

ONE-CHIP 마이크로 컴퓨터에 의한 회전형 도립 진자의 Hybrid 제어

김찬성, 김상봉

부산수산대학교 공과대학 기계공학과

Hybrid Control of Rotary Type Inverted Pendulum by Using One-chip Microcomputer

Chan-Seong Kim and Sang-Bong Kim

Department of Mechanical Engineering, National Fisheries University of Busan

ABSTRACT

In the paper, a hybrid control approach for the swing-up control of a rotary type inverted pendulum is treated using one-chip microcomputer. The control approach is composed by a scheduling logic control for swing up control and the linear state feedback control to achieve the desired inverted-state of the pendulum. The experimental system has been implemented by a 16-bit one-chip microcomputer with 3C96 cpu as the digital controller incorporating the above mentioned control approach.

1. 서론

유리주변의 일상생활에서부터 우주선에 이르기까지 마이크로 컴퓨터의 제어적응성에 있어서 무한한 가능성은 그 누구도 예측할 수 없으며, 중형컴퓨터 이상에서 발생하는 정보처리와 문제해결이도 해결할려고 노력하고 있다. 현존어로 본다면 컴퓨터의 모든 기능을 하나의 칩상에 집적하려는 방향으로 마이크로프로세서 기술이 발전해 나갈 것으로 예상된다고 할 수 있으며, 모스프로세서, 소형화, 신뢰성 향상 등의 면으로부터 one-chip형 마이크로컴퓨터가 각종종소형장분야에서 주목을 받고 있다.

본 논문에서 one-chip의 응용을 위한 제어대상으로 택한 도립 진자는 제어이론의 주요분야 중중하는 문제로서 널리 이용되고 있는 실험장비이다. (1) 일반적으로 이용되고 있는 레일형 진자 장치는 레일상의 카트에 진자를 부착시켜 직상형인 역추진 제어에도 적용가능하다. 이와같은 직상형 도립진자 시스템은 이진공통이 아니고 비교적 제어가 용이하다고 할 수 있다. 이에 의해 회전하는 팔끝에 진자를 부착시킨 형태인 도립진자는 팔이 회전계이므로 팔의 각도에 의해서 특성이 변화하는 비선형 동상을 가지기 때문에 그 안정화 제하는 중요하다.

본 논문에서는 일체형 CPU서리즈 중의 하나인 16 bit one-chip, 마이크로 프로세서의 3C96을 제어전용 컨트롤러로 적용하여 그제종소형의 제어와 실험비치드백 제어이론에 의해 회전형 도립진자의 실시간 제어를 실행결과를 보여도록한다.

2. 시스템 표현과 수학적 모델링

회전형 도립진자의 개략도는 Fig. 1과 같다. 시스템은 제한된 각도내에서 회전운동하는 회전팔(A)과 회전팔의 끝부분에 부착되어 회전하는 도립진자(Inverted Pendulum)(B)로 구성되어 있다. (C)는 회전운동하는 팔을 구동시키기 위한 액츄에이터로서, 3상 스텝핑 모터를 사용하고 있다. 회전팔의 회전운동을 안정하기 위하여 포텐셜미터를 사용했으며, 도립진자의 각도를 안정하는 데에는 2000 펄스/회전의 엔코더를 사용하였다.

- θ : 회전각
- μ : 질량
- L : 진장
- g : 중심거리
- J : 관성모멘트
- T : 입력 토크
- β : 점성계수

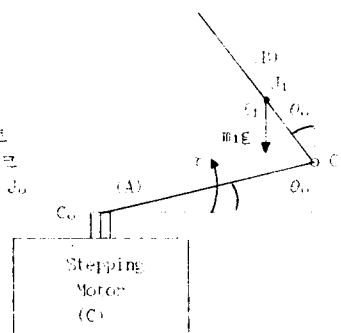


Fig. 1. A Schematic Diagram of Inverted pendulum system.

