

Embedded system을 적용한 Rotary Inverted Pendulum 설계 및 PID에 의한 구현

*김영춘, **김정훈, **김영탁, **김동한

*한국해양대학교 전자통신공학과, **한국해양대학교 Fuzzy-Neuro laboratory

전화 : 051-410-4907 / 핸드폰 : 016-529-8602

Design of Rotary Inverted Pendulum applying an Embedded System and Implementation by PID

Young-Choon Kim, Jung-Hoon Kim, Young-Tak Kim, Dong-Han Kim
Dept. of Electro. & Comm. Eng., Korea Maritime University
E-mail : spring710@hanmail.net

Abstract

In this paper, we applied a PC interface and an embedded system in order to design a non-linear system and implement the PID algorithm as our control one. We used the inverted pendulum, one of the most generally used non-linear system models, to control uncertain factors in the environment. This paper showed how to use this non-linear system model to control the factors completely as well as to understand the PID algorithm. Furthermore, this paper applied and understood the embedded system.

I. 서론

우리가 생활하면서 마이크로 프로세서로부터 10m를 떨어지기가 어렵다는 말이 있을 정도로 일상 생활에서 마이크로 프로세서는 많은 부분을 차지하고 있다.

본 논문에서는 PC와 임베디드 시스템을 적용하여 회전식 역진자를 제어한 결과를 제시하려고 한다. PC에 의한 제어는 ISA slot에 자작한 I/O 인터페이스 카드를 사용하여 구현하였으며 임베디드 시스템은 Atmel사의 At89c52를 사용하여 구현하였다.

At89c52와 같은 마이크로 프로세서를 사용할 경우에는 프로그램의 크기가 제한적이며 마이크로프로세서를 구동하기 위한 약간의 주변장치가 필요할 뿐만 아니라 PC인터페이스 방식에 비해 프로그램의 재코딩이 비교적 까다로우나 실용적인 측면에서 소형화가 가능하고 프로그램의 탑재가 가능하기 때문에 상업적인 면에서 유리하다고 볼 수 있다. 하드웨어 구성은 크게 제어부와 구동부, 플랜트 세부분으로 구성되어 있다. 제어부는 실험 초에는 PC 인터페이스를 이용하여 제어하였고 원하는 동작을 수행 할 수 있을 때 이를 임베디드 시스템으로 교체하여 설계하였다. PC인터페이스를 사용하여 시스템을 제어할 때는 PC를 기반으로 각종 Data의 처리결과를 모니터상으로 관찰하였으며, 임베디드 시스템으로 교체시는 모니터에 비해 다소 관찰 범위가 협소하지만 LCD로 대체함으로써 Data의 처리 결과를 관찰할 수 있었다. 구동부는 3부분으로 구성되어 있는데 H-bridge를 사용한 모터 구동부, 엔코더에서 들어오는 신호의 CW또는 CCW를 판별하는 회로, 폴의 기울기 정도를 측정하여 카운터하는 회로로 구성되어 있다. 플랜트는 크게 Cart식과 Rotary식으로 구분되는데 이 실험에서는 설계하기 쉽고 외란의 요소가 다소 적은 Rotary식으로 설계하였다. 제어 알고리즘으로는 PID(Proportional Integral Differential)를 적용하여 구현하였다.

II. Roary Inverted Pendulum의 수학적 모델링

Pendulum은 모터로 구동되는 수평 회전축 위에 설치되어 있으며, 적당한 제어 힘이 가해지지 않으면 언제든 쓰러지기 때문에 불안정하다. Pendulum의 질량은 pole의 중심에 있다고 가정하고, 제어 힘은 수평 회전축에만 가해진다. 본 시스템을 제어하는 목적은 시스템에 어떤 외란들이 존재해도 pole을 안정화하기 위해 최적의 제어힘 F를 가하는 것이다. [5,6]

