

허리관절을 가지는 4족보행로봇의 지그재그 걸음새 계획

Discontinuous Zigzag Gait Planning of Quadruped Walking Robot with an Articulated Spine

박 세 훈, 이 연 정*, 하 영 호
(Se-Hoon Park, Yun-Jung Lee, and Yeong-Ho Ha)

Abstract : This paper presents discontinuous zigzag gait analysis for a newly modeled quadruped walking robot with an articulated spine which connects the front and rear parts of the body. An articulated spine walking robot can move easily from side to side, which is an important feature to guarantee a larger gait stability margin than that of a conventional single rigid-body walking robot. First, we suggest a kinematic modeling of an articulated spine robot which has new parameters such as a waist-joint angle, a rotate angle of a front and rear body and describe characteristics of gait using an articulated spine. Next, we compared the difference of walking motion of newly modeled robot with that of a single rigid-body robot and analyzed the gait of an articulated spine robot using new parameters. On the basis of above result, we proposed a best walking motion with maximum stability margin. To show the effectiveness of proposed gait planning by simulation, firstly the fastest walking motion is identified based on the maximum stride, because the longer the stride, the faster the walking speed. Next, the gait stability margin variation of an articulated spine robot is compared according to the allowable waist-joint angle.

Keywords : quadruped robot, discontinuous gait, articulated spine, gait stability margin, zigzag gait, waist-joint.

I. 서론

보행로봇은 험난지형에서 환경적인 제한을 극복 하고 인간을 대신하여 작업을 수행할 수 있는 능력이 있기 때문에 최근까지 이에 관한 많은 연구가 이루어 지고 있다[1-7]. 이들 중 2족로봇은 인간형으로서 ASIMO, SDR-4x 과 같이 인간과 친화적인 서비스용 또는 엔터테인먼트용으로 연구 개발되고 있으며, 4족 로봇은 동물형으로서 AIBO, BANDAI 와 같이 서비스 및 엔터테인먼트용으로는 물론이고 안정성과 작업성이 뛰어나 탐사용, 작업용 등으로도 연구 개발되고 있다[9].

4족 보행로봇의 안정성은 주로 걸음새에 의해 결정된다. 걸음새는 몸체의 이동에 따른 연속적인 다리의 움직임으로서, 지금까지 보다 안정된 보행을 위한 다양한 걸음새가 연구되고 있다. 최근에는 주기 걸음새로서 안정성을 높일 수 있는 불연속 걸음새에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Phase gait(Santos)[8], Intermittent Crawl Gait(Tsukagoshi)[9], E-sway gait(Cheng)[10], 지그재그 걸음새[11]는 불연속 걸음새의 대표적인 예이다.

그러나 이러한 걸음새 역시 간과할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 예를 들어, 다리의 도달영역이 작을수록 보행 시 안정도는 떨어지고 보행속도도 줄어든다. 하지만 그림 1과 같이 자연 생태계에 존재하는 악어나 도마뱀은 몸체에 비해 다리가 짧지만, 보행 시 허리관절(등관절)를 이용해서 몸체를 좌우로 흔들면서 보다 빠르고 안정적으로 이동하는 효율적인 걸음새를 가지고 있음을 알 수 있다.

따라서 보행로봇이 허리관절을 가질 경우, 강체인 몸체를



그림 1. 허리관절을 이용한 동물의 보행.

Fig. 1. Animal's walking motion with an articulated spine.

가지는 기존의 로봇에 비해 힙 이동위치가 몸체 무게중심(Center of Gravity: COG) 위치에 대하여 상대적으로 자유롭기 때문에 다양한 보행자세를 가지고 걸음새 안정도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 보폭도 증가함으로써 보행속도를 향상시킬 수 있다. 그래서 GEO[13], SQ43[14] 등은 이미 허리관절은 가진 보행로봇을 만들었지만 생체제어모델에 기반한 제한된 주기 걸음새를 제안하였을 뿐 걸음새에 관한 체계적인 분석이 미흡하였다.

본 논문에서는 허리관절을 가지는 4족 보행로봇의 걸음새에 관하여 체계적으로 분석하고 안정여유도 관점에서 최적인 지그재그 걸음새를 제안한다. 2장에서는 걸음새 분석에 필요한 몇 가지 가정을 하고 허리관절 위치 및 상체, 하체의 회전각과 같은 걸음새 파라미터를 추가하여 새로운 기구학적인 모델링을 제시한다. 그리고 3장에서는 허리관절을 이용한 보행 시 나타나는 여러가지 특징을 서술하고 제안된 모델링을 바탕으로 새로운 걸음새를 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 걸음새 분석의 타당성과 효용성을 증명하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 로봇 모델링 및 가정

보행로봇의 걸음새 해석을 위해서는 다리착지위치, 다리에

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 5. 10., 채택확정 : 2004. 7. 5.

박세훈, 이연정, 하영호: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

(mbb@palgong.knu.ac.kr/yjlee@ee.knu.ac.kr/yha@ee.knu.ac.kr)

※ 본 연구는 2002년도 경북대학교특성화사업팀(KNURT) 연구비에 의하여 연구되었음.

