

경사면 보행 안정성 향상을 위한 불연속 걸음새 제어

Discontinuous Zigzag Gait Control to Increase the Stability During Walking in Slope

박 세 훈*, 이 연 정
(Se Hoon Park and Yun-Jung Lee)

Abstract: An essential consideration when analyzing the gait of walking robots is their ability to maintain stability during walking. Therefore, this study proposes a vertical waist-jointed walking robot and gait algorithm to increase the gait stability margin while walking on the slope. First, the energy stability margin is compared according to the posture of the walking motion on slope. Next, a vertical waist-jointed walking robot is modeled to analyze the stability margin in given assumption. We describe new parameters, joint angle and position of a vertical waist-joint to get COG (center of gravity of a body) in walking. Finally, we prove the superiority of the proposed gait algorithm using simulation and conclude the results.

Keywords: quadruped walking robot, vertical waist-joint, gait, discontinuous zigzag gait, slope

I. 서론

보행로봇의 이동성이 기존 무한케도나 휠 타입의 로봇에 비해 다소 비효율적이지만 습지, 사막과 같은 환경적인 제한이 있는 지형에서는 인간을 대신하여 다양한 작업을 수행할 수 있는 능력 때문에 지금까지 꾸준히 연구되고 있다. 비평탄 지형은 안정된 보행을 위한 걸음새 분석을 위해 장애물이 있는 평탄지형으로 모델링된다. 일반적으로 흔히 접하는 대표적인 비 평탄 지형은 경사면, 계단, 구덩이로 나눌 수 있다. 구덩이는 평탄지형 걸음새 분석 시 착지금지지역으로 표현할 수 있고, 계단은 착지 금지지역이 있는 경사면으로 표현할 수 있다. 그래서 평탄 지형에서 비평탄 지형으로 확장시 주로 경사면 걸음새에 대한 연구가 주를 이루고 있다[1].

경사면 걸음새는 1985년 Messuri와 Kelin[2]에 의한 6족 보행로봇 걸음새를 시작으로 국내에서는 Min[1]에 의해 경사면에서 4족 보행로봇의 직진 및 계걸음새가 처음으로 제안되었다. 그리고 같은 해에 Navy와 Whittaker[3]가 6족 보행로봇의 직진 걸음새를 제안하였다. 이러한 걸음새는 진행방향으로 몸체를 연속으로 움직여 보행하는 연속 걸음새로서 다리의 이륙 및 착지 시 안정도가 작기 때문에 안정된 보행에 지속적인 문제로 지적되어 왔다. 그래서 1995년 다리가 모두 지지한 상태에서 몸체를 이동하여 걸음새 안정여유도를 향상시킨 4족 보행로봇의 불연속 걸음새에 대한 연구가 Santos와 Jimenez에 의해 이루어졌다[4]. ICG (Intermittant Crawl Gait)[5], E-Sway and Y-Sway Gait[6] 역시 경사면 보행에 불연속 걸음새를 적용한 대표적인 연구사례이다.

위와 같이 기존의 보행로봇의 걸음새 안정여유도를 높이기 위한 연구는 대부분 걸음새 알고리즘에 중점을 두었으며, 체계적인 분석을 위한 로봇모델로서 단일 강체를 가지는 로봇을 기본모델로 하고 있다. 하지만 최근에 걸음새 안정여유

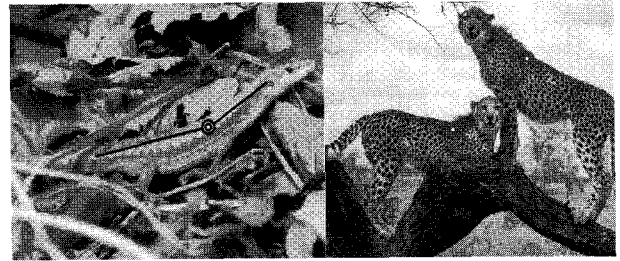


그림 1. 유연한 허리관절을 가진 동물.
Fig. 1. Animals with a flexible waist-joint.

도를 높이고 동물의 걸음새와 보다 유사한 걸음새를 구현하기 위해 단일 몸체가 아닌 수평허리관절을 가지고 몸체가 상체와 하체로 나뉘어진 보행로봇의 모델을 제안하여 평탄지형 보행에서 우수한 보행성능을 보여주었다[7].

그래서 본 논문에서는 평지가 아닌 경사면 보행 시 걸음새 안정여유도를 높이고 동물과 비슷한 보행패턴을 구현하기 위해 수직 허리관절을 가진 로봇모델을 제안하고 불연속 걸음새를 적용하였다.

먼저 경사면에서 안정성을 효과적으로 측정하기 위해 에너지 안정여유도(energy stability margin)에 대하여 언급하고 수직 허리관절과 같은 새로운 파라미터를 추가한 보행로봇의 몸체를 새로이 모델링하였다. 그리고 제안된 몸체를 기반으로 안정된 경사면 보행을 위한 불연속 걸음새를 제안한다. 마지막으로 모의실험을 통해 제안된 걸음새의 우수성을 정량적으로 보이고 수직 허리관절을 가진 4족 보행로봇 ELIRO-II을 이용하여 경사면 걸음새를 구현하였다.

II. 에너지 안정여유도

보행 시 정적 안정성을 판별하는 척도로서 안정여유도 (SM: Stability Margin), 안정여유도 변화율 (GSM: Gradient Stability Margin), 에너지 안정여유도 (ESM: Energy Stability Margin)가 있다[8]. 안정여유도는 주로 평지보행에 적합하고 안정여유도 변화율은 수직방향의 외력만을 고려하고 불안전 보행의 주요 요소인 수평방향의 외력은 고려하지 않기 때문에 실제 경

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 2. 27., 수정: 2009. 4. 3., 채택확정: 2009. 5. 13.

박세훈: 재광공학연구소(shpark@korec.re.kr)

이연정: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(yjlee@ec.knu.ac.kr)

※ 본 논문은 보건복지가족부 보건의료연구개발사업(과제번호: A085035)으로 지원되었음.

사면 보행에서 안정성을 판별하기에는 적합하지 않다. 그래서 본 논문에서는 지지다리 둘레로 몸체 무게중심을 회전시켰을 때 최대점에서의 위치에너지와의 차를 나타내는 에너지 안정여유도를 경사면 보행 안정성의 척도로 나타낸다.

