

## 고속화를 위한 공작기계 이송계의 설계

### Design of high speed feed drive system in machine tools

고해주(창원대학교), 박성호(창원대학교), 정윤교(창원대학교)

#### Abstract

It can be acquired the high effective productivity through of high speed, precision of machine tools, and then, machine tools will be got a competitive power. Industrially advanced countries already developed that the high speed feed is 60m/min using the high speed ball screw. Also, a lot of problems have happened the feed drive system. It is necessary to study about the character of positioning accuracy, heat generation and high speed control for feed drive system of high speed.

In this study, we make use of the feed drive system with a ball screw of large-scale-lead. We'll develop the feed drive system at the speed of 60m/min. Using the design of the mechanical element and the high speed control, the basic design concept can be established. After manufacturing one-shaft feed drive system and conducting the performance test, It'll be analyzed properties of the high speed feed drive system.

#### 1. 서론

산업현장의 생산성향상과 품질향상을 위하여 공작기계는 고속화, 고정도화 및 자동화의 연구가 빠르게 발전하고 있으며, 이러한 공작기계의 성능향상은 운전시간을 단축시키고, 복잡화를 통한 고효율의 생산공정을 가능케 함으로써 제품 경쟁력을 확보하게 된다. 이에 필요한 고속가공기의 경우 현재 90%이상 볼스크류를 채용한 이

송계를 적용하고 있으며, 국내에서는 급속이송 36m/min이 최고인 반면, 세계수준은 급속이송 60m/min을 실현하여 실용화하고 있는 실정이다.

따라서 공작기계의 고속화 연구는 생산현장의 필수과제이며, 이송계의 고속화를 실현하기 위해 위치정밀도, 열변형, 탄성변형 및 고속제어 특성 연구가 동시에 이루어져야 될 것으로 사료된다.

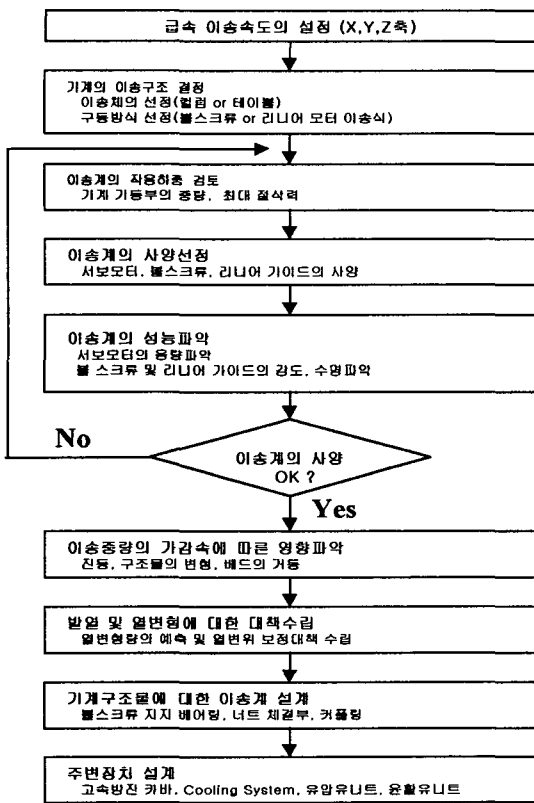
본 연구에서는 대리드의 볼스크류를 이용하여 이송속도 60m/min의 고속화를 실현하기 위한 공작기계 이송계의 구성으로, 기계적인 요소설계와 고속제어 설계를 수행하여 기본설계에 관한 개념을 정립하고, 이를 바탕으로 1축 이송계를 제작하여 성능평가를 수행함으로써 고속 이송계의 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다.

#### 2. 고속이송계의 개념 설계

이송계 고속화의 안내 및 운동성을 위해서는 경량 고강성 운동체의 개발과 저마찰 저진동 안내방식의 확립 및 볼스크류 발열방지 대책이 필요하고, 제어특성을 위해서는 고효율, 고마력의 구동장치와 고속구동용 제어장치의 구성이 요구된다. 이송계를 구성하는 각 요소별 개념설계로는 설계 시 요구사항을 Table 1의 설계흐름도로 표시하였다. 먼저, 기계의 이송구조를 결정하고, 이송계의 작용하중을 검토하여 볼스크류, 서보모터 및 리니어 가이드의 사양을 선정한 후 이송계의 성능을 파악하기 위해 서보모터의 용량을 파악하고, 볼스크류 및 리니어 가이드의 강도 및 수명을 파악한다. 이송계의 사양이 만족하는 경우 이송중량의 가속도에 따른 영향을 파악하고, 발열 및 열변형에 대한 대책을 수립하며, 이송계 부착부의 선정과 설계를 수행하여 구체설계를 실시한다. 마지막으로 주변장치들을 설계하여 기계

구조물에 대한 구성을 형성한다.

