한국정밀공학회지 제 17 권 제 1 호 (2000 년 1 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 1, January 2000.

10 nano-meter 분해능을 갖는 laser scale 을 이용한 위치 결정 실험

임선종*, 정광조*, 최재완*

Experiment for Position Accuracy Using Laser Scale Unit with 10 Nano-Meter Resoultion

Sun Jong Lim*, Gwang Jo Chung*, and Jae Wan Choi*

ABSTRACT

This paper describes a positioning system for ultra-precision that will be utilized in semiconductor manufacturing field and precision machinery. This system is composed with laser scale unit with 10nm resolution, ball screw with LM guide, brushless DC servo motor, vibration isolator and is equipped in chamber for continuous measuring environment. The dynamic of table, the problem of servo control and the traceability for micro step motion are described. These data will be applied for getting more stable system with 50nm resolution.

Key Words : Ultra-precision(초정밀), Laser scale unit(레이저 스케일), Ball screw(볼스크류), Positioning system(위치 결정 시스템), Brushless DC servo motor(브러쉬리스 DC 서보 모터), LM guide(리니어 가이드), Vibration isolator(방진기)

1. 서론

현재의 정밀 기술의 관점을 한 단계 뛰어넘은 새로운 기술 체계에 의한 정밀도의 실현을 초정밀이라고 볼 때 결국 초정밀의 기준은 그 시대의 기술적 수요에 따라 이동하게 되고 관련 기술의 개발 속도 및 접근 방법도 그 수요에 따라 변화하게 된다는 수요와 공급의 경제 원리를 추종하게 된다.[1] 한 예로 정밀도가 가장 중요한 기준이 되는 반도체 기술의 Roadmaps 은 노광 기술의 design rule 을 기준으로 정해진다. 현재 lithography 장비는 98 년도에 본격적인 생산에 돌입한 64 MDRAM 을 기준으로 하면 선폭 0.35 μm 의 design rule 이 요구되며 이를 실현하기 위한 실제 구동 시스템의 제어 정도는 약 0.05 – 0.01 μm 가 필요하다. 반도체 메모리의 경우 대략 3 년마다 집적도가 4 배 증가하는 법칙을 적용한다면 11 년 후인 2010 년에는 64 Giga DRAM 이 실용화 될 것이고 이 경우 design rule 은 대략 0.07 μm 의 구동 시스템으로 제어 정도는 약 0.01 – 0.001 μm 정도가 요구된다.[2] 이러한 초정밀 위치 결정의 제어 기술의 측면을 보면 세계적인 기술 주이는 일본이 주도하고 있고 현재 약 10 nm 정도의 위치 결정 및 구동 기술을 확보하고 있지만 실용화 초기 단계에 있고 국내의 기술은 약 100 – 300 nm 정도가 실용화되고 있다.[3]

본 연구는 향후 반도체 제조 분야 및 초정밀 가공 공정에서 요구되는 초정밀 위치 결정 정도 기술을 확보하기 위한 초기 연구 단계로 nano-

* 한국기계연구원, 자동화 연구부

meter 급의 위치 결정도를 구현하기 위해 10 nm 의 분해능을 갖는 laser scale 을 position feedback 하고, LM guide 와 ball screw 로 구동되는 table 로 구성된 시스템에 대해 기술하였으며, 본 시스템의 각 구성 요소 및 실험 환경에서 위치 결정 정도를 저하시키는 비정규적인 요인들을 분석하였고, 50 nm 의 위치 결정 정도 실험을 통해 이때 발생되는 문제점을 분석, 보다 안정된 시스템을 구축하기 위한 기본 자료 확보를 목적으로 한다.

