

4 관절 3 링크 2족 로봇과 걸음새에 관한 연구

김성훈* · 오준호** · 이기훈***

Design of 4 joints 3 Link Biped Robot and Its Gaits

Sung Hoon Kim, Jun Ho Oh and Ki Hoon Lee

Key Words : biped robot, ZMP, gate

ABSTRACT : In this paper, the new type biped walking robot which is composed of the minimum number of links just for walking and its appropriate gaits are proposed. The proposed new gaits for this robot are four—crossing, crawling, standing and turning gait. In designing the biped robot, we propose the Performance Index which means the needed torque per a moving distance and generate foot trajectories by 3rd order spline interpolation. Among those, numerically we find the optimal conditions which minimize the Performance Index. Dynamically stable walking of the biped robot is realized by satisfying the stability condition of ZMP (zero moment point), which is related to maintaining the ZMP within the region of the supporting foot during the single leg support phase. We determine the region of mass center from the stability condition of ZMP and plan references which track the mass center trajectory of constant velocity. Finally we implement the gaits statically tracking the planned trajectories using PD control method.

기호설명

m_1, m_2, m_3, m_4	Masses of motor at each joint
$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$	Total mass of biped robot
l_1, l_2, l_3	Lengthes of each link
I_1, I_2, I_3, I_4	Moment of inertia of each motor
f	The length of the foot
d	Moving distance
$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$	Angle vector of joint
$X_i = [x_i \ y_i]^T$	Position of joint i
$X_g = [x_g \ y_g]^T$	Position of center of mass
g	Gravitational acceleration
X_{zmp}	Location of zero moment point in the x-axis
$\tau_G = [\tau_{G1} \ \tau_{G2} \ \tau_{G3} \ \tau_{G4}]^T$	Joint actuator static torque vector

1. 서론

2족 로봇은 이동성과 운동성이 뛰어나고 특정 환경에서 이동이 가능하다. 그러나 대부분의 2족 로봇의 시스템은 고차의 비선형 시스템으로 걸음새의 형태와 안정성, 제어 방법 등이 연구 과제가 되어 왔다.

Zheng, et al.은 정적 안정성에 대한 걸음새를 종합적으로 연구하였고[1] 2족 로봇의 동적 안정성을 위해 Takanishi, et al.[2], Shin, et al.[3], Hirose, et al.[4]은 ZMP(Zero Moment Point)를 이용한 걸음새 형태의 종합적인 연구를 하였다. 이 방법은 원하는 ZMP의 경로를 계획하여 추종하도록 몸체의 운동을 유도하였다. 2족 로봇의 구조적인 면에서 보면, Philippe gorce 와 Olivier vanel은 BIPMAN이라 불리는 12 관절 10 링크로 이루어진 2족 로봇에 대해 연구하였으며[5] J. Furusho 와 A. Sano는 9 링크의 로봇을 센서를 이용한 제어를 하였다.[6]

본 연구에서는 시스템의 복잡성을 줄이기 위해 보행하는 데 최소한의 자유도를 가지는 로봇으로 4 관절 3 링크 2족 로봇을 제안하고 2족 로봇에 적합한 4 가지 걸음새—교차(Crossing), 기어가기(Crawling), 물구나무(Standing), 뒤집기(Turning) 걸음새—를 제안하고 평평한 지면에서 정적으로 구현한다. 로봇을 설계하기 위해 성능 지수(Performa

* 한국과학기술원

** 한국과학기술원

*** 한국과학기술원

-nce Index)를 이용하여 최적 로봇의 구조를 구하고 3차 스플라인(Cubic Spline)으로 생성한 최적의 발의 이동 경로(Foot trajectory)를 동시에 구한다. 동적인 ZMP의 안정성 조건(Stability Condition)으로부터 경로 계획을 위한 무게 중심의 영역을 정하고 무게 중심의 이동을 추종하며 각 걸음새의 경로를 계획한다. 실제 실험에서는 PD 제어를 이용하여 계획된 경로를 추종하여 각 걸음새를 구현한다.

