

장거리 구동용 FTS 의 최적 제어에 관한 연구

이상호*(경상대학교 대학원), 이찬홍(한국기계연구원), 김갑순 (경상대학교)

A study on the optimal control of Long Stroke Fast Tool Servo Systems

S. H. Lee(Control Instrumentation Eng. Dept., GSUN), C. H. Lee(KIMM), G. S. Kim (Control Instrumentation Eng. Dept., GSUN)

ABSTRACT

With a rapid development in the area of micro and ultra precision technology, the micro surface machining of small size parts are explosively increased. Especially, to improve efficiency of various beams in lens and reflector, non-rotational symmetric form and several mm level heights changeable surface can be machined at a time. These geometric complex 3D surface cannot be machined by general short stroke FTS. The long stroke FTS is firmly needed to move directly several mm and have nm level positioning accuracy for the complex surface form. The long stroke FTS used linear motors to drive moving unit long and fine, aero static bearings to decrease friction and moving errors in guide way, optical linear scale with nm level resolution to measure position of FTS. Furthermore, to increase the performance of acceleration of FTS, the light material, such as AL is used for the structure and the high stiffness box type structure is selected.

In this paper, the genetic algorithm approach is described to determine a set of design parameters for auto tuning. The authors have attempted to model the design problem with the objective of minimizing the error, such as variable pattern change. This method can give the better alternative than existing other method.

Key Words : Fast Tool Servo(고속 공구 이송 장치), Linear motor(리니어 모터), Diamond Turning(다이아몬드 선삭), Optimal control(최적제어)

1. 서론

최근 마이크로 기술의 발달로 인해 초정밀 관련 부품의 수요가 군수 산업, 우주 항공 산업 등의 제한된 분야에서 전자, 광학 및 반도체 산업 등의 다양한 분야로 확대되어가고 있다. 더불어 다이아몬드 선삭 기술의 발달로 정밀한 형상 및 가공면을 얻을 수 있어 반사경, 렌즈 금형 등 주로 광학 부품을 가공하는데 사용되고 있다. 특히 회전 대칭 표면 보다는 회전 비대칭 표면 가공기술이 가능해 지므로써 광학 산업에 큰 영향을 주었다.

그러나 이러한 초정밀 회전 비대칭 표면가공기술은 일반적인 Z 축 초정밀 가공기에서 가공하기 어렵고, 추가적으로 고속 공구이송 장치를 장착해야 하고 이 미소 이동 공구대(Fast Tool Servo, 일명 FTS)의 운동 특성은 우수해야 원하는 고품질의 표면을 얻을 수 있다. 지금까지는 초정밀 가공을 위

해 압전 소자의 팽창/수축을 이용한 FTS 가 다양한 형태의 표면을 만들어 왔었다. 그러나 초정밀 중대형 부품의 표면에 미세한 형상 가공의 필요성이 증가함으로써 기존의 단거리용 FTS 보다는 리니어 모터를 채택한 장거리 FTS 을 사용이 증가하고 있다. 이러한 리니어 모터를 이용한 장거리 구동 FTS 는 단거리 구동 FTS 사용 시 이송 거리의 제한 및 동기 제어의 어려움으로 인한 각종 빔의 렌즈나 반사경에 빔의 효율성을 높이기 위해 표면에 회전 비대칭 형상 구현과 수 mm 정도의 높낮이 변동을 동시에 고려할 수 없는 단점을 개선한다. 하지만 이 FTS 의 제어 파라미터 Tuning 에 따라서 목표로 하는 표면 형상에 대한 오차가 더 커질 수 있는 문제가 있다.

본 연구는 이러한 리니어 모터를 이용한 장거리 FTS 구현 시 최적의 제어를 구현할 수 있는 파라미터를 설정하는 것으로서, 리니어 모터와 공기 베

어령을 사용하여 3.7G 의 가속도와 10mm 의 왕복 이송이 가능한 장거리 FTS 를 구축하였다. 그리고 측정 장비를 이용하여 전달함수를 구하고 파라미터의 결정 방법으로는 Ziegler-Nichols 방법과 Relay 자동 동조기를 사용하는 방법 등이 있지만 여기에서는 제어된 시스템의 오차 값을 최소화하는 최적 제어(Optimal Control)을 이용하였다.