그림 2에서 보는 바와 같이 4족 보행로봇이 보행 시 3점 지지상태에서 뒤쪽 지지다리가 1번과 2번 지지다리로 간주할 경우, 두 지지다리를 축으로 넘어갈 경우 몸체무게중심은 최대 위치에너지점 $[x_a, y_a, z_a]$ 을 넘어서게 된다. 따라서, 이점과 현재 몸체무게중심과의 위치 에너지차인 에너지 안정여유도는 다음 식

$$ESM = mg(z_a - z_c) = mgR(1 - \cos\theta)\cos\psi \quad (1)$$

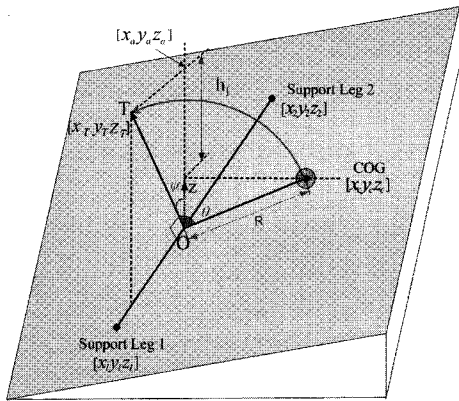


그림 2. 에너지 안정여유도.
Fig. 2. Energy stability margin.

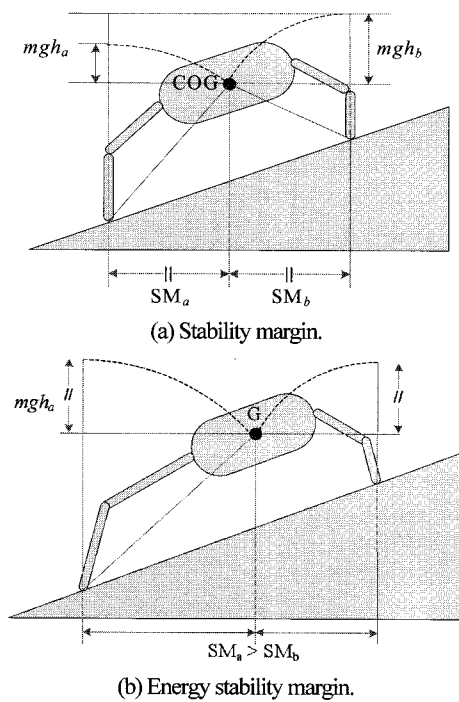


그림 3. 경사면에서의 안정성 판별기준에 따른 안정된 보행 자세.
Fig. 3. Stable walking posture according to the criteria of the stability measurement.

으로 나타낸다. 이때 m 은 몸체무게이고 g 는 중력가속도를 나타낸다.

에너지 안정여유도를 이용한 경사면의 안정성 판별은 평지에서 사용하는 안정여유도와 비교할 때 최적의 보행자세는 매우 다른 형태를 나타낸다. 안정여유도값으로 안정성을 평가할 때 그림 3(a)에서와 같이 지지 다리형의 중심에 몸체 무게중심이 위치하여 $SM_a = SM_b$ 일 때 가장 안정된 보행자세를 나타내고, 그림 3(b)는 평지 보행자세와 달리 몸체무게중심을 경사면 위쪽으로 이동하여 안정여유도 측면에서는 $SM_a > SM_b$ 형태로 덜 안정적이지만 에너지 안정여유도 측면에서는 $ESM_a = ESM_b$ 로 보다 안정된 보행자세를 나타낸다.

III. 수직 허리관절을 가진 보행로봇의 경사면 보행

경사면 보행을 위한 기존 로봇의 보행자세는 크게 2가지 타입[9,10]으로 나눌 수 있다. 첫번째 타입은 그림 4(a)에서와 같이 몸체를 경사면과 나란하게 하여 보행하는 걸음새로써 경사각에 관계없이 일정한 보폭 S_1 에 대한 4다리의 기구학적 도달영역이 보장되지만 안정성(mgh_1)은 떨어진다. 반면 그림 4(b)에서와 같이 몸체를 경사면이 아닌 수평면과 나란한 자세로 보행할 경우, 경사각에 상관없이 안정성이 $mgh_1 < mgh_2$ 처럼 증가하나 앞다리의 기구학적 구속조건에 의해 보폭 S_2 가 경사각이 증가함에 따라 점점 줄어든다. 이처럼 단일 강체인 몸체를 가진 기존의 로봇모델을 기반으로 하는 경사면 걸음새는 경사각 증가에 따라 보폭이 감소하여 보행속도가

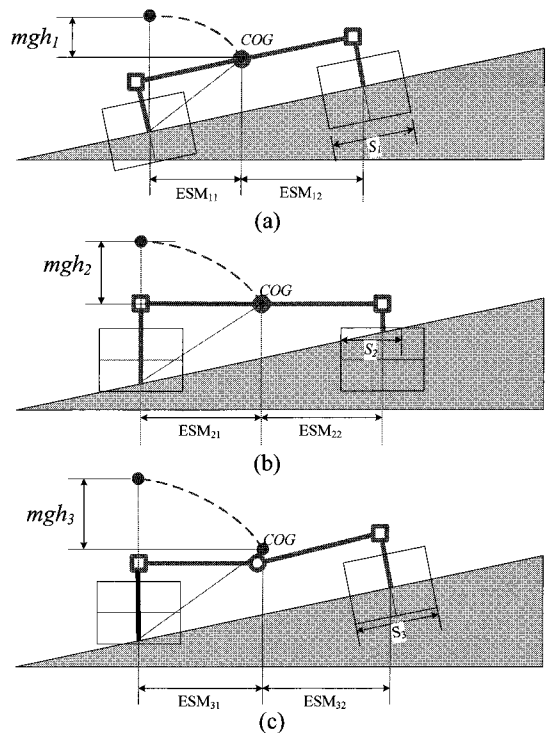


그림 4. 경사면에서 보행자세에 따른 안정성 및 보폭. (a) 경사면과 몸체가 평행하게 보행, (b) 수평면과 몸체가 평행하게 보행, (c) 수직허리관절을 이용한 보행.
Fig. 4. Comparison of the ESM and the stride in slope. (a) the body parallel with the slope, (b) the body parallel with the flat terrain, (c) the body is divided by the vertical waist-joint.

감소하거나 보행 시 안정성이 떨어지는 문제를 가지고 있다.