동순서, 몸체 궤적, 로봇의 기구학적 제한 등과 같이 많은 파라미터를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 보다 명확하게 문제를 서술하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 가정 1: 평탄한 지면에서 보행하며 몸체는 지면에 평행하다.
- 가정 2: 각 다리의 도달영역(Reachable area)은 같다.
- 가정 3: 몸체 무게중심 및 각 다리의 초기위치, 최종위치는 주어진다.
- 가정 4: 비특이(non-singular) 기는 걸음새(crawl gait)[2]만을 고려한다.
- 가정 5: 안정성 판단시 다리 무게는 무시하고 몸체 무게만을 고려한다.
- 가정 6: 상체와 하체는 균일한 매질로 구성되어 있다.
- 가정 7: 허리관절은 지면에 수직인 z 축을 따라 회전한다.

가정 1~6은 많은 기존의 주기 걸음새 연구[7]에서 동일한 가정된 것으로 실제 보행실험에서도 허용가능한 가정이며 타당성이 검증되었으며, 가정 7은 가정 1을 구현하기 위해 기구학적으로 지면에 수평으로만 회전가능한 허리관절을 가정한 것이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 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 세계 좌표계는 보행 시 각 다리의 초기 위치와 최종위치만을 고려함으로써 몸체이동에 따라 다리위치가 시시각각으로 변하는 몸체 좌표계에 비해 매우 효율적인 걸음새 분석이 가능하기 때문이다.

보행시 안정성을 판별하는 척도는 여러 가지가 존재한다. 에너지 안정여유도(Energy Stability Margin: ESM)[9], 세로 안정여유도(Longitudinal Stability Margin: LSM)[1-8, 10,12], 안정여유도(Stability Margin: SM)[11] 등이 대표적인 예라 볼 수 있다. 일반적으로 평지를 보행하는 로봇의 안정성 판별은 세로 안정여유도와 안정여유도를 사용된다. 이 중에서 허리관절을 가지고 몸체를 좌우로 움직이는 지그재그 걸음새로 보행할 경우, 세로 안정여유도는 타당한 안정성을 나타낼 수 없으므로 안정여유도를 사용하여 안정성을 판별한다. 보행로봇이 걸음새 연구분야에는 많은 용어들이 정의 되어 있으나 통상적으로 사용되는 용어에 대한 설명은 지면관계상 생략하기로 한다[1-8].

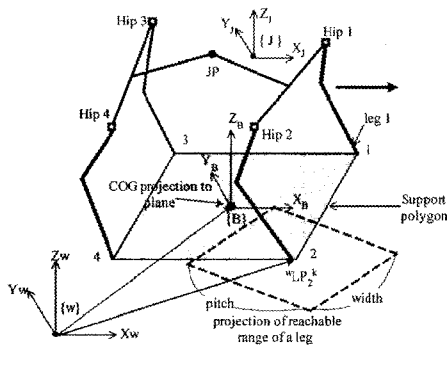


그림 2. 허리관절 로봇의 좌표계.
Fig. 2. Coordinate frame of an articulated spine robot.

로 한다[1-8]. 안정여유도는 보행시 몸체의 무게중심 위치와 몸체를 지지하고 있는 다리에 의해 형성되는 지지다각형(support polygon)에 따라 결정된다. 기존의 보행로봇은 몸체를 이동시키는 힘위치가 몸체 무게중심위치에 대하여 상대적으로 고정된 위치에 존재하므로 몸체 무게중심 이동궤적과 힘의 이동궤적이 동일한 벡터를 형성한다. 반면 허리관절을 가질 경우, 몸체 무게중심 이동궤적과 이를 이동시키는 4개의 힘의 이동궤적이 제각기 다른 벡터를 형성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 몸체 무게중심 이동시 각각의 힘 이동궤적을 효율적으로 표현하기 위해 3개의 파라미터(몸체 진행방향에 대하여 상체와 반시계 방향으로 이루는 각 θ_f , 하체와 이루는 각 θ_r , 허리 관절위치 JP)를 추가하여 그림 3과 같이 허리관절 로봇을 모델링하였다.

허리관절을 가지는 몸체는 상체와 하체로 나누고 상체 무게중심(Front COG: G_f)와 하체 무게중심(Rear COG: G_r)로 표현한다. 이때 k 번째 이벤트(event)[7]에서 진행방향을 기준으로 상체와 이루는 각을 θ_f^k , 하체와 이루는 각을 θ_r^k , 허리관절 위치가 JP^k 일 때, 보행자세를 나타내기 위한 4개의 힘 위치를 허리위치, 상체 및 하체 회전각을 이용하여 나타내면 다음 식과 같다.

여기서 C 는 cos, S 는 sin 을 나타내며 $B_{fx}, B_{fy}, B_{rx}, B_{ry}$ 는 허리관절 좌표계{J}에서 힘위치를 나타내는 상수이고 앞다리(1번다리, 2번다리)와 뒷다리(3번다리, 4번다리)의 힘을 세계좌표계로 나타내면 각각 다른 관계식 (1-1)과 (1-2)로 유도된다.

$$HP_i^k = \begin{bmatrix} HP_{xi}^k \\ HP_{yi}^k \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\theta_f^k) & -S(\theta_f^k) & 0 & JP_x^k \\ S(\theta_f^k) & C(\theta_f^k) & 0 & JP_y^k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{fx} \\ (-1)^{i+1} \cdot B_{fy} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$i = 1, 2.$

$$HP_j^k = \begin{bmatrix} HP_{xj}^k \\ HP_{yj}^k \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\theta_r^k) & -S(\theta_r^k) & 0 & JP_x^k \\ S(\theta_r^k) & C(\theta_r^k) & 0 & JP_y^k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{rx} \\ (-1)^{j+1} \cdot B_{ry} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

$j = 3, 4.$

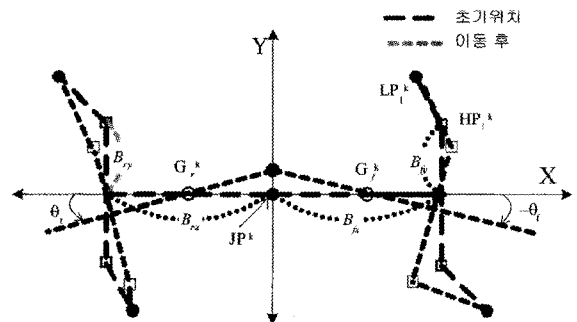


그림 3. 허리관절 보행로봇의 기구학적 모델링.
Fig. 3. Kinematic modeling of an articulated spine robot.

