

6족 보행로봇에 관한 기초연구

강동현 민영봉 飯田訓久 梅田幹雄

A Basic Study of Hexapod Walking Robot

D. H. Kang Y. B. Min M. Iida M. Umeda

Abstract

A hexapod walking robot had been developed for gathering information in the field. The developed robot was 260×260×130 (W×L×H, mm) in size and 14.7 N in weight. The legs had nineteen degrees of freedom. A leg has three rotational joints actuated by small servomotors. Two servomotors placed at ankle and knee played the roles of vertical joint for up and down motions of the leg and the other one placed at coxa played the role of horizontal joint for forward and backward motions. In addition, a servomotor placed at thorax between the front legs and the middle legs played the role of vertical joint for pumping the two front legs to climb stair or inclination. Walking motion of the robot was executed by tripod gait. The robot was controlled by manual remote-controller communicated by an infrared ray. Two controllers were equipped to control the walking of the robot. The sub-controller using PIC microcomputer (Microchips, PIC16F84A) received the 16 bit command signal from the manual remote controller, decoded it to 8bit and transmitted it to the main microcomputer (RENESAS, SH2/7045), which controlled the 19 servomotors using the PWM command signals. Walking speeds were controlled by adjusting the period of command cycle and the stride. Forward walking speed were within 100 cm/min to 300 cm/min. However, experimental walking speed had the error of 4-40 cm/min to compare with the theoretical one, because of slippage of the leg and the circular arc motion of servomotor of coxa.

Keywords : Hexapod walking robot, Tripod gait, PWM

1. 서론

곤충은 인간에 비해서 아주 단순한 신경조직을 가지고 있지만, 약 4억년 이상 높은 환경적응능력으로 지구환경에 적응하며 살아오고 있으며, 현재 세계에는 약 100만종 이상의 곤충이 살고 있는 것으로 알려져 있다(竹田, 2003). 이러한 곤충의 운동신호전달 체계, 구조, 행동 등을 조사하고 공학적으로 분석하여 농업기계에 응용한다면 농업생산성 향상에 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 보행로봇은 바퀴식 로봇에 비하여 속도면에서는 우수하지 못하지만, 무논이나 굴곡이 있는

포장 혹은 경사지 등에서의 작업 능력이 우수하다(Dohi et al., 2000). 보행로봇의 연구는 크게 2족, 4족, 6족 보행로봇이 주로 세계에서 많이 진행되어지고 있다. 2족, 4족 보행로봇은 6족 보행로봇보다 속도 면에서 뛰어나지만, 6족 보행로봇은 안정성 측면에서 뛰어나다(Dohi et al., 2002). 보행로봇을 실제 농업에 적용하기 위해서는 불규칙한 포장에서의 작업안정성이 유지가 중요하므로 곤충과 같은 6족 보행로봇의 적용이 적당할 것으로 판단된다. 곤충형 6족 로봇의 연구는 크게 두 가지 방향으로 분류된다. 하나는 곤충의 다리모양 및 관절을 응용할 목적으로 제작하는 바퀴벌레(Quinn and Ritzmann,

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation Grant (No. 2005-215-D00426). The article was submitted for publication in July 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in September 2007. The authors are Dong Hyun Kang, Graduate Student, KSAM member, Kyoto University, Kyoto, Japan, Young Bong Min, Professor, KSAM member, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, M. Iida, Associate Professor, Kyoto University, Kyoto, Japan, and M. Umeda, Professor, Kyoto University, Kyoto, Japan. Corresponding author: Y. B. Min, Professor, Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, IALS, Gyeongsang National University, Jinju, 606-701, Korea; E-mail: <mybong@gnu.ac.kr>

1998), 귀뚜라미(Birch et al., 2002), 대벌레(Guddat and Frik, 2000), 전갈(Klaassen et al., 2002)등의 연구와 또 다른 하나는 곤충의 중요 특성 중 하나인 여섯 개의 다리를 이용한 각종 제어기술을 로봇에 접목하는 연구형태이다(Arema and Fortuna 2002; Inagaki, et al., 2006; Still, et al., 2006; Haynes and Rizzi, 2006). 그러나 전자의 경우는 곤충의 형상을 그대로 모방하기 위하여 너무 많은 부품의 부착으로 로봇 질량이 증가하고, 이로 인하여 보행이 불가능한 경우도 있다. 또한 다량의 관절모터 부착에 따른 에너지소모율의 증가로 인하여 외부로부터 다량의 전원입력이 필요하여 전기 동력을 구하기 어려운 포장에 적용하는 것이 어려울 것으로 판단된다. 따라서 곤충형 로봇의 포장 적용성은 전자의 경우보다 후자의 경우가 더 적절할 것으로 판단된다.

본 연구는 곤충의 다리 움직임을 응용하여 6족 보행로봇을 고안제작하고 개발한 보행법을 적용하여 보행성능을 평가하였으며, 농업생산성 향상을 도모하기위한 적용가능성을 검증하고자 수행하였다.

2. 장치 및 방법

가. 곤충형 6족 보행로봇

로봇의 크기는 수행할 작업과 기능에 따라 결정되어지는데 본 연구에서는 곤충을 모방한 로봇의 고안제작과 보행성능을 구명할 목적이므로 행동모양을 가지적으로 확인할 수 있으면서 되도록 작은 규모의 로봇을 지향하였다. 로봇의 행동주체인 관절을 직접 DC서보모터로 구성할 수 있는 아이디어로부터 3관절형 다리를 6개 갖는 소형 곤충형 6족 보행로봇을 고안제작한 바 그 형상과 제원은 그림 1 및 표 1과 같다. 사용한 서보모터의 축방향 몸체길이 41 mm, 폭 35 mm, 두께 21 mm인 것을 이용하였으며 3관절 다리의 길이는 155 mm로 다리와 다리사이의 중심간격은 곤충을 약간 모방하여 다리길이의 약 2/3인 100 mm로 하였다. 제작한 로봇의 크기는 다리의 조작도와 장애물회피공간이 가장 우수한 표준자세에서 길이 260 mm, 폭 260 mm, 높이 130 mm였고, 총무게는 14.7 N였다. 그리고 다리간 보행간섭이 없는 최대보폭은 36 mm였다. 로봇의 다리는 서보모터와 지지링크를 이용하여 제작하였는데, 발목과 무릎을 수직회전관절로, 고관절(엉덩이관절)을 수평회전관절로 작동하도록 서보모터의 축이 로봇관절축이 되도록 하였다. 판상의 ㄷ자형 지지링크가 서보모터를 지지하도록 하였고 각 관절을 연결하도록 하였다. 따라서 3개의 서보모터를 하나의 다리에 설치하였다. 앞의 다리 전체를

