

GA-based Fuzzy 추론에 의한 미세드릴가공의 제어에 관한 연구

박인환* 鄭우섭**, 권혁준***

A Study on the Control of Micro Drilling by the GA-based Fuzzy Inference

In-Hwan Paik*, Woo-Seop Chung**, Hyedg-Jun Kweoh***

* : 부산대학교 생산기계공학과
** : 부산대학교 대학원 생산기계공학과
*** : 경주전문대학 자동차과

1. 서론

미세드릴가공은 최근의 공업제품의 소형 경량화 추세로 인해 수요가 급증하고 있으나 가공상에 있어서 많은 난점 작업 존재하기 때문에 정도 높은 가공기와 숙련된 가공 전문가를 필요로 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 변화하는 가공상태에 대응하여 항상 최적의 절삭상태를 유지할수 없도록 제어하기 위하여 적응성 제어와 비선형 제어의 의존성을 경감하고자 하는 지능제어에 대한 연구가 요구되고 있다.

절삭현상은 (대형가공에서는) 절삭현상의 변화와 같은 절삭상황의 변동에 따른 일정절삭력 제어가 수행되고 있으며 드릴가공에 있어서는 심공가공의 경우와 같이 가공이 진행됨에 따라 절삭력이 커지는 경우 혹은 강성이 다른 다층가공물의 가공 등에 있어서 절삭력의 변동을 억제하고 안정한 가공상태를 얻어려는 연구가 수행되고 있다. 드릴가공에 있어서 절삭상태를 가공중 검출하는 방법은 공구동력계를 이용하여 절삭력 측정, AE 등이 보편적이거나 적응제어의 실용화 측면에서 이송모터의 전류감지를 통해 적응제어를 시도한 연구도 보고되고 있다.^(1,3) 제어방법의 측면에서도 가공시스템의 수학적인 모델링에 의한 방법 뿐만 아니라 가공전문가의 가공방법을 묘사하는 언어적인 규칙에 의한 퍼지제어기 혹은 학습활동에 의한 신경망 제어기에 의한 방법이 선삭 및 엔드밀가공에 있어서 수행되고 있고⁽⁴⁻⁶⁾ 미세드릴가공의 제어에 관한 연구로는 최근 다중센서의 신호를 신경망 기법을 도입하여 공구상태를 규명하려는 연구가 보고되고 있다.^(7,8)

최근 현대화된 가공공장에서는 CNC 머신, 로봇 등을 최적으로 운용할수 있도록 기능과 경험 등을 기계에 부여한 지능화 된 기계가 등장하고 있다. 특히 지능있는 동작기계라 함은 작업자로 부터 상세한 정보의 입력없이 공작물의 재질변화, 효율 및 부하변동에 따른 요구변화 등을 인식하고 작업순서 등에 관계없이 최적으로 피삭재를 가공할 수 있는 능력을 가지는 것이다.⁽⁹⁾ 미세드릴가공은 작업자의 경험을 필요로 하는 난삭 가공이므로 높은 효율을 유지하며 공구파손을 방지할 수 있는 자동화가 필수적인 분야이다. 본 연구는 미세드릴가공을 수행하기 위해 우선 절삭상태 검출방법으로써 실용적이고 가공상황에 간섭을 일으키지 않는 주축용 모터의 전류값을 이용하며 제어기 설계를 위해 퍼지추론과 유전알고리즘

이론을 도입한다. 이러한 지능형 가공방법을 미세드릴가공에 구현하기 위해서 오프라인으로 안정한 가공조건을 최적화한 다음, 최적제어치를 이용하여 일정한 절삭력을 유지할수 있도록 실시간으로 이송속도를 제어하며 가공상황 변동에 따른 최적인 퍼지규칙을 자기동조하는 최적화 알고리즘을 제안한 후, 실제가공을 통하여 미세드릴가공의 특성과 제어기의 설계를 평가한다.

