

## 4족 애완로봇을 위한 보행운동 계획

### Walking Motion Planning for Quadruped Pet Robot

이수영\*, 최대성, 최병욱  
(Sooyeong Yi, Daesung Choi, and Byoungwook Choi)

**Abstract:** A motion planning algorithm is presented in this paper for a commercialized quadruped walking of robot pet. Stable walking is the basic requirement for a commercial-purpose legged robot. In order to secure the walking stability, modified body sway to the centroid of support polygon is addressed. By representation of walking motion with respect to the world coordinate system rather than body coordinate, it is possible to design the several gaits in unified fashion. The initial gait posture is introduced to maximize the stride and to achieve fast walking. The proposed walking motion planning is verified through computer simulation and experiments.

**Keywords:** quadruped, walking, planning, initial posture, inter-sampling

#### I. 서론

지능형 로봇은 단순 반복적인 기능에서 벗어난 상황 인지 학습기능 및 사용자와의 교감을 특징으로 한다. 지능형 로봇은 크게 개인용 로봇과 전문로봇으로 구분되며, 개인용 로봇에는 애완용로봇, 청소로봇, 경비, 교사로봇 등이 있다. 이 중에서도 특히 애완용로봇은 시장에서의 성공가능성이 가장 높은 분야로 인식되어 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 애완용 로봇의 대표적인 예로서 잘 알려진 바와 같이 일본 소니사의 강아지로봇 AIBO는 친근감 있는 외양과 다양한 동작으로 많은 사람들의 관심을 불러 일으켰으며[1], 국내에서도 애완견 로봇의 상업화 개발사례가 보고된 바 있다[2,3]. 애완견 로봇은 상황인지, 감성표현과 같은 지능적인 측면 외에 운동성 측면에서 기존 산업용 로봇과 대비되는 4족 보행이라는 특징을 가지고 있다. 따라서 자연스러운 보행운동이 애완견 로봇의 성공여부에 필수적인 성능이 된다.

4족 로봇의 보행운동은 지난 수십 년 간 많은 학자들에 의해서 연구되어 왔다. 보행운동 설계 방법은 크게 계획(planning)에 의한 방법과 학습(learning)에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 계획에 의한 방법은 수학적 해석에 기반을 두고 온라인으로 보행동작을 생성하는 방법이다. Crawl 걸음새라 불리는 정적(static) 걸음새를 통해 보행 계획 및 보행기구에 관한 연구가 시작되었고[4], 잘 알려진 물결 걸음새(wave gait)의 보행 안정도가 해석적인 방법으로 증명되었다[5]. 이후 계절음새, 회전걸음새와 같은 다양한 정적 걸음새 계획방법이 제안되었으며[6-8], 동적(dynamic) 걸음새에 관한 연구가 보고되었다[9,10]. 한편 학습에 의한 보행 설계방법은 행동기반(Behavior based) 학습 이론에 근거하여, 반복적인 시행-착오 과정을 통해 미리 정해진 몇 가지 기본행동 요소들을 연결하는 방법이다. 기본행동 요소들로서 각 다리 발끝의 궤적, 몸체 요동운동, 어깨 높이 및 다리 폭 등이 정해지며, 일반적인

로 유전 알고리즘에 의한 탐색과 평가를 통해 적절한 보행운동을 찾는다[11-13]. 그러나 학습에 의한 방법은 기본적으로 보행 궤적을 얻기 위해 별도의 학습시간이 필요한 오프라인 접근 방법이며, 일반적으로 행동 요소 탐색에 많은 시간이 걸리게 된다. 또한 보행동작을 바꾸기 위해서는 또 다른 학습과정이 필요하기 때문에 보폭이나 보행주기 등을 변경하기가 쉽지 않으므로 실제 적용에 있어 유연성이 적으며, 휴리스틱스를 기본으로 하기 때문에 얻어진 보행동작의 신뢰성을 보장하기 어렵다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 상용 애완견로봇을 위해 임베디드 제어기에 탑재가능한 온라인 보행운동 계획 알고리즘을 개발하고자 한다. 탑재형 온라인 보행 알고리즘은 보행궤적 생성에 있어서 실시간성과 보행운동의 신뢰성이 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 알고리즘의 실시간성을 위해서 학습에 의한 방법 보다는 계획에 의한 방법을 기반으로 보행운동을 설계한다. 또한 보행의 신뢰성을 보장하기 위해 안정성이 보장된 정적 걸음새를 설계 대상으로 한다. 전술한 바와 같이 계획 방법에 기반을 둔 4족 로봇 걸음새 연구가 이미 많이 수행되었지만, 대개 실험실 수준에서 머무는 것이 보통이며, 국내에서 상용화 버전의 애완용 로봇에 탑재되는 것은 아직 보고된 바 없다. 본 논문에서 개발한 상용 소형 애완로봇을 위한 탑재 보행운동 제어 알고리즘은 다음과 같은 특징이 있다.

1. 샘플내 보간법에 의한 관절제어 성능 향상
2. 전역좌표계 기준 운동계획에 의한 다양한 걸음새 통합
3. 초기 자세 설계에 의한 보폭 개선
4. 걸음새 안정화를 위한 수정 centroid 방향 요동운동

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II 장에서는 이해를 돕기 위하여 대상 애완견 로봇의 관절구조 및 관절제어 방법에 대해 소개하고, III 장에서는 보행계획에 관해 설명한다. 그리고 IV 장에서 보행제어 실험 결과에 대해 서술하고 V 장에서 결론을 맺는다.

#### II. 4족 애완로봇 관절구조 및 제어시스템

##### 1. 관절구조 및 기구학/역기구학

대상 4족 애완로봇의 보행부는 각각 어깨 2축, 무릎 1축을 갖는 4개의 다리로 구성되어 있다. 이외에도 머리부에 Pan,

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 12. 20., 채택확정: 2009. 3. 23.

