□ 特輯 : 電子計算機 □

상용 로봇트 제어기의 Reverse-Engineering적 분석과 기초결과

卞 增 男*, 金 京 振**
(韓國科學技術院 敎授 * · 大學院**)

■ 차 례 ■

1. 머릿말
2. 상용 로봇트 제어기의 解析과 그의 必要性
3. PUMA560 제어기의 槪要
3.1 시스템 구성
3.2 로봇트 본체
3.3 제어기의 구성
3.4 CPU의 계층적 분산처리
3.5 조작순서와 VAL명령
4. LSI 11/02 주 컴퓨터 시스템
4.1 LSI 11/02 CPU
4.2 LSI 11/02 BUS
4.3 메모리 部
4.3 메모리 部
4.4 인터페이스 부
5. 로봇트 言語 "VAL"
5.1 VAL의 特徵
5.2 VAL의 기능
6. 조인트 써보 제어장치
6.1 디지탈 써보
6.2 아나로그 써보
7. 他기종과의 비교
8. 맺음말

1 머릿말

산업용 로봇트의 進步는 구동장치(actuator)와 기계적구조의 발전에 힘입은 바도 있겠으나, 마이크로 일렉트로닉스(micro-electronics) 기술의 발달로 인하여 값싼 대용량 메모리와 고성능의 마이크로컴퓨터를 이용할 수 있게된 것이 核心的이라 하겠다.

당초에는 산업용 로봇트의 適用分野가 자동차와 관련된 스폿트 溶接이 대부분이었으나, 현재와서는 이에 더하여 塗裝, 아-크 용접과 부품의 조립작업 등으로 다양화, 고도화 되고 있다. 機能면에서 보면, 로봇트 制御장치의 역활이 처음에는 단순한 위치를 결정하는 연산과 시퀀스 제어에 한정되었었다. 그러나 최근 수년에는 적용분야의 확장에 따라 로봇트에의 작업에 대한 요구도 고급화되어서, 제어기에 사용되는 컴퓨터역시, 8bit보다 16bit로 고기능화되고 또 보다 compact한 구성이 필요하게 되었다. 동시에, 써보(servo), 맨-머신 인터페이스(man-machine interface), 로봇트언어 수행 및 교시장치(Teach-Box) 제어부 등으로 컴퓨터의 기능 및 능력에 따라서 役割分担이 일어나게 되었다. 이용면에서 보면, 로봇트를 이용한 상품의 코스트 다운(cost down) 및 다품종 소량생산을 위한 공장자동화운동에 국내 역시 무관하지 않아, 로봇트를 생산라인에 투입해서 운용하는 기업은 물론, 로봇트 자체의 개발 및 판매업을 수행하는 업체도 늘고 있다.

표 1에도 국내 주요 로봇트 판매업체의 실태가 나와 있다.

보다 진보된 商用의 로봇트 제어기는 로봇트가 工場自動化(Factory Automation)의 중요한

표 1. 로봇트판매업체의 실태(86년 5월현재)

판 매 업 체 명	판 매 형 태	주 판 매 기 종	비 고
럭키금성상사(주)	일본 Kawasaki 중공업과 판매제휴	PUMA시리즈	판매를 위한 Engineering 능력배양에 노력
삼성정밀	일본 Dainichi기공과 판매제휴	part time 200v, 300v part time 600/800 BABOT 1440/2600	판매를 위한 Engineering은 창원공장 연구소에서 수행
	자체 개발 판매	SPR 600, SPR 410	부품 조립에 사용
한국 뉴메릭(주)	일본 FANUC과 판매제휴	M-Model, A-Model S-Model	1979년 부터 판매 시작
두산기계(주)	일본Yaskawa전기와 판매제휴	MOTOMAN L10w L60 L106 S50	자체 Engineering이 어느 정도 가능
대우중공업(주)	자체개발 판매	NOVA 10	미국에 50대 판매 계약

구성요소가 됨을 고려할 때,[1] 다음과 같은 기능을 갖추어야 한다.

첫째, F.A의 다른 요소인 CAD/CAM 시스템과 용이하게 접속되어야 한다. 이는 전체구성으로 볼때 로봇트를 NC(Numerical Control) 머쉰과 같은 멤버로 사용함을 의미하며, 동시에 좌표변환연산의 精度가 높아지지 않으면 안됨을 의미한다.

둘째, 보다 복잡하고 精巧한 작업을 效率的으로 遂行하는데 필요한 방대한 자료와 프로그램을 저장하기 위하여, 확장된 메모리 시스템이 필요하게 된다.