하지만 몸체에 수직허리관절이 있는 경우, 상체와 하체의 각도를 적절히 조절하여 기존의 단일 강체인 물체를 가지는 로봇의 걸음새 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 그림 4(c)에서와 같이 경사각 증가에 따른 앞다리의 기구학적 구속조건을 해결하기 위해 상체는 경사면과 나란하게 유지하고, 하체는 수평면과 나란하게 유지함으로써 몸체무게중심을 경사면 위쪽으로 이동시켜 안정성을 향상시켰다. 그래서 안정도 및 보폭은

$$ESM_{1l} < ESM_{2l} \approx ESM_{3l}, S_2 < S_1 = S_3 \quad (2)$$

과 같다.

IV. 로봇모델링 및 가정

보행로봇의 걸음새 해석을 위해서는 다리착지 위치, 다리 이동순서, 몸체 궤적, 로봇의 기구학적 제한 등과 같이 많은 파라미터를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 보다 명확하게 문제를 서술하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1: 각 다리의 도달영역(Reachable area)은 같다.

가정 2: 몸체 무게중심 및 각 다리의 초기위치, 최종위치는 주어진다.

가정 3: 비특이(non-singular) 기는 걸음새(crawl gait)[9]만을 고려한다.

가정 4: 안정성 판단 시 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려한다.

가정 5: 상체와 하체는 균일한 매질로 구성되어 있다.

가정 6: 수직허리관절은 지면에 수평인 y축을 따라 회전 가능하다.

가정 1~5는 많은 기존의 주기 걸음새 연구[7]에서 동일하게 가정된 것으로 실제 보행실험에서도 허용 가능한 가정이며 타당성이 검증되었으며, 가정 6은 안정된 경사면 보행을 구현하기 위해 기구학적으로 상체 및 하체가 지면에 수평인 y축 허리관절을 따라 회전하기 위해 가정한 것이다.

보행로봇의 안정여유도 및 기구학적 모델링을 나타내기 위해서는 좌표계를 설정할 필요가 있다. 본 논문에서는 평면상의 임의의 점을 원점으로 하는 세계 좌표계{W}를 기준으로 한다. 왜냐하면 몸체무게중심을 기준으로 하는 몸체 좌표계는 몸체이동에 따라 다리위치가 시시각각으로 변하기 때문에 걸음새에 따른 보행자세를 관측하기는 쉽지 않다. 특히 수직허리관절을 가진 로봇의 경우, 상체와 하체가 따로 움직이며 몸체무게중심 또한 상체와 하체의 조합에 의해 움직이기 때문에 보행자세를 분석하기에는 많은 문제점이 있다.

수직허리관절을 갖는 4각 보행로봇의 걸음새 분석을 위해 본 논문에서는 다음의 파라미터를 추가하고 그림 5에 나타내었다.

Φ_f : Upper waist-joint angle with CCW from Y axis.

Φ_r : Rear waist-joint angle with CCW from Y axis.

JP: Position of the waist-joint.

G_f^k, G_r^k : COG of the rear and upper part of body, respectively.

B_{fy}, B_{ry} : Half-width of the rear and upper body, respectively.

B_{fx}, B_{rx} : Length of the upper and rear body, respectively.

LP_i, HP_i : Leg-*i* and hip-*i* position at *k*'th event, respectively.

CCW는 시계반대방향을 의미하고 Φ_f, Φ_r, JP 는 수직허리관절 파라미터인 관절 회전각과 위치를 나타내고 그 외는 몸체 및 다리의 기구학적 분석에 필요한 값들이다. 기존의 수평허리관절을 가지는 로봇의 걸음새분석에서 몸체무게중심이 힙과 허리관절로 나타낼 수 있음을 보였다[10]. 본 논문에서 역시 몸체무게중심을 수직허리관절 파라미터로 나타내고, 이를 기반으로 걸음새를 체계적으로 분석한다.

먼저 네 다리 힙의 좌표를 허리관절 파라미터로 나타내면 다음 식

$$\begin{bmatrix} HP_{xi}^k \\ HP_{yi}^k \\ HP_{zi}^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\Phi_f^k) & 0 & -S(\Phi_f^k) & JP_x^k \\ 0 & 1 & 0 & JP_y^k \\ S(\Phi_f^k) & 0 & C(\Phi_f^k) & JP_z^k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{rx} \\ (-1)^{i+1} \cdot B_{ry} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2 \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} HP_{xj}^k \\ HP_{yj}^k \\ HP_{zj}^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\Phi_r^k) & 0 & S(\Phi_r^k) & JP_x^k \\ 0 & 1 & 0 & JP_y^k \\ -S(\Phi_r^k) & 0 & C(\Phi_r^k) & JP_z^k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{rx} \\ (-1)^{j+1} \cdot B_{ry} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad j = 3, 4 \quad (3b)$$

과 같다. 이때 C, S는 각각 Sin 과 Cos을 의미한다.

위 식에서 *i, j*는 다리번호를 나타내고 *k*는 걸음새 분석 시 이벤트 발생번호를 나타낸다. $a_f, b_f, c_f, a_r, b_r, c_r$ 가 몸체를 구성하는 매질의 분포에 따른 상수값이라 가정할 때 *k*번째 이벤트에서 상체 무게중심과 하체무게중심 G_f^k, G_r^k 는

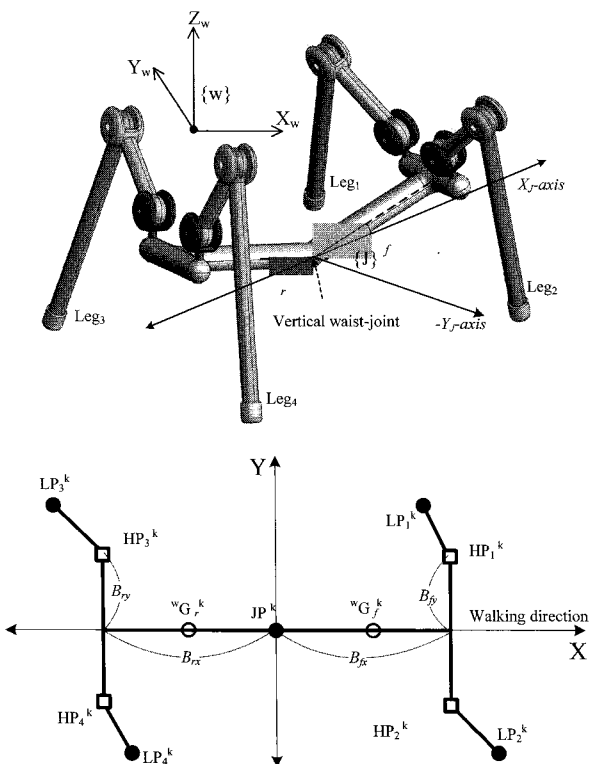


그림 5. 수직허리관절 로봇 모델링을 위한 파라미터.
Fig. 5. Parameters for vertical waist-jointed walking robot model.

