

論文91-28B-11-5

사각 보행로봇의 회전 걸음새에 관한 연구

(A Study on Turning Gait for a Quadruped Walking Robot)

孫 漢 宣*, 全 命 根**, 卞 增 男**

(Han Seon Son, Myung Geun Chun, and Zeungnam Bien)

要 約

본 논문에서는 사각 보행로봇을 위한 회전 걸음새를 제안하였다. 회전 걸음새는 평행 이동과 회전 이동을 동시에 제어할 수 있으며, 이를 위해서 진행방향의 걸음새 안정도를 보장하는 다리 이동순서를 구하는 방법과 구해진 다리 이동순서에 대하여 진행 방향 걸음새 안정도가 최대가 되는 다리 이륙 시간을 계산하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 사각 보행로봇에 대하여 로봇의 자세를 제어하는데 사용될 수 있으며, 주어진 임의의 평행이동 및 회전이동량에 대해 진행방향의 걸음새 안정도가 가장 크도록 하는 걸음새를 만들어 내는데 사용될 수 있다.

Abstract

In this paper a new turning gait is proposed for a quadruped walking robot. The proposed scheme makes it possible to control the translation and orientation of the walking robot simultaneously. At first, the feasible leg sequences which can guarantee a positive longitudinal gait stability margin for each direction of movement are found. A method for finding the lifting time of each leg of a feasible leg sequence and selecting an optimal gait among feasible gaits is then suggested. The proposed gait can be applied to control the posture of walking robots and to generate an optimal gait for a desired movement of translation and rotation of the walking robot systematically.

I. 서 론

반복적이고 단순한 작업에 로봇이 이용됨으로써 생산성을 높이고 제품의 질을 향상시키는데 크게 기여하고 있다. 현재 산업현장에서 사용되는 대부분의 로봇은 작업이 가능한 영역이 고정되어 있는 매니퓰레이터 방식으로 작업 대상물이 로봇 앞으로 이동하

여 멈추면 정해진 작업을 시작하고 작업이 끝나면 다시 작업물이 이동해가는 과정을 반복한다.

이에 비하여 스스로 이동할 수 있는 로봇은 작업 영역의 제한이 없기 때문에 매니퓰레이터 방식의 로봇보다 다양한 작업을 할 수 있을 뿐만 아니라, 방사능 물질을 다루는 일이나 해저에서의 작업, 미지 지형이나 다른 행성의 탐사, 등과 같이 인간에게 유해하거나 위험 부담이 있는 환경에서 사용될 수 있다.

이러한 이동 로봇의 이동 수단은 바퀴, 무한궤도, 다리가 있으나 불균형 지형의 이동에는 다리가 적합하다. 그러나 다리로 이동하는 로봇은 다리가 운동할 수 있는 범위가 제한되어 있으므로 다리를 들어

*正會員, 韓國通信
(Korea Telecom)

**正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1991年 8月 21日

서 이동시키는 동작을 반복해야 한다는 제약을 갖고 있으며, 다리를 들고 내리는 과정에서 쓰러지지 않기 위해서는 안정도를 임계값 이상으로 유지하도록 해야만 한다. 위와 같은 다리이동의 반복적인 패턴(pattern)을 걸음새라 한다.

지금까지의 걸음새 연구의 현황을 보면 Song^[12]은 Local Phase라는 개념을 도입하여 걸음새를 해석할 수 있는 방법을 제시하고 2n개의 다리가 있는 보행 로봇이 직진하는 경우에 물결 걸음새가 최적의 안정도를 갖는 디딤물의 범위를 해석하였다. Hirose^[13]는 금지된 영역이 있는 지형을 보행하는 경우에 게 걸음을 이용한 자유 걸음새를 실현하는 방법을 제시하였다. Mcghee와 Iswandi^[14]는 각 단계마다 천이상태에 있는 다리수를 증가시키는 방향으로 각 다리의 움직임은 알맞게 결정하는 비주기적 자유 걸음새를 개발하였으며, Min^[5]은 게 걸음새에 대하여 다리의 이륙시간을 조절함으로써 안정도를 최적으로 하는 걸음새를 제안하였다. 최근에 Fujii와 Jayarajan^[6,7]은 사각 보행로봇에 있어서 A* 알고리즘에 기초를 둔 그래프 탐색 방법을 이용한 직선 보행에 있어서의 자유 걸음새를 제안하였다.

위에서 언급된 걸음새는 모두 로봇의 회전을 고려하지 않은 직진걸음을 하는 경우에 대한 걸음새를 해석하는 것이다. 그러나 로봇보행이 그것에 부착된 매니퓰레이터를 사용하여 작업을 할 때 로봇의 자세를 바꾸기 위해서는 몸체의 회전이 필요하며, 다각형 형태의 장애물이 있는 2차원 평면상에 주어진 충돌 없는 최단경로는 구간 선형(piecewise linear)으로 주어지게 되는데^[8] 이를 보행로봇이 따라 갈때에도 로봇의 머리 방향을 계속 변화시킬 수 있어야 한다. 따라서 보행로봇이 회전할 수 없다면 충돌회피를 위한 최단 경로를 따라갈 수 없으며, 목적지에 도달한 후 작업할 경우 보행 로봇에 부착된 작업 팔이 향할 수 있는 방향이 제한될 수 있으므로 몸체를 회전시킬 수 있어야 한다.

몸체의 방향을 전환하는 방법에는 기계적인 회전 방법과 발끝의 궤적(trajecory)을 계산하여 각 다리의 동기를 맞추므로써 회전하는 방법으로 나눌 수 있다. 기계적인 회전 방법의 예로 ReCUS^[9]는 몸체가 서로 회전할 수 있는 두개의 프레임(fream)으로 설계되었다. 이에 반해 다리가 독립적으로 제어할 수 있는 세개 이상의 자유도를 갖고 있을 때 몸체에 대하여 요구되는 궤적(trajecory)을 계산하여 회전하는 방법이 제시되었다. Orin^[10]은 OSU Hexapod에 대하여 6각 로봇이 곡률 반경R을 갖고 θ 만큼의 회전을 물결 걸음새를 이용하여 구현하는 방법을 제시

하였는데 물결 걸음새를 이용한 회전은 R이 크고 θ 가 작을 때 안정도의 관점에서 최적에 가까운 걸음새이다. Hirose^[11]은 사각 보행로봇이 곡률반경 R로 θ 만큼 이동할 때의 자유 걸음새에 대하여 연구하였으나 역시 θ 가 커지면 최적이 될 수 없으며, 구간선형으로 주어지는 경로의 추적에는 R을 무한대로 높고 근사적으로 해야 하는 단점이 있다.

이상의 두 연구에서는 로봇을 어떤 위치로 이동시키기 위해서는 회전과 위치이동을 분리해서 제어해야 하는 비효율적인 면이 있다. 또한 물결 걸음새를 이용한 회전이기 때문에 직진일 때와는 달리 최적의 회전 걸음새가 아니고 회전각이 크게되면 안정도가 크게 떨어지는 단점을 갖고 있다. 위의 문제점은 3장에서 시뮬레이션 결과로 보이고자 한다.