2. 장거리 구동 FTS 설계

Fig.1 은 FTS 를 장착한 초정밀 가공기를 보여주고 있다. 여기에서 FTS 는 산업적 요구에 따라 장거리이면서 운동 주파수가 높은 FTS 를 설계하기 위해서는 무엇보다도 가벼워야 하고 FTS 의 안내면에서 마찰이 작아야 한다.

이러한 조건을 만족하기 위해서는 기본 구조상에 지금까지 많이 사용되어진 무거운 철 계통의 재료를 운동부의 재료로 사용 할 수가 없다. 또한 안내면에서의 마찰과 운동 오차를 되도록 감소시키기 위해 LM 안내면은 사용 할 수가 없다.

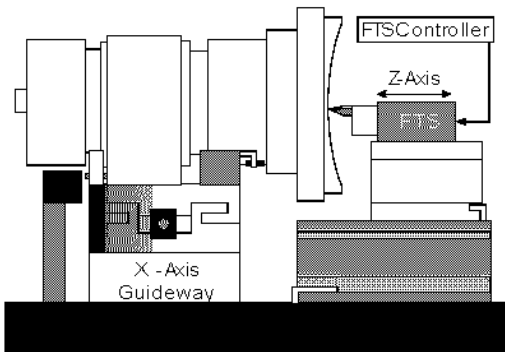


Fig.1 Schematic of Fast Tool Servo assembled on diamond turning machine.

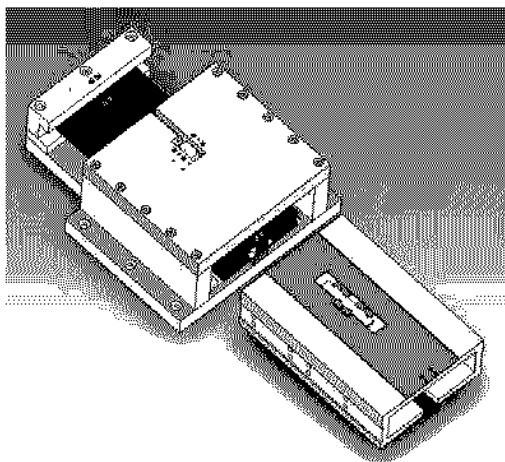


Fig.2 Assembly drawing of the FTS.



Fig.3 Location and form of porous air bearing.

구조물의 형태도 운동 주파수가 높기 때문에 진동을 감안하여 최소한의 구조물 강성을 유지할 필요가 있어 폐쇄구조 형태를 운동부의 리브로 선택해야 한다. 그리고 구동 방식도 미소이송만 가능한 PZT 구동이나 회전 질량이 커서 높은 주파수의 왕복운동이 어려운 볼스크류 구동은 사용하기 어렵다. 그래서 이러한 단점을 충족 할 수 있는 다음과 같은 구조와 메커니즘을 채용해 장거리 FTS 를 설계하였다

- 구동계 : 두 개의 배면 배열 리니어 모터를 이용한 비접촉식 구동.
- 위치 검출계 : 5nm 분해능의 레이저 리니어 스케일을 사용한 비접촉식 위치검출.
- 운동 제어계 : PC 일체형 Motion Controller 를 이용한 PID 제어.
- 안내면 : 상하 좌우 18 개의 다공질 공기 베어링을 이용한 비접촉식 초정밀 안내.
- 구조계 : Box 타입의 운동체 구조물 형상으로 설계해 고강성화 추구.
- 재료 : 운동체의 질량을 감소시키기 위해 알루미늄을 채택.

3. 시스템 모델링 및 제어기 설계

3.1 시스템 모델링

시스템은 주어진 사양에 항상 만족하지 못하기 때문에 제어기를 추가하여 보상을 해 주어야 한다. 일반적으로 보상은 두 모델 상태에서 이루어지는 경우가 많으나 그럴 경우 시스템에 대한 특성을 정확히 알지 못하므로 인해 최적의 보상이 이루어질 수 없다. 더불어 잘못된 게인 Tuning 은 고가의 장치 및 시스템 전체에 손상을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 특성을 나타내는 주파수 전달함수와 시간 영역의 Step Response 를 통하여 실제 시스템과 유사한 모델링을 하고자 하였으며, 이

러한 시스템에 시뮬레이션 과정을 통한 제어기 설계 및 최적의 게인 Tuning 에 적용하고자 하였다.

