'91 韓國自動制御學術會議論文集 1991. 10.22~24

디지탈 제어를 위한 실시간 제어용 프로그램 팩케지 개발

김 상 봉 *이 충 환

부 산 수 산 대 학 교 공 과 대 학 기 계 공 학 과

Development of Real Time Control Program Package for Digital Control

Sang-Bong Kim Choong-Hwan Lee

Dept. of Mechanical Engineering
National Fisheries University of Pusan

ABSTRACT

In recent years, the discrete-data and digital control systems have gained importance in all industies due in part to the advances made in microcomputers, as well as the advantages found in working with digital signals. So, the developments of the computer aided design packages to analysis, control law design and digital implementation of control systems are increasingly needed and those substantial technological improvements are now expected. In the paper, a real time control program package(RTCPP) for the implementation of digital control is developed by using C language. The digital controls for the feedfoward and feedback controllers such as PI(propotional and integration) type, regulator and servo types can be implemented by an IBM PC compatible computer with some interface modules of A-D/D-A converter and RS-232C. The effectiveness of RTCPP is illustrated by the application controls for motor and magnetic levitation systems.

1.서론

제어계를 실시간으로 디지탈 제어할 경우, 제어계 설계와 그 실현이라고 하는 과정에서 많은 노력과 시간을 보내게 된다. 특히 실현문제에 있어 이미 개발되어 있는 프로그램을 이용할 경우에도, 프로그램의 일부분을 고쳐쓰지 않으면 안되는 경우가 많다고 볼 수 있다[1]-[8]. 또한, 지금까지 개발되어있는 실시간 제어 프로그램은 어셈블리언어로 쓰여져 있는 예가 많았으므로 그 손작업에 있어 사용자의 많은 경험을 필요로하게 되었다[2]. 디지탈 제어를 행하는 그 개념 문제를 생각해 볼 때, 일정한 시간마다 A-D 변환기에 의한 출력, 제어칙의 연산 및 D-A 변환기에 의한 입력의 조작 등을 행하고, 실시간 제어가 되고 있는 동안에도 목표치와 샘플링 시간의 변경 및 제어 정지명령 등을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 실험 결과의 데이타 처리 기능인 그래픽, 다른 컴퓨터에의 전송 등과 같은 복합적이고 범용성있는 프로그램 팩케지의 개발이 절실하게 요구된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 일정한 샘플링 시간(Sampling Time)마다 이와같은 실시간 제어가 실현되도록 하기 위해, 컴퓨터 내부의 시스템 타이머를 임의의 샘플링 시간에 대응하는 클럭(Clock)수로 변경시켜, A/D 와 D/A 변환 및 제어칙 계산 등의 제어처리가 시스템 타이머 카운터 0의 출력에 동기한 인터럽션 전용 콘트롤러의 동작으로 일정 샘플링 시간마다 행해지도록 했다. 실시간 제어가 행해지는 동안, 목표치 변경, 샘플링 시간 변경 및 제어 종료 등의 명령은 샘플링 시간내에서 제어 처리가 끝난 여분의 시간을 활용하여 검색되어 키보드(Keyboard)로부터의 입력이 가능하도록 했다. 본 프로그램은 인터럽션 처리에 있어 어셈블리 언어를 사용하지 않고 Turbo-C를 사용하여 구성되었다.

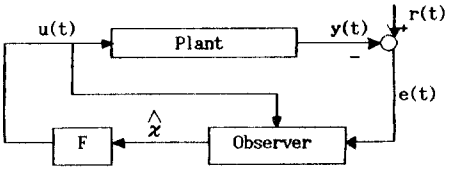
프로그램의 기능으로서, 실시간 제어, 실험 결과의 그래픽 및 RS-232C 에 의한 통신을 비롯하여 위치서보계의 실시간 파라메터 동정등이 가능하도록 개발되었다. 본 실시간 제어 프로그램 팩케지는 RTCPP(Real Time Control Program Package)라 이름 부르고,모터의 속도제어와 자기흡인 부상계의 갭(Gap)제어를 응용 대상으로 하여 그 유효성을 확인했다.

2.제어목표

본 프로그램 팩케지의 제어기능으로서는 비례 및 적분 제어계 구성, 레규레이터계 구성 및 서보계 구성에 의한 실시간 제어, 그 보조기능으로서 시스템파라메터의 동정(Identification), 그래픽 및 RS-232C에 의한 데이타 통신 등이 가능하도록 한다. 제어목표치는 키보드로부터 입력을 받는 것으로 하며, 그 형태는 스텝형식 즉, 디지탈적인 숫자의 입력으로 한다.