2. 시스템 구성

본 연구를 위해 구성된 시스템의 전체 구성은 Fig 1 과 같으며 제어 loop 는 Fig 2 와 같다.[4][5][6]

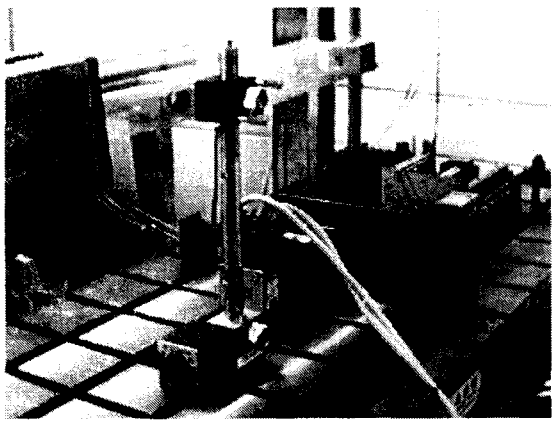

Fig. 1 Ultra-precision positioning system

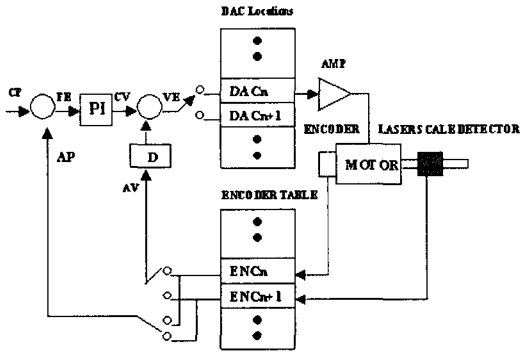

Fig. 2 Control block diagram of Ultra-precision positioning system

제어기는 Motorola DSP56001 을 내장하고 PID servo algorithm 을 가진 PMAC(Lite)를 사용하였다. Servo loop 는 위치 loop 와 속도 loop 를 함께 구성한 dual servo loop 로 구성하였다. 이 구성은 encoder 신호를 위치 신호로 받을 경우 motor 의 이동 거리와 실제 table 의 이동 거리 사이의 오차를 없애기 위해 laser scale detector 를 table 에 설치, 실제 table 의 이동 거리를 위치 loop 로 사용하였다. 속도 loop 는 상대적으로 해상도가 낮은 encoder 신호를 사용 laser scale 의 높은 해상도로 생길 수 있는 시스템의 불안정을 막았다.[7] Laser scale unit 는 scale, detector 및 amplifier 로 구성되며 분해능은 10 nm 이고 최대 응답 속도는 120 mm/sec 이다.[8] 시스템이 설치된 base 는 외란(진동, 충격)으로 인한 위치 결정도의 저하를 막기위해 vibration isolator 위에 설치하였다. Vibration isolator 는 load range: 450 – 5455 kg, vertical resonant frequency: 1.5 Hz, horizontal resonant frequency: 1.8 Hz, setting time after 2.2 kg weight removal: 1.5 sec 의 사양을 갖는다.[9] 위치 측정을 위해 사용된 laser interferometer 의 beam 은 공기 흐름으로 인한 오차를 막기위해 원통 아크릴로 보호하였다. 구동 motor 는 정격 속도 2800 rpm 을 가진 brushless DC servo motor 를 사용하였다.[10] 이 시스템은 외부와의 차단을 위해 chamber 내에 설치되었으며 실험 중 온도는 20.4 °C 로 기록되었다.

3. 구성된 시스템에서 위치 결정 정도를 저하시키는 요인

Servo 제어의 관점에서 보면 제어 가능한 위치 결정 정도는 구동 actuator 의 구조적 정밀도와 검출기의 분해능에 좌우된다. 즉 구동 motor 의 회전력의 정밀도를 결정하는 회전자계를 이상적인 형태로 제어할 수 있는 완전한 rotor 및 stator 그리고 권선 구조가 보장된다면 제어 정도는 sensor resolution 에 의존하게 된다. 그러나 servo motor 는 정밀도가 한계가 있고 그 회전 자계 특성이 비선형이므로 항상 오차 요인을 가지고 있으며 sensor 기술도 한계가 있으므로 불가피하게 각종 회로 기술이나 지능적인 알고리즘을 통해 오차를 줄여나가는 수단을 강구하게 된다. 이러한 요인은 낮은 정밀도를 요구하는 시스템에서는 큰 문제가 되지

않으나 nano-meter 의 정밀도를 요구하는 시스템에서는 위치 결정 정도를 저하시키는 요인이 된다. 이 밖에 actuator, sensor, 외란, 제어 특성 및 온도 등의 요인이 있으며 이것들은 복합적으로 작용하여 위치 결정 정도를 저하시킨다. 본 연구를 위해 구성한 시스템 역시 이러한 요인들의 복합적인 작용으로 인해 위치 결정 정도의 저하 및 정지 위치에서의 불안정을 보이고 있다. 결국 초정밀 위치 결정의 제반 문제는 이러한 비정규적인 오차 요인을 분석 및 정규화하고 이를 정략적으로 이해하여 감쇄, 보정, 교정을 통해 목표 위치에 근접시키는 문제로 정의할 수 있다. Table 1 은 위치 결정 시스템에서 시스템 구성 요소 및 환경 요인으로 인해 위치 결정 정도가 저하되는 것을 분석한 것이다.