$$\begin{aligned} G_f^k &= a_f \cdot HP_1^k + b_f \cdot HP_2^k + c_f \cdot JP^k \\ G_r^k &= a_r \cdot HP_3^k + b_r \cdot HP_4^k + c_r \cdot JP^k \end{aligned} \quad (4)$$

이므로 식 (3a), (3b)를 식 (4)에 적용하면 다음식

$$\begin{aligned} G_f^k &= \begin{bmatrix} G_{fx}^k \\ G_{fy}^k \\ G_{fz}^k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -a_f \cdot B_{fx} - b_f \cdot B_{fx} & 0 & 0 \\ 0 & a_f \cdot B_{fy} - b_f \cdot B_{fy} & 0 \\ 0 & 0 & a_f \cdot B_{fz} + b_f \cdot B_{fz} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} C(\Phi_f^k) \\ 1 \\ S(\Phi_f^k) \end{bmatrix} + (a_f + b_f + c_f) \begin{bmatrix} JP_x^k \\ JP_y^k \\ JP_z^k \end{bmatrix} \\ \\ G_r^k &= \begin{bmatrix} G_{rx}^k \\ G_{ry}^k \\ G_{rz}^k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -a_r \cdot B_{rx} - b_r \cdot B_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & a_r \cdot B_{ry} - b_r \cdot B_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & a_r \cdot B_{rz} + b_r \cdot B_{rz} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} C(\Phi_r^k) \\ 1 \\ S(\Phi_r^k) \end{bmatrix} + (a_r + b_r + c_r) \begin{bmatrix} JP_x^k \\ JP_y^k \\ JP_z^k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

과 같이 수직허리관절 파라미터로 나타낼 수 있다.

여기서, $a_f, b_f, c_f, a_r, b_r, c_r$ 은 균일한 매질로 분포되는 경우, 모두 같은 값을 가진다. 상체와 하체의 무게비가 1:1 인 경우, 힙 및 허리관절로 이루어진 삼각형 형태의 몸체에 대하여 몸체 무게중심을 나타내는 식 (5)의 상수값은 1/3으로 가정함으로써 몸체무게중심은

$$\begin{aligned} G^k &= \frac{1}{2}(G_f^k + G_r^k) = \begin{bmatrix} G_{fx}^k \\ G_{fy}^k \\ G_{fz}^k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C(\Phi_f^k) & 0 & C(\Phi_r^k) \\ 0 & 0 & 0 \\ S(\Phi_f^k) & 0 & S(\Phi_r^k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{rx}/3 \\ 1 \\ B_{rx}/3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} JP_x^k \\ JP_y^k \\ JP_z^k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

위 식으로부터 k 번째 이벤트에서 몸체 무게중심의 x 좌표 (G_x^k), y 좌표(G_y^k), z 좌표(G_z^k) 각각은 수직 허리관절 파라미터 인 $\Phi_f^k, \Phi_r^k, JP_x^k, JP_y^k, JP_z^k$ 로 표현된다. 따라서 3개의 주어진 방정식에 5개의 변수가 존재하므로 무수히 많은 해가 존재함을 알 수 있다. 본 논문에서는 기존 단일 강체를 가지는 보행로봇의 경사면 보행 시 발생하는 문제점을 해결하기 위해 상체는 경사면과 평행하게 Φ_f^k 를 경사각과 같은 값을 가지도록 하고, 하체는 수평면과 평행하게 $\Phi_r^k = 0$ 로 유지하는 보행자세를 제한한다.

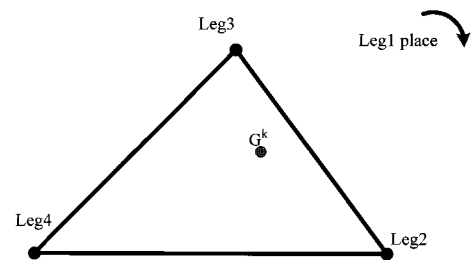
V. 수직허리관절을 가진 보행로봇의 경사면 걸음새 제어

경사면 걸음새는 평지 보행에서와 진행방향에 따라 같이 직진 걸음새와 회전 걸음새로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 수직허리관절을 가진 4각 보행로봇의 모델을 기반으로 직진 걸음새에 적용하여 기존의 단일 강체를 가지는 4각 보행로봇의 걸음새보다 높은 안정성을 가짐을 보인다.

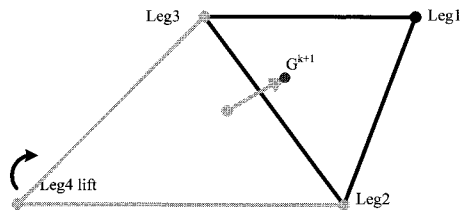
경사면에서의 직진 걸음새는 경사면을 따라 이동하는 걸음새로 평지에서 불연속 직진 걸음새와 마찬가지로 보행 안정성을 높이기 위해 몸체를 좌우로 움직이면서 보행한다. 평지 보행과는 달리 안정성의 기준을 에너지 안정여유도로 측정하기 때문에 에너지 안정여유도를 높이기 위해 4장에서 언급한 바와 같이 수직허리관절을 사용하여 상체는 경사면과 평행하게 Φ_f^k 를 경사각과 같은 값을 가지도록 하고, 하체는 수평면과 평행하게 $\Phi_r^k = 0$ 로 유지하는 보행자세로 몸체를 좌우로 움직이는 불연속 지그재그 걸음새를 구현한다. 왜냐하면 정적 보행 걸음새의 경우 불연속 지그재그 걸음새의 안정성이 가장 뛰어나기 때문이다[10,12].