상하로 움직일 수 있도록 앞다리부분과 중간다리부분 사이에 하나의 척추관절인 수직관절 서보모터를 부착하여, 로봇의 전체 자유도는 19자유도가 되었다. 로봇의 동작은 원격제어기에 의한 수동 조작신호에 따라 제어되도록 하였다. 원격제어기의 조작신호를 주제어기와 보조제어기로 전달하여 로봇 구동을 수행하였다. 그리고 전원은 DC 5V의 외부전원이나 축전지를 이용하도록 하였다.

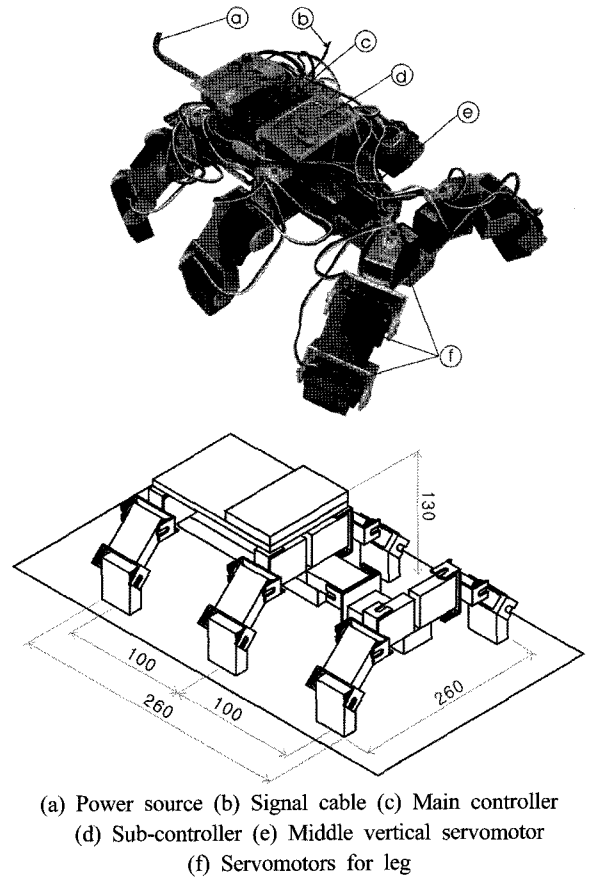


Fig. 1 Prototype and schematics diagram of the hexapod robot.

Table 1 Specifications of the hexapod robot

Item	Specification
Size (L×W×H, mm)	260×260×130
Weight (N)	14.7
Number of DOF per leg	3
Total DOF	19

나. 제어장치

1) 원격제어기

로봇의 보행조작은 원격제어기에 의하여 수동조작으로 이루어지게 하였다. 그림 2는 사용된 CD플레이어용 원격제어

기(RMT-814, Sony Corp., Tokyo, Japan)의 외형과 버튼배열 및 적외선 출력신호를 나타낸 것이다. 원격제어기의 각 버튼을 누르면 출력되는 신호는 16비트의 해당 명령값 신호가 출력된다. 버튼을 누르지 않을 때는 적외선 발신이 없는 즉, 신호는 ‘음(-)’신호로 0전압레벨이며, 버튼이 눌러지면 최초 약 520 μs 동안 적외선 발신 즉, ‘양(+)’의 명령시작신호가 발신되고, 이후 명령값 신호가 연속된다. 명령값 신호는 최상위 비트부터 발신하는데 각 비트출력 전 130 μs 동안 -신호 후 +의 해당 비트신호가 발신된다. 각 비트의 논리는 ‘양(+)’ 신호의 시간길이에 따라 결정되는데, 신호의 길이가 130 μs 이하일 경우 ‘0’으로 설정되고, 260 μs 이하일 경우 ‘1’로 설정된다. 그림 2의 출력신호는 적외선 발신신호를 수신하는 포토센서의 출력패턴으로 원격제어기의 발신신호와 반대논리이다. 이와 같이 각 버튼이 눌러지면 16비트의 값이 발신되지만 본 연구에 사용된 원격제어기는 버튼수가 19개로 적어서 상위 8비트만으로 구별되는 값의 처리가 가능하다.

표 2는 원격제어기의 각 버튼에 대한 기능과 상위 8비트의 해당 명령값을 정리한 것이다. 원격제어기의 12번을 누르면 전진보행을, 보행 중에 11과 13을 누르면 보폭의 증감, 17과 19번을 누르면 보행주기를 짧고 길게 즉, 빠르고 느린 걸음을 명령하는 것으로 정하였다.

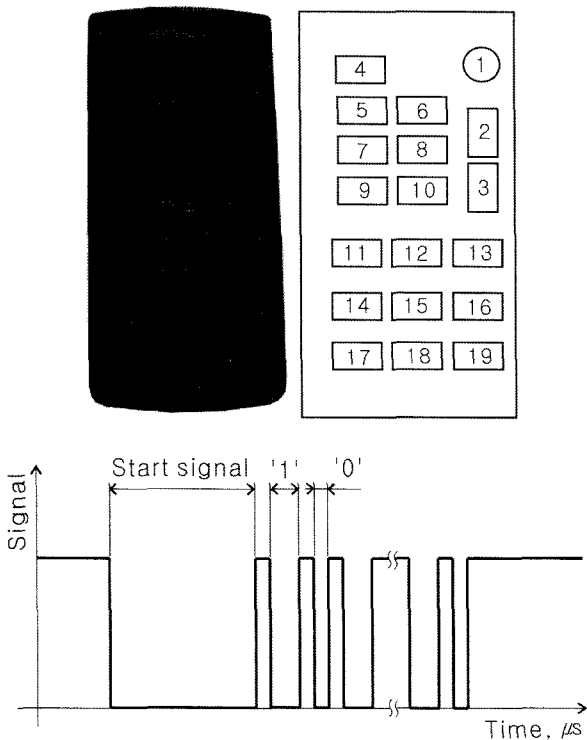


Fig. 2 Remote controller and transmitted infrared signal pattern.