2.1 레규레이터(Regulator) 구성

레규레이터계 구성은 Fig.2.1에 보인것과 같고 그 피이드백 행렬 F는 극배치, 최적제어 등의 설계법에 의해 주어지는 것으로 하며, 관측기는 최소차원 관측기 구성으로 한다.



F: feed back matrix r(t): reference
e(t): error u(t): input
y(t): output

Fig.2.1 Regulator system

2.2 서보계 구성

서보계 구성은 Fig.2.2에 보인 것과 같고 스텝형식의 목표치에 대해 주어지는 전향보상기(feedforward compensator)는다음과 같은 상태방정식[9][10]:

$$\frac{d\xi}{dt} = y(t) - r(t) \qquad (2.1)$$

을 이산화한 상태 방정식

$$\xi(k+1) = \xi(k) + T[y(k)-r(k)] \qquad (2.2)$$

의 표현으로 한다. 단, T는 샘플링 시간(Sampling time) 이

다. 관측기는 최소차원 관측기 구성으로 하며,제어칙 F_1과 F_2는 계단상의 목표입력에 대한 플랜트(Plant)의 확대계[9][10][11]로 부터 설계된 행렬로 한다.

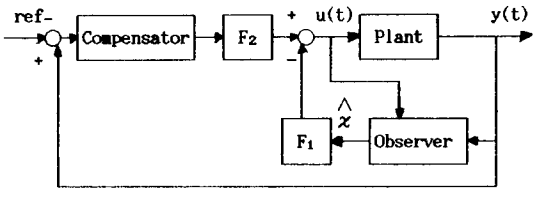


Fig.2.2 Servo Control System

2.3 시스템 파라메터 동정(Identification)

2차계의 스텝응답 으로부터 측정가능한 오버슈트량과 그때의 시간을 이용하여 선형 시스템의 파라메터를 구하는 알고리즘[2]과 최소 2승법의 동정 알고리즘[15]을 이용 하도록 한다.

2.3.1 알고리즘 I

본 논문에서는 다음과 같은 2차계 형식으로 주어지는 선형시스템을 생각한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{2.3a}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2.3b}$$

단,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad C = [\,1 \;\; 0\,]$$

식 (2.3)의 스텝 입력에 대한 그 응답은

$$y(t) = \frac{b_1}{a_2}\left\{1 + \frac{\sqrt{4a_2}}{\sqrt{4a_2 - a_1^2}} e^{-\frac{a_1}{2}t} \times \sin\left(\frac{\sqrt{4a_2 - a_1^2}}{2}t - \tan^{-1}\frac{-\sqrt{4a_2 - a_1^2}}{a_1}\right)\right\} \tag{2.4}$$

와 같이 주어진다.

y(t)가 최초로 최대가 되는 시간은

$$t_{max} = \frac{2\pi}{\sqrt{4a_2 - a_1^2}} \tag{2.5}$$

와 같이 되고 이때, y(t)의 최대치 $y(t_{max})$는

$$y_m \triangleq y(t_{max}) = \frac{b_1}{a_2}\left\{1 + e^{-\frac{a_1\pi}{\sqrt{4a_2 - a_1^2}}}\right\} \tag{2.6}$$

로 주어진다. 목표치가 스텝 입력 y_o 로 주어진다고 하면 그 오버슈트량은

$$y_{Mo} = y_m - y_o = \frac{b_1}{a_2}\left\{1 + e^{-\frac{a_1 t_{max}}{2}}\right\} - y_o \tag{2.7}$$

로 된다. 여기서

$$b_1 \triangleq a_2 y_o \tag{2.8}$$

라 하고 식 (2.5)의 양변에 자연대수를 취하여

$$a_1 = \frac{2\ln\{(y_m - y_o) / y_o\}}{t_{max}} \tag{2.9}$$

를 얻는다. 식 (2.7)을 식 (2.3)에 대입하면

$$a_2 = \frac{\pi^2 + \ln\{(y_m - y_o) / y_o\}}{t_{max}^2} \tag{2.10}$$

로 된다.

