

4 족 견마형 로봇의 동작 생성 및 제어에 관한 실험적 연구

고광진[†] · 유승남^{**} · 이희돈^{**} · 한창수^{***}

Experimental Study on Motion Generation and Control of Quadruped Robot

Kwang-jin Ko, Seung-nam Yu, Hee-don Lee and Chang-soo Han

Key Words : Locomotion Stability(보행 안정성), Locomotion Algorithm(보행 알고리즘), Quadruped Robot(4족 로봇), Stability margin(안정 여유), Torque analysis(관절 토크 분석)

Abstract

Quadruped robot is very useful mechanism for a various area. Recently, home entertainment and military robots adapted quadruped platform and useful function have been introduced. Our goal is the development of quadruped robot locomotion for any type of ground included to sloping one and irregular terrain. This paper, as a first step, deals with design and construction of quadruped robot walking on the flat ground. The most important factor of quadruped robot is stability of locomotion. At first, we introduce the developed quadruped robot based on dynamic simulation and experimental study of general gait algorithm. Finally, propose unique locomotion proper to our mechanism. Future work of this study is the performance test and analysis on the ground of various conditions and proposes the improved mechanism and gait algorithm.

1. 서론

평탄한 지역에서 바퀴를 이용하여 이동하는 기구의 운동성은 이미 200년 가량의 역사를 통하여 현재까지 그 우수성이 입증되고 있다. 이에 비해, 최근에 개발되고 있는 2족 보행 로봇(Biped Robot), 4족 보행 로봇(Quadruped Robot) 및 다족 보행 로봇(Multiped Robot) 등의 관절형 로봇은 차륜형에 비해 험지 이동이나 장애물 회피 등이 우수하며, 그 중에서도 4족형 견마로봇은 그 기계적인 특성에 의해 최근 활용 방안이 다양하게 개발되고 있는 추세이다. 첫째로, 다양한 지형에서 활동할 수 있는 군사용 로봇으로서의 개발이 시도되고 있다. 즉, 착지점의 임의 설정이 가능하다는 것과 본체와의 상대위치를 자유로이 설정할 있다는 장점을 이용하여 높은 턱을 넘고 로봇 몸

통의 폭보다 좁은 다리를 통과하거나 넓은 웅덩이를 뛰어넘는 등의 동작을 구현하는 것이다. 이는 바퀴형 로봇이나 궤도형 로봇이 통과할 수 없는 환경에서의 필드 로봇으로서의 가능성을 엿볼 수 있게 하는 부분이다. 최근에는 Big Dog™[1] (Boston Dynamics, DARPA Project, USA, 2005) 시리즈가 공개되어 중량물의 적재능력 및 험지 이동능력을 공개한 바 있다. 둘째로, 가정용 서비스 로봇으로서의 개발이다. 이미 수년 전부터 세계적인 가전 및 로봇 기업들에 의한 개발 및 상용화가 이루어지고 있다. AIBO™[2] (SONY Corp. Japan, 1999~2005)가 대표적인 사례이다. 이러한 애견용 로봇은 초기에는 단순히 강아지의 모습이나 행동을 모방하여 기동하는 심미적 기능의 완구적인 성격이 강했으나, 최근에는 다양한 멀티미디어 기능이 탑재됨으로써 가정용 홈 네트워크 시스템의 허브로서 그 기능이 점차 강화되고 있다. 이밖에, 견마 로봇의 개발은 재난 구조, 산업용 안전 감시 로봇 등, 다양한 분야에서의 활용이 기대된다.

4족 보행 로봇의 연구는 약 1970년대 초부터 보행의 안정성, 걸음새 등의 연구가 처음으로 진행되어 온 이래, 최근에는 에너지 효율, 속도, 안정성의 향상, 자체 자세 보정 등에 대한 연구 성과가 보고되고 있다. 하지만 일반적으로 관절형 보

[†] 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과
E-mail: softguy80@gmail.com
TEL : (031)400-4062 FAX : (031)406-6398

