

보행 로봇의 방향전환을 위한 걸음새 제어 알고리즘

○박 성 혁, 황 승 구

한국전자통신연구소, 자동화기술개발부

A Gait Control Algorithm to change the direction for a walking Robot

S. H. Park, S. K. Hwang

.Automation Tech. Department, ETRI

Abstract

A walking robot must have the ability to change the body direction in order to avoid the obstacles. In this paper, we develop a gait control algorithm that can maintain the stable movement of the robot for three different modes of changing directions. The algorithm makes it possible for the robot to have the larger gait stability margin than the threshold value by the method of changing the body speed.

1. 서 론

부정 지형에서 바퀴보다 우수한 이동성 때문에 다리들 갖은 보행체에 대한 연구는 일찌기 링크나 캠 메카니즘을 이용한 것에서 부터 시작되어 컴퓨터의 발달과 함께 다관절 링크에 대한 다축제어의 응용에 까지 발전하였다. 보행 로봇의 다리수도 하나에서 여섯개 까지 다양하여 정적 안정보행을 하는 경우와 동적안정 보행을 하는 경우로 나누어 연구가 진행되고 있다.

원자력 발전소나 우주 및 해저에서의 작업과 관련하여 실제로 응용 가능한 4각과 6각 보행 로봇에 대한 이제까지의 연구 결과를 걸음새(gait) 제어 알고리즘의 측면에서 살펴보면, McGhee와 Iswandi[1]가 각 단계마다 천이상태의 다리수를 증가시키는 방향으로 각다리의 물

적임을 알맞게 결정하는 비주기적 자유(free) 걸음새를 개발하였고 Song[2]은 6각 로봇의 물결(wave) 걸음새에 대한 정적 안정도(static stability margin) 관계식을 유도하고 이를 늘리기 위해 다리의 스트록(stroke)과 피치(pitch)를 변화시키는 방법을 제안하였다.

한편 Lee[3]는 평탄면과 경사면에서 정해진 정적 안정도를 갖는 교호 삼각(alternative tripod) 걸음새에 대하여 계걸음과 직선보행에 관한 연구결과를 발표하였고 Hirose[4]는 4각 보행 로봇의 자유 걸음새에 대하여 금지구역과 접근 가능영역을 이용하여 계걸음으로 접근하는 방법을 제시하였다.

실제로 보행 로봇들을 구현하는데 고려해야할 제어상의 기본문제는 다음과 같다. 첫째로, 평균 속도와 이동 궤적을 만들어 내는 방법은 무엇인가? 둘째로, 다리들 들고 놓는 궤적의 순서는 어떻게 결정할 것인가? 셋째로, 각 다리는 보폭을 얼마나 하여야 미리 지정된 안정도를 유지할 수 있는가? 넷째로, 로봇 몸체의 높이와 기울어짐 정도는 어떻게 할 것인가? 다섯째로, 경로 계획을 위한 정보제공은 어떻게 할 것인가?

본 논문에서는 상술한 다섯가지의 기본적인 고려사항을 토대로 4각 로봇이 평탄면에서 방향전환을 하기 위한 걸음새 제어 알고리즘을 II장에 기술하였고 이를 축도기 구조의 다리들 갖는 메카니즘에 적용하여 시뮬레이션한 결과를 III 장에 서술하였으며 결론을 IV장에 언급하였다.

2. 걸음새 제어 알고리즘

보행 로봇트가 갖는 기본 능력으로서 방향전환의 걸음새 종류는 다음과 같이 세가지로 나눌수 있다. 첫째, 무게중심의 이동이 없이 로봇트의 머리 방향을 360도 회전시키는 제자리 돌기와 둘째, 로봇트의 머리부분이 이동방향을 향하면서 무게중심이 주어진 곡선 경로를 따라 움직이는 회전이 있고 셋째, 로봇트의 머리방향의 진행방향과는 무관하게 늘 일정하게 하여 회전하는 계걸음에 의한 방향전환이 있다.

