



다각 보행 로봇의 서보 제어계 설계

朴 贊 雄*, 李 然 定**

*한국기계연구소 자동제어실장

**한국기계연구소 자동제어실 연구원

I. 서론

오래전부터 자동차와 같은 운송 기구에 대한 연구·발전이 거듭되어왔다. 이러한 바퀴달린 운송 기구(Wheeled Vehicle)는 평지에서는 매우 효율적이나, 습지 사막 및 장애물 지역에는 불합리하다. 이를 극복하기위해 최근 20년전부터 곤충, 동물이나 사람의 다리 구조를 본딴 多脚歩行 로봇에 관한 연구가 계속되어 왔다. 따라서, 다각 보행 로봇의 궁극적인 목표는 부정지면(irregular terrain)에서의 원활한 보행이라고 할 수 있다. 이러한 보행을 위해서는 하나의 다리가 3차원 공간상을 움직일 수 있어야하며, 이를 위해 한 다리당 최소한 3 자유도 이상을 가져야한다. 예를들면, Ohio 주립대 6각 보행 로봇(OSU Hexapod)¹⁾의 경우는 18개의 관절을 가지며, 일본 동경공업대 4각 보행 로봇(TITANⅢ)²⁾는 12개의 관절을 가지는 등 다자유도를 가지고 있다. 그러나, 다 자유도를 갖는 각 다리간의 협동제어(Cooperative Control)를 이루는 것은 매우 어려운 문제이다. 그래서, 보행 기계의 자유도를 감소시켜, 걸음새(foot pattern)에 제한을 두는 대신, 제어 시스템을 간소화하는 방향

의 연구도 진행되고 있다. 예를들면, 일본기계 연구소 6각 보행 로봇(MEL WALK MARK-Ⅲ)⁴⁾의 경우는 8개의 자유도만을 가지며, 이는 OSU Hexapod와 비교해 볼 때 매우 간소화된 것임을 알 수 있다. 이를 위해서는 기구적인 연결 구조의 설계가 또한 어려운 문제이다.

여기서는 총 12 자유도의 4각 보행 로봇의 서보 제어기 설계에 관해 논하고자 한다.

제2장에서는 서보 제어계가 갖추어야 할 필요 요건에 대해서 기술하고, 제3장에서는 적합한 구동부의 선정에 관해 기술하고, 제4장에서는 서보 제어계의 주 제어기(main controller)에 관해 기술한 후 결론을 맺도록 한다.

II. 서보 제어계의 필요 요건

다각 보행 로봇의 운동은 크게 지면적응 운동(terrain-adaptive motion)과 동체 추진 운동(body-propelling motion)으로 나뉜다. 지면 적응시에는 유각(swing leg)을 안정된 위치에 큰 충격없이 착지시키고, 추진 운동시에는 동체의 흔들림 없이 지지각(Support leg)들을 동시에 신속하게 움직이도

록하는 것이 서보 제어계가 수행해야 할 일들이다.
이를 위한 서보 제어계가 갖추어야 할 필요 요건을 요약하면,

- 가. 가변 부하 조작(Variable Load Handling)
- 나. 소형·경량화
- 다. 에너지 고효율화
- 라. 유연한 적응 동작
- 마. 고속화

등이다.

이에 대해서 상세히 기술하고자 한다.

(가)~(다)는 기구부와 관련되어 구동부의 기능에 관한 항목이고, (라)~(마)는 제어기의 기능에 관한 것이다.

한 다리의 상하 운동용 구동원(Actuator)에는 상황에 따라 두가지 종류의 부하가 작용한다. 첫째, 유각상(transfer phase)에서 부하는, 관성력을 무시한다면, 한 다리의 중량과 같고, 둘째, 지지상(Support phase)에서 부하는 동체의 중량에 관계한다. [참조 그림 1]

특히, 경사지를 올라갈때나, 부정지면 보행시는 최악의 경우 동체 전체 중량을 지지할 경우도 예상할 수 있다. 일반적으로 한 다리의 중량은 동체의 그것에 비해 매우 작으므로 구동원의 선정은 지지상에서 요구되는 토크와 속도 사양에 기준한다. 그러나, 이러한 토크와 속도는 유각상에서보다 각각 크고, 느리게 되므로, 비효율적이다. 이는 자동차를 평지나 경사지에서 공히 낮은 기어단으로 운전하는 것과 같다. 또한, 일반적으로 토크 출력이 큰 구동원일수록 중량도 크다. 로봇트 매니플레이터

와 같이 모터의 중량이 크게 문제가 되지않는 경우와는 달리 보행 로봇트는 구동원을 직접 지지하며 이동해야 하므로 소형·경량의 구동원 선정은 필수적이다.

위의 두가지 필요 요건은 서로 상반되므로 이를 해결하기 위해서는, 가벼운 동체의 설계, 출력 토크 대 중량비가 큰 구동원의 선정, 또는 전기식 변속기의 부착⁶⁾ 등의 방안을 고려할 수 있다. 그러나, 실제 보행 로봇트의 제작시에는 현재 이용 가능한 기술을 사용해야 한다. 즉, 소형·경량의 전기식 변속기의 부착은 현재 매우 어려운 문제이고, 가벼운 동체의 설계는 물론 위와같은 구동원의 선정에도 한계가 있다. 따라서, 구동원의 수를 줄이거나, 다리의 수가 적은 (2각, 1각) 보행 로봇트에 관한 연구⁷⁾로 근본적인 동체의 무게인 구동원의 무게 자체를 줄이려는 방안도 있다.