이수영: 서울산업대학교 전기공학과(syylee@snut.ac.kr)

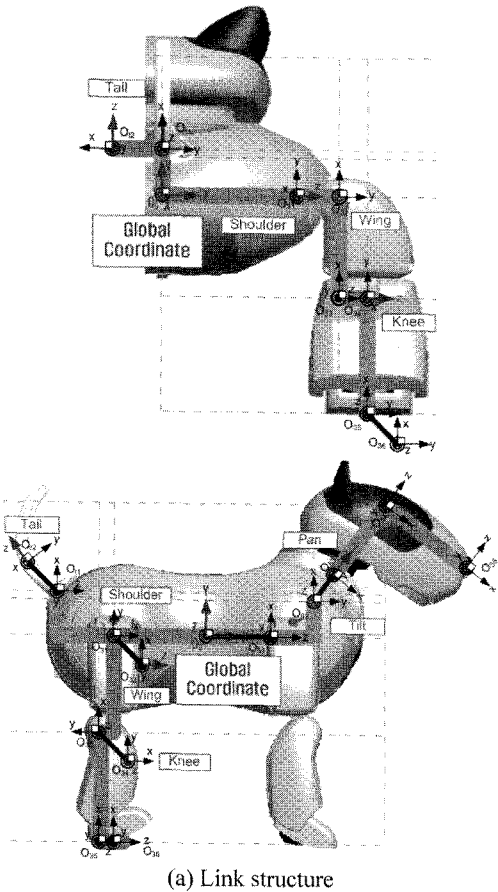
최대성: ㈜ 다사로봇(hawk@dasarobot.com)

최병욱: 서울산업대학교 전기공학과(bwchoi@snut.ac.kr)

※ 본 논문을 위해 도움을 주신 ㈜다사로봇 강석희 대표이사를 비롯하여 김형철 이사, 박경희 수석연구원에게 감사드립니다.

Tilt 구동축을 가지며, 꼬리 1축으로 로봇의 총 자유도는 15 이다. 대상 로봇의 링크 구조와 기구학 파라미터 정의를 그림 1에 나타내었다.

보행 운동의 안정성을 계산하기 위해서는 각 부품들의 무게중심(COG: Center Of Gravity)을 알아야 한다. 위 그림에서  $O_{UC}$ 와  $O_{LC}$ 는 상박(Upper Leg)과 하박(Lower Leg)의 무게중심을 나타내며, 전체 COG에 영향을 주는 부품으로 머리부와 몸통부도 고려하였다.



(a) Link structure  
(b) Coordinate system definition and kinematic parameters

그림 1. 기구학 구조  
Fig. 1. Kinematic structure.

그림 1에서 정의한 좌표계 및 기구학 파라미터를 통해 어깨좌표계  $O_{11}$ 로부터 발끝좌표계  $O_{16}$ 까지의 기구학 식을 구할 수 있으며, 또한 해석적인 방법으로 다음과 같은 어깨좌표계 기준 역 기구학해를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{L_5 \cdot F_x - L_6 \cdot F_y}{L_6 \cdot F_x + L_5 \cdot F_y} \right) \quad (1a)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{d_3}{\Delta} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{F_z}{L_7} \right) \quad (1b)$$

$$\theta_3 = -\tan^{-1} \left( \frac{L_2}{L_3} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{L_4} \right) \quad (1c)$$

여기서

$$F_x = -C_1(d_5C_3 + a_4S_3) - S_1C_2(d_5S_3 - a_4C_3) + S_1(a_2C_2 + d_3S_2) + d_2C_1$$

$$F_y = -C_1(d_5C_3 + a_4S_3) + C_1C_2(d_5S_3 - a_4C_3) - C_1(a_2C_2 + d_3S_2) + d_2S_1$$

$$F_z = S_2(d_5S_3 - a_4C_3) - a_2S_2 + d_3C_2$$

$$L_1 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 - (a_2^2 + d_2^2 + d_3^2) - (a_4^2 + d_5^2)$$

$$L_2 = a_2 \times a_4 - d_2 \times d_3$$

$$L_3 = a_2 \times d_5 - d_2 \times a_4$$

$$L_4 = \sqrt{L_2^2 + L_3^2 - L_1^2}$$

$$\Delta = d_5 \cdot \sin(\theta_3) - a_4 \cdot \cos(\theta_3) - a_2$$

$$L_7 = \sqrt{d_3^2 + \Delta^2 - F_z^2}$$

$$L_5 = d_2 - d_5 \cdot \cos(\theta_3) - a_4 \cdot \sin(\theta_3)$$

$$L_6 = -\Delta \cdot \cos(\theta_2) + d_3 \cdot \sin(\theta_2)$$

이며, 각 파라미터  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$  및  $\alpha_i$ 는 표준 D-H 표기법 (Denavit-Hartenberg representation)에 따른 변수들이다. 4개의 다리는 동일한 기구학 구조를 가지고 있으므로 위 기구학/역기구학 해는 모든 다리에 적용된다.

## 2. 제어 시스템 및 샘플내 보간 관절제어법

각 관절은 직류모터로 구동되며, 15축 관절제어를 담당하는 모터제어기와 전체시스템의 주 제어기가 직렬 통신 방식으로 연결된다. 상위 주제어기에서는 직렬 통신 채널을 통해 보행 명령 궤적을 내리고, 또한 현재의 모터 각을 모니터링 할 수 있다(그림 2).

