

# 물결걸음세를 이용한 준정적 4족 보행로봇에 관한 연구

최기훈\*(중앙대 원), 김태형(중앙대 원), 유재명(중앙대 원), 김영탁(중앙대)

A study for semi-static quadruped walking robot using wave gait

G. H. Choi\*, T. H. Kim, J. M. Yoo(Mech. Eng. Dept. CAU.), Y. T. Kim(Chunang Univ.)

## ABSTRACT

A necessity of remote control robots or various searching robots etc. that accomplish works given instead of human under long distance and extreme environment such as volcano, universe, deep-sea exploitation and nuclear power plant etc. is increasing, and so the development and the research regarding these mobile robots are actively progressing. The wheel mobile robot or the track mobile robot have a sufficient energy efficiency under this environment, but also have a lot of limits to accomplish works given which are caused from the restriction of mobile ability. Therefore, recently many researches for the walking robot with superior mobility and energy efficiency on the terrain, which is uneven or where obstacles, inclination and stairways exist, have been doing.

The research for these walking robots is separated into fields of mechanism and control system, gait research, circumference environment and system condition recognition etc greatly. It is a research field that the gait research among these is the centralist in actual implementation of walking robot unlike different mobile robots. A research field for gait of walking robot is classified into two parts according to the nature of the stability and the walking speed, static gait or dynamic gait. While the speed of a static gait is lower than that of a dynamic gait, a static gait which moves the robot to maintain a static stability guarantees a superior stability relatively. A dynamic gait, which make the robot walk controlling the instability caused by the gravity during the two leg supporting period and so maintaining the stability of the robot body spontaneously, is suitable for high speed walking but has a relatively low stability and a difficulty in implementation compared with a static gait. The quadruped walking robot has a strong point that can embody these gaits together.

In this research, we will develop an autonomous quadruped robot with an adaptability to the environment by selectly appropriate gait, element such as duty factor, stride, trajectory, etc

Key Words · quadruped(4족), wave-gait(물결걸음세), walking(보행), robot(로봇)

### 1. 서론

현대 산업사회는 과학의 발전으로 인간이 수행하는 작업의 일부를 도와주는 단순한 기능의 로봇에서부터 인간을 대신할 수 있는 고도의 기능을 가진 로봇이 개발되어 인류의 생활에 편의를 주고, 산업에 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 산업용 로봇의 대부분은 작업장의 고정된 위치에서 반복적인 작업을 단지 고속, 고정도로 수행하고, 일부 이동기능을 갖춘 로봇 또한 주어진 환경에서만 그 역할 및 기능을 수행 할 수 있기 때문에 사막, 해저, 우주와 같이 작업환경이 알려지지 않은 넓은 공간이나 주변 정보의 예측이 어려운 작업 환경에 대응하기에는 어려움이 있다.

이는 현재 대부분의 산업 현장에서 사용되는 이동형 로봇은 이동을 위한 수단으로 바퀴나 무한궤도의 형태를 갖추고 있기 때문이다. 결과적으로 복잡한 환경에서 작업을 수행하기에는 이동 능력에 제한이 있고, 더불어 작업 수행

능률도 저하된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 불규칙적이고 비주기적인 환경에서 이동능력이 우수한 인간이나 동물, 곤충의 이동수단인 다리 형태를 갖춘 보행 로봇의 연구와 개발이 필요하다.

보행 로봇은 몸체에 연결된 다리 기구의 수에 따라 1족, 2족, 4족 그리고 6족 등으로 분류되며, 연구 분야는 기구적 설계, 주변환경 인식, 제어 및 걸음세로 나눌 수 있다. 이 중에서 로봇의 걸음세에 관한 연구는 로봇의 유연한 적응력을 구현하기 위해 가장 우선적으로 개발이 필요한 분야이다. 로봇의 걸음세는 이동시 넘어지지 않고 안정 상태를 유지하는 방법에 따라 정적 걸음세와 동적 걸음세로 나누어진다.

정적 걸음세는 정적인 평형 상태를 유지하면서 보행하는 형태로 동적 걸음세에 비해 이동 능력은 낮지만, 해석이 용이하고 지형 적응성이 높으며 대부분 수송에 적합하므로 동적 걸음세보다 앞서 필요한 연구이다. 반면에 동적 걸음

새는 동적인 평형을 갖기 때문에 정적 걸음세보다 빠르고 다양한 걸음세를 구현할 수 있지만 관성효과, 발끝과 지면의 충돌효과 등을 고려한 동적 해석을 하여야 하므로 제어가 복잡하고 실시간 제어에 어려움이 있다.