다음에 에너지 고효율화는 기구 설계와 구동원의 선정에 있어 공통적인 문제이다. 에너지의 효율을 나타내는 척도로는

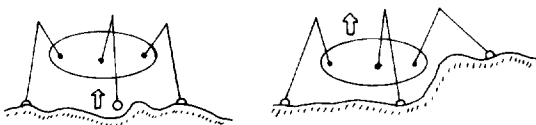
$$\epsilon = \frac{E}{WL}$$

- 단, E : 보행중 소모 에너지
- W : 보행 로봇트의 중량
- L : 보행 거리

로 나타내며, 이는 W, E의 정의에 따라 [표 1]과 같이 분류된다. 즉, 보행중 소모된 전체 에너지(total)와 보행을 위해서 소모된 에너지(net)로 나뉘고, 보행 로봇트 전체 무게(total)와 보행 로봇트가 이동시킨 부하(Payload)(net)로 나눌수 있다. 따라서, 에너지 효율을 높이기 위해서는 불필요한 에너지의 소모를 줄여야한다. 이러한 이유에서 [그림 2]의 GDA (Gravitationally Decoupled Actuator) 시

표 1. 에너지효율 계수(ε)의 분류

Energy \ Weight	Total	Net
Total	ε _{type 1}	ε _{type 2}
Net	ε _{type 3}	ε _{type 4} (ε*)



(가) Transfer phase (나) Support phase

그림 1. 구동원에 상이한 두 가지 부하가 걸리는 경우

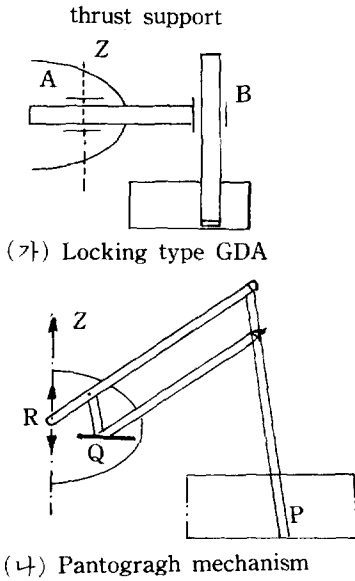


그림 2. GAD 시스템

시스템¹⁾과 같은 기구 설계가 제안되기도 한다. GAD 시스템을 간단히 설명하면, [그림 2]의 Z축 운동이 X, Y축에 무관하게하여 Z축 운동시 X, Y축 구동원에서 소모되는 에너지를 없애도록한 구조이다.

이 GAD 시스템은 에너지의 고효율뿐만 아니라, X, X, Z축 운동이 상호 무관하므로 제어시, 3차원 공간상의 점(X, Y, Z)_{desired}에 한 다리를 위치하도록 하기위한 제어 알고리즘 상의 계산을 단순화할 수 있어 (배)항의 고속화에도 밀접한 관계를 가진다.

또, 유연한 적응 동작이라함은 유각의 착지시 부정지면으로부터의 보행 로봇에 대한 충격을 작게 하고, 동체의 중심에 큰 흔들림이 없도록 하는 것이라고 요약할 수 있다. 이는 다각 보행 로봇의 서보 제어계 설계시 해결해야할 어려운 문제 중 하나이다. 로봇 매니플레이터에서는 시점에서부터 주어진 경로를 따라 주어진 종점까지 신속정확히 움직이도록 제어하는 것을 서보 제어계의 목표로 삼

고 있다. 이때 주어진 경로 내에 장애물이 있는 경우는 미리 장애물 회피 경로를 계산해 놓은 뒤 움직이거나, 비전(Vision)시스템의 경로에 대한 영상 처리(Image Processing)에 의한 정보를 이용해서 장애물을 피하도록 한다. 다각 보행 로봇에서 주어진 문제인 부정지면은, 로봇 매니플레이터의 경우 종점이 주어지지 않은 경우, 혹은 미지의 장애물이 경로 상에 있는 경우와 같다. 따라서, 이 문제를 해결하기 위해서는 3차원 비전을 이용한 정확한 유각의 착지 좌표 정보를 구하거나 비접촉식 센서(예: 초음파 센서)를 이용하여, 다리의 각 관절 구동원의 유연한 가감속을 수행해야 한다. 완전한 평지의 경우는 착지 높이가 일정한 경우이므로 비교적 쉬운 문제이나, 이것도 평지가 변형이 없어야 한다는 가정이 있어야 한다. 즉, 습지나 사지(沙地)의 경우는 착지시 지형이 변화하고, 한 다리는 유각과 지지각의 기능을 번갈아 수행하므로, 동체를 지지할수 있는 충분한 힘을 지면으로부터 받는지 여부를 확인하기 위해서는 힘 센서(Force sensor/pressure sensor)가 다리 끝에 부착되어야 한다.⁵⁾ [참조 그림 3] 실제, 최근까지 개발된 다각 보행 로봇 중 3차원 비전을 사용한 적응 제어는 없다. 이는 3차원 비전의 영상 처리 시간이 매우 길어 보행 로봇의 보행 속도가 현저히 저하되고, 3차원 비전의 영상 처리 자체가 또 하나의 풀어야할 문제이기 때문이다. 기 연구된 외국의 보행 기계의 경우는 기구적으로 순응성(Compliance)를 주거나, 접촉식 센서(tactile sensor / touch sensor)를 써서 유각의 착지시 동체의 약간의 흔들림은 감수하고 있는 실정이며 이를 개선하기 위한