먼저 다리이동순서는 직진 보행시 안정성이 뛰어난 물결 걸음새 다리 이동순서(3-1-4-2, 4-2-3-1)로 이동하고 몸체 무게중심은 이동다리의 이륙 이벤트 발생 직후 및 착지 이벤트 발생 직전 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도점을 이룬 선분을 따라 이동한다. 그림 6에서 보는 바와 같이 k 번째 착지 직전 이벤트에서 진행방향으로 단조증가성을 만족하는 최대 안정여유도점이 G^k 이고, $k+1$ 번째 4번째 다리 이륙 직후 최대 안정여유도점이 G^{k+1} 일 때, 몸체 무게중심은 1번 다리 착지 직후 4점 지지상태에서 선분 $\overline{G^k G^{k+1}}$ 를 따라 이동한다. 이때 최소 안정여유도점은 선분상의 연속된 모든 점들의 안정여유도 값을 계산하지 않고 G^k, G^{k+1} 중 작은 값이 최소 안정여유도값이 된다[11].

따라서 한 주기 보행 동안 최소 안정여유도값을 가지는 걸



(a) Maximum stability margin just before k 'th placing event.



(b) Maximum stability margin just after $k+1$ 'th lifting event.

그림 6. 이륙 및 착지 이벤트 발생에 따른 몸체 무게중심 이동경로.

Fig. 6. Movable COG path according to the gait events.

음새 안정여유도(GSM: Gait Stability Margin)는 다음 식

$$GSM = \min(ESM(G^k)) \quad k=1, 2, 3, \dots, 8 \quad (7)$$

과 같이 4다리의 이륙 및 착지 이벤트가 발생하는 시점 중 가장 작은 안정여유도값을 걸음새 안정여유도로 쉽게 구할 수 있다[7]. 이때 COG는 진행방향으로 단조 증가성을 보장함으로써 자연 생태계의 동물과 보다 유사한 보행자세를 취할 수 있으므로 매 이벤트 별 최대 안정여유도점은 다음 식

$$G_x^k < G_x^{k+1} \quad (8)$$

을 만족해야 한다.

단조 증가성을 만족하는 각 이벤트 별 최대 안정여유도점 G^k 는 그림 7과 같이 먼저 3점 지지상태에서 COG 이동가능 영역의 모든 점들의 안정여유도를 탐색하여 같은 x 값을 가지는 점들 중 가장 큰 에너지 안정여유도값을 가지는 점들을 연결하여 안정여유도 그래프를 생성한다.

각 이벤트별 생성된 최대 안정여유도 그래프를 이용하여 단조 증가성을 보장하는 최대 안정여유도점을 구할 수 있다[12].

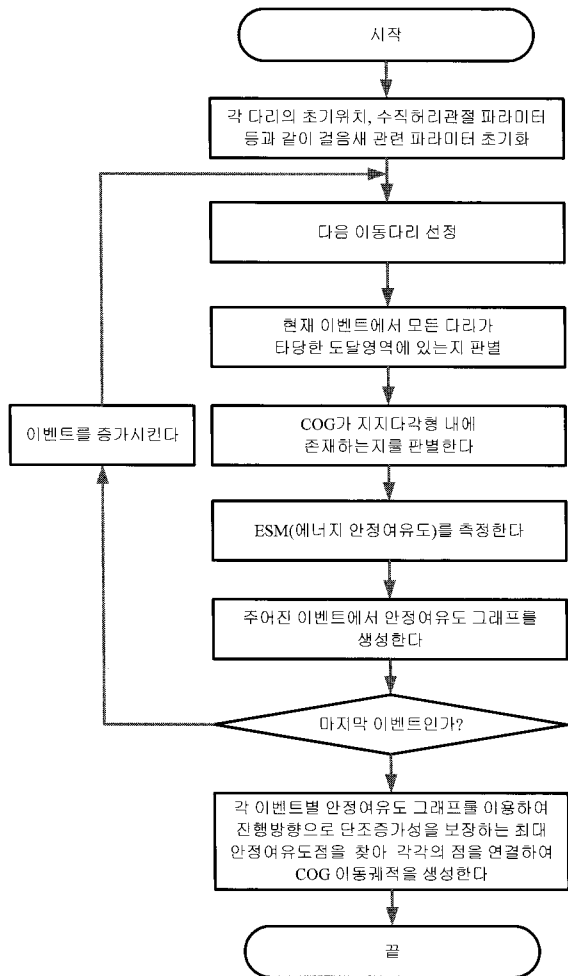


그림 7. 진행방향으로 단조증가성을 보장하는 각 이벤트별 최대 안정여유도점 탐색.

Fig. 7. Flow of the searching algorithm to get the maximum stability margin which guarantees the monotonicity of the walking direction.

VI. 모의실험 및 구현

지금까지 수직허리관절을 가진 로봇의 몸체를 모델링하고 경사면에서 안정된 보행을 위한 보행자세 및 각 이벤트별 COG 이동위치 및 경로를 서술하였다. 본 절에서는 제안된 모델 및 걸음새 알고리즘을 기반으로 모의실험을 통하여 경사면 보행자세에 따른 제안된 수직허리관절 보행로봇의 우수성을 증명하고자 한다.

먼저 걸음새 비교분석을 위한 로봇 모델은 그림 8과 같고 허용 가능한 수직 허리관절각은 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 이고, 그림 4(a)와 같이 몸체가 경사면과 평행한 자세로 보행하는 경우, 그림 4(b)와 같이 몸체가 평탄한 지면과 평행한 자세로 보행하는 경우, 4(c)와 같이 수직 허리관절을 사용하는 경우로 나누어 경사각 및 보폭을 증가시키면서 걸음새 안정여유도를 그림 9와 같이 나타내었다.

먼저 몸체를 경사면과 나란하게 보행할 경우, 그림 9(a)에서와 같이 경사각이 증가함에 따라 안정도는 다른 걸음새에 비해 급감하여 각 다리의 보폭이 기구학적으로 허용 가능하더라도 보행이 불가능해진다. 다음으로 몸체를 수평면과 평행하게 보행할 경우 그림 9(b)에서와 같이, 10° 이하와 같은 경사각이 적은 경사면 보행에서는 보행에 필요한 각 다리의 기구학적 구속조건이 보행에 영향을 덜 미치기 때문에 다른 보행자세에 비해 큰 안정도와 보폭으로 보행이 가능하나, 경사각이 큰 경사면에서는 허용 가능한 보폭 및 안정도가 매우 감소한다.

마지막으로 수직허리관절을 가지고 상체는 경사면과 나란하게 하여 앞 다리의 기구학적 구속조건에 의한 보폭의 감소를 막고, 하체는 수평면과 나란하게 하여 안정성 향상을 고려한 보행자세의 경우 그림 9(c)에서와 같이 경사각이 증가하더라도 보폭 및 안정성이 우수함을 알 수 있다.

