

압전소자에 의한 미세이송시스템의 개발에 관한 연구
Development of Piezo-Electric Micro-Depth Control System

김 동 식*, 김 정 두 (KAIST)
Dong-Sik Kim*, Jeong-Du Kim

Keywords: Piezo-Electric Material(압전소자), Piezoelectric Voltage Feedback(압전 전압피드백), Hysteresis Loop(이력 곡선), , Micro-Depth Control System(절입깊이 미세이송시스템)

ABSTRACT

A micro positioning system using piezoelectric actuators have very wide application region such as ultra-precision machine tool, optical device, measurement system. In order to keep a high precision displacement resolution, it is useful to take a position sensor and feedback of the error. From the practical point of view, high-resolution displacement sensor systems are very expensive and it is difficult to make such a sensitive sensor work properly in a poor operational environment of industry.

In this study, a piezo-electric micro-depth control system which does not require position sensor but piezoelectric voltage feedback, has been developed. It is driven by hysteresis-considering reference input voltage calculated in advance and actuator/sensor characteristics of piezoelectric materials. From the result of experiments, a fast and stable response of micro-depth control system has been achieved and an efficient technique to control the piezoelectric actuator suggested.

----- **Nomenclature** -----

A [m^2]	: 압전소자의 단면적	b [mm]	: 힌지폭
C_o [μF]	: 압전소자 정전용량	D_e [N/sec]	: 압전소자 등가감쇠계수
d_{33} [m/V]	: 압전상수	E [N/m ²]	: 힌지 탄성계수
F_1 [N]	: 외부하중	K_f [N/V]	: 압전소자 등가힘계수
K_e [N/m]	: 압전소자 등가스프링상수	k [N/m ²]	: 압전소자 탄성계수
k_h [N/m]	: 힌지 강성	L [mm]	: 힌지간 거리
l [m]	: 압전소자 길이	M [Kg]	: 하중

M_c [Kg]	: 압전소자 등가질량	R_o [Ω]	: 구동전원 출력측 저항
r [mm]	: 노취반경	t [mm]	: 힌지홀사이 두께
U [m]	: 압전소자 변위	V_i [V]	: 입력전압
ϵ_3 [F/m]	: 압전소자 유전율	ρ [g/Cm ³]	: 압전소자 밀도

1. 서론

최근, 항공 우주산업, 메카트로닉스 산업 등의 발달로 인해 자기디스크용 알루미늄의 경면 다듬질 가공 등은 고부가 가치 기술로써 매우 중요하게 인식되고 있으며, 이러한 초정밀 가공을 위해 절삭 깊이가 마이크로미터 이하에서 이루어질 수 있는 미세 이송 능력을 가진 공작기계가 요구되고 있다. 미세 이송 기구로 대표적인 것 중의 하나는 압전 소자를 이용한 미세 이송 기구라 할 수 있으며, 마이크로미터 이하의 이송 분해능을 낼 수 있고 기계적 이송 장치에서 발생하는 백래쉬, 스틱슬립등의 문제점을 해결할 수 있는 장점으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 큰 발생력을 낼 수 있는 적층형 압전 소자를 이용한 것에는 연삭기의 연삭깊이 미세 조절용 연삭테이블⁽¹⁾, 주사 터널링 현미경의 탐침 이송 기구^(2,3), 동흡진 장치^(4,5) 등이 있으며 기하학적으로 큰 변위를 일으킬 수 있는 바이몰프형의 경우에는 하드디스크 헤드 지지용 외팔보계의 진동제어 등에 응용되어 왔다.

이들 시스템의 공통적인 특징은 압전소자의 미세 변형 특성을 이용한 것으로, 압전소자의 큰 이력을 극복하기 위해 위치 제어시 변위 센서를 사용한 폐루프 제어를 한다는 것인데, 시스템을 실용화 한다는 관점에서 볼 때, 높은 분해능의 변위 센서를 사용함으로써 시스템의 제작 비용이 고가이고, 또한 열악한 현장의 사용 환경을 고려해 볼 때 고정도의 변위 센서가 제대로 성능을 발휘하도록 하는 것도 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 압전소자의 액츄에이터 및 센서의 성질을 이용하여, 별도의 변위 센서를 사용하지 않고, 안정적인 미세 이송을 할 수 있는 구동장치로써 초정밀 선반에 이용되는 절입깊이 미세이송 시스템을 개발하였다.

2. 압전구동 미소이송 시스템의 제작 및 실험

Fig.1은 설계되어지고 제작된 압전소자에 의하여 구동되는 미소이송 시스템 몸체의 사진과 개략도를 나타낸다. 본 이송시스템은 자기디스크 가공 전용 초정밀 선반⁽⁶⁾의 X축 슬라이더에 장착이 되도록 설계되었으며 천연단결정 다이아몬드 공구가 장착이 되도록

하였다. 다이아몬드 공구는 탄성힌지에 의해 수평운동이 보장되는 기구적 메카니즘을 채용하였으며, 압전전압 궤환 방식으로 제어되고 발생변위의 확인용으로 와전류형 간극 센서를 사용하였다. 그림에서 보는 것처럼 압전소자에 불과 스크류를 이용하여 초기 예압을 줄 수 있도록 하였다.

Fig.2는 힌지의 설계시에 이용되는 평행스프링을 나타낸 것으로 본 연구에서는 힌지의 설계시 강성이 $50\text{N}/\mu\text{m}$ 이 되도록 하였고 상세 치수는 식(1)의 평행 스프링 식⁽⁷⁾에 의하여 결정하였다.

$$k_h = \frac{8Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}L^2} \quad (1)$$

본 연구에서 제작된 미소이송시스템 힌지의 각 변수값은 각각 $b=20(\text{mm})$, $t=3(\text{mm})$, $r=1.7(\text{mm})$, $L=12(\text{mm})$ 이었다.

Fig.3은 전체 압전구동 미소이송 시스템의 개략도를 나타낸다. 486 IBM-PC를 이용하여 압전전압, 미소이송시스템의 변위, 동작기계의 진동등의 신호를 모니터링하고, 인가전압의 형태를 조절 하여 압전구동기를 가진시키거나, 압전소자의 이력을 고려한 전압을 인가할 수 있도록 하였다. 압전 구동기의 드라이버 내부에는 고전압용 연산증폭기를 사용한 압전소자 구동용 전원과 압전전압 분리용 감산회로, 센서의 증폭기등이 있으며 A/D, D/A 변환기를 통하여 컴퓨터와 접속되어 있다. 압전소자 구동전원으로부터 순수 압전 전압을 산출하기 위해 연산증폭기(Op-amp)의 차동감산 회로로부터 압전전압을 궤환 받는 회로를 구성하였다.

3. 압전소자 미소이송시스템의 모델링

압전소자란 힘 또는 압력이 인가되었을 때 전하가 발생하는 재료의 압전성(Piezoelectricity)으로부터 이의 역효과인 전왜(Electrostric -tion)현상을 이용한 것으로 특징적인 사항은 외부 부하가 발생하면 압전효과에 의해 발생된 전하가 궤환되어 출력변위에 영향을 미치는 것인데, 이것은 모터에서 역기전력(Back Electromotive Force)으로 인한 유도 전압의 발생과 같은 현상이 압전구동기에서도 발생한다.