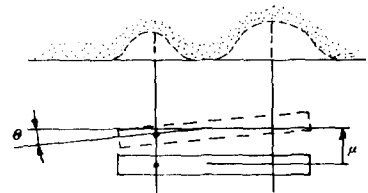


그림 3. Body attitude and altitude change on soft ground

연구는 계속되고 있다.

마지막으로 고속화에 대해 기술하고자 한다.

보행 로봇의 정적 보행(static walk)인 경우, 다리의 수직 운동(Z축운동) 시간을 무시한다면, 한 다리의 평균 이동 속도를 V 라하고, K 를 보행 로봇의 다리 갯수라 하면, 동체의 이동 속도 v 는

$$K=4 \text{ 일때 } v=V/3$$

$$K=5 \text{ 일때 } v=2V/3$$

$$K=6 \text{ 일때 } v=V$$

이다.²⁾ 즉, 6각의 경우 3각 교환 보행시 동시에 3 다리가 지지각과 유각을 반복 수행하므로 동체 중심의 이동속도는 V 와 같고[참조, 그림 4], 4각의 경우 중심의 한 스텝이동을 위해서는 3다리의 동작이 소요되므로 쉽게 $V/3$ 임을 알수 있다[참조, 그

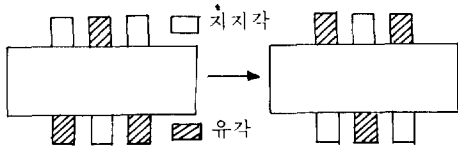


그림 4. 6각 보행 로봇의 3각 교환 보행 예

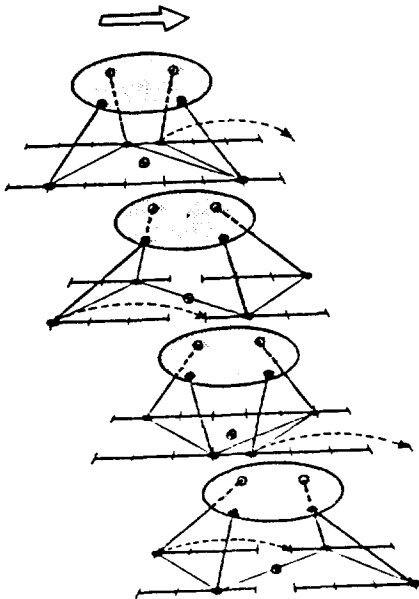


그림 5. The Pattern of Crawl Gait. Fundamental Sequence of Operation.

림 5).

따라서, 4각, 5각 보행 로봇가 속도 V 로 이동하려면 동적 보행(dynamic walking)을 고려해야 한다. 역으로, 동체를 v 로 움직이도록 하기위한 각 다리의 속도는 4각일 경우 3배 이상 커야 한다. 고속화를 위해서는 보행 로봇 전체 구성을 효율적으로 하여야 한다. 예를 들면, 실제 동체 추진시의 협동 제어를 위해서는 각 다리가 지면을 통해 연결되어 있으므로, 몇 개의 Closed Kinematic chain을 풀어 서보 제어를 해야 한다. 이의 효율적인 구성을 위해 계층적 구조를 가지는 다중 프로세서 (Hierarchical multiprocessor structure)의 서보 제어기의 구성은 필수적이다. 그밖에 제어 알고리즘의 간소화를 통해 고속화를 추진해 나가는 것이 정적 보행인 경우 바람직하다.

이상의 내용을 정리하면, (가)~(마)항의 다각 보행 로봇 서보 제어계가 갖추어야 할 필요 요건을 만족하기 위한, 현재 가용한 수단을 빌어, 최선의 구동원의 선정, 최적의 기구 설계, 다양한 센서의 응용, 그리고, 다중 프로세서 구조등을 제어계 설계시 고려해야 할 것이다.

다음에는 현재 가용하면서, 보행 로봇에 적합한 구동원의 선정에 관해 기술하고자 한다.

III. 구동원의 선정

구동원의 종류를 크게 [그림 6]과 같이 분류할 수 있는 것은 주지의 사실이다.

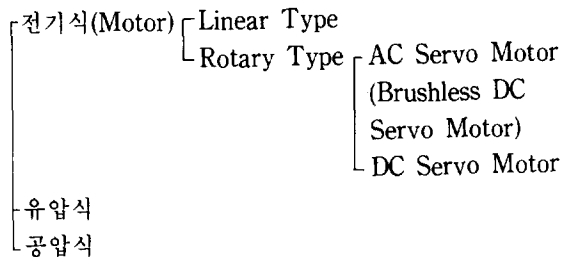


그림 6. Actuator Type

유압식은 저속으로 큰 힘을 내는 것이 특징이나 누설, 유질의 변화, 배관계의 막힘 등이 있기 때문에 보수가 복잡하고, 펌프 모터와같은 2차적인 구동원이 필요한 단점이 있다.

