

## 폐쇄 기구형 다리의 조향가능 4족 보행 로봇 시스템

임 승 철\* · 정 해 성\*\*  
(1999년 1월 27일 접수)

### A Steerable Quadruped Walking Robotic System with Legs of a Closed-Chain Mechanism

Seungchul Lim and Hai-Seong Jeong

**Key Words:** Stepping Pattern(발움김 형태), Closed-chain Mechanism(폐쇄 기구), Gait Form(걸음새), Steering(조향), Prototype(시작품)

#### Abstract

Most quadruped walking robots under current research are individually controlling every joint to make them step or walk according to an integrated strategy. Such methods are characterized by at least one pair of an actuator and a sensor installed per each joint so that the robots weigh excessively and move inefficiently in terms of energy expenditure. In addition, the task of controlling all the joints simultaneously is quite complex and prone to destabilize the robot motion. These respects keep the existing walking robots away from realistic applications such as transportation even if they have potentially outstanding adaptability to swamps or uneven terrains as opposed to wheeled vehicles. So, this paper presents a new conceptual quadruped robot developed to walk and steer only with a minimal number of actuators owing to a closed-chain mechanism. To prove its actual performance including the adaptability to various types of terrains, experiments are done with the mammal-type prototype. And, it is also shown that the same concept can be easily extended to carry out different gait forms, for instance, that of spiders only with minor modifications.

#### 1. 서론

현재 연구되고 있는 4족 보행 로봇 시스템은 대개의 경우가 걸음새를 구현하는 방식으로 각각의 관절에 센서와 함께 모터 등의 작동기를 설치한 다리형태를 갖는다.<sup>(1)</sup> 그런 경우 각각의 작동기를 동시에 개별 및 통합 제어하기 위하여 마이크로 프로세서들을 채용한 계층구조의 제어를 설치한다.<sup>(2)</sup> 제어기는 일차적으로 발움김 운동을 조합해 걸음새를 형성시키고<sup>(3)</sup> 보행속도나 지형의 변화에 대처하도록 설계되는데 관절

각각의 자유도를 확보하기 위하여 작동기를 개별적으로 설치하는 경우엔 제어 대상 작동기의 수가 많아지기 때문에, 특히 고속보행시 걸음새의 안정성을 유지하는 것만으로도 제어기의 설계가 까다롭다. 또한 구동에 필요한 동적 데이터의 양과 처리시간이 문제가 되며 로봇의 자체 하중도 그 만큼 증가하여 보행체의 제작비용과 에너지 소비의 증가를 가져오게 된다. 이에 보행동작을 간소화한 여러 모델에 연구가 시도되었으나 걸음새를 기계적으로 구현할 메커니즘 설계의 어려움으로 인하여 아직 뚜렷한 성과가 없는 실정이다.

한편, 동물의 경우를 살펴보면 보행시 일정한 궤도를 가진 네 다리의 연동운동 패턴이 존재한다.<sup>(4)</sup> 이 형태는 일반 보행시에 주기적이고 연속적으로 나타나는 것을 볼 수 있는데 이러한

\* 회원, 명지대학교 기계공학과

E-mail : slim@wh.myongji.ac.kr

TEL : (0335)330-6428 FAX : (0335)321-4959

\*\* 명지대학교 대학원

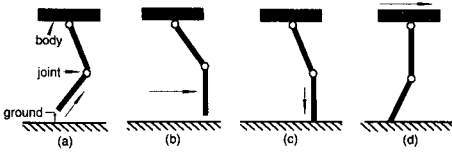


Fig. 1 Stepping pattern:

- (a) leg lifting, (b) leg forwarding,
- (c) leg landing, (d) body dragging

운동을 폐쇄 기구형 다리 등을 채용한 기계요소로 대체할 수 있다면 최소 개수의 작동기와 간소화된 제어기 구조로 안정된 4족 보행 시스템을 구현할 수 있다. 그 경우, 4족 보행이 갖는 불규칙 지형에 대한 적응력과 더불어 바퀴 달린 차량이 고른 지형에서 갖는 뛰어난 이동성, 대규모 운송능력, 소수의 작동기 사용으로 얻어지는 경제성, 속도의 가변이나 조향의 용이성, 그리고 에너지 효율의 향상을 기대할 수 있다.