^{**} 한양대학교 대학원 기계공학과

^{***} 회원, 한양대학교 기계정보경영학과 교수

행로봇은 높은 관절 자유도로 인해 해석이 어렵고, 안정적인 보행을 위해 몸체의 진동과 보행 자세의 안정성을 고려해 줘야 하는 등의 다소 복잡한 분석을 요구하기도 한다.[3] 기존의 연구사례를 살펴보면, 복잡한 다리 구조를 단순화하여 가상 다리의 개념으로 시스템을 해석하거나[4], 보행 중에 발생하는 몸체의 불안정한 진동 현상을 보상하기 위해 몸체에 무게 균형 진자를 탑재한 4족 로봇이 제안되기도 하였다.[5], Kimura Hiroshi 등은 4족 로봇의 동적 보행을 평가할 때에 지지 각 중 대각선 방향에 위치하는 두 발의 연결선을 이용하는 대각선법(Diagonal Principle)과 정적 보행 시 삼각 안정성(Tripod stability)을 고려하였으며, 이를 통한 걸음새를 계획하였다. [6]

본 연구는 안정여유, Duty factor, COG 위치 변화 등의 보행이론은 시스템에 최대한 반영하여 시뮬레이션을 하였으며, 이를 통해 적절한 보행 계획을 수립하여 실제 시스템에 반영 및 실험을 통한 평가를 실시하였다. 전체적인 구성은 4족 보행 동물의 해부학적 구조 분석 및 개념설계를 도출하고 이를 근거로 한 시스템의 모델링 및 동적 시뮬레이션, 실제 4족 보행로봇의 제작 및 실험을 통한 걸음새의 적용 및 안정성 평가로 이루어져 있다. 이러한 연구는 향후 센서 융합 등을 통해 지능형 4족 보행로봇으로 발전하기 위한 기초 연구의 성격을 가지고 있다.

2. 해부 역학적 모델링

2.1 4족 보행 로봇의 개념 설계

본 연구에서는 4족 견마형 로봇의 제작을 위해 포유류의 'Mirror image'를 개념 설계에 적용하여 시스템의 동적 안정성을 보상하는 데에 활용하고자 한다. [7] 상세설계와 4족 보행 로봇의 구체적인 걸음새 계획을 위하여 다음을 고려하였다.

- (1) 'Mirror-image' 골격구조: 시스템의 정적, 동적 안정성 확보할 수 있다.
- (2) 2-joint, 2-segment(link)을 가지는 다리 구조: 보행 시에 기구적인 이점을 가진다. (mechanical leg advantage)
- (3) 구형의 고무 발 (Rubber Foot): 비 평탄 지역에서의 자유로운 보행을 가능하게 해주며, 충격 흡수와 견인력을 증가시킨다.
- (4) 중심이 높은 로봇 (High Center Point): 비 평탄 지역에서의 보행이 용이하며, 기민한 동작이나 진로의 변경과 같은 제어를 용이하게 만들어 준다.



Fig. 1 Side and front view of foot schematic

(5) 대각(Diagonal) 보행: 3 각 정적 지지 시에 안정성을 향상 시킨다.

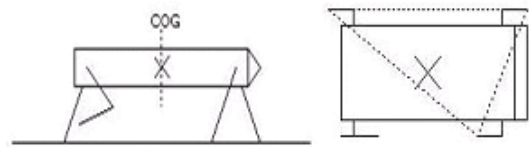
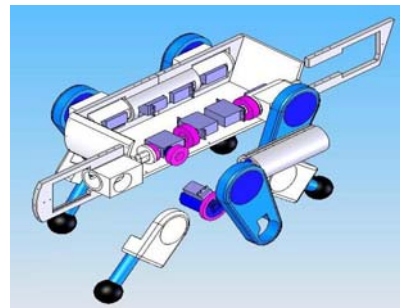
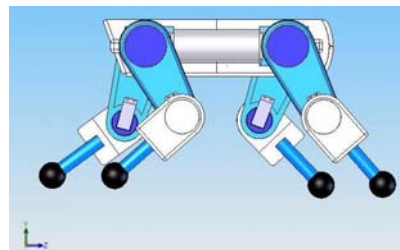


Fig. 2 Side and top view of Robot schematic

2.2 상세설계

본 시스템은 Fig.3 에 나타낸 구조와 같이 동체 전후 좌우 대칭구조를 가지며 4 개의 다리로 구성 되어 있다. 각각의 다리는 모두 수평회전축을 갖는 어깨, 허벅지, 무릎 관절로 이루어진 3 자유도 시스템이므로 전체 시스템은 총 12 자유도 시스템이다. 로봇에 사용된 RC 서보 모터(Servo Motor)의 형상, 모터와 몸체의 체결 문제, 관절 부분의 회전축과 모터 구동 축 사이의 정렬(Alignment) 문제, 링크(Link)와 조인트(Joint) 사이의 베어링(Bearing) 형상 등이 로봇 설계 시의 중요한 요소로 고려되었다.