공압식은 유압식보다는 큰 힘을 내지는 못하나 취급이 간편하고 소형, 고속의 것을 만들기 쉽다. 그러나, 위치 서보로서의 안정성의 결함, 단순한 stopper에 의한 위치 결정 방식이라는 단점이 있다.

전기식은 유압식이나 공기압식과 같이 압력을 발생시키는 기구와 배관을 필요로 하지 않는 잇점이 있고 더우기 위치 제어 정도가 높고, 사용하기 쉽고 보수성도 우수하다. 전기식에는 리니어형과 회전형의 두가지가 있다. 리니어형을 전술한 GDA 시스템에 적용하면, 회전형을 사용하고 기구적인 선행 가이드를 사용하는 경우보다, 기구적인 마찰 손실을 없앨수있고, 계산도 간단한 비례식이 되므로 효율적이다. 그러나, 리니어형은 소용량의 것이 상품화되어 있는 정도이며, 그 사용예도 X-Y Plotter, Printer 등에 국한되어 있는 상태이다. 따라서, 현재 보행 로봇에 리니어형 구동원을 사용하기는 어렵다.

주지하는 바와같이, 위와같은 이유에서 로봇트 매니플레이터 및 수치 제어 공작 기계(NC Machine)의 구동장치 대부분은 회전형 구동원을 사용하여 속도제어 및 위치제어를 행하여 왔다. 회전형에는

직류전동기(DC motor), 유도전동기(Induction motor) 동기 전동기(Synchronous motor)가 있으나, 최근까지는 주로 직류 전동기를 사용하였다. 이와 같이 직류 전동기를 사용하는 주된 이유는 속도제어가 용이하고, 전류와 토크가 비례하는 장점이 있기 때문이다. 그러나, 직류 전동기의 경우는 직류를 회전자에 공급하여 주기 위해서 기계적인 정류자(Commutator)와 브러쉬(Brush)가 필요하며, 이에 따른 보수 유지가 매우 번거로운 문제였었다. 이를 해결하기 위해, 동기 전동기를 서보모타로서의 조건을 만족하게 만드는 것이 요구되었다. 결국 동기 전동기를 제어 방식에따라 직류 전동기와 동일한 제어 특성을 갖게하는 것이 가능하게 되었으며, 이를 Brushless DC - servo motor 혹은 AC servo motor 라고 부른다. 교류서보전동기(AC servo motor)와 직류서보전동기(DC servo motor)의 특성을 비교요약하면 [표 2]와 같다.

교류서보전동기는 [표 2]의 여러 특징을 살려 점차 직류서보전동기를 대체하고 있는 추세이다. 그러나, 구동부(Driver)가 복잡한 것이 어려운 점이다.

교류서보전동기에서는 회전자에 발생하는 전체 토크를 전기자 전류에만 비례하게 하기 위해서는 현재 회전자의 위상에따른 3상 전류의 크기를 결정해야 한다.

교류서보전동기의 속도제어기 구성에는 (그림 7)

표 2. DC Servo Motor AC Servo Motor의 특성 비교

	DC Motor	Brushless DC Motor
기계구조	계자자석은 Stator 측	계자용 자석은 Rotor 측 AC동기 Motor와 유사하다.
장 점	응답성이 우수하다. 제어성이 양호하다.	가속특성이 양호하다. 효율이 좋다. 냉각이 용이하다. 순간 Torque/정격 Torque비가 크다. 수명이 길고 보수가 간단하다.
정류방법	Brush와 정류자의 기계적 접촉	Transistor 등의 전자 Switching
Rotor의 위치검출	Brush가 자동적으로 수행한다.	광학 Encoder, Resolver 등을 사용한다.
역회전의 방법	단자전압의 역전에 의한다.	Transistor의 Switching 상태의 변환

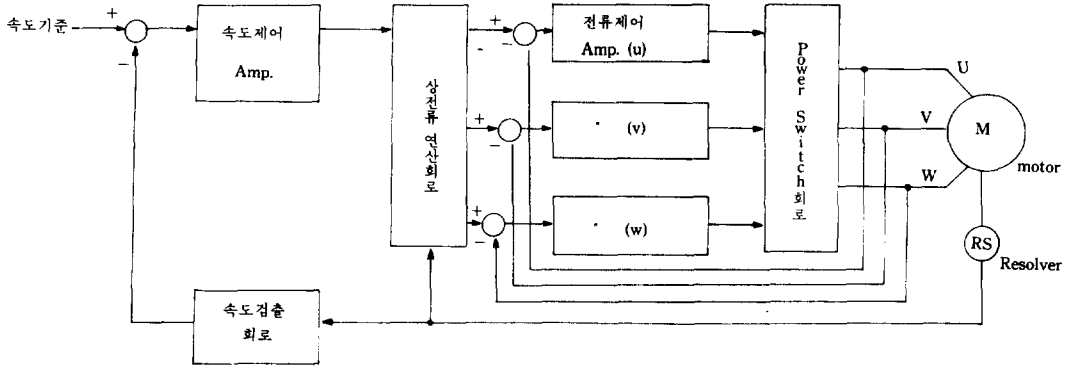


그림 7. AC servo motor-velocity controller Block diagram

의 블록선도와 같다.⁹⁾

그러나, 이러한 속도제어기의 구성은 현재 반도체 기술의 발달로 비교적 손쉽게 구성 가능하며, 다양한 용량의 교류서보전동기에 대한 속도제어기가 상품화 되어있다. 또한, 구동원 특성의 비교값으로 $power\ rate$ 나 $power\ density$ 를 사용한다. 각각은,