Fig.3 은 Dynamic Signal Analyzer (Model : Agilent 35670A)를 이용, PID 제어기를 추가한 Closed Loop 에서 Open Loop 주파수 응답 특성을 측정하는 것이다. 이 주파수 응답 특성 곡선을 바탕으로 Matlab 의 System Identification 툴을 이용하여 근사화 모델을 찾았다. 그리고 근사화 된 시스템이 얼마나 정확한지를 확인하기 위해 시뮬레이션 상에서의 Step Response 와 실험상에서의 Step Response 를 상호 비교 하였으며 다음과 같이 3 차 전달함수를 갖는 시스템을 모델링 하였다.

$$G_{OL}(s) = \frac{1.013e008}{s^3 + 562.9s^2 + 4081s + 2.895e005}$$

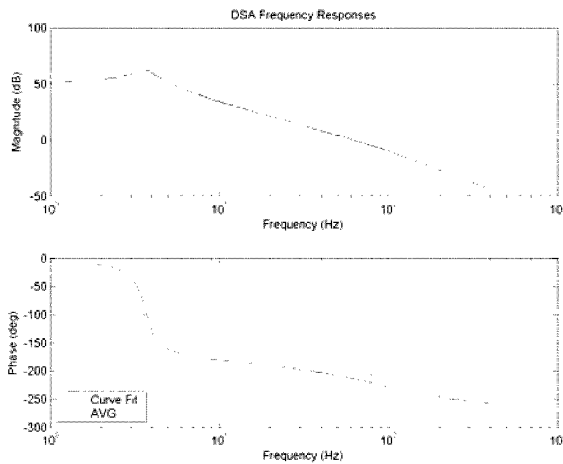


Fig. 4 Frequency Response of Plant

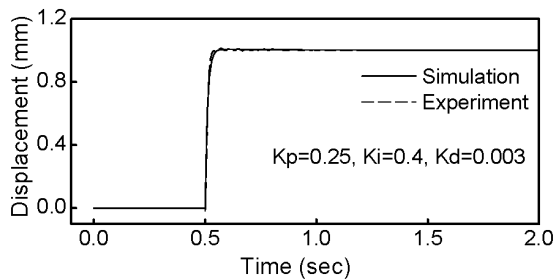


Fig.5 Comparison of Step Response.

3.2 제어기 설계

여러 가지 제어기 중 본 논문에서는 산업체에서 가장 많이 사용하는 PID 제어기를 사용한다.

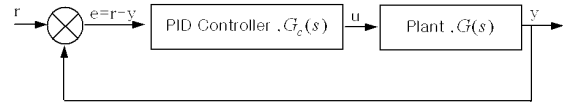


Fig. 6 PID Controller.

Fig.6 에서도 볼 수 있듯이 PID 제어기는 시스템의 전달함수 $G_s(s)$ 에 PID 제어기의 전달 함수 $G_c(s)$ 을 곱하여 시스템 성능을 향상 시킨다. 따라서 PID 제어기를 설계한다는 것은 PID 제어기의 계수인 Kp, Ki, Kd 를 결정하는 것이라고 할 수 있다. Kp, Ki, Kd 를 결정하는 방법에는 Ziegler-Nichols 방법과 Relay 자동 동조기를 사용하는 방법 등이 있지만 여기에서는 제어된 시스템의 오차 값을 최소화 하는 최적 제어(Optimal Control) 즉, 유전자 알고리즘(Genetic algorithm, GA)을 이용한다. 최적화에는 주어진 조건 하에서 목적으로 하는 값을 최대 또는 최소화하는 설계 변수를 구하는 것이다. 이러한 최적화 방법을 PID 제어기에 적용시키면 주어진 시스템(Plant) 대해서 목적 함수인 성능지수로 시스템 오차 e 를 최소화하는 설계 변수인 PID 제어기 Kp, Ki, Kd 를 결정하는 것으로 정리 할 수 있다.