(b) Deal drawing

Fig. 3 A detailed design of a quadruped robot

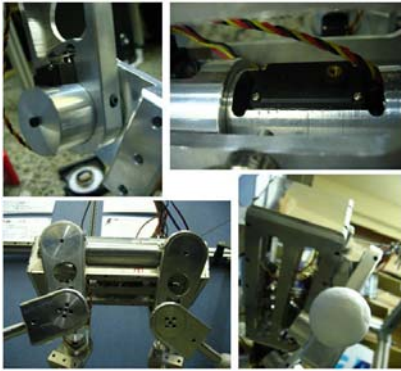


Fig. 4 Finished product of quadruped CQR-1

본 시스템은 단순 전진 이동뿐만 아니라, 후진 및 방향 선회를 감안하여 무릎과 허벅지 관절 이외에 어깨에 내전, 외전(Adduction, Abduction) 관절을 부여하여 위치 이동 시에 로봇의 방향을 용이하게 변화시킬 수 있도록 고려하였다. 또한 내/외전 관절은 로봇이 발을 지면에 내려놓을 때에 모터에 순간적으로 걸리는 구동 토크(Driving Torque)의 과부하 현상을 완화시켜 주는 역할을 하여, 스프링-감쇠기(Spring-Damper)와 같은 효과를 낼 수 있도록 모델링 하였다. 어깨 관절과 구형의 고무 발과 함께 로봇의 허벅지와 종아리 부분의 두 개의 링크부분에 동물의 골격 구조에서 보다 다소 큰 각도인 130° 을 부여하여 기구 자체 내에서의 충격흡수 효과를 가질 수 있도록 하였다. 시스템의 전체적인 사양은 Table 1 과 같다

Table.1 Specification of CQR-1

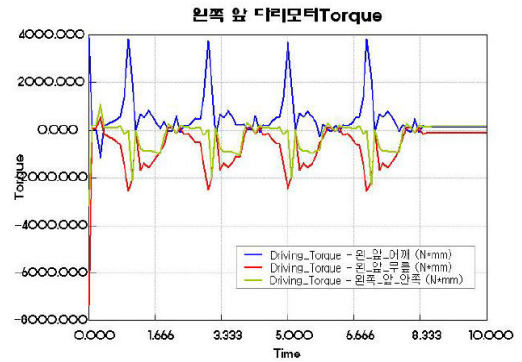
ITEM		Value
Body dimension(mm)	length	347.5
	Width	120
Leg dimension(mm)	Link 1	120
	Link 2	136
Height dimension(mm)	Minimum	193.5
	Maximum	280
Total weight (g)		7500
Gait period (sec)		2
Stride (cm/s)		7.4

2.3 구동 및 제어시스템 구현

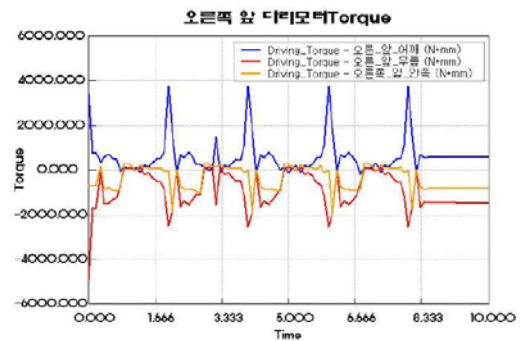
2.3.1 모터 선정

상세설계에서 고려한 무게, 크기 및 동작 성능을 반영하여 시스템의 액추에이터를 시뮬레이션 상에

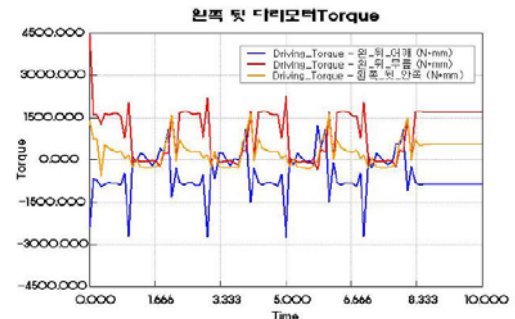
서 선정하였다. (Fig.5 (a)~(d))