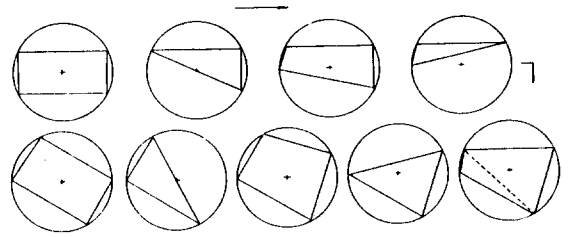
구체적인 걸음새 제어 알고리즘을 언급하기 전에 앞서 개발된 직선 보행 알고리즘을 이용하고 제어 문제에 대한 접근방법을 용리하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- 보행 로봇트는 대칭 구조이다.
- 걸음새마다 특정한 초기 위치가 있다.
- 디딤폭은 0.75 보다 크다
- 걸음새 마다 정적 안정도가 보장되는 일정한 패턴(event sequences)에 따른다.
- 무게중심은 한 스텝마다 직선운동을 한다.

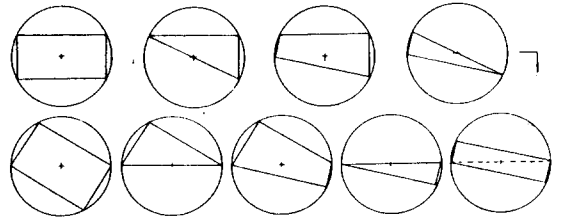
(1) 제자리 돌기

이 걸음새는 특별히 무게중심과 회전의 중심이 일치하기 때문에 일반적인 직선 보행과는 다르게 회전방향에 따라 이벤트 시퀀스가 8-4-7-3-5-1-6-2 나 8-4-6-2-5-1-7-3 인 것이 그림 1에서 보듯이 정적 안정도 측면에서 유리하기 때문에 제자리 돌기를 위한 제어 알고리즘의 시작부분에 회전 방향을 기준으로 이벤트 시퀀스를 결정하는 과정이 포함된다.

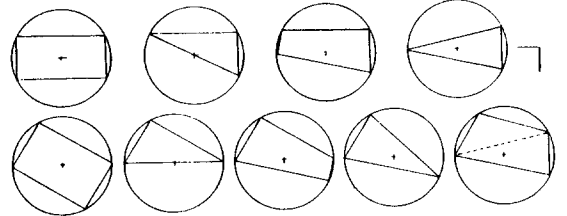
무게중심의 이동이 없이 보행 로봇트가 방향전환을 하기 위해서는 원칙적으로 구동부에서 소비되는 에너지를 최소한으로 하고 각다리에 분산되는 무게오차가 없도록 할 필요가 있다. 뿐만 아니라 한 주기가 끝났을 때의 다리 모양새가 처음의 다리 모양과 같도록 해야 한주기를 기준으로 주기적인 제어를 할 수 있다. 따라서 제자리 돌기를 시작하기 전에 네다리의 초기 위치는 무게 중심으로부터 동심원 상에 있고 회전방향과 이벤트 시퀀스에 따라 다음에 놓여질 다리 끝위치 역시 같은 동심원상에 있어야 한다.



a) 8-4-6-2-7-3-5-1



b) 8-4-5-1-7-3-6-2



c) 8-4-7-3-5-1-6-2

그림 1. 제자리 돌기시 이벤트 시퀀스 변화에 따른 지지 다각형 변화
(Fig 1. The support polygons owing to event sequences in turning)

그림 2. 에 곡률반경을 R, 한 스텝자를 θ 라 하면, 보폭은 식(1) 과 같이 표시되고 현재의 착지점 1,2,3,4와 다음 착지점 1',2',3',4'의 X,Y 좌표는 식 (2)와 같이 무게중심과 착지점이 이루는 각 θ 로 부터 계산된다.