세째, 實時間 高速연산기능이 요구되며 精度를 높이기 위해 부동소숫점(Floating Point) 처리및 精密함수의 취급이 가능해야 한다.

네째, 호스트 컴퓨터(Host Computer)와 자료및 명령의 傳達體係(communication protocol)가 確立되어야 한다.

이러한 내용은 현 산업현장에서의 요구에 의한 것이며, 최근 공장자동화를 위해 提唱되고 있는 通信方式의 일례인 MAP(Manufacturing Automation Protocol)[9]에서 개념적 배경을 알아볼 수 있다.

본 글월에서는 로봇트제어기를 직접 설계하거나 또는 變形하여 이용하고자 하는 경우, 이해를 돕기위하여 既存商用로봇트중 성능이 우수한 것으로 알려진 Kawasaki-unimate社의 PUMA560 로봇트 제어기에 대하여 콤퓨터的 구조를 設明하기로 한다.

2 상용 로봇트 제어기의 解折과 그의 心要性

로봇트를 보다 知能的으로 제어한다는 문제를 學問的인 立場에서 보면, 그 研究내용에 따라 더욱 더 많은 기능이 요구되고 있다. 이를 일반적으로 말할 수 있는 것은 아니나, 최근에 조사된 바에 따르면, 기존 로봇트 제어기를 그대로 이용하는 데는 다음과 같은 문제점을 內包하고 있는 것으로 조사 되었다.

첫째, 外部환경변화를 感知하는 센서 즉 視覺, 觸覺, 聽覺, 圧力감지용(vision, tactile, speech, force……) 센서 등의 연결에 의한 센서를 이용한 제어(sensor based control)가 대단히 어렵다.

둘째, 하드웨어(hard ware)의 擴張 및 變更이 容易하지 못하다.

세째, 개발지원장치(developement tool)가 未備할 경우, 필요한 소프트웨어(soft ware)의 作成이 힘들다.

네째, 새로운 로봇트 제어 알고리즘(예, computed torque method, adaptive control, le-

arning control)의 適用이 구조상 불가능 한점.

이상과 같이, 새로운 로봇트 제어기를 개발할 경우, 또는 학문적인 목적을 위해 기존 시스템의 확장, 변경으로 前述한 문제점의 해결을 試圖할 경우, 우수한 상용 로봇트 제어기의 구조 및 기능에 대한 Reverse Engineering적 해석 및 參照가 필요한 것으로 보이며, 設計를 시작하기 전에 먼저 수행함이 바람직하다.

그동안 국내기관중 한국과학기술원[2]~[5], 서울대학교[6] 등에서 發表한 논문 또는 보고서를 보면, 기존 제어기의 상당한 해석이 진행된 것으로 보인다.

대개의 로봇트 제어기는 주중앙처리장치(main cpu), 맨-머쉰 인터페이스 등을 포함하는 High-level부분과 써보회로, 구동장치로 이루어진 Low-level부분의 階層구조(hierachical structure)를 가지고 있다. 따라서 중점적인 분석사항은 이러한 각부의 구조 및 기능에서 부터, BUS의 형태와 연결, 傳送데이타의 형식과 Timing diagram, 나아가 pin by pin 信号해석을 포함하게 되며, 하드웨어와 연관된 Firm ware (주로 Joint servo의 프로그램)와 로보트 언어의 구조와 기능에 관한 소프트웨어적 분석이 될 것이다. 다음 장에서는, 최근 로봇트 제어기의 구성 및 필수기능을 엿볼 수 있고, 보다 나은 제어기의 실현에 도움이 될 것이라는 생각아래, 그동안 필자들의 연구실에 보유중이며, 대표적인 상용 로봇트 제어기로 指称되는 PUMA560 시스템을 대상으로 살펴 보았다.

3 PUMA560 제어기의 概要

3.1 시스템 구성

PUMA560 시스템은 로봇트本體, 제어기, 교시장치(Teach-Box), 터미날, 플로피디스크, I/O 모듈로 구성되어 있다.[7] 이러한 로봇트 시스템 전체를 總括제어 하기 위한 제어용 소프트웨어인 "VAL"이 있으며, 이는 로봇트 동작제어뿐만 아니라 作業프로그램의 작성, 편집, 실행기능 및 시스템監視기능 등이 具備된 고도의 로봇트제어 언어이다. 그외, Teach-Box는 주로 로봇트를 원하는 위치에 수동으로 유도하기 위함이며, 터미날은 VAL과의 대화를 위해, 플로피디스크는 사용자가 작성한 작업프로그램과 위치정보를 保存하기 위한 외부기억장치이다. I/O모듈은 외부장비와의 信号傳達을 위한 인터페이스(Relay Bank)이다.