Table 1 Flow chart of high speed feed drive system



### 3. 고속화 특성

#### 3.1 볼스크류의 선정

##### 1) 리드의 검토

고속·고정도를 실현하기 위해서는 리드를 크게 함과 동시에 회전수도 고속이기 때문에 종래보다 리드가 큰 것이 사용되며, 나사축경의 1/2 전후 리드를 갖는 볼스크류의 사용이 많아지고 있다. 여기서 서보모터의 회전수 3,000rpm으로 하여 볼스크류의 리드를 기존의 10~12mm에서 20mm를 적용하여 이송속도 60m/min의 구현이 가능하게 하고, 볼스크류의 너트부를 2조 나사로 적용하여 유효권수의 증가에 따라 고강성 및 고부하의 용량을 실현할 수 있다.

##### 2) $d_m \cdot n$ 값의 고속한계

허용회전수는 주속을 표시하는  $d_m \cdot n$ 값으로 규

정되며, 볼 중심원경  $d_m$ 과 회전수  $n$ 의 곱으로 표시하는  $d_m \cdot n$ , 즉 볼의 공전속도가 크게되면 반복 충격력에 의해 볼의 순환기구나 나사홈에 손상을 생기게 하여 볼스크류의 허용 최고회전수가 제한된다. 일반적으로  $d_m \cdot n$  허용치가 7만이나 고속용으로 15만으로 적용하고, 20만을 초월한 고속시험이 연구실 수준에서 연구되고 있다.

##### 3) 위험속도의 한계

고속에서 회전수와 나사축의 고유진동수가 일치할 때 큰 공진현상이 일어나게 되는 것을 볼스크류의 위험속도라 부르며, 나사축이 수mm의 단위에도 진동하고 나사구에 손상을 주게되며, 기계전체의 큰 진동 및 소음을 발생하고 서보계의 불안정을 초래하는 경우가 있다. 볼스크류 축은 일반적으로 양단과 너트의 3점으로 지지되고, 너트의 양측에 각각 예압을 가함으로써 2개의 고유모드가 존재한다. 이러한 볼스크류를 운전하면 너트가 이동하기 때문에 고유진동수는 변화하게 되는데, 이를 방지하기 위한 방법의 한가지로 나사축의 중공구멍에 제진댐퍼를 내장한 형태를 적용함으로써 스크류축의 감쇠능력을 향상시켜 고속화를 실현하고 외관의 치수에 변화 없는 특징을 갖게된다.

이상의 특성을 종합하여 볼스크류의 사양을 선정하면 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of ball screw

Item	Specification	
Pitch circle of dia. of balls (mm)	41	
Lead (mm)	20	
Circuit(Turns x Circuit)	2.5 x 2	
Feed (m/min)	60	
Basic load rating Ca(kgf)	Dynamic	6,380
	Static	15,600
Dynamic preload drag torque(kgf-cm)	10.4~15.6	
The length of effective screw (mm)	720	
Nut length (mm)	185	
Max. of rotational speed (rpm)	3,000	

##### 3.2 제어계 구성

공작기계의 이송계는 AC서보모터, 엔코드, 서보AMP, 커플링, 볼스크류로 구성되며, 위치제어

방식에 따라 리니어 스케일을 사용하는 경우가 있다. 이송계가 구동하기 위해서는 NC로부터 이송지령이 주어지면 NC의 메모리 카드에 입력된 PLC 데이터를 통하여 I/O 카드에서 기계와 인터페이스를 행하고, 이송지령은 축카드를 거쳐서 주파수 전압제어를 한 후 서보AMP를 구동시킨다. 여기서 생성된 동력을 이용해 서보모터가 회전하고 커플링을 통하여 회전력이 볼스크류로 전달되어 이송테이블이 움직이게된다. 고속이송계를 구현하기 위해서 서보계에 고려되어야 할 사항은 다음과 같다.

