목표 ZMP 궤적 기반 휴머노이드 로봇 이족보행의 최적 관절궤적 생성

Optimal Joint Trajectory Generation for Biped Walking of Humanoid Robot based on Reference ZMP Trajectory

최 낙 윤¹, 최 영 림², 김 종 욱[†]

Choi Nak-Yoon¹, Choi Young-Lim², Kim Jong-Wook[†]

Abstract Humanoid robot is the most intimate robot platform suitable for human interaction and services. Biped walking is its basic locomotion method, which is performed with combination of joint actuator's rotations in the lower extremity. The present work employs humanoid robot simulator and numerical optimization method to generate optimal joint trajectories for biped walking. The simulator is developed with Matlab based on the robot structure constructed with the Denavit-Hartenberg (DH) convention. Particle swarm optimization method minimizes the cost function for biped walking associated with performance index such as altitude trajectory of clearance foot and stability index concerning zero moment point (ZMP) trajectory. In this paper, instead of checking whether ZMP's position is inside the stable region or not, reference ZMP trajectory is approximately configured with feature points by which piece-wise linear trajectory can be drawn, and difference of reference ZMP and actual one at each sampling time is added to the cost function. The optimized joint trajectories realize three phases of stable gait including initial, periodic, and final steps. For validation of the proposed approach, a small-sized humanoid robot named DARwIn-OP is commanded to walk with the optimized joint trajectories, and the walking result is successful.

Keywords: Biped Walking, Zero Moment Point, Optimization, Humanoid Robot, Particle Swarm Optimization

1. 서 론

휴머노이드 로봇은 인간을 모방한 외관과 관절 구조를 갖추고 있으며 문턱이나 계단이 있는 주거환경에서 이동하기에 용이하므로 각종 지능형 서비스, 교육, 엔터테인먼트, 가사 보안 등의 인간 친화형 기능들을 수행하는 데 가장 적합한 로봇 플랫폼이다.

휴머노이드 로봇의 주된 이동 방법은 이족보행으로서, 크게 영모멘트점(ZMP) 기반 보행^[1-6]과 수동 동보행(passive dynamic walking) 기법^[7-9]으로 구분할 수 있다. 어떤 폐회로 시스템의 모든 극점이 s -평면의 좌반면에 있을 때 그 시스템이 안정하다고 판별하는 것처럼, 휴머노이드 로봇의 경우 어떤 시점의 ZMP가 지면에 접지한 발바닥이 만드는 지지다각형(support polygon, SP)안에 존재할 때 안정적인 자세라고 판별하는 것이 ZMP 기반 이족보행이다.

이에 비해 수동 동보행 기법은 인간의 보행을 진자가 앞뒤로 흔들리는 운동과 유사하다고 간주하고 최소한의 에너지로 소요하는 원리로 보행하게 함으로써 인간의 보행과 유사한 패턴을 보이지만, 휴머노이드 로봇은 단순히 직립 보행만 하는 것이 아니라 무거운 짐을 옮기거나 평평하지 않은 바닥에서도 안정되게 보행할 수 있어야 하므로 ZMP 기반 보행이 유리하다. 이를 위해서는 로봇 전신에 대해 각

Received : Dec. 15. 2012; Reviewed : Jan. 20. 2013; Accepted : Apr. 4. 2013

※ This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science, and Technology (KRF-2010-0010463) and partly supported by the Human Resource Development of the Korean Institute Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea Government Ministry of Knowledge Economy (No. 20114030200030).

¹ Hwashin Co., Ltd (1110410@hwashin.co.kr)

² Kwang-Won Meditec Co., Ltd (lotuswave@hotmail.com)

[†] Corresponding author: Electronic Engineering, Dong-A University, Hadan-2-Dong, Saha-Gu, Busan, Korea (kjwook@dau.ac.kr)

링크 좌표계의 위치와 방향을 기구학적으로 계산하고, 각 링크 무게중심점의 위치와 질량을 기반으로 ZMP를 계산할 수 있어야 한다.

최근에 로보티즈사^[10]의 바이올로이드(Bioloid)를 대상으로 휴머노이드 로봇의 3차원 전신에 대해 DH법으로 기구학적인 모델링을 하고, 이를 기반으로 이족보행과 방향틀기, 앞차기 등의 동작을 입자군집최적화(particle swarm optimization, PSO)기법을 적용해서 컴퓨터 상에서 자동으로 생성하는 방법에 관한 체계적인 연구가 수행되었다^[6]. 이 책에서는 주기적 이족보행의 시작과 종료자세를 보폭(step length)에 따라 미리 최적화한 후, 하체와 상체의 관절들의 궤적을 표현하는 혼합다항식(blending polynomial)의 계수들을 최적값으로 조절함으로써 정확한 보폭으로 안정적인 보행을 할 수 있게 했다. 이 방법에서는 보행 안정도를 확인하기 위해 지지하는 다리의 발바닥이 만드는 지지다각형(SP)안에 샘플링 시점의 ZMP가 위치하면 0, 그렇지 않으면 SP를 이탈한 ZMP와 SP간의 최근접 거리에 비례한 벌칙 값을 부여하게 했다. 이 경우 ZMP가 SP 안에서 전후로 크게 왕복해도(상체를 크게 앞뒤로 흔들어도) 비용 함수에 전혀 영향을 미치지 못하므로 부자연스러운 보행 패턴을 최적의 결과로 생성시키는 문제가 있다. ZMP는 안정도 여부뿐만 아니라 로봇의 순시적인 자세에 대한 정보도 담고 있으므로, 최적화 시 부드럽고 안정된 보행에 대응되는 ZMP 궤적을 추종하게 하면 인간과 유사한 보행 패턴을 생성할 수 있다.