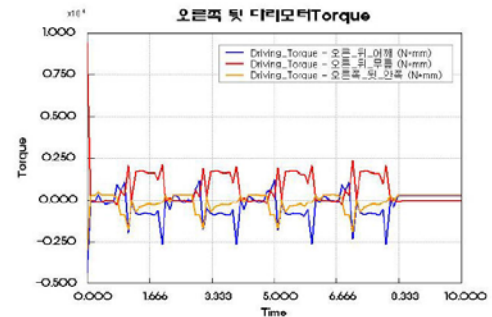
(a) a driving torque of left fore-limb



(b) a driving torque of right fore-limb



(c) a driving torque of left rear-limb



(d) a driving torque of right rear-limb

Fig. 5 Virtual dynamic simulation for the purpose of selecting an actuator

2.3.2 통합제어시스템구현

앞 절에서 계산된 모터 사양을 바탕으로 모터를 제어하기 위한 DSP(Digital Signal Processor) 및 관

런 시스템을 Fig.6 과 같이 구성하였다.

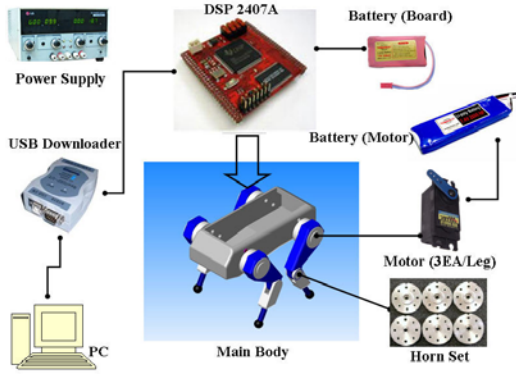


Fig. 6 Schematic of a quadruped robot platform

3. 걸음새 안정성 평가

3.1 기본 개념

로봇이 다리를 올리고 내리는 주기적 운동인 걸음새(gait)를 정의하기 위하여 주기, 이동거리 등의 기본적인 항목들을 선정하고, 정적 보행 안정성을 평가하기 위한 안정여유, Duty factor, COG 위치 변화 등을 계산하였다. 보행 주기는 왼발 앞다리가 지면에서 떨어져서 스윙(Swing)을하고 다시 지면에 닿는 순간까지를 1 주기로 한다.

$$T = \tau_s + \tau_t \quad (1)$$

여기서, T 는 보행 주기, τ_s 는 다리가 지면에 지지하는 구간이고, τ_t 는 다리가 지면에서 떨어져 이동하는 구간을 나타낸다. 디듀티 울(Duty factor)은 i 번째 다리가 한 주기 동안 지면을 지지하는 시간을 주기로 나누어 무차원화 한 것으로 식(2)와 같고, 값은 $0 < \beta < 1$ 의 범위이며, $0.75 < \beta < 1$ 의 범위에서 안정적이다.[8][9]

$$\beta_i = \frac{\tau_s}{T} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{R}{\beta_i} \quad (3)$$

여기서, λ_i 는 한 주기 동안 몸체가 움직이는 거리이고, R 은 한 다리의 변위이다.

보행 로봇의 몸체 안정성을 평가하는 요소로서 본 연구에서는 안정여유(Stability margin)를 선정하였다. 안정여유란 보행 로봇의 다리의 x-z 평면에 투영시킨 점들이 이루는 지지다각형의 경계선과 몸체의 무게중심점(COG)의 x-z 평면에 투영시킨 점간의 최소 거리로 정의하고, 이중에서 이동 방

향에 대한 안정 여유를 세로안정여유(Longitudinal Stability margin)라고 정의한다.

