

〈論 文〉

4각 보행로봇의 동적 걸음새 평가

김종년* · 홍형주** · 윤용산**

(1990년 6월 13일 접수)

Feasibility Test for Dynamic Gait of Quadruped Walking Robot

J.N. Kim, H.J. Hong and Y.S. Yoon

Key Words : Walking Robot(보행로봇), Dynamic Gait(동적 걸음새), Gait Feasibility(걸음새 가능성)

Abstract

In this study the feasibility of a dynamic gait for a given quadruped walking robot is investigated through a computer simulation of the walking with certain drivings of the actuators. Two planar inverted pendulums are used to represent the dynamic model of the leg of the walking robot. Its gait motion is assumed to be periodic and symmetric between left and right sides only with half cycle delay. The dynamics of the walking robot is simplified by introducing two virtual legs to produce two planar inverted pendulums in two orthogonal planes and on the basis that certain legs in pair act as one. The feasibility of the dynamic gait motion is established from the following two necessary conditions : (1) The position and velocity of a foot must satisfy the stroke and velocity requirements. (2) The gait motion should be periodic without falling down. The gait feasibility test was applied to a walking robot design showing the specific acceptable speed range of the robot in trot. Also it showed that the higher body height may produce the faster trot gait.

1. 서 론

힘지에서 우수한 운동성과 높은 에너지 효율을 갖는 보행로봇은 바퀴로 구동되는 이동기구에 비해 특수한 목적을 위해서는 많은 장점을 가지므로 많이 연구되고 있다. 평지에서는 자동차와 같이 바퀴로 구동되는 차량보다 효율면에서 뛰어난 것은 없으나 특수한 지형 예를들어 계단이나 파이프등이 바닥에 깔려있는 곳에서 사람이 접근할 수 없는 성질의 작업이 요구되는 경우 사람을 대신하여 운동성이 우수한 보행시스템의 사용이 바람직 할 것이

다. 그러나 보행로봇은 초기 개발단계에 있으며 느린속도, 낮은 에너지 효율등으로 인하여 아직까지는 실험실 수준을 크게 벗어나지 못한 실정에 있다.

이와같이 우수한 장점에도 불구하고 보행로봇이 아직까지 현실에 널리 이용되지 못하는 이유는 보행로봇의 운동성이 뛰어난 만큼 자유도가 매우 많으며 다 자유도계를 동시에 제어하는 어려움과 자율적인 활동 그리고 우수한 기동성을 내기 위하여 필요한 경량화 및 강력한 동력원이 아직까지 미흡하기 때문이다. 또한 지금까지 개발된 보행로봇들은 대부분 안정여유에 의한 정적인 안정성에 기초한 정적 걸음새들을 취하는 것들이며, 정적인 안정성이 없는 동적 걸음새를 갖는 보행로봇은 그 안정성

*현대정공주식회사 기술연구소

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

연구와 동역학적 해석의 복잡함, 그리고 그에 따른 민감한 제어기술의 취약함 때문에 많이 시도되지 못하고 있는 실정이다.

초기의 연구는 정적 걸음새를 취하는 보행로봇이 주된 것이었다. 그러나 1960년 후반부터 초보적인 동적 걸음새의 연구가 시작되었다. 주로 1각 혹은 2각 로봇에서 동적 보행을 적용하며 사각보행 로봇의 동적 걸음새는 몇몇 연구에서 시도되었다. 이때 보행로봇의 동역학적 해석을 위하여 간단한 역진자 모델(inverted pendulum model)^(1,2)이 이용되었으며 대표적인 모델로서 동적걸음새를 함께 쓰는 걸음새인 준 동적 걸음새(quasi-dynamic gait)가 도입되었으며⁽³⁾ 모든 다리들이 동시에 땅에서 떨어지는 기간이 있는 달리는 걸음새(ballistic flight gait)를 취하는 보행로봇이 연구되었다⁽⁴⁾.

그러나 지금까지의 보행로봇 개발과정을 살펴보면 정적 걸음새에 기초한 보행로봇을 설계, 제작한 후에 시행 착오법에 의하여 가능한 동적 걸음새를 찾았으며⁽³⁾ 따라서 동적 걸음새에 적합한 설계를 얻게 된다는 보장이 없다. 본 연구의 목적은 동적 걸음새를 설계과정에 도입하여 적절한 정적 및 동적 걸음새를 갖는 설계를 구하고자 함이며 이를 위하여 가상의 보행로봇을 가지고 수치적인 시뮬레이션을 시행하여 동적 걸음새의 가능성을 검사함으로써 적절한 설계의 방향을 제시하고자 하는 것이다.

2. 보행로봇의 운동 해석

보행로봇의 운동을 해석하기 위해서는 우선 보행로봇의 구조에 맞는 특정한 걸음새를 결정 하여야 한다. 축도기형(pantograph) 다리구조를 가진 사각보행로봇의 동적 걸음새를 결정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- (1) 평면 직선보행에 적합한 걸음새를 생각한다.
- (2) 주기적 걸음새(peiodic gait)인 경우를 생각한다.
- (3) 1각 지지 경우가 있는 걸음새는 고려 하지 않는다.
- (4) 걸음새는 대칭형 걸음새(symmetric gait)이다.
- (5) 디딤틀이 일정한 경우, 위상차가 일정한 걸음새 만을 고려한다.
- (6) 다리의 질량을 무시하며, 몸체는 하나의 강체로 생각한다.