$$\text{stride} = R \sqrt{2(1 - \cos\theta)} \quad \text{-----(1)}$$

$$\begin{aligned} & 0 \geq \theta \geq \pi/4, \quad 0 \geq \theta \geq 2\pi \\ \text{if } x > 0, & \quad \theta = \arctan(y/x) - \theta \quad \text{:CW} \\ & \quad \theta = \arctan(y/x) + \theta \quad \text{:CCW} \\ x < 0, & \quad \theta = \arctan(y/-x) - \theta + \pi \quad \text{:CW} \\ & \quad \theta = \arctan(y/-x) + \theta + \pi \quad \text{:CCW} \\ (x', y') & = R (\cos\theta, \sin\theta) \quad \text{-----(2)} \end{aligned}$$

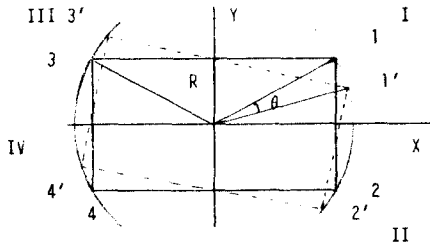


그림 2. 제자리 돌기의 해석도
(Fig. 2 The coordinate for a rotation)

한편, 제자리 돌기시의 몸체 이동은 네 다리가 모두 지지상태인 경우만 시행하는데, 이는 세다리 지지상태시에 몸체를 움직일때 따라 생기는 상대적인 보폭의 감소를 고려치 않음으로써 제어를 용이하게 하기 위함이다. 이 경우, 한주기에 몸체를 4번 회전하게 되어 한번 회전할 때의 회전각은 한 스텝각의 4분의 1이 된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 4자 보행 로봇의 보행 체적과 관련하여 곡률반경 R에 따른 한 스텝각의 최대치는 식(3)으로 표시된다. 여기서 몸체의 넓이와 길이는 L, W, 피치는 P, 가로 방향 스트루크와 세로 방향 스트루크는 S_x, S_y 이고 네 다리의 초기치는 $(X[1..4, i], Y[1..4, i])$ 이다.

$$R^2 = X[1..4, i]^2 + Y[1..4, i]^2$$

$$Y[4, 1] = W/2 - 2D, \quad X[4, 1] = -\sqrt{R^2 - Y[4, 1]^2}$$

$$Y[4, 2] = S_y + W/2 - 2D, \quad X[4, 2] = -\sqrt{R^2 - Y[4, 2]^2}$$

$$\theta(\max.) = \arctan\left(\frac{Y[4, 1]}{X[4, 1]}\right) - \arctan\left(\frac{Y[4, 2]}{X[4, 2]}\right) \quad (3)$$

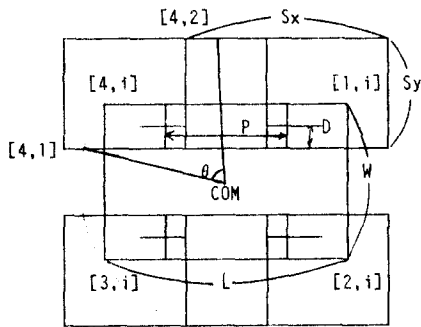


그림 3. 보행 체적과 한 스텝각의 관계도
(Fig. 3 The relation between the walking volume & one step angle)

(2) 회전

이 걸음새는 제자리 돌기와는 다르게 진행방향으로 무게중심이 이동하기 때문에 안정도가 이벤트 순간뿐

만 아니라 매 순간 변화하므로 전술한 가정 이외에 다음과 같은 조건을 전제로 걸음새 제어 알고리즘을 설계한다.