2. 2족 로봇의 모델

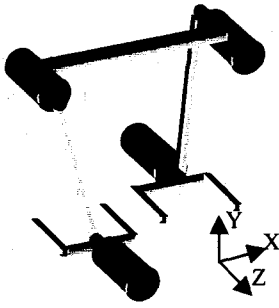


Fig. 1 The model of 3 link biped robot

Fig. 1은 4관절 3링크 2족 로봇의 3D 모형이다. 로봇의 형태는 기본적으로 4개의 관절, 2개의 다리와 1개의 몸체를 이루는 3링크, 2개의 발로 이루어져 있다. XY 평면의 2차원적인 운동을 한다. 본 연구에서 가정은 다음과 같다.

- 1) 발은 강체이다.
- 2) 지지하는 발은 딱딱한 표면에 평평하게 접한다.
- 3) 걷는 동안 발과 표면사이 미끄럼을 방지할 정도의 충분한 마찰력이 있다.
- 4) 링크의 질량은 모터의 질량에 비해 무시할 수 있다.

3. 걸음새(Gaits)

3.1 교차 걸음새(Crossing Gait)

다리를 이루는 2개의 링크가 서로 교차되며 걷는 기본 걸음새이다. 높이가 낮은 계단을 오르내릴 때도 적용할 수 있는 걸음새이다.

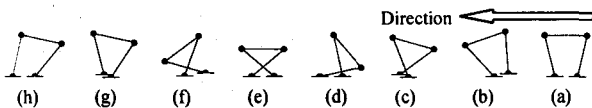


Fig. 2 Crossing gait

Fig. 2은 교차 걸음새의 형태로 (a)의 초기상태

에서 무게중심을 왼발로 이동하여 (b)와 같이 왼발을 지지하며 오른발을 링크를 교차하며 이동한다(c). 착지한 뒤(d) 무게 중심을 이동하여(e) 착지했던 발로 지지하며 다른 발로 이동한다(f-g). 착지한 뒤(h) 초기 상태로 돌아간다.

3.2 기어가기 걸음새(Crawling Gait)

이 걸음새는 몸이 긴 곤충의 기어가는 형태를 모델로 한 걸음새로 항상 양발이 지면에 접한다.

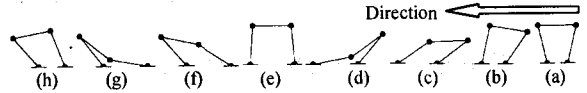


Fig. 3 Crawling gait

초기상태 (a)에서 오른발을 지지하며 왼발을 이동한다(b-d). 왼발로 무게 중심을 이동하고(e) 왼발로 지지하며 오른발을 이동한다(f-h).

3.3 물구나무 걸음새(Standing Gait)

인간이 물구나무 섰을 때의 형태를 모델로 한 걸음새이다.

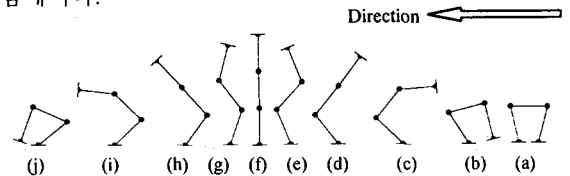


Fig. 4 Standing gait

초기상태 (a)에서 왼발을 지지하며 발을 회전하여(b-d) 구부린 상태가 된다(e) 물구나무를 선 뒤 (f) 반대쪽으로 발을 회전하여 착지한다(g-j).

3.4 뒤집기 걸음새(Turning Gait)

마지막으로 물구나무를 서지 않고 로봇이 뒤집어질 수 있는 걸음새이다.