Table 1 The environmental and system configuration factor in depreciating positioning accuracy

구동부 문제	. Rotor, stator 구조의 가공, 조립 오차 . Bearing, shaft 의 열변형 . Pitch 오차, stick slip, lost motion
Sensor 문제	. 응답 속도 지연 . Linear scale 의 진직도 및 slit 간격 . 센서 출력 특성의 비선형
외란 문제	. Base 고유의 진동, 구동 진동 및 기계적 noise . 전류의 급격한 변화에 따른 2 차 유기 전력
제어 문제	. 시스템의 비선형에 의한 모델링의 오차 . 외란에 대한 모델링 한계 . Analog 제어 방식에서의 noise 대책 한계
온도특성 문제	. 기계적 열변형에 따르는 구조적 오차 . 열변형 특성의 해석 한계, 비선형 . 전자회로 부품의 온도 drift

4. 미소 이송 실험

Position feedback 으로 10 nm 의 해상도를 갖는 laser scale 을 사용한 본 시스템에서 50 nm/step 위치 이동 명령에 대한 응답은 그림 3 과 그림 4 와 같다. Fig 3 은 미소 이송 명령 간격이 1 초, Fig 4 는 5 초이다. Fig 3 의 경우 위치 이동 명령에 대해 table 은 수초 후 급격한 위치 변화를 보이고 table 의 추종성은 떨어진다. 이동 명령이 끝나고 servo on 상태에서 table 은 위치 변화가 심한 불안정한 상태에 있다. Fig 4 의 경우 역시 미소 이송 명령 수 초 후 위치 변화가 심하며 이것의 영향으로 위치 명령에 대한 table 의 추종성은 다소 떨어지고 있다. 그러나 Fig 3 에 비해 개선된 상태이다. 역방향에 대한 미소 이송 명령에 대해 table 의 추종성은 현저히 떨어지고 있다. 미소 이송 명령이 끝나고 servo on 상태에서도 역시 위치 변화가 불안정한 상태이다.

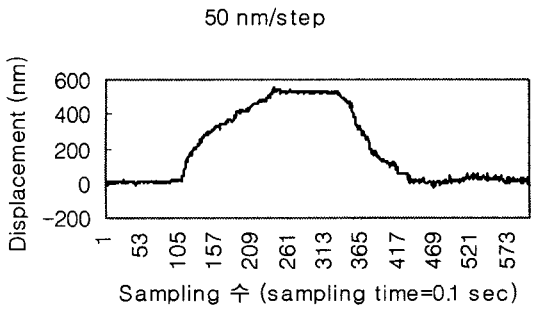

Fig. 3 Step response (time interval =1 sec)

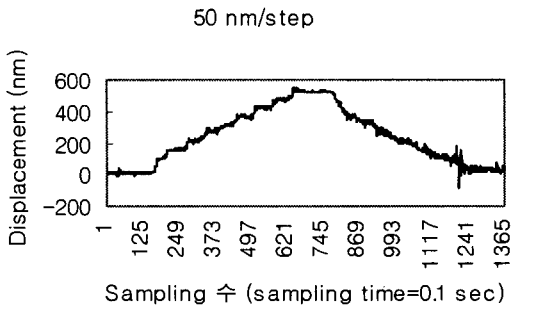

Fig. 4 Step response (time interval=5sec)

5. 고찰

초정밀 위치 결정 시스템 구축을 목적으로 하고 위치 결정에 대한 기본 자료 확보를 위해 시행한 50 nm/step 의 미소 이송 실험 결과, 3 절에서 분석된 위치 결정 저하 요인과 관련하여 다음의 사항들이 나타나게 되었다.