$$* power\ rate(W/Sec) = \frac{(\text{모터의 정격토크})^2}{\text{모터 Inertia}}$$

$$* power\ density(W/kg) = \frac{\text{정격 출력}}{\text{모터 중량}}$$

로 나타내어진다. $power\ rate$ 는 단위 시간당 모터 출력 크기이므로 순간적인 가속 능력을 나타낸다.

표 3. 기존 보행로봇의 예

형 명	Type	Actuator 종류	갯 수	Weight	비 고
TITAN III	4 legs	AC motor	12	80 kg	GDA, 20W(Y) 30W (X, Z)
MELWALK III	6 legs	DC motor	8	35 kg	GDA, 30W, 50W
OSU Hexapod	6 legs	DC motor	18	140 kg	Joint
OSU ASU	6 legs	Hydraulic motor	18	3ton	Joint
Sumitomo Electric Ltd.	4 legso	DC motor	12	60 kg	Joint SCARA Type leg
NCTU Quadruped-1	4 legs	DC motor	12	50 kg	Joint

또, $power\ density$ 는 제2장에서 언급한 바와 같이 보행 로봇의 구동원 선정시 기본이 되는 척도이다. 일반적으로 교류서보전동기가 직류서보전동기에 비해 이 두 값이 크다.

따라서, 나열된 여러 관점에서 볼때, 보행 로봇용 구동원으로는 교류서보전동기가 적합하다고 할 수 있다.

구동원의 종류에 관한 선정은 전술한 바와 같으나, 그 구동원의 정확한 사양을 결정하기 위해서는 다음과 같은 사항에 관한 Data가 필요하다.

가. 부하에 관한 것

○ 취급 물체의 중량 및 질량분포

○ 각 부분의 해당구동 관절에 관한 적정 토크.

특집/ 보행로봇(Walking Robot)

- 각 부분의 해당구동 관절에 관한 적정 Inertia
- 나. 모터에 관한 것
- 토크-속도 특성 곡선
- 과부하-Duty 특성 곡선
- 다. 감속기에 관한 것
- 감속비, Inertia
- 라. 마찰 토크에 관한 것
- 감속기의 마찰 토크
- 모터 및 브레이크의 마찰 토크
- 마. 각 관절의 요구속도, 가속도, 가속시간
- (가)~(마)항의 data에서, 요구토크, 속도 및 순간 토크 등이 계산되면, 모터의 정격 출력과 회전 속도에 따른 선정은,

$$\begin{aligned} \text{모터정격출력}(w) &= \text{토크}(N \cdot m) \times \text{회전속도}(\text{rad/Sec}) \\ &= \frac{\text{토크}(\text{kgf} \cdot m) \times \text{회전속도}(\text{rpm})}{0.974} \end{aligned}$$

식에 의해 할 수 있다. 단, N:1의 감속기를 사용할 경우,

토크 = 요구토크/N
회전속도 = 요구속도 × N
으로 계산한다. 물론, 실제 모터의 선정은 위에서 계산된 정격 출력 값보다 큰 것을 택해야 한다. 여기서, 기존 보행 로봇의 경우를 살펴보면 [표 3]과 같다.

사람을 실을 수 있는 구조를 하고 있는 OSU ASU는 전체 크기가 3ton에 달하므로, 고토크 출력의 유압식 모터를 사용했다. 이를 제외하고는 대부분 직류서보전동기를 사용했으며, 최근에 개발된 일본 동경 공업대의 TITAN III는 교류서보전동기를 사용했다. 일본 기계연구소의 MELWALK III는 기구적인 link에 의해 구동원 수를 줄이므로써, 제어의 간소화를 꾀하여, 같은 다리 수의 OSU Hexapod와 비교하면 10개의 구동원을 감소시킨 것을 주목할만하다.