- 속도, 곡률반경, 한 스텝각은 상위 제어 레벨에서 받는다.
- 한 스텝각이 작다고 가정하여 각 다리의 위상은 직선보행의 물결 걸음새와 같은 위상을 따른다

따라서 지정된 속도가 유지되도록 동작 실행부에 구동 명령을 보내기 위해서 먼저 식(4)와 (5)와 같이 가정에 의해 디딤돌을 이용하여 그림 4.의 각 구간을 정의한다. 여기서 $gu1$ 에서 $gu8$ 은 그림 4.의 AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI를 의미한다.

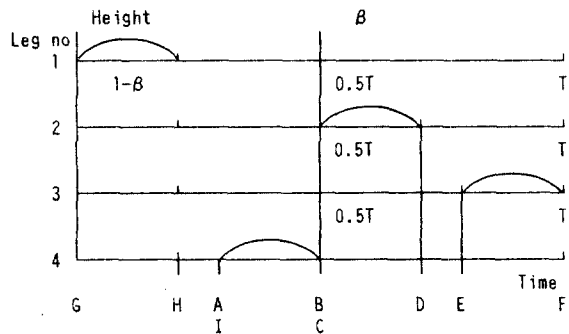


그림 4. 물결 걸음새의 Gait Diagram
(Fig 4. The gait Diagram of a wave gait)

$$T = R \sqrt{2(1 - \cos\theta)} / \text{Velocity} \quad (4)$$

$$gu1 = (1 - B) T$$

$$gu2 = (1 - B) T$$

$$gu3 = 2(1 - B) T$$

$$gu4 = [2(1 - B) + 2B - 1.5] T$$

$$gu5 = [3(1 - B) + 2B - 1.5] T \quad (5)$$

$$gu6 = gu5$$

$$gu7 = [4(1 - B) + 2B - 1.5] T$$

$$gu8 = T$$

한편, 직선 보행시는 로봇의 무게중심이 XY 평면에서 일직선으로만 움직이는데 반하여 회전시는 XY 평면상에 2차원적으로 움직인다. 그러므로 몸통 좌표계로부터 진행방향을 나타내는 방향각을 τ 로 표시하면 그림 5.에 도시한 바와 같이 현재의 무게중심 (COMx, COMy)와 다음의 무게중심 (COMx', COMy') 사이에 식(6)과 같은 관계가 성립한다.

$$COMx' = COMx + R \sqrt{2(1 - \cos\theta)} \cos(\tau - \theta/2)$$

$$COMy' = COMy + R \sqrt{2(1 - \cos\theta)} \sin(\tau - \theta/2) \quad (6)$$

이 때, 방향각 τ 는 한 주기동안 로봇이 θ 만큼 회전하고 1, 2번 다리의 중심점 (Hx, Hy)과 무게중심이 이루는 직선의 기울기 정보로부터 식(7)과 같이 구

이루는 직선의 기울기 정보로부터 식(7)과 같이 구

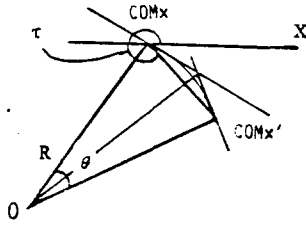


그림 5. 회전시 무게중심의 이동도
(Fig. 5 The moving C.O.M. in turning)

$$\tau = \arctan\left(\frac{Hy - COMy}{Hx - COMx}\right) \quad (7)$$

if $(Hy - COMy) < 0$ & $(Hx - COMx) > 0$: $\tau + 2\pi$
 if $(Hy - COMy) < 0$ & $(Hx - COMx) < 0$: $\tau + \pi$
 if $(Hy - COMy) > 0$ & $(Hx - COMx) < 0$: $\tau + \pi$
 otherwise : τ