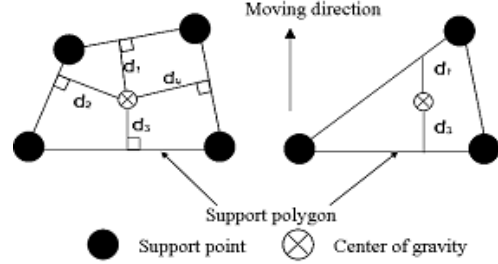


Fig. 7 Stability of margin projected on XZ-plane

세로안정여유는 정적 걸음새인 직선보행의 경우에 해석의 용이성으로 주로 이용되는 요소이다. 시스템의 속도(Trot)에 의한 안정여유를 (4), (5)의 식을 통해 산정할 수 있다.

$$S_M = \min(d_1, d_2, d_3, d_4) \quad (4)$$

$$S_L = \min(d_1, d_2) \quad (5)$$

다리가 $2n$ 개인 직선보행 로봇의 주기적이고 정적인 걸음새의 안정 여유는 다음과 같다.

$$S = \left(\frac{n}{2} - 1\right)P + \left(1 - \frac{3}{4\beta}\right)R \quad (6)$$

(β_i : 디듀티, R : 보폭, P : 다리 피치(Pitch))

이에 따라, 각 다리의 위치와 보폭을 1로 정규화한 형태를 Fig.7에 도식화하였고, 진행방향에 대해서만 고려한 안정 여유 식은 다음과 같이 표현된다.

$$S_L = \left| \frac{x_a + x_b}{2} \right| \quad (7)$$

x_a, x_b 는 무게중심에 대한 다리 a, b의 진행방향 위치를 나타낸다. 이 때 각 걸음새의 최적 세로 안정여유는 다음과 같다.

$$S^* = \frac{S_L}{\lambda} \quad (8)$$

이와 같은 최적안정여유 값으로 보행하는 경우가 로봇의 보행에 있어 가장 이상적인 걸음새가 된다. 여러 가지 보행 패턴 중, 최적안정여유 개념을 적용하였을 때에 가장 높은 안정성을 나타내는 것이 트롯 보행으로 알려져 있으며, 다음절에서는 본 연구에서 제안한 시스템의 걸음새 계획에 있어서 위에서 제시한 이론들을 적용하여 최적의 보행 패턴을 계산하고, 실제 제작된 시스템에 적용한 결과를 소개할 것이다.

3.2 보행 인자의 산출

앞 절에서 소개한 기본 개념을 본 시스템에 적용하여 보행 성능과 관련된 중요 인자들을 산출하였다.

(1) Duty factor

$$\beta_{1,2} = \frac{\tau_{1,2}}{\tau} = \frac{1.8}{2} = 0.9$$

$$\beta_{3,4} = \frac{\tau_{3,4}}{\tau} = \frac{1.5}{2} = 0.75$$

(2) Displacement per 1 cycle

$$\lambda_{1,2} = \frac{R}{\beta_{1,2}} = \frac{0.15}{0.9} = 0.17(m)$$

$$\lambda_{3,4} = \frac{R}{\beta_{3,4}} = \frac{0.15}{0.75} = 0.2(m)$$

(3) Stability margin

$$S_{1,2} = \left(\frac{n}{2} - 1\right)P + \left(1 - \frac{3}{4\beta_{1,2}}\right)R$$

$$= \left(1 - \frac{3}{4 \times 0.9}\right) \times 0.15 = 0.025$$

$$S_{1,2} = \left(\frac{n}{2} - 1\right)P + \left(1 - \frac{3}{4\beta_{3,4}}\right)R$$

$$= \left(1 - \frac{3}{4 \times 0.75}\right) \times 0.15 = 0$$

계산 결과 1, 2 번 앞다리의 Duty factor 는 0.9 이고, 3,4 번 뒷다리는 0.75 로서, Duty factor 의 안정범위 조건을 충족시키는 결과 값을 알 수 있다. 시뮬레이션을 위하여 Fig. 8 과 같이 각 다리에 번호를 부여하였고, Fig.9 와 같은 보행 패턴을 설계하였다.

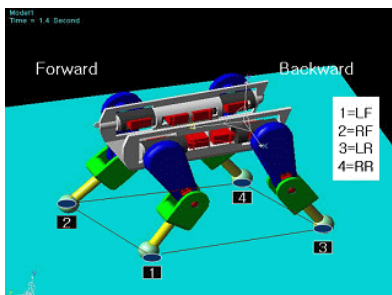


Fig. 8 The Definition of Locomotion

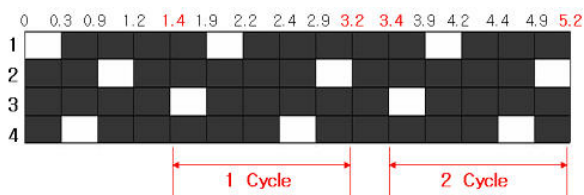


Fig. 9 Gait algorithm (Trot gait)

Table.2 는 속도(Trot)를 기준으로 위의 보행 패턴

을 적용하여 시스템의 1 사이클의 보행 주기 동안의 COG 의 단위 시간 별 이동 거리 및 속도를 시뮬레이션 한 결과이다.