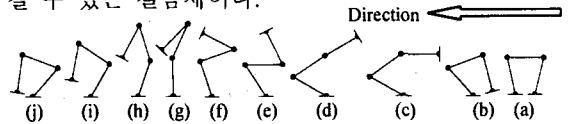


Fig. 5 Turning gait

초기 상태 (a)에서 왼발을 지지하며 발을 회전하여(b-d) 구부린 상태가 된다(e) 몸을 구부린 채 다리를 접어 반대쪽으로 넘어간 후 착지한다.(g-j)

4. 최적 설계(Optimal Design)

4.1 성능 지수(Performance Index)

로봇의 구조는 3개의 링크와 2개의 발로 이루어져 있다. 기본 걸음새인 교차 걸음새에서 발을 들어 착지할 때까지의 한발 지지 상태(Single-support phase)에서 설계한다. (Fig 3.의 (b-d)과정)

Fig 6은 한발 지지 상태에서 착지할 때의 자세이다. 설계 변수로는 각 링크의 길이 l_1, l_2, l_3 와

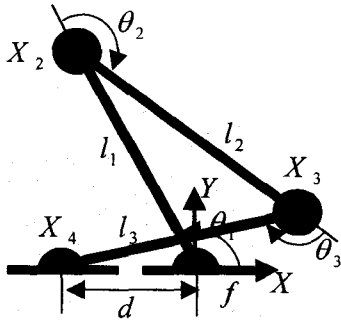


Fig 6. Landing posture at crossing gait

발 길이 f 가 있다. 본 연구에서는 로봇을 대칭으로 하기 위해 링크 1과 3의 길이가 같다고 한다. ($l_1 = l_3 = l$) 로봇을 표준화(normalize)하기 위해 링크 2의 길이 $l_2 = 31cm$ 로 고정하고 발의 길이를 $f = 20cm$ 로 정했다. 성능 지수는 다음과 같다.

$$P = \frac{\int_0^f \sum \tau_G^2}{d} \quad (1)$$

$$\sum \tau_G^2 = \tau_{G1}^2 + \tau_{G2}^2 + \tau_{G3}^2 + \tau_{G4}^2$$

T 는 발을 들어 착지할 때까지의 총 시간이고 $\sum \tau_G^2$ 는 각 모터에 걸리는 정적 토크의 제곱의 합이다. 성능 지수의 분자는 한발 지지 상태동안에 소모된 정적 토크의 양을 의미하고 분모는 이동 거리를 나타낸다. 그러므로 성능 지수는 물리적으로 단위 이동 거리당 소모된 토크의 양을 의미한다. 성능 지수는 링크 길이 l , 이동 거리 d , 발의 이동 경로에 따라 결정된다. 본 연구에서는 식(1)을 최소화하는 조건을 수식적으로 구하기 어려우므로 가능한 경우 중에서 최소화하는 경우를 찾는 수치적인 방법을 이용한다.

4.2 최대 이동 거리(Maximum moving distance)

링크 길이 l 의 범위를 15,16,..,45cm의 이산적인

값으로 제한하고 설계에서 이용되는 무게 중심의 영역식과 로봇이 지면에 부딪히지 않기 위한 조건을 만족하는 범위 내에서 l 에 따른 최대 이동 거리 d_{max} 를 구한다.

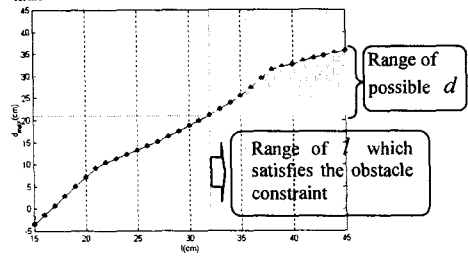


Fig 7. Maximum moving distance d_{max} vs. l

$$-\frac{f}{4} \leq x_g \leq \frac{f}{4} \quad (2)$$

$$y_3 = l \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \geq y_{im}$$

착지할 때 지지하는 발을 회피하기 위한 조건(Obstacle constraint)에서 $d_{max} > f$ 이어야 하고 만족하는 $l=32,33,..,45cm$ 이고 $d=21,22,..,35cm$ 의 범위를 갖는다.