본 논문에서는 인간이 양팔과 양다리를 쭉 펴고 직립한 자세로 보행을 시작해서 다시 그 자세로 종료하는 것을 구현하기 위해 전체 보행을 3단계로 구분하고, 각각에 대한 목표 ZMP 궤적과 이동하는 발의 목표 고도 궤적을 생성하고 이를 추종하게 하는 최적 관절궤적을 PSO^[11]로 생성하는 방법을 제안한다. 그리고 최적화된 관절궤적을 휴머노이드 로봇 플랫폼인 DARwIn-OP에 적용하여 보폭과 속도별 이족보행을 구현함으로써 로봇에의 적용 가능성을 검증한다.

2장에서는 DARwIn-OP에 대해 DH법을 적용하여 전신을 모델링한 것을 설명하고, 3장에서는 PSO를 이용해서 최적 보행궤적을 생성하는 방법을 설명한다. 4장에서는 제안된 방법으로 계산한 보행 단계별 관절궤적을 이용해서 이족보행을 시뮬레이션하고 DARwIn-OP에 적용한 결과를 보인다. 5장에서는 본 논문에 대한 결론과 향후 연구에 대해서 논한다.

2. 휴머노이드 로봇 모델링

이 장에서는 본 논문에서 휴머노이드 로봇의 플랫폼으로 사용되는 DARwIn-OP의 신체 규격과 링크-관절 구조를 따라 기구학적 모델링을 수행한다.

그림 1은 DARwIn-OP의 외관을 나타내는데, 내장 PC는 1.6GHz 인텔 Z530 온보드(4GB flash SSD)이며 제어기는 ARM Cortex-M3 STM32F103RE(72MHz)이다. 각 관절의 액추에이터로는 DYNAMIXEL MX-28을 사용하며, 양 다리에 각 6개, 양 팔에 각 3개, 목에 2개가 장착되어 있어서 총 20개에 이른다. DARwIn-OP의 센서로는 3축 자이로센서, 3축 가속도센서, 2개의 감지 마이크 등이 있어서 이족보행에 필요한 센서들을 모두 갖추고 있다^[10].

휴머노이드 로봇은 복잡한 구조의 다관절 로봇이므로 DH법을 이용해서 각 링크 좌표계의 원점과 방향을 계산할 수 있다. 그림 2는 인접한 $x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ 좌표계와 $x_i y_i z_i$ 좌표계 사이의 관계를 규정하는 4개의 DH 파라미터를 보이는데, δ_i , α_i , d_i , a_i 는 각각 관절각, 링크 비틀림, 링크 오프셋, 링크 길이를 나타낸다^[12].

그림 3은 왼쪽 다리로 서 있는 휴머노이드 로봇의 전신

Fig. 1. Appearance of the robot platform DARwIn-OP

Fig. 2. DH parameters for two adjacent coordinate frames

을 링크와 관절로 표현한 모델을 보이며, 시상면(sagittal plane)의 관절변수로는 $\theta \sim \theta_{10}$, 관상면(coronal plane)의 관절변수로는 $\phi \sim \phi_6$, 횡평면(transversal plane)의 관절변수로는 ψ_1, ψ_2 가 사용되어서 전체 관절변수는 18개에 이른다. 참고로 머리에 위치한 팬-틸트 모터는 보행 시 고정시켰으므로 그림 3에서 모델링하지 않았다.

휴머노이드 로봇의 하체를 모델링할 때 주의할 점은 지지하는 다리에 따라 기준좌표계가 달라지므로 관절변수의 위치가 좌측에서 우측으로 상호 교환되고, 고관절의 링크 구조 상 DH법을 바로 적용할 수 없다는 점이다.

첫 번째 문제는 관절변수를 관절기하각과 관절모터각으로 분리해서 정의하면 해결된다. 관절기하각은 그림 3과 같이 지지하는 다리의 발목을 기준좌표계로 잡고 DH법에 따라 각도를 정의한 변수이고, 관절모터각은 각 관절에 고유하게 할당된 모터의 회전각 변수로서 직립자세일 때를

0°로 설정했다.

관절기하각과 관절모터각은 서로 연관되어 있으므로 상호 변환할 수 있다. 그림 4는 왼발 지지 시 발목과 무릎에 위치한 관절기하각과 관절모터각을 예시하며 관절변수 간에는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta'_{an}, \theta_2 = \theta'_{kn} \quad (1)$$

식에서 θ'_{an} 과 θ'_{kn} 은 왼쪽다리의 발목과 무릎의 관절모터각을 각각 나타낸다. 오른쪽발 지지할 경우 식 (1)은 다음과 같이 위치자만 r 로 바뀐다.

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta'_{an}, \theta_2 = \theta'_{kn} \quad (2)$$

다른 모든 관절에 대해서도 이와 같이 관절모터각을 관절기하각에 대해 정의한다. 최적화는 주요 관절모터각을 대상으로 수행하고 시뮬레이션 할 때는 이로부터 변환된 관절기하각을 이용한다.