3.2 로봇트 본체

PUMA560은 인간의 팔을 닮은 형태의 6개의 자유도를 가진 多関節형 로봇트로 대단히 큰 동작영역을 취할 수 있다. 통상 body, shoulder, elbow의 기본 3축을 구동시켜, 위치를 잡은 후 손목부의 3축의 동작에 의해 工具의 작업자세를 결정하게 된다. 각 동작축은 revlute(rotary)타이프로써, 직류써보모터로 구동되며, 현재 위치檢出을 위해 인크리멘탈 엔코더(incremental encoder)가 부착되어 있다.

3.3 제어기의 구성

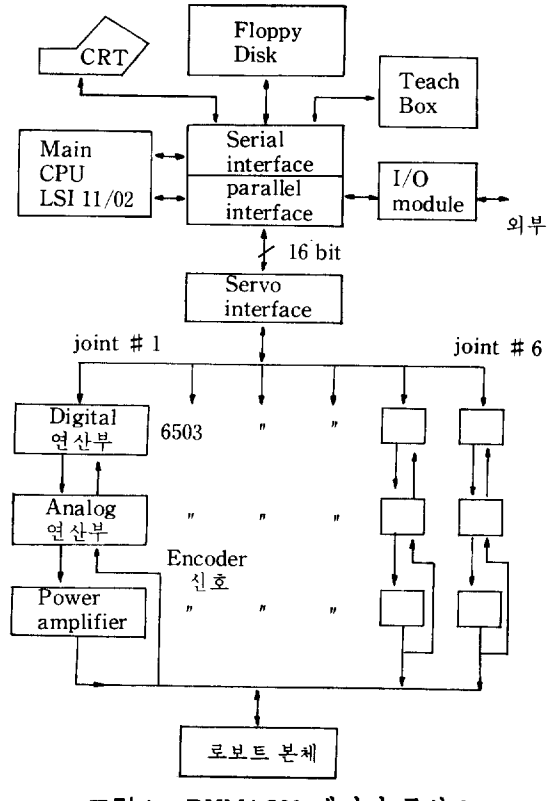

그림 1. PUMA560 제어기 구성도

PUMA560의 제어부는 그림 2 와 같이 구성되어 있다. 주 컴퓨터는 16bit board 컴퓨터인 LSI 11/02를 사용하였고, 메인CPU와 써보회로등 주변장치간의 데이타 전달을 위해 써보 인터페이스 회로가 있다. 써보회로는 디지탈演算部, 아나로그연산부, 電力增幅部로 구성되어 있으며, 이들은 로봇트의 각軸(joint) 당 1조씩 할당되어 있다. Rockwell社의 8bit마이크로프로세서인 6503CPU가 디지탈연산에 사용되었다. 따라서 전체시스템은 교시장치 제어용 인텔社의 8748 one-chip cpu 와 합쳐 모두 8개의 CPU로 구성되어 分散처리를 행하고 있다.

3.4 CPU의 계층적 분산처리

메인 CPU는 작업프로그램을 이해하여 로봇트팔을 움직이는데 필요한 위치(指令値)를 算出해낸 후, 매 28.7msec의 일정시간 간격마다 디지탈 연산부로 출력한다. 디지탈연산부는 엔코더(encoder)신호로부터 얻어진 현재위치와, 메인CPU로부터 내려온 지령치와의 差를 계산해서, 보다 미세한 시간간격으로 로보트팔의 移動量을 결정한후, D/A변환부, 아나로그연산부, 전력증폭부를 거쳐 직류써보모터를 구동하게 된다.

3.5 조작순서와 VAL명령

전원투입후, PUMA에 절대엔코더(absolute encoder)가 없는 관계로, calibration이라고 불리는 조작을 행한다. 이는 로봇트의 현재위치를 인식하고, 위치算出用 엔코더 펄스카운터를 初期化하기 위함이다.