(1) Table 의 동특성에 관하여

정지하고 있는 table 을 이동시키는 경우 외부의 구동력과 정지 마찰력 사이에 함수 관계가 성립된다. 외부 구동력이 정지 마찰력을 극복하는 순간, 이송 속도와 이동량이 작은 경우, 물체의 이동은 stick-slip 현상을 보이면서 이동하게 된다.[11][12][13] Stick-slip 현상은 이동 현상 중 상대적으로 빠른 위치 변화를 나타내게 된다. Fig 5 는 Fig 4 에서 이송 명령 시작부터 30 초까지를 확대한 것이다. Fig 5 에서 Table 을 이동시키기 위해 지속적으로 적용된 구동력이 약 16 초 정도에서 table 과 LM guide 및 ball screw 끝단부 등에서 작용되고 있는 마찰력을 극복, 빠르게 이동하는 것을 볼 수 있다. 50 nm/step 미소 이송에 대해 table 은 50 nm 의 위치를 지나쳐 100 nm 위치로 빠르게 이동하는 stick-slip 현상을 보인다. Table 의 stick-slip 현상은 table 이동의 5 steps(250 nm)까지 영향을 미쳐 미소 이송에 대한 table 의 추종성을 떨어트리고 있다.

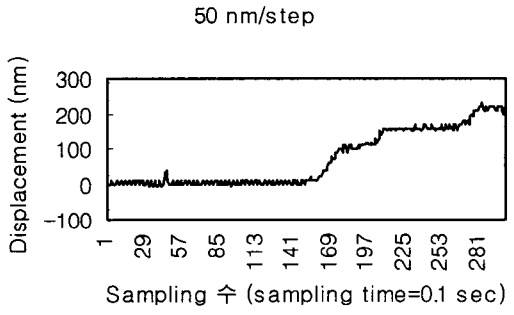

Fig. 5 Step response from 0 to 30 sec

(2) Table 정•역 방향에 대한 동특성에 관하여

역방향에 대한 미소 이송 응답 결과에서, 미소 이송 명령에 대해 table 의 추종성이 떨어지는 원인은 table 과 LM guide 사이에 작용하는 마찰력의 변화, 역방향 이송 명령에 대한 table 의 관성력 작용, coupling 탄성 및 backlash 등으로 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig 4 에서도 보여지는데 역방향 미소 이송에 대해 80 초 정도에서의 table 응답은 16 초 정도에서 보여지는 응답처럼 급격한 위치 변화를 보이고 있다. 또한 역방향에 대한 전체적인 table 의 추종성이 정방향의 table 의 추종성에 비해 현저히 떨어지고 있음을 볼 수 있다.

(3) Servo 제어의 관점에서

PID algorithm 에서 각 parameters 은 각각의 의미를 가지고 위치 제어에 영향을 미치게 된다.[14] 따라서 parameters 의 결정은 보다 좋은 위치 결정도를 내기위한 중요한 요인이다. Parameters 의 결정은 구성된 시스템의 모델링을 바탕으로 simulation 을 통한 방법과 실험적인 방법이 있다. 본 시스템은 table 과 LM guide 에 작용하는 마찰력 해석, 온도 변화에 대한 열변형 해석, motor 와 table 의 정확한 modeling, table 의 관성력 및 coupling 의 탄성력 측정 등의 어려움으로 실험적인 방법을 통해 결정을 하였다. Nano-meter 단위의 위치 결정의 경우, 위 요인들의 작은 변화는 복합적인 현상으로 작용하고 있다. 그러므로 table 을 이동할 때 parameter 값을 상황에 맞추어 연속적으로 조종하는 것이 필요하다. 그러나 초기 실험으로 결정된 parameters 을 사용하고 있는 본 시스템에서는 위치 결정도를 저하시키는 원인이 된다. Fig 6 은 Fig 4 에서 미소 이송 명령이 끝나는 110 – 140 초 사이를 확대한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이송이 끝난 후 servo on 상태에서 table 의 정지 상태가 불안정하고 위치 변화가 큰 것으로 나타났다. 이유로는 첫째 위치 오차를 보상하기 위해 table 이 이동할 때 table 과 LM guide 사이에 발생하는 마찰력의 변화, 둘째 본 실험에서 motor 의 1 회전 당 laser scale 의 pulse 수는 ball screw pitch 가 5 mm 이므로 500,000 pulses 가 되어 laser scale 1 pulse 당 motor 는 360/500,000 = 0.00072 ° 의 제어 정도가 요구된다. 따라서 motor 가 균일한 제어 정도를 제공하기 어려움 점, 셋째 backlash 에 의한 것으로 보여진다.