본 논문에서는 앞에서 지적한 문제점을 해결하기 위해 직선으로 이동하면서 회전하는 경우에 대한 최적의 회전 걸음새를 제시하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론에 이어, 2장에서는 걸음새에서 많이 사용되어지는 용어 및 본 논문에 사용된 좌표계를 정의하고 본 논문에서 다루고자 하는 문제를 정의한다. 3장에서는 회전 가능한 다리 이동 순서 및 구해진 다리이동 순서에 대하여 안정도의 관점에서 최적이 되는 각 다리의 이륙 시각을 찾는 방법을 제시하며 기존의 물결 걸음새, 게 걸음새와 제안된 회전 걸음새의 상호 관계를 알아 본다. 4장에서 본 연구에 대한 결론을 기술하고자 한다.

II. 좌표계 및 문제설정

1. 걸음새 해석을 위한 용어 정의

본 논문에서 걸음새 용어들을 정의하면 다음과 같다.^[11,12]

[정의 1] 이동구간(transfer phase) : 다리가 지면에 떨어진 후 다음에 착지할 위치로 이동하는 시간구간을 말한다.

[정의 2] 지지구간(support phase) : 다리가 지면에 닿아있는 상태로 몸체의 지지 및 이동을 위해 추진하는 시간구간을 말한다. 지지구간에 있는 다리의 집합을 Q로 표시하기로 한다.

[정의 3] 지지다각형(support polygon) : 지지 구간에 있는 다리의 착지점을 수평면상에 투영시킨 후, 이 점을 연결하여 얻은 다각형을 말한다.

[정의 4] 이벤트(event) : 다리의 이륙(lift)과 착지(placement)를 이벤트라 한다. 다리를 이

룩하는 시각을 이복시각으로 표기하기로 한다.

- [정의 5] 주기 걸음새 (periodic gait) : 모든 다리의 유사한 상태들이 일정한 시간 간격으로 반복되는 걸음새이다. 반복되는 시간 간격을 주기시간 T 라 하고, t 는 주기시간 T 에 대하여 정규화한 시간이다.
- [정의 6] 디튠율 (duty factor) : 다리가 지지구간에 있는 시간을 주기시간 T 로 나눈것을 말한다. i 번째 다리의 디튠율을 β_i 로 표기한다.
- [정의 7] 보폭 (stride) : 한 걸음새 주기 동안 몸체의 중심이 이동한 거리이다.
- [정의 8] 정적 안정도 (stability margin) : 몸체의 무게 중심을 지지다각형에 투영시켰을 때 투영점과 지지다각형의 각 변까지의 거리 중 가장 짧은 거리이다.
- [정의 9] 진행 방향 안정도 (longitudinal stability margin) : 그림1에 나타난 것처럼 몸체의 무게중심의 투영점과, 몸체 좌표계에서 로봇의 진행방향에 대하여 X축 방향으로 지지다각형의 변까지의 거리 중 짧은 것을 말한다. 무게중심의 투영점과 뒷 경계면까지의 거리를 S_{Lr} 로 표기하고 앞경계면까지의 거리를 S_{Lf} 로 표기할 때 진행방향 안정도, $S_L = \min(S_{Lr}, S_{Lf})$.
- [정의10] 진행 방향 걸음새 안정도 (longitudinal gait stability margin) : 한 걸음새 주기동안 나타나는 모든 지지다각형에서 구해진 진행방향 안정도 중 가장 작은 것을 말한다.
- [정의11] 정칙 걸음새 (regular gait) : 모든 다리의 디튠율이 같은 걸음새를 말한다.

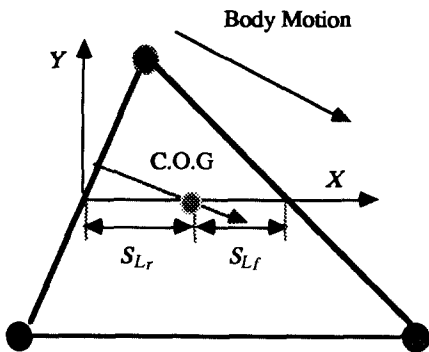


그림 1. 지지다각형과 진행방향 안정도
Fig. 1. Support polygon and longitudinal stability margin.

[정의12] 보행 체적 (walking volume) : 사각 보행로봇의 3차원 운동을 하는 발끝이 도달할 수 있는 체적으로 주어지는 영역을 말한다.

2. 문제 설정 및 사용 좌표계의 정의

본 논문에서는 그림2와 같이 주어진 사각 보행로봇의 무게중심이 일정한 높이에서 X방향과 Y방향에 대하여 각각, 정속도, A와 B를 갖는 평행이동과 Z축을 기준으로 ϕ_0 의 각 속도를 갖는 회전 이동을 동시에 하는 경우에 대해 물결 걸음새와 같은 주기적이고 정칙인 걸음새에 대하여 기술하고자 한다. 즉 각 다리의 디튠율이 같으며, 한 주기내에서 각 다리는 한번의 이동 구간만을 갖는다.

그림2에서 $\{R\}$ 은 몸체의 무게 중심에 설정된 로봇 좌표계이며, $\{H_i\} (i=f, r, l, r, l)$ 은 각 다리의 발끝이 보행체적의 중심에 위치할 때 구동축에 설정되어 좌표계 $\{R\}$ 과 평행이동 관계에 있는 다리 좌표계이다. 발끝의 위치는 다리 좌표계에 대하여 표시한다.

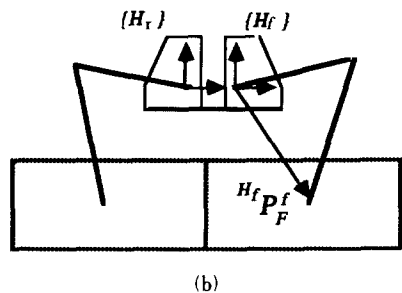
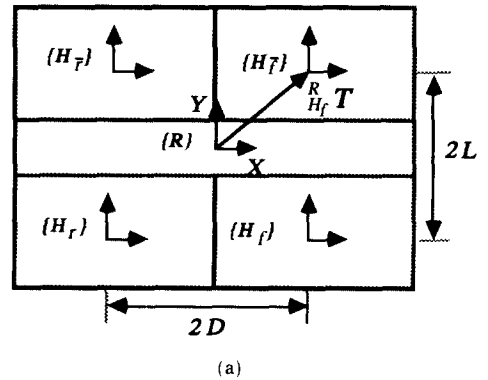


그림 2. 4각 보행로봇의 기하학적 모델
(a) 위에서 볼 때 (b) 옆에서 볼 때
Fig. 2. A geometric model of quadruped walking robot.
(a) top view, (b) side view.

$${}^R P_F^i = {}^R_{H_1} T \cdot {}^{H_1} P_F^i, \quad i=f, \bar{f}, r, \bar{r} \quad (1)$$

$${}^R_{H_1} T = \begin{bmatrix} I & {}^R P_{H_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ${}^R P_{H_1}$ 는 보행로봇의 기구적인 크기에 의존한다.