이에 착안하여 본 논문에서는 현재 4족보행을 위해 사용되고 있는 다수의 작동기를 폐쇄 기구로 대체한, 일체형 조향가능 4족 보행 로봇기구를 제안하고자 한다. 이러한 신 개념의 4족 보행 시스템은 당초에 포유류의 보행형태를 기본으로 구성하여 걸음새와 보행형태에 따른 특징 등을 제시하였으나<sup>(5)</sup> 동 개념을 응용하면 다양한 동물, 일례로 거미형의 4족보행 시스템도 쉽게 구성될 수 있음을 보였다.

2. 발움김 형태 구현용 폐쇄 기구계

제안된 4족 보행형 로봇은 4족 동물의 보행과 동일한 네 단계로 이루어진 발움김 형태를 갖는다. Fig. 1은 발움김 형태에서 보여지는 개별 다리의 이차원적인 움직임을 보여준다.

기존의 4족보행 로봇에서는 그러한 2차원 평면상의 움직임을 각각의 관절에 설치된 작동기의 구동으로 구현하는데 보행시 다리 끝의 허공에서의 움직임을 살펴보면 타원형의 궤도를 형성하게 된다. 그러한 궤도를 기계적으로 구현하기 위하여 Fig. 2와 같은 6절 폐쇄 기구 시스템을 설계하였다.

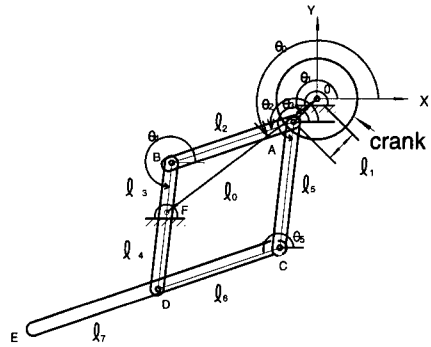


Fig. 2 6-bar linkage leg mechanism

Fig. 2에 제시된 기구는 구동 크랭크의 회전시 하나의 고정된 패턴만을 출력하게 되는 데, 이것은 링크의 개수  $n=6$ , 저차 대우의 수  $L=7$ , 고차 대우의 수  $H=0$ 를 Grubler의 공식<sup>(6)</sup>에 대입하여 조사해 볼 때 아래와 같이 운동 자유도가 한 개라는 사실로부터도 확인 가능하다.

$$F=3(n-1)-2L-H=1 \tag{1}$$

한편, 폐 루프를 구성하는 모든 링크의 길이와 절대 각변위를 복소수의 극형식으로 표현하면

$$\begin{aligned} OA &= l_1 e^{i\theta_1}, \quad AB=l_2 e^{i\theta_2}, \quad AC=l_5 e^{i\theta_3}, \\ BD &= (l_3+l_4) e^{i\theta_4}, \quad CD=l_6 e^{i\theta_5}, \\ BF &= l_3 e^{i\theta_4}, \quad OF=l_0 e^{i\theta_0} \end{aligned} \tag{2}$$

또한, 루프 방정식으로 부터

$$AB+BD=AC+CD \tag{3}$$

가 성립한다.

마찬가지 방법으로 힌지점 O, A, B, F가 형성하는 4절 링크로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$OA+AB+BF=OF \tag{4}$$

$\theta_0$ 가 상수이고  $\theta_1(t)$ 가 크랭크의 회전각으로 주어지면 식 (2)와 (4)로부터  $\theta_2$ 와  $\theta_4$ 에 관한 다음과 같은 두 개의 실수 방정식을 얻게 된다.

$$l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_4 = l_0 \cos \theta_0 \quad (5a)$$

$$l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 = l_0 \sin \theta_0 \quad (5b)$$

