. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=10^\circ$.

4. 내고장성 걸음새

4.1 착지점 조정

본 장에서는 양의 ESM을 가지는 내고장성 걸음새를 사족 보행 로봇의 직선 보행에 대해서 제안한다. 보행 로봇이 임계 안정여유도를 피하고 양의 ESM을 가지기 위해서는 다리나 몸체가 이동하기 전에 지지 상태에 있는 다리들의 착지점을 조정하여 무게중심과 지지 다각형 변 사이의 간격을 넓히는 일이 수반되어야 한다. 정상적인 다리의 착지점 조정은 아무 문제가 없으나 관절고착고장이 발생한 다리는 이동성에 제한을 가지므로 착지점 조정이 되는지 확인해야 한다. 본 절에서는 먼저 [8],[9]에서 기술된 관절고착고장의 작업 공간 변화를 바탕으로 고장 난 다리도 양의 ESM 값을 가지기 위한 착지점 조정 과정에 참여할 수 있다는 사실을 규명한다.

그림 7은 직선 보행에서 고장 난 다리가 착지점을 조정하는 모습을 그린 것이다. 관절고착고장이 발생하여 관절 1이 움직이지 못하게 되면 다리는 두 개의 회전 관절로 이루어진 2-링크 평면 매니플레이터와 동일한 기구학을 가지게 된다. 따라서 다리의 이동 가능 범위는 평면이 되고 지표면에 투영된 범위는 그림 7(a)와 같은 직선이 된다. θ_1 은 관절 1

이 고착된 위치를 가리킨다. 다리의 궤적이 작업 영역의 중선일 때 다리는 그림 7(a)의 점 P에 착지해야 한다. 하지만 다른 다리가 이동할 때 양의 ESM을 주기 위해서 현재 착지점을 일시적으로 바꾸어야 할 때에는 그림에서 표시되었듯이 착지가능선의 양 끝단인 P₁과 P₂까지 다리의 발을 옮길 수 있다.

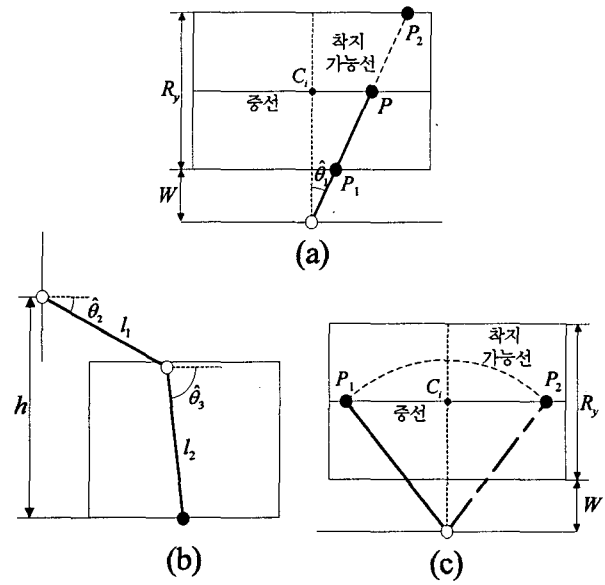


그림 7. 고장 난 다리의 착지점 조정. (a) 관절 1의 고착, (b) 관절 2 또는 3의 고착(측면도), (c) 관절 2 또는 3의 고착(평면도).

Fig. 7. Foot point adjustment of a failed leg. (a) locked failure at joint one, (c) locked failure at joint two or three (lateral view) and (c) locked failure at joint two or three (plane view).

한편 관절 2(또는 관절 3)에 관절고착고장이 발생하면 다리의 전후 이동은 관절 1에 의해서 이루어지지만 다리의 상하 운동은 관절 3(또는 관절 2)만을 이용해야 하므로 이동성에 제한을 받는다. 또 지표면에 대한 무게중심의 고도가 h로 일정하다고 가정하였으므로 관절 2와 관절 3 중 하나가 고착되면 다른 하나의 값도 고도 h를 맞추기 위해서 자동적으로 결정된다. 그림 7(b)는 이러한 다리의 고장 상태를 측면에서 바라본 그림이다. 그림에서 θ_2 와 θ_3 은 관절 2와 관절 3이 고착된 각도를 각각 표시한다. 고장 난 다리는 로봇 몸체 좌표계의 $\pm Y_b$ 방향으로의 이동이 불가능하므로 작업 영역에 투영된 다리의 착지 가능 영역은 그림 7(c)와 같이 원호(arc) 모양이 되며, 작업 영역의 중선을 다리 궤적으로 하는 걸음새에서 고장이 발생한 후 다리가 디딜 수 있는 착지 영역은 점 P₁ 또는 P₂가 된다. P₁과 P₂ 중 하나가 착지점이 되면 다른 하나는 다리 이동을 위해서 착지점이 옮겨질 수 있는 조정 지점이 된다.