다리 좌표계의 중심은 몸통 좌표계의 원점이 되는 보행 로봇의 무게중심으로 부터 항상 일정하게 천이 되어 있고 회전을 시작하기 전에 초기 다리 모양새들 한주기 간격으로 일정하게 유지하는 점에 착안하여 주기적 제어 형태를 취할 때, 네 다리의 착지점(mLegx, mLegy) 변화는 그림 6. 과 같이 무게중심으로 부터 네 다리의 좌표가 떨어진 거리 rr 과 방향자 τ 및 한 스텝자 θ 의 함수로 식(8)로 나타내진다.

$$\begin{aligned} mLegx &= COMx + rr \cos(n\pi/4 + \tau - \theta) \\ mLegy &= COMy + rr \sin(n\pi/4 + \tau - \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

where $m = 1, 2, 3, 4$; $n = 1, -1, -3, -5$

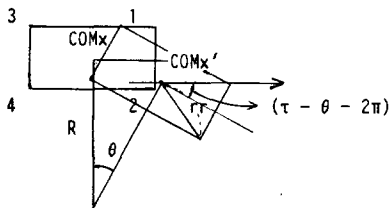


그림 6. 착지점과 무게중심과의 관계도
(Fig. 6 The support points & C.O.M.)

(3) 계걸음에 의한 방향전환

해석상 중요 매개변수가 되는 계 걸음각 α 들 제어 하오는 제어 알고리즘 설계시 선행되는 모든 가정이 앞서 기술한 제자리 돌기 및 회전과 같다. 계 걸음각은 45 도를 기준으로 이보다 크고 작음에 따라 정적 안정도가 보장되는 이벤트 시퀀스가 달라진다. 즉 진행 방향에 따라 직선보행시의 유리한 걸음세 패턴은 계

걸음각이 45 도 보다 커짐에 따라 달라져서 표 1과 같이 된다.

표 1. 계걸음각에 따른 안정된 걸음세 패턴
(Table 1. The stable gait patterns of the variable gait angles)

계 걸음각	걸음세 패턴
$-45 < \alpha < 45$	4 - 2 - 3 - 1
$45 < \alpha < 135$	2 - 1 - 4 - 3
$135 < \alpha < 225$	1 - 3 - 2 - 4
$225 < \alpha < 315$	3 - 4 - 1 - 2

무게중심의 변화식과 이에 따른 네 다리의 착지점 계산식은 식(9)와 식(10)에 나타난 바와 같고 이는 식(8)에서 방향자 τ 를 영으로 하고 한 스텝자 θ 에 초기 계 걸음각 μ 을 더하여 계산된다. 자세한 제어 알고리즘의 흐름도는 회전과 제자리 돌기와 같이 그림 7.에 도시한 바와 같다.

$$\begin{aligned} COMx' &= COMx + Velocity \uparrow \cos \alpha \\ COMy' &= COMy + Velocity \uparrow \sin \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} mLegx &= COMx' + rr \cos[p\pi/4 + (-1)^n (\mu + L\theta)] \\ mLegy &= COMy' + rr \sin[p\pi/4 + (-1)^n (\mu + L\theta)] \end{aligned} \quad (10)$$

where $m = 1, 2, 3, 4$; $p = 1, -1, -3, -5$;
 $L = 1, 2, 3, 4, \dots, \text{integer}(2\pi/\theta)$;
 $n = 1, \text{CW}$; $n = 0, \text{CCW}$

3. 실험 및 검토

전술한 세가지 방향전환 알고리즘을 직접 보행 로봇에 구현해 보는 대신에 실제로 각 순간마다 정적 안정도가 양의 값으로 유지되는 지를 확인하기 위하여 각 걸음세에 대한 안정도 여유 변화를 중점적으로 살펴 보았다.

제자리 돌기는 안정도 변화에 영향을 미치는 각 이벤트 순간을 임의의 보폭에 대하여 살펴보면 그림 8.에서 보듯이 회전 방향이 시계방향(CW) 혹은 반시계방향(CCW)에 따라 전술한 걸음세 패턴의 각 이벤트마다 정적 안정도가 양의 값으로 보장되며, 되도록 보폭이 큰 경우가 보폭이 작은 경우에 비해서 이벤트 7, 3에서 더 큰 안정도 값을 갖는다. 한편, 이벤트 4, 1에서는 반대 현상이 나타나지만 이 때는 지지각 각형이 삼각형이 아닌 사각형이기 때문에 실제로 정적 안정도에 영향을 미치지 못한다.