압전구동 장치는 Fig.4(a),(b)에 나타난 바와 같이 압전방정식과 힘의 평형 방정식에 의해 기계적으로는 등가 2차 시스템으로, 전기적으로는 압전소자 구동용 전원의 출력측 임피던스와 압전소자의 정전용량을 고려하여 1차 시스템으로 모델링 할 수 있다. 이 시스템을 Fig.5와 같은 블록선도로 나타낼 수 있으며 앞에서 언급한 것처럼 외부하중에 의한

압전소자의 탄성적인 변형 외에 압전전압이 구동기 앰프에 영향을 미침을 알 수 있다. 전반적인 압전구동 장치의 특징은, 구동기에 외란(FI)으로서 힘이 작용하면 비례적인 역전압이 발생하여 구동기 앰프의 출력전압을 저하시키며, 인가된 전압을 그에 상당하는 변위로 전환시켜 주는 척도를 나타내는 압전상수(d_{33})와 압전소자의 정전용량(C_0)이 인가전압의 크기에 따라 변하므로 압전소자의 발생변위에 이력을 일으키고, 동적 거동에서 비선형 특성을 나타낸다는 것이다. 즉, 압전구동기의 위치제어에 있어서 해결해야 할 문제는 이력(Hysteresis)과 압전전압에 의한 출력전압의 섭동(Fluctuation)으로 요약될 수 있다.

출력전압의 섭동을 해결하기 위한 방법으로는 압전소자가 액츄에이트뿐 아니라 센서로서도 많이 응용된다는 것에 착안하면, 압전구동기 앰프의 출력 중 압전전압을 측정하여 외란의 크기를 알 수 있다. Fig.6과 같이 압전전압은 압전소자의 특성상 정적인 하중에 대해서는 전압이 발생하지 않기 때문에 적분제어를 사용하여 하중 인가시 발생하는 구동기 앰프의 출력전압 강하를 피드포워드제어로서 보상해 줄 수 있다. 식(2)에 보상기를 부가하였을 때의 전달함수를 나타내었다.

$$U(s) = \frac{K_f(Ts+1)}{T^2 Ms^4 + (T^2 D_e + 2TM)s^3 + (T^2 K_e + 2TD_e + M)s^2 + (2K_e T + D_e)s + K_e} V(s) - \frac{T^2 \{1 + 2P\}s^2 + T\{2 + P(3 - K_e)\}s + \{1 + P(1 - TK_e)\}}{T^2 Ms^4 + (T^2 D_e + 2TM)s^3 + (T^2 K_e + 2TD_e + M)s^2 + (2K_e T + D_e)s + K_e} F_i(s) \quad (2)$$

여기에서,

$$K_f = \frac{\hat{k}d_{33}A}{l} V_i, M_e = \frac{\rho Al}{2}, K_e = \frac{\pi^2}{8l} \hat{k}A, \frac{\hat{k}}{k} = \left(1 + \frac{\hat{k}d_{33}}{\epsilon_3}\right), M + M_e \approx M, P = \frac{8K_f^2}{\pi^2 C_0 K_e}$$

여기서, 외란으로 인한 오차를 제거하기 위해 제어게인을 설정해야 하는데, 적분게인은 식(3)에 의해 설정되며, 비례게인은 시스템의 천이영역에서의 거동에 영향을 미치며 적분게인의 1%로 하였다.

$$1 - \frac{8K_f^2 K_i R_0}{\pi^2 K_e} = 0, K_i = \frac{\pi^2 K_e}{8K_f^2 R_0} \quad (3)$$

위의 시스템은 개루프 시스템이고 시스템의 극점이 S평면의 오른쪽 반면에 속하므로 안정하다고 할 수 있다. 압전소자의 물성치와 시뮬레이션의 변수들은 Table 1,2에 설정계인은 Table 3에 나타내었으며, 시뮬레이션시의 감쇠계수는 압전소자의 이력곡선으로부터 구한 등가 점성감쇠계수를 사용하였다.

Fig.7에 시스템의 계단함수 입력에 대한 응답을 나타내었다. Fig.7(a)는 피드 포워드 보상기를 부가하지 않았을 때의 응답이며, Fig.7(b)비례적분기로서 피드포워드 보상기를 부가하였을 때의 응답으로 시스템의 천이영역에서의 거동이나 응답속도는 큰 차이가 없

고 외란으로 인한 오차만이 보상기를 설치하였을 경우는 제거된 것을 알 수 있다. 외란으로 인한 오차 보정을 위해 제어계인을 설정할 경우 위와 같이 압전구동기에 아무런 구속 조건이 없다고 가정하고 그 값을 구하면 된다.

그런데, 실제로 압전구동 장치를 설계할 경우 압전소자 위에는 Fig.4(a)에 나타난 것처럼 질량체를 압전소자에 설치하거나, 스프링등으로 예압을 주어 사용하게 된다. 따라서, 변위가 발생하면 압전소자 위에 설치된 질량체의 무게에 비례하는 힘이 발생한다. 이것은 Fig.8에 나타난 블록선도에서처럼 변위가 궤환이 되는 효과가 나타나게 되며 여기에 외부하중의 작용이 중첩된다.

압전구동기 시스템에 제어기를 부가하지 않은 시스템의 전달함수를 식(4)에 나타내었다.

$$U(s) = \frac{K_f}{TM_s^3 + (TD_e + M)s^2 + \{TK_e + D_e + K_m T(1+2P)\}s + \{K_e + K_m(1+P)\}} V_i(s) \quad (4)$$

$$- \frac{T(2P+1)s + (1+P)}{TM_s^3 + (TD_e + M)s^2 + \{TK_e + D_e + K_m T(1+2P)\}s + \{K_e + K_m(1+P)\}} F_i(s)$$

Fig.9는 궤환효과를 고려한 시스템의 근궤적선도와 계단함수 입력에 대한 응답이다. 계인의 크기에 상관없이 시스템은 안정한 것을 볼 수 있다. 계단함수 입력에 대한 응답도 앞의 궤환효과를 고려하지 않은 것과 거의 유사하므로 궤환효과가 매우 작음을 알 수 있으며, 외부하중 발생시에는 여전히 오차가 존재한다. Fig.10에 보상기를 포함시킨 블록선도를 나타내었으며, 이는 3중 궤환루프를 이룬다. 외란에 의한 블록선도는 Fig.11에 나타내었으며, 부가한 보상기는 기준 입력에 대해서는 피드백으로 외란에 대해서는 피드포워드로 작용한다. 압전구동기에 보상기를 부가하고, 변위 발생에 의한 힘의 궤환작용을 고려한 완전한 전달함수를 식(4)에 나타내었으며 Fig.12에 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

$$U(s) = \frac{K_f(Ts+1)}{T^2Ms^4 + (T^2D_e + 2TM)s^3 + \{T^2K_e + 2TD_e + M + T^2K_m(1+2P)\}s^2 + \{2K_eT + D_e + TK_m(2+3P - PK_e)\}s + \{K_e + K_m(1+P - TPK_e)\}} V_i(s) \quad (5)$$

$$- \frac{T^2(1+2P)s^2 + T\{2+P(3-K_e)\}s + \{1+P(1-TK_e)\}}{T^2Ms^4 + (T^2D_e + 2TM)s^3 + \{T^2K_e + 2TD_e + M + T^2K_m(1+2P)\}s^2 + \{2K_eT + D_e + TK_m(2+3P - PK_e)\}s + \{K_e + K_m(1+P - TPK_e)\}} F_i(s)$$

근궤적선도에 나타난 외란에 의한 영향을 시스템의 안정성에 영향을 미치지 못하지만 기준입력에 의한 응답은 힘의 궤환작용의 크기를 나타내는 계수 K_m 이 6.1249×10^6 이상 이 되면 시스템이 불안정해지는 것으로 나타났다. 38V, 30N의 계단함수 입력에 대한 응

답은 보상기를 부가하였기 때문에 외부하중 발생으로 인한 오차가 제거되는 것을 알 수 있다.

