

다각 보행 로봇을 위한 서보제어기

이연정, 여인택, 박찬용
한국기계연구소 자동제어실

A servo controller for the multi-legged walking robot

Y. J. LEE, I. T. YEA, and C. W. BAHK

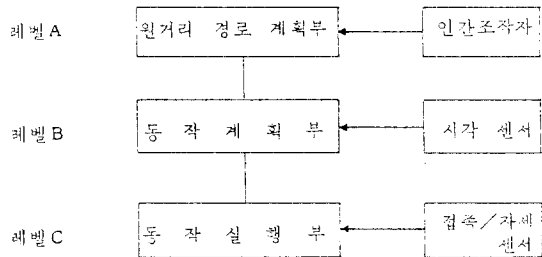
Automatic Control Lab. Korea Institute of Machinery and Metals

ABSTRACT

A sampled data controller for the quadruped walking robot is presented. To provide systematic design procedure, the relation between PI gain of velocity controller and sampling rate is analyzed with the ISE performance index and the time responses. The position controller for one-leg, 3-axis, was developed under consideration of compactness and expandability. And several experiments were performed.

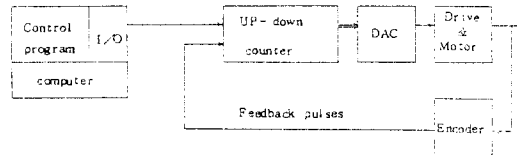
1. 서론

다각보행로봇은 기구설계, 컴퓨터 응용, 서보제어 및 3차원 Vision을 포함한 센서응용기술 등과 같은 고도의 기술이 복합된 구성을 갖는다. 이 중 서보제어기는 제어부의 기본으로서 [그림.1]의 레벨 C에 해당한다. 비평탄 지형을 이동하기 위한 보행로봇의 운동은 지면 적응 운동(Terrain Adaptive Motion) 과 동체 추진 운동(Body Propelling Motion)으로 나뉜다. 지면 적응시에는 이동다리(swing leg)를 안정된 위치에 유연하게 착지시키고, 추진운동시에는 지지다리(support leg)를 동시에 구동시켜 동체를 원활히 추진시키기위한 구동부의 제어가 서보제어기의 목표이다. 이를 세부적으로 분석하면, 각 다리간의 연결 제어, 견실한 다축동시제어, 부하변화에 둔감한 위치/속도 제어 및 접촉센서의 응용 등 많은 문제로 나뉜다.

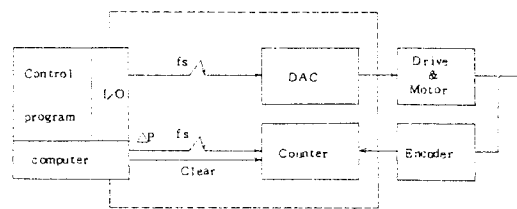


[그림.1] 다각보행로봇의 제어부

이 중 본논문에서는 보행로봇 서보제어기의 개념설계를 바탕으로 한다리 구동을 위한 3축 동시제어용 서보제어기 에 대해 기술한다. 그리고, 이는 추후 연구될 가변부하 및 동특성 보상을 고려한 12축 제어기로의 확장용 염두에 둔 것이다. 이에따라, Sampled Data 방식(참조 [그림.2])의 소프트웨어 서보제어기를 개발하고, 집적화된 3축용 서보제어 하드웨어 유닛을 개발하였다. 또한, 부하 실험을 통해 제어기의 성능을 실험하였다. 본문에서 이들 사항을 보다 자세히 기술하고자 한다.



- Reference - Pulse Technique



- Sampled-Data Technique

[그림.2] Digital 서보제어 방식

II. 위치 제어기 설계

1. 개요

다각보행로봇의 서보제어기는 산업용 로봇이나 CNC 등의 그것과는 특성면에서 많은 차이를 갖는다.

첫째, 목표 위치가 주어지는 것이 아니고, 지면의 굴곡 상태에 따라 센서로 감지하여야 한다.

둘째, 부하의 변동이 극심하다. 즉, 이동다리 일때는 다리 하나의 부하에서 지지다리 일때는 동체의 일부가 부하가 된다.

셋째, 각 다리를 하나의 로봇 암(Arm) 으로 보면 이들이 동체와 지면을 통해 동/정 역학적으로 연결되어 있다.