### 1) H/W 측면

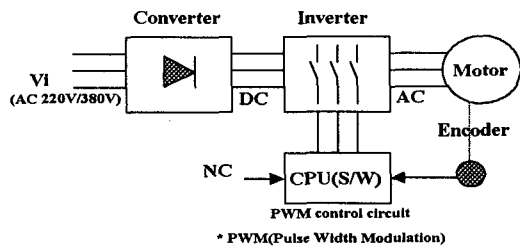


Fig. 1 Composition of control system H/W

PWM제어회로의 스위칭 속도 및 응답성의 고속화 처리가 필요하고, 이를 위해 최근기술로는 DSP(Digital signal processor)를 채용하여 연산 처리 속도를 크게 개선하였고, ASIC화를 통해 고속신호처리 및 단순화를 하고있다. 또한 Power 소자의 고속스위칭 동작 및 안정화를 위해 IGBT(Insulated gate bipolar transistor)를 적용하고 있고, 더불어 IPM(Intelligent power module)적용이 증가하고 있다.

### 2) S/W 측면

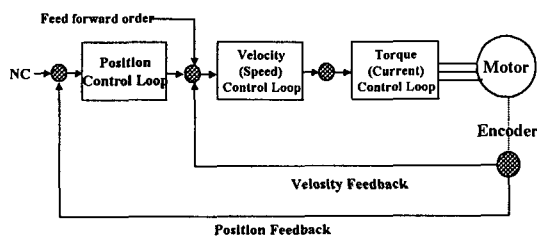


Fig. 2 Composition of control system S/W

서보계의 제어는 위치제어, 속도제어, 전류제어 루프로 구성되고, 최근에는 엔코더만에 의한 피드백 제어방식으로 발생하는 서보계의 지연오차를 줄이고 고응답성을 실현함으로써, 고속가공이 가능하도록 피드백 제어와 병행하여 Feed forward제어를 실현하고 있다. 또한 최근의 디지털 서보시스템들은 CPU속도 및 H/W의 고집적화, 고속화 기술의 발전에 더불어 서보제어 알고리즘을 서보유니트에서 CNC본체로 혼합설계하여 단순화를 실현하고 있다.

### 3.3 서보모터의 선정

볼스크류와 동일하게 서보모터의 사양 최적화를 목적으로 정격Torque, 가감속시 구동Torque, 이송축의 관성Moment, 최대절삭 Torque 및 급이송 도달시간을 산출하고, FANUC의  $\alpha$ -Series 모터를 적용하여 급이송 속도를 60m/min에 대하여 검토한 결과 Table 3과 같으며, 검토결과에 대하여 서보모터의 사양을 다음과 같은 항목으로 적합성을 검증한다.

- 서보모터 최대 단속 Torque는 이송조건외 가감속 Torque보다 큰가?
- 서보모터의 정정격 Torque는 최대절삭 Torque 이상인가?
- 급이송 도달시간이 시정수에 비하여 지나치게 크지는 않는가?
- 서보모터 Rotor 관성모멘트가 기동축 총관성 모멘트의 1/3보다 큰가 ?

Table 3 The Specification of servo motor

Item		Result
Servo motor	Rotor inertia (kgf-cm-s <sup>2</sup> )	0.064
	Static basic torque (kgf-cm)	122
	Max.of intermittent torque(kgf-cm)	382
Feed drive system inertia (kgf-cm-s <sup>2</sup> )	Total inertia of moving shaft	0.096
	Total inertia of moving shaft / 3	0.032
Constant speed torque (kgf-cm)		14.1
Max. of cutting torque (kgf-cm)		48.6
Torque (kgf-cm)	Acceleration	349
	Deceleration	-321
Arrival time of rapid feed		0.20

### 3.4 이송 안내면

이송 안내면은 속도에 비례해서 마찰저항이 증가하여 마모가 급격히 일어나기 때문에 고속이송에서는 미끄럼 안내면을 사용할 수가 없고 구름 안내면의 사용이 적합하며 구름안내에 적합한 리니어 가이드는 다음과 같은 요구를 필요로 하고 있다.