Fig.13은 인가전압을 108V까지 점진적으로 증가시킨 후 다시 0V로 감소시켰을 때 나타나는 압전 구동테이블의 이력실험 결과를 하중이 가해지지 않았을때와 탄성한지의 압축력을 받고 있을때의 경우를 나타내었다. 압전소자도 기계적인 관점에서 볼 때 고유의 강성과 점성계수를 가진 탄성체이므로 하중이 가해지면 발생변위가 감소한다. 위 실험결과로부터, 압전소자에 가해지는 예압의 상태에 따라 신장량이 변하므로 같은 크기와 용량의 압전소자를 사용하더라도 적용 시스템에 따라 이력을 없애기 위한 이력곡선의 기준이 달라져야 한다는 것을 알 수 있다. 다음의 식(6)은 이력곡선을 모델링한 것으로 상수 값들은 표4에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 U(V) &= F_{1i}V^5 + F_{2i}V^4 + F_{3i}V^3 + F_{4i}V^2 + F_{5i}V + F_{6i} \quad (Forward) \\
 U(V) &= B_{1i}V^5 + B_{2i}V^4 + B_{3i}V^3 + B_{4i}V^2 + B_{5i}V + B_{6i} \quad (Backward) \quad (6) \\
 i &= 1,2, 1:= Free load, 2:= Loaded 100N
 \end{aligned}$$

4. 실험결과 및 고찰

Fig.14는 38V의 계단함수 입력이 가해질 때의 응답을 나타낸다. (a), (b)는 변위궤환에 의한 응답을 (c), (d)는 압전전압 궤환에 의한 응답을 3 mm 지점에서부터 외란이 발생하도록 한 경우와 함께 나타내었다. 시뮬레이션에 비해 변위궤환에 의한 경우는 정상상태에 도달하는 시간이 5배정도 실험치가 늦게 나타났고, 변위궤환에 의한 경우는 3배정도 실험치가 늦게 나타났으며, 천이 영역에서의 거동은 실험치가 시뮬레이션에 비해 오히려 우수하게 나타났다. 응답속도에 대한 실험결과와 시뮬레이션과의 차이는 압전소자 구동전원의 출력측 임피던스와 압전소자의 정전용량이 실제 시스템이 시뮬레이션을 할 때 정한 값보다 다소 크게 나타났기 때문인 것으로 생각된다. 천이영역에서 감쇠계수가 실제 시스템이 더 크게 나타나 거동이 보다 안정적인 것은 시뮬레이션에서 감쇠 계수 설정을 압전소자의 이력 곡선이 둘러싼 부분을 에너지 손실량이라 가정하고 구한 등가감쇠계수를 사용하였는데 그것이 실제 시스템과 오차를 보였기 때문이라 생각된다. 또한, 변위궤환과 압전전압 궤환에 의한 응답을 비교하면 압전전압 궤환에 의한 방법이 입력

전압의 궤환효과에 의해 응답속도가 빨라 압전전압 궤환에 의한 위치제어 방법이 매우 효과적인 제어방법임을 알 수 있다.

Fig.15는 구동기의 입력단에 차단 주파수 500Hz인 저주파 통과 필터를 부착한 후 시스템의 스텝 응답으로서 Fig.13의 실험에 나타난 응답보다는 느리지만 정착시간이 0.15초로 빠른 것을 알 수 있다. 저주파 통과필터를 사용하는 이유는 압전전압 궤환 중 모델링에 포함되지 않는 외부 잡음의 효과를 줄이기 위하여 사용되며, 실제 미세이송 시스템을 운용할 경우 충격적인 전압의 발생은 그 주파수가 매우 높아 구동기 앰프에 과부하를 유발하고, 압전구동 미세이송 시스템의 변위에도 불규칙한 진동이 생길수 있기 때문이다.

5. 결론

압전소자를 이용한 초정밀 선반용 미세이송시스템을 개발하고 모델링하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 미세이송 시스템에 외란이 작용할 때, 기존의 위치센서를 이용한 위치오차궤환을 사용하지 않고 비선형적 특성인 이력곡선을 모델링하고, 외란 인가시에 발생하는 압전전압을 비례-적분 제어기로 보상하여 위치 오차를 제거하였다.
- (2) 압전전압 궤환에 의한 미세이송 시스템의 성능이 와전류형 간극센서를 이용한 위치제어시보다 응답속도가 더 빠르고 안정적으로 나타났다.
- (3) 압전전압 궤환 중 모델링에 포함되지 않는 외부 잡음의 효과를 줄이기 위하여 저주파 통과필터를 부착하였으며 미세이송 시스템은 0.15초의 빠른 정착시간을 보였다.

[참고 문헌]

1. Z.Zhong, T.Nakagawa, 1992, Development of a Micro-Displacement Table for Ultra-Precision Machining and Grinding for Curved Surfaces by the Use of It, JSPE, Vol.26, No2, pp102-107
2. Seung-Bae Jung and Seung-Woo Kim, Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuator by feed-forward model-reference control, 1994, Precision Engineering, Vol. 16, No.1, pp.49-55
3. 정승배, 이용호, 김승우, 터널링 효과를 이용한 초미세 가공표면의 형상측정, 1993, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제7호, pp.1731-1739
4. H.S.Tzou, 1991, Design of a Piezoelectric Exciter/Actuator for Micro-Displacement Control: Theory and Experiment. Precision Engineering Vol.13, No 2, pp.104-110
5. C.V.Newcomb, 1982, Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators, Electronic Letters Vol.82 No.11, pp.442-444
6. J.D.Kim and D.S.Kim, 1994, Surface Characteristics of Magnetic Disk Machined by Single Crystal Diamond Tool in Ultraprecision Lathe, 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, pp.428-441
7. Yoshihiro Hara, 1990, A New Micro-Cutting Device with High Stiffness and Resolution, CIRP, Vol. 39/1, pp.375-378

Table 1. Characteristics of Piezoelectric Actuator

Size (mm)	10x10x18(144layers)
Static Cpacitance (nF)	6500
Piezoelectirc Constant d33 (m/V)	635e-12
Density (g/cm3)	8
Elastic Constanct (N/m2)	5.5e10

Table 2. Parametes of Simulaiton

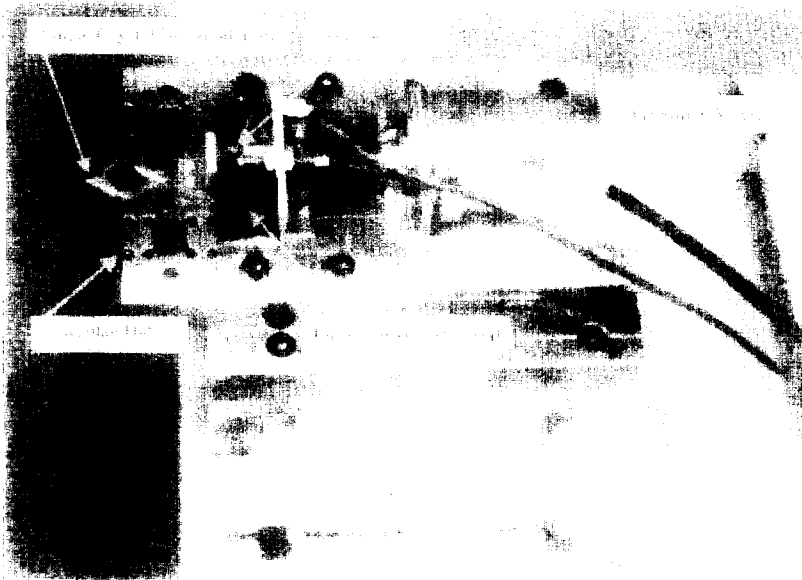
Kf	20.794
M	20
De	20144
Ke	1.843e8
Co	6.5e-6
Ro	300