일반적으로 소형 로봇의 경우에는 모터의 사양 제한 때문에 추종가능한 관절각속도 명령의 크기에 한계가 있다. 그러므로 관절의 명령궤적을 생성할 때에는 각속도의 최대 크기를 제한해야 한다. 추종 가능한 보행 명령궤적을 만들어내는 가장 손쉬운 방법은 동일한 운동에 대해 보행주기를 길게 늘여서 관절 각속도의 크기를 전체적으로 줄이는 것이다. 그러나 이러한 방법은 온라인 보행명령 궤적 생성시에 미리 추종

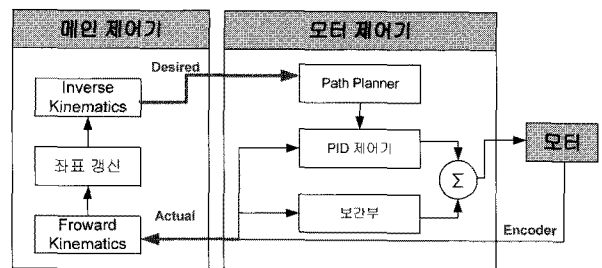
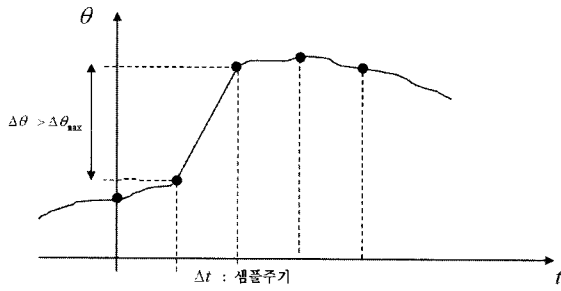
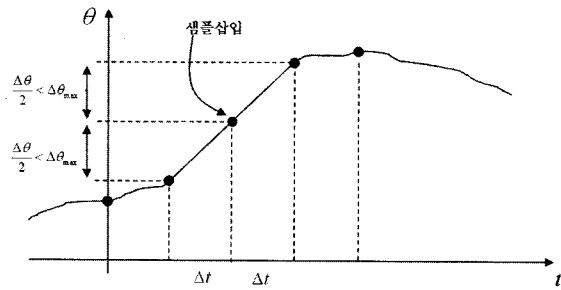


그림 2. 제어시스템 구조.  
Fig. 2. Control system structure.



(a) 추종가능한 관절각속도를 넘는 샘플이 있는 경우



(b) 샘플내 보간법에 의한 관절 각속도 완화

그림 3. 샘플내 보간법.

Fig. 3. Inter-sample interpolation.

가능한지 여부를 알 수 없을 뿐만 아니라, 전체 보행동작이 매우 느려지게 된다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 관절의 각속도 값이 과도한 명령 샘플의 경우에 각속도 명령을 순시적으로 완화하기 위한 샘플내 보간법을 제안하였다. 샘플내 보간법은 현재 시점에서 생성된 샘플의 명령 관절각을 이전 샘플의 명령 관절각과 비교하여 관절각속도를 계산하고, 관절 각속도의 크기가 모터의 사양에 비추어 추종가능 최대 각속도 값보다 큰 경우에는 샘플내부에서 선형적으로 보간하여 명령 값을 다시 생성하는 방법이다(그림 3). 계산량을 줄이기 위해 보간은 직교좌표공간에서 보다는 관절각 공간에서 단순히 선형적으로 행한다. 물론 관절각 공간에서의 선형 보간이 직교좌표공간에서는 직선에 해당하지 않으므로 부드럽지 않은 궤적을 생성할 수 있으나 샘플링 구간이 충분히 짧고 기구학적으로 특이점(singularity)에서 벗어난 위치에서 보행 궤적이 생성되므로 관절각 공간에서의 보간과 직교공간에서의 보간의 오차는 크지 않다. 그림 3에서는 설명을 쉽게 하기 위해 보간을 위해 삽입되는 샘플을 하나로 하였으나, 명령 관절각의 크기에 따라 여러 개의 보간 샘플이 삽입될 수도 있다.

샘플내 보간법은 전체계산량에 부담을 주지 않고 보행명령레계의 각속도를 완화하는데 큰 도움이 된다. 물론 보간이 필요한 샘플구간에서는 보행운동 동기를 맞추기 위해 모든 관절에 동시에 보간을 적용해야 하며, 따라서 보행주기가 약간 느려질 수 있다.

III. 걸음새 구현

1. 전역좌표계 기준계획에 의한 걸음새 통합

보행동작을 위한 다리운동은 다음과 같이 두 가지 서로 다른 좌표계를 기준으로 기술할 수 있다:

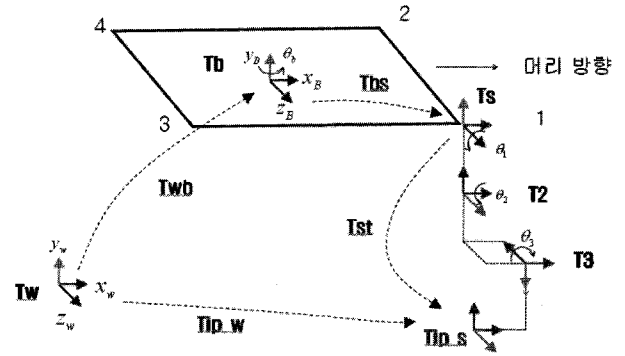


그림 4. 전역좌표계 좌표변환.

Fig. 4. Coordinate transformation to world coordinate.

- 몸체 좌표계 기준: 몸체에 설치된 이동좌표계
- 전역 좌표계 기준: 로봇외부에 설치된 고정좌표계

몸체 좌표계를 기준으로 기술하는 경우, 지지다리는 몸체와 반대 방향으로 운동한다고 볼 수 있으며, 전역 좌표계를 기준으로 기술하는 경우에 지지다리는 몸체의 운동과 상관없이 지면에 고정되어 있다고 볼 수 있다[6]. 따라서 전역좌표계 기준 계획은 다양한 보행운동 패턴에 있어서 각 다리의 운동을 통일적으로 기술할 수 있으므로 여러가지 걸음새들의 통합 구현에 유리할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 전역좌표계 기준 계획을 통해 전진, 후진, 회전, 제자리 회전, 계 걸음새 등 여러가지 걸음새를 통합한다. 걸음새를 통합하는 것은 계획의 용이성 뿐만 아니라 탑재형 임베디드 제어기에 적용함에 있어 프로그램의 용량을 크게 줄이고 효율성을 높인다는 의미가 있다.