2.3.2 알고리즘 II

최소2승법의 파라메터 동정에 있어서 다음과 같은 차분 방정식

$$y_k = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u_k + v_k \tag{2.11}$$

단, $k = 1, \cdots, N$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}$$
$$B(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_n z^{-n} \tag{2.12}$$

으로 표현되는 시스템의 파라메타를 구하는 것으로 한다.

신호벡터 z_k 및 파라메터 벡터 θ는 다음과 같이 정의한다.

$$z_k \triangleq [-y_{k-1}, \cdots, -y_{k-n}, u_{k-1}, \cdots, u_{k-n}]^T$$

$$\theta \triangleq [a_1, \cdots, a_n, b_1, \cdots, b_n]^T \tag{2.13}$$

이때, θ의 추정치 $\hat{\theta}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\theta} = (z^T z)^{-1} z^T y \tag{2.14}$$

단, $y^T \triangleq [y_1\ y_2\ \cdots\ y_N]$

$e^T \triangleq [e_1\ e_2\ \cdots\ e_N]$

$z^T \triangleq [z_1\ z_2\ \cdots\ z_N]$

로 정의한다.

3. 실시간 제어용 팩케지의 구조

3.1 하드웨어의 구성

실시간 제어용 프로그램팩케지 RTCPP(Real Time Control Program Package)는 IBM PC와 호환성을 가지는 개인용 컴퓨터를 대상으로 개발되었으며,이에 사용된 언어는 Turbo C(ver2.0)이며 그 하드웨어의 구성도는 Fig.3.1과 같다.

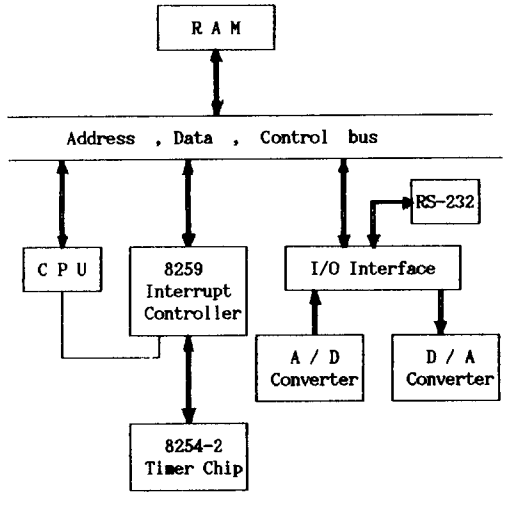


Fig.3.1 Hardware configuration

3.2 RTCPP의 구조

본 프로그램의 主 메뉴는 윈도우(window)를 통하여 키보드(keybord)로 부터 그기능의 선택이 가능하도록 개발 되었

으며,실시간 제어와 비실시간 제어의 분기가 가능하도록 되어 있다. 프로그램의 구조는 Fig.3.2에 보인 것과 같다. 디지탈 제어 즉 실시간 제어시, 제어가 진행되는 동안에도 목표치 변경이나 제어 정지 명령등을 키보드(keyboard)를 통해 입력해야 하는 것과 같은 다중처리가 가능한 프로그램이 필요하다.

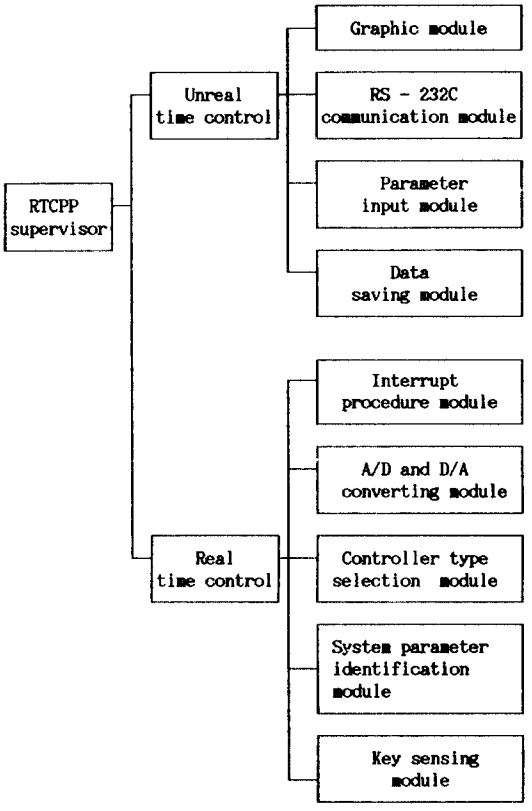
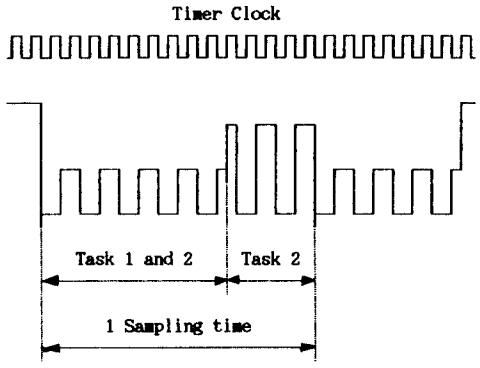