Table 3. Optimum Control Gain of Piezoelectric Actuator System

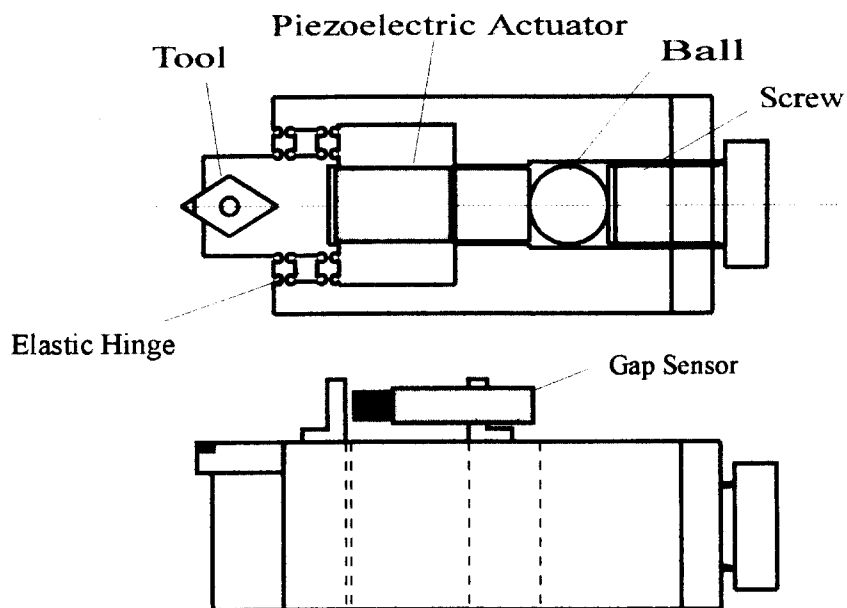
System	P Gain	I Gain
(a) Simulation	17.5	1752.9
(b) Close loop (Real System)	0.5	50
(c) Open loop (Real System)	27	2750

Table 4. Constants for Hysteresis Loop

Direction	Forward		Backward
F11	-6.985421139590995e-010	B11	-4.552492675557121e-010
F21	1.904302574720577e-007	B21	1.483791256991933e-007
F31	-1.916931328277198e-005	B31	-2.125999326715789e-005
F41	5.116156546422172e-004	B41	1.433933577180438e-003
F51	1.227700458133560e-001	B51	7.015094534712238e-002
F61	4.279793988881664e-001	B61	5.894988681107062e-002
F12	-6.490815261774926e-010	B12	-1.984551823466195e-010
F22	1.769756495853477e-007	B22	9.862014433722472e-008
F32	-1.779012039910072e-005	B32	-2.021943246366318e-005
F42	2.757932453650912e-004	B42	1.663289809857115e-003
F52	1.563923238984797e-001	B52	8.023825411254014e-002
F62	8.764124297787161e-001	B62	-8.927675085903882e-003



(a) Photograph of Micro-Depth Control Device



(b) Schematic Diagram of Micro-Depth Control Device

Fig.1 Overview of Piezo-Electric Micro-Depth Control System

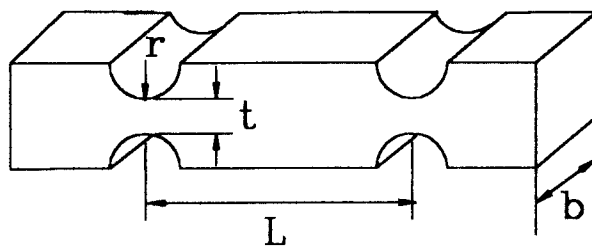


Fig.2 Flexure Hinge of Parallel Spring

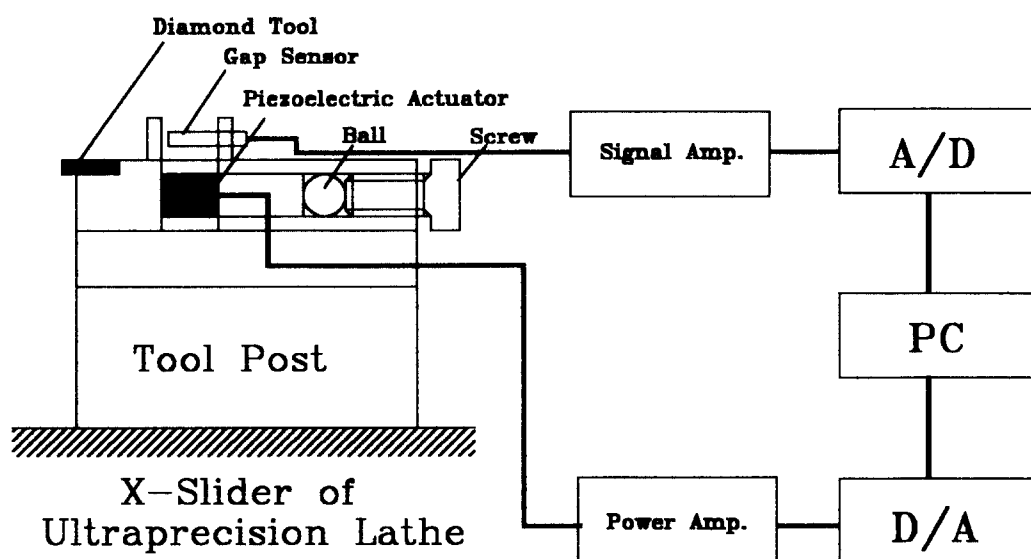
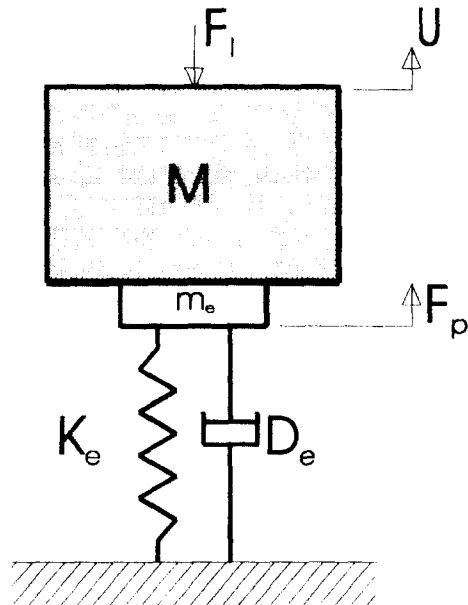
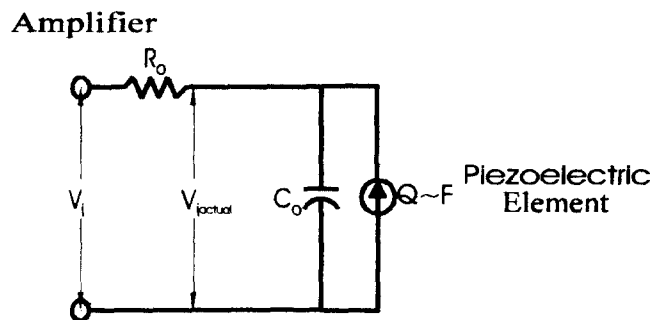