도립진자의 무게중심의 위치를 각각  $x_1, y_1, z_1$  이라고 할때, 진자의 회전각은 θ 회전팔의 각도에 대해 다음식이 성립한다.

$$\begin{aligned} x_1 &= L \cos \theta \\ y_1 &= L \sin \theta \\ z_1 &= l_1 + \mu g \end{aligned} \quad (1)$$

회전팔과 진자에 대한 운동에너지와 위치에너지  $T_1, U_1$  ( $\dot{\theta} = 0$ )를 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$T_1 = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

$$U_1 = 0 \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \mu l_1^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \mu l_1^2 (\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2) \quad (4)$$

$$U_2 = - \mu g l_1 (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

Lagrange 방정식을 이용하여 풀면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} J_0 + m_1(L_0 + l_1 \sin^2 \theta_1) & m_1 l_1 L_0 \cos \theta_1 \\ m_1 l_1 L_0 \cos \theta_1 & J_1 + m_1 l_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 + m_1 l_1 L_0 \sin 2\theta_1 \dot{\theta}_1 \\ -m_1 l_1 \sin \theta_1 (\cos \theta_1) \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 l_1 g \sin \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이와  $\theta_1$ 를 평형점 부근( $\theta_0 \approx 0, \theta_1 \approx 0$ ) 부근에서 선형화 시켜

$$M \ddot{x} + N \dot{x} = 0$$

$$M = \begin{bmatrix} J_0 + m_1 L_0^2 & m_1 l_1 L_0 \\ m_1 l_1 L_0 & J_1 + m_1 l_1^2 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} C_0 & 0 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix}$$

이후 (6)식을 상태 방정식으로 나타내면

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7)$$

$$y = Cx$$

이 같이 된다. 단,

$$x = [\theta_0 \quad \dot{\theta}_0 \quad \theta_1 \quad \dot{\theta}_1]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -L^{-1} M^{-1} N & -L^{-1} M^{-1} B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -L^{-1} M^{-1} N & -L^{-1} M^{-1} B \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L^{-1} M^{-1} B & L^{-1} M^{-1} B \\ 0 & 0 \\ L^{-1} M^{-1} B & L^{-1} M^{-1} B \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

중요한 파라미터 및 추정된 파라미터는 Table 1에 보여진 것과 같다.

Table 1. Parameters of inverted pendulum system

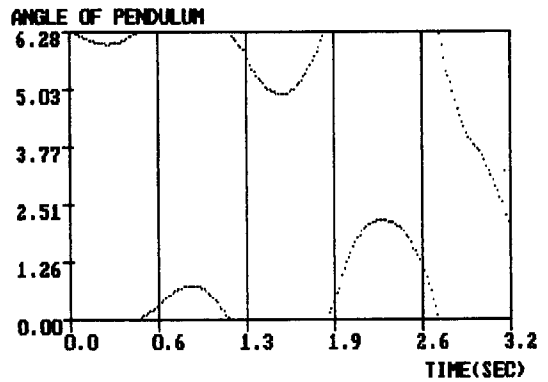
Description	Symbol	Unit	Parameter values	
			Rotating Arm	Pendulum
mass	$m_1$	[kg]	-	0.057
length	$L_1$	[m]	0.105	0.095
length of mass center	$l_1$	[m]	-	0.1925
Inertia moment friction	$J_1$	[kgm <sup>2</sup> ]	0.0094117	0.0025697
coefficient	$C_1$	[Nm s]	0	0.0001636