로봇트의 작업순서를 지시하기위해 작성하는 프로그램을 작업프로그램이라 하며, 로봇트의 動作命令(MOVE, APPRO…), 프로그램 제어명령(GOTO, IFSIG…)등을 이용해 작성한 후, 터미날로 부터 入力한다. 프로그램내의 여러 位置데이타는 Teach-Box를 이용, 목표점에 유도하거나, 직접 수치를 입력해서 教示한다. 이와 같이 작성된 작업프로그램이 기대대로인지, 터미날로 표시(LIST…)시키거나, 실제 로봇트를 1스텝(Step)씩 동작(NEXT)시키므로써 확인

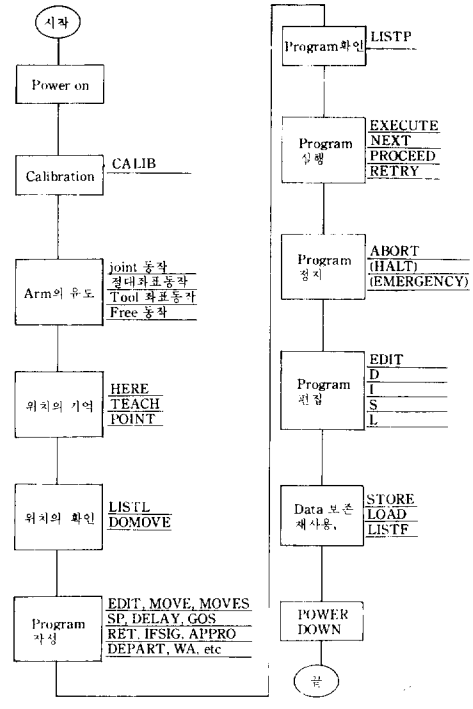

그림 2. PUMA의 조작순서와 VAL명령

하고, 修正이 필요한 경우는 EDIT 기능을 이용해 편집하거나, 再教示로 수정한다. 이런 과정으로 확인될 작업프로그램은 위치데이타와 같이 플로피디스크에 저장(STQRE)해서, 필요시 터미날로 부터 실행(EXEC…)시킬 수 있다.

4 LSI 11/02 주 컴퓨터 시스템

로보트 제어를 위한 주 컴퓨터로 사용된 LSI 11/02 시스템은 그림 4 와 같이 小形(13cm×22cm)의 PCB(printed circuit Board) 6枚로 구성되어 있다.

4.1 LSI 11/02 CPU

LSI 11/02 CPU는 DEC계열의 Pdp11과 동일명령체제를 가진 CPU로써 NMOS chip(40pin) 4개로 구성되어 있다. 이들 chip간의 通信은 22bit 내부 macro-instruction bus와 16bit data/address 선에 의해 이루어진다. 4개의

chip은 각각 레지스터(register), 논리연산유닛 등은 포함한 Data chip과, Instruction decode, interrupt를 관장하는 Control chip, 명령의 실현을 위한 마이크로코드(micro-cobe)를 지닌 2개의 ROM chip으로 나누어져 있다.

4.2 LSI 11/02 BUS

LSI 11/02의 BUS는 다음과 같은 信号線들로 구성되어 있다.

1) data/address line : 16
2) address/parity line : 2
3) 확장 address line : 4
4) 데이타 control line : 4
5) 시스템 control line : 6
6) interrupt/DMA control line : 10

LSI 11/02 bus와 접속된 他 board간의 데이터 통신은 비동기(asynchronous)方式으로 행하여 지므로 데이타의 送受信은 master/save가 있어 master측(즉 LSI11/02)이 제어권을 가지고 있다.

4.3 메모리 部

ROM board는 로봇트 제어프로그램(VAL)을 위한 것이며, RAM board는 로봇트 작업프로그램의 저장과 VAL의 work area를 겸하고 있다. 또한 RAM board는 16Kword까지 실장이 가능하며, 전원off시 메모리 내용을 保存하기 위한 battery back-up 기능도 있다. 그림 5는 PUMA의 메모리맵(memory map)이다.

4.4 인터페이스 部

이 부분은 LSI 11/02와 써보部, 또는 付帶장치간의 데이타송수신을 제어한다. 터미널, Teach-Box, mini-floppy disk의 데이타 송수신은 비교적 장거리이므로, 배선의 간략화를 위해, 직렬접속(Serial Interface : RS-232-C 사양)이며, 써보회로와 I/O모듈간은 고속전송이 가능한 16bit 병렬접속(Parallel Interface)로 되어 있다.