Fig.3 Schematic Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System



(a) Lumped Mechanical Model of Piezoelectric Actuator



(b) Equivalent Electric Circuit of Voltage Driving Piezoelectric Element

Fig.4 Mechanical, Electrical Model of Piezoelectric Actuator

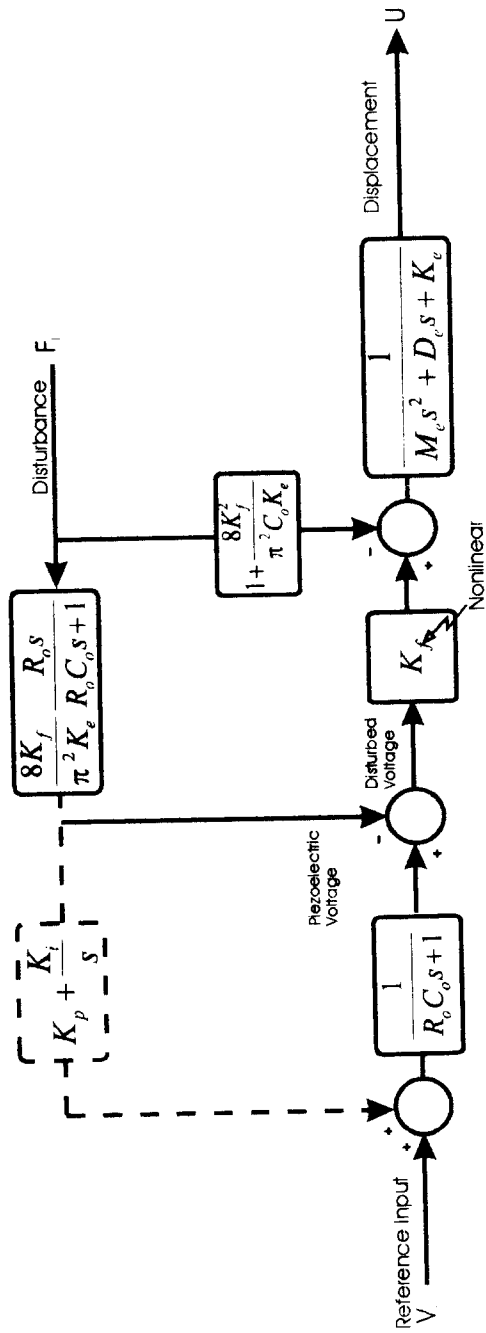


Fig 5 Block Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System

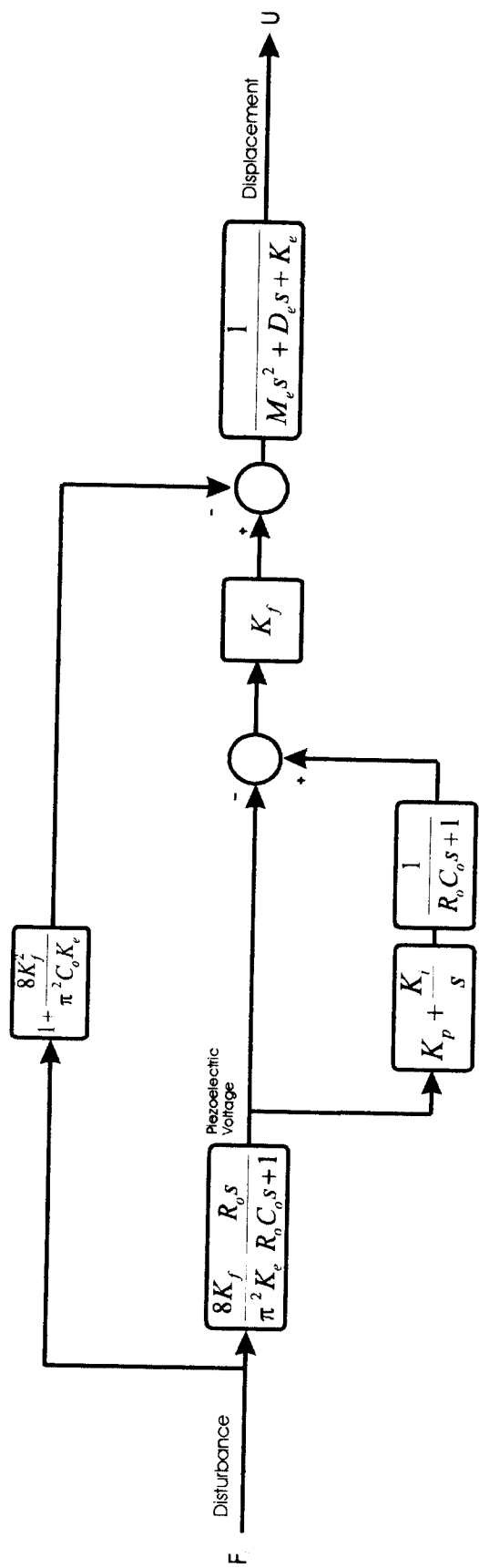
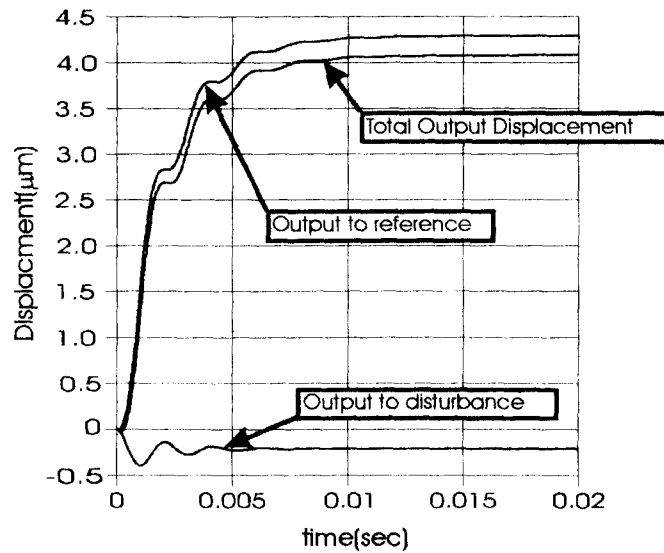
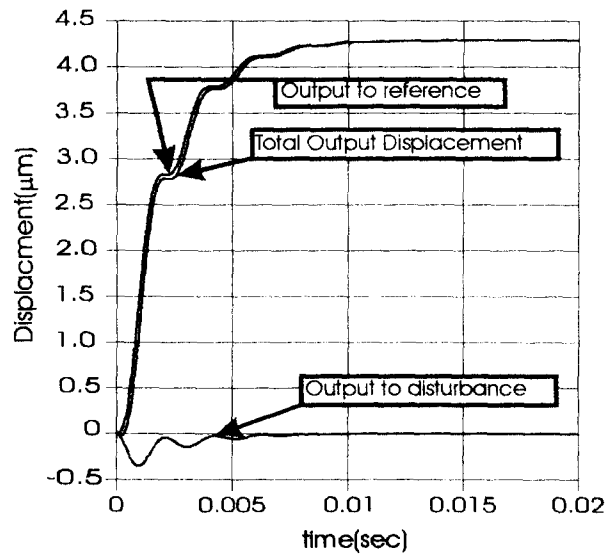