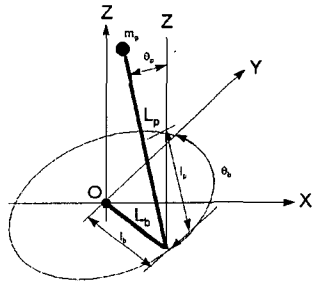


그림 1. 수직진자의 모델도

베이스 링크 L_b 는 원점 O에 있는 모터 축에 연결되어 있고 링크 L_p 는 링크 L_b 의 끝에서 회전 할 수 있도록 구성되어 있다. 모터 회전에 따른 센서의 입력 값은 링크 L_b 가 CW방향으로 회전할 때 입력 값이 증가 하고 CCW방향으로 회전할 때는 입력 값이 감소한다. 다음 식은 원형 역진자 시스템의 각 부분에 대한 위치에너지(PE_{pen})와 운동에너지(KE_{pen} , KE_{base})를 나타내고, m_p 는 진자의 무게, l_b 과 l_p 는 각 링크의 길이, g 는 중력가속도, J_b 은 베이스 링크의 관성을 나타낸다.

$$PE_{pen} = m_p g l_p \cos(\theta_p)$$

$$KE_{pen} = \frac{1}{2} m_p [(\dot{\theta}_b l_b + \dot{\theta}_p l_p \cos(\theta_p))^2 + (\dot{\theta}_p l_p \sin(\theta_p))^2]$$

$$KE_{base} = \frac{1}{2} J_b \dot{\theta}_b^2$$

위의 식을 이용하여 Lagrangian 방정식으로 풀면 다음과 같다.

$$(m_p l_b^2 + J_b) \ddot{\theta}_b + m_p l_b \dot{\theta}_p^2 \cos(\theta_p) - m_p l_b \dot{\theta}_p^2 \sin(\theta_p) = T$$

$$m_p l_p \cos(\theta_p) \ddot{\theta}_b + m_p l_p \sin(\theta_p) \dot{\theta}_b \dot{\theta}_p + m_p \ddot{\theta}_p l_p^2 - m_p g l_p \sin(\theta_p) = 0$$

DC 모터에 의해서 발생하는 토크 T는 다음 식과 같고 u는 플랜트의 입력이다.

$$u = V = IR_m + K_m \omega_m$$

$$T = IK_m = \frac{K_m}{R_m} V - \frac{K_m^2}{R_m} \omega_m$$

여기서 ω_m 은 모터의 회전속도[rad/s]이다.

따라서 시스템 파라미터(표1)에 의해 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_b \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -67 & -25 & 0 \\ 0 & 64 & 12 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_b \\ \dot{\theta}_b \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 47 \\ -22 \end{bmatrix} u$$

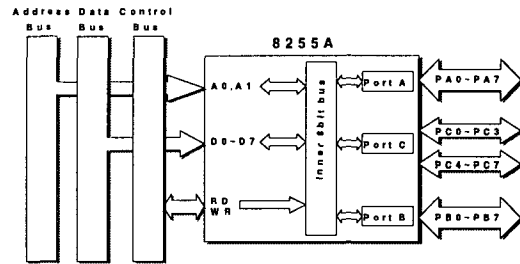
Parameter	기호	수치	단위
베이스 링크의 길이	l_b	0.145	m
베이스 링크의 관성	J_b	0.0044	kgm ²
진자의 길이	l_p	0.305	m
진자의 질량	m_p	0.210	Kg
모터 토크 상수	K_m	0.00767	V/rad.s
모터 전기자 저항	R_m	2.6	Ω
모터 전기자 전압	V	± 5	V

표 1. System Parameter

III. PC Interface

8255는 Intel사의 범용 입출력 인터페이스 디바이스이다. 또한 PPI(Programable Peripheral Interfacing)라고도 하며 3개의 포트에서 8비트 입출력을 할수 있는 범용 Programmable I/O LSI이다.

PC 인터페이스란 PC의 ISA slot을 이용하여 PC와 플랜트 상호간의 신호를 전달해 줌으로써 두 장치를 연결 시켜주는 장치이다. [3]



IV. Embeded system

Atmel사의 AT89C52은 Intel사에서 만든 MCS-51 Family에 속하는 80계열 중에서 8bit 마이크로프로세서 중의 한 계열이다. 8Kbyte의 Flash메모리를 내장하고 있으며 사용자의 용도에 따라 사용하기 편리한 범용 8bit 마이크로 콘트롤러이다. [4]