4.2 다리 움직임 순서

그림 8은 본 논문에서 제안하는 양의 ESM을 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새이다. 사족 보행 로봇은 평

탄 지형에서 직선 보행을 하며 관절고착고장이 다리 1의 관절 2 또는 관절 3에 발생하였다고 가정한다. 관절 1에 발생한 고장에 대한 내고장성 걸음새도 그림 8과 유사하므로 그 설명은 생략한다. 본 걸음새는 기존 걸음새[8],[9]와 동일하게 다리4→다리2→다리3→다리1로 가는 +X-형(+X-type)의 순서를 가진다. 하지만 앞에서 설명했듯이 걸음새가 양의 ESM을 가지게 하기 위해서 한 다리가 이륙하기 전에 지지 상태에 있는 다리의 착지점을 조정하는 과정이 먼저 실행된다. 그림 8(a)는 초기 상태로서 다리 4가 맨 처음 이동할 준비를 하고 있다. 다리 3이 중점 C_3 에서 -Y 방향으로 $R_x/2$ 만큼 조정되었고 다리 1도 그림 7(c)의 두 착지점 중 P_1 에 착지되어 있다. 그림 8(b)에서 다리 4가 이륙하여 다음 착지점 C_4 에 착지한다. 그림 8에서 일점쇄선으로 표시한 직선은 모두 현재 걸음새의 ESM을 결정하는 지지 다각형의 변을 표시한다. 그림 8(b)에서 다리 2와 다리 3의 착지점으로 만들어지는 변 안쪽에 무게중심 C_0 가 놓여 있음을 알 수 있다.

그림 8(c)와 (d)는 그 다음 이동할 다리 2를 위해서 다리 3과 고장 난 다리 1의 착지점이 조정되는 과정을 나타낸 것이다. 다리 3은 직전 위치에서 +Y 방향으로 R_y 만큼 다시 조정되고 다리 1은 그림 7(c)에 표시된 P_2 로 이동한다. 일점쇄선으로 표시된 edge와 무게중심 C_0 와의 상대적인 위치를 보면 다리 3과 다리 1의 착지점이 조정될 때에도 ESM은 항상 양의 값을 가진다는 사실을 알 수 있다. 그림 8(e)에서 다리 2가 이동한 후 다시 다리 1의 착지점이 P_1 으로 조정되고(그림 8(f)) 다리 3이 이동한다(그림 8(g)). 마지막으로 그림 8(h)에서 다리 1이 이륙한 후 로봇 몸체의 움직임에 따라서 수동적으로 이동하는 내고장성 걸음새가 완성된다. 그림 8(i)는 다음 주기에서 다리 4가 다시 이동하기 위해서 다리 3의 착지점을 조정하는 과정이다.

그림 8(b), (e), (f), (g)에서 알 수 있듯이 본 걸음새의 보폭(stride length)은 $R_x/2$ 이다. 다리 1의 착지점 x_1 이 $0 \leq x_1 < R_x/2$ 의 범위 안에 있으면 기존 내고장성 걸음새의 보폭도 $R_x/2$ 이 나오므로(식 (1) 참조) 본 논문에서 제안된 걸음새는 보폭 면에서 기존 걸음새와 성능이 동일하다고 말할 수 있다. 그러나 양의 ESM을 가지기 위한 다리 착지점 조정 과정이 걸음새 중간에 삽입되므로 디듀티(duty factor)[14] 등 속도 면에서는 기존 걸음새의 성능보다 뒤진다. 즉 본 걸음새는 속도의 성능을 희생하면서 사족 보행 로봇의 내고장성에 안정도를 더 부여하도록 설계되었다고 말할 수 있다.

그림 8의 각 걸음새 상태에서 ESM 값은 표시되지 않았다. 이것은 ESM이 보행 지면의 경사도에 따라서 변하기 때문이다. 다음 장에서는 경사면을 보행하는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새를 사례 연구(case study)로 들어 구체적인 ESM 값을 구하기로 한다.