### 3. 제어시스템 설계

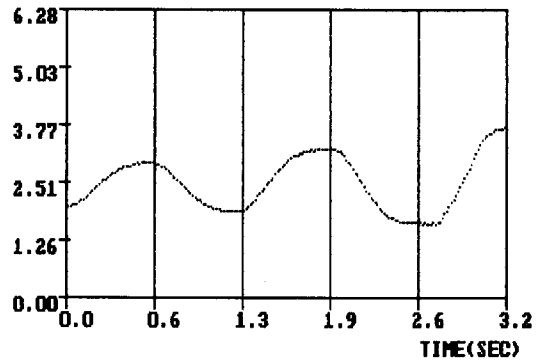
#### 3.1 스케줄링 로직 제어

진자는 스케줄링 로직 제어에 의하여 아래로 그려진 상태에서 swing-up 을 하여 주어진 영역으로 도립을 하게된다. 선

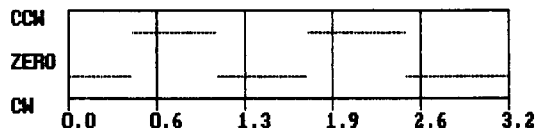
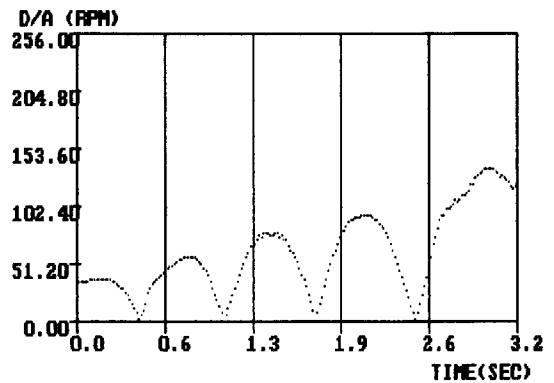
형상제어기로는 제어하기 어려운 비선형성을 제어하고자 인산의 학습에 기초하여 스케줄링 차프를 구성한다. 스케줄링 차프는 Fig. 2에 보여져있 것과 같은 경험적인 실험결과를 기초로 하여 Table 2와 같이 구성하게 되었다.



a) Swing-up angle of pendulum



b) Angle of rotating arm



c) Digital to analog output of stepping motor  
Fig. 2. Experimental result by human institution

센싱이 되는 부분을 회전팔의 각도와 진자의 각도로 될 수 있으나 회전팔의 각도는 무시하고 진자의 각도와 진자의 각속도를 기준으로하여 데이터를 취득하여 Table을 구성한다. 인간이 직접 제어한 상태에서 진자가 흔들림이 발생하는 구간에서 각속도가 반대로 발생할 때는 반대의 속도를 가해주는 현상을 볼 수 있을 것이다. 이러한 현상을 Pumping 효과라고 한다. 이 이것은 진자가 도입하기 위한 주된 개념이며 프로그램을 하기 쉽도록 하기위해서 그 제어변수로써 진자의 각도를 9개로 정의하고 진자의 각속도를 7개로 분류하여 작성하였다.

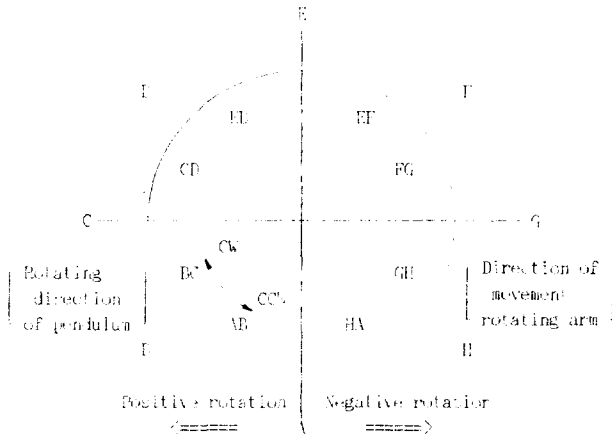


Fig. 3. Angular range of inverted pendulum

Table 2. Scheduling logic chart

		Angle of inverted pendulum								
		A	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GH	HA
A	OP	180	150	130	70	40	-40	100	130	150
a	PL	-150	-150	150	50	30	-50	160	150	-130
e	PM	-130	10	-130	50	20	-30	-90	-120	-110
a	PS	-110	20	20	40	10	-10	-70	-90	-80
r	ZO	70	50	60	0	0	0	-50	-60	-50
c	NS	110	80	90	-40	10	-10	-70	-30	-20
i	OM	130	110	120	-50	20	-20	-90	130	-10
t	NL	150	130	-150	-60	30	-30	-160	-150	110
y	OR	-180	-150	-130	-70	40	-40	-200	-190	-150