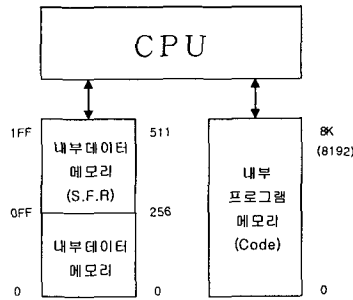


그림 3. At89c52의 메모리 구조

AT89C52의 특징			
FLASH(bytes)	8K	Interrupt source	6
RAM	256	Add/Date bus	Yes
On-chip EEPROM	0	Power down & Idle mode	Yes
Timer/Counters	2	Power supply	4~6
Security lock bits	3	Frequency	0~24
Watchdog Timer	-	Pin count	40/44
Serial uart	Yes	I/O current sink (mA)	10
Analogue comparator	-	Max total I/O	71
I/O pins	32	current sink (mA)	

표 2. At89c52의 내부 특징

V. Hardware의 구성

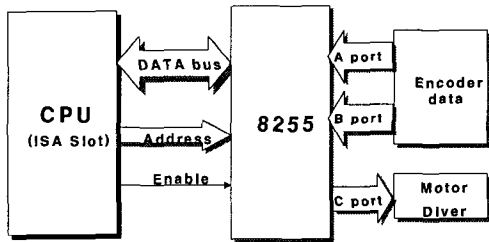


그림 4. PC제어의 간략도



사진 1

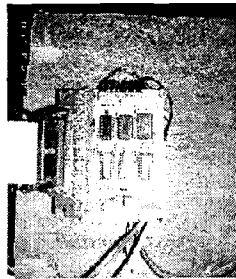


사진 2

그림 4는 PC를 기반으로 한 Interface를 사용하여 시스템을 구성한 블록도이다. 사진 1과 2는 실제 구성된 시스템 및 제어보드이다.

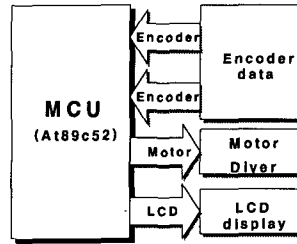


그림 5. MCU제어의 간략도

그림 5는 PC 대신에 Embedded system인 At89c52로 시스템을 제어하기 위한 간략도이다. 사진 3은 실제 사용한 구성도이다.

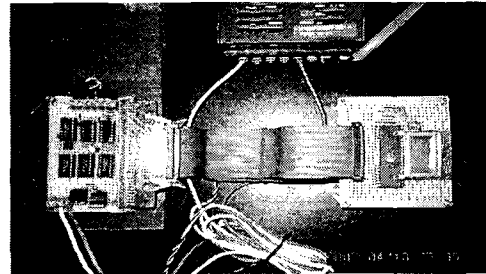


사진 3

VI. Block diagram

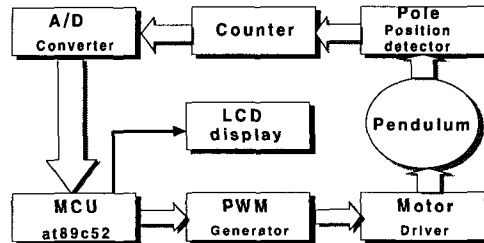


그림 6. MCU에 의한 펜듈럼 제어 블록도

전반적인 동작원리는 Pendulum의 링크에 연결된 Encoder는 Pole의 수직상태를 Sensing하여 그 값을 판별회로에 전달한다. 판별 회로에서는 링크의 기울어진 방향이 CW 또는 CCW인지를 판단하여 결과를 카운터 회로로 전달하고 카운터회로는 판별회로에서 들어오는 펄스를 카운터하여 A/D converter로 넘겨준다. A/D converter는 10bit의 Binary Digital signal을 만들어 PC로 입력한다.

PC에서는 10bit의 Binary Digital signal을 Decimal로 변환하여 연산을 수행하고 그 결과에 따라 PWM신호를 생성하여 Motor Driver단에 공급한다.

Embedded system을 적용시에는 10bit의 data는 At89c

52의 Port1 및 Port2로 입력되어 내부 메모리에 저장된 프로그램에 따라 연산을 수행한 후 Port0로 PWM 신호를 생성하여 출력한다.