예를 들어, 경사각 20° 에서 보행시, 그림 9(a)인 경우, 보폭 40mm로 보행시 최대 안정도값 1을 가지고, 허용가능한 최대보폭은 60mm 이다, 반면 9(b)인 경우 기구학적 구속조건으로 보행이 불가능하며, 9(c)의 경우 보폭 40mm 보행시 최대 안정도 값 2.6을 가지고, 허용가능한 최대보폭은 75mm 이다.

이처럼 적절한 보폭과 안정성을 고려한 경사면 걸음새로

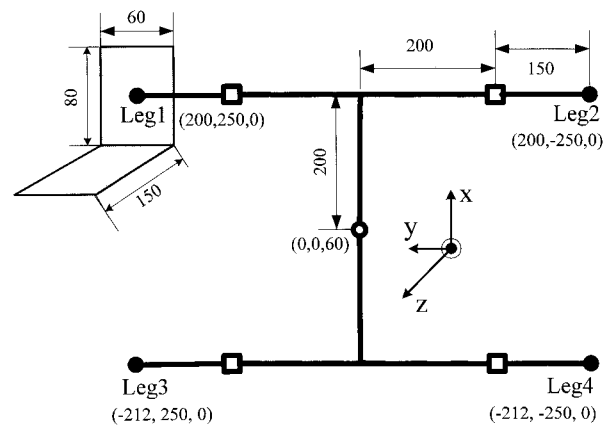
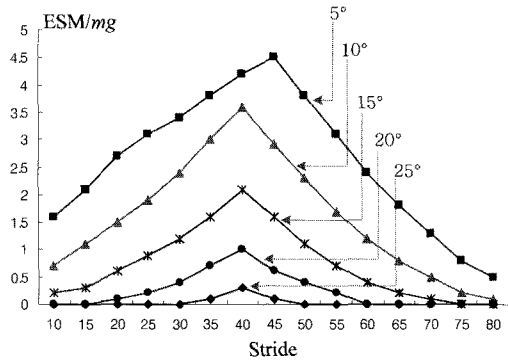
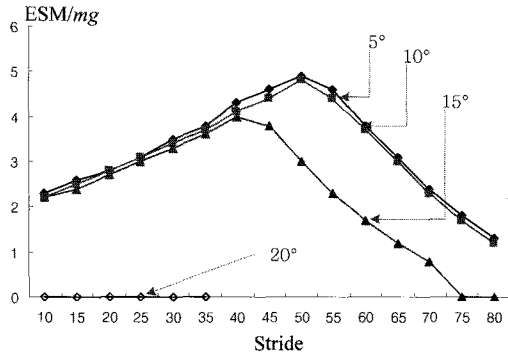


그림 8. 경사면 걸음새 비교분석을 위한 로봇 모델링.

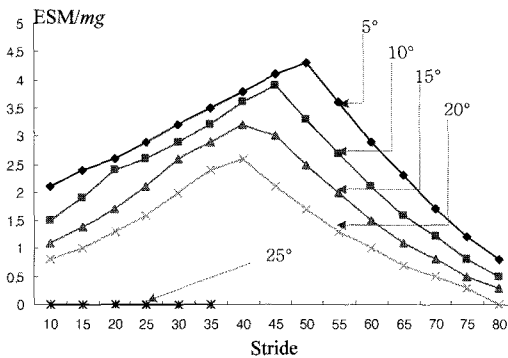
Fig. 8. Robot modeling for gait comparison in slope.



(a) The body parallel with the slope.



(b) The body parallel with the flat terrain.



(c) The body is divided by the vertical waist-joint.

그림 9. 서로 다른 보행자세에서 보폭의 증가에 따른 에너지 안정여유도.

Fig. 9. Comparison of the ESM and stride according to the walking posture in slope.

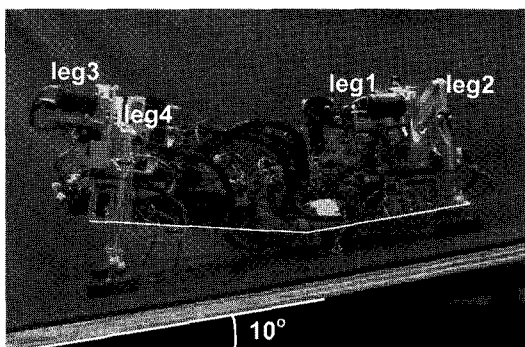


그림 10. 수직허리관절을 가진 4족 보행로봇 ELIRO-II.

Fig. 10. ELIRO-II of quadruped walking robot with vertical waist-joint.

서는 수직허리관절을 가진 보행로봇의 보행자세가 기존의 단일 강체인 몸체를 가진 로봇의 보행자세보다 다양한 보폭과 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

시뮬레이션을 통해 검증된 수직허리관절의 우수한 보행특성을 그림 10과 같이 ELIRO-II(Eating Lizard Robot - II)를 이용하여 구현하였다.

그림 11은 경사면 보행을 위한 초기자세로서 경사각 ϕ 는 10° 이고, 걸음새 분석을 위한 몸체모델 파라미터인 몸체길이는 상체 및 하체 각각 $119\text{mm}(B_u)$, $211\text{mm}(B_r)$, 몸체폭은 $139\text{mm}(B_f, B_r)$, 각 다리의 도달영역은 $x=80\text{mm}$, $y=60\text{mm}$, $z=120\text{mm}$ 로 동일하고 보행시 몸체 높이는 50mm 이다. 상체 및 하체의 몸체 무게중심(COG)은