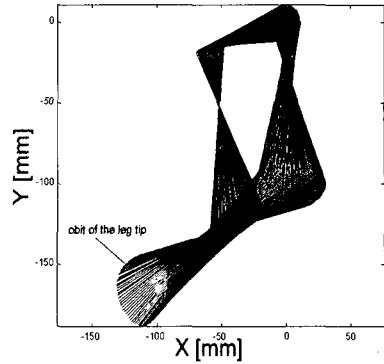
식 (5)는 초월함수 방정식으로서 총 네 조의 해를 갖게 되는데 그 중 물리적인 실제 형상과 운동의 연속성을 고려하여 특정한 조를 일관적으로 선택하고 그것들을 식 (3)에 대입하여 마찬가지로 방법으로 해를 선택하면 모든 회전각 변수  $\theta_2 \sim \theta_5$ 을 시간에 관하여 연속적으로 구할 수 있다.

마지막으로 다리 끝단 E점의 궤도는 다음 식으로 계산된다.

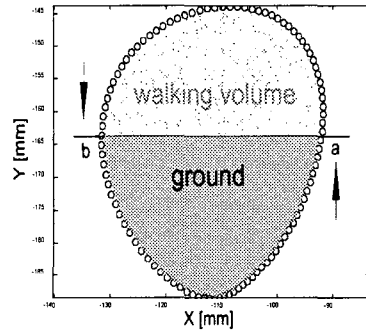
$$OE = l_1 e^{i\theta_1} + l_5 e^{i\theta_5} + (l_6 + l_7) e^{i\theta_5} \quad (6)$$

위의 도출식 (6)에 의하여 링크의 길이가 각각  $l_0=73, l_1=11, l_2=61, l_3=38, l_4=76, l_5=104, l_6=50, l_7=85$  mm,  $\theta_0=5\pi/4$  rad 일 때 Fig. 2의 크랭크가 반시계 방향으로 등속 회전함에 따라 다리와 E점의 위치가 시간에 따라서 Fig. 3과 같이 변화하게 되며 이러한 움직임이 보행에 필요한 기본적인 발음김 패턴을 형성한다.

Fig. 3(a)는 제안된 링크 시스템의 구동에 의한 발음김 형태 생성 과정을 등 시간 간격으로 보여주고 있고, Fig. 3(b)에서 화살표는 다리 끝의 이동 방향이며 그 방향을 따라 'a→b' 구간은 다리 끝이 지면으로부터 들어 올려져 허공에 궤도를 그리다가 착지하는 구간이고 'b→a' 구간은 실제로 지면과의 작용시 다리 끝이 지면에 밀착 정지하고 그 대신 몸통이 반작용으로 추진력을 얻는 구간이다. 한편, 등시간 간격으로 궤적이 도시되었으므로 별도의 속도해석 없이도 전 궤적에 걸쳐 어느 구간에서 다리 끝이 빠르게 운동하는지 알 수 있으며 이는 곧 충격을 최소화하는 보행



(a)



(b)

Fig. 3 Simulated stepping pattern

- (a) leg movement
- (b) leg tip's orbit

궤도의 설계에도 활용될 수 있다.

### 3. 걸음새의 형성

걸음새는 각 다리의 발음김 형태가 나머지 다리들과 유기적으로 연동해야만 형성되는데 모든 다리의 형태가 동일한 4족 보행체에 있어서 발음김 형태의 궤도를 같게 하고 간단히 위상차만을 변화시키면 소위 trot형 보행효과를 얻을 수 있다.