각 다리의 발끝의 위치가 모두 보행 체적의 중심에 위치할 때를 초기 자세로 하며 이동후에도 이와 같은 자세가 되도록 한다. 이때 로봇 좌표계 $\{R\}$ 을 $\{W\}$ 좌표계로 설정한다. 즉,

$${}^W P_F^i(0) = {}^R P_F^i(0) \quad i=f, \bar{f}, r, \bar{r} \quad (3)$$

로봇의 무게 중심이 이동하는 궤적이 좌표계 $\{W\}$ 에 대하여 로봇 몸체의 높이를 일정하게 유지하면서 $(A \cdot t, B \cdot t)^T$ 의 직선운동과 $\phi_0 \cdot t$ 의 회전운동을 하면서 보행하므로

$${}^W_R T(t) = \begin{bmatrix} R(t) & {}^W P_R(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^W P_R(t) = [A \cdot t \quad B \cdot t]^T \quad (5)$$

$$R(t) = \begin{bmatrix} \cos(\phi_0 \cdot t) & -\sin(\phi_0 \cdot t) \\ \sin(\phi_0 \cdot t) & \cos(\phi_0 \cdot t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(1),(2),(3)에 의하여 좌표계 $\{W\}$ 에 대한 i 번째 발끝의 위치 ${}^W P_F^i$ 는 다음과 같다.

$${}^W P_F^i(t) = {}^W_R T(t) \cdot {}^{H_1} P_F^i(t), \quad i \in Q \quad (7)$$

$${}^{H_1} T(t) = {}^W_R T(t) \cdot {}^R_{H_1} T \quad (8)$$

$t=0$ 에서 발끝의 위치를 로봇 좌표계의 $x-y$ 평면으로 투사시켜 나타내면 다음과 같다.

$${}^W P_F^i(0) = (D-L)^T \quad (9)$$

$${}^W P_{\bar{F}}^i(0) = (D \ L)^T \quad (10)$$

$${}^W P_F^i(0) = (-D \ -L)^T \quad (11)$$

$${}^W P_{\bar{F}}^i(0) = (-D \ L)^T \quad (12)$$

$t=1$ 에서의 발끝의 위치는

$$\begin{bmatrix} {}^W P_F^i(1) \\ 1 \end{bmatrix} = {}^W_R T(1) \cdot \begin{bmatrix} {}^W P_F^i(0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, ${}^W_R T(1) = \begin{bmatrix} \cos\phi_0 & -\sin\phi_0 & A \\ \sin\phi_0 & \cos\phi_0 & B \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$${}^W P_F^i(1) = [D\cos\phi_0 + L \sin\phi_0 + A \ D\sin\phi_0 - L\cos\phi_0 + B]^T \quad (14)$$

$${}^W P_{\bar{F}}^i(1) = [D\cos\phi_0 - L \sin\phi_0 + A \ D \sin\phi_0 + L\cos\phi_0 + B]^T \quad (15)$$

$${}^W P_F^i(1) = [-D\cos\phi_0 + L\sin\phi_0 + A \ -D\sin\phi_0 - L \cos\phi_0 + B]^T \quad (16)$$

$${}^W P_{\bar{F}}^i(1) = [-D\cos\phi_0 - L \sin\phi_0 + A \ -D\sin\phi_0 + L\cos\phi_0 + B]^T \quad (17)$$

그림2와 같이 주어진 사각 보행로봇의 경우 다음과 같이 4개의 진행 방향으로 나누어 걸음새를 생각할 수 있다.³⁾¹⁵⁾

$$-\tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \tan^{-1} \frac{B}{A} \leq \tan^{-1} \frac{L}{D} \quad (18)$$

$$\tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \tan^{-1} \frac{B}{A} \leq \pi - \tan^{-1} \frac{L}{D} \quad (19)$$

$$\pi - \tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \tan^{-1} \frac{B}{A} \leq \pi + \tan^{-1} \frac{L}{D} \quad (20)$$

$$\pi + \tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \tan^{-1} \frac{B}{A} \leq 2\pi - \tan^{-1} \frac{L}{D} \quad (21)$$

여기서 D, L 은 그림2에 나타난 바와 같이 보행 로봇의 기하학적 크기이다. 사각로봇의 경우에는 위의 4개의 각 방향에 대하여 주기적이고 정칙인 걸음새인 경우에 각각 $24(4!)$ 개의 다리아동 순서가 있을 수 있으나, 로봇이 상하좌우 대칭이므로 식(18)와 같이 주어진 방향으로 진행하는 경우에 대하여 해석하면 나머지 경우에 대해서는 좌표 변환을 하면 쉽게 유추될 수 있다. 이때 다음과 같이 각 다리의 x 축 및 y 축에 대한 기구학적인 제한을 갖는 경우에 대하여 생각하고자 한다. 여기서, 임의의 벡터 ξ 에 대하여 $\xi|_x$ 와 $\xi|_y$ 는 벡터의 x 성분 및 y 성분을 나타낸다.

$$-2D \leq {}^R P_F^i(1)|_x - {}^R P_F^i(0)|_x \leq 2D, \quad i=f, \bar{f}, r, r \quad (22)$$

$$-2L \leq {}^R P_F^i(1)|_y - {}^R P_F^i(0)|_y \leq 2L, \quad i=f, \bar{f}, r, r \quad (23)$$

III. 새로운 회전 걸음새의 제안 및 해석

1. 회전 가능한 다리 이동순서 추출

걸음새는 다리의 이동 순서와 각 다리의 이륙 시 각으로 표현¹⁹⁾되므로, 회전과 평행이동을 동시에 하도록 하는 걸음새를 찾기 위해 먼저, 식(18)의 방향으로 병진운동 및 회전운동을 하면서 무게중심이 이동한다고 했을 때 24개의 다리아동 순서 중에서 걸음새 주기중에 정적 안정(static stability)을 만족할 수 있는 다리아동 순서를 알아본다.

지지다각형과 진행 방향 안정도와는 다음과 같은 성질이 있다.

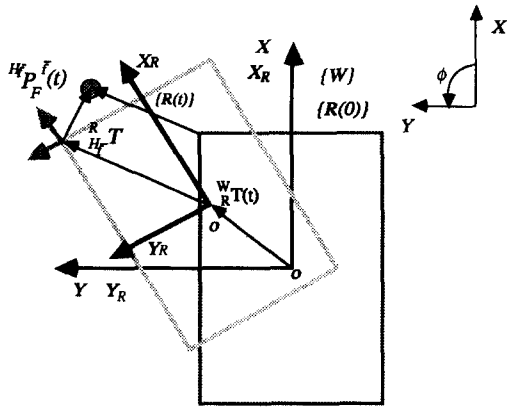


그림 3. 보행시 좌표계 설정
Fig. 3. Coordinate system at walking.

[보조정리 1][2]

걸음새 주기내에서 정적안정도의 판별은 8개의 이벤트 즉 4개의 다리에 대하여 각각의 이륙시각 및 착지시각에서의 정적안정도만을 구하면 된다. 왜냐하면, 걸음새 주기내에서 각 다리는 이동구간과 지지구간으로 나누어지며 무게중심이 일정한 속도로 움직이므로 8개의 이벤트에서 정적안정도가 경계값이 되고 그 사이에서는 선형으로 증가 또는 감소하기 때문이다.