여기에서 주기적 걸음새란 같은 패턴의 걸음새가 주기시간 단위로 반복되는 걸음새를 말하며 위상이란 1번 다리가 착지한 후 i번 다리가 착지하기까지의 시간을 주기로 나눈 값이다. 또 대칭걸음새는 2n개의 다리를 갖는 보행로봇에서 2i-1번 다리와 2i번 다리사이에 1/2의 위상차가 존재하는 걸음새이며 보행패턴을 정의하는 디딤틀은 한 다리가 보행 주기중 땅을 딛고 있는 시간을 주기로 나눈 값이다.

2.1 가상의 다리 모델 해석

동적 걸음새의 해석에 많이 응용 되고있는 역진자(inverted pendulum) 모델은 실제의 보행로봇과는 차이점이 있으나, 해석의 편리함을 위하여 도입된 가상의 다리를 이용한 것이다. 다리가 지면에 닿아있는 지지구간중 동일한 속도로 구동되는 1쌍의 다리를 가상적인 하나의 다리로 생각 할 수 있다. 4각 보행로봇의 경우 속보(trot), 측대보(pace), 땀(bound)의 걸음새를 구현하기 위해서 Fig. 1과 같이 가상의 다리를 이용하여 등가의 2각 보행로봇으로 대체된다.

4각 보행로봇에서 가상다리를 이용하여 걸음새를 해석하기 위해서는 지지 쌍의 운동이 동시성

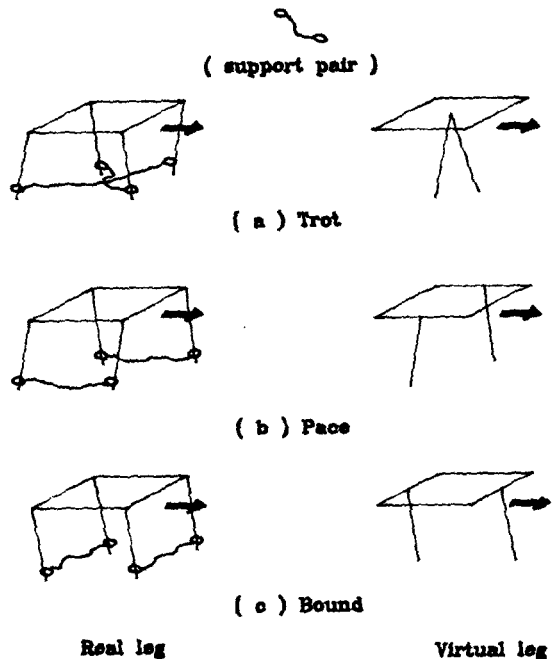


Fig. 1 Classification of gait pattern

(synchronization)을 갖게하는 제어방법과, 실제 다리와 가상다리의 운동이 동일한 결과를 산출하게 하는 가상다리의 선택이 필요하다⁽²⁾. 하나의 다리쌍이 지지구간(support phase)에 있을 경우 다른 다리쌍은 다음 걸음을 준비하기 위하여 다음 착지점으로 이동하는 이동구간(transfer phase)에 놓이게 된다. 속도 걸음새의 경우 가상다리의 착지점은 지지구간에 있는 두 다리의 지지점을 이은 선(diagonal support line)의 중앙에 위치하며, 실제 다리의 성질을 가상다리가 갖기 위하여 진행방향으로 실제 다리의 지지점과 두 구동부(hip joint) 간의 거리와 동일하게 가상다리의 구동부의 위치를 결정한다. 4각 보행로봇에서 4개의 다리가 로봇 질량중심점을 중심으로 대칭형으로 배치되어 있는 경우 가상다리의 구동부 위치는 질량중심점이 된다.

2.2 단 역진자 모델 해석

Adachi⁽¹⁾등은 보행로봇의 동적보행 주기동안의 운동을 해석함에 있어 앞절에서 기술한 바와 같이 동적인 걸음새에서 필수적으로 나타나는 2각 지지기간을 한개의 역진자 모델로 근사화 하였다. Fig. 2에서와 같이 한 주기동안 각다리를 지지구간을 굵은 선으로 표시한 걸음새 도표에서 2개의 다리만이 지면과 닿고 있는 동안의 자세는 Fig. 3에서와 같이 표시할 수 있다. 속도걸음새의 경우 대각 지지선에서 바라본 보행시스템은 Fig. 4와 같이 역진자 모델로 근사화하여 해석할 수 있다.

즉 Fig. 4(a)에서 대각선 방향으로 바라본 이차원 평면에서 전진방향의 좌표를 u 라 정의하면 운동 방정식은

$$m\ddot{u} - \frac{mgu}{h} = 0 \tag{1}$$

이다⁽¹⁾.