Photo. 1은 구상된 기구 모델을 바탕으로 2절에서 밝힌 제원의 다리를 갖도록 제작된 시작품으로 포유류의 형태를 기본으로 취하였다. 참고로 네 발간의 로봇 폭  $b$ , 길이  $l$ , 그리고 로봇

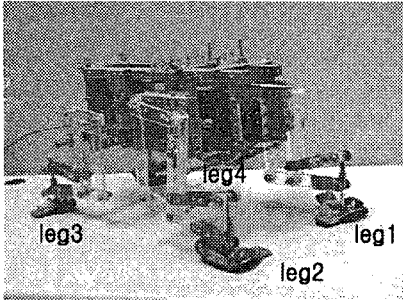


Photo. 1 Proposed quadruped walking robot

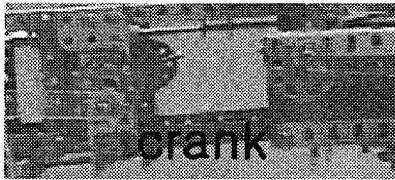


Photo. 2 Driving cranks

의 키  $h$  는 각각 21, 40, 20 cm이며 전체 중량은 2.56 Kg이다. 또한 보행운동의 변화 없이 다만 보행시의 완충효과만을 위하여 스프링형 서스펜션과 발 그리고 발다닥에 고무패드가 추가되었다. 한편, Photo. 2는 보행체의 측면에서 촬영된 구동 크랭크로서 앞다리와 뒷다리의 회전각 사이에  $180^\circ$  의 위상차가 있음을 보여준다.

이 모델에서 보여주는 것과 같이 다리 1과 다리 3은 위상을 같게 하고 나머지 두 다리는 그들과  $180^\circ$  의 위상차를 두면 Fig. 4와 같이 동기화된 각 다리의 궤도가 나타나고, 이 경우 다리 1과 3이 지면 위에 떠 있으면 다리 2와 4가 추진력을 형성하고 반대로 다리 2와 4가 떠 있으면 다리 1과 3이 추진력을 형성한다.

이와 같은 동작의 반복으로 얻어진 추진력은 모든 다리의 지면이하의 궤적이 동일하며 어떤 단순한 좌우 대칭 곡선이라고 할 때, 몸통을 Fig. 5와 같이 상하방향 주기운동과 함께 전진 이동시키며 후방으로의 보행은 작동기의 역회전에 따라 이러한 과정의 역순으로 얻어진다.

그러나, 각 발의 궤도가 좌우 대칭이 아니거나 조립상의 문제로 약간의 차이가 발생하는 경우에는, 무게중심이 몸체 중앙에 있고 부하의 크기에 관계없이 각 다리의 운동이 작동기의 위치제

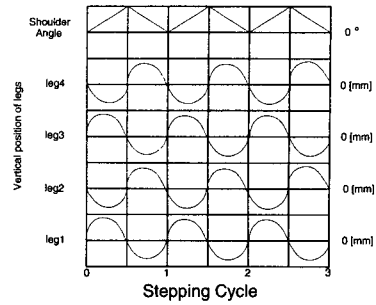


Fig. 4 Coordinated stepping and steering motions

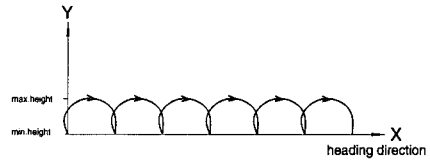


Fig. 5 Body locomotion

어에 의하여 정확히 실현된다고 하더라도 로봇 몸체는 공간내의 6개 운동 자유도중 다리와 몸체 간의 체결구조상 횡방향 병진과 yawing을 제외한 4가지 운동이 야기된다. 즉, 지면 이하에서의 각 발의 궤도를  $f_i(t)$  ( $i=1,2,3,4$ ) 그리고 그들의 진행방향과 수직 방향의 변위성분을 하첨자  $x$  와  $z$  로 표시할 때, 몸체의 수직방향 변위  $z$ , 진행방향 변위  $x$ , 피칭 각  $\theta_y$ , 롤링 각  $\theta_x$  는 다음 식과 같아진다.