Fig.3.2 Program Structure of RTCPP

본 패캐지에서는 이와같은 다중처리를 인터벌 타이머로부터의 끼어들기에 의해 인터럽션처리, 제어처리 및 키보드(keyboard)로부터의 커맨드(command)처리를 Fig.3.3에서 보인 것과 같이 행한다. 즉 ,타이머 인터럽션 마다 제어처리를 행하고 인터벌 내에서 제어처리가 끝나면 나머지 시간으로 커맨드(command)처리를 수행한다.본 RTCPP는 위의 3가지 기능을 모두 Turbo-C로 작성했으며 MS-DOS上에서 실행되도록 되어있다.

3.2.1 슈퍼바이저(supervisor)

실시간 제어용 프로그램 RTCPP에서 슈퍼바이저(Supervisor)의 흐름도는 Fig3.4와 같다.



Task 1: A/D and D/A converting module
Task 2: Calculation modules of observer and control input
Task 3: Command treatment

Fig.3.3 Real time multi-task

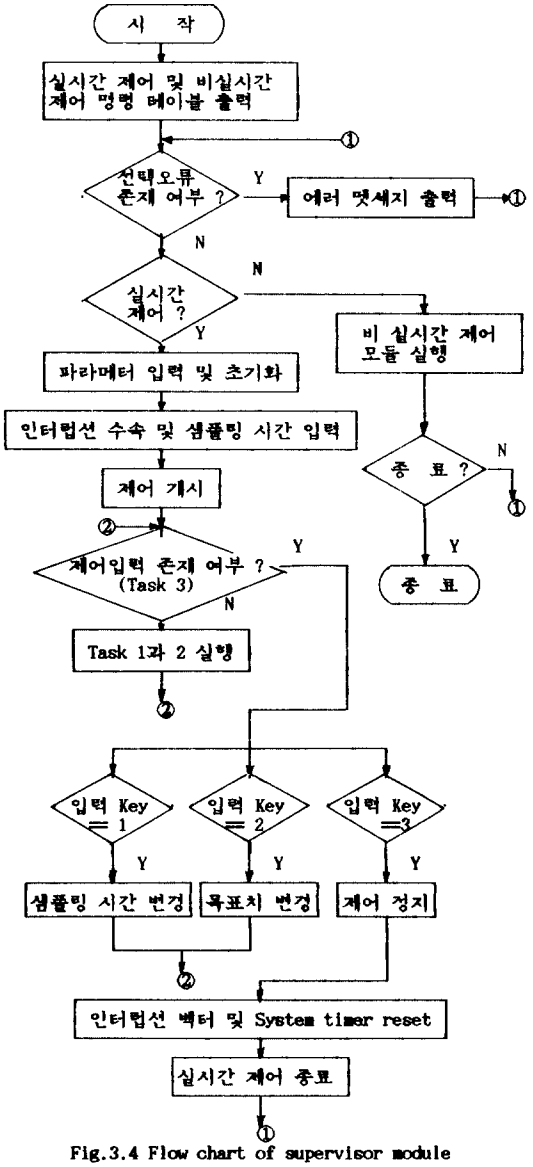


Fig.3.4 Flow chart of supervisor module

슈퍼바이저(Supervisor)는 수행하려고 하는 명령을 처리하고 각 모듈의 선후처리를 수행한다. 특히 실시간 제어가 행해지고 있을 때 DOS 인터럽션을 이용하여 키보드의 상태를 점검하고 관리한다. 프로그램 RTCPP는 메뉴(menu)에 따라 대화식으로 사용자가 명령을 입력하여 사용할 수 있도록 되어있으며, 프로그램 RTCPP를 사용하기 위해 필요한 하드웨어와 소프트웨어의 사양은 Table 3.1에 보인 것과 같다.