Table2. Position of COG for gaits

단위 시간	COG 의 위치변화	소요 시간	가속도
t_1	$\frac{\lambda}{T}(1 - \beta_{1,2}) = \frac{0.17}{2}(1 - 0.9) = 0.0085$	0.009	0.009
t_2	$\frac{\lambda}{T}(\phi_4 - 1 + \beta_{3,4}) = \frac{0.2}{2}(0.25 - 1 + 0.75) = 0$	0	0.009
t_3	$\frac{\lambda}{T}(\phi_4) = \frac{0.17}{2}(0.4) = 0.034$	0.034	0.043
t_4	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2) = \frac{0.2}{2}(0.5) = 0.0425$	0.043	0.085
t_5	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2 - 1 - \beta_{3,4}) = \frac{0.17}{2}(0.5 - 1 + 0.75) = 0.025$	0.025	0.11
t_6	$\frac{\lambda}{T}(\phi_3) = \frac{1.7}{2}(0.7) = 0.0765$	0.077	0.187
t_7	$\frac{\lambda}{T}(T) = 0.17$	0.17	0.357

4. 결론

4.1 4족 보행 로봇 시스템의 보행 실험

Fig.10 은 앞 절에서 시뮬레이션을 통해 도출한 보행 패턴을 실제 시스템에 적용하여 실시한 보행 실험을 도시하고 있다.

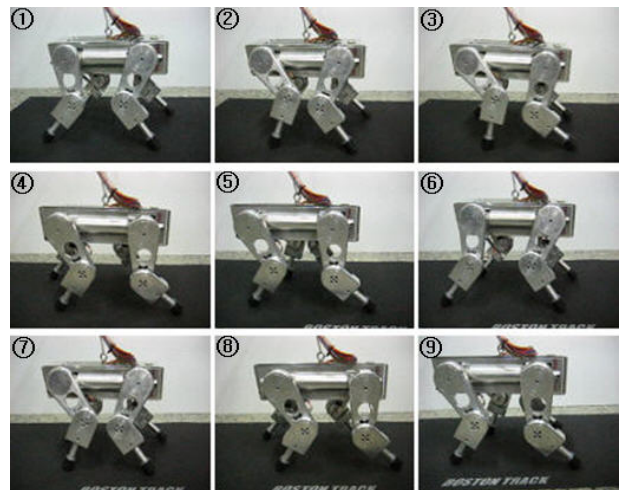
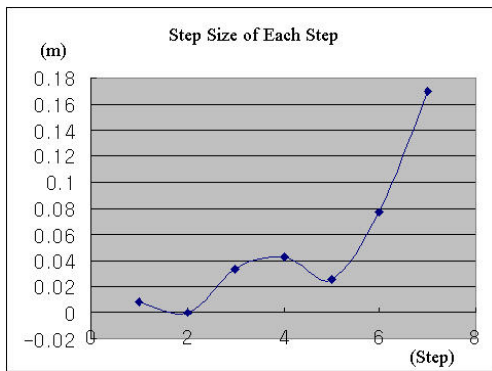
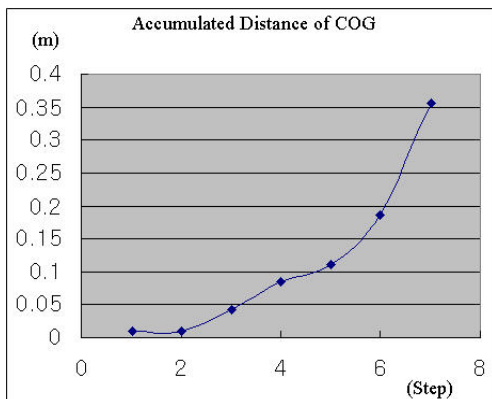