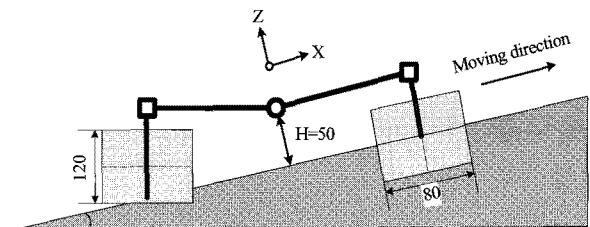
$$G_f = \frac{142A + 57JP}{199} = 0.3569HP_1 + 0.3569HP_2 + 0.2864JP$$

$$G_r = \frac{179A + 32JP}{211} = 0.4241HP_1 + 0.4241HP_2 + 0.1608JP$$

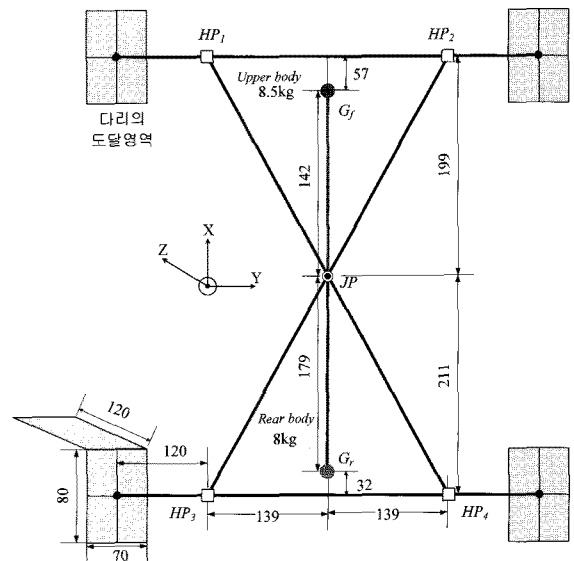
이고 상체와 하체의 무게비는 8.5:8이므로

$$G^k = \frac{8 \times G_f^k + 8.5 \times G_r^k}{8.5 + 8}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이때 A는 HP_1, HP_2 를 1:1로 내분하는 벡터이고, B는 HP_3, HP_4 를 1:1로 내분하는 벡터이다. 그리



(a) Side view.



(b) Top view.

그림 11. 경사면 보행을 위한 수직허리관절 로봇의 초기자세.

Fig. 11. Initial posture of a vertical waist-jointed walking robot to walk in slope.

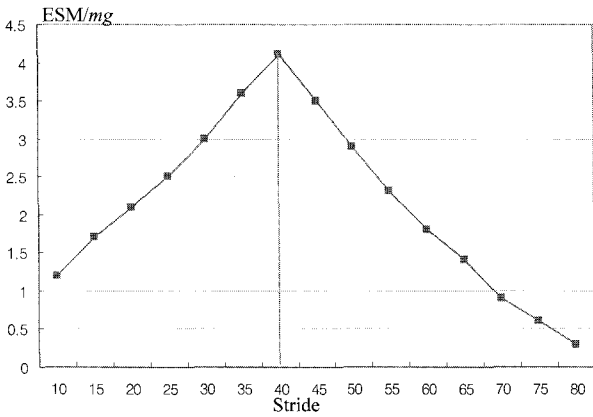


그림 12. 경사각 10° 에서 보폭의 증가에 따른 ELIRO-II의 안정도.

Fig. 12. Stability of the ELIRO-II walking in slope angle 10° according to the stride increasing.

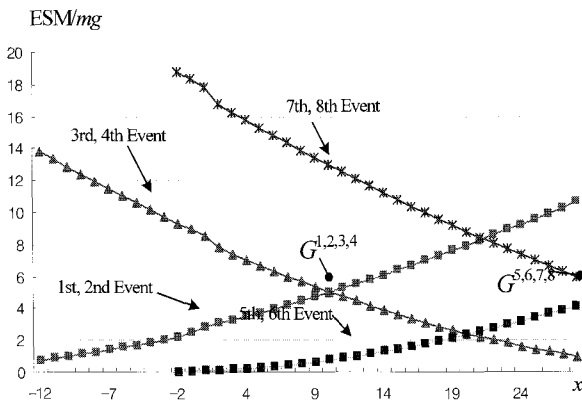


그림 13. 각 이벤트별 최대 안정여유도 그래프.

Fig. 13. Maximum stability marginal graph for walking period.

표 1. 각 이벤트별 몸체 무게중심 및 수직허리관절 파라미터.

Table 1. Parameters of the waist-joint and COG at each event.

Event No.	Φ_f	Φ_r	Waist-joint position	COG position
Initial position	0°	10°	(0, 0, 50)	(0, 0, 65)
1 st (after leg3 lift)	0°	10°	(22, -30, 50)	(9.6, -30, 65)
2 nd (before leg3 place)	0°	10°	(22, -30, 50)	(9.6, -30, 65)
3 rd (after leg1 lift)	0°	10°	(22, -30, 50)	(9.6, -30, 65)
4 th (before leg1 place)	0°	10°	(22, -30, 50)	(9.6, -30, 65)
5 th (after leg4 lift)	0°	10°	(40, 30, 50)	(28,30,65)
6 th (before leg4 place)	0°	10°	(40, 30, 50)	(28,30,65)
7 th (after leg2 lift)	0°	10°	(40, 30, 50)	(28,30,65)
8 th (before leg2 place)	0°	10°	(40, 30, 50)	(28,30,65)
Final position	0°	10°	(40, 0, 50)	(40, 0, 65)

고 보행자세는 앞 절에서 언급한 바와 같이 상체 수직 허리관절각은 0° 이고, 하체 수직 허리관절은 10° 를 유지하고 있다.

그림 12는 경사각 10° 에서 보행 시 보폭의 증가에 따른 ELIRO-II의 걸음세 안정도를 나타내었다. 보폭 40mm에서 가장 큰 걸음세 안정도를 나타낸다. 이를 각 이벤트별로 구체적으로 살펴보면 그림 13과 같이 먼저 걸음세 안정여유도를 최대화하기 위한 각 이벤트별 최대 안정여유도점을 찾기 위해 최대 안정여유도 그래프를 나타내었다. 이때 몸체무게중심은 보행방향으로 단조증가성을 보장해야 하기 때문에 각 이벤트별 최대 안정여유도점은 $G^{1,2,3,4}$, $G^{5,6,7,8}$ 이 된다.