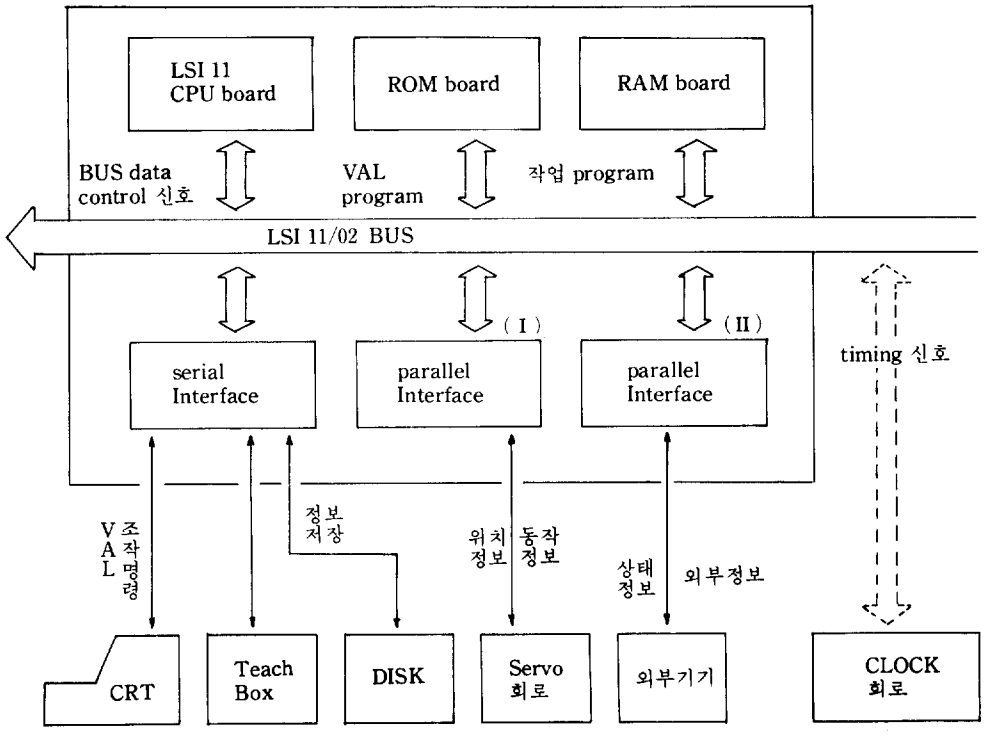

그림 3. PUMA의 LSI 11/02 computer system

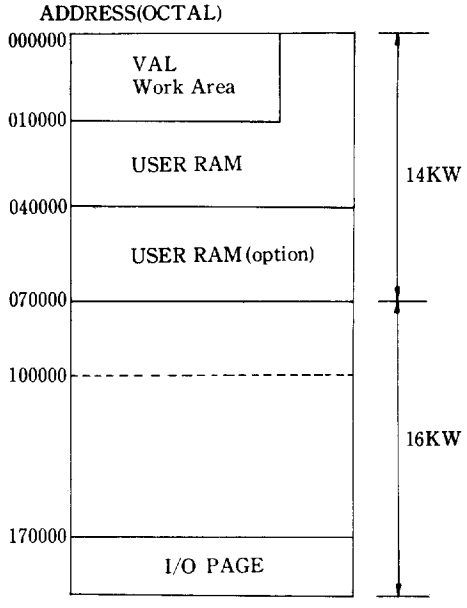

그림 4. PUMA memory map

5 로봇트 言語 "VAL"

VAL은 PUMA시리즈를 위해 개발된 로봇트 전용언어로써, 극히 간단하게 그리고 정확하게 로봇트를 제어함을 目的으로 하고 있다.

5.1 VAL의 特徵

- interpreter형식
- 로봇트 작동중에도 프로그램의 편집이 가능(back ground job)

그림 6 은 VAL시스템의 내부구성을 보여 주고 있다.

5.2 VAL의 기능

VAL은 작업프로그램의 작성, 편집, 실행, 또는 시스템의 상태표시, 진단 등을 행하는 Monitor Command와 로봇트의 동자, 주변기기 제어를 위한 Program Command로 구성되어 있다.