보행 로봇에 관한 연구는 Muybridge의 인간과 동물, 곤충 등의 연속적인 사진 촬영을 통한 걸음세 연구에서부터 시작되어 1968년 McGhee 와 Frank에 의해 실제 보행 로봇에 대한 수학적 개념을 적용시켰다[1]. 또한 이들은 최초로 컴퓨터를 이용하여 Phony pony라는 4족 보행 로봇을 제어하였다. 1977년 미국 Ohio 주립대학에서 McGhee 등에 의해 OSU Hexapod를 개발하였고, 1980년 Klein과 Briggs에 의해 OSU(Ohio State University) Hexapod Vehicle에 대하여 자세 센서와 발끝의 힘 센서를 이용하여 비평탄 지형을 보행하는 방법을 연구하였다[2]. 또한 미국 Carnegie-Mellon 대학에서는 우주 탐사용 6각 로봇을 개발하였다. 1985년 Song은 ASV (Adaptive Suspension Vehicle)를 개발하였고, 물결걸음새에 대한 해석학적인 분석도 수행하였다. 1984년 Orin은 유압을 이용한 각 다리의 제어를 finite state machine으로 모델링을 한 후 센서의 정보를 이용하여 인간의 반사 동작과 같은 반사제어(Reflexive machine)를 행하는 연구를 하였다. 일본 동경공업대의 S. Hirose 등은 1984년에서부터 최근까지 TITAN III에서부터 TITAN VIII까지의 TITAN 시리즈를 개발하여 동적 보행(dynamic walking)에 대한 연구를 수행하였다[3]. 1991년 Takanishi는 2족 보행 로봇의 안정성 유지를 위하여 ZMP(Zero Moment Point) 조건을 사용하였고 하중 모멘트 센서를 사용하여 이를 검증하였다. 최근에는 일본 소니社에서는 인간에 반응하는 강아지 로봇을 개발하였다. 국내에서도 1987년부터 한국과학기술연구원(KIST)에서 KAISER-I, II를 제작하였으며, 인체의 다리 구조를 갖으며 지능을 가진 4족 보행 로봇으로 CENTAUR를 제작하여 여러 보행 및 알고리즘에 대한 연구를 수행하고 있다[4].

최근 이와 같은 보행 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 평탄 지형에서는 어느 정도 안정도가 높은 보행 로봇의 구현이 가능하다는 것을 보이고 있지만, 안정도 상의 문제와 걸음세 및 기구적인 메커니즘을 이용한 에너지 효율성, 자유도를 수학적으로 표현해야 하는 문제 등의 많은 과제들이 남아 있다 이러한 문제들을 해결하기 위한 방법으로 에너지 효율을 고려한 기구적인 메커니즘을 개발할 필요가 있다. 또한 이에 적합한 로봇의 걸음세에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 디딤음, 보폭, 경로 등의 걸음세 인자들을 선정하여 외부 환경에 적응하며 자율적인 보행을 하는 로봇을 설계하고자 한다.

## 2 보행 로봇의 걸음세

걸음세란 일반적으로 동물이나 보행 로봇이 몸체를 이동시키면서 각각의 다리를 올리고 내리는 반복적인 패턴을 의미하며, 시간과 거리의 함수로 표현된다. 걸음세는 두 가지 상태 즉, 지면에 발이 닿아 있는 형태(support pattern)와 지면에서 발이 떨어져 있는 형태(transfer pattern)로 나뉘어진다. 지지형태에 있는 다리는 몸체의 지지와 앞으로의 추진 운동을 하게 되며, 이동형태에 있는 다리는 장애물 회피, 지형과의 충돌회피 등을 고려하여 다음의 착지점으로 이동하게 된다.