따라서 걸음세 안정여유도는 5, 6번째 이벤트에서 나타나고 그 값은 4.14이다. 표 1은 각 이벤트별 몸체 무게중심 이동위치 및 허리관절 위치를 구체적으로 나타내며 한 주기 보

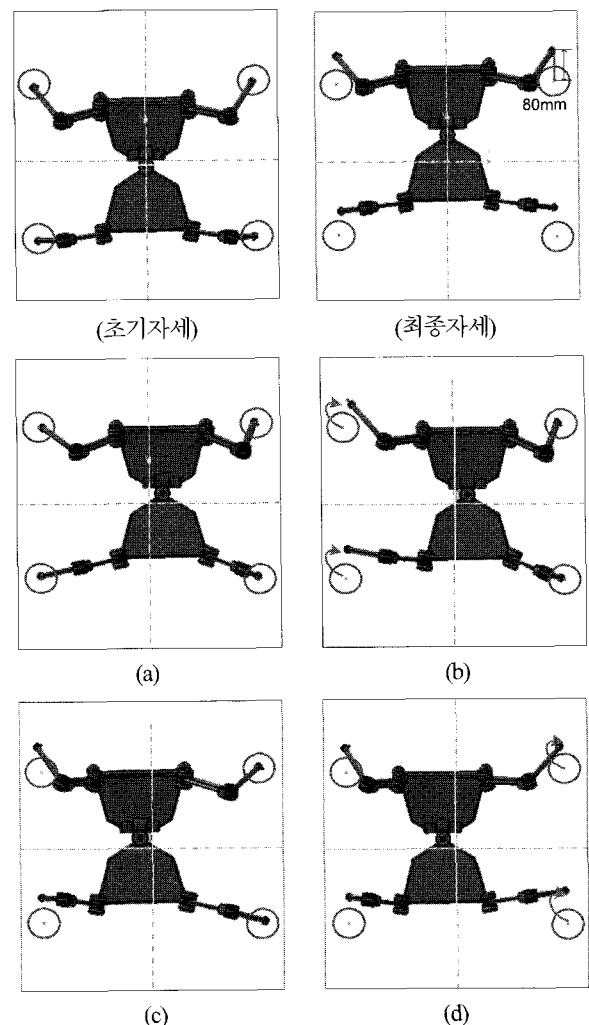


그림 14. 경사면에서 수직허리관절을 가진 4각 보행로봇의 불연속 걸음세. (a) 4점지지 몸체이동 (b) 3, 1번 다리 이동 (c) 4점지지 몸체이동 (d) 4, 2번 다리이동.

Fig. 14. Discontinuous gait of a quadruped walking robot with a vertical waist-joint in slope. (a) COG shift with 4-legged support state for next stable phase, (b) leg 3, leg 1 swing phase, (c) COG shift with 4-legged support state for next stable phase, (d) leg 4, leg 2 swing phase.

행 시 수직으로 내려다 봤을 경우 그림 14와 같다. 불연속 직진걸음새와 마찬가지로 물결걸음새 다리이동순서(3-1-4-2)로 보행 시 4점 지지상태에서 몸체무게중심을 다음위치까지 이동한 후 순서대로 다리의 이륙 및 착지 이벤트가 발생한다. 그림 14(a)와 같이 1번째 이벤트인 3번 다리 이륙이 발생하기 전 4점 지지상태에서 몸체무게중심을 (9.6, -30, 65)로 이동한다. 그리고 그림 14(b)와 같이 3번 다리 착지 및 1번 다리 착지 이벤트 발생 후 다시 4점 지지상태에서 그림 14(c)와 같이 (28, 30, 65)로 몸체무게중심을 이동시켜 안정성을 최대로 유지한다.

VII. 결론

지금까지 경사면 보행 시 걸음새 안정여유도를 향상시키기 위한 새로운 로봇모델을 제안하고 제안된 로봇모델의 걸음새가 기존의 단일 강체를 가지는 로봇모델보다 보폭 및 안정성 면에서 우수함을 모의실험 및 구현을 통해 증명하였다. 하지만, 최대 안정여유도를 보장하는 최대 안정여유도점 탐색이 off-line 으로 결정되기 때문에 보행 시 발생하는 장애물이나, 기타 외란의 경우는 고려되지 않았기 때문에 향후 동작보행에 따른 연구가 지속되어야 할 필요가 있다.

참고문헌

[1] B. Y. Min, *Crab Gait Analysis and the Application of the Adaptive Gait Control of a Quadruped Walking Robot*, Ph.D. Thesis, KAIST.

[2] D. A. Messuri and C. A. Kelin, "Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion," *IEEE Int. J. of Robotics & Automation*, vol. RA4, no. 3, pp. 132-140, 1985.

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

[4] P. G. Santos and M. A. Jimenez, "Generation of discontinuous gaits for quadruped walking vehicles," *Int. J. of Robotic systems*, vol. 12, no. 9, pp. 599-611, 1995.

[5] H. Tsukagoshi, S. Hirose, and K. Yoneda, "Maneuvering operation of the quadruped walking robot on the Slope," *Procs. IROS*, pp. 863-869, 1996.

[6] F. T. Cheng, H. L. Lee, and E. Orin, "Increasing the locomotive

stability margin of multilegged vehicles," *Procs. of ICRA*, pp. 1708-1714, 1999.

[7] S. H. Park, Y. H. Ha, and Y.-J. Lee, "Discontinuous zigzag gait planning of a Quadruped Walking Robot with articulated spine," *J. of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 10, no. 8, pp. 703-710, 2004.

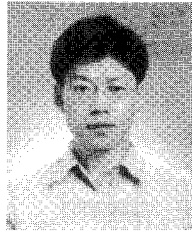
[8] S. Hirose, H. Tsukagoshi, and K. Yoneda, "Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain," *Pros. Of the IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 181-186, Seoul, Korea 2001.

[9] S. M. Song and K. J. Waldron, "An analytical approach for gait study and its applications on wave gait," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, 1987.

[10] S. H. Park and Y.-J. Lee, "Discontinuous zigzag gait planning of a quadruped walking robot with a waist-joint," *Advanced Robotics*, vol. 21, no. 1-2, pp. 143-164, 2007.

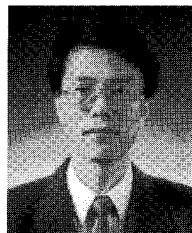
[11] 이연정, 비평탄 지형에서 사각 보행 로봇의 게걸음새 제어 및 경로 계획에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 1994.

[12] S. H. Park, S. H. Lee, and Y.-J. Lee, "Discontinuous zigzag gait planning of a Quadruped Walking Robot with articulated spine," *J. of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 142-150, 2002.



박 세 훈

1972년 8월 15일생. 1998년 경북대학교 전자공학과(공학사). 2000년 동 대학원 전자공학과(공학석사). 2006년 동 대학원 박사. 현재 재활공학연구소 책임연구원. 관심분야는 재활보조기기개발 및 지능제어, 로봇걸음새 제어.



이 연 정

1984년 한양대 전자공학과(학사). 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1994년 동 대학원(박사). 1995년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 보행로봇, 서비스로봇, 임베디드시스템, 지능제어.