한편, 몸체 무게중심(G)은 상체 무게중심벡터(G_f)와 하체 무게중심벡터(G_r)의 내분점으로 (2-1)로 표현되며 상체 및 하체 무게중심은 각각의 힙과 허리 관절각의 벡터합으로 (2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G^k = \begin{bmatrix} G_x^k \\ G_y^k \end{bmatrix} = \frac{G_f^k + G_r^k}{2} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} G_f^k &= a_f \cdot HP_1^k + b_f \cdot HP_2^k + c_f \cdot JP^k, \\ G_r^k &= a_r \cdot HP_3^k + b_r \cdot HP_4^k + c_r \cdot JP^k \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기서, $a_f, b_f, c_f, a_r, b_r, c_r$ 은 상체 및 하체 무게중심 벡터를 나타내기위한 상수값으로 단일 강체인 상체, 하체 각각의 기하학적 모양에 따라 결정된다. (1-1), (1-2)에서 구한 힙의 위치벡터를 (2-2)에 대입하여 몸체 무게중심을 $\theta_f^k, \theta_r^k, JP^k$ 로 나타내면 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_x^k &= a_g \cdot C(\theta_f^k) - b_g \cdot C(\theta_r^k) + JP_x^k \\ G_y^k &= a_g \cdot S(\theta_f^k) - b_g \cdot S(\theta_r^k) + JP_y^k \end{aligned} \quad (3)$$

(3)에서 a_g, b_g 는 로봇의 상체 및 하체의 모양에 따라 변하는 값으로 본 논문에서는 일반성을 유지하기 위해 변수로 설정하였다. (3)에서 알 수 있듯이 같은 COG 위치에 대하여 서로 다른 많은 해($\theta_f^k, \theta_r^k, JP^k$)가 존재한다. 이러한 많은 해는 기존의 로봇에 비해 많은 보행자세를 제공함을 의미한다. 그래서 다음절에서는 허리관절 보행로봇의 특징을 살펴보고 몸체 무게중심을 효율적으로 이동하기 위한 해를 찾아 안정된 보행을 위한 걸음새 계획을 제안한다.

III. 허리관절을 가지는 보행로봇의 걸음새 계획

1. 허리관절 로봇의 특성

로봇이 허리관절을 가짐으로써 다양한 보행자세, 힙 도달영역의 가변성, 보행속도 및 보폭의 증가등 여러가지 특별한 장점을 가진다. 이에 대해 살펴보면 다음과 같다.

특징 1 : 힙의 도달영역은 허리관절각에 따라 변한다. 즉 같은 몸체 무게중심위치에서 허리관절각을 변화시킴으로써 힙 도달영역을 보다 자유로이 변화시켜 다양한 보행자세를 취할 수 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 몸체 무게중심은 원점에서 변하지 않고 허리관절각을 θ_f, θ_r 로 바꿔, 다리 4의 도달영역이 range a에서 range b로 변화시켜 다른 보행자세를 취할 수 있음을 알 수 있다.

특징 2 : 그림 4에서 알 수 있듯이 허리관절각을 조절함으로써 힙의 도달영역을 진행방향으로 'L' 만큼 증가시켜 보행속도를 증가시킬 수 있다.

특징 3 : 그림 5에서 알 수 있듯이 허리관절 로봇은 허리를 적당히 구부려 꼬불꼬불한 좁은 통로를 쉽게 빠져 나갈 수 있다.

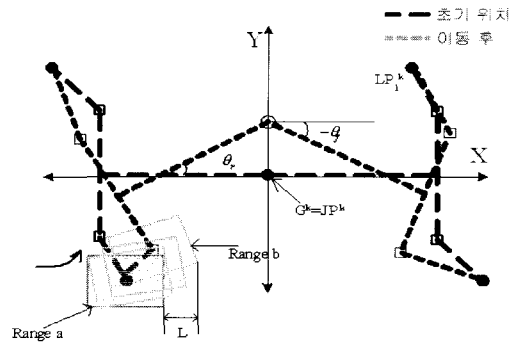


그림 4. 허리관절로봇의 특성.

Fig. 4. Characteristics of an articulated spine walking robot.

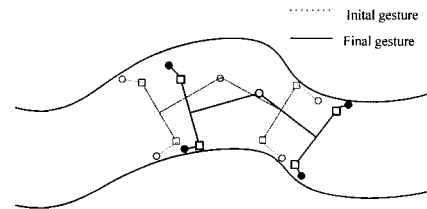


그림 5. 좁은 통로를 통과하는 허리관절 로봇.

Fig. 5. Articulated spine robot passing through narrow path.