Fig. 6 Block Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System w.r.t. External Load
(with feed forward compensator)



$V_i=38V, F_i=30N$

(a) Step Response Without Compensator & No Feedback



$V_i=38V, F_i=30N$

(b) Step Response with Compensator & No Feedback

**Fig.7 Simulation of Piezo-Electric Micro-Depth Control system
(not considered Displacement Feedback)**

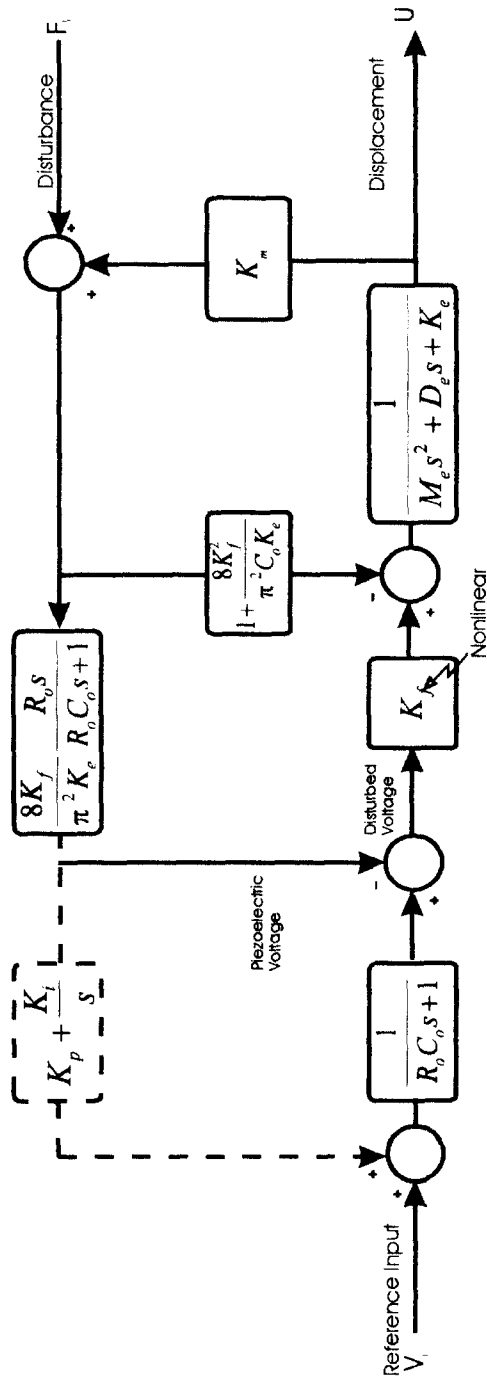
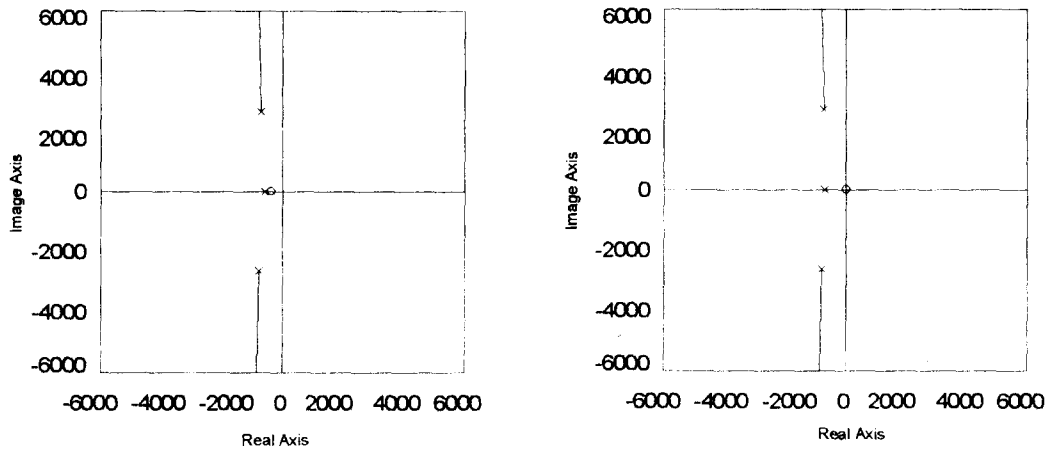
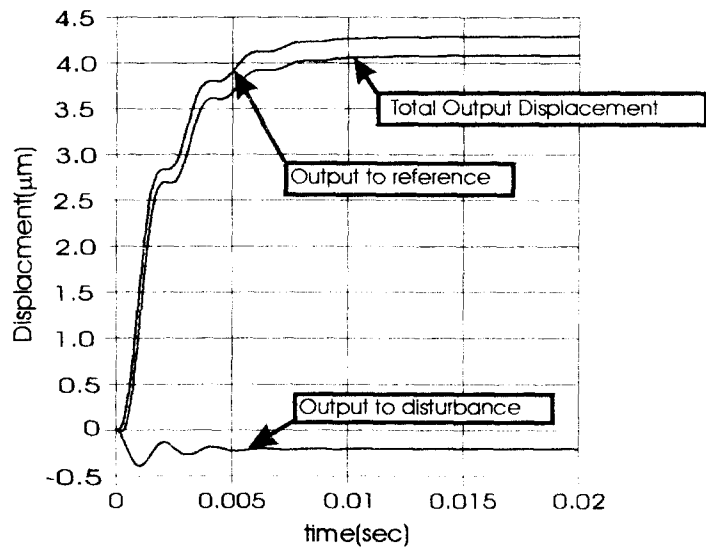


Fig.8 Block Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System
(Considered the displacement feedback)