두 번째로, 고관절에 DH법 적용 시 발생하는 문제를 해결하기 위해 DH법을 만족시키는 임시 좌표계를 설정하고 그 좌표계로부터 추가적으로 회전변환을 하여 목표 좌표계로 변환하는 방법을 이용했다. 그림 5는 그림 3(a)의 왼쪽 고관절 부위를 확대한 그림으로, 굵은 선으로 표시된 x_5 축은 z_5 축과 일렬로 정렬되어 DH법을 적용할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 3. Full-body 3D stick diagram of the humanoid robot suited to DARwin-OP's body structure

Fig. 4. Relationship between the joint geometric angles and the joint motor angles

Fig. 5. DH Coordinate frames located at the left hip joint

이를 해결하기 위해 DH법을 만족시키는 임시 좌표계를 그림에서와 같이 $x'_5 y'_5 z'_5$ 좌표계로 명명하고, 그에 해당하는 DH변환행렬을 B_5 라고 한다. 이후 인접좌표계인 $x_5 y_5 z_5$ 좌표계와 $x'_5 y'_5 z'_5$ 좌표계 간의 회전변환행렬을 다음과 같이 B_5 이후에 후행승산(post-multiplication)하면 기준좌표계로부터 측정한 $x_5 y_5 z_5$ 좌표계 상의 한 점 P_5 의 좌표인 P_5^0 를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_5^0 &= T_4^0 B_5 \begin{bmatrix} x_5 \cdot x'_5 & y_5 \cdot x'_5 & z_5 \cdot x'_5 & 0 \\ x_5 \cdot y'_5 & y_5 \cdot y'_5 & z_5 \cdot y'_5 & 0 \\ x_5 \cdot z'_5 & y_5 \cdot z'_5 & z_5 \cdot z'_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_5 \\
 &= T_4^0 B_5 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_5 = T_4^0 B_5 M_1 P_5 = T_5^0 P_5
 \end{aligned} \quad (3)$$

식에서 T_k^0 는 기준좌표계부터 k 번째 좌표계까지의 DH변환을 누적해서 표현하는 복합변환행렬을 나타내고, M_1 은 추가적으로 곱해진 동차변환을 의미한다. 반대편 고관절에서도 동일한 원리로 임시 좌표계를 이용해서 좌표계 변환을 할 수 있으며, 추가 동차변환행렬 M_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Table 1. DH parameters for the lower body link coordinates of DARwin-OP

DH Matrix	δ_i	d_i	a_i	α_i	M
B_1	$\phi_1 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$	
B_2	$-\theta_1 + \frac{\pi}{2}$	0	l_1	0	
B_3	$-\theta_2$	0	l_2	0	
B_4	$-\theta_3$	0	0	$-\pi/2$	
B_5	ϕ_2	0	l_3	0	M_1
B_6	ψ_1	0	l_4	0	
B_7	ψ_2	0	0	$-\pi/2$	M_2
B_8	$\phi_3 - \pi/2$	0	0	$-\pi/2$	
B_9	$-\theta_4 + \pi$	0	l_6	0	
B_{10}	$-\theta_5$	0	l_7	0	
B_{11}	$-\theta_6$	0	0	$\pi/2$	
B_{12}	ϕ_4	0	l_8	0	

표 1과 표 2는 원발 지지 시 DARwin-OP의 하체와 상체의 링크 좌표계에 대한 DH 파라미터들을 정리한 것으로 $l_1 \sim l_{12}$ 는 링크 길이를 의미하며 그림 3에 정의되어 있다.

로봇 상체의 링크 좌표계는 지지하는 다리와 상관없이 DH법으로 표현되지만 기준이 되는 골반좌표계(그림 3(b)의 $x_6 y_6 z_6$ 좌표계)가 지지하는 다리에 따라 달라지므로, $x_6 y_6 z_6$ 좌표계와 $x_{13} y_{13} z_{13}$ 좌표계 간의 동차변환행렬이 달라져야 한다. 이에 대한 자세한 내용은 [6]을 참고하기 바란다.

3. 최적 이족보행 관절 궤적 생성

3.1 이족보행

휴머노이드 로봇은 인간처럼 두 다리로 일정한 보폭과 발 높이, 속도를 유지하며 걸어가야 한다. 이족보행시 한쪽 다리를 지면에서 떼 순간 인체는 역진자(inverted pendulum) 상태가 되므로 불안정한 시스템이 된다. 로봇이 자연스럽게 보행하기 위해서는 다리를 뺄으면서 앞으로 상체를 이동시켜야 하는데 이 때 순간적으로 ZMP가 SP를 벗어나게 된다. 그러므로 자연스러운 보행은 안정상태와

Table 2. DH parameters for the upper body link coordinates of DARwin-OP

DH Matrix	δ_i	d_i	a_i	α_i
B_{14}	$-\theta_7$	0.024	0.016	$\pi/2$
B_{15}	$\phi_3 - \pi$	0	l_9	$-\pi/2$
B_{16}	$-\theta_8$	0	l_{10}	0
B_{18}	$-\theta_9$	-0.024	0.016	$\pi/2$
B_{19}	$\phi_6 - \pi$	0	l_{11}	$-\pi/2$
B_{20}	$-\theta_{10}$	0	l_{12}	0

불안정상태를 교차하며 이루어진다고 할 수 있다.