여기서 h 는 걸음새의 조건을 결정하기 위해 주어졌던 것으로 몸통의 높이를 나타내며 보행중 일정한 값을 갖는다. 한편 역진자 운동에서 궤도에너지(Orbit Energy)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

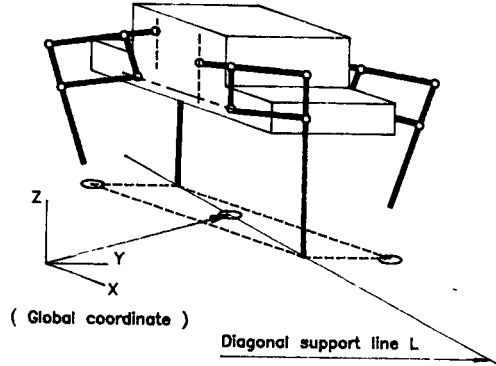
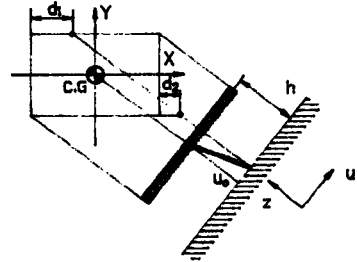
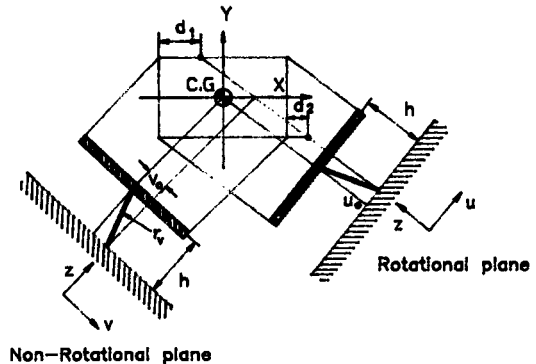


Fig. 3 Two-leg supporting gait



(a) Single inverted Pendulum Model



(b) Dual inverted Pendulum Model

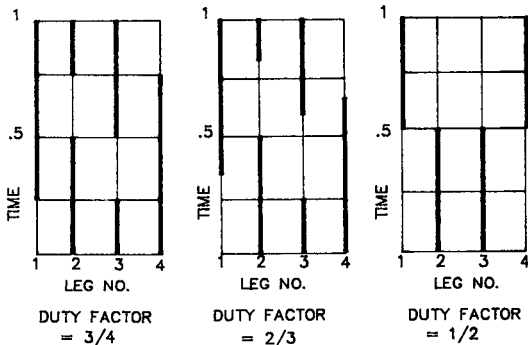


Fig. 2 Gait diagram

Fig. 4 Inverted pendulum model

$$E = E_k - E_p = \frac{mu^2}{2} - \frac{mgu^2}{2 \cdot h} \quad (2)$$

여기서 E_k 와 E_p 는 각각 로봇 몸통의 운동에너지와 위치에너지를 말한다. 2각 지지의 초기상태에서 보행로봇이 진행방향의 역 방향으로 쓰러지지 않기 위해서는 초기의 케도에너지 E_0 가 양의 값을 가져야 한다. 그러므로 로봇의 보행이 계속되기 위한 초기속도의 조건은 다음과 같이 표시된다.

$$u_0 > a \cdot u_0 \quad (3)$$

여기서

$$a = \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (4)$$

이를 x 축 방향으로 환산하면

$$\dot{x} > \frac{a(d_1 + d_2)}{2} \quad (5)$$

이 된다. 여기에서 d_1 과 d_2 는 Fig. 4에서와 같이 표시되고 d_1 과 d_2 의 평균값은 x 축 상에서 질량중심에 대한 대각지지선의 거리를 나타내며 한주기에서 발이 접지하고 있는 시간의 비율을 나타내는 디듀티(duty factor) β 에 따라 결정된다. 대각 지지쌍간의 위상이 $\phi = \beta - 0.5$ 인 경우에는

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{(2-3\beta)S}{2\beta} \\ d_2 &= \frac{(1-\beta)S}{2\beta} \\ \dot{x}_0 &> \frac{(3-4\beta)S \cdot a}{4\beta} \quad (6) \end{aligned}$$

여기에서 S 는 한주기 동안 몸통 좌표에서 바라본 발의 이동량인 내디딤길이(stroke)를 나타낸다. 한편 u 방향의 운동방정식은 초기조건이

$$u(0) = u_0, \quad \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad (7)$$

인 이계 미분방정식이므로 그 해는

$$u = \frac{\left(u_0 + \frac{\dot{u}_0}{a}\right)e^{at} + \left(u_0 - \frac{\dot{u}_0}{a}\right)e^{-at}}{2} \quad (8)$$

이를 X 축 방향으로 환산하면

$$\begin{aligned} x &= [\{2\dot{x}_0 - a(d_1 + d_2)\}e^{at} \\ &\quad - \{2\dot{x}_0 - a(d_1 + d_2)\}e^{-at}] / 4a \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 \quad (9) \end{aligned}$$

2.3 복 역진자 모델 해석

앞절에서 기술된 한개의 역진자 모델로서는 몸통의 운동을 기술하기에는 부족하다. 실제로 동적걸음새를 구현할때 발생될 것으로 예상되는 몸통의 삼차원 운동을 기술하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4(b)와 같이 회전평면에 직교하는 또 하나의 평면,