따라서, 이러한 서보제어기의 구성을 위해서는 알고리즘의 가변이 용이한 소프트웨어에 의한 제어기가 필수적이다.

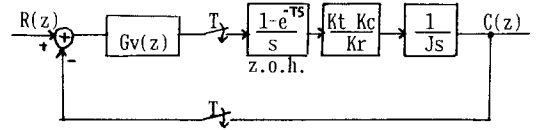
4각보행로봇의 12축 동시제어를 위해 축당 서보제어기 하나씩을 두고 이를 전체적으로 총괄하는 주제어기로 구성하는 방법은 하드웨어의 부담이 크고, 고가이며 각 축간의 연결제어가 번거롭다. 따라서, 본연구에서는 이를 두개의 CPU 모듈과 간결한 하드웨어로의 구성을 제안한다. 하나의 CPU 모듈은 상위 제어기와 통신 및 센서 interface를 담당하고, 다른 하나는 12축 서보제어기로 한다. 이러한, 집중제어방식은 소프트웨어의 부담이 크고, 고주파수의 sampling에 의한 서보제어가 어려우므로 이를 해결하기 위한 서보제어기의 설계가 필요하다.

2. 속도제어기의 설계

소프트웨어 서보제어기의 부담을 줄이기 위해서는 sampling 시간을 길게 하는 것이 좋으나, 긴 sampling 주기는 시스템 안정도를 해치므로 이를 절충한 sampling 주기의 선정과 그에 따른 제어기 gain의 결정이 필요하다. 따라서, 속도제어기 설계문제를 다음과 같이 설정하였다.

" [그림.3]의 시스템에서, 성능지수 $P = \int_0^{\infty} e(t) dt$ 를 최소화하고 안정조건을 만족하며 unit step input에 대한 steady state error가 영인 속도제어기를 설계하라"
[그림.3]는 Brushless DC servo motor의 dq변환⁽⁶⁾에 의한 모델과 이에 큰 gain을 갖는 전류제어 시스템의 모델을

이용한 것이다. 그리고, viscous friction 과 부하가 없는 경우를 가정한다.



[그림.3] 속도 제어 시스템

$$Gv(z) = Kp + Ki \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} \quad \text{이하하면}$$

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{KT(Kp + TKi/2)z + (TKi/2 - Kp)}{(z-1)^2 + KT(Kp + TKi/2)z + KT(TKi/2 - Kp)} \quad \text{(식.1)}$$

(단, $K = \frac{Kt \cdot Kc}{Kr \cdot J}$,
 Kt : Motor Torque Constant,
 Kr : Current Feedback Gain,
 Kc : D/A Converter Gain,
 J : Motor Inertia)

Jury's criteria를 적용하여 (식.1)의 안정조건을 구하면,

$$1 + KT(TKi/2 - Kp) < 1,$$

$$KT Ki > 0,$$

$$4 - 2KT Kp > 0 \text{ 이다.}$$

또, $b = KTKp$, $c = KT Ki/2$ 로 하고 $A = b+c$, $B = c-b$ 로 가정하고 시간영역 응답과 성능 지수를 구하자.

가. $(1+B) > ((2-A)/2)^2$ 인 경우

- 시간 영역 응답

$$C(nT) = 1 + \frac{e^{-\alpha nT}}{\sqrt{1-r^2}} \sin(n\omega T - \beta), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\left(\text{단, } r = \frac{b+c}{2\sqrt{2c}}, \right.$$

$$\alpha = -\frac{1}{2T} \ln(1+c+b),$$

$$\omega = \omega_0 + N\pi/T \quad (N=0, 0 \leq \omega T < \pi, N=1, \pi \leq \omega T < 2\pi)$$

$$\omega_0 = -\frac{1}{T} \tan^{-1} \frac{\sqrt{8c-(b+c)^2}}{2-(b+c)},$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-r^2}}{r})$$

$e(nT)$ 의 모든점을 지나는 $e(t)$ 를 이용하여 성능지수 P 를 계산하면,

$$P = \frac{1}{4(\alpha T)(1-r^2)} + \frac{1}{4(\alpha T)} - \frac{((\alpha T)M + (\omega T))^2}{4T[(\alpha T)^2 + (\omega T)^2]}$$

이다. (단, $M = r/\sqrt{1-r^2}$)