IV. 서보 제어계의 설계

다각 보행 로봇의 제어 시스템 전체 구성은(그

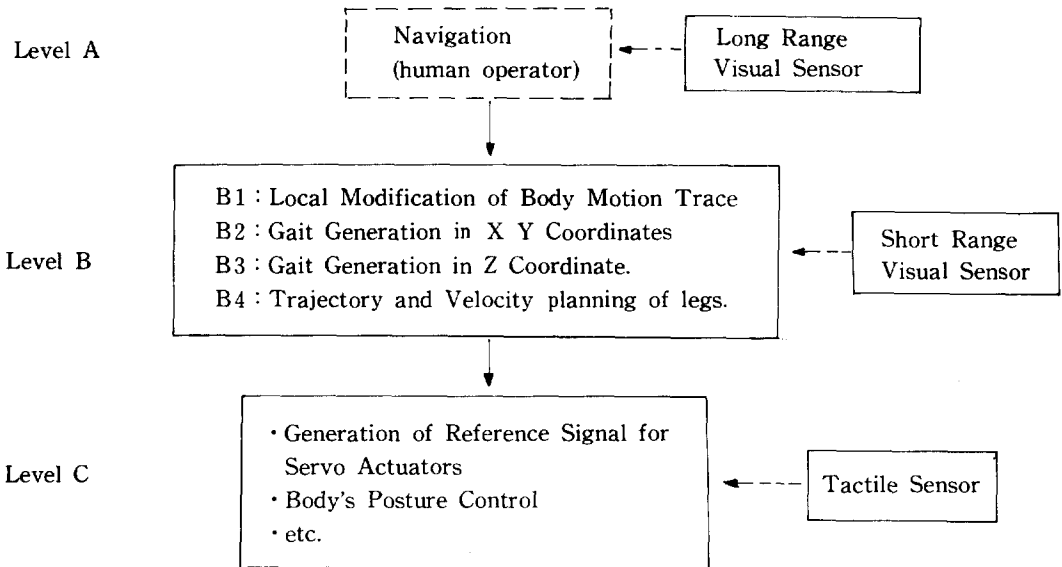


그림 8. 다각 보행로봇의 제어시스템 전체구성

림 8]에서와 같이 3단계로 나눌 수 있다.

레벨 A는 원거리에 대한 보행 계획을 수립하는 단계로, 조작자로부터의 명령이나, Intelligent Controller에 의해 계획이 수립된다. 이 단계는 출발점에서 도착지점까지의 대략적인 경로에 해당하는 지도(Map)와 같은 정보를 해석하여 이를 세분화한후 레벨 B에 넘겨준다.

레벨 B,에서는 비교적 근거리의 경로와 비전으로부터의 정보를 이용해 정확한 경로를 결정한다. 즉, 경로상에 돌출된 장애물 및 Hole이 있는 경우 이를 회피하는 최적의 경로 결정을 해야한다.

레벨 B₂, B₃에서는 정해진 경로를 보행하기 위한 3차원 공간상에서의 자세를 결정한다. 자세의 결정은 각 다리의 이동 순서는 물론 각 다리의 착지 좌표 및 보행 방향에 대한 결정을 의미한다. 특히, 다리의 이동 순서는 보행 속도 및 보행 각도(방향)에 따라, dead lock 상태가 생기지 않도록 결정해야 한다. dead lock이라함은 유각(swing leg)으로 선정된 다리를 지면에서 이격시키면 보행로봇이 쓰러지도록 지지각의 위치가 결정된 자세를 말하며 선정된 유각은 이동이 불가능하며, 따라서 지지각들을 이동하여 새로운 자세를 잡은 후 선정된 유각을 움직여야 하는 상태를 말한다.

레벨 B₄에서는 각 다리의 이동 속도와 경로를 결정하여 레벨C에 이에 관한 정보를 전달한다.

레벨 C는 서보 제어기에 해당하는 단계로 "Basic Motion Regulation"단계라고도 하며 센서를 이용하여 다음과 같은 사항을 수행한다. 요약하면,

- 가. Body Height Regulation.
 - 나. Postural Regulation.
 - 다. Weight Distribution (4 - leg standing phase)
 - 라. Propelling motion (3 - leg support phase)
 - 마. Terrain adaptive motion (3 - leg support phase)
 - 바. Obstacle Avoidance.
 - 사. Velocity Regulation.
- 등의 사항이다.

표 4. Attitude sensor characteristics

Pendulums	Small size and weight Low cost Immediate operation Sensitive to lateral acceleration Limited bandwidth High reliability
Gyroscopes	Larger size and weight High cost Requires time to "spin up" and erect Insensitive to lateral acceleration Infinite bandwidth Limited lifetime

Body Height regulation의 목적은 불규칙한 지면 보행시 동체가 일정한 높이를 유지하도록 하는 것이다. 이상적인 경우는 비전의 영상 처리에 의한 지형 정보로부터 동체 높이를 조절하는 것이나, 비전 센서의 도움없이 각 다리의 높이 정보를 이용해 동체의 높이를 유도하여, 다리의 각 관절을 적절히 구동하므로써 동체의 높이를 일정하게 유지할 수도 있다. 그러나, regulation을 위한 기준 높이에 대한 정보는 레벨 B에서부터 명령받아야 한다.

Postural regulation은 중력 방향에 대해 동체면을 수직이 되도록 하는 것이다. 즉, 진자(pendulum)형태의 센서나, Gyroscope와 같은 자세(posture) 센서를 이용하여 동체의 기울어진 정도를 측정하여 기울어짐이 없도록 제어하는 것이다. 이 두 자세 센서의 특성을 비교하면 (표 4)와 같다.