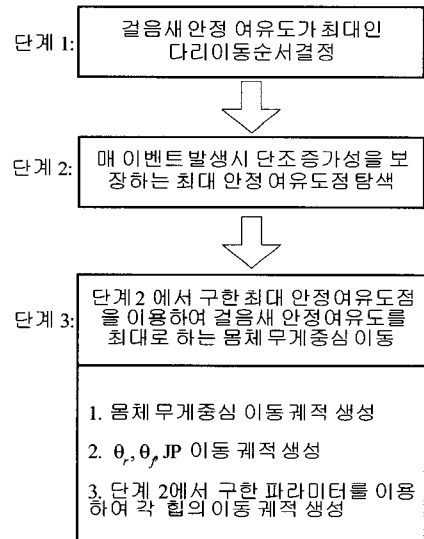


그림 6. 불연속 지그재그 걸음새 계획.

Fig. 6. Discontinuous zigzag gait planning.

특징 4 : 허리관절이 회전할 수 있는 회전각이 증가함에 따라 힙의 도달영역범위가 증가한다. 이러한 특징은 궁극적으로 보행 시 안정여유도의 증가를 가져온다[11].

2. 허리관절 로봇의 불연속 지그재그 걸음새 계획

앞서 기술한 보행로봇의 걸음새 계획은 크게 다리아동순서 및 몸체 무게중심 이동으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 진

행 방향으로 단조 증가성[15]을 보장하는 몸체 무게중심 이동을 위해 그림 6과 같이 보행로봇의 불연속 지그재그 걸음새 계획을 크게 3단계로 나누었다.

불연속 지그재그 걸음새에서 가장 큰 걸음새 안정여유도를 가지는 다리이동순서는 물결걸음새 다리이동순서이다[11]. 본 걸음새 계획의 단계 1에서는 최대 안정 여유도를 보장하는 물결걸음새 다리이동순서만을 고려한다. 왜냐하면 허리관절을 가진 보행로봇이 불연속 걸음새로 보행할 경우, 기존의 불연속 지그재그 걸음새에서 허리관절로 인한 각 다리의 도달영역을 증가시켜 보행하는 것과 같으므로 다른 걸음새의 다리이동순서는 고려하지 않는다.

그리고 자연계의 동물은 보행시 특별한 경우(장애물 회피, 방향전환) 외에는 몸체를 진행방향과 반대방향으로 이동하지는 않는다. 본 논문의 걸음새 계획의 단계 2에서도 역시 이벤트 발생순서에 따라 보행시 몸체를 진행방향과 반대방향으로 움직이는 걸음새는 고려하지 않는다[15]. 이러한 걸음새는 기구부 제어시 불필요한 동작을 감소시켜 에너지 효율성을 높이고 보행속도를 증가시키는 잇점을 가져온다. 본 절에서는 매 이벤트 발생 시 단조 증가성을 보장하고 최대 안정 여유도를 가지는 몸체 무게중심 위치를 찾기위해 안정여유도 그래프[11]를 이용한다.

그림 7은 임의의 이벤트 발생 시 최대 안정 여유도 그래프를 구하기 위해 지지 다각형내의 몸체 무게중심과 이를 구성하는 상체 및 하체 관절각, 허리관절위치를 구하는 알고리즘을 나타낸다. 같은 몸체 무게중심에 대하여 여러 개의 θ_f, θ_r, JP 가 존재할 때 불필요한 허리관절의 움직임을 제한하기 위해 (4)와 같은 성능 지수(PI)를 최대로 하는 θ_f, θ_r, JP 를 선택한다.

$$PI = \frac{1}{\sqrt{(\theta_f)^2 + (\theta_r)^2}} \quad (4)$$

(4)는 같은 몸체 무게중심위치를 가지더라도 가장 적은 상체 및 하체 회전각을 선택함으로써 불필요한 허리 회전을 줄이고, 또한 두 회전각의 차를 최소화 함으로써 몸체 이동시 각 힙의 이동을 보다 균등하게 하는 파라미터는 선택하려는 의미를 갖는다.

마지막으로 단계 3의 경우, 매 이벤트별 최대 안정여유도 점을 이은 선분을 따라 몸체 무게중심을 이동하는 궤적을 생성해야 한다. 한 주기동안 보행시 몸체 무게중심은 계속해서 가변하므로 한 주기동안 연속적으로 변하는 몸체 무게중심에 대한 안정 여유도를 구하기 위해서는 매우 많은 계산과정을 요한다. 그러나 지지 다각형 내에서 몸체 무게중심을 선분을 따라 직선이동할 때 이동구간 내에서의 최소 안정여유도를 가지는 점이 되는 사실을 이용하여 보다 간단하게 계산할 수 있다[7,11,15].

따라서, 본 논문에서는 매 이벤트마다 구한 단조 증가성을 보장하는 최대 안정 여유도점을 이은 선분을 따라 몸체를

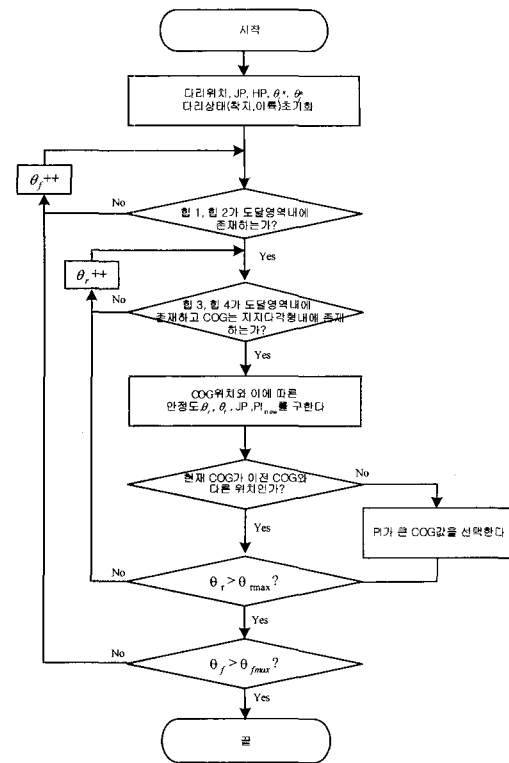


그림 7. COG 및 허리관절 파라미터 탐색 알고리즘.