5. 경사면 보행: 사례 연구

본 논문에서 제안된 내고장성 걸음새가 실제로 가지는 ESM 값을 알아보기 위해서 관절고착고장이 발생한 사족

보행 로봇이 경사면을 걷는 사례 연구를 제시한다. 앞서와 마찬가지로 사족 보행 로봇의 다리 1의 관절 2 또는 관절 3에 관절고착고장이 발생하였다고 가정한다. 또 로봇 질량은 $m=30\text{kg}$, 무게중심 고도는 $h=30\text{cm}$ 이며, $R_x=40\text{cm}$, $R_y=20\text{cm}$, $W=40\text{cm}$ 의 매개 변수를 가진다. 사족 보행 로봇은 경사면 각도 θ 가 각각 0° , 10° , 20° 인 세 개의 평탄 지형에서 내고장성 걸음새를 가진다고 설정한다. $\theta=0^\circ$ 인 완전 평탄 지형(perfectly even terrain)은 경사각을 가지는 지형에 대한 보행의 성능과 서로 비교하기 위해서 추가되었다.

사족 보행 로봇은 그림 8에 나와 있는 내고장성 걸음새로 직선 보행을 한다. 지표면이 평탄하다고 가정하였으므로 로봇은 그림 8의 걸음새를 한 주기로 하는 주기적 걸음새를 가진다. 그림 9는 로봇이 보행할 때 각 걸음새 상태에서 가지는 ESM을 시간에 따라 그린 그래프이다. 안정도 변화치를 명확하게 보여주기 위해서 본 논문에서는 사족 보행 로봇이 그림 8(a) ~ (i)에 나타난 다리 이동 또는 몸체 이동 등의 걸음새 이벤트(event)[14]를 수행하는 시간이 모두 1초로 동일하다고 가정한다. 실제로는 다리 관절에 달린 액츄에이터의 성능과 로봇 매개 변수에 따라서 수행되는 시간은 서로 다를 것이다. 그림 9(a)는 사족 보행 로봇이 완전 평탄 지형을 내고장성 걸음새로 걸을 때 가지는 ESM 그래프이다. ESM가 에너지 단위(J)를 가지는 비교적 큰 값이므로 여기서는 ESM에 로봇 몸체의 무게를 나눈 정규화된 ESM(Normalized ESM)(cm)으로 그래프를 표시하여 변화치의 식별을 용이하게 하였다. 그림 8과 비교하면 알 수 있듯이 완전 평탄 지형 보행에서 ESM은 기구학적 안정여유도와 비슷한 경향을 보인다. 즉 지지 다각형 변과 무게중심과의 거리가 가까울수록 ESM 값도 적어지고((d), (h) 구간), 지지 다각형 변과의 거리가 멀수록 ESM 값도 커진다((c), (f), (i) 구간). 지형의 경사가 없으므로 몸체 무게중심이 넘어지는 데 필요한 에너지가 가장 적은 변은 무게중심 투영점과의 거리가 가장 가까운 곳일 것이다.

그림 9(b)는 양의 경사각을 가지는 지형을 내고장성 걸음새로 걷는 사족 보행 로봇이 가지는 ESM을 그린 그래프이다. 완전 평탄 지형 보행과 비교하면 경사면 보행은 ESM 값에서 큰 차이를 보인다. 특히 (c), (g) 등 완전 평탄 보행에서 정규화된 ESM값이 0.5가 넘는 걸음새 상태들이 경사면 보행에서는 아주 적은 ESM 값을 가지는 사실을 관찰할 수 있다. 이것은 ESM을 결정하는 지지 다각형 edge의 고도가 무게중심보다 더 낮기 때문이다. 그림 4에서 경사면의 최대 기울기선은 +X₀ 방향으로 나 있다고 설정하였으므로 그림 8의 (c)와 (g) 구간에서 일점쇄선으로 표시된 edge는 무게중심 C_0 보다 낮은 위치에 있다. 지지 다각형 edge의 고도가 무게중심보다 더 낮으면 로봇이 넘어지는 데 필요한 위치에너지는 고도가 같을 때보다 더 적게 든다. 이렇듯 ESM은 기존의 기구학적 안정여유도가 찾을 수 없는 보행 지형에 상관은 로봇의 안정도까지 위치 에너지 측면에서 명확하게 반영해주므로 제안된 내고장성 걸음새가 가지기에 적절한 안정도 척도라고 말할 수 있다. 또 임계 안정여유도를 가지는 그림 3의 기존 내고장성 걸음새에서는 무게중심 투영점이 지지 다각형 바깥에 위치하는 불안정한 상태로 접어들 수 있으므로 경사면 보행에 적용될 수 없다. 따라서 본 논문에서 제안된 걸음새가 더 실용적이라고 말할 수 있다.