따라서 제자리 돌기의 경우는 메카니즘이 허용하는 한 보폭을 최대로 하는 것이 유리하다. 본 실험에서는 P를 85, W를 85, L을 100, D를 12, Sy를 40으로 했을 때 θ 의 최대값은 46.2도가 되었다.

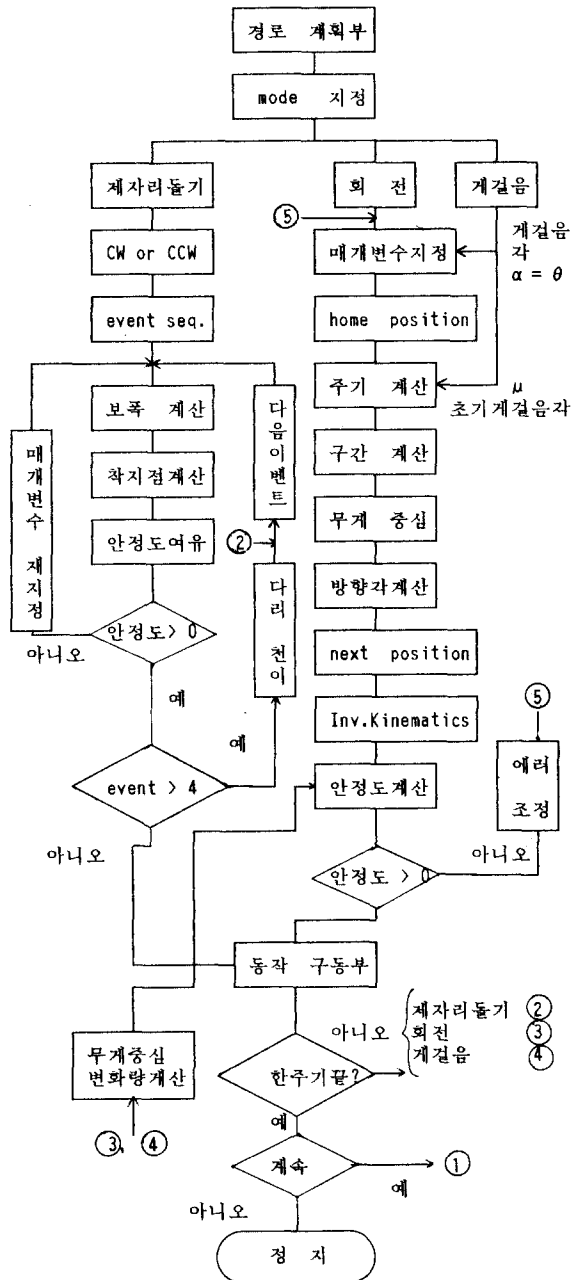


그림 7. 방향전환에 관한 제어 알고리즘 흐름도 (Fig. 7 The flowchart of a gait control algorithm in circulation)

회전 시는 디딤울, 곡률반경, 한 스텝자, 속도등을 변화시켜 가면서 안정도의 추이를 살펴 보았다. 그 결과

지선 보행의 경우와 마찬가지로 같은 조건에서는 디딤울이 클수록 안정도가 크고 한 스텝자를 크게 해 주면 지지다각형에 접근하거나 벌어지는 무게중심의 양이 늘어나기 때문에 시간에 따른 안정도 변화가 심해진다 또한 속도변화는 다른 조건이 같을 경우에 안정도에 영향을 주지 않으며 곡률반경이 커지면 각 다리의 다음 착지점이 인접한 다리 근처에 이르게 되므로 지지다각형이 사각형일지라도 다음 이벤트에서 안정도가 작아지게 되어 안정도 변화폭이 커짐을 알 수 있다.