$$z = (f_{1z} + f_{3z})/2 \text{ or } (f_{1z} + f_{4z})/2 \quad (7a)$$

$$x = (f_{1x} + f_{3x})N/2 \text{ or } (f_{2x} + f_{4x})N/2 \quad (7b)$$

$$\theta_y = (f_{1z} - f_{2z})/l \text{ or } (f_{2z} - f_{4z})/l \quad (7c)$$

$$\theta_x = (f_{1z} - f_{3z})/b \text{ or } (f_{2z} - f_{4z})/b \quad (7d)$$

식 (7b)에서  $N$  은 보행주기의 횡수를 뜻한다. 위와 같은 로봇 몸체의 기구학적 모델로부터, 무게중심이 중앙에 있는 경우 보행중 전복사태의 방지, 즉 안정성을 확보하기 위하여는 무게중심의 수직위치가  $h/2$  라고 할 때 피칭이나 롤링각이

각각

$$\theta_y \leq \tan^{-1}(l/h), \quad \theta_x \leq \tan^{-1}(b/h) \quad (8a,b)$$

의 조건을 만족하여야 한다. 한편, 무게중심은 일반적으로 로봇의 제작시나 화물 적재시 네 발 사이의 대각선의 교차점인 몸체중앙에 위치시키는 것이 일반적이며 다소간의 오차는 발을 적당한 크기로 만들므로써 상기 교차점이 어떤 영역을 형성하게 되면서 허용되고 이때 2점 이상 지지되어 위의 가정은 만족된다.

또한 보행을 위해 구동시키는 총 4개의 크랭크는 동일한 동력 전달계로부터 동력을 전달받을 수 있기 때문에 보행에 필요한 작동기의 개수가 한 개로 대폭 줄어들뿐 아니라 자중감소로 인하여 에너지 효율을 크게 증가시킬 수 있다.

설계상에서 또 하나의 주요 관점은 두 발이 떠 있는 시간과 나머지 두 발이 지면을 딛고 있는 시간이 동일하여야 하는 것이다.<sup>(7)</sup> 그렇지 않으면, 네 다리가 동시에 땅을 짚거나 공중에 순간적으로 떴다가 주저앉는 현상이 발생할 것이다. 따라서, 현재와 같이 대각선상의 앞·뒤다리가 반대방향을 향하는 두 다리군이 180°의 위상차로 동작하는 경우에는 Fig. 3과 같은 발의 궤도가 좌우대칭인 것이 바람직하다.

또한 제안된 4족보행 로봇은 감속 기어뿐만 아니라 폐쇄 기구 구조로 인하여 구성 링크 자체의 강도에 의해 각 무게가 지탱되므로 대용량의 하중에 견딜 수 있고 제어기 구조가 간소화되어 치명적인 시스템 오류 등에도 강인하다.

#### 4. 걸음새의 변형

앞에서 제안한 4족 보행 시스템은 포유류의 보행형태를 기본으로 설계되었다. 그러나 폐쇄 기구는 링크의 길이를 변화시켜 다양한 보행 궤도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 기구를 몸체에 접합시키는 방식에 따라 여러 가지 보행 형태를 표현할 수 있다. 즉, 포유류의 걸음새 형태로 설계된 링크 시스템을 링크를 설치하는 방식에 따라서는 거미형 등으로 쉽게 변형 가능하다는 것

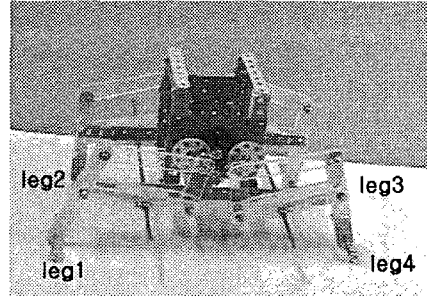


Photo. 3 Spider-type walking robot

이다.

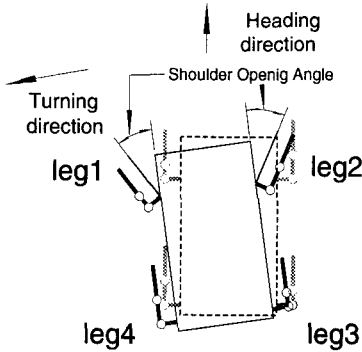
Photo. 3은 폭  $b$ , 길이  $l$ , 높이  $h$ 가 각각 16, 27, 20 cm인 거미형으로 변형된 보행 시스템을 보여주고 있는데 Fig. 2의 링크들이 대각선  $AD$ 에 대하여 거울상으로 뒤바뀐 형태이다. 이 경우 발움김 형태의 궤도는 포유류의 발움김 형태가 90° 회전된 형태를 보이며 보행 높이보다는 보행폭이 커지게 된다.