나. $(1+B) < ((2-A)/2)^2$ 인 경우

- 시간 영역 응답

$$C(nT) = 1 - \beta e^{-P_1 nT} - \gamma e^{-P_2 nT}, \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\begin{aligned} \beta &= (1 - e^{-P_1 T}) / (e^{-P_2 T} - e^{-P_1 T}), \\ \gamma &= (e^{-P_2 T} - 1) / (e^{-P_2 T} - e^{-P_1 T}), \\ e^{-P_1 T} &= (2-A)/2 \pm \sqrt{(2-A)^2/4 - (1+B)} \\ e^{-P_2 T} &= (2-A)/2 \mp \sqrt{(2-A)^2/4 - (1+B)} \end{aligned}$$

- 성능 지수

$$P = \frac{\beta^2}{2(P_1 T)} + \frac{\gamma^2}{2(P_2 T)} + \frac{2\beta\gamma}{(P_1 T + P_2 T)}$$

다. $(1+B) = ((2-A)/2)^2$ 인 경우

- 시간 영역 응답

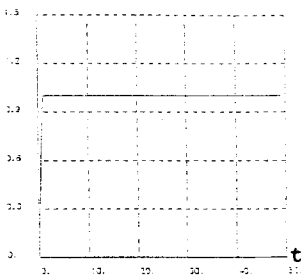
$$C(nT) = 1 - e^{-P_3 nT} - \frac{1}{T} (1 - e^{-P_3 T}) (nT) e^{-P_3 nT}$$

$$(\text{단, } e^{-P_3 T} = (2-A)/2)$$

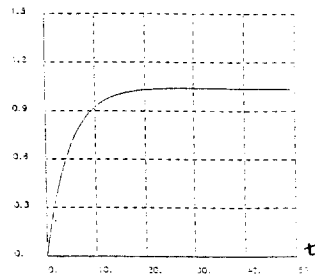
- 성능 지수

$$P = \frac{1}{2(P_3 T)} + \frac{(1 - e^{-P_3 T})^2}{4(P_3 T)} + \frac{(1 - e^{-P_3 T})}{2(P_3 T)}$$

위의 가,나,다 경우에서 안정조건 ($0 < b < 2, 0 < c < b$)을 만족하는 범위에서 성능지수 P를 최소화하는 b,c를 구하면 $b=1.0, c=0.001$ 일때 $P = 0.073125$ 이다. 이의 단위계단 입력에 대한 시간영역 응답은 [그림. 4]과 같다. 변수 정의에 의해 b,c는 K_p, K_i 및 T의 함수이므로 b,c 값이 정해지면 Sampling rate와 속도제어기의 PI gain K_p, K_i 의 관계가 얻어진다. [그림. 4]의 경우는 dead beat 경우와 유사하여 제어 입력이 매우 크게 되어 실제 실험에서는 $b=0.2, c=0.001$ 으로하였다. 이의 단위계단 입력에 대한 시간영역 응답은 [그림.5]과 같다.



[그림.4] Velocity Time Response ($b=1.0, c=0.001$)



[그림.5] Velocity Time Response ($b=0.2, c=0.001$)

3. 위치 제어기 설계

[그림.6]의 비례제어(K_{pp}) 위치제어기 시스템의 전달함수는 $H(z) = \frac{C(Az^2 + (A+B)z + B)}{z^3 + (A+CA-3)z^2 + (B-A)z + C(A+B)+3}z + (CB-B-1)$

$$H(z) = \frac{C(Az^2 + (A+B)z + B)}{z^3 + (A+CA-3)z^2 + (B-A)z + C(A+B)+3}z + (CB-B-1)$$

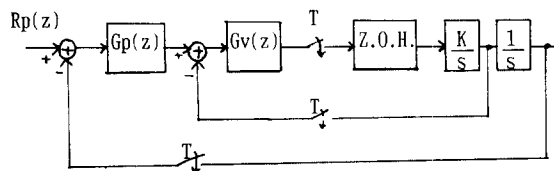
(단, $A = b+c, B = c-b, C = K_{pp} T/2$)

이다. $T = 5 \text{ msec}, b=0.2, c=0.001$ 와 실험 시스템의 각 계수로 부터 $K = 172.0842 [\text{sec}^{-1}]$ 일때,