II 장에서 관절 역기구학 해는 각 다리의 어깨 좌표계를 기준으로 표현되므로, 전역좌표계 기준 보행운동을 각 다리 관절운동으로 변환하기 위해서는 그림에 보이는 것과 같은 좌표변환 과정이 필요하다.

$$\begin{aligned}
 Tip_w &= T_{wb} \cdot T_{bs} \cdot Tip_s \\
 &= Tip_s \cdot T_{bs}^{-1} \cdot T_{wb}^{-1} \cdot Tip_w
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

위 그림에서  $T_w, T_b, T_s$  는 각각 전역좌표계, 몸체좌표계, 어깨좌표계를 의미하며,  $T_{wb}, T_{bs}, T_{st}$  는 각각 전역-몸체 좌표변환, 몸체-어깨 좌표변환, 어깨-발끝 좌표변환을 나타낸다. 또한  $Tip_w$  와  $Tip_s$  는 각각 발끝의 전역좌표계 기준 위치 및 어깨좌표계 기준 위치 좌표를 의미한다. 식 (2)는 각 다리의 보행운동이 전역 좌표계를 기준으로 기술되었을 때, 역기구학의 기준이 되는 어깨 좌표계로 변환하는 과정이다. 그림 4에서 각 다리의 번호는 다음과 같이 부여하였다: 1번-오른쪽 앞다리, 2번-왼쪽 앞다리, 3번-오른쪽 뒷다리, 4번-왼쪽 뒷다리.

2. 보행운동 계획

4족 로봇의 보행운동은 기본적으로 4점지지 상태와 3점지지 상태의 반복적인 천이 과정으로 볼 수 있다(그림 5).

물론 동적보행(dynamic gait)에서는 일시적으로 2점지지 상태가 나타나는 경우가 있으나, 본 논문에서는 상용 애완로봇 대상 보행운동의 신뢰성을 위해 정적보행(static gait)만을 고려한다. 3점지지-4점지지 사이의 상태 천이 조건은 이동 다리의

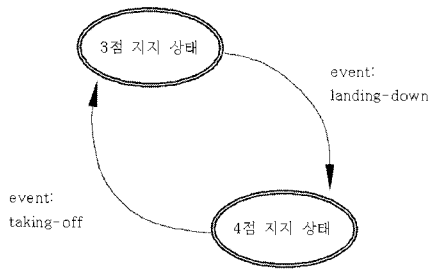


그림 5. 상태전이 다이어그램.  
Fig. 5. State transition diagram.

착지/이륙여부를 감지할 수 있는 발바닥 센서 출력이 될 수도 있고, 센서가 없는 개방제어 방식인 경우는 걸음새 다이어그램에 따라 미리 설정된 이벤트 시점이 될 수도 있다.

보행 운동계획은 사용자로부터 보행명령 파라미터를 받아서 몸체 및 다리 운동계획을 생성하는 것이다. 보행명령 파라미터는 다음과 같다: 보행주기, 보폭, 디딤률( $\beta$ ), 진행 방향각, 게 걸음새 또는 회전걸음새 여부. 이들 보행 파라미터의 조합에 따라 다양한 걸음새를 나타낼 수 있다.

보행로봇의 기본 걸음새로서 가장 보편적으로 이용되는 물결 걸음새(wave gait)는 디딤률이  $\beta > 0.75$  일 때 정적 보행 안정성을 보장한다[5]. 해석적인 보행 안정성을 보장하기 위해서는 로봇 몸체가 등속 직진운동을 하며, 로봇 전체의 무게 중심이 몸체의 무게중심과 항상 일치하도록 각 다리의 무게가 0이어야 한다는 이상적인 조건이 필요하다. 그러나 대상 로봇의 경우는 몸체내에 배터리나 제어보드와 같은 부품들의 배치에 따라 몸체 무게중심이 편중되어 있으며, 각 다리의 무게가 몸체의 무게에 대해 무시할 수 없는 크기를 가지므로 다리의 들고 내림에 따라 전체 무게중심에 변동이 생길 수 있다. 따라서 기존 물결걸음새의 보행 안정성을 만족시킬 수 없게 된다. 그러므로 이러한 경우에 보행 안정성을 확보하기 위한 몸체 요동운동과 걸음새 다이어그램 수정이 필요하다.

3. 지지다각형 중심(centroid) 방향 요동운동

정적 보행안정성을 만족하면서 이동 다리를 들기 위해서는 로봇의 무게중심을 먼저 지지다각형 내부로 옮겨야 한다. 지지다각형 내부에서 가장 안전한 위치는 물론 지지다각형의 중심점이 된다[14]. 그러나 단순히 지지다각형 중심점으로

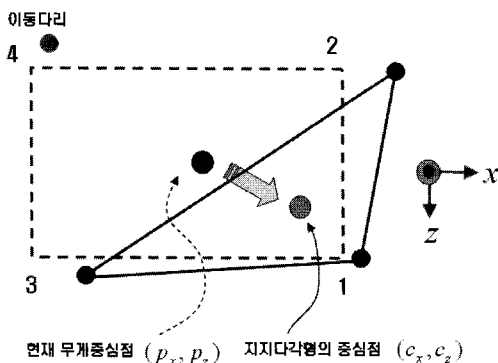


그림 6. 지지다각형 중심 방향 요동운동.  
Fig. 6. Centroid sway.

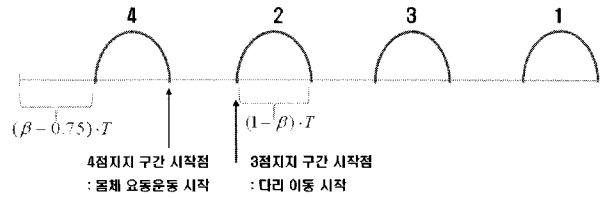


그림 7. 수정 걸음새 다이어그램.  
Fig. 7. Modified gait diagram.