변형된 발움김 형태에서도 걸음새를 일으키는 기본 방식은 동일하다. 포유류와 마찬가지로 앞다리 1과 뒷다리 3의 위상을 같게 하고 나머지 두 다리의 위상을 같게 해서 두 다리군의 위상차를 180°로 고정하여 구동시키면 보행효과를 얻을 수 있다.

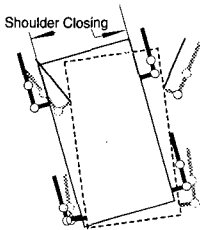
#### 5. 조향 메커니즘

본 논문에서 제안하는 조향 시스템은 다리 각이 조향을 위해 독립적으로 움직이는 시스템<sup>(8)</sup>이 아닌 어깨의 움직임에 의한 일체적 조향 시스템을 채택하고 있다. 본 보행 시스템은 네 다리로 형성되는 걸음새를 단일 모터와 기계적인 메커니즘으로 구현하였기 때문에 보행주기를 안정시킬 수 있고 조향시에도 이러한 타이밍 특징이 이용된다.

발움김 운동이 이루어지는 동안 이미 제시된 타이밍 선도 Fig. 4와 같이 조향하려는 방향과 반대 앞다리가 지면에 닿았을 때 양쪽 어깨를 개방하고 조향방향과 동 방향의 다리가 지면에 닿았을 때 양쪽 어깨를 닫는 동작을 시키면 조향이 이루어진다. Fig. 6은 조향시 각 다리의 발움김



(a) 1st half of stepping cycle



(b) 2nd half of stepping cycle

Fig. 6 Steering principle

운동과 어깨 동작간의 조화를 로봇의 상부에서 내려다 본 형태로 나타낸 것이며 거미형과 같은 다른 형태의 보행에서도 동일한 조향원리를 적용할 수 있다. 조향 메커니즘은 Fig. 7에 보인 좌우 대칭형 구조로서, 보행과 조향의 2축 회전운동을 위하여 어깨에 설치된 만능 조인트와 귀환용 스프링이 달린 4절 링크, 기어열, 그리고 돌기를 갖고 있는 두 기어 사이의 동력 전달을 단속하기 위한 솔레노이드 등으로 구성되어 있다. 조향 동작을 목표 조향각의 크기에 따라 차등 반복하면 원하는 각도만큼 조향효과를 얻을 수 있다. 또한 조향각은 발움김 동작의 반복 횟수 외에도, 솔레노이드 작동기와 연동하는 기구부의 치수 조절에 따르는 어깨 부위의 개폐각을 변화시켜 조절할 수 있다.

한편, Photo. 4는 포유류형 시작품이 조향을 위하여 어깨가 개방된 순간을 포착한 것이다.

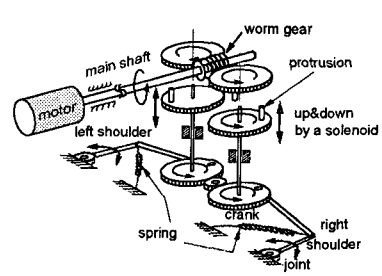


Fig. 7 Steering mechanism

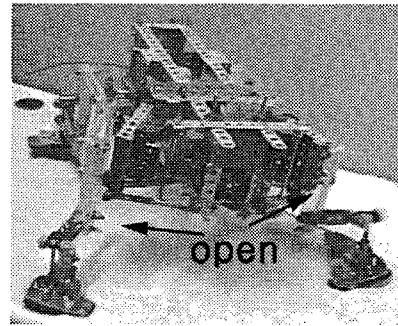


Photo. 4 Captured steering motion

## 6. 시작품 및 실험 결과

Photo. 1에 보인 포유류형의 시작품을 제작해 발움김 형태를 시뮬레이션과 비교해 보고 보행 및 조향 실험을 해 보았다. 실제 모델에선 네 다리의 보행을 위한 작동기로서 한 개의 직류 모터가 사용되었고 조향을 위하여 두 개의 솔레노이드가 사용되었다. 또한 추가로 제작된 거미형 시작품으로도 보행실험을 해 보았다.