Weight Distribution은 네 다리가 모두 지면에 접촉하고 있는 경우, 동체의 전중량을 고르게 분포시켜 각 다리의 구동원에 무리한 힘이 가해지지 않도록 하는 것이다. 그리고, 바람과 같은 외란에 의해 다리가 지면에서 이격되었을때, 계속적인 Weight Distribution 관점에서의 제어보다는 전술한, 동체의 자세나 동체 높이에 대한 제어에 의해 다시 안정된 자세를 잡도록 하는 것이 보통이다. 즉, 동체 중량

표 5. Load cell characteristics

Strain Guage	Low output Shear loadings not tolerated Poor dynamic range Large size Usable for static applications
Semiconductor	High output Shear loadings not tolerated Fair dynamic range Small size Usable for static applications
Piezoelectric	Selectable output Small shear loadings tolerated Excellent dynamic range Small size Not for static applications

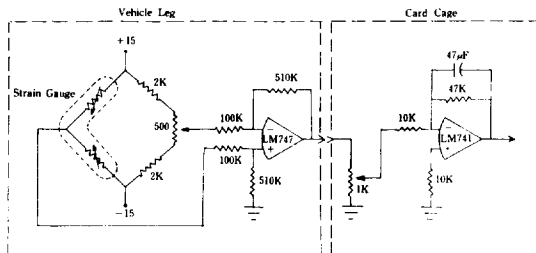
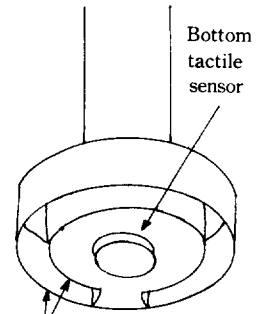


그림 9. Strain Gauge Amplification Circuitry.

의 균등한 분배를 위한 제어는 이상의 두 제어에의 해 간단히 수행될 수도 있다.

세다리 지지각 상태에서의 Propelling/terrain Adaptive motion은 보행 로봇에서 가장 중요한 동작이다. 네다리중 임의의 한다리가 유각으로 선택되면, 유각의 동작과 동기된 지지각의 추진이 필요하다. 또한, 지지각의 추진 방향은 유각의 착지 위치와 정적 안정도에 밀접한 관계를 가지며, 한 지지각의 움직임은 다른 두 지지각과 지면과 동체를 통해 상호 연결되어 있으므로 이들간, 즉 9개의 구동원의 움직임을 적절히 동기시켜야 보다 유연한 동체의 추진 경로를 얻을 수 있을 것이다. 그리고,



A pair of metal plates for side tactile sensor (가)

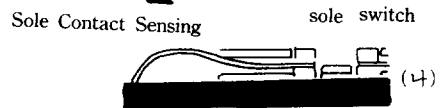
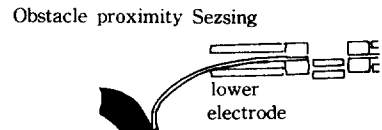
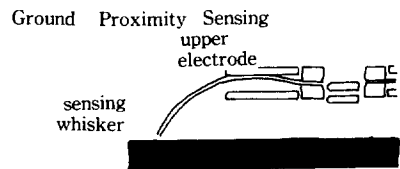


그림 10. (가) Example of tactile sensor

(나) Sensing whisker (shape memory alloy)

추진 제어는 유각의 지면 적응 제어와 역시 동기되어 수행되어야하므로 유연한 보행 제어는 계속 연구되어야할 큰 과제이다. 이를위한 서보 제어기의 기본적인 하드웨어의 구조는 각 다리(3축) 당 하나의 프로세서(processor)를 두고, high-level 제어기와 통신 및 서보 제어기의 전체적인 계획 수립(Scheduling)과 상황 판단을 위한 프로세서를 두어, 5-프로세서의 다중 프로세서(multiprocessor)구조를 가지면서 계층적 구조(Hierarchical Structure)를 취하는 것이 필수적이라고 본다.

또한 제2장에서 전술한바와 같이 부정지면에서의

힘 센서(force sensor)의 부착은 지면 적응 동작에 유연성을 추가하는데 매우 중요한 요소이다. 참고로 힘 센서 소자간의 특성 비교는 [표 5]와 같으며,

특히 strain gage에 대한 Transducer 회로 예는 [그림 9]와 같다.