Fig. 7. Searching algorithm to determine COG position and its corresponding parameters.

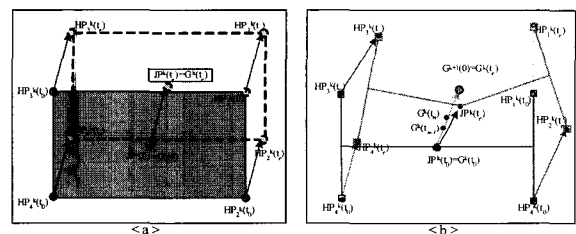


그림 8. 몸체이동에 따른 각 다리 및 허리관절 이동 궤적의 비교.

Fig. 8. Comparison of hips and waist-joint path according to a COG trajectory.

이동함으로써 단지 10개의 몸체 무게중심(초기위치, 최종위치, 각 이벤트별 최대 안정여유도점 8개)에 대한 안정 여유도만을 계산해서 비교적 간단하게 걸음새 안정여유도를 구할 수 있다.

허리관절을 가진 보행로봇의 경우 몸체 무게중심이 직선 방향으로 이동할 때 허리관절 및 각각의 다리의 이동궤적은 매우 다른 궤적을 형성할 수 있다. 그림 8-(a)에서 알 수 있듯이 강제인 몸체를 가지는 보행로봇의 경우 몸체 이동궤적을 따라 힙을 이동하면 되지만 허리관절을 가질 경우 몸체 무게중심을 $G^k(t_k)$ 에서 $G^k(t_k)$ 까지 직선이동하기 위해서는 그림 8-(b)와 같이 힙 및 허리관절이 각각 다른 궤적을 가지고 이동할 수 있으며 이동방법 또한 무수히 많다.

본 논문에서는 매 이벤트마다 발생한 최대 안정 여유도점 사이를 직선이동하기 위해 몸체 무게중심 궤적과 허리관절 궤적(일정한 속도로 직선이동)이 주어진 상태에서 (3)을 이용하여 θ_f, θ_r 를 구한 후 몸체를 이동시킨다. 이때 θ_f, θ_r 는 다음 (5)와 같이 단조 증가 또는 단조 감소하도록 제한한다.

$$\{\theta_f(t_{n-1}) \leq \theta_f^k(t_n) \leq \theta_f(t_{n+1})\}, \{\theta_r(t_{n-1}) \leq \theta_r(t_n) \leq \theta_r(t_{n+1})\} \text{ 또는} \quad (5)$$

$$\{\theta_f(t_{n+1}) \leq \theta_f^k(t_n) \leq \theta_f(t_{n-1})\}, \{\theta_r(t_{n+1}) \leq \theta_r(t_n) \leq \theta_r(t_{n-1})\}$$

(5)로부터 힙 위치를 일정한 방향으로 회전시킴으로써 보다 효율적으로 이동할 수 있다. 그림 9는 $\theta_f^{k-1} = 15^\circ, \theta_r^{k-1} = -14^\circ, JP^{k-1} = (10, -94), COG^{k-1} = (10, -44)$ 를 $COG^k = (11, 44)$ 이고 $\theta_f^k = -14^\circ, \theta_r^k = 15^\circ, JP^k = (10, 94)$ 인 보행자세로 몸체 무게중심과 허리관절이 등속 직선이동시 θ_f, θ_r 에 의한 몸체 이동 궤적의 한 예이다.

IV. 모의실험 및 결과

본 장에서는 제안된 허리관절 로봇의 걸음새 계획방법을 Pentium IV IBM-PC 에서 Visual C++ 을 이용하여 구현하고 모의실험을 통하여 증명하고자 한다

그림 10에서 로봇의 각 다리끝의 위치는 각 도달영역의 중심에 위치하며, 힙, 몸체 무게중심의 초기위치와 최종위치들은 표시된 바와 같다(각 다리의 도달영역은 길이 60mm, 폭 40mm). 몸체의 길이는 폭의 3배 정도로 약어나 도마뱀의 체형과 비슷하게 설정하였으며 허리관절의 회전가능각은

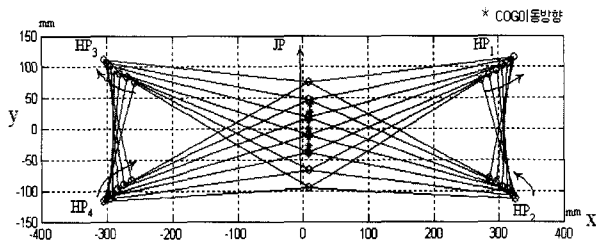


그림 9. 몸체 무게중심 이동 궤적에 따른 각 파라미터의 궤적.
Fig. 9. Trajectory of parameters according to COG trajectory.