여기서 각도는 45도씩 구분하였으며 각속도는 OP(Over Positive), PL(Positive Large), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NL(Negative Medium), NL(Negative Large), OR(Over Negative)로 분류하였다. Table 2의 각도와 각속도의 관계에 의해서 B-A 변환하여 구분도서의 입력으로 되게 된다.

### 3.2. 최적제어계 구성

본 실험에서는 Table 2의 로직제어에 의해 진자가 도입하여 진자의 범위내로 진입하였을 때 다음의 최적제어계 구성에 의해서 진자의 도입상태 제어가 이루어지게 된다.

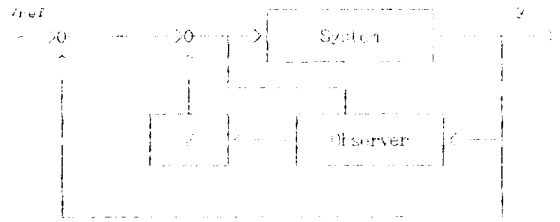


Fig. 4. Block diagram of control system

측정한 Table 2의 파라메터 값에 의해서 상태방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} C & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.9370E & 0 & 0.0000025 \\ 0 & 24.458E & 0 & -0.000717 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 204.79785 \\ -57.15679 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

각각의 상태방정식에서 측정되지 않는 나머지의 상태량을 관측하기 위하여 다음의 최소차원관측기를 설계한다. 관측기의 극을 [-10, 0 -20, 0]으로 하고 Sampling Time을 0.02 sec로 하여 최소차원관측기를 구하면

$$A = \begin{bmatrix} 0.61873 & 0 \\ 0 & 0.67931 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1.8125924 & -0.1032197 \\ 0 & -1.1802301 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 10 & 0.00018049 \\ 0 & 19.966183 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 4.05221336 \\ -0.90320346 \end{bmatrix}$$

와 같이 된다.

제어식은 최적제어계 설계법에 의해서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F = [-1.0 \quad -12.7738964 \quad -0.51376327 \quad -2.04903651]$$

이때 하중함수는 각각 Q=I, R=I로 두었다.

## 4. 실험장치의 개요

Fig. 5은 One-Chip 컴퓨터를 이용하여 실제적으로 도입진자의 안정화 제어를 실행하는 장치를 모식적으로 나타낸 것이다. 구동용 모터로서 스테핑 모터(Stepping Motor Co., DC1.4A, EM599-1A)를 사용하였으며, 스테핑 모터의 축에 도입진자를 설치하기위해 자각봉을 직립시키고 진자의 회전각도는 자각봉에 설치되어 진자와 축으로 연결된 회전형 엔코더로 출력 펄스수를 카운트하여 각도를 센싱하고 회전팔의 회전각도는 포텐쇼메터로부터 A/B 변환을 거쳐 센싱한다. 도입진자의 제어용 프로그램은 16비트 퍼스널 컴퓨터를 호스트 컴퓨터로 하여 8096에 대응하는 어셈블러로 코딩되어, One-Chip 컴퓨터의 소프트웨어 개발 전용 집적회로인 ASM-96을 사용하여 주소화일을 컴파일한 후, KS-232C 포트를 통하여 One-Chip 컴퓨터의 메모리에 데이터를 로딩한다. 이와같은 상태에서 One-Chip 컴퓨터는 하나의 독립된 컴퓨터로서 역할을 수행하게 된다.