위의 보조정리를 이용하여 주어진 문제에서 정적안정도를 만족할 수 있는 다리 이동 순서를 추출하고자 한다.

[정리 1] 식(18)의 방향으로 병진운동 및 회전운동을 하면서 보행로봇의 무게중심이 이동할 때 24개의 다리이동 순서 중에서 걸음새 주기 중에 정적안정(static stability)를 만족할 수 있는 다리이동 순서는 $\bar{r} \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow \bar{f}, \bar{r} \rightarrow \bar{f} \rightarrow r \rightarrow f, r \rightarrow \bar{r} \rightarrow f \rightarrow \bar{f}, r \rightarrow f \rightarrow \bar{r} \rightarrow \bar{f}$ 이다.

(증 명) 앞으로 증명에 사용되는 용어들을 표 1에 정리하였으며, 그림4를 이용하여 4개의 단계로 나누어 설명하고자 한다. 그림에서 화살표는 로봇의 진행방향을 나타내며, 빗금 친 부분은 지지다각형을 나타낸다.

(1) $S_1 = r$ 또는 \bar{r} 이다.

그림(4a)에서 알 수 있듯이 S_1 을 이륙하기 이전의 t 에 대하여 $C_k[t] \in \Delta ffr, C_k[t] \in \Delta \bar{f}fr$ 이므로 $S_1 \neq f, \bar{f}$ 이다. 첫번째 이동다리로 r 또는 \bar{r} 를 선택해야만 시간 t 에 대하여 진행 방향 안정도가 0보다 클 수 있다. 그러므로 $S_1 = r$ 또는 \bar{r} .

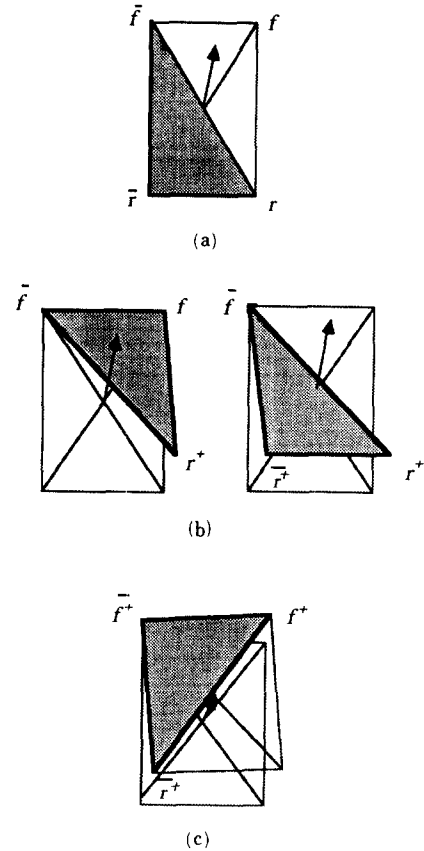


그림 4. 다리이동 순서와 지지다각형
(a) S_1 이 앞 경계의 다리인 경우
(b) 뒷 경계의 이동 후 대각 방향의 다리 이동하는 경우
(c) S_4 이 뒷 경계의 다리인 경우
Fig. 4. Support polygon and leg sequence.
(a) In case, S_1 is one of the front legs,
(b) In case, the diagonal leg moves after one of the rear legs transferred,
(c) In case, S_4 is one of the rear legs.

표 1. 정리1의 증명에 사용된 용어
Table 1. Terminology used in theorem 1.

$C_k[t]$	k번째 보행주기의 시각에서의 무게 중심의 위치
f, r, \bar{f}, \bar{r}	식(18)의 방향을 알이라 하고, +Y를 원점으로 놓았을 때 오른쪽 앞다리가 f, 오른쪽 뒷다리가 r이며 왼쪽 앞의 다리는 \bar{f} , 왼쪽 뒤의 다리는 \bar{r} 이다.
S_i ($i=1, 2, 3, 4$)	i번째로 이동되는 다리를 나타냄
Δ	4개의 다리중 지지구간에 있는 다리들이 이루는 지지다각형
앞경계, 뒷경계	로봇의 운동에 의해 무게 중심이 지지다각형 내부에서 다가가는 변을 앞경계 멀어지는 것을 뒷경계
$f^+, \bar{f}^+, r^+, \bar{r}^+$	하나의 걸음새 주기안에서 이동된 다리를 나타냄

(2) S_1 , 즉 뒷 경계의 다리 r 또는 r 의 이동 직후 이동 가능한 다리는 대각선 방향이 아닌, 이웃하는 다리만 가능하다.

그림 (4b)에 나타난 바와 같이 뒷 경계의 다리를 들었을 때의 지지다각형의 뒷 경계는 대각방향의 다리를 들었을 때의 지지다각형의 앞 경계와 같다. 뒷 경계의 다리를 들었을 때 형성되는 지지다각형 내부에 무게 중심이 위치한다고 가정하면 뒷 경계와 대각선 방향의 다리를 들었을 때 형성되는 지지다각형 내부에 위치하지 않기 때문에 뒷 경계의 다리를 이동한 직후 그 대각선 방향의 다리를 이동시킬 수 없다. 그러나 이동하는 다리가 이웃하는 다리이면 연속하는 지지다각형들이 겹치게 되어 이동 가능한 다리가 된다. 따라서 S_1 이 r 이면 S_2 는 r 의 이웃하는 다리 r 또는 f 이고 S_1 이 r 이면 S_2 는 r 또는 f 이다.

(3) $S_1=r, S_2=r$ 이면 S_3 는 S_2 의 이웃하는 다리 f 가 가능하며, 마찬가지로 $S_1=r, S_2=f$ 이면 S_3 는 f 만 가능하다. 만일 $S_1=r, S_2=f$ 일 때 S_3 를 r, f 로 선택하면 S_2 와 S_3 의 연속하는 두개의 지지다각형들이 겹치게 되어 $S_3=rf$ 이다. 마찬가지로 $S_1=r, S_2=f$ 일 때 $S_3=r, f$ 이다.

(4) $S_4 \neq r, r$

그림 (4c)에서 볼 수 있듯이 S_4 의 다리이륙 시각전 t 에 대하여 $C_k[t] \in \Delta f^+ r^+ r^+, C_k[t] \in \Delta f^+ r^+ r^+$ 이어야 한다. 왜냐하면 S_4 의 착지 후에 로봇의 진행 방향이 식(18)과 같이 주어지는 로봇의 진행 방향에 대하여 이동 완료 후의 무게 중심이 로봇의 기하학적 중심과 일치하기 위해서는 위의 조건을 만족해야만 한다. 그러므로 $S_4 \neq r, r$ 이다. $S_4=f, f$ 이면 시간 t 에 대하여 진행 방향 인정도가 0보다 클 수 있다.