무게중심을 옮기는 요동운동은 몸체 움직임의 폭이 과도하여 걸음새 모양을 해치는 경우가 있을 수 있다. 예를 들어 전진 걸음새에서 앞 다리를 들어야 하는 경우에 지지다각형은 뒤쪽에 형성되므로 몸체 무게중심을 뒤 방향으로 옮겨야 하고, 이는 전진 명령과 상충하여 걸음새 모양이 어색하게 된다. 따라서 본 논문에서는 다음 식 (3)과 같이 가중치를 두어 지지 다각형 중심 방향 요동운동의 크기를 조절 할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} v_x &= \mu_x \cdot (c_x - p_x) / \tau \\ v_z &= \mu_z \cdot (c_z - p_z) / \tau \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $v$ 는 몸체운동 속도,  $\mu$ 는 각 방향 속도의 가중치,  $c$ 와  $p$ 는 각각 지지다각형 중심점 및 현재 무게중심점(그림 6), 그리고  $\tau$ 는 4점지지 구간의 시간을 나타낸다. 가중치는 실험을 통해 휴리스틱하게 정하는 것으로 하였다.

이동다리를 들기 전에 로봇 무게중심을 지지다각형 중심으로 옮기기 위해서는 일정 시간이 필요하므로 기존의 물결 걸음새 다이어그램을 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 이를 수정하여 그림 7과 같은 걸음새 다이어그램을 정의하고, 몸체 요동운동을 구현한다.

4. 초기 자세에 의한 보폭 개선

일반적으로 보행로봇은 모든 다리 관절을 곧게 편 자세에

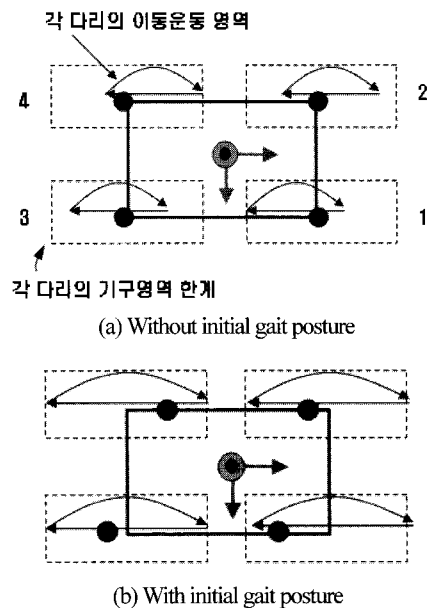


그림 8. 각 다리 발끝의 운동영역.  
Fig. 8. Work range of tip position.

서 시작하며, 초기위치에서 각 다리의 발끝은 어깨 좌표계의 중심이 지면에 사영된 점에 놓이게 된다. 그런데 걸음새 다이어그램에 따른 각 다리의 이동시점이 서로 다르므로, 어깨 좌표계 기준 운동영역이 다리마다 다르게 되고, 따라서 기구학 영역의 한계를 만족하는 보폭이 짧아지게 된다(그림 8(a)). 소형 로봇의 경우 보폭이 짧으면 아장아장 걷은 것과 같이 어색한 보행 패턴이 얻어진다. 그러므로 걸음새 다이어그램에 따른 각 다리 이동시점을 고려하여 각 다리의 운동영역이 어깨 좌표계를 중심으로 앞뒤로 고르게 배분되도록 초기 자세를 설계함으로써 보폭을 크게 개선할 수 있다(그림 8(b)). 초기 자세를 취하기 위한 동작도 걸음새 이므로 최초의 첫 걸음새에서 초기 자세를 취할 수 있어야 한다. 초기걸음새 자세 결정에는 다리 이동순서가 4-2-3-1로 미리 주어지고 가정한다.

IV. 실험결과

1. 샘플내 보간에 의한 관절각 추종성능 개선

2.2절에서 설명한 관절각 추종성능 개선을 위한 샘플내 보간법 실험 결과를 다음 그림에 보인다. 실험은 보행주기 4초인 직진 보행에 대해서 행하였으며, 각 관절모터 및 기어헤드의 성능에 따라 추종가능한 최대 각속도,  $\Delta\theta_{max}$  는 다음과 같이 설정하였다.

$$\Delta\theta_{max}^{shoulder} = 0.192 \text{ deg/sec}$$

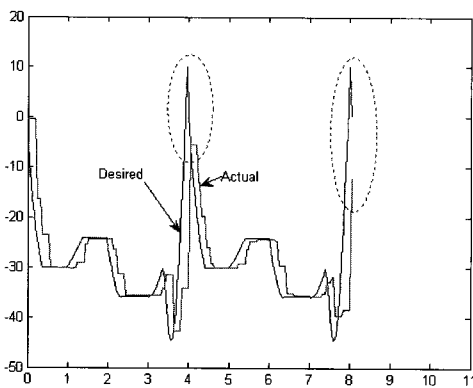
$$\Delta\theta_{max}^{wing} = 0.384 \text{ deg/sec}$$

$$\Delta\theta_{max}^{knee} = 0.384 \text{ deg/sec}$$

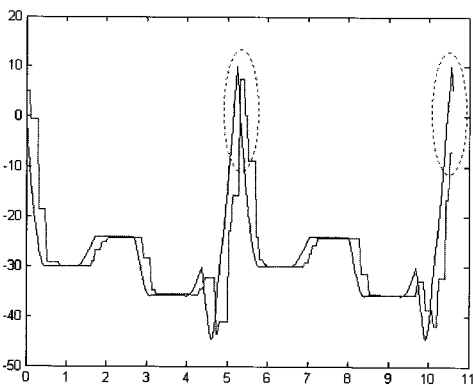
그림 9(a)에서 보인 바와 같이 관절 각속도 명령이 추종가능한 최대 각속도 보다 큰 경우(점선 타원부분)에 추종제어 오차가 커지게 된다. 그러나 샘플내 보간법을 적용한 경우(그림 9(b))에는 중간 샘플에 의해 각속도가 완화되어 추종제어 오차가 줄게 된다. 그림에서 샘플내 보간법을 사용한 경우에 보행주기가 약간 길어졌음을 볼 수 있다.