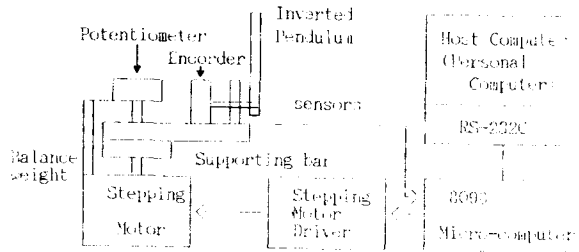


Fig. 5 Block diagram of experimental setup

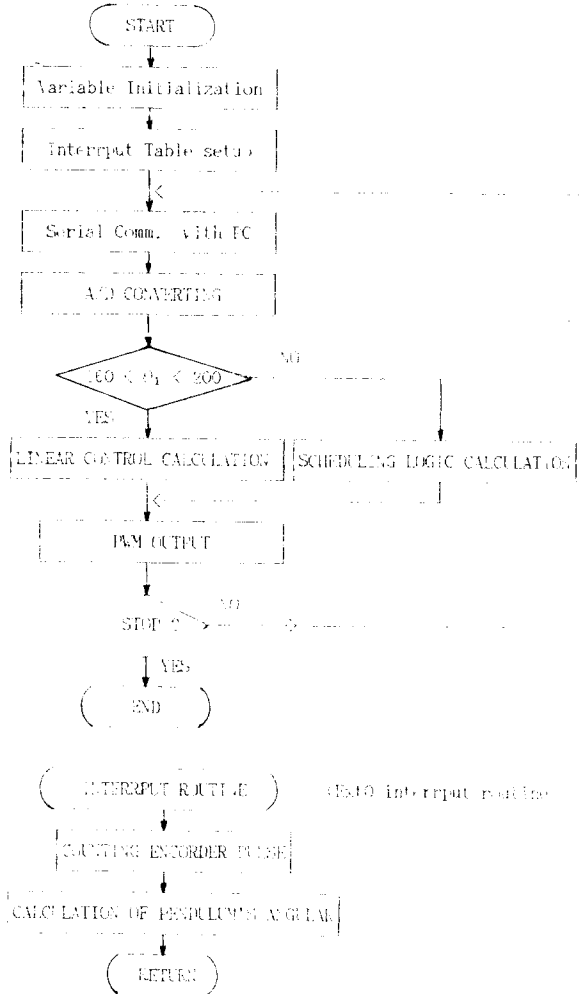


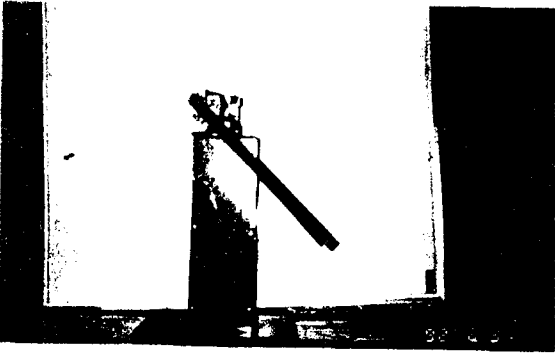
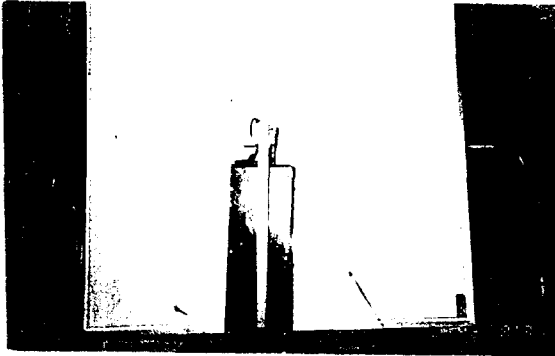
Fig. 6 Inverted pendulum control logic flow chart