즉 비회전평면을 정의한다. 회전평면과 비회전평면에서의 역진자모델을 해석한 후 이를 좌표변환하여 전체좌표계에 대하여 표시함으로써 3차원 동역학적해를 구할 수 있다. 회전평면에서의 역진자 운동은 매 순간마다 하나의 강체가 발끝을 중심으로 회전운동하는 것으로 생각할 수 있다. 비회전평면에서의 운동은 몸체의 회전이 없는 병진운동이며, 다리의 길이가 몸체와 발끝의 수직거리가 일정하게 유지하기 위하여 시간에 따라 변하는 것을 생각할 수 있다. 따라서, 비회전평면에서의 운동 방정식은 단역진자 모델에서의 운동방정식과 마찬가지로

$$\begin{aligned} m\ddot{v} - \frac{mgu}{h} &= 0 \\ h(t) &= r_v(t) \sin \theta_r \\ v(0) &= v_0, \quad \dot{v}(0) = \dot{v}_0 \quad (10) \end{aligned}$$

회전평면에서의 운동방정식은

$$\begin{aligned} \Sigma M &= I\ddot{\theta} \\ &= -F_{ur}(t) \cos \theta + F_{zr}(t) \sin \theta \\ \Sigma F_r &= mr(t) \dot{\theta}^2 \\ &= F_u \sin \theta + F_z \cos \theta - mg \cos \theta \\ \Sigma F_\theta &= mr(t) \ddot{\theta} \\ &= F_u \cos \theta - F_z \sin \theta + mg \sin \theta \quad (11) \end{aligned}$$

여기에서 F_u 및 F_z 는 발끝에 작용하는 u 방향 및 Z 방향의 지면반발력을 말한다. 이들을 지면반발력에 대하여 정리하면

$$\begin{aligned} F_u &= mr(\ddot{\theta} \cos \theta + \dot{\theta}^2 \sin \theta) \\ F_z &= mg + mr\dot{\theta}^2 \cos \theta - mr\ddot{\theta} \sin \theta \quad (12) \end{aligned}$$

또한 회전평면에서 보행로봇 몸통의 회전운동방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}[(I + mr^2) \dot{\theta}] &= mgr \cdot \sin \theta \\ (I + mr^2) \ddot{\theta} + 2mr\dot{r} \dot{\theta} &= mgr \cdot \sin \theta \quad (13) \end{aligned}$$

몸통의 회전속도가 작고 지면에 닿아있는 다리의 운동이 크지 않은 경우 즉 몸통의 요동이 크지 않은 경우에는 $2mr\dot{r} \dot{\theta}$ 를 무시할 수 있기 때문에 보행로봇의 회전평면에서의 운동방정식은 대략 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = \frac{mgr(t) \cdot \sin \theta}{I + mr^2} \quad (14)$$

3. 예제 및 동적 걸음새의 필요조건

사각 보행로봇의 보행속도 V_0 는 몸통에 대한 발끝의 최대 이동속도가 V_{max} 로 주어졌을때

$$V_G = \frac{(1-\beta)}{\beta} \cdot V_{max} \quad (15)$$

로 표시된다. 따라서 보행속도는 디딤률 β 가 작을수록 증가하게 되나 β 가 3/4보다 작게 되면 정적평형을 유지할 수 없는 상황이 발생함으로 동적걸음새가 요구된다. 즉 디딤률 β 가 3/4보다 작은 경우 지면을 딛는 다리의 수가 2개인 구강이 보행주기 동안에 발생하게 되며 이때 몸통의 운동은 이각지지구간이 시작될 때의 초기조건으로부터 몸통의 운동방정식을 풀어야 로봇의 운동을 구할 수 있게 된다.

보행로봇의 동적 걸음새는 정적 걸음새와는 달리 우수한 기동성에 비하여 동작의 안정성을 유지하는데 어려움이 있다. 정적인 안정성이란 보행로봇 질량 중심점을 중력방향으로 투영했을 때 그 투영점이 지지발끝을 이은 지지 다각형(support polygon)내에 존재하면 정적으로 안정하다고 하고 다각형의 안쪽에 있을수록 안정성이 보장된다. 그러나 동적걸음새는 중력의 작용으로 로봇의 운동에 가감속이 있는 걸음새로 정적걸음새에서 안정성에 상응되는 것을 찾기 어려우며 걸음새를 유지함에 있어서 필요한 조건들로부터 동작의 전반적인 여유도를 설정할 수 있겠다. 즉 걸음새가 성립되기 위해서 다음과 같은 조건이 필요하다.

- (1) 앞으로 내딛는 발은 적절한 시간내에 원하는 지점에 디딜 수 있어야 한다.
- (2) 몸체가 내딛던 다리를 받침으로 하여 앞으로 넘어갈 수 있어야 하는 조건 즉 궤도에너지(orbit energy)가 양이 되어야 하는 조건이 갖추어져야 한다.

위의 정의는 동적걸음새 실현에 있어서 최소한의 필요조건이라 할 수 있으며 이를 착지조건과 진행조건이라 부르기로 한다. 다음은 착지조건과 진행조건을 시간의 관점에서와 발끝체적의 관점에서 고찰한 것이다.