일반적으로 안정된 이족보행을 위해서는 전신의 관절 모터들이 다음의 조건을 모두 만족시켜야 한다.

- C1) ZMP 궤적은 지지하는 다리의 SP 내에 최대한 머물러야 한다.
- C2) 관절 모터는 허용된 각도 이내에서만 회전해야 한다. 예를 들어 그림 4의 θ_{kn}^l 은 항상 양이어야 함.
- C3) 보행 중에 들어올린 발은 항상 지면보다 높아야 한다.

로봇 운용 시간을 최대화하기 위해 모터의 소비전력은 최소화여 하는데, 이를 위해서는 관절모터가 최대한 부드럽게 회전해야 한다. 또한 평면별로 관절의 회전특성이 다양하므로(예를 들어 관상면 발목관절인 ϕ 의 경우 관절궤적이 0° 에서 시작해서 일정각을 충분한 시간동안 유지하다가 다시 0° 로 복귀해야 함), 일반적으로 고차원의 다항함수로 궤적을 표현해야 한다. 그러나 고차원 함수의 계수들을 최적화하는 것은 탐색 범위 설정과 수치해석적 안정성 면에서 약점이 있으므로 본 논문에서는 궤적 형상을 생성하기가 용이하고 계수 값이 직관적인 혼합다항식(blending polynomial)을 이용해서 궤적을 수식화한다^[13].

혼합다항식은 궤적함수 $q(t)$ 를 몇 개의 경유점(via point)으로 시분할하여 구간(segment)을 만들고, 각 경유점의 경계조건을 이용해서 3차 다항식으로 $q(t)$ 의 각 구간을 근사화하는 함수이다. 그림 6은 $t \in [t_0, t_f]$ 를 두 경유점 t_1 과 t_2 로 분할하여 세 개의 구간을 만든 예를 보이며 m 번

Fig. 6. Blending polynomial composed of three segments and two via points at t_1 and t_2

째 구간에서 함수 $q(t)$ 는 다음과 같은 3차 다항함수로 근사화된다.

$$q_m(t) = a_0^m + a_1^m t + a_2^m t^2 + a_3^m t^3, \quad t \in [t_0^m, t_f^m] \quad (5)$$

식에서 $a_i^m, i=0, \dots, 3$ 은 계수이며 다음과 같이 구간의 경계조건으로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} q_m(t_0^m) &= q_0^m, q_m(t_f^m) = q_f^m, q'_m(t_0^m) = v_0^m, q'_m(t_f^m) = v_f^m \\ a_0^m &= q_0^m, \quad a_1^m = v_0^m, \\ a_2^m &= \frac{3(q_f^m - q_0^m) - (2v_0^m + v_f^m)(t_f^m - t_0^m)}{(t_f^m - t_0^m)^2}, \\ a_3^m &= \frac{2(q_0^m - q_f^m) + (v_0^m + v_f^m)(t_f^m - t_0^m)}{(t_f^m - t_0^m)^3}. \end{aligned} \quad (6)$$

식에서 t_0^m 과 t_f^m 은 m 번째 구간의 시작점과 끝점을 나타내며, 그림 6의 첫 번째 구간의 경우 t_0 과 t_1 , 두 번째 구간의 경우 t_1 과 t_2 , 세 번째 구간의 경우 t_2 과 t_3 가 된다. 식에서 미지수는 두 경유점에서의 각도와 각속도 조건인 $q_0^m, q_f^m, v_0^m, v_f^m$ 이고, 이 값들을 최적화 알고리즘으로 탐색한다. 경유점 당 2개의 미지수가 필요하며, 이웃한 두 구간은 한 개의 경유점을 공유하므로 어떤 궤적을 M 개의 구간으로 분할한다면 $2(M+1)$ 개의 미지수를 최적화해야 한다.

본 논문에서는 들어올린 발이 원하는 높이가 되게 하기 위해 특정 궤적을 따라가도록 PSO로 최적화한다. 그림 7은 0.02m 높이만큼 들어올린 발의 목표 궤적을 3-구간 혼합다항식으로 표현한 것을 보인다. 인간의 경우 들어올린

Fig. 7. Reference altitude trajectory of the swing foot during walking

발 높이의 궤적은 정규분포의 형태를 보이므로 이와 유사한 궤적을 그리기 위해 그림 7의 궤적 파라미터를 다음과 같이 정했다.

$$\begin{aligned} t_0 &= 0, t_1 = 0.45T, t_2 = 0.55T, t_f = T, \\ q(t_0) &= 0, q(t_1) = q(t_2) = 0.02, q(t_f) = 0, \\ q'(t_0) &= q'(t_1) = q'(t_2) = q'(t_f) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 PSO

PSO는 Kennedy와 Eberhart에 의해 제안된 전역최적화 기법으로서, 조류나 어류 등의 무리가 서로의 정보를 공유하면서 먹이를 찾아가는 과정을 흉내 낸 자연모방형 알고리즘이다^[11]. PSO는 무리 내의 각 개체가 가지고 있는 최적해 정보와 무리 전체가 가지고 있는 최적해 정보를 기초로 하여 각 개체가 행동한다는 개념을 최적화 과정에 도입했다. PSO는 알고리즘이 간단하고 계산시간이 짧으며 대량의 메모리가 필요 없는 장점이 있다.