걸음세는 이동 메커니즘의 설계 및 알고리즘의 설계에 영향을 미치는 중요한 인자이다 걸음세의 설계에 있어서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다. 첫째, 이동 다리의 순서를 결정해야 한다. 이를 위해서 일반적으로 걸음세 다이어그램을 이용하는데, 이것은 평탄지형에서 주기 걸음세로 보행할 때 매우 중요하며, 다리를 옮겨 놓는 순서와 시간에 관한 정보를 제공한다. 둘째, 몸체 무게 중심의 궤적을 결정해야 한다. 여기서 몸체 무게 중심의 궤적이란 몸체의 방향(orientation)과 위치(position)를 말한다. 셋째, 착지점의 선정을 결정해야 한다. 이것은 실제 지형에서 보행할 때 매우 중요하다

걸음세는 보행 로봇이 이동시 넘어지지 않고 안정 상태를 유지하는 방법에 따라 크게 정적 걸음세(static gait)와 동적 걸음세(dynamic gait)로 나누어진다.

정적 걸음세는 보행 로봇이 넘어지지 않도록 정적인 평형 상태를 유지하는 걸음세를 말하며, 다리가  $n$  개 있는 경우에  $n-1$  이상의 다리가 항상 지면을 지지하고 있는 상태가 유지되는 걸음세를 말한다. 반면에 동적 걸음세는 이동 중에 발생하는 몸의 불균형을 능동적으로 대처하여 몸체의 균형을 유지하여 보행하는 걸음세를 말하며, 한 다리나 두 다리가 지면을 지지하는 상태가 있는 경우로 안정도 유지에 어려움이 있다 또한, 정적 걸음세는 지형에 대한 적응력이 우수하고 안정도 유지면에서 안정적이며 대중량을 수송 등에 적합하다. 반면에 동적 걸음세는 빠른 속도의 보행에 유리하지만, 다리의 관성이나 다리와 지면에 의한 충격 등의 요소를 고려해야 하므로 구현하기는 어렵다.

걸음세는 주기걸음세(period gait)와 비주기 걸음세(aperiod gait)로 나누어지는데,  $i$ 번째 다리에 대한 주기가  $\tau_i$ 일 때 모든 다리에 대하여  $\tau_i$ 로 같다면 이것을 주기 걸음세라고 한다. 주기 걸음세는 이동속도가 일정하게 주기적으로 반복적인 보행을 하며, 다리의 초기 위치를 지정할 필요가 있다. 반면에, 비주기 걸음세는 일정한 걸음세의 패턴이 있는 것이 아닌 주변상황에 맞도록 적응하면서 임의의 보행을 하는 걸음세이다. 이것은 장애물이 있는 실제 지형 조건에서 사용하기에 적합한 걸음세이며 초기 위치를 선정할 필요가 없으나 교착상태(deadlock)가 발생할 수도 있다 주기 걸음세의 대표적인 것으로 McGhee의 물결걸음세[5]와 Hirose의 개걸음세[6]등이 있으며, 자유 걸음세라고도 하는 비주기 걸음세는 그리픽 탐색법, 착지 영역 제한법 등을 이용한 걸음세 표현 방법들이 있다

### 2.1. 물결걸음새

물결걸음새는 다리의 운동이 운동체의 한쪽 편에 대하여 전방 또는 후방으로 먼저 움직이기 때문에 물결 모양을 이룬다고 하여 붙여진 명칭이다. 다리를 놓는 순서가 뒷다리에서 앞다리의 방향으로 행하여지거나 반대로 행하여진다. 또, 좌우 한 쌍의 다리사이에는 1/2의 위상차가 있으며, 모든 다리의 디딤올은 일정하다. 따라서, 물결 걸음새는 정칙 걸음새이며 대칭 걸음새이고, 주기 걸음새이다. 이러한 물결 걸음새는 4족 보행 로봇인 경우 정칙 보행시 최적의 걸음새임을 알수 있다.

물결걸음새의 운동학적인 면에서 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$K = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \phi_2, \phi_3, \phi_4)$$

$$\text{where, } \phi_2 = \frac{1}{2}, \phi_3 = \beta, \phi_4 = \beta - \frac{1}{2}$$

$$(\text{단, } \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta)$$

그림1은 보행 로봇의 각 다리 번호와 다리 이동순서(4-2-3-1)를 나타내며, (c)는 물결 걸음새를 1번 다리를 기준으로 하여 각 다리 상대 위상을 나타낸 것이다