3.1 시간의 관점에서의 조건

가상 다리를 이용한 보행로봇의 동적걸음새의 모델링(modelling)에서 θ 가 비교적 작은 값을 가정으로 θ 에 대하여 선형화를 할 수 있다. 즉 속도의 경우에서의 운동방정식 (14)는 다음과 같이 선형화될 수 있다.

$$\ddot{\theta} = \frac{mgr\theta}{I+mr^2} = C\theta \quad (16)$$

발이 땅에서 떨어질때를 초기조건으로 보면 $\theta(0) = \theta_0$, $\dot{\theta}(0) = 0$ 이 되며 따라서 식 (16)으로 부터

$$\theta(t) = \theta_0 \cos h(\sqrt{C}t) \quad (17)$$

앞에서 정의한 착지조건에서, 보행로봇의 운동목적은 대각지지선(diagonal support line)을 가로질러 진행방향으로 나아가는 것이지만 내딛는 다리가 착지할 때 몸체가 많이 기울지 않는 것이 바람직하다. 그러나 다리와 몸체간의 각도는 구동조건에 의하여 시간의 함수로 주어지고 따라서 몸체의 기울기는 다리의 기울기에 의해 정해지게 됨으로

$$\theta(T_0) = \theta_0 \cos h\sqrt{CT_0} \leq \theta_{max} \quad (18)$$

여기서 T_0 는 디딤시간으로 보행주기 T 와 디딤률 β 그리고 속도중 지지상태에 있는 다리의 위상차 ϕ 가 주어지면

$$T_0 = (1-\beta-\phi)T \quad (19)$$

그러면 식(17)로부터 보행주기 T 에 관한 제한조건을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(1-\beta-\phi)T = T_0 \leq \cos h^{-1}\left(\frac{\theta_{max}}{\theta_0}\right) / \sqrt{C} \leq \ln\left(2 \cdot \frac{\theta_{max}}{\theta_0}\right) / \sqrt{C} \quad (20)$$

즉 θ_{max} 에 따라 T 의 허용범위가 결정된다. 한편 지면에 디디고 있는 시간 T_s 는

$$T_s = \frac{S}{V_{sp}} = \beta T \quad (21)$$

여기에서 S 는 보폭(stroke)이고 V_{sp} 는 지면에 디디고 있는 발의 속도이다. 따라서 식 (20)에 제한받는 보행주기 T 는 또한 식 (21)의 T 보다 작아야 한다.

3.2 발끝 체적의 관점에서의 조건

보행로봇의 동적 걸음새 실현에 있어서 적절한 구동부 속도들을 결정하는 것은 매우 중요하다. 그러나, 동적 효과를 정확하게 예측하지 못하면 좋지 못한 결과를 얻게 될 것이다. 구동부 속도들을 결정한다는 것은 몸체에 대한 발끝점의 상대체적을 결정하는 것이며 보행로봇의 보행안정성을 확보할 수 있는 구동부의 속도, 즉 발끝점의 체적이 존재할 것이다. 설계자가 개략적인 구동부 속도를 결정하기 위해 Fig. 5에 보여주고 있는 발끝점 체적의 치수들을 선택 할 필요가 있다. 그리고, 구동부의 성능과 보행속도 등을 고려하여 속도함수를 결정한다. 이는 보행로봇의 동적 효과를 고려하지 않은 것이므로 안정성에 대한 검사는 따로 필요하다.

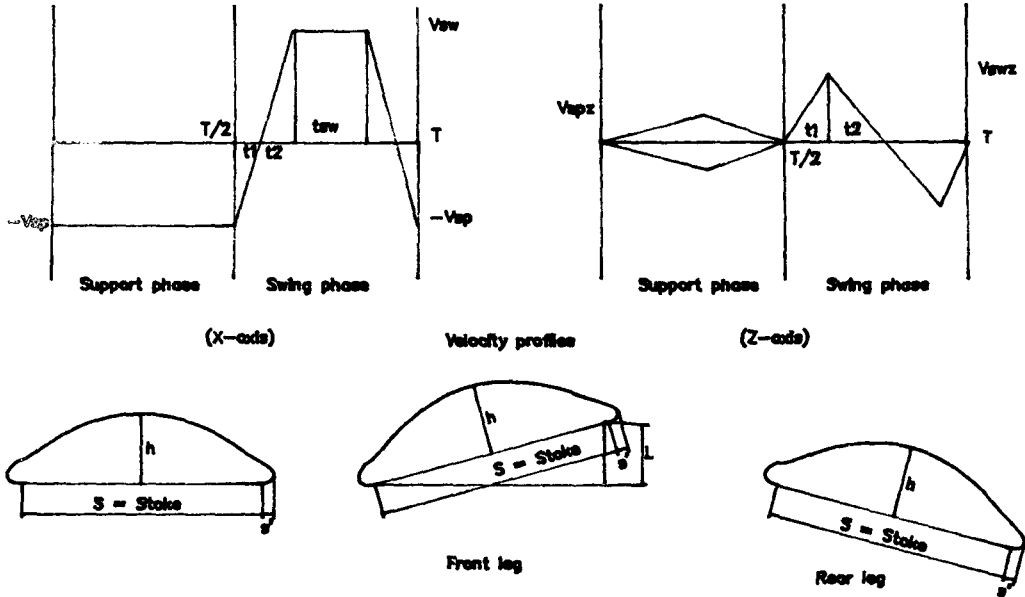


Fig. 5 Velocity profile & foot trajectory

Fig. 5에서와 같이 초기설계 과정에서 결정된 속도들을 적용하여 걸음새를 취할 경우, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 관성좌표계에서 본 발끝의 궤적은 앞 발은 지면을 파고들고 뒷 발은 지면에서 떨어지는 경우가 생기게된다. 이에 대한 보정을 가한 결과를 Fig. 7에 보여주고 있는데 발끝이 디는 순간 지면에 대해 파고 들거나 미처 도달하지 못하는 현상이 없어짐을 알 수 있다.