PSO에서 각 개체(에이전트)들은 탐색 시작 후 자신들이 발견한 해 중 가장 좋은 해의 위치 벡터인 $\mathbf{p}_{best}$ 와 그 비용함수 값 $J(\mathbf{p}_{best})$ 를 메모리에 저장한다. 그리고 집단 전체에서 발견한 해 중에서 가장 좋은 해의 위치벡터인 $\mathbf{g}_{best}$ 와 비용함수 값 $J(\mathbf{g}_{best})$ 를 개체 간에 공유한다. 전체 집단 중 k 번째 개체는 이러한 $\mathbf{p}_{best}^k$ 와 $\mathbf{g}_{best}$ 의 정보를 이용하여 아래 식 (8)과 (9)에 의해 다음 반복(iteration) 차수에서의 속도 벡터 $\mathbf{v}_k^{next}$ 와 위치 벡터 $\mathbf{s}_k^{next}$ 를 계산한다^[11].

$$\mathbf{v}_k^{next} = w\mathbf{v}_k^{now} + c_1r_1(\mathbf{p}_{best}^k - \mathbf{s}_k^{now}) + c_2r_2(\mathbf{g}_{best} - \mathbf{s}_k^{now}), \quad (8)$$

$$\mathbf{s}_k^{next} = \mathbf{s}_k^{now} + \mathbf{v}_k^{next}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

식에서 w 는 속도의 관성 가중치(inertial weight)를, c_1 과 c_2 는 학습요인(learning factor)의 가중치 계수를 나타내며, r_1 과 r_2 는 0과 1 사이에서 발생시킨 균일분포(uniformly-distributed) 랜덤 값을 나타낸다.

3.3 비용함수

휴머노이드 로봇이 안정된 보행을 하기 위해서는 보행 특성에 따라 각 관절 모터에 목표 회전각 궤적을 명령 값으로 보내야 하고, 해당 관절 모터가 그 값들을 잘 추종하게 하는 제어기가 있어야 한다. 본 논문에서는 완성된 이족보행을 위해 차려자세에서 시작해서 차려자세로 끝나는 목표 관절 회전각 궤적을 생성하는 방법을 제안한다. 이를 위해 세가지 보행단계를 고려해야 한다.

- G1) 초기 보행: 차려자세로 시작해서 보행준비자세로 끝남
- G2) 주기 보행: 보행준비자세로 시작해서 발을 바꾼 보행준비자세로 끝남
- G3) 최종 보행: 보행 준비자세로 시작해서 차려자세로 끝남

본 논문에서는 각 보행단계에 대해 목표 ZMP 궤적을 직선형태로 만든 후 최적화 단계에서 이를 추종하게 만드는 주요 관절 궤적의 파라미터를 찾는 방법을 제안한다.

그림 8은 왼발 지지 상태를 기준으로 세 가지 경우에 대한 목표 ZMP 궤적을 직선을 이어 붙여서 생성한 것을 보인다. 그림에서 점 A는 보행 시작 시 ZMP를 나타내며 이 때 로봇은 양측지지상태(double support phase, DSP)에 있다. 점 A 직후에 로봇은 오른발을 들어올리므로 단측지지상태(single support phase, SSP)가 되고, B점은 안정된 자세를 만들기 위해 중심을 충분히 왼쪽으로 이동시켰을 때의 ZMP를 나타낸다. 이후 로봇은 ZMP를 점 C까지 이동시키며 앞으로 나아가는 데, 이 때 로봇은 지지하는 다리의 관상면 발목 각도를 유지하며 오른발을 앞으로 뻗는다. 마지막으로 점 D에서 오른발을 착지함으로써 다시 DSP상태가 된다.

표 3은 각 보행단계 별 목표 ZMP 궤적 경유점의 시공간 좌표를 나열한 것이며, T 는 보행 주기, S 는 로봇의 목표

Fig. 8. Reference ZMP trajectories for three gait phases

보폭, l_4 는 골반의 링크 길이를 나타낸다. 표에서 점 B와 C의 시간 경유점을 $T/5$ 와 $4T/5$ 로 잡은 이유는 인간의 평균 보행속도(1.36m/s로서 DARwIn-OP로 환산 시 약 0.4m/s)보다 실험에서 구현한 로봇 보행 속도가 느리며, 보행 속도가 느려질수록 DSP 시간(A-B, C-D구간) 비율이 늘어나기 때문이다. 인간은 DSP와 SSP의 비율이 평균속도로 보행 시 약 6:4이며, A-B 구간과 B-C 구간, C-D 구간의 비율은 약 1:4:1이다^[14]. 주의할 점은 인간은 A-B 구간과 C-D 구간에서 DSP 상태로 몸의 무게중심만을 앞으로 이동하지만, 로봇의 경우 착지의 불안정성을 해소하기 위해 지면과 평행하게 착지하게 했고 이 때문에 보행 주기에서 DSP의 비율은 10% 정도밖에 되지 않는다는 점이다.