따라서 가능한 다리의 이동순서를 S_1, S_2, S_3, S_4 의 순으로 표기하면 r, f, r, f 와 r, r, f, f 와 r, f, r, f 와 r, r, f, f 가 가능한 다리의 이동 순서이다. (증명 끝)

모든 방향에 대한 다리의 이동순서를 표2에 정리하였다.

2. 다리 이륙시각에 따른 진행방향 안정도

걸음새는 다리의 이동 순서와 각 다리의 이륙 시각으로 표현되므로, 회전과 평행이동을 동시에 하도록 하는 정칙 걸음새를 찾기위해 식(18)과 같은 방향으로 운동하는 경우에 [정리1]에서 구해진 다리의 이동순서를 기초로 각 다리의 이륙시각에 따른 진행방향 걸음새 안정도를 알아본다. [정리1]에서 구해진 4개의 다리이동 순서 (leg sequence)를 다음과 같이 표기하고,

표 2. 진행방향에 따른 가능한 다리이동 순서
Table 2. Feasible leg sequences according to the leg sequence.

이동방향	가능한 다리 이동순서
$-\tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \theta \leq \tan^{-1} \frac{L}{D}$	$r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ $r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$ $r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ $r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$
$\tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \theta \leq \pi - \tan^{-1} \frac{L}{D}$	$r \rightarrow f \rightarrow f \rightarrow r$ $r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ $f \rightarrow r \rightarrow r \rightarrow f$ $f \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow r$
$\pi - \tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \theta \leq \pi + \tan^{-1} \frac{L}{D}$	$f \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow r$ $f \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow r$ $f \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow r$ $f \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow r$
$\pi + \tan^{-1} \frac{L}{D} \leq \theta \leq 2\pi - \tan^{-1} \frac{L}{D} - \tan^{-1} \frac{L}{D}$	$r \rightarrow f \rightarrow f \rightarrow r$ $r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ $f \rightarrow r \rightarrow r \rightarrow f$ $f \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow r$

$$SL_1 \equiv r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f \quad SL_2 \equiv r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$$

$$SL_3 \equiv r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f \quad SL_4 \equiv r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$$

SL_i 에 대하여 ${}^1S_{i,r}(t_i)$ ($1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4$)와 ${}^1S_{i,r}(t_i)$ ($1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4$)로 j 번째의 다리를 드는 시각에서 앞 경계면까지의 진행방향 안정도 및 뒷 경계면까지의 진행방향 안정도를 나타내기로 한다.

[보조정리1]에 따라 SL_i 에 대한 진행방향 안정도 ${}^1S_{i,r}$ 에 대한 최적 다리 이륙시간은 다음과 같이 표현된다.

$$\max_{t_{i,j}=1,2,3,4} {}^1S_{i,r} = \min [{}^1S_{i,r}(t_i^*), {}^1S_{i,r}(t_i^* + 1 - \beta), {}^1S_{i,r}(t_i^*), {}^1S_{i,r}(t_i^* + 1 - \beta)] \quad (24)$$

여기서 t_i^* 에 대한 조건들은 다음과 같다.

$$0 \leq t_i^* \leq 1, \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (25)$$

$$t_i^* \geq t_i^* + (1 - \beta) \quad (26)$$

$$t_i^* \geq t_i^* + (1 - \beta) \quad (27)$$

$$t_i^* \geq t_i^* + (1 - \beta) \quad (28)$$

식(24)에서 ${}^1S_{i,r}(t_i)$ 는 j 번째 다리를 들때에 뒷 경계로 부터의 진행 방향 안정도이다. 또한 t_i^* 가 j 번째 다리를 드는 시각을 나타내므로 j 번째 다리를 놓는 시각은 $t_i^* + 1 - \beta$ 이고 따라서 ${}^1S_{i,r}(t_i^* + 1 - \beta)$ 는 다리 j 를 내릴때의 뒷 경계로 부터의 진행 방향 안정도이다.

지지다각형에 대하여 지지다각형의 앞 경계를 함수 $L_1(\cdot)$ 를 이용 $x = L_1(y)$ 라 표기하고, 뒷 경계를 함수 $L_2(\cdot)$ 를 이용 $x = L_2(y)$ 라 하자. 시각에서 무게 중심의 위치가 식(4)로 주어지고, 디딤음이 β 이며 t 에서 다리를 든다고 했을 때 [정의9]에 의해

$${}^1S_{i,r}^1(t) = {}^wP_R(t) |_{x=L_2({}^wP_R(t)|_y)}, \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (29)$$

$${}^wS_{i,r}^1(t) = L_1({}^wP_R(t)|_y) - {}^wP_R(t) |_{x}, \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (30)$$

이다. [정리1]에서 구한 4가지 다리 이동 순서들에 대한 최적의 다리 이동 시각은 식(24)로 부터 구할 수 있다. 그런데 같은 이동량을 갖으며 이동 방향이 x 축에 대칭이고, 회전양의 크기는 같고 회전 방향만이 반대일 경우, 다리 이동순서 SL₁과 SL₃에 의하여 발생하는 지지다각형들이 x축에 대하여 대칭이며, 또한 SL₂와 SL₄에 대해서도 마찬가지로의 성질이 있다. 따라서 다리 이동순서 SL₁과 SL₂의 진행방향 안정도를 계산하면 SL₃과 SL₄에 대해서는 쉽게 유도할 수 있다.

1) 이동순서가 SL₁, 즉 r → r → f → f 인 경우
 S₁ = r 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고, 뒷 경계는 *P_F'(0)와 *P_F'(1)를 잇는 직선이므로

$$x = \frac{D}{L} \cdot y \quad (31a)$$

또한 앞 경계는

$$x = D \quad (31b)$$

0 ≤ t ≤ 1의 임의의 시각에 r를 드는 경우 드는 시각에 따른 진행 방향 안정도는 식(29), (30)에 의해

$${}^1S_{1r}^1(t) = (A - B \frac{D}{L})t \quad (32a)$$

$${}^1S_{1r}^2(t) = D - At \quad (32b)$$

이다.

S₂ = r 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고, 뒷 경계는 식(13)의 *P_F'(1)과 *P_F'(0)를 잇는 직선의 방정식이므로

$$x = D - \frac{D - A + D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{L + B - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} \cdot (y + L) \quad (33)$$

이고, 앞 경계는 (31b)와 같으므로

$${}^1S_{1r}^3(t) = (A \cdot t - D) + \frac{D - A + D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{L + B - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t + L) \quad (34a)$$

$${}^1S_{1r}^4(t) = D - At \quad (34b)$$

이다.

S₃ = f 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고 앞 경계는 *P_F'(1)과 *P_F'(0)를 잇는 직선의 방정식이므로,

$$x = D + \frac{D - A + D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L - B + D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (y - L) \quad (35a)$$

이고, 뒷 경계는 *P_F'(1)과 *P_F'(1)를 잇는 직선의 방정식이므로

$$x = (A - D \cos \phi_0) - \tan \phi_0 (y + D \sin \phi_0 - B) \quad (35b)$$

이다. 따라서

$${}^1S_{1r}^5(t) = (D - A \cdot t) + \frac{D - A + D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L - B + D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t - L) \quad (36a)$$

$${}^1S_{1r}^6(t) = (A \cdot t - A + D \cos \phi_0) + \tan \phi_0 (B \cdot t + D \sin \phi_0 - B) \quad (36b)$$

이다.