4.3 발의 경로 생성(Generation of foot trajectory)

이동 거리 d 에 따라 지지하는 발을 회피하며 이동할 수 있는 발의 이동 경로가 무수히 많다. 자연스러운 걸음새를 만들어 무리한 움직임을 줄이기 위해 3차 스플라인 보간법(Cubic spline interpolation)을 이용한다. 경유하는 5점(2 ends, 3 knots)과 2개의 기울기(slope)를 만족하는 경로를 생성한다.

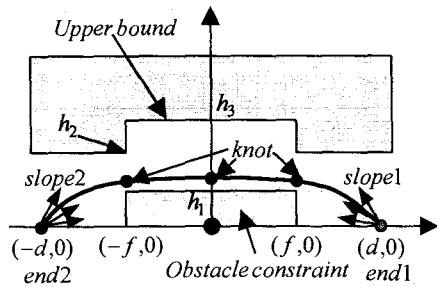


Fig 8. Cubic spline generation for foot trajectory

스플라인 경로 생성 방법은 다음과 같다.

- 1) d 에 따른 두 end 점과 5°씩 증가하여 0~85°의 18가지의 두 기울기로 총 324가지 스플라인 생성
- 2) $x = -f, f$ 의 각 경로위의 점이 $h_1 \leq y \leq h_2$ 을 만족하면 이 점을 knot로 하고 아니면 경계값

을 kont로 하여 두 knot를 정한다.

- 3) 두 end점, 두 knot점과 두 기울기로 스플라인 경로를 생성하고 $x=0$ 일 때, 경로위의 점이 $h_1 \leq y \leq h_3$ 을 만족하면 이 점을 knot로 하고 아니면 경계값을 knot로 하여 마지막 knot를 정한다.
- 4) 두 end점, 세 knot점과 두 기울기로 스플라인을 생성하여 전 범위에서 Upper bound와 Obstacle constraint을 만족하는 스플라인을 찾는다.

Fig. 9는 이동 거리 d 가 35cm일 때 가능한 스플라인 경로를 그린 것이다.

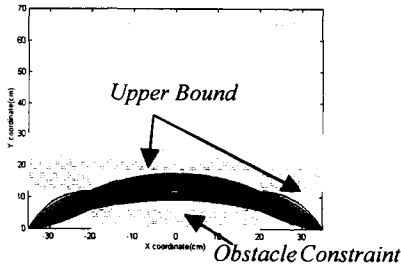


Fig. 9 Possible spline path when $d=35$ cm

4.4 최적의 조건(Optimal Condition)

1에 따라 d 의 범위가 정해지고 범위내의 d 에 따라 가능한 이동 경로들이 있다. 이동하는 발은 경로 위에서 일정한 속도(5cm/sec)로 이동한다. 무게 중심의 이동은 5.2절의 Fig. 13의 경로 형태로 이동한다.

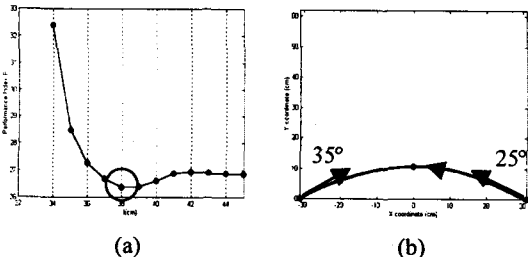


Fig. 10 (a) Minimum performance index P vs. l
(b) Optimal foot trajectory at crossing gait

Fig. 10(a)는 1에 따른 최소의 성능 지수값을 그린 것이다. $l=38$ cm일 때 구간 최소값을 갖는다. 이 때의 이동 거리 $d=31$ cm이고 교차 걸음새에서 최적의 이동 경로는 Fig. 10(b)와 같고 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y &= 0.0003x^3 + 0.0069x^2 + 0.3893x + 13.0862 \text{ where } -31 \leq x \leq -20 \\
 y &= -0.0001x^3 - 0.0116x^2 + 0.0207x + 10.6291 \text{ where } -20 \leq x \leq 20 \\
 y &= 0.0010x^3 - 0.0744x^2 + 1.2770x + 2.2539 \text{ where } 20 \leq x \leq 31
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

발을 들 때($x=31$ cm)에서 기울기가 작지할 때

($x=31$ cm)의 기울기보다 작다. 이는 물리적으로 힘이 없는 사람이 발을 들 때 발을 끌려고 하는 특성에서 확인할 수 있다. 최적의 조건으로부터 로봇을 설계하면 Fig. 11과 같다. 설계한 로봇으로 각 걸음새의 경로 계획을 통해 걸음새를 구현한다.