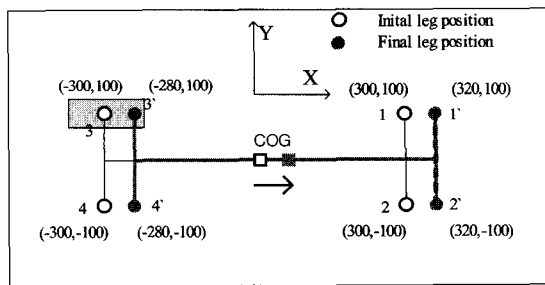


그림 10. 각 다리의 초기위치 및 최종위치.
Fig. 10. Initial and final foothold of each leg.

$-15^\circ < \theta_f, \theta_r < 15^\circ$ 로 설정하였다. 위와 같은 몸체구조는 몸체에 비해 다리가 짧지만, 보행시 허리관절의 유용성을 잘 나타낼 수 있다.

먼저 보폭이 20mm 로 지그재그 보행시 각 이벤트에 따른 몸체 무게중심 이동범위는 그림 11과 같다. 허리관절이 없는 경우 몸체 무게중심의 y 좌표는 결코 20mm 를 넘을 수 없다. 하지만 허리관절을 가질 경우 약 50mm 까지 몸체 무게중심의 y 좌표가 이동함을 알 수 있다. 그리고 x 방향으로 몸체 무게중심 이동범위는 각 이벤트마다 진행방향으로 단조증가성을 만족하기 때문에 최종 이동 위치의 x 값(=20) 보다 클 수 없음을 그림 11에서 잘 알 수 있다.

그림 12는 매 이벤트마다 최대 안정 여유그래프와 각각의 위치를 나타낸다. 그림 12로부터 단조증가성을 보장하면서 최대 안정여유도를 가지는 몸체 무게중심위치와 이동궤적을 구해보면 그림 13과 같다. 그림 13-(a)로부터 허리관절을 가질 경우 기존의 단일 몸체인 보행로봇에 비해 걸음새 안정여유도가 매우 커짐을 알 수 있다. 그림 13-(b)는 한 주기동안 매 이벤트발생에 따른 몸체 무게중심 이동궤적으로 이를 xy 평면상에 나타내면 지그재그 형태의 경로가 됨을 알 수 있다. 이로부터 허리관절을 갖는 4족 보행로봇의 최적 불연속 걸음새를 지그재그 걸음새라 칭한다.

보행 시 각 이벤트별 허리관절각 및 몸체 무게중심은 표 1과 같고, 이를 각 이벤트별로 로봇의 자세를 도식적으로 나타내면 그림 14와 같다. 실제 보행은 몸체 무게중심이동, 다리의 이륙 및 착지 이벤트로 그림 15과 같이 15단계로 이루어진다. 단계 1, 8, 15는 보행 시 4점 지지상태에서 몸체 무게중심을 이동하는 불연속 걸음새 특성을 나타낸다.

그림 16은 다리의 도달영역이 길이 100mm, 폭 40mm 인 경우 보폭의 변화에 따른 걸음새 안정여유도 관계 그래프로서 허리관절을 가진 보행로봇은 보폭에 관계없이 항상 기존의 단일 몸체인 보행로봇보다 큰 걸음새 안정여유도를 가짐을 알 수 있다.

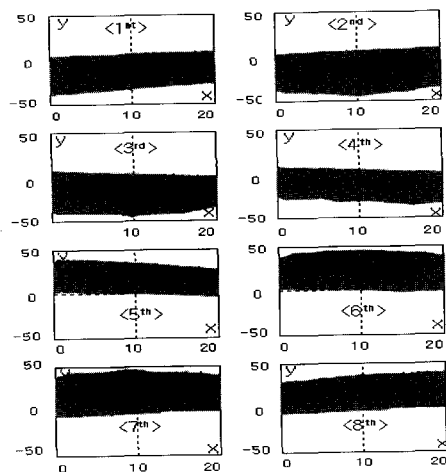


그림 11. 매 이벤트별 몸체 무게중심 이동범위.
Fig. 11. Movable COG range at each event.

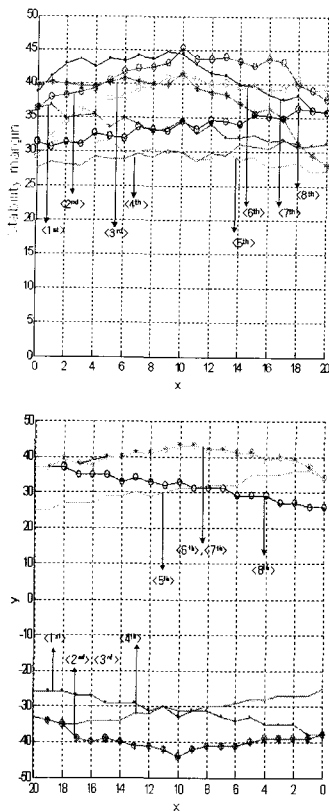


그림 12. 각 이벤트별 최대 안정 여유그래프 및 위치.
 Fig. 12. Maximum stability margin graph and its position at each event.