- 적정예압으로 강성 및 밸런스가 우수할 것.
- 적당한 마찰력을 갖고 감쇠성이 있을 것.
- 운동진직성이 우수하고 고정도일 것.
- 긴 수명으로 신뢰성과 내충격성이 우수할 것.

Table 4 Specification of linear guide

Item		LY-35EL
Contact angle		45°
No. of contact part		4
Basic load rating, dynamic(kgf)		3,590
Basic load rating, static(kgf)		5,220
Static moment (kgf-m)	Rolling moment	90
	Pitching moment	59
	Yawing moment	59

본 연구에서 이상의 특성을 만족하는 리니어 가이드로 불형 구름안내계를 적용하고, 특성으로는 4열의 구름을 가지고 예압설정에 따른 볼이 구와 4점 접촉하기 때문에 부하를 받는 점의 수가 많고, 하중을 지지하기 위해 적정한 예압으로도 고강성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 접촉각을 45°를 하여 상하좌우 각 방향의 밸런스가 우수해 여러 방향의 절삭력에 대해 동일한 고강성을 유지할 수 있다.

## 4. 이송장치 구성 및 성능평가

### 4.1 이송장치 구성

대리드의 중공 볼스크류를 적용하여 스트로크 420 mm 1축 이송계를 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 설계, 제작하였다. 이송계의 구성요소로는 서보모터, 커플링, 볼스크류, 지지베어링, 리니어 가이드, 이송테이블로 구성되고, 제어계는 FANUC의 0-M CNC장치로 구축하였다. 주변장치로는 고속용 방진 Cover와 윤활 시스템을 추가하여 특성연구를 수행하였다.

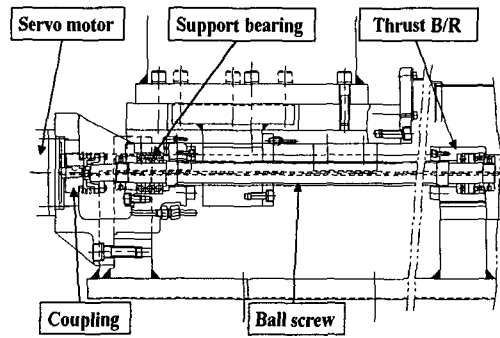


Fig. 3 Drawing of high speed feed tester

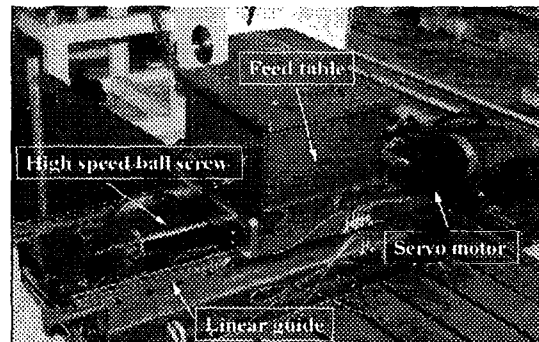


Fig. 4 Configuration of experimental setup

## 4.2 성능평가

### 1) 위치정도

이송계의 위치정도를 Laser간섭계를 사용하여 정밀측정하고, 볼스크류의 피치오차를 자동피치보정 S/W를 이용하여 보정 한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다.