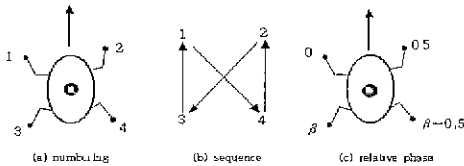
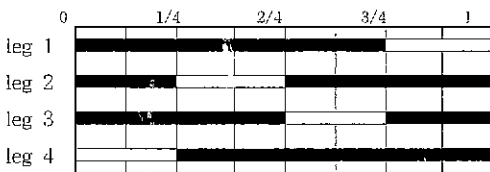
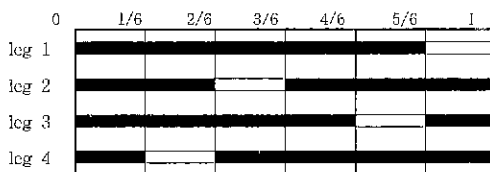


그림 1 A number and sequence of legs for wave-gait

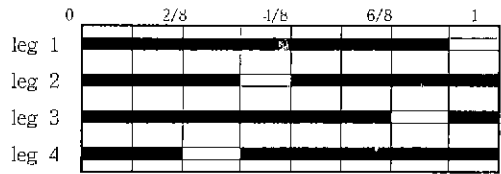
또한, 물결 걸음새를 디딤올에 따라 각각 3/4, ..., 11/12 등의 걸음새 다이어그램으로 나타내면 그림2와 같다. 다리의 이동순서는 앞절에서 전경한 4-2-3-1의 순서를 따른다. 물결 걸음새를 다이어그램상에서 보면, 디딤올이 3/4인 경우는 지지구간과 아동구간이 동시에 발생하는 시기가 네 번 일어나고, 디딤올이 3/4보다 큰 경우에는 일정 주기동안 자세를 보정하거나 다리 지지상태에서 몸체를 이동하는 구간과 다리가 이동하는 구간으로 나누어진다.



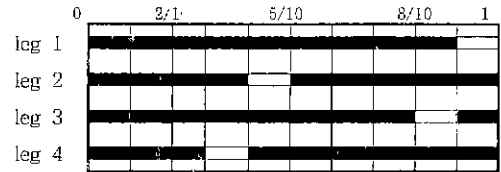
(a) duty factor 3/4



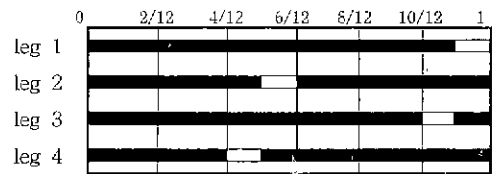
(b) duty factor 5/6



(c) duty factor 7/8



(d) duty factor : 9/10



(e) duty factor . 11/12

그림 2 A gait diagram of a wave-gait

물결걸음새에서 지지하는 다리의 형태를 다각형으로 나타내면 그림3과 같다. 이것은 무게 중심의 이동을 시간에 대하여 상대위상과 디딤올로 표현한 것이다. 또한, 디딤올이 3/4인 경우는  $t_3$ 의 시간 주기가 나타나지 않는다.

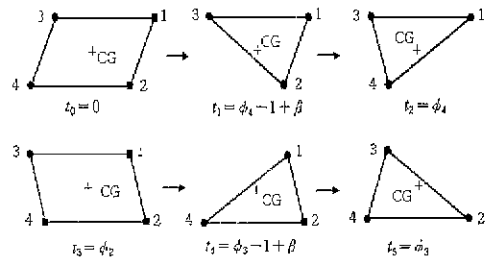


그림 3. A support pattern of wave-gait

### 3. 4족 보행 로봇의 설계

보행 로봇은 동물의 걸음걸이를 적용한 것이다. 이러한 보행 로봇은 어떠한 형태의 모델을 적용하느냐에 따라 걸음새의 제어 방법이 각각 다르다.

다리의 형태에 있어서, 포유류는 빠르고 보행에 효과적이며, 파충류는 느린 반면에 안정적이며, 곤충류는 몸의 안정을 취하면서도 적은 힘으로 몸을 전후좌우로 기민하게 움직일 수 있는 특징을 가지고 있다.

곤충의 보행에 있어서, 각 다리를 개별적으로 운동하는 형태와 두 다리를 동시에 운동하는 형태가 있으며, 4족

이하인 경우는 개별적인 모델을, 6족 이상 인 경우는 쌍을 이루는 모델을 적용하는 것이 보행시 운동성 및 안정성을 높일 수 있다고 기술하였다.

이와 같은 내용을 종합해 보면, 보행 로봇은 다리의 수가 많으면 많을수록 안정적이고 무거운 하중에 잘 견디나 제어의 어려움으로 동작이 느리고, 다리가 2개 또는 4개인 경우는 안정성은 떨어지지만, 보다 빠르게 이동할 수 있으므로 동적 보행의 구현이 상대적으로 쉽다.