5. 경로 계획 (Trajectory Planning)

5.1 무게 중심 영역(Mass center region)

한발 지지 상태에서 로봇이 안정하게 보행하기 위해서는 ZMP가 지지하는 발의 안정 영역 안에 있어야 한다.

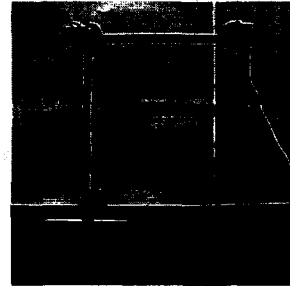


Fig. 11 Optimal designed biped robot

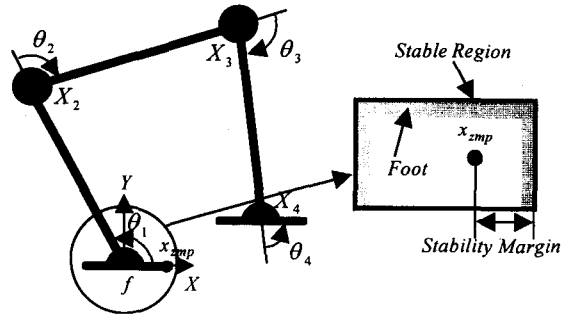


Fig. 12 (a) Single-support phase
(b) Stable region and stability margin

Fig. 12(b)에서 안정 이득(Stability margin)은 안정 영역의 경계에서 ZMP까지의 최소 거리이다. 지지하는 발 X_1 을 원점으로 하고 Fig. 12(a)의 한발 지지 상태에서 y 방향의 가속도 \ddot{y}_i 가 중력 가속도 g 에 비해 무시할 수 있다고 하면, ZMP의 좌표 x_{zmp} 는 다음과 같다.

$$x_{zmp} = x_g - \frac{m_2 y_2 \ddot{x}_2 + m_3 y_3 \ddot{x}_3 + m_4 y_4 \ddot{x}_4 + I_1 \ddot{\theta}_1 + I_2 \ddot{\theta}_2 + I_3 \ddot{\theta}_3 + I_4 \ddot{\theta}_4}{Mg}$$

$$= x_g + y_g \Delta_1 + \Delta_2$$

where $\Delta_1 = \frac{l_1(\ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \dot{\theta}_1 \sin \theta_1)}{g}$ (4)

$$\Delta_2 = \frac{(m_3 + m_4)l_2(\ddot{\theta}_{12} \cos \theta_{12} + \dot{\theta}_{12} \sin \theta_{12}) + m_4 l_3(\ddot{\theta}_{123} \cos \theta_{123} + \dot{\theta}_{123} \sin \theta_{123}) - I_1 \ddot{\theta}_1 - I_2 \ddot{\theta}_2 - I_3 \ddot{\theta}_3 - I_4 \ddot{\theta}_4}{Mg}$$

$$\text{and } \theta_{12} = \theta_1 + \theta_2, \theta_{123} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

ZMP 가 지지하는 발의 안정 영역에 있기 위해서는 다음을 만족해야 한다.

$$-\frac{f}{2} \leq x_{zmp} \leq \frac{f}{2}$$
 (5)

(4)식에서 복잡한 $\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i$ 로 이루어진 Δ_2 를 무시할 수 있다면 Δ_1 의 최악의 경우를 고려해 무게 중심의 안정 이득을 다음과 같이 정한다.

$$f_m = \frac{f}{2} - y_{g\max} \Delta_{1\max} \text{ where } \Delta_{1\max} = \frac{l_1 \sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}{g}$$
 (6)

(6)식에서 ω, α 는 각속도, 각가속도의 최대값이다. 무게 중심의 영역은 다음과 같이 정한다.

$$-f_m \leq x_g \leq f_m$$
 (7)

각 걸음새에 대해 (6)식을 계산하고 계산치보다 작은 값을 안정 이득으로 정하여 무게 중심 영역을 다음과 같이 정했다.