VII. Software의 구성

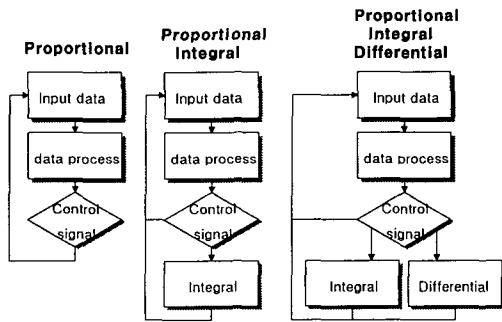


그림 7. PID제어 알고리즘의 흐름도

Flowchart에서 보는 것과 같이 PID제어란 P(비례), P I(비례적분), PD(비례미분)제어를 모두 합해 놓은 것으로써 현재의 제어량은 과거의 미분 및 적분된 오차량에 영향을 받는다는 것이다. 비선형 시스템에서는 보편적으로 PID제어기를 사용함으로써 보다 신속하고 정확하게 제어량을 추출 할 수 있다. [1]

VIII. 실험 및 고찰

Matlab을 이용한 Simulation

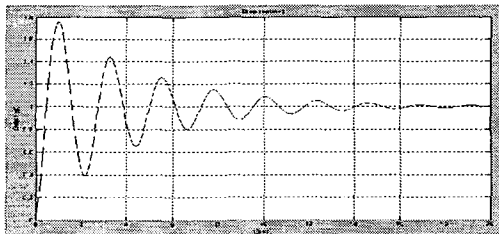


그림 8. 불안정한 시뮬레이션 결과치

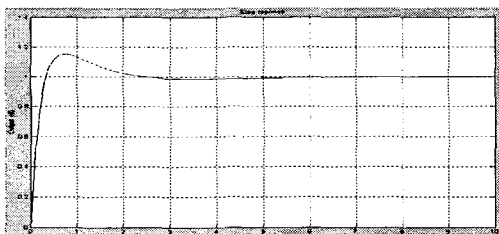


그림 9. 안정된 시뮬레이션 결과치

Matlab을 이용하여 Simulation한 결과 원하는 목표값에 신속히 수렴할 수 있는 전달함수를 구할 수 있었

다. [2]

$$e(u) = Kp * e(n) + Ki \sum_{n=0}^n e(n) + Kd(e(n) - e(n-1))$$

비례함수 Kp는 상승시간을 결정하고 적분함수 Ki는 오버슈트 정도를 결정하며 미분함수 Kd는 최대한 빨리 안정시간에 도달할 수 있는 정도를 결정하였다. 그러나 이 세가지 함수값들이 모두 복합적으로 제어량에 영향을 미치기 때문에 시뮬레이션뿐만 아니라 실제 펜듈럼에 적용하면서 반복적인 실험과정을 통하여 적절한 값을 구한 다음 제어량에 반영하였다.

과거 오차량 e(n), 그전 과거 오차량 e(n)-e(n-1)을 합산하여 현재 오차량 e(u)에 반영한다. [1]

IX. 결론 및 향후과제

본 실험에서 중요한 점은 PC를 이용하지 않고 Embedded 시스템을 적용하여 구현했다는 점이다.

PC로 제어한 경우에 비해 같은 조건하에서 Embedded 시스템을 적용해 펜듈럼을 제어할 경우 약 60%의 제어 성능을 볼 수 있었다. 만약 고속의 임베디드 시스템으로 구현한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

개선해야 할 사항은 Plant의 자체 제작으로 인해 미세한 오차가 많이 발견 됐으며 Motor의 RPM이 비교적 높지 않아 더 정밀한 동작을 구현하지 못했다.

높은 RPM의 Motor를 사용하고 Plant를 좀 더 정밀하게 설계하고 또한 고속의 MCU를 적용한다면 완벽한 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

향후과제는 Pole의 위치 검출 Sensor로 쓴 Encoder없이 카메라를 이용해 화상처리로 Pendulum을 제어해 볼 계획이다.

참고문헌 (Reference)

- [1] Benjamin C. KUO, "Automatic Control Systems", 김수중의 3명, "자동제어", 청문각 1996. 2.
- [2] William J. Paim III, 용호택, 박익근, 박장식 공역, "MATLAB 공학 응용", 아진, 1999. 11.
- [3] 신정환, "초보자를 위한 PC인터페이스 입문 C가미는 로봇 I, II, III", 1998. 8.
- [4] 차영배, "8051기초부터 응용까지", 2000. 1.
- [5] 방은오, "The Control of Rotary Inverted Pendulum using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller", 1999. 2.
- [6] 이주원, "디지털 제어를 이용한 Pendulum 제어"