Table 2 Transmitting signal and functions assigned to each buttons of the remote controller

Button No.	Signal	Functions
1	19711	-
2	11591	Pump up front leg
3	27903	Pump down front leg
4	21759	-
5	37887	-
6	36607	-
7	23295	-
8	6655	-
9	36607	Low posture walking pattern
10	34559	High posture walking pattern
11	36351	Short stride
12	34303	Forward walking(middle stride)
13	33791	Long stride
14	33023	Turn left
15	33279	Stop
16	35071	Turn right
17	35327	Low pace frequency
18	36095	Backward walking
19	33535	high pace frequency

2) 제어기

그림 3은 곤충형 6족 보행로봇의 보행제어를 위한 흐름도를 나타낸 것이다. 원격제어기로부터 송신된 그림 2와 같은 16비트의 보행명령신호는 적외선 전용의 포토센서(PL-IRM0208-A538, Para Light Electronics Co., Ltd, Taipei, Taiwan)가 수신하고 전압신호로 변환하여 그림 1의 (d)와 같은 보조제어기(PIC16F84A, Microchips Technology Inc., Chandler, AZ, USA)의 입력단자로 입력된다. 보조제어기는 16비트의 시간 길이 논리신호를 일반 디지털논리신호로 변환하고 상위 8비트의 신호만 주제어기(SH2/7045, Renesas Technology Corp., Tokyo, Japan)로 출력되도록 하드웨어를 구성하고 마이크로프로세서를 프로그램하였다. 주제어기는 직진, 후진, 좌·우회전 및 속도조절 기능으로 설정된 명령신호값이 입력되면 각각의 행동이 가능하도록 개발한 보행법에 맞추어 19개의 해당 서보모터에 PWM 신호를 출력하여 보행을 제어하도록 하드웨어를 구성하고 마이크로프로세서를 프로그램하였다. 이 신호 이외의 신호가 입력되면, 주제어기는 표준자세를 유지하도록 하는 PWM 신호를 출력하여 표준자세를 유지하도록 하였다. 주제어기와 보조제어기의 제원은 표 3과 같다.

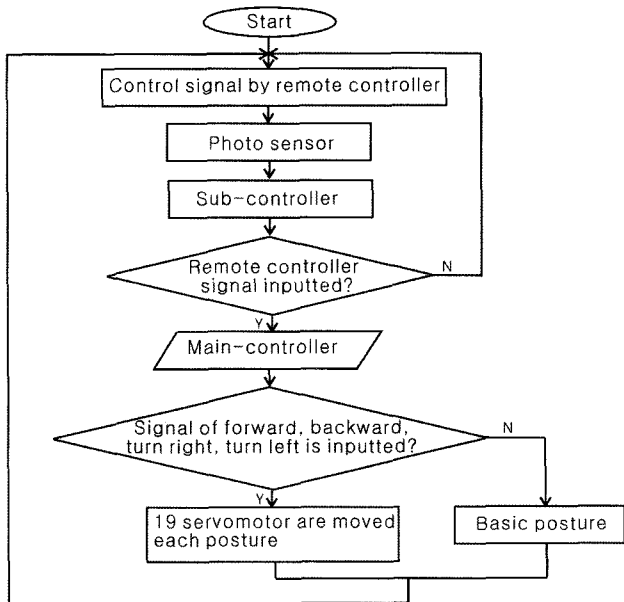


Fig. 3 Flowchart of walking control of the hexapod robot by manual remote controller.

Table 3 Specifications of the controllers in the hexapod robot

Item	Specification	
Model	MC ^{*)}	SH2/7045
	SC ^{**)}	PIC16F84A
I/O port	MC	106
	SC	13
Clock	MC	28 MHz
	SC	20 MHz
A/D channel	MC	8 ch(10bit)
	SC	-

^{*)} MC : Main-controller

^{**)} SC : Sub-controller

3) 서보모터

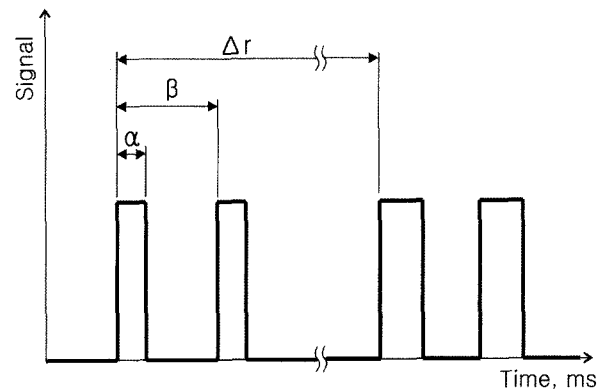
6족 보행로봇의 다리관절 구성 겸 구동장치로 이용한 서보모터(KRS-786ICS, Kondo Kagaku Co., Ltd, Tokyo, Japan)의 제원은 표 4와 같다. 서보모터는 5 V 직류를 흘리면 60°/170 ms의 속도로 축이 회전하며, 서보모터의 축을 0°에서 최대회전각도 180°까지 회전시키는데 걸리는 시간은 약 510 ms이다. 따라서 축의 각도를 원하는 위치로 조정하기 위해서는 원하는 구동각도의 PWM신호를 출력하는 서보모터 구동회로가 필요하다. 그림 4는 서보모터를 구동하기 위한 타임 차트(time chart)이다. 본 연구에 사용된 서보모터의 구동회로는 신호조작주기(β)에 대해 입력되는 각도제어신호의 시

간길이(α) 비에 따라 정해져 있는 각도로 축을 정역 회전하여 그 각도에서 정지하게 하는 제어를 행한다. 신호조작주기(β)가 24 ms이고, 각도제어신호(α)가 1.5 ms일 경우 제어각도 0°, 2.3 ms일 경우 +90°, 0.7 ms일 경우 -90°로서, 총 180°의 각도 제어가 가능하다. 주제어기의 프로그램 스캔타임은 15 μ s로써 이 스캔타임이 최소 각도제어신호이며, 이 스캔타임동안 신호입력을 ON(5V)으로 유지하면 서보모터 축은 1.6° 회전(각도분해능)한다. 서보모터축을 180° 위치로 하려면 107회 스캔타임동안 각도제어신호를 ON하면 된다.