(4) 미소 이송에 대한 table 의 추종성에 대해

본 시스템의 제어 loop 는 velocity loop 로 구성되어 있으며 위치 명령의 크기에 따라 motor 의 구동 전류가 커진다. 그러므로 motor 의 구동력과 table 에 작용하는 마찰력의 관계에서 발생하는 stick-slip 현상을 없애기 위해서는 motor 에 흐르는 전류를 크게 해 table 의 구동력을 증가 시킨다.

Fig 7, Fig 8 그리고 Fig 9 는 각각 100 nm/step, 200 nm/step 및 300 mm/step 에 대한 미소 이송을 보이고 있다. 100 nm/step, 200 nm/step 및 300 nm/step 의 미소 이송은 50 nm/step 에 비해 상대적으로 motor 의 구동 전류가 크게 흐르고 따라서 Fig 3 및 Fig 4 에 비해 상대적으로 table 의 추종성이 향상된 것을 볼 수가 있다. Fig 7 의 경우 table 의 초기 미소 이송은 50 nm/step 와 비슷한 현상을 보이고 있으나 역방향에 대해서는 다소 개선된 결과를 보인다. Fig 8 은 table 의 초기 이동에서 stick-slip 으로 인한 급격한 위치 변화도 개선되었으며 역방향에 대한 결과 역시 안정된 결과를 보이고 있다.

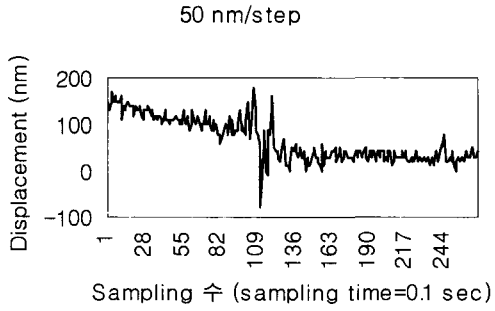

Fig. 6 Step response from 110 to 140 sec

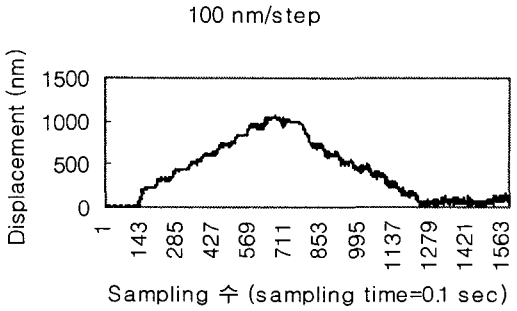

Fig. 7 Step response for 100 nm/step

Fig 9 는 모든 구간을 비교할 때 Fig 3, Fig 4, Fig 7 및 Fig 8 에 비해 안정된 응답을 보이고 있다. 따라서 50 nm/step 의 미소 이송 결과를 개선시키기 위해서는 같은 이동 명령에 대해 motor 의 구동 전류를 증가 시키는 방법이 요구되고 있다