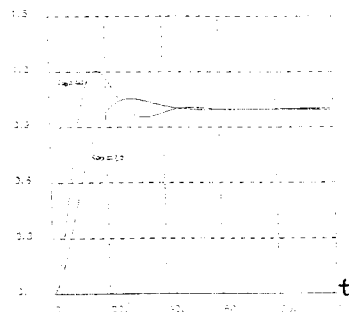
$$H(z) = \frac{K_{pp} G'(z)}{1 + K_{pp} G'(z)}$$

$$G'(z) = \frac{5.025E-4 z^2 + 5E-6 z - 4.975E-4}{z^3 - 2.799 z^2 + 2.6 z - 0.801}$$

이때, root loci 에 의한 시스템 안정조건은 $0 < K_{pp} < 376$ 이다. 또, K_{pp} 가 20 일때 poles 는 $0.99, 0.89 \pm j0.1$ 이다. 그리고, K_{pp} 의 변화에따른 단위 계단 입력에 대한 응답의 simulation 결과는 [그림.7]과 같다.



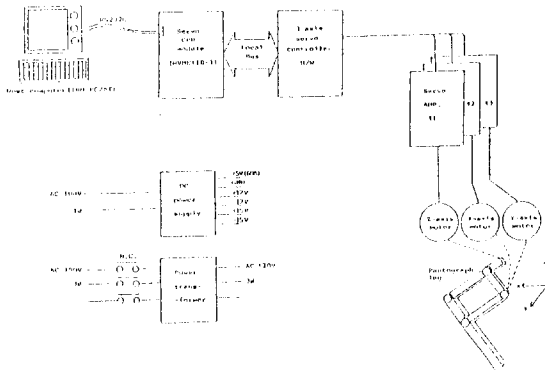
[그림.6] 위치 제어 시스템



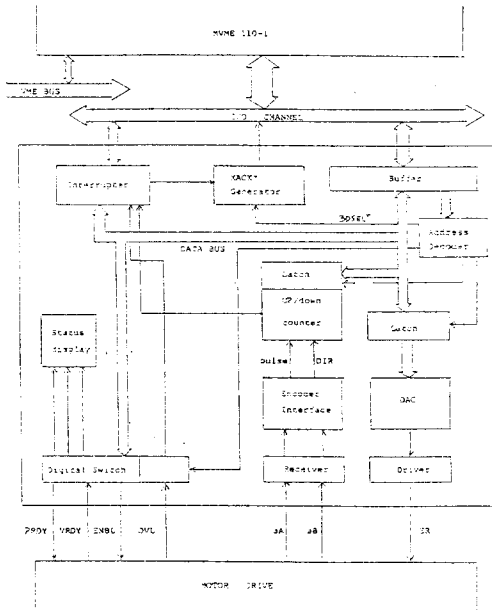
[그림.7] T=5ms Position Time Response

III. 시스템 구성

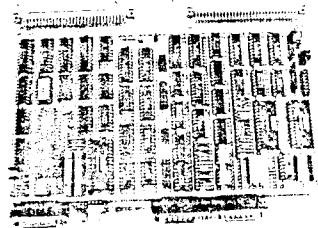
전체 시스템의 구성은 [그림.8]와 같다. Host Computer (IBM PC/AT)는 소프트웨어 개발 장비 및 Man/Machine Interface용 이며, 주제어기(MVME110-1)은 16-bit microprocessor MC68000을 중심으로한 VME Bus 규격의 Single Board Computer이다. 또한, 3축용 서보제어기 하드웨어 유닛은 집적화를 위해 counter는 74LS697 을 DAC는 12-bit BB1201KP를 사용하였으며, 이의 불럭도는 [그림.9]과같고, 제작된 board는 [사진.1]과 같다. Servo Amp. (Current Amp)와 Motor는 FANUC 사의 Brushless DC servo motor를 사용하였으며, pantograph형 한다리에 대해 X,Z 축용 50 W, Y 축용 20 W급을 사용하였다. 구성된 전체 시스템은 [사진.2]와 같다.