Table 4 Specifications of a servomotor in the hexapod robot

Item	Specification
Model	KRS-786ICS
Size (L×W×H, mm)	41×35×21
Max. torque (N·m)	0.856
Movement	180°
Speed of movement	170 ms/60°

각 서보모터 축의 1회 최대회전각도를 60°로 하면 이 각도를 회전하는데 170 ms가 걸리므로 주제어기는 각도제어신호 명령 후 다음의 각도제어신호를 명령하는 데는 최소 170 ms 이상의 시간이 소요되므로 그 동안 각도제어신호를 반복하여 송출하여야 정확한 동작제어가 가능하다. 또한 서보모터축의 회전이 멈추는 시점에서 다리의 관성진동이 소멸하는 것 등을 고려하여 명령반복주기(Δr)는 최소 240 ms로 하였다. 그리고 이 명령반복주기의 증감을 통해 보행속도의 조절을 시도하였다.



α : Pulse width to decide the rotating angle of servomotor shaft

β : Period of PWM cycle

Δr : Period of command cycle

Fig. 4 Time chart for driving of servomotor.

다. 다리 동작

그림 5는 하나의 다리에 대한 동작 설명도이다. 고관절인 모터 1은 수평회전관절이며 다리를 전후로 동작하는 보행기능을 가진다. 보행중의 보폭은 모터 1의 회전각도 θ_1 과 다리관절의 수평길이에 의하여 결정된다. 다리의 수평길이는 식 1을 통하여 계산되어지고, 계산된 값은 식 2에 의해 보폭(stride)을 결정한다.

$$r = l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos (\theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$stride = 2 \times r \times \sin \frac{\theta_1}{2} \quad (2)$$

이러한 모터 1의 회전각인 θ_1 을 조절하여 보행속도의 조절이 가능하다. 무릎관절인 모터 2와 발목관절인 모터 3은 보행을 할 때, 로봇의 다리를 지면에서 상승시키는 기능을 한다. 전진보행은 모터 2와 3을 다리 상승방향으로 회전시켜 다리가 지면에서 떨어져 상승을 완료하면, 모터 1을 회전시켜 다리를 전진시킨 후, 모터 2와 3을 다리 하강방향으로 회전시켜 다리가 지면과 접촉하게 하고, 다리가 지면과 접촉한 후 다시 모터 1을 회전하여 다리를 후진시키는 1사이클로 이루어진다. 보행 중 진로상의 장애물을 통과하기 위해서는 다리를 들어 올리는 높이조절이 필요하다. 다리의 상승량은 θ_2 와 θ_3 의 각도 조절에 의하여 결정되는데, 모터 3의 몸체는 로봇의 발로서 착지 시 지면과 수직을 유지하도록 하였으므로 각 발의 착지 시 $\theta_2 + \theta_3$ 는 90° 이며, 그림 6과 같은 2단계의 낮은 자세와 높은 자세의 보행에서 θ_3 는 70° 와 30° 로 고정하였다. 따라서 다리의 상승높이 h 는 θ_2 의 각도에 의해 결정되는데, θ_2 의 각도는 식 (4)를 통하여 결정된다. 제작한 로봇은 원격제어의 수동조작에 따라 행동하므로 장애물 통과 가능성을 조사하기 위해 모터 2의 회전각도 조절을 2단계로 설정하여 보행진로상의 장애물의 크기에 따라 발을 들어 올리는 높이 h 를 다르게 하였다.

$$h = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin (\theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{h - l_3}{l_2} \right) \quad (4)$$

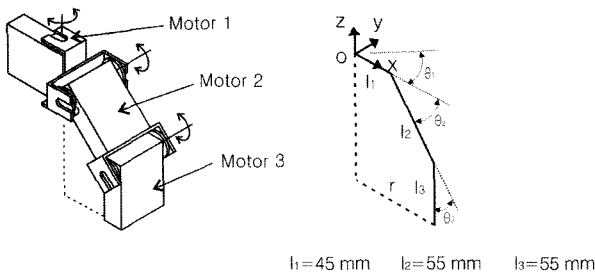


Fig. 5 Movement of a leg manipulator.

실외 포장에서는 보행로면의 조건이 실내와 비교하여 많이 다르다. 실내에서의 보행로면은 요철, 돌이나 잡초 등의 장애물이 없지만 포장에서의 보행로면은 로봇이 보행할 때 많은 장애물을 만나게 된다. 따라서 로봇이 보행 할 때 이것들을 회피하도록 하기 위하여, 그림 6과 같이 모터 2와 3의 움직임을 낮은 자세와 높은 자세 두 단계로 조절할 수 있도록 하였다. 장애물이 없는 평지인 경우, 발은 지면으로부터 20 mm 상승시켜 모터의 에너지 사용량을 최소화하였다. 높이 50 mm이하의 장애물, 요철 및 잡초 등이 있는 불규칙적인 지면인 경우, 다리는 로봇 몸체의 높이와 같은 높이인 50 mm로 상승하여 작은 장애물을 통과할 수 있도록 하였다. 낮은 자세와 높은 자세 보행 시 처음시작과 보행완료의 자세는 θ_1 을 1/2로 하여 6개의 다리가 모두 착지된 것으로 이 자세를 표준 자세라 하였다.

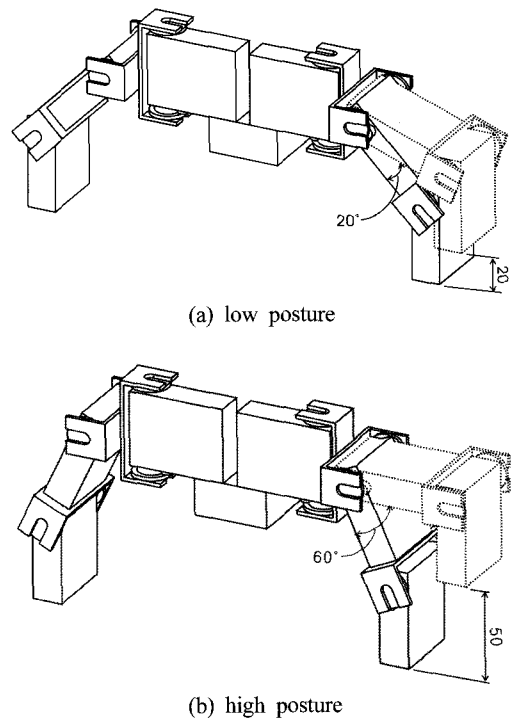


Fig. 6 Two patterns of body posture.