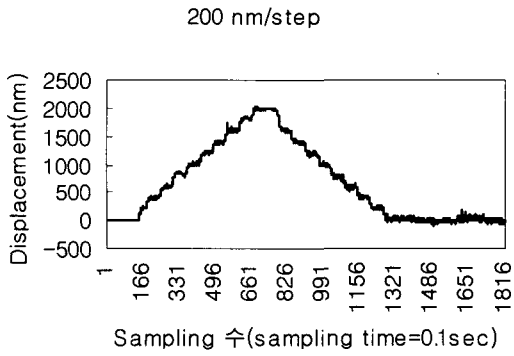

Fig.8 Step response for 200 nm/step

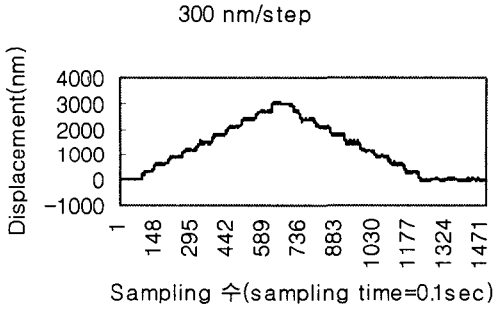

Fig. 9 Step response for 300 nm/step

6. 결과

10 nm 의 해상도를 갖는 laser scale unit 를 position feedback 으로 사용하고 이송 기구로 ball screw 를 사용한 위치 결정 시스템에서 향후 안정된 50 nm 의 위치 결정도 시스템 구축에 필요한 자료 확보를 목적으로 한 본 실험을 통해 다음의 결과를 얻게 되었다.

1) 미소 이송 실험 결과, Fig 4, Fig 7, Fig 8 그리고 Fig 9 에서 보는 바와 같이 300 nm/step, 200 nm/step 및 100 nm/step 의 미소 이송이 50 nm/step 의 경우에 비해 상대적으로 안정된 추종 특성을 보인다. 결국 50 nm/step 미소 이송의 경우 정지 마찰력과 table 의 작은 이동량으로 생기는 stick-slip 으로 인한 급격한 위치 이동은 motor 의 구동 전류를 증가 시킴으로 해서 개선할 있다.

2) Nano-meter 급 위치 결정은 이송 단위 크기가 작으므로 작은 환경 변화가 위치 보정에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 ball screw 에서 실제 nano-meter 급의 위치 결정이 요구되는 구간에 대해 반복 실험을 통해 보정에 필요한 최소 값을 구한 후 servo algorithm parameter 결정에 반영해야 한다. 한편 고정된 parameter 를 갖는 PID algorithm 의 위치 결정도를 개선하기 위해 환경 변화에 적응이 용이한 지능형 algorithm 의 적용도 검토되고 있다.
3) Nano-meter 급의 위치 결정은 시스템 구성 요소 및 주변 환경에서 나타나는 정규적 및 비 정규적인 오차의 원인을 정규화 및 정량적으로 이해하여 감쇄, 보정, 보완 및 교정을 통해 측정 가능한 양으로 근접시키는 것이 중요하다.

참고문헌

1. 大嫁二郎, 超精密位置決め技術の現狀と今後, 日本精密工學會誌, Vol. 61, No. 12, 1995.
2. The National Technology Roadmap for Semiconductors
3. 朴天弘, "超精密位置決めに關する 專門委員會 定例會 講演 前刷集," 日本精密工學會, 1996.
4. J. Otsuka, N. Iida, Y. Kawase, "Ultra-precision Positioning Using Lead Screw Drive(1st Report)-Fundamental Study Using a Sliding Screw or Ball Screw," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.56, No.11, 1990.
5. Y. Kawase, J. Otsuka, S. Fukada, Y. Aoki, N. Iida, "Ultra-precision Position Using Lead Screw Drive(2nd Report) – Nanometers Accuracy Positioning by Improved Proportional Gain Characteristic," Journal of the Society for Precision Engineering, Vol. 57, No.7, 1991.
6. J. Otsuka, N. Iida, Y. Kawase, R. Akino, S. Fukada, "Ultra-precision Positioning Using Lead Screw Drive(3rd Report) – Nanometer Accuracy Positioning and Settling Time Reduction," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.59, No.10, 1993.
7. Delta Tau Data Systems, "PMAC User's Manual", 1996.
8. Sony Laserscale Detector Unit BD10 Instruction Manual 1st Edition(Revised 1)
9. Vibration Control 1997 catalog, Newport
10. Parker Motion & Control catalog.
11. Pierre E. Dupont, EricP. Dunlap, "Friction Modeling and PD Compensation at Very Low Velocites," Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.117/9, March, 1995.
12. Brian Armstrong-Helouvry, "Stick-Slip and Control in Low-Speed Motion," IEEE Transactions on automatic control, Vol.38, No.10, 1993.
13. Brian Armstrong-Helouvry, Pierre Dupont, Carlos Canudas De Wit, "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," Automatica, Vol.30, No.7, pp1083-1138, 1994.
14. Benjamin C. Kuo, "Automatic control systems," Fifth Edition