Table 3.1 Hardware and software specifications needed for RTCPP

항 목	사 양
하드웨어	IBM PC / XT / AT 또는 이와 호환기종 IBM 흑백 및 칼라 모니터 카드 또는 이와 상응하는 모니터 카드 플로피 디스크 드라이브 1 대 이상 RS-232C 를 이용하는 경우 송신 케이블
소프트웨어	MS-DOS 버전 2.0 이상 Turbo-C 버전 1.0 이상 RTCPP 프로그램 모듈

Supervisor 모듈은 비실시간 제어와 실시간 제어의 명령 테이블이 정의 되고, 각 실행 모듈별로의 분기가 행해지도록 하며 또 에러 멧세지 테이블이 정의되고 있어 변수값에 대응해서 에러 멧세지를 출력하도록 되어 있다. 실시간 제어시 키보드로부터 목표치와 샘플링 타임을 변경 입력할 때도 자동적으로 로깅이 행해지도록 되어있다.

3.2.2 파라메터 입출력 모듈
이 모듈은 제어계의 파라메터 입출력 및 초기설정을 행한다.

3.2.3 로깅 데이타(Logging Data) 및 파일(File)관리모듈
이 모듈에서는 로깅데이타를 파일에 세이브, 파일로부터의 로드와 RS-232C회선을 통한 다른 컴퓨터등에의 전송을 행하도록 한다.

3.2.4 키보드(keyboard) 입력모듈
키보드 입력과 관련된 함수의 서브루틴이며 DOS 인터럽트 펑션(Interrupt Function)을 이용하여 문자입력에 대한 키(Key)를 판별하여 그 값을 리턴(return)하고 정수, 단정도 실수, 배정도 실수 등의 키(Key)입력을 행한다.

3.2.5 그래픽 모듈
로깅된 데이타를 그래픽 화면에 플로트(plot)하기위한 루틴으로 지정된위치에 그래픽(Graphic) 문자출력과 2차원 그래픽(Graphic)을 행한다.

3.2.6 제어계 파라메터(Parameter) 정의모듈
로깅영역에의 포인터(Pointer), 입력수, 출력수, 제어계 파라메터를 정의하는 영역을 설정할수 있는 모듈이다.

3.2.7 인터럽션 수속 및 샘플링 시간 변경 모듈
샘플링 시간에 동기한 인터럽션(Interruption)을 행하기 위해 시스템 타이머 인터럽트 벡터(System timer interrupt vector)를 보존하고 유저 루틴(User routine)을 설정하며 종료시 변경된 벡터 테이블(Table)을 원래 상태로 복귀시키고 제어를 종료한다.
PC에는 시스템의 시간 관리를 위해 프로그램어블 인터벌 타이머(Programable interval timer,8254-2)를 내장하고 있다. 8254-2의 경우 입력 클럭(Clock)으로 1.193182 MHz의 수정 진동자를 사용하고 있으며 3개의 독립된 Channel(CH0,CH1,CH2)을 가지고 있다. 이 중 Channel 0의 출력은 8259 PIC(Programable interrupt controller)의 IRQ0에 접속되어 있으며, 특정 인터벌(Interval)시간 마다 8259 IC에 IRQ를 발생시켜 하드웨어 인터럽터(Hardware interrupt)를 발생시키는 것을 이용하여 인터럽터의 INT 1CH 벡터를 변경하여 유저루틴(user routine)을 set하고 8254-2에 원하는 특정의 샘플링 시간을 입력하여 실시간 제어가 행해지도록 프로그램되었다. 기준 클럭(clock)이 1.193182 MHz이므로 0.838 μsec ~ 55 msec 범위의 샘플링 시간 변경이 가능하도록 프로그램되었다.

3.2.8 A/D및 D/A변환모듈
연속계의 아날로그신호를 디지탈 신호로 변환 하는 것을 관리하고 제어알고리즘에 따라 계산된 제어출력치를 아날로그신호로 변환하여 출력하는 기능을 갖는다.

4.실시간 제어예

4.1 서보모터의 속도제어

RTCPP의 제어기능중 적분 보상기에 의한 제어를 서보모터(AMSTEK,LAMB ELECTRIC DIVISION KENT OH10 442 40)의 속도제어에 적용하여 샘플링 시간 및 목표치 변경에 대한 속도 추종과 안정성을 검토하였다. Fig.4.1은서보모터속도 제어계이고 Fig.4.2는 샘플링 시간10mSEC,목표치를 400-300-200-100-50RPM으로 변경했을때의 데이타를 그래픽화면 처리한 그림이며 유효한 제어결과를 보여주고 있다.