2. 초기 걸음새 자세에 의한 보폭 개선

앞 3.4절에서 기술한 바와 같이, 이동다리의 운동영역이 어깨 좌표계 중심을 기준으로 앞뒤에 고르게 배분되도록 초기 자세를 취함으로써 보폭을 확대할 수 있다. 그림 10(a)는 초기 자세를 적용한 경우와 적용하지 않은 각각의 경우에 대해서, 관절 역기구학의 기준이 되는 어깨 좌표계를 중심으로 이동다리의 발끝 궤적을 표시한 것이다. 그림 10(a)에서 x 축은 로봇 진행방향을 의미하며, y 방향은 수직방향을 나타낸다. 두 궤적이 겹쳐지지 않도록 하기 위하여 수직방향으로 편차를 두고 그래프를 표시하였다. 수직 점선이 어깨 좌표계 중심선을 나타내며, 검은색 굵은 수평 선분들이 발끝 x 축 궤적 분포를 나타낸다. 초기자세를 적용한 경우가 어깨 좌표계 중심을 기준으로 전후방향(x축 방향)으로 균형있게 배분



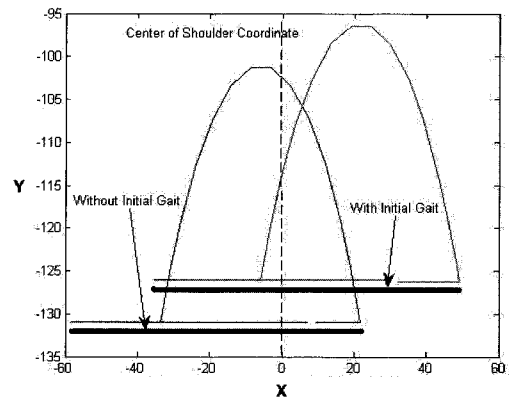
(a)  $\theta_1$  without inter-sample interpolation



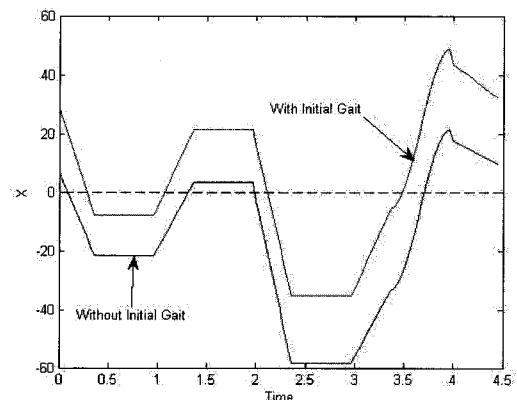
(b)  $\theta_1$  with inter-sample interpolation

그림 9. 1번다리, 1번관절(예) 추종제어 성능개선 (직진 보행 주기 4초, 2 보행주기).

Fig. 9. Tracking control performance of e.g., 1<sup>st</sup> joint of leg 1 (4 sec. of straight walk period, 4sec, Two walks).



(a) x-y(side) trajectory



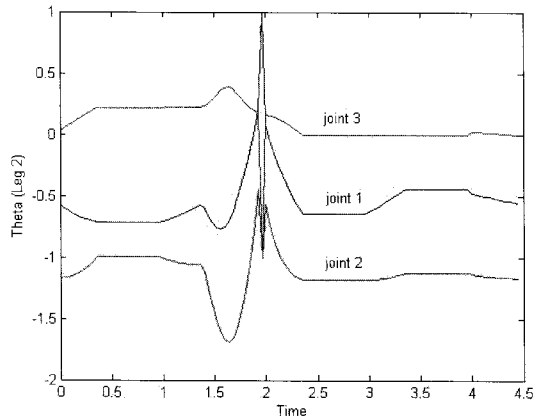
(b) Time-x trajectory

그림 10. 어깨좌표계 중심(점선) 기준 발끝 궤적.

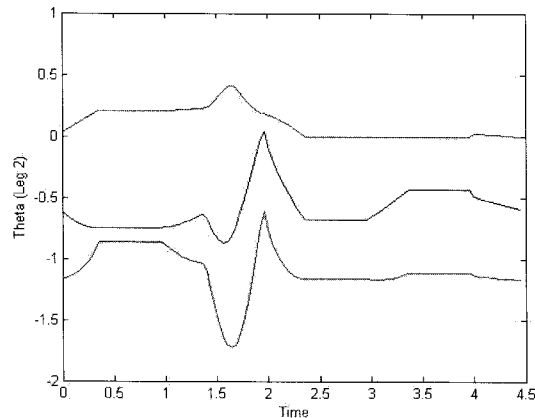
Fig. 10. Tip trajectory in center(dotted line) of shoulder coordinates.

되어 있으며, 이는 시간에 따른 x축 궤적(그림 10(b))에서도 볼 수 있다.

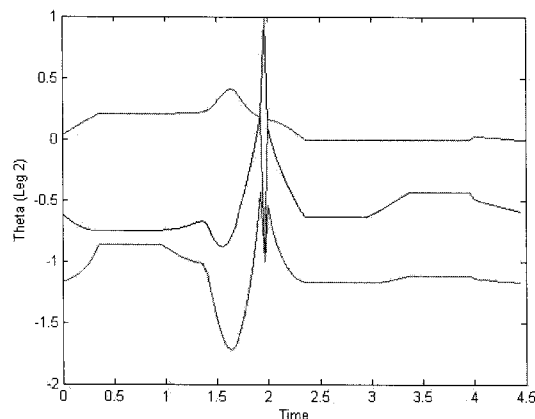
그림 11은 초기자세를 적용한 경우와 적용하지 않은 각각의 경우에 대해서 기구학 한계조건하에서 확보할 수 있는 최대 보폭의 관절궤적을 보여준다. 초기자세를 적용하지 않은 경우에는 보폭 60mm일 때, 역기구학 해가 기구학 한계에 접근하여 특이값(singularity)에 이르는데 비해서, 초기자세를 적용한 경우는 그림 11(b)와 같이 특이값에 이르지 않고 부드러운 궤적을 보인다. 또한 그림 11(c)와 같이 초기자세를 적



(a) Without initial gait posture: stride, 60mm



(a) With initial gait posture: stride, 60mm



(c) With initial gait posture: stride 75mm

그림 11. 초기자세에 의한 보폭확대.