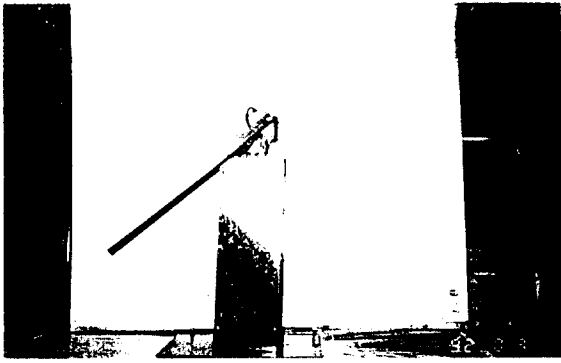
5. 결론

본 논문에서는 인텔계 CPU 시리즈중의 하나인 16비트 인텔이 이므로 프로세서 8096을 제어연용 용도로써 하고 Hybrid 제어 방식인 스케줄링 로직과 선형제어 이론이 적용하여 회전형 모션 컨트롤러 만능화 제어를 통한 그 실제 응용 대상으로 하여 실시간 제어에 대한 실험을 통한 본 실험결과로 미루어 보아, 지금까지 퍼스날 컴퓨터 이상의 레벨에서 선형제어 이론이 적용되어 오던 그 한계성을 탈피하여 컨트롤 전용 one-chip 마이크로 프로세서로 얼마든지 실현제가 실현될 수 있다는 것을 확인할 수 있는 계기가 되었다.

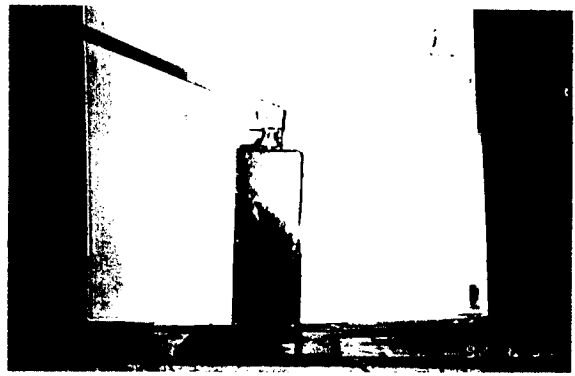
참고문헌

- [1] Chin E. Lin and Tai-Lun Shyu, "A Hybrid Control Approach For Inverted-Car Control", 1988, '01, pp.461 - 465
- [2] Masaharu S. Kobayashi, "A NEW INVERTED PENDULUM APPARATUS FOR EDUCATION", Proc. of IFAC Control Education Conference, 1991
- [3] Y. Miyazaki, "AFC 適應制御", Computers, 1, No. 32
- [4] Masaharu S. Kobayashi, "創立電子制御システム適應制御", Computers, 1, No. 32
- [5] Dudley, J. L. and T. King, "Fuzzy Controller Theory: Limits - Theorem for Linear Fuzzy Control Rule", Vol. 15, No. 1, pp. 409-472, 1989.
- [6] Farvia, E. Behar, M. and B. Imbehuen, "Digital Computer Control of a Triple Inverted Pendulum", Optimal Control Applications & Methods, Vol. 11, pp. 157-171, 1990.
- [7] Furuta, K., H. Kajiwara and K. Kosuge, "Digital control of a Double Inverted Pendulum on an Inclined rail", IET, J. Control, Vol. 32, No. 5, pp. 907-924, 1980.
- [8] Furuta, K., T. Ochiai and S. Uno, "Attitude Control of a Triple Inverted Pendulum", IET, J. Control, Vol. 30, No. 6, pp. 1051-1065, 1984.
- [9] Anderson, B. and J. S. Van, "Linear Optimal Control System", John Wiley & Sons, 1977.
- [10] Mori, S., H. Nishikawa and K. Furuta, "Control of Inverted Mechanism System Control of pendulum", IET, J. Control, Vol. 23, No. 5, pp. 679-693, 1975
- [11] Franklin, Gene F., J. David David and Abbas Gamiel, "Modern Control of Dynamic System", Addison-Wesley, 1986.