라. 보행법

그림 7은 고안 제작한 6족 보행로봇의 다리인 매니플레이터의 전체 보행동작 개요도이다. 로봇의 보행은 그림 7의 그룹 1과 2의 상호작용에 의한 보행인 삼각보행(三脚歩行, tripod gait) 방법을 이용하였다. 삼각보행법은 보행을 할 때 로봇의 몸체가 세 개의 다리에 의해 지지되므로 안정된 자세에서 보행을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 8은 삼각보행법의 설명도이다. 보행은 먼저 표준자세(a)에서 원격제어

기로부터 전진신호가 입력되면 그룹 1과 그룹 2가 걷기위한 자세(b)를 취하면서 보행을 시작한다. 이 자세에서 그룹 1의 다리가 상승(c)하고 지면위에 서 있는 그룹 2가 뒤쪽으로 이동하여 일보 전진함과 동시에 그룹 1은 상승한 상태로 앞으로 한 걸음 전진위치로 이동(d)한다. 그룹 1이 한 걸음 전진위치로 이동한 상태에서 바닥으로 발을 내려 다리를 최대한 벌린 상태로 땅위에서 서있는 자세(e)로 만든다. 다음은 그룹 2의 다리가 상승한(f) 후 그룹 1이 뒤쪽으로 이동하여 일보 전진함과 동시에 그룹 2는 상승한 상태로 앞으로 한걸음 전진위치로 이동(g)한다. 이렇게 두 걸음 전진하는 것이 보행의 한 사이클을 이루고 이러한 사이클의 반복을 통하여 삼각보행을 하게 하였다. 후진신호가 입력되면 그룹 1과 그룹 2의 다리들이 전진보행순서와 반대로 이동하여 후진보행을 한다. 또한 로봇의 좌회전과 우회전은 전진 혹은 후진보행의 삼각보행에서 회전방향 다리의 모터 1(Fig. 5)의 회전각을 줄이고, 회전반대방향 다리의 모터 1의 회전각을 크게 하여 회전걸음새를 형성하였다. 개발한 로봇은 원격제어기의 제어신호에 의한 제어이므로 좌우회전신호가 입력되면 모터 1의 회전각을 회전방향의 다리는 0°, 회전반대방향의 다리는 전진보행 시 모터 1의 회전각의 1.4배를 하도록 설정하였다. 이는 로봇이 회전할 때 회전중심이 각각의 중간다리(Fig. 9-(a), MR or ML)가 되고, 회전반경은 약 280 mm로 회전한다. 보행 중에 보행정지신호가 입력되면 표준자세(a)로 정지를 하게 하였다. 또한 장애물을 회피하거나 경사지를 오르내릴 때에는 척추관절 서보모터(Fig. 7, Jc)의 구동을 통하여 앞의 두 다리가 상하 운동하게 하면서 삼각보행을 하도록 하였다.

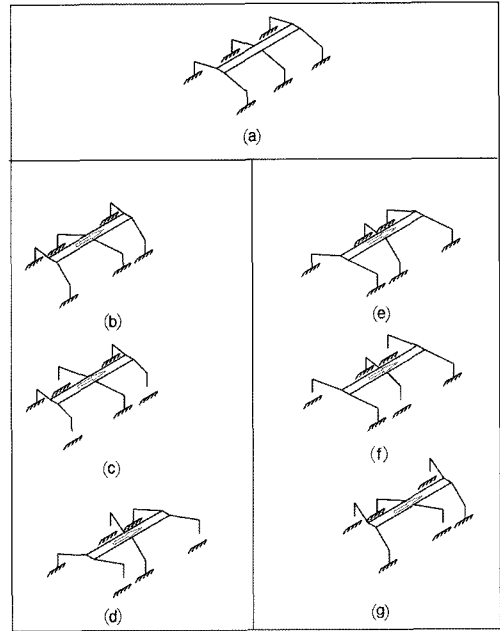


Fig. 8 Schematic diagram of walking patterns using tripod gait.

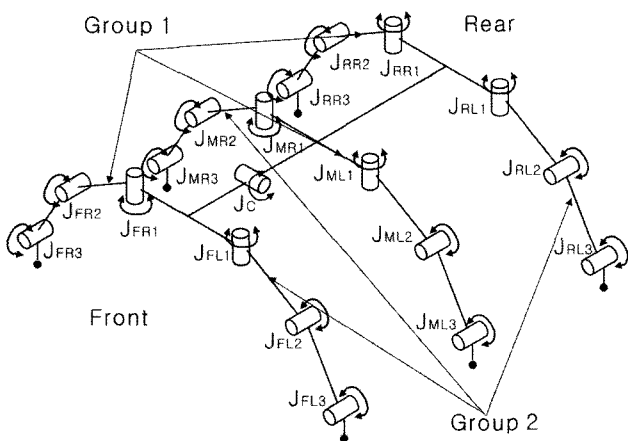
마. 시험설계

1) 각 다리의 발바닥에 부과된 하중측정

로봇의 제작과정에서 각 다리에 부과되는 하중은 가 관절 구동모터의 사양 결정의 요인 중 하나이다. 로봇의 정지나 보행 시 각 다리에 부과되는 하중은 로봇의 자세에 따라 다르며, 구동모터의 사양은 최대 하중을 반력으로 하는 토크를 필요로 한다. 구동모터에 부과되는 토크는 낮은 자세 보행 시가 높은 자세 보행 시보다 크므로 로봇의 각 다리에 부과되는 최대하중의 측정은 낮은 자세 보행 시의 표준자세에서 여섯 개의 다리에 부과되는 하중과 삼각보행 시 세 개의 다리에 부과되는 하중을 측정하였다. 다리에 부과되는 하중은 전자저울(BX-4200H, Shimadzu Corp., Kyoto, Japan)을 이용하여 측정하였다. 측정장치는 측정하고자 하는 다리의 발바닥과 측정하지 않는 다리의 발바닥이 평행한 상태에서 측정되도록 각 다리를 지지 할 수 있도록 높이조절이 가능한 보조지지장치와 전자저울로 구성하였다.