(a) Root locus to Disturbance Input (b) Root locus to Reference Input



$V_i = 38V, F_i = 30N$

(c) Step Response Without Compensator & Considered Feedback

**Fig.9 Simulation of Piezo-Electric Micro-Depth Control system
(Without Controller and Feedback)**

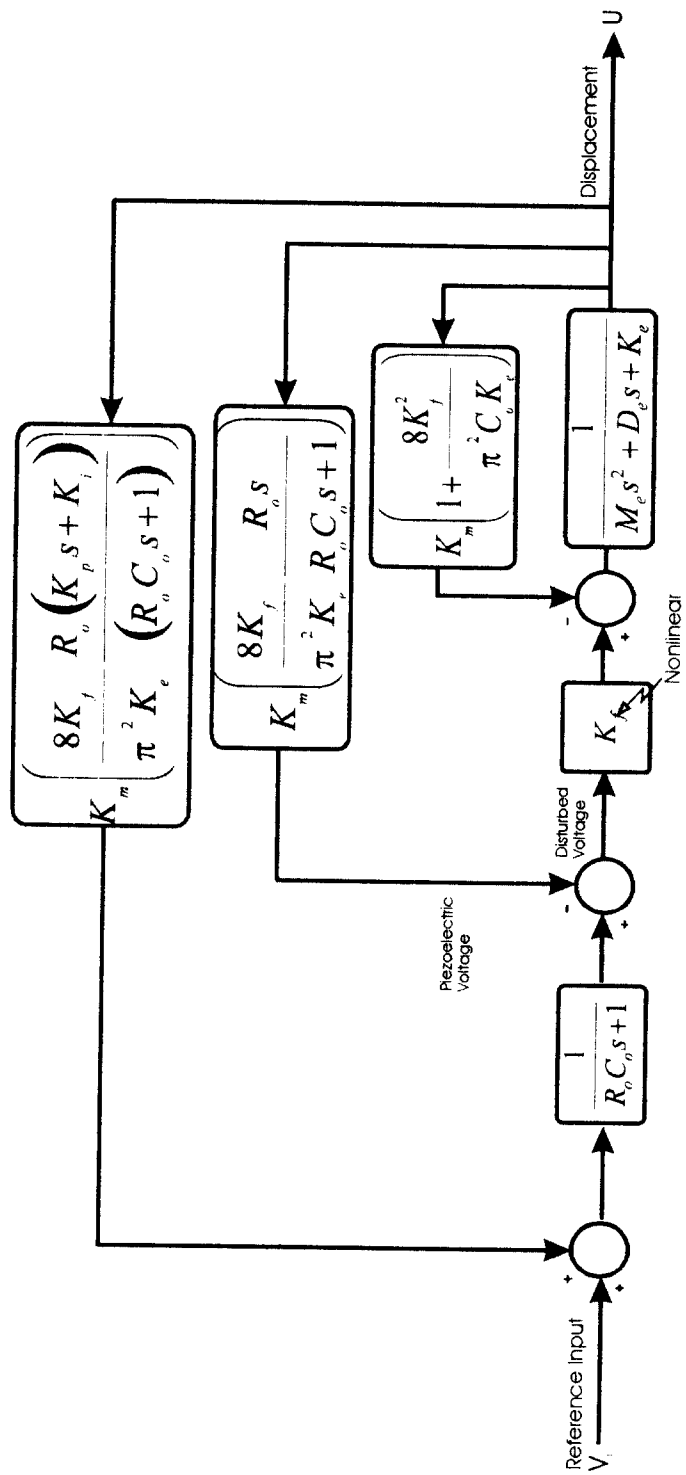


Fig.10 Block Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System
w.r.t. Reference Input

(Considered the displacement feedback and feed forward compensator)

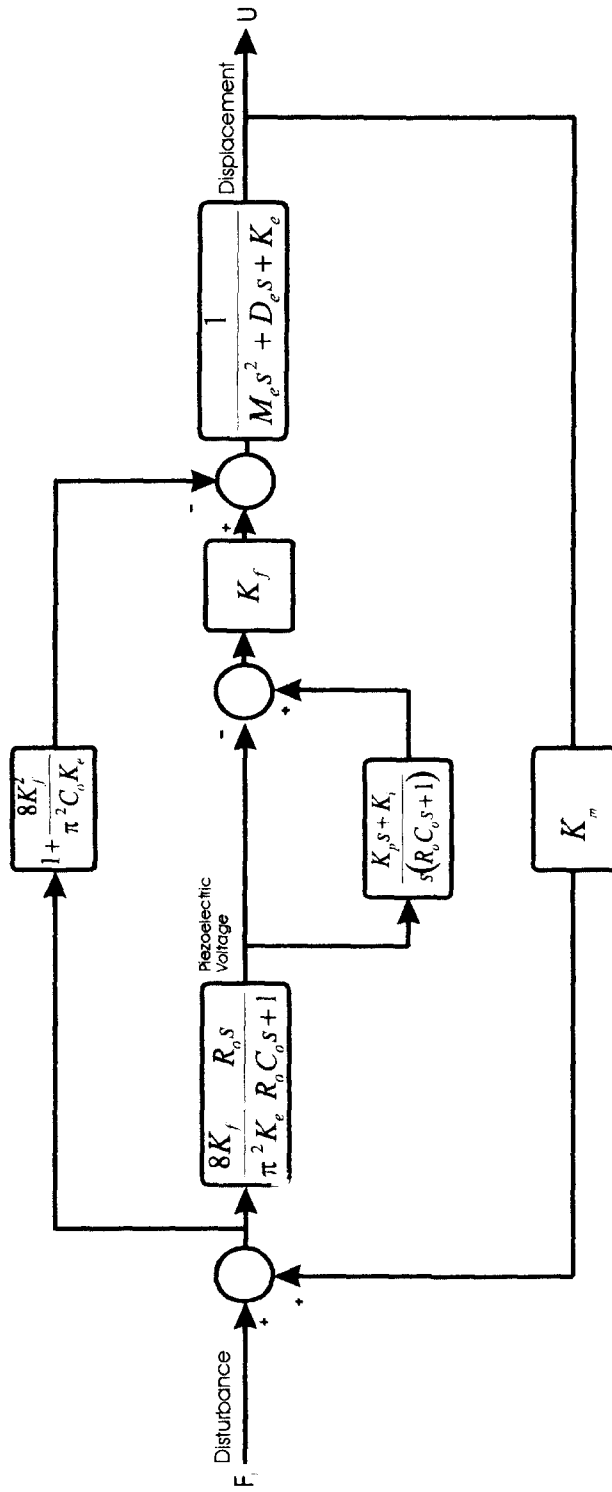
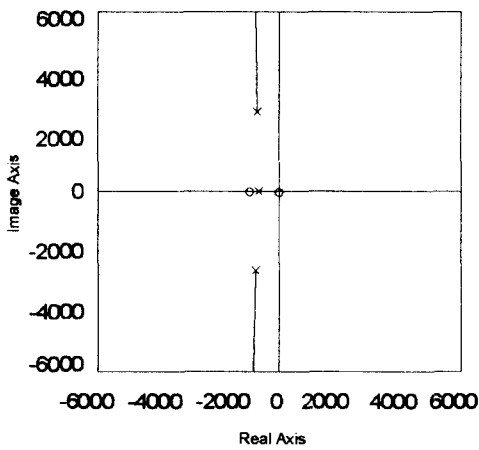
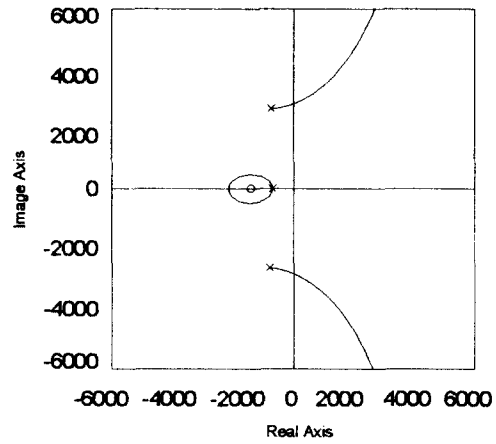


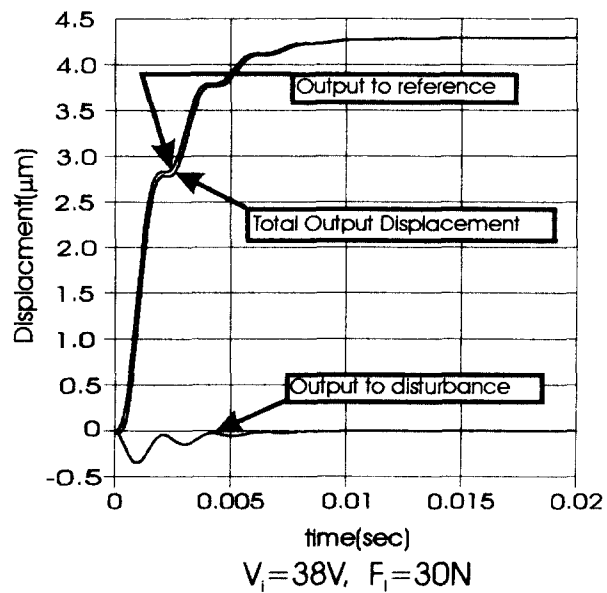
Fig.11 Block Diagram of Piezo-Electric Micro-Depth Control System
w.r.t. External Load
(Considered the displacement feedback and feed forward compensator)