[그림.8] 전체 시스템 구성도



[그림.9] 3축 서보제어기 H/W 블록도



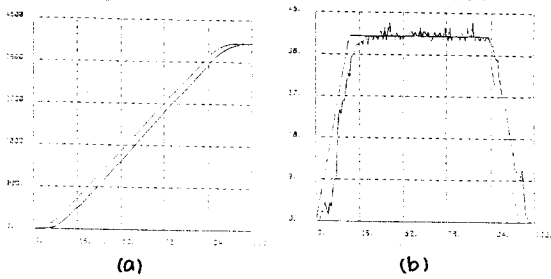
[사진.1] 제작된 3축 서보 제어기 H/W Unit



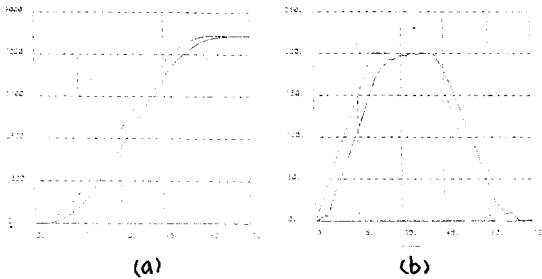
[사진.2] 제작된 시스템 전체 구성

V. 실험 및 결과

소프트웨어는 MC68000-어셈블리 언어로 구현하였으며, 알고리즘 수행시간의 단축과 확장성을 고려하여 직선 가감속 table 및 각축의 상태를 나타내는 Status table을 제안하였다. 그 결과 축당 알고리즘 수행시간은 약 250 μ sec로써 이는 12축의 경우 3 msec로 추후 추가될 동특성 보상기 등을 table 방식으로 수행시간을 최소화 하면 12축당 5 msec의 sampling 시간의 선정이 가능하리라 예상된다. Sampling 주기가 5 msec 일때 무부하에서 설계와 같은 동작 조건하의 결과는 [그림.10],[그림.11]로 위치/속도 지령치로 잘 추종하는 것을 보았다. 또한, 부하 상태에서 실험으로는, 저속에서는 무부하를 가정한 경우와 같은 동작조건에서도 위치/속도를 잘 추종하나, 고속에서는 부하의 관성 모멘트(inertia), 마찰력 등 비선형적 요소가 작용하여 제어기의 gain의 조정이 없이는 overshoot가 30% 이상 매우 큰 것을 볼수있었다. 따라서, 이러한 가변부하 및 동특성을 고려한 제어기의 설계는 동체 이동 실험과 병행하여 앞으로 계속 진행하려 한다.



[그림.10] Pd=4000 pulse, Vd=240 rpm=40 pulse/5ms
 (a) Position Response (b) Velocity Response
 (X축 : No. of Sampling)



[그림.11] Pd=8000 pulse, Vd=1200 rpm=200 pulse/5ms
 (a) Position Response (b) Velocity Response

VI. 결 론 및 앞으로의 방향

본 연구에서는 4각 보행로봇의 서보 제어 알고리즘의 개념 설계틀 바탕으로 소프트웨어에 의한 한 다리에 대한 3축 제어기 개발에 관해 수행하였다. 그 주요 내용을 요약하면,

- 보행로봇의 서보제어기 설계원칙 정립
- 4각보행로봇의 서보제어 알고리즘 개념설계
- 보행로봇에 적합한 3축 위치/속도제어기 개발이다. 앞으로는, 원활한 고속 운동을 위한 동특성 보상기의 설계, 발바닥 접촉센서의 응용, 각 다리간의 연결제어 알고리즘 개발 등을 기반으로하여 4각 (12축) 서보제어기의 개발을 수행하고자한다.

— 참 고 문 헌 —

1. PARESH C. SEN, "Thyristorized DC Drives with Regenerative Braking and Speed Reversal," IEEE IECI-25, No.4 Nov. pp45-62, 1978
2. YORAM KOREN, "Design Parameters for Sampled-Data Drives for CNC Machine Tools", IEEE IA-14, No.3 May/June, 1978

3. YORAM KOREN, "Design of Computer Control for Manufacturing Systems", J. of EI, Trans. of ASME Vol.101 Aug. pp326-322, 1979
4. B.C. Kuo, Digital Control Systems, HRW, 1980
5. Karl J. Astrom, Computer-Controlled Systems, Prentice Hall, 1984
6. (일어) 브러시리스 서보 모터의 기초 및 응용, 총합전자출판사, 1985
7. S. Hirose, "A study of design and control of a quadruped walking vehicle", Int. J. of Robotics Research, Vol.3 No.2 pp113-133, 1984
8. S. Hirose, et al., "TITAN III : A quadruped walking vehicle", Proc. 2nd ISRR Symp. pp247-253, 1984
9. M. Kaneko, et al., "A hexapod walking machine with decoupled freedom", IEEE J. of Robotics & Automation, Vol.RA-1, No.4 pp183-190, 1985
10. M.H. Rceihert and I.E. Sutherland, "Machine that Walk", scientific American Vol.13, No.1, pp31-41, 1983