### 6.1 발움김 형태

실제 포유류 모델에서의 발움김 형태는 어두운 조명하에서 다리 끝에 발광 다이오드를 붙여 포착한 결과, Photo. 5와 같이 나타나고 이것은 이론상의 발움김 형태와 거의 동일함을 알 수 있다. 다소 Fig. 3의 발움김 형태와 차이를 나타내는 것은 시작품의 부품중 플라스틱 기어의 백래쉬, 링크간 관절의 유격 등에 기인한 재현 정밀도의 부족 때문이다.

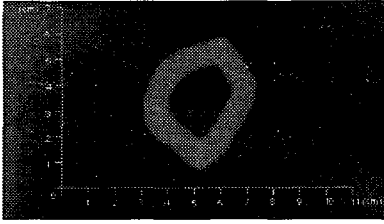


Photo. 5 Captured stepping pattern

### 6.2 보행실험

일반 평면상에서 로봇은 Photo. 6과 같이 몸체가 이동하면서 각각 약  $6^\circ$  와  $5^\circ$  이내의 롤링과 피칭을 보였지만 전복되지 않는 안정한 보행을 할 수 있었으며 정지시에도 자세가 흐트러지지 않았다. 한편 보행체의 속도는 보폭을 변경하지 않고 구동 모터의 인가전압만으로 쉽게 조정 가능하였다.

만일 식 (7)의 기구학적 모델이 성립하고 네 발의 지면 이하의 궤도  $f_i(t)$  가 동일하다면 몸체의 좌우 롤링 및 전후 피칭이 사라질 것이며 그와 같이 이상적인 경우, 몸체의 운동 패턴은 이론적으로 Fig. 5와 같아 질 것이다. 그러한 점에서 Photo. 6의 실제 몸체 운동 패턴은 이론치와 약간의 차이를 반영하고 있다.

한편, 경사 유리면에서는 승강시와 횡방향 진행시 각각  $15^\circ$ ,  $12^\circ$  이내의 각도에서 무리 없는 보행이 가능하며 평면보행과 마찬가지로 지면과 몸체가 평행을 이루며 보행하였다. 이 때, 경사면의 최대각도는 정지시 미끄러짐 방지를 위하여  $\mu$  를 발바닥과 지면 사이의 마찰계수라고 할 때, 이론적으로는  $\alpha = \tan^{-1}\mu$  의 식으로 일차 제한된다. 또한 상기 이상적 조건하에서라도 보행 중 전복이 되지 않으려면 지면의 경사각이 더욱 제한되어야 하는 데 그 최대값이 승강시와 횡방향 진행시 각각  $\alpha = \tan^{-1}(l/h)$  와  $\tan^{-1}(b/h)$  이 된다. 따라서 현재와 같이  $b \leq l$  인 경우 식 (7c), (7d)와 (8)로부터 경사면에서 승강보다는 횡방향 진행시 전복의 가능성이 커짐을 알 수 있다.