2) 원격조작시험

원격조작시험은 수동 원격제어기에 의한 조작명령에 맞는 동작을 제작한 로봇이 수행하는지 여부와 잡초 등과 같은 장애물의 통과여부를 검증하기위한 두 가지를 시행하였다. 첫 번째는 원격제어기의 명령에 의한 직진, 좌·우회전, 후진, 정지, 다리의 높이조절, 속도조절이 가능한지를 검증하기 위하여, 실험실내의 평평한 바닥에서 실시하였다. 두 번째는 잡초 등의 장애물 존재하는 장소에서 보행할 때, 다리의 상승높이



JFL : Joint of front left JFR : Joint of front right
 JML : Joint of middle left JMR : Joint of middle right
 JRL : Joint of rear left JRR : Joint of rear right
 JC : Joint of center

Fig. 7 Leg manipulators of the hexapod robot.

조절만으로 그것들을 통과할 수 있는지의 여부를 검증하기 위하여 지면으로부터 키가 100 mm이하의 잡초와 작은 돌(30 mm 이하) 등으로 구성된 평평한 포장에서 실시하였다.

3) 보행시험

표 5는 보행속도에 영향을 미치는 서보모터 명령반복주기 (Δr)와 보폭의 변화에 따른 보행성능을 조사하고자 구성한 시험구이다. 표 5와 같이 총 9가지 종류의 시험구에서 로봇의 속도를 측정하고 장애물 등 노면조건에 따른 보행가능여부도 조사하였다. 로봇의 속도제어는 명령반복주기의 조절과 보폭의 조절에 의한 방법의 두 가지 방법이 있다. 명령반복주기(Δr)는 240 ms(신호조작주기(β)의 10회)를 시작으로, 288 ms(12회), 336 ms(14회)로 하였다. 명령반복주기가 너무 길 경우에는 속도가 너무 느려지게 되므로 336 ms 초과에 대해서는 시험을 실시하지 않았다. 보폭은 모터 1(Fig. 5)의 구동 각도를 조정하여 2.4 cm, 3.0 cm, 3.6 cm로 조절하였다. 보폭이 3.6 cm를 초과 할 경우에는 앞쪽 다리와 중간다리 혹은 중간다리와 뒤쪽 다리간의 간섭이 생기므로 시험을 시행할 수 없었다. 또한 2.4 cm 이하의 보폭이 너무 작을 경우, 속도가 너무 느려지는 현상이 발생하므로 시험을 수행하지 않았다. 또한 바닥면이 콘크리트로 구성되어 있고 평평한 실내에서만 보행속도를 측정할 경우, 바닥면이 흙으로 구성되어 있고 장애물 등이 있는 포장에서와 차이가 있을 것으로 판단되어 보행시험은 실내시험과 실외시험으로 수행하였다. 실내시험은 콘크리트로 된 평평한 시험실 내의 바닥에서 장애물 없이 수행하였다. 실외시험은 실내시험과 비슷한 조건에서 실시하기 위하여 표면이 단단하고 평평한 흙 바닥위에 작은 모래와 3 mm이하의 나무 찌꺼기로 구성되어있는 운동장에서 장애물 없이 시행하였다. 보행속도측정은 시계를 이용하여 측정할 경우, 측정자에 의한 오차가 발생하므로 보행시간을 30 s로 프로그래밍하여 실시하였다. 원격제어기로부터 신호가 입력되면 로봇은 지정시간동안 보행하게 되고, 보행한 거리를 측정하여 속도를 계산하였다. 보행거리의 측정은 로봇의 오른쪽 뒷다리(Fig. 9, RR)를 보행시작기준점으로 하여 보행이 완료되었을 때까지의 거리를 측정하였다. 그리고 모든 시험은 각각 5회 반복하여 실시하였다.

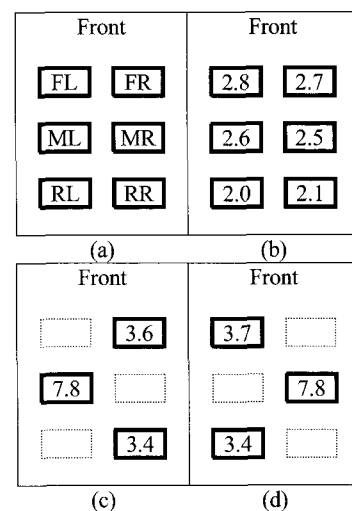
Table 5 Experimental design of walking test

Δr	Stride	2.4 cm	3.0 cm	3.6 cm
	240 ms		test 1	test 4
288 ms		test 2	test 5	test 7
336 ms		test 3	test 5	test 9

3. 결과 및 고찰

가. 각 다리의 발바닥에 부과된 최대하중

그림 9는 제작한 로봇의 정지자세인 표준자세와 삼각(三脚)보행 시에서 각 다리의 발바닥에 부과되는 최대하중을 나타낸 것이다. 표준자세에서 전방의 두개의 다리의 발바닥에 부과되는 하중이 중간·뒷다리의 그것에 비하여 큰 이유는 척추관절모터의 기계적 여유로 인하여 로봇의 두부(頭部)의 하중이 앞쪽의 두 다리에 집중되었기 때문인 것으로 판단된다. 삼각보행 시 그룹 1과 그룹 2의 세 다리에 부과되는 하중은 세 다리 중 하나의 다리가 지지하는 쪽의 다리가 두 개의 다리가 지지하는 쪽보다 기체의 쏠림현상에 의해 더 많은 하중이 가해지는 것으로 나타났다. 이들 중 최고 최대하중은 중간 다리의 발바닥으로 7.8 N이며 이 하중이 걸리는 시기는 모터 2와 모터 3은 정지상태이고 모터 1이 동작하는 때이다. 따라서 최대하중의 시점에서 모터 2와 모터 3에 걸리는 토크는 0이다. 최대 동하중은 삼각보행 시 다리 그룹 1과 그룹 2가 교체되기 바로 직전으로 중간다리에 표준자세의 하중보다 약간 큰 3 N으로 모터 2에 걸리는 최대토크는 0.155 N·m로 계산되었다. 기체쏠림현상이나 경사지 등에서 로봇의 자세를 유지하기 위해서는 중간다리의 발바닥에 걸리는 최고 최대하중 7.8 N이 동적하중으로 작용하므로 모터 2와 모터 3에 최대토크 0.4 N·m가 부과된다. 따라서 관절 모터의 토크용량은 가운데 발바닥의 최대 부과하중을 로봇 전체무게의 1/2로 하고 모터 중심과의 작용거리를 곱하고 안전율을 1.5정도로 하여 계산이 가능한 것으로 판단된다.