S₄ = f 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고 앞 경계는 *P_F'(1)과 *P_F'(1)을 잇는 직선의 방정식이므로

$$x = A + \frac{D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{D \sin \phi_0 - L \cos \phi_0} \quad (37)$$

이고, 뒷 경계는 (36b)와 같으므로

$${}^1S_{1r}^7(t) = A \cdot (1 - t) + \frac{D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{D \sin \phi_0 - L \cos \phi_0} B \cdot (t - 1) \quad (38a)$$

$${}^1S_{1r}^8(t) = (A \cdot t - A + D \cos \phi_0) + \tan \phi_0 (B \cdot t + D \sin \phi_0 - B) \quad (38b)$$

이다.

(2) 다리이동 순서가 SL₂, 즉 r → f → r → f 인 경우

S₁ = r 이므로 뒷 경계 및 앞 경계가 (32a) 및 (32b)와 같으므로

$${}^2S_{1r}^1(t) = (A - B - \frac{D}{L})t \quad (39a)$$

$${}^2S_{1r}^2(t) = D - At \quad (39b)$$

이고, S₂ = f 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고 앞 경계는 식(33)으로 표시되며 뒷 경계는 *P_F'(1)과 *P_F'(0)를 잇는 직선이므로,

$$x = -D + \frac{D + A - D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L + B - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (y + L) \quad (40)$$

이다. 따라서,

$${}^2S_{1r}^3(t) = -(D + A \cdot t) - \frac{D - A + D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{B + L - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t + L) \quad (41a)$$

$${}^2S_{1r}^4(t) = A \cdot t + D - \frac{D + A - D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L + B - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t + L) \quad (41b)$$

이다.

S₃ = r 이므로 지지다각형은 Δfrr 이고 뒷 경계는 식(33)이고, 앞 경계는 *P_F'(0)와 *P_F'(1)를 잇는 직선이므로

$$x = D + \frac{-D + A - D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L + B + D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (y + L) \quad (42)$$

이다. 따라서

$${}^2S_{Lr}^1(t) = (A \cdot t - D) + \frac{D - A + D \cos \phi_0 + L \sin \phi_0}{L + B - D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t + L) \quad (43a)$$

$${}^2S_{Lr}^2(t) = D - A \cdot t + \frac{-D + A + D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{L + B + D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t + L) \quad (43b)$$

$S_4 = f$ 이므로 지지다각형은 $\Delta f^+ r^+ r^+ i$ 이고 앞 경계는

$$x = A + \frac{D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (y - B) \quad (44)$$

뒷 경계는 (35b)와 같으므로

$${}^2S_{Lr}^3(t) = A - A \cdot t + \frac{D \cos \phi_0 - L \sin \phi_0}{D \sin \phi_0 + L \cos \phi_0} (B \cdot t - B) \quad (45a)$$

$${}^2S_{Lr}^4(t) = (A \cdot t - A + D \cos \phi_0) + \tan \phi_0 (B \cdot t + D \sin \phi_0 - B) \quad (45b)$$

이다.

(3) 다리이동 순서가 SL_3 , 즉 $r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ 인 경우

SL_1 과 같은 이동량을 갖으면서 이동방향이 x 축에 대칭이고 같은 회전량에 대하여 회전방향만이 반대일 경우 SL_1 에 의해 발생하는 지지다각형이 x 축에 대칭이므로 SL_1 에서 구한 ${}^1S_{Lr}^1(t)$ 및 ${}^1S_{Lr}^2(t)$ 에서 ϕ_0 대신에 $-\phi_0$ 을 그리고 B 대신에 $-B$ 를 대입하면 ${}^3S_{Lr}^1(t)$ ${}^3S_{Lr}^2(t)$ 이 된다.

(4) 다리이동 순서가 SL_4 , 즉 $r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$ 인 경우

SL_2 과 같은 이동량을 갖으면서 이동방향이 x 축에 대칭이고 같은 회전량에 대하여 회전 방향만이 반대일 경우 SL_2 에 의해 발생하는 지지다각형이 x 축에 대칭이므로 SL_2 에서 구한 ${}^2S_{Lr}^1(t)$ 및 ${}^2S_{Lr}^2(t)$ 에서 ϕ_0 대신에 $-\phi_0$ 을 그리고 B 대신에 $-B$ 를 대입하면 ${}^4S_{Lr}^1(t)$ ${}^4S_{Lr}^2(t)$ 이 된다.

3. 최적 회전 걸음새 및 시뮬레이션

최적의 회전걸음새는 모든 가능한 걸음새 중 진행 방향 걸음새 안정도가 가장 큰 걸음새를 의미한다. 각 다리이동 순서에 대해 최적의 진행방향 걸음새 안정도를 ${}^1S_L^* = \max {}^1S_L$ 로 표기할 때 최적의 진행방향 걸음새 안정도 S_L^* 는

$$S_L^* = \max_{1 \leq i \leq 4} ({}^1S_L^i) \quad (46)$$

이다. SL_i 의 다리이동 순서에서 j 번째의 다리를 드는 시각에서의 진행방향 안정도를 나타낸다고 했을 때 이는 다음과 같이 일반적으로 표시된다.

$${}^1S_{Lr}^i(t) = r^i a_j^i \cdot t + r^i b_j^i \quad (1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4) \quad (47a)$$

$${}^1S_{Lr}^j(t) = r^j a_i^j \cdot t + r^j b_i^j \quad (1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4) \quad (47b)$$

여기서, $r^i a_j^i$, $r^i b_j^i$, $r^j a_i^j$, $r^j b_i^j$ 는 앞절에서 유도되었다.

주어진 이동량 A, B, ϕ_0 에 대한 최적의 진행방향 걸음새 안정도 및 각 다리의 이륙시간은 식(24)와 식(45)로 구해지는데 먼저, 다음과 같은 성질을 알아보자.

[성질 1] 식(24)에서 ${}^1S_{Lr}^i(t)$ 와 ${}^1S_{Lr}^i(t+1-\beta)$ 둘 중에서 최소치는 ${}^1S_{Lr}^i(\cdot)$ 가 1차 함수이므로 $r^i a_j^i$ 의 부호에 따라 결정된다. 즉, $r^i a_j^i$ 가 (+)인 경우는 ${}^1S_{Lr}^i(t) < {}^1S_{Lr}^i(t+1-\beta)$ 이므로 ${}^1S_{Lr}^i(t)$ 만 고려하면 된다. 마찬가지로 관계가 ${}^1S_{Lr}^j(t)$ 와 ${}^1S_{Lr}^j(t-1+\beta)$ 에 대해서도 성립한다. 그러므로 식(24)에서 주어진 이동량에 따라 16개의 직선이 아닌 8개의 직선만 고려하면 된다.