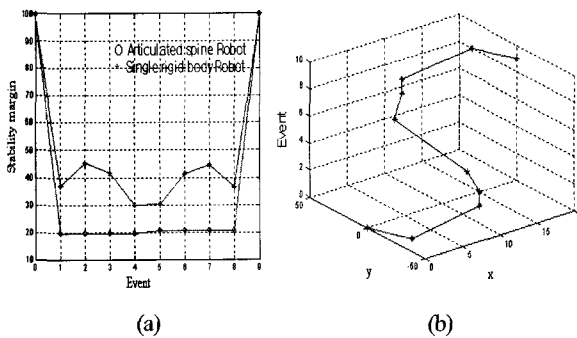


그림 13. 이벤트에 따른 (a) 안정여유도 비교 및 (b) 허리관절 로봇의 COG 이동궤적.
 Fig. 13. (a) Comparison of stability margins with conventional walking robot for each event. (b) COG trajectory of Articulated-spine robot according to event.

그림 17은 허리관절각 변화에 따른 걸음세 안정여유도 관계로서 허리관절의 회전가능각이 커짐에 따라 걸음세 안정여유도가 증가함을 알 수 있다. 이때 허리관절각이 일정한 범위 이상이 되면 걸음세 안정여유도는 더 이상 증가하지 않는다. 왜냐하면 걸음세 안정여유도에 영향을 주는 몸체 무게 중심 이동범위는 허리관절각에 많은 영향을 받지만 허리관절각이 일정값 이상이 되면 각 다리의 도달영역이 계속

표 1. 각 이벤트에 따른 허리관절로봇의 파라미터.

Table 1. parameters of an articulated spine robot at each event (stride = 20mm).

Event	θ_u	θ_r	Waist-joint position	COG position
0	0	0	(0, 0)	(0, 0)
1	11	-11	(1.6, -76.4)	(1, -38)
2	15	-14	(11.1, -94.2)	(10, -44)
3	15	-14	(11.1, -94.2)	(10, -44)
4	8	-8	(10.8, -59.8)	(10.8, -31)
5	-8	8	(10.0, 59.8)	(10, 31)
6	-14	15	(9.7, 93.5)	(10, 43)
7	-14	15	(9.7, 93.5)	(10, 43)
8	-11	11	(18.4, 76.1)	(18, 37)
9	0	0	(20, 0)	(20, 0)

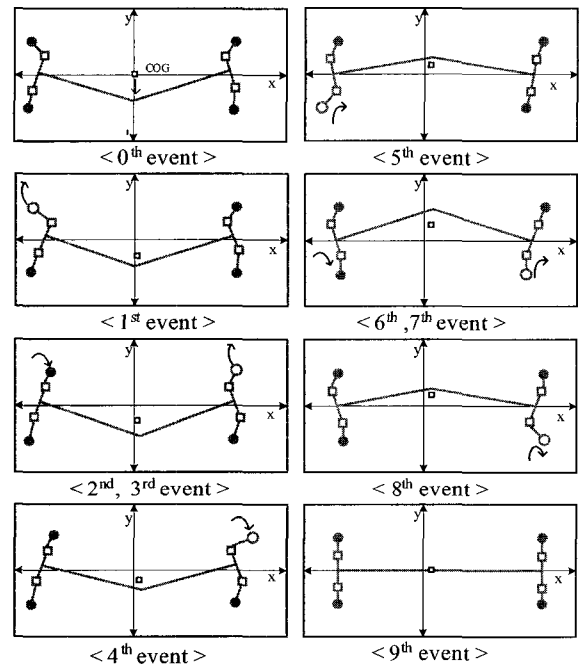


그림 14. 허리관절로봇의 보행 자세.
 Fig. 14. Walking motion of an articulated-spine robot.

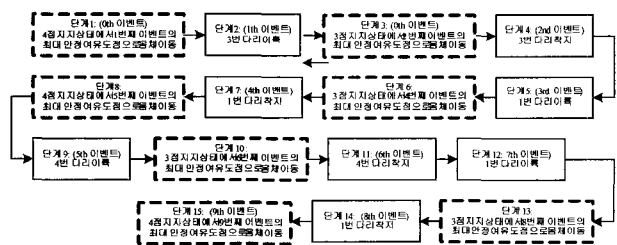


그림 15. 허리관절로봇의 보행.
 Fig. 15. Walking process of an articulated-spine robot.

증가하지 않기 때문에 몸체 무게 중심 이동범위도 더 이상 증가하지 않기 때문이다.

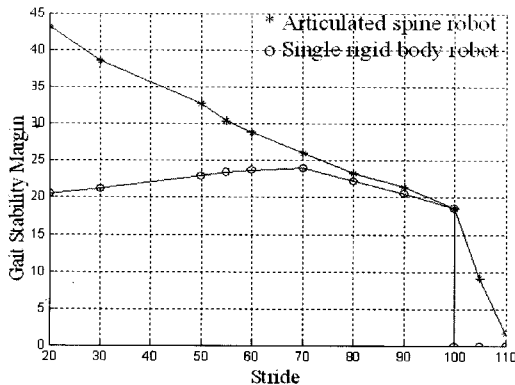


그림 16. 보폭의 변화에 따른 걸음세 안정여유도.

Fig. 16. Comparison of an gait stability margin according to stride.

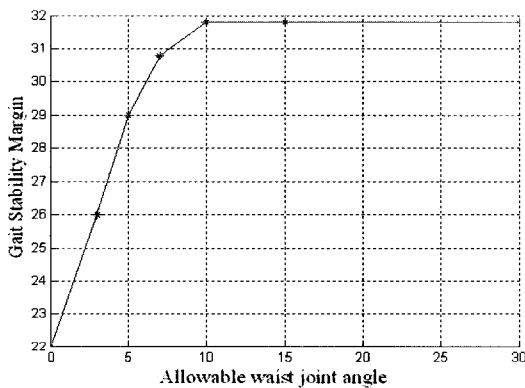


그림 17. 회전가능한 허리관절각에 따른 걸음세 안정여유도.