(a) Named legs (b) Basic posture (N) (c) Tripod posture Group 1 (N) (d) Tripod posture Group 2 (N)

Fig. 9 Weight of each legs at basic and tripod posture.

나. 원격조작시험

제작한 로봇이 수동 원격제어기에 의한 조작명령에 따라 바른 동작을 수행하는지 여부를 검증하기 위한 시험을 실시한 결과, 원격제어기의 신호에 따라 적용한 명령에 의해 직진, 좌·우회전, 후진, 정지, 다리의 높이조절, 속도조절이 정확하게 수행되었다. 하지만 로봇과 원격제어기의 거리가 약 1.5 m 이상일 경우, 로봇은 행동 제어가 정확히 이루어지지 않았다. 이는 원격제어기의 송신신호 도달거리가 짧기 때문에 보조제어기에서 명령신호의 수신감도가 낮아져 발생한 것으로 판단된다. 수동조작에 의한 원격제어기의 신호에 따른 자세변화와 걸을 때 다리의 높이를 조절하여 걸음새의 변화를 통하여 장애물이 존재하는 포장에서의 보행 가능성을 검증한 결과, 일반 평지와 포장 내에서의 보행이 가능하여 농업현장에서 6족 보행로봇의 적용은 가능할 것으로 판단되었다. 하지만 잡초의 키가 50 mm 이상이거나 잡초가 많은 곳, 15 mm 이상의 돌 등의 장애물이 있는 곳, 혹은 지면이 깊게 패인 곳 등 보행 방해 요인이 큰 경우에는 보행에 어려움이 있었다. 잡초는 잎이 부드러기 때문에 잡초의 키가 50 mm까지 보행이 가능하였으나, 잡초의 뿌리부분이 무성한 경우는 로봇의 다리 상승 시와 보행 시 다리 끝부분이 잡초에 엉켜 보행이 불가능한 경우도 발생하였다. 이러한 보행불능 상황을 제거하기 위해서는 로봇이 보행하여 통과할 수 없는 장애물 존재하거나 노면의 굴곡 정도에 따라 로봇의 크기를 달리해야 하며, 또한 센서 등의 부착을 통한 장애물의 통과와 회피의 결정을 자동적으로 할 수 있는 제어의 적용도 필요할 것으로 판단되었다.

다. 보행시험

로봇의 실내와 실외 보행시험 결과, 로봇은 1 m 직진주행

에서 주행궤적은 시점과 끝점을 이은 직선에서 약간의 벗어나는 보행을 하였다. 보폭이 3.0 cm이고 명령반복주기가 288 ms의 경우, 실내에서 로봇은 1 m 직진주행에서 주행궤적은 왼쪽으로 약 15 cm 이내에서 이탈하였고, 실외에서는 실내보다 오차범위가 적은 최대 약 10 cm 정도 이탈하여 왼쪽으로 치우쳐 보행하는 특성을 나타내었다. 그러나 5 cm 이상 이탈 시에 리모콘으로 1회 회전조작을 가하는 주행에서는 5 cm 이내의 오차를 나타내었다. 직선주행에서 항상 왼쪽으로 이탈하는 것은 로봇제작 시 기계적인 오차로 인하여 발생하는 것으로 판단되며 이를 개선하기 위해서는 현재의 알루미늄 사각 발바닥 재료를 미끄럼 없는 재료로 바꾸고 방향센서 부착을 통한 보행방향 제어 등이 필요할 것으로 판단된다. 표 6은 보폭과 명령반복주기의 조절을 통한 실내와 실외 두 곳에서 실시한 시험의 결과와 보폭과 명령반복시간을 이용하여 계산된 속도를 나타낸 것이다. 보폭이 2.4 cm의 경우 실내에서의 속도는 약 117-168 cm/min로 측정되었고, 실외에서는 128-196 cm/min인 것으로 측정되었다. 실내에서의 시험은 계산된 값과 비교했을 때, 약 분당 30 cm 정도의 오차가 나타났지만, 실외의 경우는 명령반복주기(Δt)가 짧을 경우인 240 ms의 경우에 약 분당 3 cm 정도의 오차만이 발생하였고, 다른 두 경우에서도 분당 약 14 cm 정도로 실내에 비하여 작은 오차가 나타났다. 보폭이 3.0 cm의 경우 실내에서의 속도는 약 155-221 cm/min로 측정되었고, 실외에서는 158-248 cm/min인 것으로 측정되었다. 실내에서의 시험은 보폭 2.4 cm의 경우와 비슷하게 약 분당 30 cm 정도의 오차가 나타났고, 실외의 경우는 반복시간이 240 ms의 경우 분당 약 2 cm 정도의 오차가 나타나 전체 시험 중에 가장 낮은 오차가 나타났다. 보폭이 3.6 cm의 경우 실내에서의 속도는 약 193-277 cm/min로 측정되었고, 실외에서는 174-265 cm/min인 것으로 측정되었

Table 6 Performances of walking speed for the stride and the period of command cycle

(unit: cm/min)