그림 8에서 점 A의 시공간 좌표를 (t_0, x_0, y_0) , 점 B의 시공간 좌표를 (t_1, x_1, y_1) , 점 C의 시공간 좌표를 (t_2, x_2, y_2) , 점 D의 시공간 좌표를 (t_3, x_3, y_3) 라고 명명하면 특정 시점 t 에서의 목표 ZMP 궤적의 2차원 좌표는 다음 관계식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{zmp}^r(t) &= x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}(t - t_i), \\ y_{zmp}^r(t) &= y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i}(t - t_i), \\ t_i &\leq t < t_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2 \end{aligned} \quad (10)$$

ZMP가 점 A-B-C-D를 통과하면 한 스텝의 보행이 완성된다. 그 다음 스텝은 보행시작의 경우 그림 8(a)에서 보듯이 ZMP가 점 D-E-F-G를 통과하게 하면 되고, 주기 보행의 경우 왼쪽 다리에 있던 모터의 관절궤적을 오른쪽 다리로 상호 교환하여 반복하면 된다. 최종 보행의 경우 그림 8(c)와 같이 ZMP가 점 A-B-C-D를 통과하면 차려자세로 종결하는 보행이 된다.

PSO를 이용한 효율적인 탐색을 위해 3.1절에서 설명한 이족보행을 위한 관절모터의 한계각도 조건들과 목표 ZMP궤적의 추종 정도, 들어올린 발의 높이 조건들을 모두 만족시킬 수 있도록 비용함수를 다음과 같이 벌칙함수(penalty function)를 이용해서 설계했다.

Table 3. (t, x, y) coordinates of reference ZMP points

	Initial step	Periodic step	Final step
A	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)$	$(0, 0, 0)$
B	$\left(\frac{T}{5}, 0, \frac{l_4}{2}\right)$	$\left(\frac{T}{5}, \frac{S}{4}, \frac{l_4}{2}\right)$	$\left(\frac{T}{5}, \frac{S}{4}, \frac{l_4}{2}\right)$
C	$\left(\frac{4T}{5}, \frac{S}{4}, \frac{l_4}{2}\right)$	$\left(\frac{4T}{5}, \frac{3S}{4}, \frac{l_4}{2}\right)$	$\left(\frac{4T}{5}, \frac{S}{2}, \frac{l_4}{2}\right)$
D	$\left(T, \frac{S}{2}, 0\right)$	$(T, S, 0)$	$\left(T, \frac{S}{2}, 0\right)$

$$\begin{aligned} J &= w_a P_a + w_s P_s + w_{zmp} J_{zmp} + w_h J_h \\ P_a &= \begin{cases} P_a + 1, & \text{if } \theta_{kn}^l(t_i) > \frac{\pi}{2} \text{ or } \theta_{kn}^l(t_i) < 0 \\ P_a + 1, & \text{if } \theta_{kn}^r(t_i) > \frac{\pi}{2} \text{ or } \theta_{kn}^r(t_i) < 0 \end{cases} \\ P_s &= P_s + 1, \text{ if } fh(t_i) < 0, \\ J_{zmp} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{|x_{zmp}^r(t_i) - x_{zmp}(t_i)|}{\max x_{zmp}^r} + \frac{|y_{zmp}^r(t_i) - y_{zmp}(t_i)|}{\max y_{zmp}^r} \right\} \\ J_h &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|fh_{ref}(t_i) - fh(t_i)|}{\max fh_{ref}}, \quad 0 \leq t_i \leq T \end{aligned} \quad (11)$$

식에서 t_i 와 N 은 i 번째 샘플링 시간과 샘플 개수를 각각 의미하고, x_{zmp} 와 y_{zmp} , fh 는 ZMP의 x 좌표와 y 좌표, 발 높이를 나타낸다. w_a 와 w_s 는 한계각(limit angle)과 발높이(step height)와 관련된 벌칙 가중치 계수로서 100이라는 큰 값을 부여했다. w_{zmp} 와 w_h 는 정규화된(normalized) 목표 ZMP(x_{zmp}^r 와 y_{zmp}^r) 추종오차와 목표 발높이(h_r) 추종오차의 값에 곱해지는 가중치 계수로서 3과 1로 각각 설정했다. 그리고 $\theta_{kn}^l, \theta_{kn}^r$ 은 왼쪽과 오른쪽 무릎의 관절각을 각각 의미한다. ZMP는 i 번째 링크의 무게중심점의 절대좌표가 $C_i = [c_i^x \ c_i^y \ c_i^z \ 1]^T$ 이고 링크 질량이 일 때 다음과 같이 간략화된 식으로 계산할 수 있다^[6].

Table 4. Optimization variables necessary for biped walking

Variable name	Meaning
SAG_AN_L_MID_ANG	Mid-angle of the left ankle joint's rotation in the sagittal plane
SAG_KN_L_MID_ANG	Mid-angle of the left knee joint's rotation in the sagittal plane
SAG_HP_R_MID_ANG	Mid-angle of the right hip joint's rotation in the sagittal plane
SAG_KN_R_MID_ANG	Mid-angle of the right knee joint's rotation in the sagittal plane
SAG_AN_L_MID_VEL	Mid-velocity of the left ankle joint's rotation in the sagittal plane
SAG_KN_L_MID_VEL	Mid-velocity of the left knee joint's rotation in the sagittal plane
SAG_HP_R_MID_VEL	Mid-velocity of the right hip joint's rotation in the sagittal plane
SAG_KN_R_MID_VEL	Mid-velocity of the right knee joint's rotation in the sagittal plane
COR_AN_L_MID_TIME1	First mid-time of the left ankle joint's rotation in the coronal plane
COR_AN_L_MID_TIME2	Second mid-time of the left ankle joint's rotation in the coronal plane
COR_AN_L_MID_ANG	Mid-angle of the left ankle joint's rotation in the coronal plane
SAG_SH_L_MID_ANG	Mid-angle of the left shoulder joint's rotation in the sagittal plane
SAG_SH_R_MID_ANG	Mid-angle of the right shoulder joint's rotation in the sagittal plane
SAG_SH_L_MID_VEL	Mid-velocity of the left shoulder joint's rotation in the sagittal plane
SAG_SH_R_MID_VEL	Mid-velocity of the right shoulder joint's rotation in the sagittal plane