Fig. 17. Gait Stability according to the allowable waist-joint angle (stride=50mm).

V. 결론

본 논문은 기존의 단일 몸체를 갖는 보행로봇과는 달리 새로운 기구적 몸체구조인 허리관절을 갖는 4족 보행로봇의 지그재그 걸음새를 제안하였다. 허리관절을 가지고 보행할 경우 나타나는 여러가지 걸음새의 특징을 나열하고 걸음새에 대한 새로운 몸체 파라미터를 추가하여 이를 이용한 최대 안정여유도를 가지는 걸음새 계획을 제안하였다. 그 결과 보행로봇이 허리관절을 이용하여 보행할 경우 보다 큰 보폭으로 이동이 가능하며 걸음새 안정도 또한 증가함을 보였다. 또한 허리 관절각의 회전각 증가에 따른 걸음새 안정 여유도 변화를 보임으로써 허리관절 회전각이 0° 인 기존의 보행로봇에 비해 매우 우수한 안정성을 보장함을 확인 하였다.

그러나 허리관절로 인해 각 다리의 도달영역이 매우 복잡한 형태와 크기를 가지기 때문에 최대 안정여유도를 가지는 몸체 무게중심위치를 찾기 위한 탐색시간이 길어진다. 그래서 보다 효율적인 on-line 계획을 위해서는 보다 빠른 최대 안정여유도 탐색 알고리즘이 필요하다. 또한 본 논문에서는 1자유도 허리관절만이 고려 되었기 때문에 비평탄 지형에서의 보행에서는 그 장점을 충분히 살릴 수 없을 수도 있다.

차후 효율적인 탐색알고리즘 및 2자유도 허리관절을 연구함으로써 엔티테인먼트 로봇에 향후 적용가능하고 다양한 환경에 적용가능한 최적 걸음새의 연구가 진행되어야 할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] R. B. Mcghee and A. Frank, "On the stability properties of quadruped creeping gaits," *Mechanical Biosciences*, vol. 3, 1968.
- [2] S. M. Song and K. J. Waldron, "An analytical approach for gait study and its applications on wave gait," *International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, 1987.
- [3] S. M. Song and B. S. Choi, "The optimally stable range of 2n-legged wave gaits," *International Conference on Advanced Robotics(ICAR)*, vol. 6, no. 2, 1987.
- [4] C. D. Zhang and S. M. Song, "Stability analysis of wave-crab gait of a quadruped," *Journal of Robotic System*, vol. 7, no. 2, 1990.
- [5] S. Hirose and O. Kunieda, "Generalized standard foot trajectory for a quadruped walking vehicle," *International Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 1, 1991.
- [6] S. Hirose, "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," *International Journal of Robotics Research*, vol. 3, no. 2, 1991.
- [7] 이연정, 비평탄 지형에서 사각 보행 로봇의 게 걸음세 제어 및 경로 계획에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 2월, 1990년.
- [8] P. G. Santos and M. A. Jimenez, "Generation of discontinuous gait for quadruped walking vehicles," *Journal of Robotic System*, vol. 12, no. 9, 1995.
- [9] H. Tsukagoshi, S. Hirose, and K. Yoneda, "Maneuvering operation of the quadruped walking robot on the Slope," *Procs. IROS*, pp. 863-869, 1996.
- [10] F. T. Cheng , H. L. Lee, and E. Orin, "Increasing the locomotive stability margin of multilegged vehicles," *Procs. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, pp. 1708-1714, 1999.
- [11] 박세훈, 이승하, 이연정, "기하학적 탐색을 이용한 4각 보행로봇의 지그재그 걸음새 계획," 제어자동화시스템 공학 논문지, 제8권, 제2호, pp. 142-150, 2002.
- [12] H. S. Son and Z. N. Bien, A study on turning gait for a quadruped walking robot, Master thesis KAIST, 1990.
- [13] M. Anthony Lewis, "Self-organization of locomotory Controllers in Robots and animals", Ph.D. Thesis, Univ. of Southern California, 1996.
- [14] I. Mizuuci, T. Matsuki, M. Inaba, and H. Inoue, "GA-Based motion generation for quadruped robot which has soft spine structure," *Procs. of the 17th Annual Conference of the Robotics Society of Japan*, pp. 199-200, 1999.
- [15] Y. J. Lee and Z. N. Bien, "A hierarchical strategy for planning crab gaits of a quadruped walking robot," *International Journal of ROBOTICA*, vol. 12, pp. 23-31, 1994.



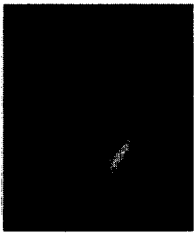
박 세 훈

1972년 8월 15일생. 1998년 경북대 전자공학과 졸업. 2000년 동대학원 석사. 2000년~현재 동대학원 박사과정. 관심 분야는 걸음새 제어 및 지능제어.



이 연 정

1961년 9월 10일생. 1984년 한양대 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사. 동대학원 박사(1994). 현재 경북대학교 전자전기 컴퓨터 학부 부교수. 관심 분야는 보행로봇, 서비스로봇, 지능제어.



하 영 호

1953년 8월 10일생. 1976년 경북대 전자공학과 졸업. 1978년 동대학원 석사. The University of Texas Austine 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동대학원 박사(1985). 현재 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 교수. 관심분야는 칼라 이미지 신호처리

및 컴퓨터 비전.