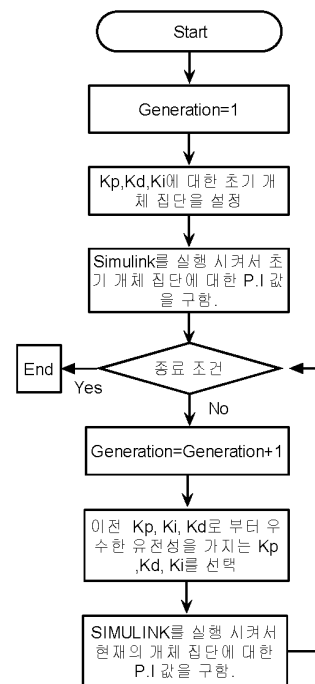


Fig.7 Flowchart for selection of optimal gain by GA.

유전자 알고리즘은 한 번에 25 세대를 수행하며 다음과 같이 11 번의 과정을 거쳐 최적의 gain 을 찾았다.

	Kp	Ki	Kd	Error
1	0.077066	0.060231	0.000651	2.6538
2	0.20466	0.11983	0.001279	2.5099
3	0.29134	0.1316	0.001578	2.4667
4	0.32056	0.17948	0.001571	2.4636
5	0.32053	0.19269	0.001571	2.4635
6	0.31921	0.19796	0.001571	2.4635
7	0.31918	0.20932	0.001571	2.4634
8	0.31918	0.20932	0.001571	2.4634
9	0.31918	0.20932	0.001571	2.4634
10	0.31782	0.21571	0.001571	2.4634
11	0.31782	0.21571	0.001571	2.4634

Table 1. Selection of optimal gain by GA.

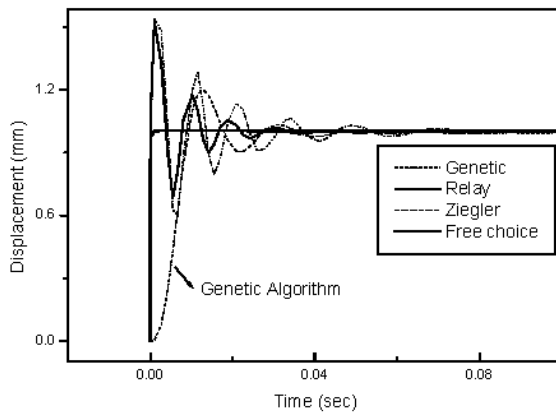


Fig.8 Step response of optimal gain by tuning methods.

Fig.8 은 Genetic 을 포함한 기존의 동조법을 이용하여 찾은 PID gain 을 Step Response 를 통해 본 것이다. 이 PID gain 을 통해 Fig.9 형상에 대해 적용하였을 때 형상에 대한 예러는 다음과 같았다.

Tuning methods	Errors (norm)
Genetic	4.6802
Relay	10.3030
Ziegler	12.3770
Free Choice	10.0659

Table 2. Turning Surface Errors with Tuning Parameters.

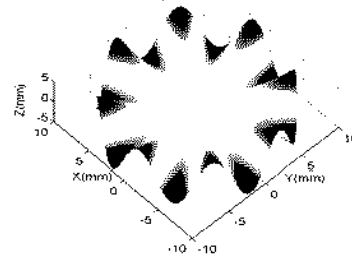


Fig.9 CAD Surface Pattern for Diamond Turning.

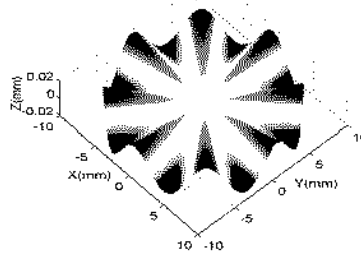


Fig.10 Turning Surface Errors by GA .

4. 결론

본 논문에서는 시스템의 특성을 나타내는 주파수 전달함수와 시간 영역의 Step Response 를 통하여 실제 시스템과 유사한 모델링을 하였다. 이를 이용하여 기존의 동조법에 적용하였으며 그에 최적의 PID 계수동조법으로 Genetic Algorithm 을 이용할 경우 형상에 대한 가공예러를 최소화 할 수 있다는 것을 시뮬레이션으로 알 수 있었다.

참고문헌

1. K. J. Åström and H. Ågghund, "Automatic Tuning of simple regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins, Automatica, Vol.20, pp.645 – 651, 1984
2. Goldberg D.E., "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning," Addison-Wesley, 1989
3. Sung, S.W., "New Process Identification Method for Automatic Design of PID Controllers," Automatica, Vol.34, pp 513, 1998