Fig. 9. Simulation of a periodic step using the optimized joint trajectories

$$\begin{aligned}
 x_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{20} m_i (\ddot{c}_i^z + g) c_i^x - \sum_{i=1}^{20} m_i \ddot{c}_i^x c_i^z}{\sum_{i=1}^{20} m_i (\ddot{c}_i^z + g)} \\
 y_{ZMP} &= \frac{\sum_{i=1}^{20} m_i (\ddot{c}_i^z + g) c_i^y - \sum_{i=1}^{20} m_i \ddot{c}_i^y c_i^z}{\sum_{i=1}^{20} m_i (\ddot{c}_i^z + g)}
 \end{aligned} \quad (12)$$

식에서 g 는 중력가속도를 나타낸다.

탐색해야 할 변수의 수를 최소화하기 위해 보행 시작 및 완료자세의 관절각도를 보폭 별로 미리 계산했으며, 이 경우의 미지수는 로봇 하체의 4개 관절모터각 뿐이므로 PSO로도 실시간으로 계산할 수 있다. 또한 부드러운 시작과 착지를 위해 초기와 최종 각속도는 0으로 설정했으므로, 최적화 변수는 2-세그먼트 혼합다항식으로 표현되는 관절의 경우 중간각도와 중간각속도 값이 되고, 3-세그먼트 혼합다항식으로 표현되는 관절의 경우 첫 번째 중간시간과 두 번째 중간시간, 첫 번째 중간각도 값이 된다.

DARwIn-OP 로봇의 특성을 고려해서, 보행하는 동안 시상면의 상체 각도는 앞으로 10도 정도 기울게 했고, 관상면의 상체는 왼발지지 시 왼쪽으로 최대 15도, 오른발지지 시 오른쪽으로 최대 15도 기울어지게 했다. 이는 인간의 보행 자세를 모방한 것으로 머리에 위치한 카메라 영상의 흔들림을 감소시키면서 관상면 고관절 모터에 걸리는 상체의 중량 부하를 감소시켜 주는 효과가 있다. 이런 각도 조건들에 신체의 대칭성을 추가적으로 이용함으로써 최적화 변수는 왼발 지지 기준으로 표 4에 나타난 바와 같이 15개로 감소했다.

4. 이족보행 시뮬레이션 및 구현

본 논문에서는 목표 ZMP를 추종하도록 보행의 3단계에 대한 최적 파라미터들을 PSO를 이용해서 탐색했다.

(a) joint angle trajectories in sagittal plane

(b) joint angle trajectories in coronal plane

Fig. 10. Optimized joint angle trajectories for periodic step with the length of 5cm

Fig. 12. Comparison of ZMP trajectories for three phases of walking with step length of 5cm and period of 2 seconds.

PSO 에이전트의 수는 40, 최대 반복회수를 100회로 정했고, 목표 보행 조건은 다음과 같다.

- 보행 주기(T): 1초/2초
- 샘플링 시간: 0.1초($T=2$ 초)/0.05초($T=1$ 초)
- 최대 발높이: 2cm
- 보폭: 3cm/5cm

그림 9는 구해진 최적 관절궤적을 이용해서 Matlab으로 시뮬레이션 한 것을 보이며, 그림 10과 11에 시상면과 관상면의 관절궤적과 들어올린 다리의 직교공간 궤적을 나타냈다. 그림 10(b)에서 보듯이 안정된 자세를 위해 관상면 하체 관절모터 궤적이 고원(plateau)과 같은 형상이고, 그림 11에서 보듯이 PSO가 생성한 관절궤적이 목표한 최대 발높이인 0.02m를 만족시킴을 알 수 있다. 그림 11은 2-세그먼트 혼합다항식으로 표현된 시상면 관절궤적들이 후반 세그먼트로 전환하는 과정에서 들어올린 발의 궤적이 정점에서 전후로 흔들리는 것을 나타낸다. 이 궤적의 시간-고도 궤적은 그림 7과 같이 정규분포와 유사한 형상을 가진다. 발 높이도 ZMP 궤적과 마찬가지로 비용함수 식 (11)을 조정함으로써 원하는 대로 조정할 수 있다.

그림 12와 13은 보폭이 5cm일때 세가지 보행단계에 대해 주기를 2초와 1초로 설정하고 최적화한 관절 궤적이 생

Fig. 11. Altitude trajectory of swing foot

Fig. 13. Comparison of ZMP trajectories for three phases of walking with the step length of 5cm and period of 1 second

Fig. 14. Snapshot photos of biped walking with step length of 3cm and period of 2 seconds

Fig. 15. Snapshot photos of biped walking with the step length of 5cm and period of 2 seconds

Fig. 16. Snapshot photos of biped walking with the step length of 5cm and period of 1 second

성한 실제 ZMP와 목표 ZMP 궤적을 비교한 것을 각각 나타낸다. 보행속도가 빨라지면서 로봇의 횡방향 속도가 커짐으로 인해 y -축에서의 변화가 조금 더 커졌지만 전체적으로 목표 ZMP를 잘 추종함을 알 수 있다.