또한, 모래밭이나 웅덩이, 장애물 등에 의해 약간의 굴곡이 있는 지형에서도 무리 없이 보행이 가능하였다. 넘어갈 수 있는 굴곡의 최대 한계는 몸체의 롤링이나 피칭을 무시하는 경우

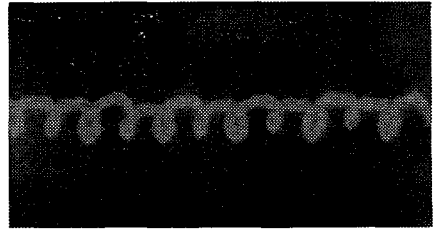


Photo. 6 Captured robot body's locomotion

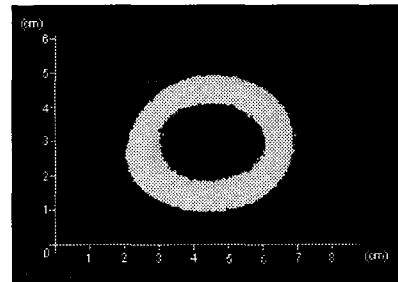


Photo. 7 Stepping pattern(spider type)

Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 지면위의 발의 궤도 즉, 보폭과 보고에 따라 결정되는 walking volume이 된다. 따라서 그 이상 굴곡이 심한 곳에선 자유도가 고정되어 있는 관계로 대응력이 충분치 않았다.

### 6.3 조향실험

제작된 시작품은 한 주기의 발움김 형태를 통해 약  $15^\circ$ 의 조향효과를 갖는다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 솔레노이드가 여자되는 발움김 형태의 반복 횟수, 솔레노이드 연동 크랭크의 길이 등을 조절하면 임의의 조향각을 얻을 수 있다.

### 6.4 거미형의 보행실험

거미형의 경우 Photo. 7과 같이 거의 좌우 대칭인 발움김 형태를 갖도록 링크 길이가 설계되어 매우 안정한 보행효과를 얻을 수 있었다. 또한 구조적 특징으로 인하여 보행폭에 비하여 보행높이가 크지 않아 포유류 형태보다 에너지 소비가 적고 롤링이나 피칭이 감소되어 더욱 우월한 걸음새를 보였다.

## 7. 결 론

이론적 설계와 보행실험을 통해 본 논문에서 제안한 새로운 개념의 4족 보행로봇은 충분한 보행과 조향 효과를 보였다. 특히, 다수의 작동기와 다수의 마이크로 프로세서 제어를 계층구조로 채용하는 기존방식의 보행 로봇에 비하여 보행시나 정지시의 안정성이 두드러지고 보행속도를 제어하기가 용이함을 알 수 있었다. 또한 모래밭, 보통 수준의 불규칙 지형 및 경사면 등에 대한 대응력, 발음김 형태의 다양화 용이성도 확인할 수 있었다.

이상의 연구결과를 바탕으로, 향후에는 대응력이 부족한 험지등에서도 보행 가능하도록 약간의 자유도가 추가된 폐쇄 기구와 이를 실시간으로 변형시킬 수 있는 제어기 설계에 대한 연구로 발전시키고자 한다.

## 참고문헌

- (1) Sukhatme, G. S., 1997, "The Design and Control of a Prototype Quadruped Microver," *Autonomous Robots*, Vol. 4, No. 2, pp. 211~220.
- (2) Tomokazu, H., and Kazuo, Y., 1992, "Control of the Variable-Structure-Type Locomotive Robot.,"

*JSME International Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 601~603.

- (3) MacDonald, W. S., and Grupen, R.A., 1997, "Building Walking Gaits for Irregular Terrain from Basis Controllers," *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM.
- (4) Grieve, D., 1968, "Gait Patterns and the Speed of Walking," *Biomedical Engineering*, pp. 119~122.
- (5) 임승철, 정해성, 1998, "작동기의 수를 최소화한 조향가능 4족 보행 로봇 시스템의 설계," 한국자동제어학술회의 논문집, 제2권, pp. 1560~1563.
- (6) Kimbrell, J. T., 1991, *Kinematics Analysis and Synthesis*, McGraw-Hill, Inc.
- (7) Emura, T. and Arakawa, A., 1991, "Attitude Control of a Quadruped Robot during Two Legs Supporting," *International Conference on Advanced Robotics*, Pisa, Italy.
- (8) Ding, Y. and Scharf, E., 1994, "Deadlock Avoidance for a Quadruped with Free Gait," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, San Diego, CA, pp. 143~148.