Fig. 11. Enhancement of stride according to initial gait posture.

용한 경우에 보폭 75mm일 때, 역기구학 해가 특이값에 이르게 되었다. 따라서 대상 로봇에 초기자세를 적용했을 때 15mm 정도의 보폭 개선을 이룰 수 있다.

3. 지지다각형 중심 방향 요동운동에 의한 보행안정화

그림 12는 요동운동을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우, 10 걸음 직진 보행에 따른 무게중심 궤적을 컴퓨터시뮬레이션을 통해 얻은 것이다. 그림 4에서 정의한 바와 같이 x축은 로봇의 진행방향이며, z축은 측면방향이다. 요동운동을 적용하지 않은 경우(점선 궤적) 무게중심 궤적이 진행방향으로 직선인 반면, 요동운동을 적용한 경우(실선 궤적)는 무게중심 궤적이 전후좌우로 운동함을 볼 수 있다.

그림 13은 요동운동에 의한 보행안정화 효과를 그래프로 표시한 것이다. 그림에서 보행 안정도는 로봇의 무게 중심점과 지지 다각형 각 변까지 거리의 최소값으로 정의된다[5]. 점선으로 표시된 그래프가 요동운동을 적용하지 않은 것이며, 이 경우 음의 안정성, 즉 무게중심이 지지다각형을 벗어나는 상황이 존재한다. 그러나 요동운동을 적용한 경우는 보행주기 동안 항상 양의 안정성을 보인다.

4. 걸음새 통합 실험

초기자세를 포함하여 직진, 후진, 회전, 계 걸음새등 다양한 걸음새들을 실험을 통해 검증하였다.

- 초기자세: 그림 14는 초기자세를 보여준다. 모든 다리를 같은 각도로 약간 구부린 준비자세 이후, 보폭을 최대화하기

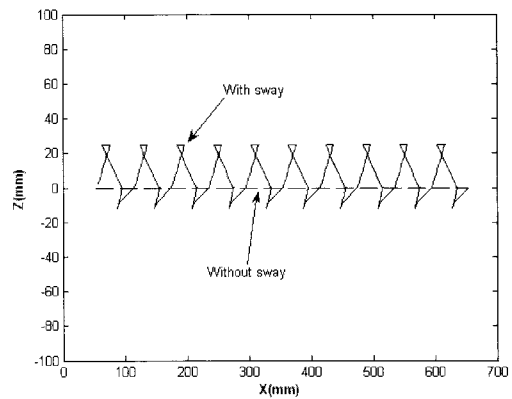


그림 12. 무게중심(COG) 궤적 (10걸음).

Fig. 12. COG trajectory for 10 walks.

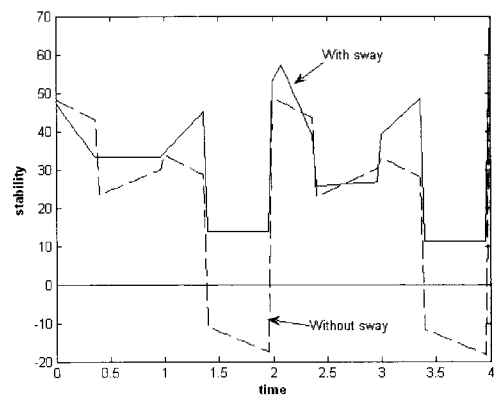


그림 13. 보행 안정도(1걸음, 보행주기 4초).

Fig. 13. Walking stability (1 walk, 4sec. of walk period).

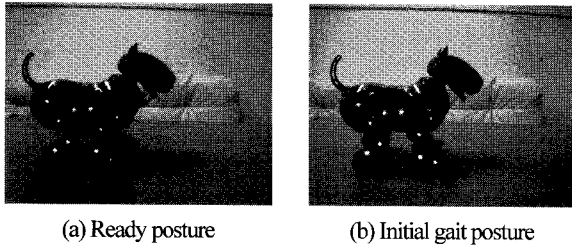


그림 14. 초기자세 과정.

Fig. 14. Procedure for initial gait posture.

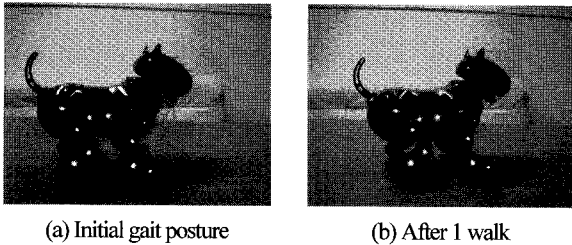


그림 15. 직진 걸음새.

Fig. 15. Forward straight gait.

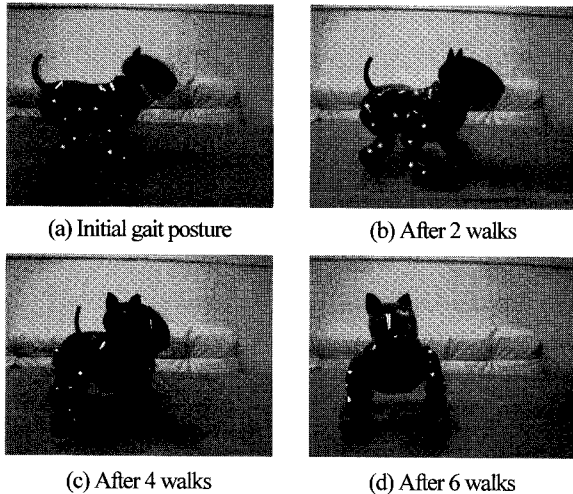


그림 16. 회전 걸음새.