Obstacle Avoidance는 이상적인 경우 비전 센서

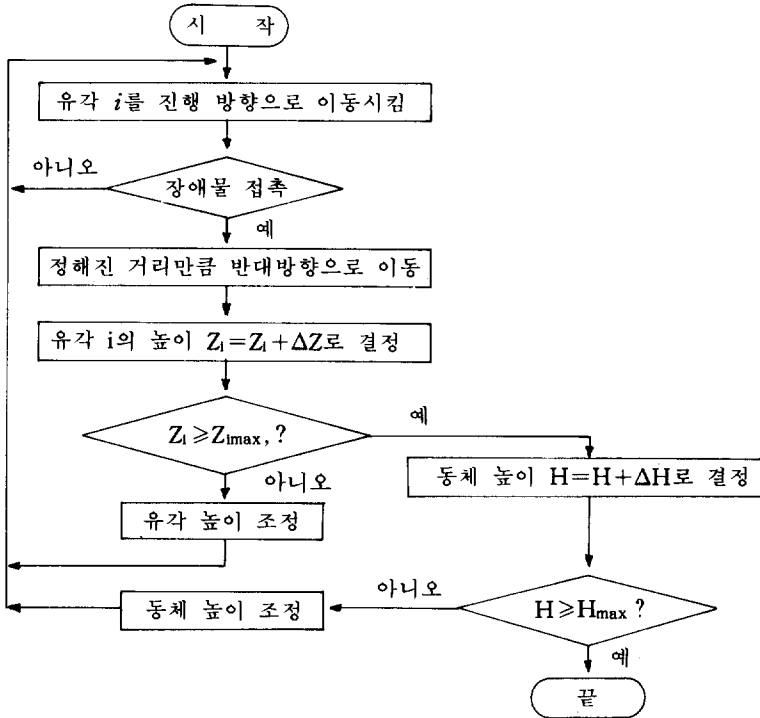


그림 11. Obstacle Avoidance Algorithm-flowchart

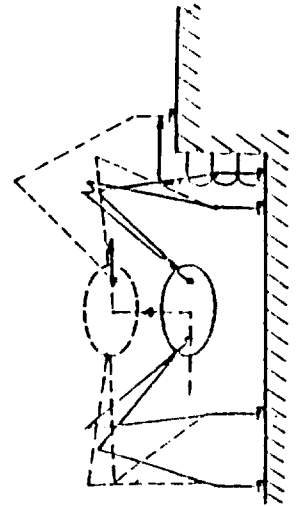
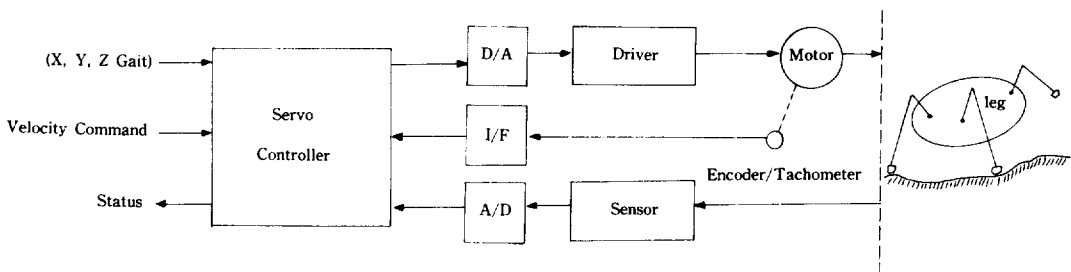


그림 12. 장애물 회피시 유각의 이동 경로 예



- Body Height Regulation
- Postural Regulation (Inclination)
- 4 leg-Standing Phase (Weight Distribution)
- 3 leg-Supporting Phase
- Obstacle Avoidance
- Velocity Regulation

그림 13. 서보 제어기의 전체 구성도

를 이용한 방법도 있을 수 있으나, 접촉 센서 (tactile sensor)를 이용한 서보 제어에 의해 수행할 수도 있다.

접촉 센서의 예는 [그림 10]과 같으며, 일본 동경공업대(Hirose) TITAN III에는 특히, 형상기억합금을 사용한 Sensing whisker를 사용한 예도 있다. 접촉 센서를 사용한 장애물 회피 순서는 [그림 11]의 순서도와 같으며, 계단을 오르는 경우의 예는 [그림 12]와 같다.

Velocity regulation은 가장 낮은 레벨의 문제이며, 레벨 B₄에서 주어진 기준 속도에 맞추어 유각 및 지지각의 평균 이동 속도를 조절하며, 이에 따른 각 구동원의 서보 드라이버(driver)를 제어하는 것이다.

이러한, (가)~(사)의 제어를 행하기 위한, 다중 프로세서를 내재적으로 갖춘 서보 제어기의 전체 구성은 [그림 13]과 같이 할 수 있다.

V. 결 론

다각 보행 로봇은, 정도높은 기구 설계, 협동제어(Cooperative Control), 센서 응용, 그리고 인공 지능등 고도 기술의 복합응용 시스템이다. 이중 센서 및 서보 제어기에 국한시켜, 서보 제어기가 수행해야할 일들에 대해 기술하였다.

실제 풀어야할 문제들에 비하면, 간략한 정리에

지나지 않으나, 앞으로 이 분야에 대한 많은 관심과 활발한 연구가 행하여져서 이들이 하나하나 해결되나가길 바라는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) S. Hirose, "A Study of design and control of a quadruped walking vehicle", Int. J. of Robotics research, Vol. 3, NO. 2, pp. 113-133, 1984.
- 2) S. Hirose, et al, "TITAN III : A Quadruped walking vehicle" Proc. 2nd ISRR Symp. pp. 247-253, 1984.
- 3) Dennis Ray Pugh, An autopilot for a terrain-adaptive hexapod vehicle, M. S. thesis, ohio state University columbus, 1982.
- 4) M. Kaneko, et al., "A hexapod walking machine with decoupled freedoms", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-1, NO.4, pp. 183-190, Dec. 1985.
- 5) M. Kaneko, "노면의 변형을 고려한 다족보행기계의 제어방법", 일본 Robot 학회지 4권3호, pp. 25-34, 6월, 1986(일어).
- 6) M. Keneko, "보행기계의 Hybrid Actuator", 일본 Robot 학회지 2권 4호, pp. 69-70, 8월, 1984(일어).
- 7) Tsu-Tian Lee, and Ching-Long shih, "Real time computer control of a quadruped walking Robot", Trans. of ASME, Vol. 108, pp. 346-353, Dec., 1986.
- 8) M. H.Rceihert and I. E. Sutherland, "Machine that walk", Scientific American Vol. 13, No. 1, pp.32-41, 1983.
- 9) 서보기술실용 Manual, トリケツプス(일어), 1983.