보행로봇 몸통의 회전운동 즉 롤(roll)과 피치(pitch)운동은 보행속도와 보폭에 따라 큰 차이를

보이며 보폭 0.3m인 걸음새에서 보행속도 0.6m/s를 구현했을 때의, 몸통의 회전운동을 Fig. 8에 표시하였는데 처음의 약 1/2주기를 지나서는 회전운동이 주기적으로 반복되었다.

역진자 모델에 따라 몸통이 궤도에너지를 충분하지 않다면 각변위가 큰 걸음새가 얻어지며 심한 경우 보행을 계속하지 못하는 결과를 초래한다. Fig. 9에서는 보폭이 0.3m로 주어졌을 때 보행속도에 따른 몸통의 궤적을 표시하였다. 첫째 그림은 충분한 궤도에너지를 얻지 못해 보행을 계속하지

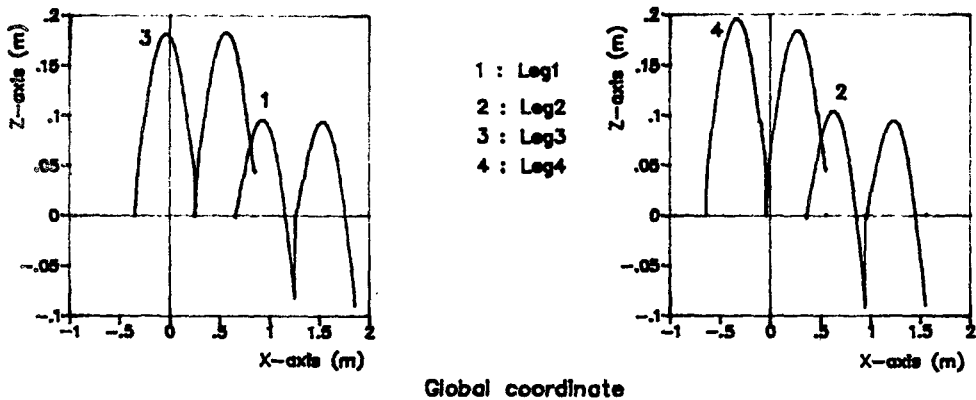


Fig. 6 Trajectory of foot

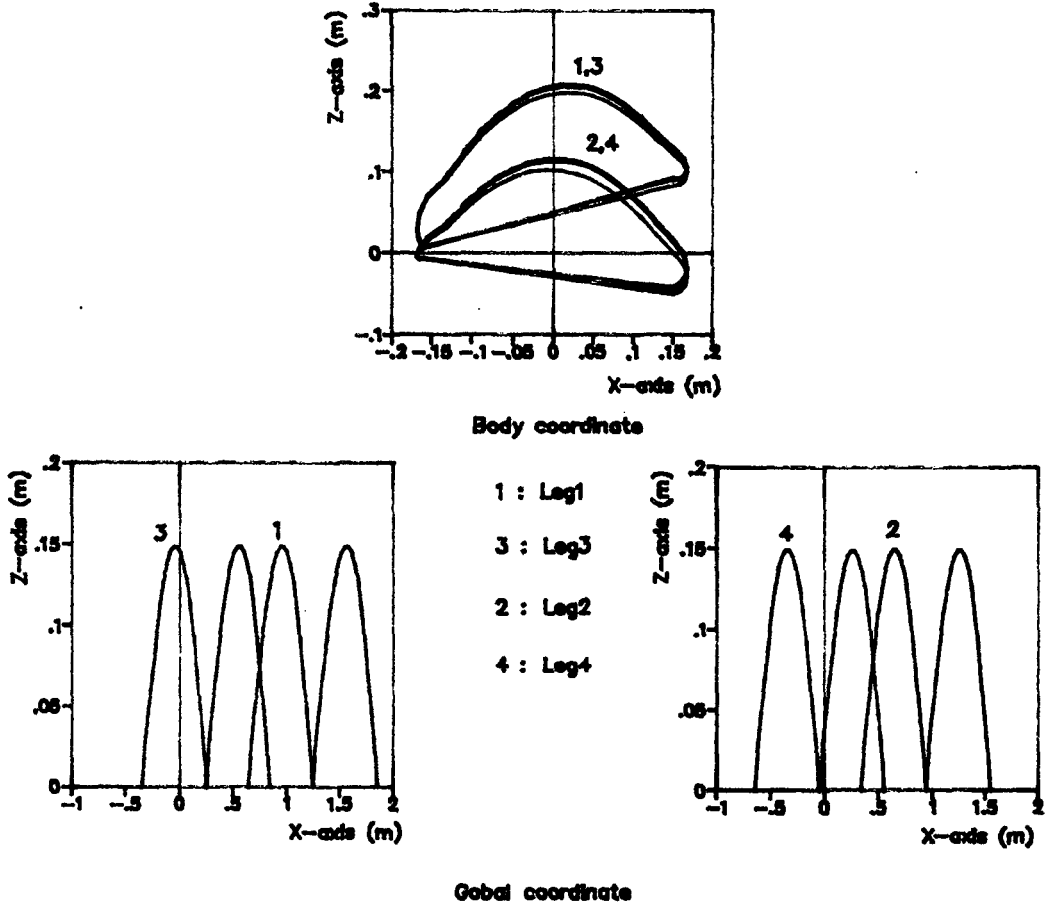


Fig. 7 Trajectory of foot (corrected)