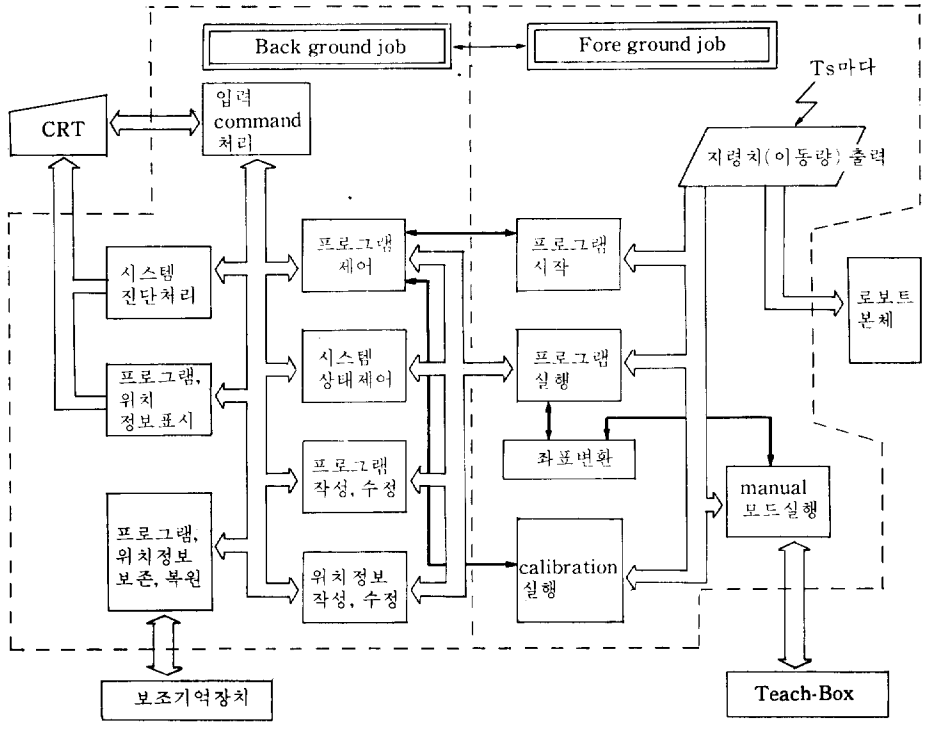

그림 5. VAL시스템의 내부구성도

a. 로보트 동작제어기능-직선補間, 원호補間

b. 수동조작기능-Teach-Box로 유도

c. 프로그램 시퀜스 제어기능- subroutine call 등

d. 프로그램 편집기능-step의 挿入削除, 修正.

그림 7 은 VAL의 기능을 정리한 block圖 이다.

이상과 같이 VAL은 뛰어난 상업용 언어이긴 하지만, 기존시스템의 확장, 수정에는 어려움이 있으며, 그 처리속도가 느리고 복잡한 제어구조의 실현이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

6 조인트 써보 제어장치

조인트 써보 제어장치는 디지탈써보(digital servo), 아나로그써보(analog servo) 및 전력증폭기(power amplifier)로 구성되어 있으며 전체적인 dynamics와 coupling효과를 고려하지 않은 individual joint제어를 행하고 있다. 대부분의 상용 로봇트와 마찬가지로 PUMA의 써보 제어장치 역시, 그 모델의 parameter를 잘 알 수있음에도 불구하고 계산능력의 微弱 또는 경제적인 면을 고려하여, 복잡한 model-based control law의 적용대신에 매우 단순한 방법으로 제어방식을 실현하였다.[8]

6.1 디지탈 써보

디지탈써보의 대략적인 구성은 그림8과 같다. 중요부품으로 6503㎛, 6532RIOT(RAM-I/O Timer), D/A converter, Encoder pulse카운터가 있다. 6503㎛는 각 조인트의 set point를 써보 인터페이스 보드를 통하여 LSI 11/02 C-PU로 부터 받은 다음, 매 28.7msec마다 현재위치와 가야할 위치 사이의 interpolation을 수행한다. 동시에 각축의 운동을 제어하기 위해 매 0.875msec마다 엔코더의 증분치(incremental value)를 저장하는 register의 값을 읽어서 set point와의 誤差신호를 update시켜 D/A converter로 출력한다. 6532 RIOT는 6503㎛에 0,875msec의 기준시간도 제공하며, 펄스카운터는 2개의 up-down counter로 구성되어 모터