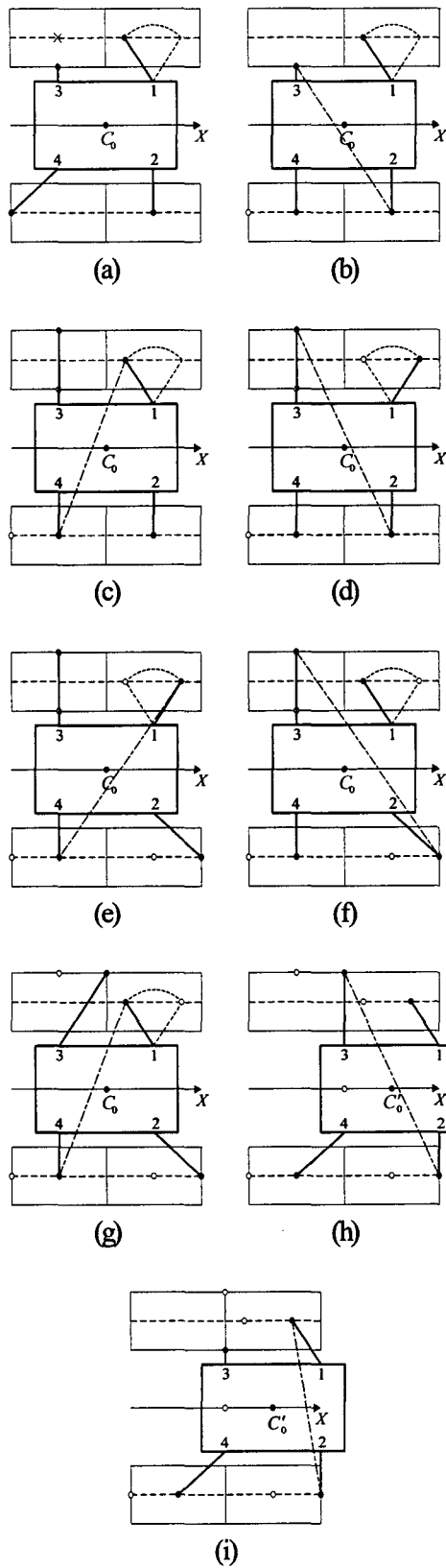
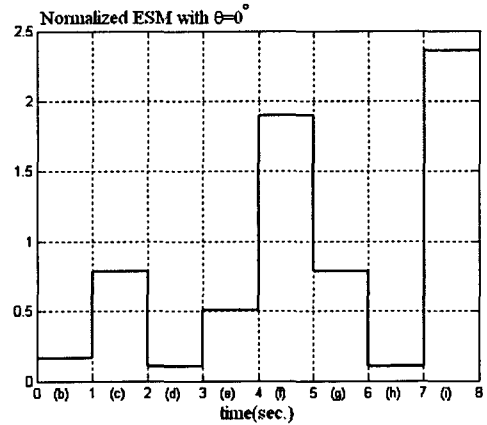
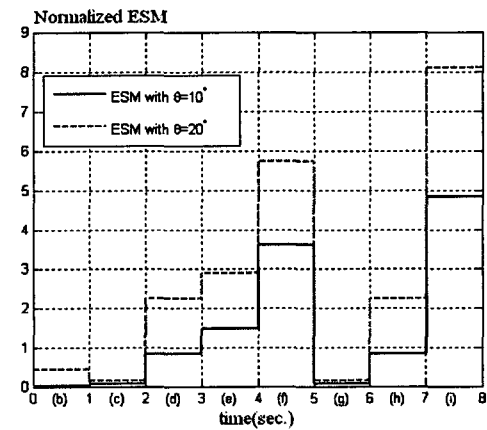


그림 8. 양의 ESM을 가지는 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새. (a) 초기 상태, (b) 다리 4 이동, (c) 다리 3 착지점 조정, (d) 다리 1 착지점 조정, (e) 다리 2 이동, (f) 다리 1 착지점 조정, (g) 다리 3 이동, (h) 다리 1 이륙 후 몸체 이동, (i) 다리 3 착지점 조정.