Fig. 16. Rotation gait.

위한 초기자세를 취한다. 초기자세를 준비자세와 비교해서 보면 1번, 즉 오른쪽앞 다리가 앞으로 나와 있음을 볼 수 있다. 이는 미리 가정된 4-2-3-1 다리 이동순서에서 1번 다리가 가장 늦게 이동하게 되므로 미리 앞으로 옮겨 놓은 것이다.

- 직진걸음새: 그림 15는 직진 보행의 초기자세와 1걸음 후의 자세를 보여준다. 보행주기는 4초로 설정하였다.

- 회전걸음새: 그림 16은 회전 걸음새를 보여준다. 보행주기는 6초, 그리고 한 걸음당 회전량은 15도로 설정하였다. 그림 16(d)에서 6걸음 후에 90도로 방향 전환하였음을 볼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 상용화 목적으로 개발한 애완견 로봇을 위한 보행계획 알고리즘을 설계하였다. 애완로봇을 위한 보행

계획은 임베디드 제어기에 탑재가능해야 하고, 온라인 방식으로 보행운동을 생성할 수 있어야 하며, 또한 보행의 신뢰성이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 사전계획에 의한 체계적인 보행운동 설계 방법을 택하였다.

다리에동에 따른 전체 무게중심의 변동을 보상하기 위한 몸체 요동운동을 수정 적용함으로써 보행운동 안정화와 더불어 걸음새 모양을 자연스럽게 할 수 있었으며, 실험을 통해 보행 안정화 효과를 검증하였다. 또한 전역좌표계를 기준으로 로봇의 운동을 기술함으로써 전후진, 회전등 다양한 걸음새를 통합적으로 구현하였으며, 임베디드 제어기에 탑재할 수 있도록 알고리즘을 효율화하였다. 발 끝점의 보행 운동영역을 어깨 좌표계 중심으로 전후 균일하게 배분되도록 미리 엇갈려 놓는 초기 자세 설계를 통해 보폭을 최대화할 수 있었다.

소형 로봇에 있어서는 일반적으로 관절 모터의 사양이 높지 않기 때문에 관절 명령각 추종 오차 문제가 심각할 수 있다. 본 논문에서는 관절 각속도 명령을 완화함으로써 관절구동 모터가 추종 가능하도록 만들기 위한 샘플내 보간법을 제안하였고, 실험을 통해 추종제어 성능을 검증하였다.

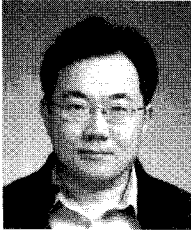
## 참고문헌

- [1] Sony Corporation, Model Information for ERS-7, OPEN-R SDK, 2004.
- [2] 이래경, 박수민, 김형철, 권용관, 강석희, 최병욱, “센서 퓨전을 통한 인공지능 4족 보행 애완용 로봇,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제11권 제4호, pp. 314-321, 2005.
- [3] 최대성, 주충호, 박경희, 김형철, 오세휘, 강석희, 이수영, “지능형 애완로봇 제니보(Genibo),” 한국로봇공학회지, 제5권, 제2호, pp. 4-11, 2008.
- [4] R. McGhee, “Some finite state aspects of legged locomotion,” *Math. Biosci.*, vol. 2, pp. 67-84, 1968.
- [5] S. M. Song and K. J. Waldron, “An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits,” *The Int'l Jour. of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 60-71, 1987.
- [6] B. Min, Analysis of Quadruped Crab Gait and its Application on Adaptive Gait Control, Ph.D. Thesis, KAIST, 1993.
- [7] Y. L. Lee and Z. N. Bien, “A hierarchical strategy for planning crab gaits of a quadruped walking robot”, *Robotica*, vol. 12, Part 1, pp. 23-31, 1994.
- [8] J. Estremera and P. Santos, “Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain,” *IEEE Tr. on Robotics*, vol. 21, no. 6, pp. 1067-1076, 2005.
- [9] S. Chitta and J. Ostrowski, “New insights into quasi-static and dynamic omnidirectional quadrupedal walking,” *Proc. of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawaii, USA, pp. 2306-2311, Oct. 2001.
- [10] K. Yoneda and S. Hirose, “Dynamic and static fusion gait of quadruped walking vehicle on winding path,” *Advanced Robotics*, vol. 9, no. 2, pp. 125-136, 1995.
- [11] G. S. Hornby, S. Takamura, T. Yamamoto, and M. Fujita, “Autonomous evolution of dynamic gaits with two quadruped robots,” *IEEE Tr. on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 402-410, 2005.
- [12] 서기성, 현수환, “관절 공간에서의 GP 기반 진화기법을

이용한 4족 보행로봇의 걸음새 자동생성,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제6호, pp. 573-579, 2008.

[13] G. Golubovic and H. Hu, “Parameter optimisation of an evolutionary algorithm for on-line gait generation of quadruped robots,” *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology*, vol. 1, pp. 221-226, Dec. 2003.

[14] J. Rebula, P. Neuhaus, B. Bonnlander, M. Johnson, and J. Pratt, “A controller for the LittleDog quadruped walking on rough terrain,” *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1467-1473, Apr. 2007.



**이수영**

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997년 2월~1998

년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007. 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇 센서.



**최대성**

1997년 2월 서울시립대학교 정밀기계공학과(공학사). 1999년 2월 고려대학교 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 ㈜다사로봇 책임연구원. 관심분야는 지능형 서비스 로봇, 엔터테인먼트 로봇.

**최병욱**

제어·로봇·시스템학회 논문지 제14권 제11호 참조.