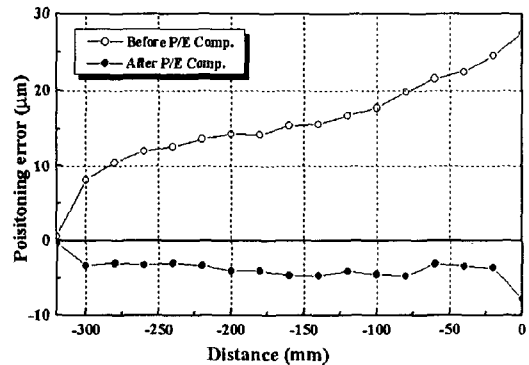


Fig. 5 Positioning accuracy of before & after pitch error compensation

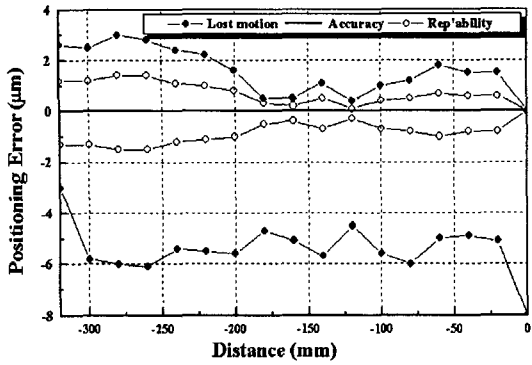


Fig. 6 Positioning accuracy applied JIS-b6330 rules

Fig. 5는 스트로크 320mm의 위치정도를 피치 보정 전·후로 비교하여 보정전의 최대 27 $\mu$ m에서 보정후 7.8 $\mu$ m으로 약20 $\mu$ m의 향상을 나타내며, Fig. 6은 보정후의 위치정도를 JIS-B6330규격으로 표현한 것으로 로스트모션 3 $\mu$ m, 반복정도 1.5 $\mu$ m을 보여주고 있어 이송계가 고정도를 유지하고 있다.

## 2) 미소이송정도

이송계의 미소이송단위를 1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 및 10 $\mu$ m/스텝으로 하여 5스텝씩 응답성을 반복 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내었으며 1 $\mu$ m씩 5스텝에서 0.3 $\mu$ m의 오차를 가지며, 이송단위가 클수록 오차가 감소함을 보여주고 있다. 미소단위에서 오차 현상은 스틱슬립이 발생되고 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 고속, 정밀제어가 되는 것을 볼 수 있다.

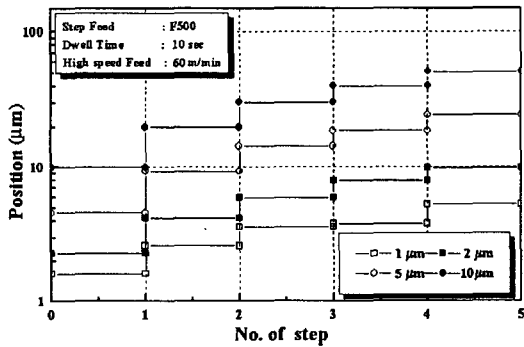


Fig. 7 Micro step response of feed drive system

## 3) 열변형 특성

이송계의 열변형 특성을 분석하기 위하여 측정 시스템으로 열변위는 Laser간섭계를 사용하고, 온도는 백금측은 저항체를 적용한 온도센서와 온도수집보드를 사용하여 8시간(480분)을 연속하여 수집하고 그 결과를 아래의 그래프에 나타내었다. Fig. 8에서 이송계의 열변위는 구동모터 축을 고정축으로 하여 최대 18 $\mu$ m의 변위를 나타내고, 반대편인 반고정축은 55 $\mu$ m의 변위를 나타내며, 볼스크류의 팽창량은 최대 89 $\mu$ m으로 나타났다. 또한 온도변위는 Fig. 9에서 실온의 변동에 따라 변하며, 볼스크류의 너트측에서 계속적인 이송에 따른 발열로 온도가 가장 많이 상승하였고, 실온과의 차는 최대 5° 정도를 나타내었다.