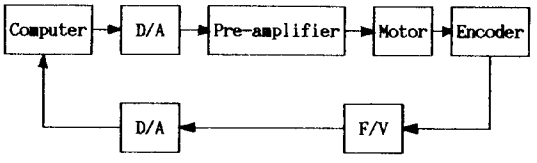


Fig.4.1 서보모터의 속도제어계

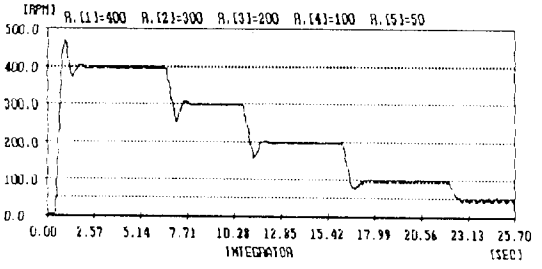


Fig.4.2 서보모터 속도제어의 결과

4.2 자기 흡인 부상계(magnetic levitation system) 제어

자기흡인부상계는 Fig.4.3과 같은 모형을 만들어 실험을 행했으며 전자석은 단면적이 A[0.017m^2] 이고 길이가 ℓ[0.096m] 인 철심(Iron bar)에 권수가 n[965 turn] 이되도록 동선을 감고,외부전원(+15V)을 가하였으며, 운동부는 질량 m(0.085 kg)인 철심(iron bar)과 여기에 연결된 직선형 포텐쇼메터(linear potentio-meter,cp 50F,±0.1%,1Ω,MIDOR1)로 구성 하여 제어를 행했다.

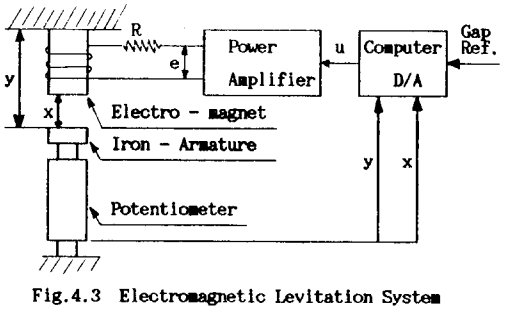


Fig.4.3 Electromagnetic Levitation System

서보계 및 레규레이터 설계 알고리즘[16]에 대한 시스템 피이드백칙 값은 Table 4.1과 같으며 각각의 시스템 파라메터로 제어를 행한 결과는 Fig.4.4 및 Fig.4.5 와 같다.

Table 4.1 Controller parameters of maglev system

Design method	Feedback law	Closed loop poles	
		Real	Imaginary
Servo	7.161D+00	-9.375300	10.1062
	2.350D+01	-9.375300	-10.1062
	9.000D-03	-116078.0	0.00000
	1.252D+01	-38.21590	0.00000
Regulator	4.548D+00	-1.690600	1.37620
	2.260D-02	-1.690600	-1.37620
	5.520D-03	-39.99820	0.00000