[성질 2] $r^i a_j^i$ 와 $r^j a_i^j$ 는 항시 부호가 반대이다. 왜냐하면 로봇의 무게중심이 지지다각형의 내부에 있으므로 앞과 뒤의 경계면에 대하여 한쪽에서 멀어지면 다른쪽으로는 접근하게 되므로 앞 경계면에 대한 진행방향 안정도의 변화율은 뒷 경계면에 대한 진행 방향 안정도의 변화율과는 부호가 서로 반대이다.

[성질 3] ${}^1S_{Lr}^i(t)$ 와 ${}^1S_{Lr}^i(t)$ 의 관계에서 알 수 있듯이 ${}^1S_L^* \leq D/2$ 이다. 즉, 각 다리 이동순서에서 첫번째 다리 이동에서 얻을 수 있는 $B=0$ 일 경우 최대가 되며 이때의 값이 $D/2$ 이므로 위의 관계가 성립한다.

식(24)와 같은 일반적인 형태의 문제는 4개의 변수에 대해 하나의 비선형적인 목적함수를 푸는 문제로 그 해법이 쉽지 않다. 그렇지만 본 연구의 문제로부터 유도된 성질 1, 2, 3을 이용 다음과 같은 알고리즘을 제시한다.

[알고리즘]

[1] 먼저, 식(22), (23)으로부터 각 다리가 이동 해야 할 양이 x 축 및 y 축의 기구학적 조건을 만족하는지 점검한다.

[2] 위의 조건들을 만족하는 이동량에 대하여, SL_i 에 대한 $r^i a_j^i$, $r^i b_j^i$, $r^j a_i^j$, $r^j b_i^j$ 를 구한다.

[3] [성질1]에 따라 8개의 직선의 방정식을 선택한다.

[4] [성질3]에 따라 1S_L 을 $D/2$ 로 부터 δS_L 만큼 감소시켜 가면서 8개의 직선의 방정식에서 1S_L 이 되는 t 를 구한다. 이들이 처음으로 식(24), (25), (26), (27)의 조건을 모두 만족 시킬때의 1S_L 이 ${}^1S_L^*$ 가 된다. 이때 1S_L 이 0이 될 때까지도 ${}^1S_L^*$ 가 구해지지 않으면 주어진 이동량에 대하여 SL_i 의 다리이동 순서로는 정적 안정도를 만족할 수 없는 경우이다.

[5] (4)에서 구한 'S*'을 만족하는 r는 (성질2)에 따라 어떠한 구간으로 주어지게 된다. 따라서 각 다리의 이동시각은 각 구간내에서 식(24), (25), (26), (27)을 만족하도록 하는 r을 선택하면 된다.

위와 같은 알고리즘을 모든 $SL_i (1 \leq i \leq 4)$ 에 대해 적용한 후 식(45)를 이용하여 구할 수 있다.

앞으로 언급될 시뮬레이션 결과는 위와 같은 알고리즘을 $D=550.0mm$ 이고 $L=410.0mm$ 인 보행 로봇에 적용한 것이다. 먼저 보폭이 300mm이고 디딤율이 0.9일때 계걸음각 $\tan^{-1}A/B$ 과 회전각을 변화시키면서 각 걸음새의 진행 방향 걸음새 안정도를 시뮬레이션한 결과는 그림(5)와 같다. 이때 최적 안정도는 식(45)로부터 그림6을 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 3개의 경계 곡선이 존재한다. 이 경계를 기준으로 어떤 걸음새에서 다른 걸음새로 바뀐다.

계 걸음각을 일정하게 하면서 회전하는 경우의 회전각에 따른 최적의 걸음새를 생각하면 다음과 같이 된다. 그림6에서 보는 바와 같이 회전각의 크기가 작은 경우 $r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f, r \rightarrow f \rightarrow r \rightarrow f$ 의 걸음새로 이동할

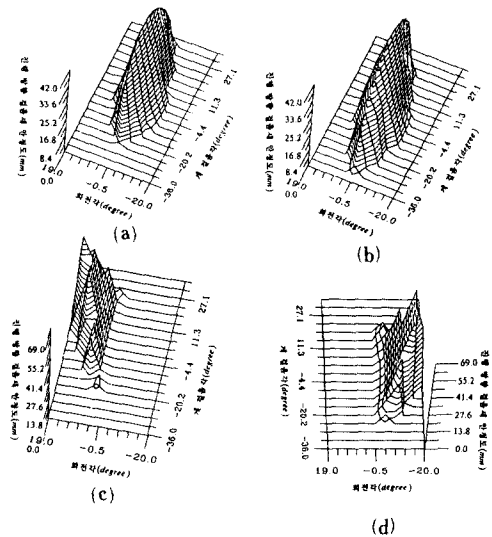


그림 5. 다리아동 순서에 따른 진행방향 걸음새 안정도

- (a) 다리 이동순서 (r→f→r→f)
- (b) 다리 이동순서 (r→f→r→f)
- (c) 다리 이동순서 (r→r→f→f)
- (d) 다리 이동순서 (r→r→f→f)

Fig. 5. Longitudinal gait stability margin according to leg sequence.

- (a) (r→f→r→f), (b) (r→f→r→f)
- (b) (r→r→f→f), (d) (r→r→f→f).

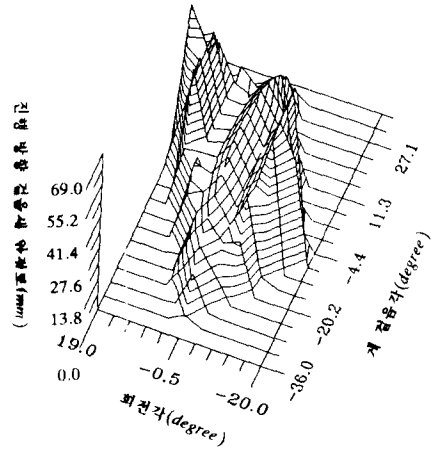


그림 6. 최적 진행 방향 걸음새 안정도

Fig. 6. Optimal longitudinal gait stability margin.

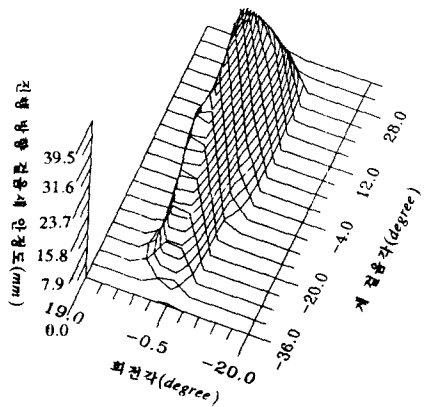


그림 7. 물결 걸음새를 이용한 회전의 진행 방향 걸음새 안정도

Fig. 7. Longitudinal gait stability margin of turning using wave gait.