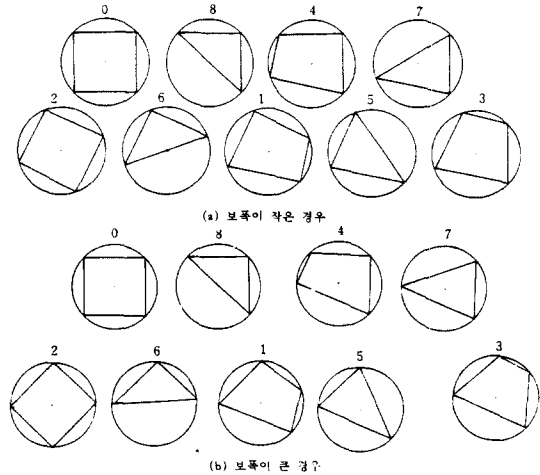


그림 8. 제자리 돌기시 보폭변화에 대한 안정도 변화 (Fig. 8 The variation of stability margins owing to the variable strides in rotation)

속도 100cm/sec, 곡률반경 100 cm, 한 스텝자 5도, 디딤울 0.9 및 0.75 인 경우에 그림 9에 나타난 바와같이 디딤울이 0.75 보다 크면 전 구간에서 안정된 회전 걸음새가 구현됨을 알 수 있다. 한편, 디딤울이 0.75 인 경우에도 양의 임계값보다 안정도가 크게 유지되도록 처음 가정에는 어긋나지만 보행 로봇의 속도들 가변시키면 그림 9 - c에 나타난 바와같이 안정도가 전구간에서 양의 값으로 보장된다. 이는 안정도가 임계값보다 작게 되는 해당 이벤트에서 무게중심을 더이상 이동하지 않고 다음 이벤트에서 이전에 이동하지 못한 만큼 속도들 증가하여 무게중심을 이동시킴으로써 속도변화에 따른 주기의 변화가 상쇄되어 전체적인 디딤울이 고정되고 구간의 시간에 대한 변화도 생기지 않는 점에 착안한 것이다. 그러나 실제 보행 로봇의 걸음새 제어 알고리즘으로 응용하기에는 속도 변화에 따른 운동

역학(dynamics) 효과가 생기기 때문에 한계가 있을 것으로 사려된다.

그림 9 - d는 계걸음에 의한 회전시, 계 걸음각을 90도로 하여 4번 만에 360도를 회전하도록 한 경우로 초기 계걸음각이 45도이고 90도씩 증가할 때의 안정도 변화를 나타낸 그래프이다. 180도를 기준으로 서로 대칭인 계걸음각이 생기기 때문에 두 주기를 한 사이클로 안정도 변화가 반복되어 나타난다. 한편 안정도가 영인 구간이 나타나는데 이는 초기의 지지다각형을 정사각형으로 하여 실험했기 때문에 계 걸음각이 45도나 135도일 때에 이벤트8이나 6에서 무게중심이 지지다각형의 선상으로 이동하는 경우가 생기기 때문이다.