그림 14, 15, 16은 앞에서 시뮬레이션으로 검증한 보폭별/단계별로 최적화된 18개의 관절모터 궤적을 DARwIn-OP에 적용하여 보행 실험을 수행한 것을 연속사진으로 보인 것이다. 사진에서 로봇은 초기-주기-최종보행을 안정적으로 수행하며, 그림 16과 같이 보행속도가 2배 빨라져도 정확한 보폭으로 걸어갈 수 있음을 확인했다.

본 논문에서는 자이로 센서나 발바닥의 압력센서 값을 이용한 자세 균형 제어기법을 사용하지 않았지만 목표 보폭과 발높이, 보행주기에 맞춰 안정적인 보행을 수행함을 확인할 수 있었다. 그러나, ZMP 계산을 위해 가정한 링크 무게중심점의 위치가 실제 로봇과 차이가 있어서 시뮬레이션 상으로는 안정적인 보행도 로봇 구현 시 불안정한 보행을 보이는 경우가 많았다. 이를 해결하기 위해서는 발바닥 압력센서를 이용해서 각 링크의 정확한 무게중심점 위치를 식별하는 과정이 필요하다. 또한 보행 지면이 평탄하지 않거나 경사가 있는 경우, 센서 데이터를 이용해서 역진자 제어 기법을 자세 제어에 적용해야 한다. 이 경우 본 논문에서 제안한 방법으로 관절 궤적을 만들고 이를 목표 값으로 추종하는 폐회로 피드백 제어를 구성하면 된다.

5. 결론

본 논문에서는 안전한 이족보행에 상응하는 ZMP 궤적을 직선으로 구축하고, 이를 추종하면서도 보행에 필요한 발높이 조건과 한계각 조건들을 모두 만족시키는 최적의 관절궤적을 PSO로 탐색하는 방법을 제안했다. 또한 실제 로봇의 적용 가능성을 검증하기 위해 DARwIn-OP에 적용하여 성공적인 보행을 수행했다.

본 논문에서 제안한 방법의 장점은 이족 보행을 위해

무게중심점 또는 허리나 발목관절의 궤적을 특정 형태의 곡선으로 가정하는 기존 방식에 비해 다양한 모션(계단 오르내리기, 방향 틀며 걷기, 앞차기, 인간의 성격을 표현한 특징적인 보행 등)을 관절 별로 궤적을 생성할 수 있다는 점이다.

향후 다양한 보행 속도와 보폭의 경우에 대해 제안한 방법에 역진자 제어 기법을 적용하여 휴머노이드 로봇이 인간과 유사한 보행 성능을 가질 수 있게 할 예정이다.

References

- [1] J. H. Park and Y. K. Rhee, "ZMP trajectory generation for reduced trunk motions of biped robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 189-203, 1998.
- [2] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," International Conference on Robotics and Automation, pp. 1620-1626, Taipei, Taiwan, Sept. 2003.
- [3] E. Kim, J. Kim, and J.-W. Kim, "Development of modular DEAS and its application to optimal trajectory generation of biped walking," Trans. KIEE, vol. 58, no. 2, pp. 382-390, February 2009.
- [4] K. Erbaturo and O. Kurt, "Natural ZMP trajectories for biped robot reference generation," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, March 2009.
- [5] B.-S. Kim, K.-M. Nam, and S.-G. Lee, "A study on ZMP improvement of biped walking robot using neural network and tilting," Journal of Korea Robotics Society, vol. 6, no. 4, pp. 301-307, Dec. 2011.
- [6] J.-W. Kim, How to Manage Humanoid Robot by

Yourself: BIOLOID, HongRung Publishing Company, 2012.

- [7] T. McGeer, "Passive dynamic walking," International Journal of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp. 62-82, April 1990.
- [8] F. Asano, Z.-W. Luo, and M. Yamakita, "Biped gait generation and control based on a unified property of passive dynamic walking," IEEE Trans. Robotics, vol. 21, no. 4, August 2005.
- [9] M. Mizuno, H. Ohtake, K. Tanaka, H. O. Wang, "Passive dynamic walking with elastic energy," SICE Annual Conference, pp. 3224-3228, 2008.
- [10] <http://www.robotis.com>
- [11] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," IEEE International Conf. on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, Nov./Dec. 1995.
- [12] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," Journal of Applied Mechanics, vol. 77, pp. 215-221, 1955.
- [13] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [14] J. Perry and J. M. Burnfield, Gait Analysis: Normal and Pathological Function, 2nd Edit., SLACK Incorporated, 2010.

최영림

2011 동아대학교 전자공학과 (공학사)
2013 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
2013.1~현재 (주)광원메디텍

관심분야: 임베디드 시스템 개발, 로봇 연구

김종욱

1998 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학사)
2000 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학석사)
2004 포항공과대학교 전자전 기공학과(공학박사)

2006.3 ~현재 동아대학교 전자공학과 부교수
관심분야: 이족보행, 최적화 기법, 지능제어

최낙윤

2011 동아대학교 전자공학과 (공학사)
2013 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
2012.12~현재 (주)화신

관심분야: 최적화 기법, 소프트웨어 개발