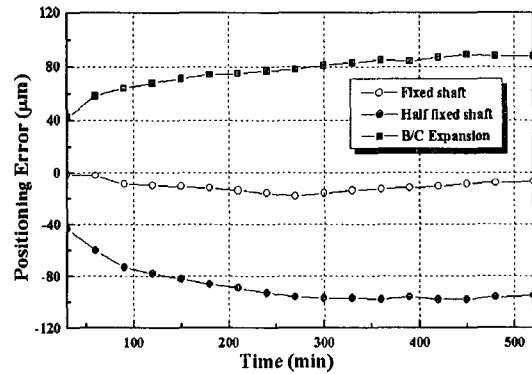


Fig. 8 The continuous heat displacement of feed drive system

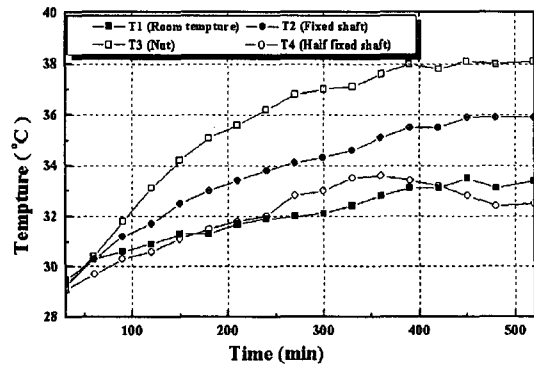


Fig. 9 The continuous temp. change of feed drive system

#### 4) 이송속도별 가·감속 특성

이송속도별 가·감속시간을 비교하기 위해 CNC의 D/A 컨버터 채널과 메모리 하이코더를 사용하여 30m/min과 50m/min, 60m/min으로 비교 측정하여 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 가감속시간은 각각 160msec, 180msec, 200msec이고, 320mm 이동거리 도달시간 차는 30m/min에 비해 60m/min이 370msec 단축되어 실제 45%의 시간 단축 효과를 보여주고 있다. 또한 동일조건에서 30m/min에 도달하는 시간이 30m/min에 비해 60m/min이 50msec 단축되어 가속 중에도 단축 효과가 나타남을 확인할 수 있었다.

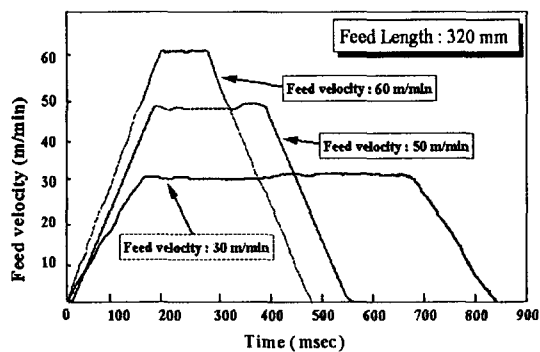


Fig. 10 The comparison of acceleration & deceleration time according to feed

#### 5. 결론

본 연구에서는 공작기계 이송계의 고속화를 달성하기 위해 이송속도 60m/min의 구현을 목적으로, 대리드의 볼스크류를 적용한 고속 이송계의 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고속 이송계의 기계적 요소설계와 제어계 설계를 고속특성에 따라 수행하여 기본설계에 관한 개념을 정립하였으며, 이를 바탕으로 1축 이송계를 제작하고 성능평가를 수행하여 고속 이송계의 특성을 분석할 수 있었다.
- (2) 이송계의 위치정도는 자동피치보정을 적용하여 고속주행에서도 7.8 $\mu$ m의 고정도를 실

현하고, 미소이송단위를 전스트로크에서 스텝별로 측정된 결과 정밀한 제어가 가능함을 확인하였다.

- (3) 열변형 특성은 8시간 연속운전에서 볼스크류의 팽창량은 최대 89 $\mu$ m을 보여주고, 온도변위는 볼스크류의 너트측에서 가장 많이 상승함을 나타내었다.
- (4) 고속 이송계가 기존의 30m/min에 비해 이동거리 도달시간은 실제 30%의 시간단축 효과를 보여주며, 동일조건에서 기존의 최대 속도에 도달하는 시간도 고속 이송계가 50msec가 단축되어 가속 중에도 속도차이가 남을 확인할 수 있었다.

이상의 연구결과를 바탕으로 향후에 볼스크류의 발열특성을 정밀분석하기 위해 중공 볼스크류의 적용과 냉각매체의 적용유무를 통하여 열변형 특성을 평가하고, 열변위 억제를 위한 보정 관계를 연구하여 고속 및 고정도의 이송계를 실현하여 공작기계에 활용함으로써 생산성 향상에 기여하는 것을 목적으로 한다.

#### 참고문헌

1. 玉置明, "超高速, 低騒音 テーブルとその要素", 自動化技術, 25-3, p43, 1993.
2. M.Ninomiya and K.Miyaguchi, "Recent Development of Ball Screws", NSK Technical Journal No. 664, pp.1-4, 1997.
3. S.Yabe, "Development of NSK Linear Guides", NSK Technical Journal No. 664, pp.14-16, 1997.
4. 大塚二郎, "ねじ駆動による 超精密位置決め (第1報)", 日本精密工學會誌, 56-11, pp2033-2038 1990.
5. 井澤 實, "精密位置決め技術", 工業調査會, 1990.
6. 諸眞信行, "工作機械の送り駆動系の運動精度", 機械の研究, 42-1, pp181-182, 1990.
7. 松本秀樹, "超高精度 直線運動 機構(第2報)", 精密工學會誌, 54-10, pp1945, 1988.