Fig. 8. Fault-tolerant gait of quadruped robots having positive ESM. (a) initial state, (b) swing leg 4, (c) adjust foot point of leg 3, (d) adjust foot point of leg 1, (e) swing leg 2, (f) adjust foot point of leg 1, (g) swing leg 3, (h) lift off leg 1 and move the body and (i) adjust foot point of leg 3.



(a)



(b)

그림 9. 경사면을 보행하는 사족 보행 로봇의 ESM. (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 10^\circ, 20^\circ$.

Fig. 9. ESM of the quadruped robot walking over a slope. (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 10^\circ, 20^\circ$.

6. 결 론

내고장성 걸음새의 목적은 다리에 고장이 발생해도 로봇이 안정여유도를 가지면서 계속 보행할 수 있게 만드는 일이다. 기존에 제안되었던 사족 보행 로봇에 대한 내고장성 걸음새는 이러한 목적에 잘 부합하도록 설계되었으나 다리나 몸체의 이동 시 걸음새가 임계 안정여유도를 가진다는 약점이 있었다. 본 논문에서는 기존 걸음새의 이러한 약점을 없애면서 안정도 면에서 더 우수한 새로운 내고장성 걸음새를 제안하였고, 에너지 안정여유도 ESM을 도입하여 일반적인 안정도 척도를 사용하였다. 제안된 내고장성 걸음새는 기존 걸음새와 동일한 다리 이동 순서를 가지나 다리가

이동하기 전에 걸음새가 양의 ESM을 가지도록 지지 상태에 있는 다리의 착지점을 조정하는 과정을 거친다. 본 논문에서는 관절고착고장의 고장 후 특성을 분석하여 사족 보행 로봇이 이러한 다리 착지점 조정 과정을 성공적으로 수행한다는 사실을 검증하였다. 또한 관절고착고장이 발생한 사족 보행 로봇이 경사각을 가지는 지형에서 보행하는 사례 연구를 통해서 ESM이 기존의 기구학적 안정여유도에 비해서 보행 지형의 상태와 로봇 몸체의 고도 등을 안정도 척도에 반영할 수 있다는 사실을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00289).

참 고 문 헌

[1] T. C. Lueth, U. M. Nassal and U. Rembold, "Reliability and integrated capabilities of locomotion and manipulation for autonomous robot assembly," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 185-198, 1995.

[2] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics B*, vol. 28, no. 1, pp. 109-116, 1998.

[3] H. Arai and S. Tachi, "Position control of a manipulator with passive joints using dynamic coupling," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 1, pp. 15-20, 1991.

[4] 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, 1994.

[5] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Optimal fault tolerant gait sequence of the hexapod robot with overlapping reachable areas and crab walking," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics A*, vol. 29, no. 2, pp. 224-235, 1999.

[6] 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.

[7] 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.

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

[9] 양정민, 노지명, "육각 보행 로봇의 내고장성 세다리 걸음새," *대한전기학회논문지*, 제52D권, 제12호, pp. 689-695, 2003.

[10] 노지명, 양정민, "교착 회피를 고려한 내고장성 세다리 걸음새," *대한전기학회논문지*, 제53D권, 제8호, pp. 585-593, 2004.

[11] 양정민, 박용국, "비평탄 지형에서 사각 보행 로봇의 고장후 보행," *대한전기학회논문지*, 제54D권, 제9호, pp. 547-555, 2005.

[12] D. C. Messuri and C. A. Klein, "Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-1, no. 3, pp. 132-141, 1985.

[13] H. Tsukagoshi, S. Hirose and K. Yoneda, "Maneuvering operations of a quadruped walking robot on a slope," *Advanced Robotics*, vol. 11, no. 4, pp. 359-375, 1997.

[14] J. J. Craig, *Introduction to Robotics (3rd ed.)*, Pearson Education, NJ, 2005.

[15] S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, MIT Press, Cambridge, MA, 1989.

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(공학박사). 1999년 3월~2001년 2월 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어연구소 선임연구원. 2001년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야: 로봇 제어, 보행 로봇 시스템 등.
 Tel : 053-850-2736
 Fax : 053-850-2704
 E-mail : jmyang@cu.ac.kr