Fig. 10 Gait Experiment

각 다리가 지면에 접촉하고 있는 시간, 지면에서 떨어진 시간 및 각 다리 별 보행 순서를 정하는 것은 4 족 보행로봇의 걸음새를 정의하는데 중요한 인자들이며, 각 요소들을 어떻게 설정하느냐에 따라 로봇의 전체적인 보행 성능이 좌우되기도 한다. 실험결과 시뮬레이션의 결과와는 다소 다른 보행 패턴이 검출되었다. 일례로 단위 시간 별 보행량이 일정치 않은 문제 등이 그것이다.(Fig.11 참조) 이러한 불규칙적인 보행패턴은 몸체의 안전성에 영향을 미치며, 방향 전환 및 후진과 같은 전진 보행과 다른 패턴의 보행 시에 예상치 못한 동적 거동을 초래할 수 있다. 또한 지면 마찰이나 로봇의 발과 지면과의 불규칙한 접촉 등의 인자가 다음 보행에도 영향을 끼치는 현상 등은 향후 다양한 센서의 적용을 통해 로봇의 자세에 따라 실시간으로 보행 패턴을 변경할 수 있는 유연성이 높은 시스템의 필요성을 제기하는 부분이라 할 수 있다.



(a) Position of COG at Each Step



(b) Position of COG at Each Step (Accumulated)

Fig. 11 Position of COG for gaits

4.2 Future work

본 연구는 안정여유, Duty factor, COG 위치 변화 등의 보행이론을 적용하여 시스템을 시뮬레이션하

고, 실제 하드웨어에 맞는 적절한 보행 패턴을 산출하여 이를 적용 및 실험함으로써 시뮬레이션 결과와의 비교 및 실제 상황에서의 추가적인 고려사항 등

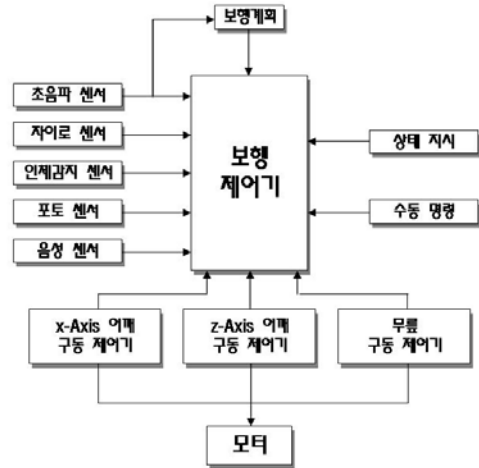


Fig. 12 Schematic of a gait algorithm

향후에는 자이로 센서 (Gyro Sensor)를 이용한 자세보정 및 초음파 센서를 이용한 장애물 회피 기능을 부여하여, 평지 이외의 다양한 환경에서의 시스템을 실험 평가하는 연구가 진행될 것이다.(Fig.10)

참고문헌

- [1] <http://www.bostondynamics.com/>
- [2] <http://www.sony.net/Products/aibo/>
- [3] C.O. Bae, B.W. Ahn and H.S. Kim, 2004, "A Study on Trot Walking for Quadruped Walking Robot", KIMICS, pp. 1418~1423
- [4] J.N. Kim, H.J. Hong and Y.S. Yoon, 1990, "Feasibility Test for Dynamic Gait of Quadruped Walking Robot, KSME 1990, pp.1455~1463
- [5] Gi-Hun Choi and Young-Tark Kim, 2002, "Development of a quadruped robot with weight balancing oscillator", KSME 2002, pp. 894~899
- [6] Yasuhiro Fukuoka, Hiroyuki Nakamura and Hiroshi Kimura, 1999, "Biologically-Inspired Adaptive Dynamic Walking of the Quadruped on Irregular Terrain", Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Application, Hawaii, pp.490~495
- [7] "Basic Anatomy of Mammals", Oricom Technologies, <http://www.oricomtech.com/projects/leg-anat.htm>
- [8] Vincent Hugel, Patrick Bonnin and Pierre Blazevic, 1999 "Towards Efficient Implementation of Quadruped Gaits with Duty Factor of 0.75" 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 10-15.
- [9] Vincent Hugel, Patrick Bonnin and Pierre Blazevic, 2000 "Speed Control for Quadruped using Duty Factor" IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 985-990