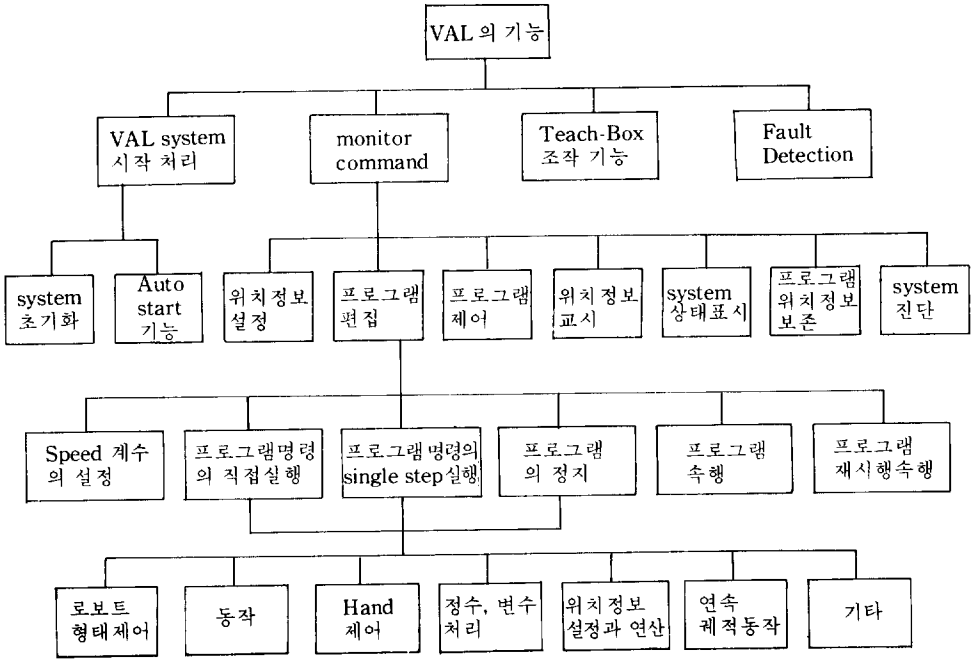

그림 6. VAL의 기능

의 회전각 및 회전방향을 檢出할 수 있다.