못하고 쓰러지는 경우를 나타낸다. 두번째와 세번째 그림은 보행을 계속할 만큼 케도에너지를 얻는 경우이나 두 번째 그림에서는 속도가 충분하지 못

하기 때문에 세번째 경우보다 몸통의 요동이 심해지는 것을 알 수 있다. 진행중 몸통의 질량중심의 위치를 Fig. 10에 표시하였다. 비록 발끝은 몸통에 대해서, y 축 운동은 하지 않지만 역진자 운동을 하는 것 때문에 몸통은 좌우로 요동을 계속하며 보행한다. 이것은 각 운동과 마찬가지로 보행속도가 느릴 수록 심하게 나타난다.

Fig. 11에서는 보행이 가능한 보행속도와 보폭간의 관계를 그림으로 표시하였다. 최대 보폭과 가능한 보행속도는 거의 선형적인 관계를 보이는 데 이것은 식 (2.2)에서 일정한 높이의 걸음새가 주어진다 면 보행속도와 역진자의 지면착지점의 거리가 선형이 되는 결과와 일치한다. 또한 식 (2.4)에서 몸통의 높이 h 가 클수록 적은 속도로 큰 에너지를 얻을 수 있으므로 보행로봇의 몸체의 높이를 높여서 보행하는 것이 큰 보행속도를 얻을 수 있다. 그