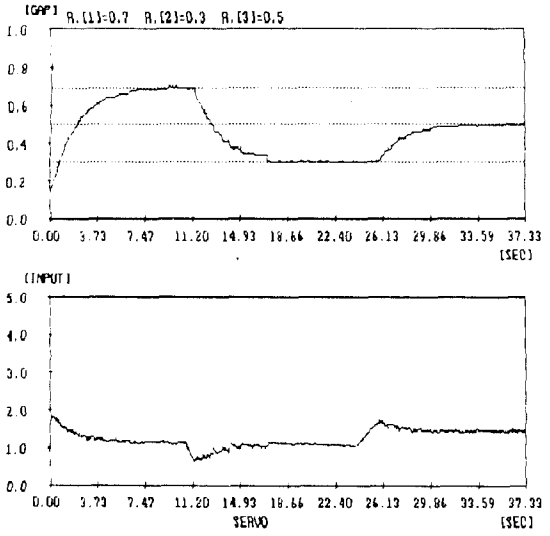


Fig.4.4 서보계 설계법에 의한 제어결과

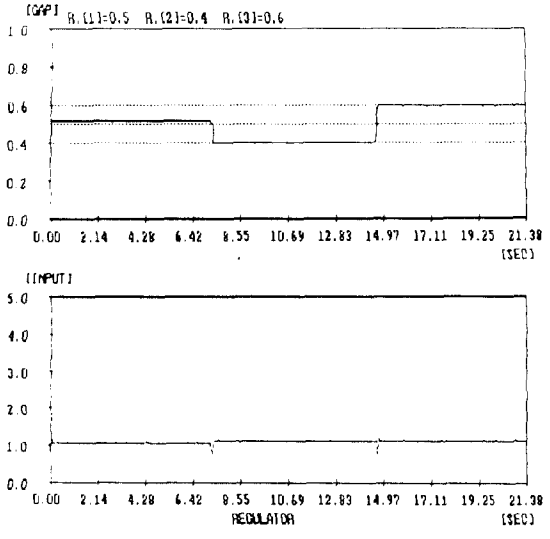


Fig.4.5 레규레이터 설계법에 의한 제어결과

5.결론

본 논문에서 개발한 실시간 제어용 프로그램 패케지인 RTCPP는 제어계 설계를 통한 실현문제에 있어서의 노력을 줄이고 안정된 디지탈 제어계의 실현이 가능하다고 하는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있으며 위치서보계의 시스템 파라메타 동정은 스텝응답을 이용하여 실시간으로 측정되고 있으므로 앞으로 현대 제어이론의 오토튜닝(Autotuning)문제의 해결뿐만 아니라 현장 제어 기술자들에게 있어 시스템 파라메터를 측정하는데 많은 시간낭비를 필요치않게 하므로 대단히 유익할 것으로 생각된다. RTCPP는 모터의 RPM제어와 자기흡인 부상계의 갭(Gap) 제어에 대한 응용을 통해 그 유효성이 크다는 것을 확인할수 있었다. 각 컴퓨터 기종간의 호환성을 위해서는 더 많은 개발이 요구되어 진다.

참고문헌

1) 荒木光彦 :制御系用 CAD の利用狀況と研究方向,計測と 制御, Vol.25, No.3, pp.259-265 (1987)
2) 大山, 工藤ら :現代制御論に 基づひたディヅタル制御系設計法, インターフェース, No.115, PP.215-250 (1986)
3) 古田, 梶原 :制御系のための CAD, 計測と 制御, 18(9), pp.777-786 (1979)
4) K. Furuta el al :Computer Aided Design Program for Linear Multivaiable Control Systems, IFAC Symp. Computer Aided Design of Control Systems, pp.267-272 Pergamon (1980)
5) 古田 :制御系 CAD システム, 電氣學會雜誌 106(2), pp.105-111 (1986)
6) 古田 :ディジタル技術の進展に伴う制御工學の動向, 電子通信學會誌 63(7), pp.771-773 (1977)
7) 古田:現代制御と各社ディジタルユントローラ, Computrol ,No.3, pp.107-124 (1983)
8) 長川 :オートチューニング PID コントローラ, Computrol, No.3, PP.125-129 (1983)
9) 김상봉,박순실 :강인한 서보계설계와 R/C헬리콥터 트레이닝 시뮬레이터 제어에의 응용,대한기계학회 논문집 제15권 제2호, pp.497-506 (1991)
10)김상봉,오세준,정용길,김환성:서보계 설계에 대한 쌍선형 변환법의 응용 및 카트의 위치제어,대한전기학회 논문집 39(1),pp.290-298 (1991)
11)E.J.Davison :The Output Control of Linear Time-Invariant Multivariable System with Unmeasurable Arbitrary Disturbances,IEEE Trans, Automatic Control,AC-17,No.5,pp.621-630(1972).
12)佐野 :カルマンフイルタ と システム 同定,Computrol No.23,pp.73-78(1988).
13)M.J,Grimble :A Control Weighted Minimum Variance Controller for Non-minimum Phase System,Int.J. Control,Vol.33,No.4,pp.751-762(1981).
14)F.Camerron and D.E.Seborg :A Self-tuning Controller with PID structure, Int.J.Control,Vol.38, No.2,pp. 401-417(1983)
15)中溝高好:最小二乘法と線形回歸,Computrol,No.23,pp. 53-58(1988)
16)김상봉,김환성,정남수 :섭동계의 강인한 제어기 설계와 흡인형 자기부상계 제어,대한 기계학회 투고중.