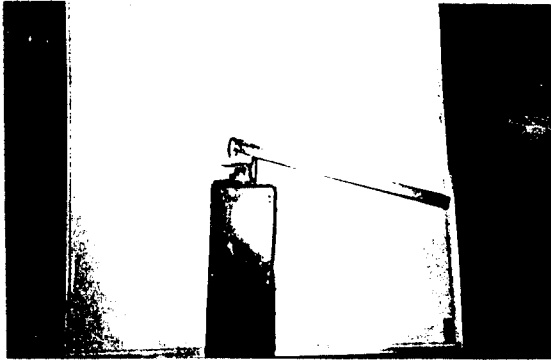




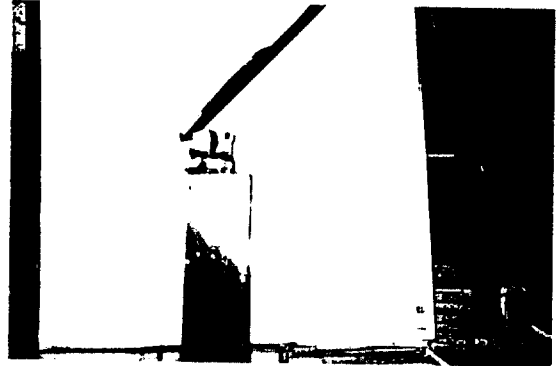
3



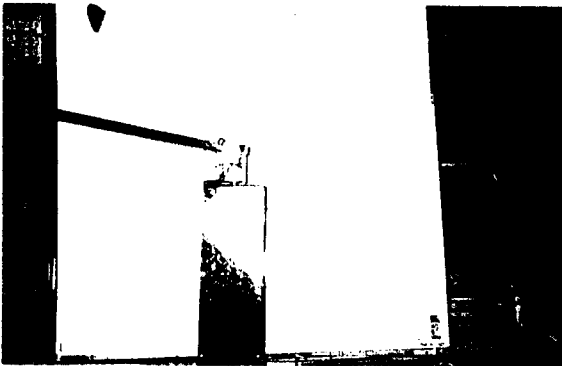
7



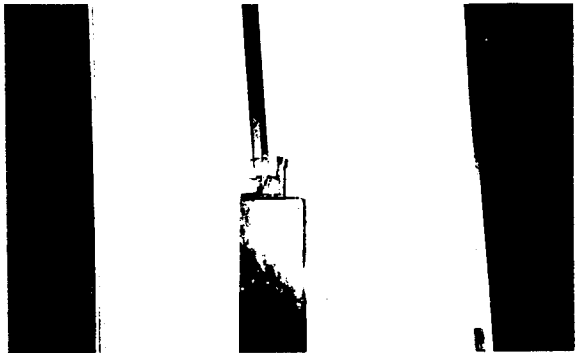
4



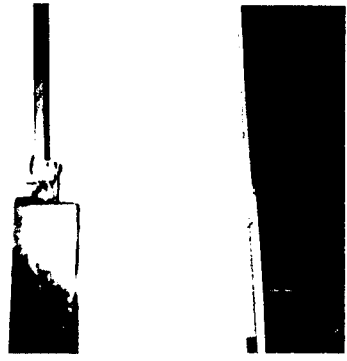
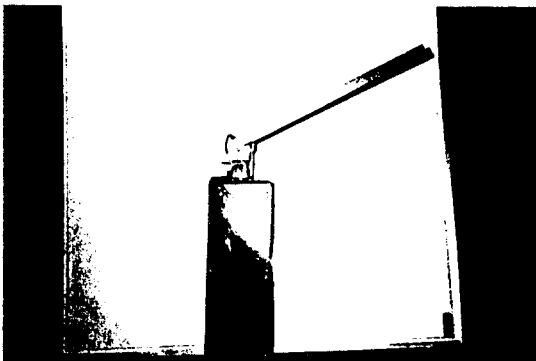
8



5



9



10

Fig. 3 The photograph of the movement of the pendulum during the control