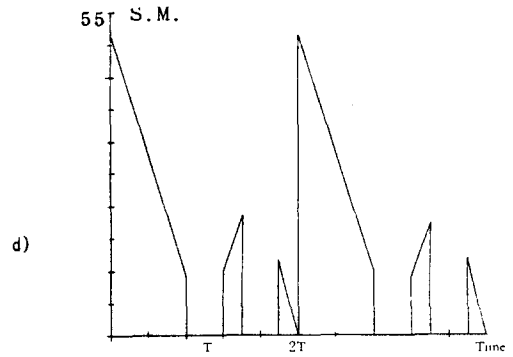
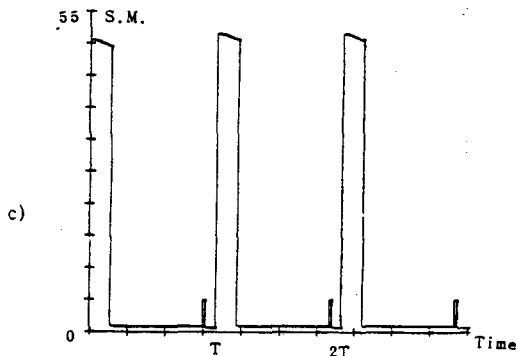
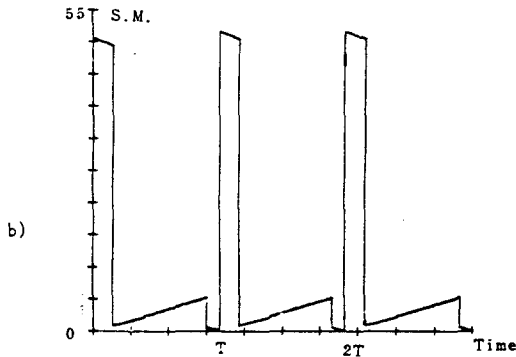
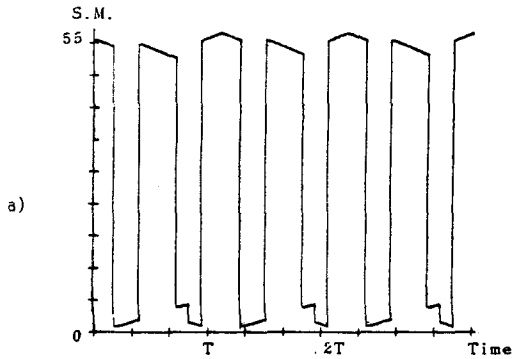


그림 9. 각 걸음세에 따른 안정도 변화
(Fig. 9 The graphs of stability margins for each gaits)

- a) $R=100\text{cm}$, $\text{Velocity}=100\text{cm/sec}$, $B=0.9$, $\theta=5$
- b) $R=100\text{cm}$, $\text{Velocity}=100\text{cm/sec}$, $B=0.75$, $\theta=5$
- c) $R=100\text{cm}$, $\text{Velocity}=\text{variable}$, $B=0.75$, $\theta=5$
- d) $R=100\text{cm}$, $\text{Velocity}=100\text{cm/sec}$, $B=0.9$, $\alpha=90$

4. 결 론

4 자 보행 로봇의 방향전환에 관한 걸음세 제어 알고리즘을 제자리 돌기, 회전, 계걸음에 의한 회전으로 나누어 고찰하였다. 각 경우에 있어서 계걸음의 경우를 제외하고는 직선 보행시의 불결 걸음세들 응용함에 별다른 문제점을 보이고 있지 않음을 알 수 있다.

계 걸음세는 추후, 자유 걸음세의 기본 형태로 불결 걸음세와 같이 각 다리의 상대 위상이 디딤물에 영향을 받지 않는 새로운 형태의 걸음세로 발전시켜 연구되어야 할 것이다. 본 연구의 결과는 앞으로 축도기 구조의 다리를 갖는 보행 로봇에 적용하기 위하여 시각센서와 접촉센서의 정보를 이용하여 보강될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] R.B.McGhee and G.I.Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. SMC-9, no. 4, pp176-182, 1979
- [2] S.M.Song, "Kinematic optimal design of a six-legged walking machine," Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, 1984
- [3] T.T.Lee, C.M.Liao, and T.K.Chen, "On the stability properties of hexapod tripod gait," IEEE Jr. Robotics and Automation, vol. 4, no. 4, pp427-434, 1988
- [4] S.Hirose, "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," Int. J. Robotics Res., vol. 3, no. 2, pp113-133, 1984