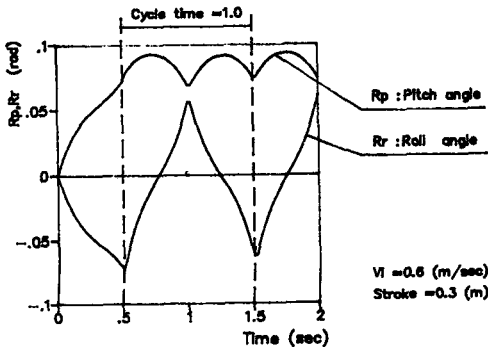


Fig. 8 Angular displacement

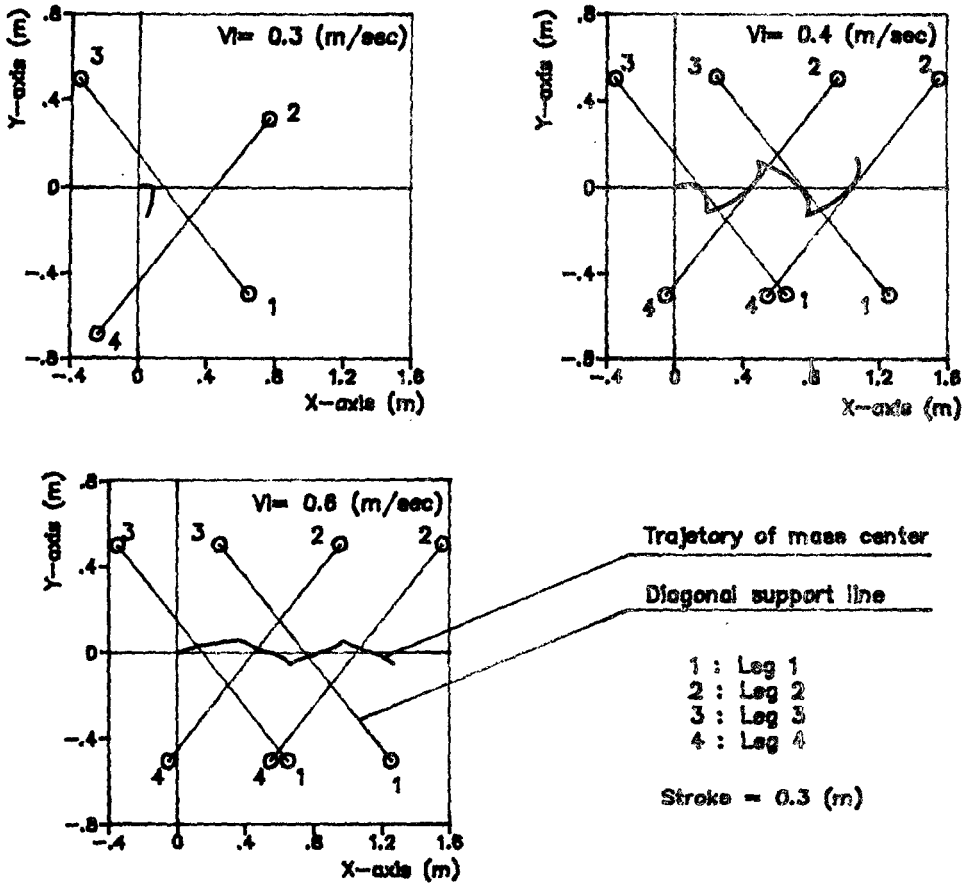


Fig. 9 Projection of mass center

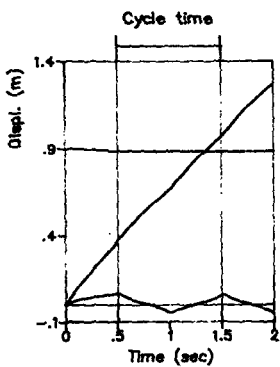


Fig. 10 Displacement of mass center

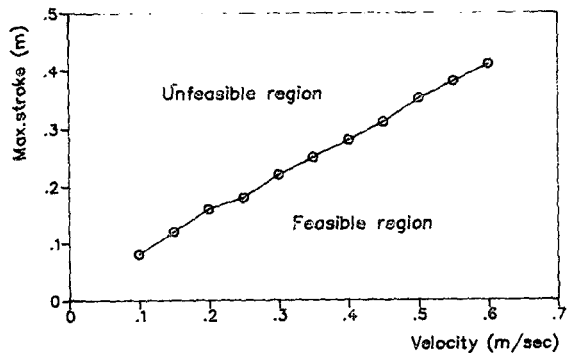


Fig. 11 Velocity and maximum stroke

러나 이점은 동적인 안정성의 관점에서 검토되어야 할 것이다.

동적인 걸음새를 구현하는 데 필요한 힘은 몸통의 각축에 대하여 Fig. 12와 같이 표시된다. 이것

은 발끝이 지면과 닿을때 충격력을 무시한 것이지만 현재 연구중에 있는 보행로봇에 사용되는 10W급 모터에 의해 충분히 구동될 수 있는 양이다.

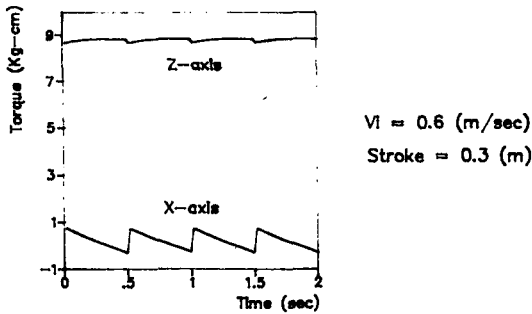


Fig. 12 Torque of actuator

Table 1 Physical quantities of walking robot

Body length	1.2m	Body height	0.9m
Body width	1m	Body mass	70kg
Walking volume		Mass moment of inertia	
<i>x</i>	1.0m	<i>I_{xx}</i>	6.7kgm ²
<i>z</i>	0.65m	<i>I_{yy}</i>	9.3kgm ²
		<i>I_{zz}</i>	1.42kgm ²
Driving torque			
<i>x</i>	0.32Nm		
<i>z</i>	2.6Nm		

4. 결 론

본 논문에서는 동적 걸음새를 취하는 보행로봇의 동적걸음새의 실현 가능성을 컴퓨터를 통해 분석하였다. 본 논문에서 연구한 걸음새는 디딤높이 0.5인 속보이며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저 단-역진자 모델해석과 복-역진자 모델해석의 결과가 중력 방향의 운동을 무시할 경우에는 거의 일치함을 보았다. 둘째 보행로봇의 진행조건은 궤도 에너지가 증가하므로 동일한 보폭에서 보다 작은 속도 조건에서도 동적 걸음새가 가능하기 때문에 몸체 질량중심점의 위치가 지면에서 높이 있을수록 양호하다.

셋째로 시간의 관점에서의 보행 조건이 발끝점의 관점에서의 보행 조건보다 안정여유도가 작다는 사실에서, 두 가지의 안정성평가 중에서 발끝점의 제약을 통해 보행로봇의 동적 걸음새에 대한 안정성평가를 결정하는 것이 바람직하였다. 그리고 보행 속도가 정해졌을 경우, 그때 사용할 수 있는 보폭을 제시하였다. 예를 들어 Table 1과 같은 보행로봇의 경우 최대 0.6(m/sec)인 보행속력의 동적 걸음새를 실현할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Hironori Adachi, Noriho Koyachi and Eiji Nakano, 1988, "Mechanism and Control of a Quadruped Walking Robot," IEEE Control Systems magazine, pp. 14~19, Oct
- (2) March Raibert, Michael Chepponis, and H. Benjamin Brown, 1986, "Running on Four Legs as Though They Were One," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. Ra-2, NO. 2, pp. 72~82.
- (3) Shigeo Hirose, Kan Yoneda, Riki Furuya and Tastuo Takagi, 1989, "Dynamic and Static Fusion Control of Quadruped Walking Vehicle," Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 194~204.
- (4) Song Shin-Min, 1984, "Kinematic Optimal Design of Six Legged Walking Machine," Ph. D Dissertation, Ohio State University.
- (5) 윤용산, 홍형주, 손용희, 1989, "다각 보행로봇의 기구학적 설계 및 제작(II)," 과거처 특정과제 연구 보고서, 과학기술처.
- (6) Greenwood, D.T. 1977, Classical Dynamics, Prentice Hall.
- (7) Nikravesh, P.E. 1988, Computer Aided Analysis of Mechanical Systems, Prentice Hall.