- 1) 교차 걸음새: $y_{g\max} < 38\text{cm}$, $-\frac{f}{4} \leq x_g \leq \frac{f}{4}$
- 2) 기어가기 걸음새—항상 양발 지지 상태이지만 고정하는 발에 발생하는 마찰력을 높이기 위해 고정하는 발의 영역을 벗어나지 않도록 한다.
 $x_1 + \frac{f}{4} \leq x_g \leq x_1 + \frac{f}{2}$ or $x_4 - \frac{f}{2} \leq x_g \leq x_2 - \frac{f}{4}$
- 3) 물구나무 걸음새: $y_{g\max} = 53.5\text{cm}$, $-\frac{f}{8} \leq x_g \leq \frac{f}{8}$
- 4) 뒤집기 걸음새— $y_{g\max}$ 는 물구나무 걸음새보다 작지만 그대로 이용 $-\frac{f}{8} \leq x_g \leq \frac{f}{8}$

한발 지지 상태에서 무게 중심은 Fig. 13 과 같이 이동한다. 무게 중심 영역의 경계에서 발을 들기 시작해 반대쪽 경계에서 착지한다. 영역 안에서는 안정 이득이 증가하는 방향으로 일정 속도로 이동하고 안정 이득이 가장 큰 지지하는 발의 중심 ($x_g = 0$)에서 무게 중심은 정체가다 로봇이 지면에 닿지 않는 조건($y_i \geq y_{\lim}$)을 만족하지 못하면

다시 일정 속도로 이동한다. (7)식의 무게 중심의 영역은 한발 지지 상태에서 무게 중심의 범위를 정한 것으로 식(5)의 ZMP의 안정성 조건같이 로봇의 안정성을 판별하는 조건은 아니다.

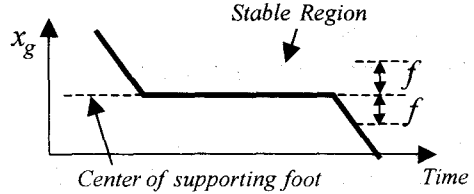


Fig. 13 Trajectory of mass center during single-support phase

5.2 교차 걸음새의 경로 계획

교차 걸음새의 경로 계획 원칙은 다음과 같다.

- 1) Fig. 13 처럼 무게 중심은 일정 이동 속도로 이동하고 지지하는 발의 중심에서 정체한다.
- 2) 한발 지지 상태에서 이동하는 발은 들 때 0.5 초동안 가속(10cm/sec^2)한 뒤 일정 속도(5cm/sec)로 이동하고 착지할 때 0.5 초동안 감속(-10cm/sec^2)한다.
- 3) 양발 지지 상태의 시간은 한발 지지 상태 시간의 40%로 정한다.
1)의 원칙은 모든 걸음새에 해당이 된다.



Fig. 14 Walking pattern step by step at crossing gait

Fig. 14는 시뮬레이션한 결과, 걸음새의 형태를 각 단계별로 나타낸 것이다. 굵은 선은 각 단계의 초기 자세이고 Step 2, 4에서의 곡선은 발의 이동 경로를 나타낸 것이다.

5.3 기어가기 걸음새의 경로 계획

기어가기 걸음새에서도 이동하는 발은 일정 속도(1.5cm/sec)로 이동하여 무게 중심이 고정하는 발의 영역을 벗어나지 않는 범위내에서 최대 이동 가능 거리까지 이동한다.



Fig. 15 Walking pattern step by step at crawling gait

5.4 물구나무 걸음새의 경로 계획

물구나무 걸음새는 일정한 발의 이동 경로가 없

으므로 무게 중심의 이동을 추종하도록 관절각을 잘 조절하여 경로를 계획한다.