6.2 아나로그써보

디지탈써보에서 보내진 위치오차 신호를 아나로그써보에서는 lead－lag보상기와 PID제어기를 거쳐 전력증폭기로 보내지게 된다. 그림 9

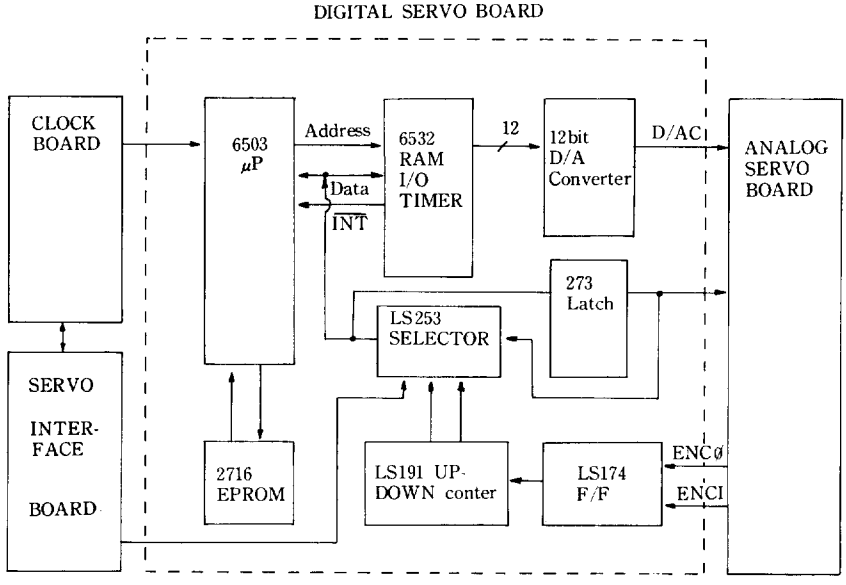

그림 7. 디지탈 서보 구성도

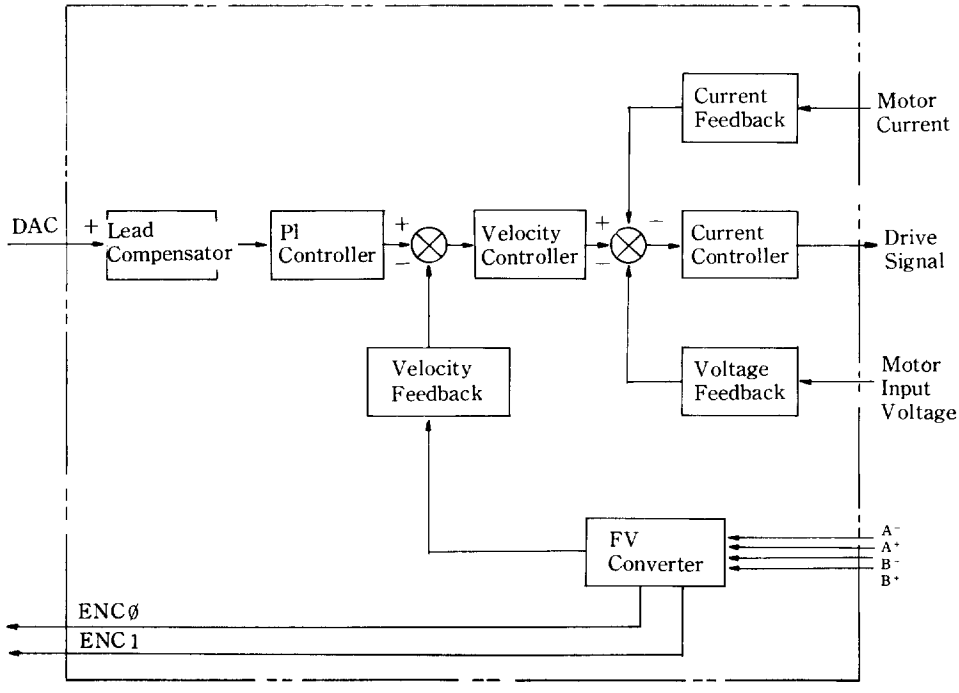

그림 8. 아나로그 서보 구성도

에서 볼 수 있듯이 속도검출용 tachogenerator 대신 FV변환기(Frequency to Votage converter)를 거쳐 속도신호를 feed-back 시킨점이 특색이다.

7 他기종과의 비교

대부분의 상용 로봇트제어기는 서로 유사한 기능 및 구조를 취하고 있으며 부가기능 및 용도에 따라 조금씩 그 내용이 달라짐을 알 수 있다. 표2는 국내에서 개발된 대표적인 용접용 로봇트 NOVA-10의 제어기와 PUMA의 기능을 비교 정리한 결과이다.

표2. PUMA와 NOVA-10 제어기의 기능비교

기종 / 항목	PUMA	NOVA-10
메 인 CPU	LSI11/02(16bit)	MC68000(16bit)
써 보 μp	6503 6개(8bit)	MC68000 1개(16 bit)
교시장치제어	8748	
ROM 용 량	16Kword	64Kbyte
RAM 용 량	14Kword	1280step
로 보 트 언 어	VAL(interpreter) -직선 보간 -원호 보간 -프로그램편집기능	교시 재생 방식 -PTP, CP -직선, 원호 보간 -편집 기능
위치지령시간	28.7msec	100msec
써보샘플링시간	0.875msec	5msec
속 도 검 축	F/V converter	F/V+soft ware
외부기억장치	Disk Driver	cassette
외부연결회로	RS-232c Relay Bank	RS-232c Relay Bank
엔코더타입	인크리 멘탈	인크리 멘탈
자 유 도	6축	6축

8 맺음말

로봇트의 활약에 힘입어 인력의 절감과 생산성을 향상하려는 노력이 각국에서 경쟁적으로 추진되고 있는 이때, 로봇트의 제작 및 활용이 매우 뒤진 현 실정을 고려하면 우수한 상용로봇트 제어기의 개발과 성능개선은 참으로 시급한 과제임이 틀림없다. 따라서 우수한 기존의 로봇트 제어기의 분석은 그 첫 걸음이 될 수 있으며, 이는 새로운 제어장치를 설계, 제작하는데 뿐만 아니라 제어기의 성능개선에도 많은 도움이 될 것이다. 학문적인 입장에서, advanced robat 시스템을 완성하기 위해 tightly-coupled multiprocessor시스템으로 구성된 sensor-based 로봇트 제어기가 요구되거나, 엄청난 계산능력을 지닌 수퍼컴퓨타가 동원될 경우, 또 보다 발전된 구조의 써보제어기의 적용이 필요하는 경우 등에 전체적인 로봇트제어기의 설계, 제작을 시작하기 보다는 우수한 기존의 제어기를 분석, 필요부분을 대체함으로써 같은 효과를 볼 수 있다고 본다.

이렇게 이루어진 기술의 축적이 産學 양면에서 補完이 된다면 우수한 로봇트제어기의 개발은 물론 미래의 기술경쟁에도 많은 도움이 될 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

1) 변증남, 신유식, "F. A의 연구개발동향," 대한전자공학회지, vol. 13, No. 2, pp. 1-4Apr. 1986.
2) 조용철, "산업용 로봇트의 영상궤환 제어를 위한 시각정보처리 시스템의 개발," 한국과학기술원 생산공학과. 1986.
3) 유완식, "PUMA산업용 로봇트의 영상궤한 제어방법," 한국과학기술원 전기및 전자공학과. 1986.
4) 이상열, "PUMA-760로보트의 손목 서보제어장치에 관한 연구," 한국과학기술원 기계공학과. 1986.
5) 문전일, "PUMA-760 로보트의 동적 파라미터 identification에 관한 연구," 한국과학기술원. 1986.
6) 김경환, "VAL-컴파일러를 이용한 로보트 프로그래밍 시스템의 설계," 서울대학교 제어계측공학과. 1986.
7) PUMA560 Technical Manual, Unimation Inc.
8) John. J. craig. Introduction to Robotics Mechanics & Control, Addison-wesley co. 1984.
9) Control Engineering, "The MAP to Automation," 1985. 10월호.