Stride × Δt (cm×ms)	C. speed	Indoor			Outdoor		
		E. speed		Error	E. speed		Error
		Average	S. D.		Average	S. D.	
2.4×240	200	168	1.13	32	196	6.93	4
2.4×288	167	135	1.57	32	152	0.99	15
2.4×336	143	117	0.89	25	129	2.17	14
3.0×240	250	221	2.22	29	248	2.17	2
3.0×288	208	172	2.17	36	187	3.01	22
3.0×336	179	155	0.54	23	159	3.71	20
3.6×240	300	278	1.91	22	265	3.01	35
3.6×288	250	219	1.29	31	213	2.94	37
3.6×336	214	194	1.13	20	175	0.44	39
Average	-	-	-	28	-	-	21

C. speed: Calculated speed E. speed: Experimental speed S. D.: Standard deviation

다. 이 경우는 실내의 속도가 실외에서의 속도보다 빨라서 보폭이 좁을 경우와 다른 결과가 나타났다. 이런 결과가 나타난 이유는 보폭은 한걸음의 직선진행거리인데 반하여 실제의 로봇의 보행 시에는 고관절 모터의 회전각에 의한 각 다리의 원호운동에 의하여 이동하여, 보폭과 원호운동거리의 차이가 나고 이동 중 노면과 발바닥의 미끄럼이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 보폭이 짧은 경우는 한걸음의 원호운동거리와 직선진행거리의 차이가 크지 않고 미끄럼율이 실내에 비해 낮은 실외의 보행속도가 빠른 것으로 판단된다. 하지만 보폭이 커질수록 로봇의 보폭과 원호운동거리의 차가 커지면서 미끄럼이 없는 실외포장에서 원활한 원호운동이 억제되어 관절유격과 토크가 적은 모터의 회전정지현상이 그 원인인 것으로 생각된다. 이러한 원호운동에 의한 속도저하를 저감시키기 위해서는 로봇의 한걸음 이동자세에서의 고관절 모터 1 이외에 무릎관절 모터 2와 발목관절 모터 3의 체어를 함께 하여 로봇의 발이 직선운동궤적을 가지는 보행이 필요할 것으로 판단되었다. 실제 보행로봇은 본 실험의 로봇보다 매우 크게 하여야 하므로 용도에 따라 포장상태와 대상작물 등을 미리 조사하여 로봇의 크기를 결정하여야 하며, 로봇의 무게가 증가하면 직진, 회전 등 각 보행방식에 따라 좌우측 다리의 지지력 분산과 지면의 침하 등을 면밀히 조사 분석하여 로봇의 기능을 충분히 발휘할 수 있는가에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

보행로봇은 작물이 자라고 있고 지면이 고르지 못한 포장에서 각종 정보를 수집하기 위하여 바퀴식로봇보다 이용효율이 높다. 곤충의 다리 움직임을 응용하여 개발한 로봇은 총 19 자유도를 갖는 소형 6족 보행로봇이며, 삼각보행(tripod gait) 법을 적용하여 보행성능을 평가하였다. 로봇의 보행조작은 외부의 적외선 원격제어기에 의해 수동으로 이루어지도록 마이크로프로세서를 이용한 신호 송수신 및 보행제어장치를 부착하였다. 로봇의 각 다리에 부과되는 하중을 측정하고, 삼각보행 시 하나의 다리로 지지하는 쪽으로 하중의 치우침이 있었으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 보행시 장애물과 노면의 상황에 따라 보행이 용이하도록 하기 위하여 다리의 상승높이는 두 단계로 조정할 수 있게 하였다. 실내와 포장에서 실증시험을 실시한 결과, 외부의 원격제어기의 적외선 신호에 의해 전진, 후진, 좌·우 회전, 속도조절이 가능하였고, 로봇의 크기에 비해 큰 장애물의 경우는 보행에

어려움이 있었는데, 향후 포장상태, 다리크기 및 보행특성에 따른 최대 장애물 통과에 대한 분석이 필요하였다. 또한 보폭과 명령반복주기 조정을 통한 보행속도 조절시험 결과, 실내와 실외에서의 보행속도 조절이 약 100-300 cm/min로 가능하였으나 이론적인 속도와는 4-40 cm/min 사이의 오차가 발생하였다. 이 오차는 다리의 원호운동에 의해 보행이 이루어지고 발바닥과 노면의 미끄럼 때문으로 발바닥재료의 개선과 다리의 직선운동제어에 의해 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Arema, P. and L. Fortuna. 2002. Analog cellular locomotion control of hexapod robots. *IEEE Control Systems Magazine* 22(6), pp. 21-36.
2. Birch, M. C., R. D. Quinn, G. Hahm, S. M. Phillips, B. T. Drennan, A. J. Fife, R. D. Beer, X. Yu, S. L. Garverick, S. Laksanacharoen, A. J. Pollack and R. E. Ritzmann. 2002. Cricket-based robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 9(4), pp. 20-30.
3. Dohi, M., T. Fuziura, N. Ishizuka and K. Nonami. 2000. Gait control by genetic algorithm for agricultural hexapod walking robot. *Bio-robotics II*, pp. 91-95.
4. Dohi, M., T. Fujiura and A. Yano. 2002. Hexapod walking robot for agricultural field. *Automation Technology for Off-Road Equipment*, pp. 196-203.
5. Guddat, M. and M. Frik. 2000. Control of walking machines with artificial reflexes. *Advanced Motion of Animals and Machines, 2nd International Symposium on Impact and Friction of Solids, Structures and Intelligent Machines*.
6. Haynes, G. C. and A. A. Rizzi. 2006. Gaits and gait transitions for legged robots. *Proceeding of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1117-1122.
7. Inagaki, S., H. Yuasa, T. Suzuki and T. Arai. 2006. Wave CPG model for autonomous decentralized multi-legged robot. *Robotics and Autonomous systems*, 54, pp. 118-126.
8. Klaassen, B., R. Linnemann, D. Spenneberg and F. Kirchner. 2002. Biomimetic walking robot SCORPION. *Robotics and Autonomous Systems* 41, pp. 69-76.
9. Quinn, R. D. and R. E. Ritzmann. 1998. Construction of a hexapod robot with cockroach kinematics benefits both robotics and biology. *Connection Science* 10 (3&4), pp. 239-254.
10. Still, S., K. Hepp and R. J. Douglas. 2006. Neuromorphic walking gait control. *IEEE Transaction on Neural Networks* 17(2), pp. 496-508.
11. 竹田 敏. 2003. 昆虫機能の秘密. 工業調査.