따라서, 본 연구에서는 정적과 동적 보행에 모두 적합한 4족형태를 기본으로, 이에 물결걸음세의 적용과 몸의 안정성 향상 그리고 에너지 효율면을 검토하여 최적인 형태인 4족 보행 로봇을 설계하였다.

설계한 4족 보행로봇은, 몸을 중심으로 다리전체를 좌우로 움직이는 관절 4개와 다리의 하부를 상하로 움직이는 관절을 각각 1개씩 가지고 있다. 또한 다리 하부를 링크 구조로 하여 제어를 간소화 함으로써, 정적 및 동적 보행이 원활하고, 에너지 효율을 높일수 있을 것으로 기대한다. 그림4는 설계한 4족 보행로봇의 개략도이다.

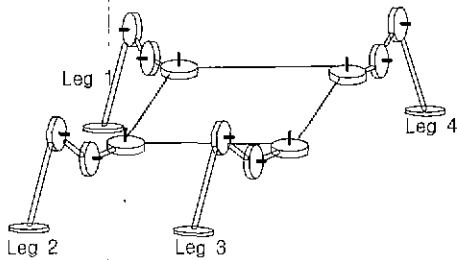


그림 4. The schematic of Framix-T serie

그림5는 본 연구에서 설계한 4족 보행로봇을 제작 조립한 모습이다.

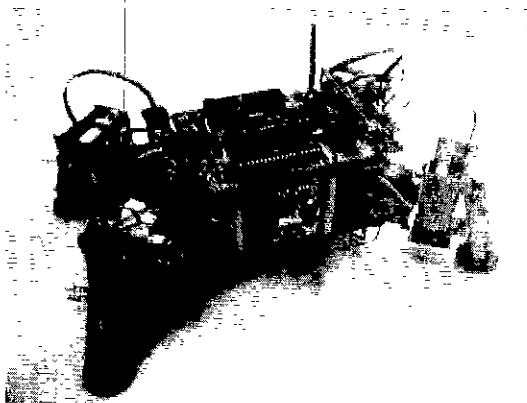


그림 5. The photograph of Framix-T series

#### 4. 결론

본 연구에서는 동물과 곤충의 다리 형태를 가진 보행로봇의 설계시 고려사항중 걸음세에 대하여 검토하였다. 결과적으로 물결걸음세를 보행 로봇에 적용할 경우 정적 및 동적 보행이 최적인 된다는 검토 결과를 얻었다.

이를 바탕으로 실제로 걸음세를 적용하기 위해 준정적 보행이 가능한 구조의 4족 보행로봇을 설계하였다.

#### 5 후기

향후에는 설계한 4족 보행로봇을 주기적 걸음세 이외에 보행로봇 설계시 고려사항인 안정도와 기구적인 에너지 효율면을 검토하여, 비주기적 걸음세를 구현하는 동적 보행로봇을 설계할 예정이다.

#### 6. 참고문헌

1. R. B. McGhee, & A. Frank, "On the stability properties of quadruped Creeping Gaits", *Mathematical Biosciences*, Vol 3, pp.331-351, 1968
2. C. A. Klein, R. L. Briggs, "Use of Active Compliance in the Control of Legged Vehicles", *IEEE Trans. SMC*, Vol.SMC-10, No.7, pp 393-400, 1980
3. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII , Arukawa, K, Hirose, S. , *Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Volume: 1 , 1996 , Page(s): 208 -214 vol.1*
4. Teleoperation of a quadruped walking robot using an aperiodic gait that converges to a periodic gait , Duck-Young Lee, Dong-Soo Kwon, Soo-Yeong Yi; Yeh-Sun Hong , *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Volume: 3 . 1999 , Page(s) 1639 -1644 vol.3*
5. A simplified forward gait control for a quadruped walking robot , Pack, D.J., Kak, A.C. , *Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Volume' 2 , 1994 , Page(s)' 1011 -1018 vol.2*
6. Dynamic And Static Fusion Control Of Quadruped Walking Vehicle , Hirose, S.; Kan Yoneda, Furuya, R., Takagi, T. , *Intelligent Robots and Systems '89. The Autonomous Mobile Robots and Its Applications. IROS '89. Proceedings., IEEE/RSJ International Workshop on , Page(s)' 199 -204*