때 최적의 걸음새가 된다. 회전각의 크기가 커지면 $r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f, r \rightarrow r \rightarrow f \rightarrow f$ 의 걸음새로 이동할 때 최적의 걸음새가 된다. 회전각에 따른 진행 방향 걸음새 안정도의 변화를 고찰해 보면, 회전각이 0°로 부터 경계까지 증가하는 동안 진행 방향 걸음새 안정도가 감소하지만, 회전각이 경계보다 커지면 진행 방향 걸음새 안정도가 커진다. 계 걸음각의 영향을 보면 계 걸음각이 커지면 보행 체적이 제한되어 있는 관계로 회전할 수 있는 각이 작아진다. 또 계 걸음각이 양

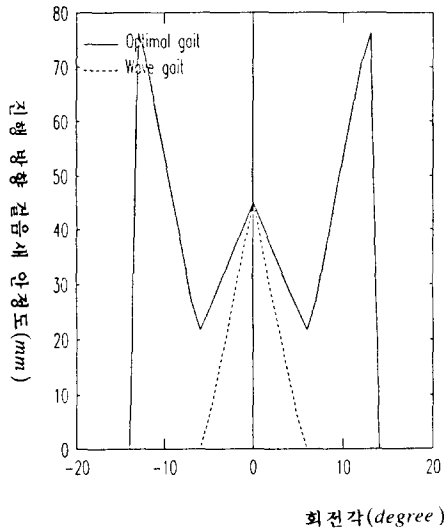


그림 8. 진행방향 걸음새 안정도의 비교
 Fig. 8. A comparison of longitudinal gait stability margin.

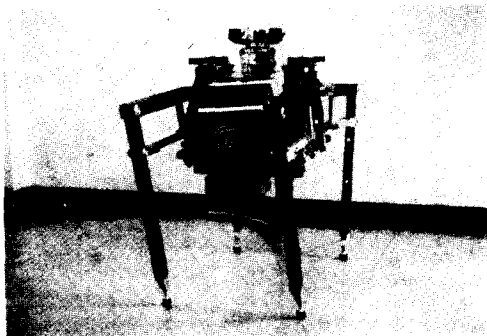


그림 9. 사각 보행로봇 KAISER-II
 Fig. 9. A Quadruped walking robot KAISER-II.

이때 회전 가능한 각은 음의 방향이 양의 방향보다 크다. 계 걸음각이 음이면 위와 반대가 된다. 원인은 계걸음으로 인하여 보행체적을 특정 방향으로 치우쳐 쓰기 때문이다.

물결 걸음새를 이용하여 회전 걸음새를 적용했을 때 진행 방향 걸음새 안정도를 시뮬레이션한 결과를 그림7에 나타내었다. 계 걸음각과 회전각이 작을때 진행 방향 걸음새 안정도는 그림6의 최적의 회전 걸음새의 진행 방향 걸음새 안정도보다 약간 작다. 그림8은 회전각이 커지면 물결 걸음새를 이용한 회전 걸음새의 진행 방향 안정도는 작아지고, 최적의 회전

걸음새의 진행 방향 걸음새 안정도와 차가 점점 커짐을 나타낸다. 또 진행 방향 걸음새 안정도가 0 이상인 경우 이동가능이라 할 때 물결 걸음새를 이용한 회전 걸음새보다 본 논문에서 제안된 회전걸음새가 회전할 수 있는 각이 큼을 알 수 있다.

제안한 회전 걸음새에서 계 걸음각과 회전각을 0°으로 하면 물결 걸음새가 된다. 또 0이 아닌 계걸음각에 대해서 계걸음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안된 회전 걸음새는 물결 걸음새와 계걸음을 포함하는 걸음새로, 사각 보행 로봇이 평행이동, 회전이동을 동시에 하는 경우의 최적의 걸음새이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 사각 보행로봇의 이동 및 작업에 필수적인 회전 걸음새를 제안하고 이를 해석하였다. 병진운동 및 회전운동을 하면서 정적안정도를 만족할 수 있는 다리이동 순서를 찾아 내었으며 각각의 다리이동 순서에 대하여 진행 방향 걸음새 안정도가 최대가 되도록 각 다리의 이륙시간을 정하여 방법을 제시함으로써 주어진 직선이동량과 회전량에 대하여 최적의 다리이동 순서 및 각다리의 이륙시간을 정할 수 있도록 하였다. 이를 물결 걸음새를 이용하여 회전하는 경우와 비교하여 제안한 회전 걸음새의 진행 방향 걸음새 안정도가 클 뿐만 아니라, 회전할 수 있는 각이 더 클 수 있음을 한국과학기술원과 기계연구소, 전자통신연구소 등이 국책과제로 공동개발한 KAISERII의¹²⁾ 적용 결과로 알 수 있었다.

제한된 회전 걸음새는 회전각이 0°이고 계 걸음각이 0°일때 직진 걸음새에서 최적인 물결 걸음새가 되고, 회전없이 계걸음만 하는 경우는 계걸음에서 최적인 canonical crab walk¹³⁾을 포함하는 걸음새이다.

參 考 文 獻

[1] S.M. Song and K.J. Waldron, "An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits" *Int J. Robotics Research*, vol 6, no. 2, pp. 60-71, 1987.
 [2] S.M. Song and B.S. Choi "The optimally stable ranges of 2n legged wave gaits" *IEEE Tr. on SMC*, vol. 20, no. 4, pp. 888-902, 1990.
 [3] S. Hirose "A study of design and control of a quadruped walking vehicle," *Int J.*

Robotics Research, vol. 3, no. 2, pp. 113-133 1984.

[4] R.B. Mcghee and G.I. Iswandhi, "Adaptive locomotion of a multi-legged robot over rough terrain," *IEEE Tr. on SMC*, vol. 9, no. 4, pp. 176-182, 1979.

[5] B. Min, Z. Bien and S.K. Hwang, "On the basic characteristic and the stability properties of quadruped crab gaits," *Int. J. Robotics Research*,

[6] P.K. Pal and K. Jayarajan, "A Free Gait for Generalized Motion," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 5, pp. 597-600, 1990.

[7] P.K. Pal and K. Jayarajan, "Generation of Free Gait-A Graph Search Approach," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 299-305, 1991.

[8] L.P. Tomas and M.A. Welsey, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles" *Comm. ACM*, vol. 22, no. 10, pp. 560-570, 1979

[9] D.J. Todd, "Walking machines," *Kogan Page Ltd.*, 1985.

[10] D.E. Orin, "Supervisory control of a multi-legged robot" *Int J. Robotics Research*, vol. 1, no. 1, pp. 79-91, 1982.

[11] S. Hirose "The Standard Circular Gait of a Quadruped Walking Vehicle," *Advanced Robotics*, vol. 1, no. 2, pp. 143-164, 1986.

[12] 변중남, "시각장치 및 보조 센서를 이용한 Fe-Feedback Controller 및 인공지능을 갖는 관리 제어 시스템 개발" 과학기술 연구보고서(III), 1990.

著 者 紹 介



孫 漢 宣(正會員)
 1965年 12月 4日生. 1989年 충남대학교 전자공학과 졸업. 1991年 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1991年~현재 한국통신 연구개발단 전임연구원



全 命 根(正會員)
 1964年 7月 17日生. 1987年 2月 부산대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1989年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 공학석사 취득. 1989年 3月~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 FMS 스케줄링, Petri Nets, Fuzzy Logic 등임.

卞 增 男(正會員) 第28卷 第6號 B編 參照
 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수