(a) Root locus to Disturbance Input



(b) Root locus to Reference Input



(c) Step Response With Compensator & Considered Feedback

**Fig.12 Simulation of Piezo-Electric Micro-Depth Control system
(With Controller and Feedback)**

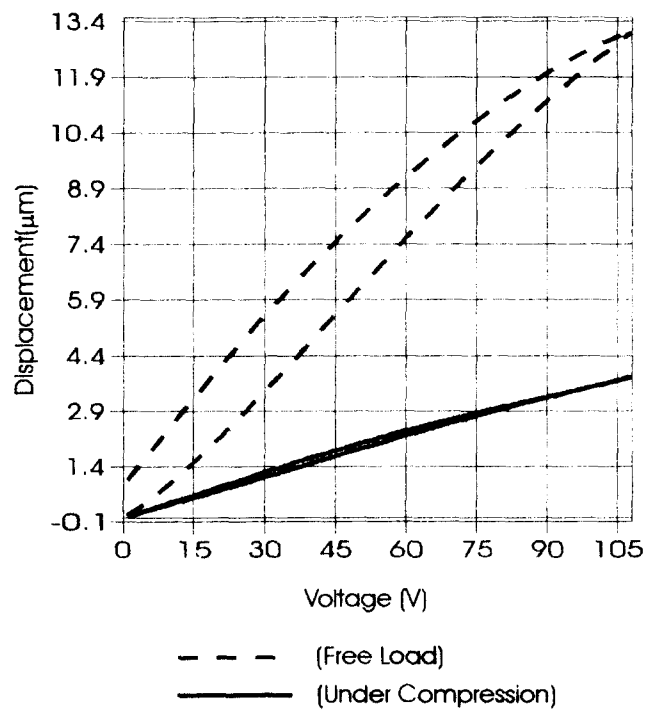
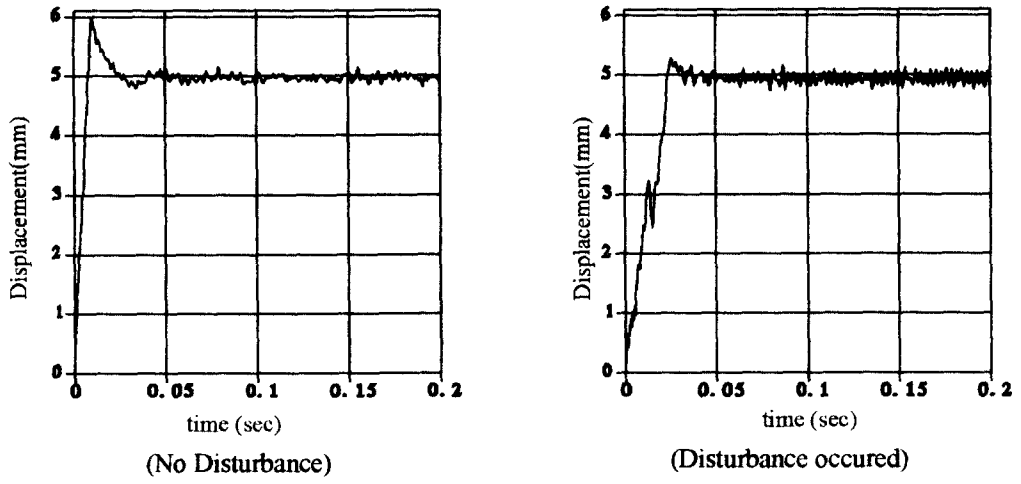
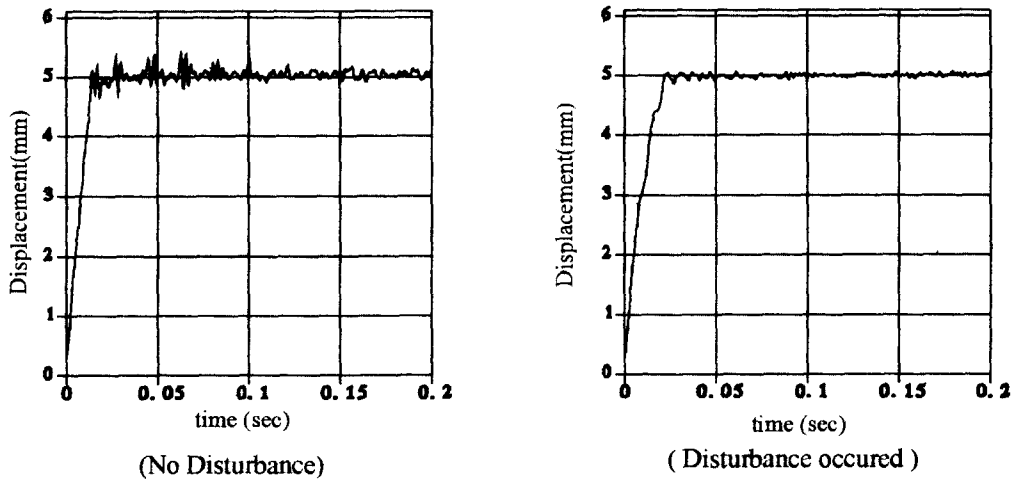


Fig.13 Hysteresis Loop of Piezo-Electric Micro-Depth Control System



(a) Displacement Feedback $V_i = 38V, F_1 = 3N$



(b) Piezoelectric Voltage Feedback $V_i = 38V, F_1 = 3N$

Fig.14 Step Response of Piezo-Electric Micro-Depth Control System

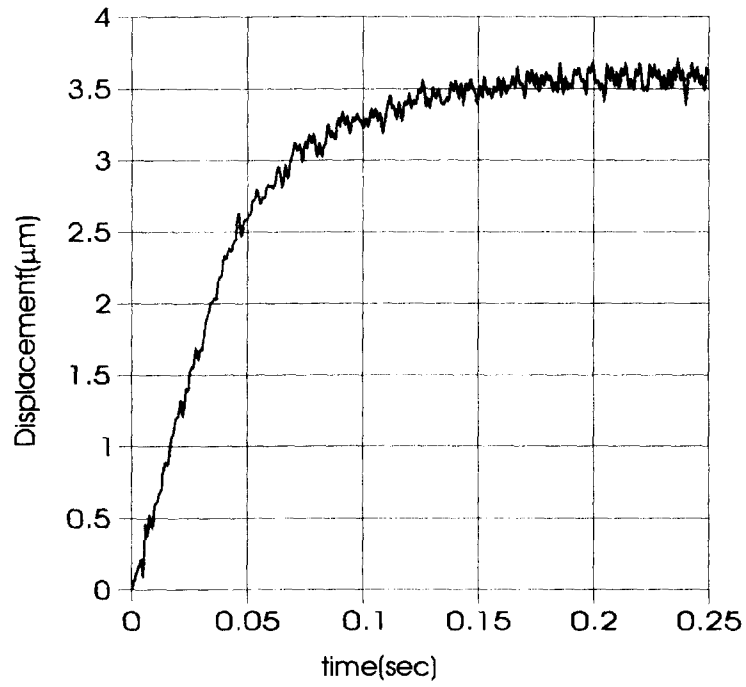


Fig.15 Step Response of Piezo-Electric Micro-Depth Control System using Low Pass Filter