Fig.16 Walking pattern step by step at standing gait

5.5 뒤집기 걸음새의 경로 계획

무게 중심 이동 경로는 물구나무 걸음새의 경우와 비슷하지만 걸음새의 형태는 비대칭이다.



Fig.17 Walking pattern step by step at standing gait

5.6 ZMP의 이동 경로

5.2~5.5 절의 계획된 경로는 무게 중심의 이동을 추종하여 계획한 것으로 실질적인 안정성 판별 조건인 ZMP의 안정성 조건을 만족해야 안정한 보행이 가능하다. ZMP의 이동 경로를 그려 보면 다음과 같다.

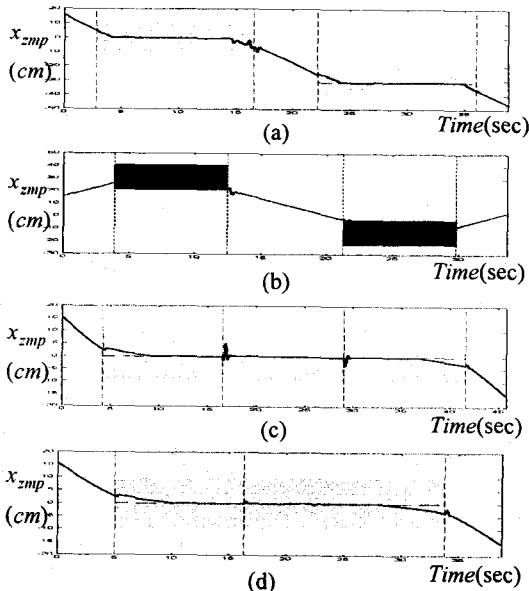


Fig. 17 (a) ZMP trajectory at crossing gait
(b) ZMP trajectory at crawling gait
(c) ZMP trajectory at standing gait
(d) ZMP trajectory at turning gait

흐린 영역은 ZMP의 안정 영역이다. (b)의 기어가기 걸음새의 경우 안정 영역은 두 발 사이의 모든 영역이 된다. (b)의 그림에서 짙은 사각형 영역

은 고정하는 발의 영역으로 발을 이동할 때 ZMP는 고정하는 발의 영역에 있다. ZMP의 경로는 몇 군데 진동하는 부분을 제외하고 무게 중심 경로와 비슷하다. ZMP의 기준으로도 안정한 보행이 가능함을 실험으로 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 보행하는 데 최소한의 링크를 가진 3 링크 2족 로봇을 제안하였고 로봇에 맞는 4가지 걸음새를 제안하고 실험을 통해 구현해 보았다. 로봇의 구조를 결정하기 위해 수치적으로 성능 지수를 구해 최적의 구조를 결정하여 제작하였고 이에 따른 자연스러운 3차 스플라인을 이용한 최적의 발의 이동 경로를 구하였다. 제작한 로봇을 이용해 각 걸음새를 구현하기 위해 실제 안정성 판별 조건인 ZMP의 관계로부터 경로 계획을 위한 무게 중심의 영역을 정하고 무게 중심의 이동을 추종하도록 경로를 계획하였다. 이 계획된 경로로부터 ZMP의 경로를 구하여 실질적인 ZMP의 안정성 조건을 만족하므로 안정적인 보행이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Y. F. Zheng and J. Shen, "Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface," IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 6, No.1, pp. 86-96(1990)
- (2) A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking Robot WL-10RD", Proc. Int. Conf. Advanced Robotics, pp, 459-466(1985)
- (3) C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee and W. A. Cruver, "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1646-1652 (1990)
- (4) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1321-1326, (1998)
- (5) Philippe Gorce and Olivier Vanel, "Behaviour Synthesis of the Erect Stance for a Biped Control", Journal of Intelligent and Robotic Systems, pp. 127-145 (1997)
- (6) J. Furusho and A. Sano, "Sensor-based control of a nine-link biped," Int. J. Robot. Res., vol. 9, no. 2, pp. 83-98 (1990)