2. 퍼지 추론 및 유전 알고리즘

본 연구에서는 GA-based Fuzzy 제어가 설계를 위해 퍼지제어 분야에 많이 이용되고 있는 간략화된 퍼지추론과 최근 최적화 기법으로 관심이 집중되고 있는 유전 알고리즘에 대해 살펴본 후, 본 연구에서 사용한 양자의 결합방법을 기술한다.

2.1 간략화된 퍼지추론

퍼지제어기는 기존에 PID 제어기법⁽¹⁰⁾의 한계로 인한 운전조건보다 훨씬 넓고 작업자의 작업동작을 언어적인 수단으로 표현하기 때문에 제어규칙을 변경하거나 이해하기가 쉽다는 등의 장점을 가지고 있다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 (1)과 같이 후건부가 실수치로 표현되는 간략화된 상태평가형 퍼지규칙을 사용하였다. A_1, A_2 는 퍼지규칙의 전제부에는 항상 참형(영) 태에 대한 멤버십 함수 값이며 W_i 는 제어값을 임의하는 실수값이다.

$$\text{Rule } i: \text{IF } (x \text{ is } A_1) \text{ AND } (y \text{ is } A_2) \text{ THEN } z \text{ is } W_i$$
$$\mu_{A_1}(x) = \mu_{A_2}(y) \Rightarrow \mu_{A_1 \text{ AND } A_2}(x, y) = \min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y)) \quad (1)$$

Fig.1에 나타난 간략화된 추론 방법은 처리속도가 빠르고 계산의 간단함으로 퍼지제어에 이용되고 있으며 출력 y 는 아래와 같은식으로 나타낸다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3)$$

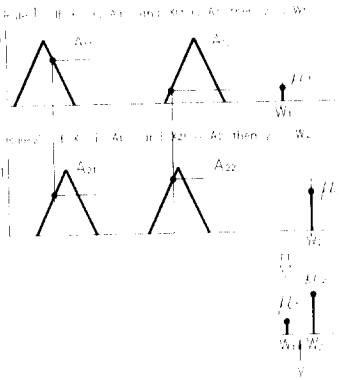


Fig.1 Graphical representation of simplified fuzzy reasoning method

2.2 유전 알고리즘에 의한 퍼지제어규칙의 자기동조

퍼지추론은 지식표현에는 적당한 방법이지만 본질적으로 지식을 습득하는 능력을 가지고 있지 않으므로 퍼지제어기를 가변적인 상황에 적합하게 최적의 상태로 운영하려면 전문가의 지식과 경험을 토대로 제어규칙을 구성하고 반복적인 실험 또는 시행착오적인 시도 등을 통해 제어규칙의 구성을 설계해야 한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 규칙베이스의 조정, 입출력 환산계수값 수정 또는 멤버십 함수의 조정 등을 수행하여 자기동조할 필요가 있으며 최근에는 신경회로망의 학습기능을 이용하여 퍼지규칙을 얻고자 하는 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁰⁾ 본 논문에서는 삼각형 형태의 멤버십 함수를 생성하기 위해 삼각형의 중앙값과 폭을 매개변수로 하여 유전 알고리즘을 사용하였다. 유전 알고리즘은 진화과정의 반복조작으로 적합도에 따라 생존경쟁하여 최적의 개체를 발생시키는 알고리즘으로 신경망 기법의 단점인 국부수렴의 단점이 줄어들고 탐색을 위해 보조적인 정보를 필요로 하지 않으며 모집단의 스트링과 적합함수를 필요로 하는 비교적 간단한 구성으로 이루어져 있다. 즉 이 방법은 자연선택과 적자생존과 같은 유전자 메카니즘의 원리를 이용하여 정립된 최적화 알고리즘으로서 유전자를 형성하는 모집단 내에서 하나의 유전자를 선택하여 Fig.2와 같은 교배 및 돌연변이 연산을 반복하여 가장 우수인 유전자를 선택하는 원리를 응용한 것이며 그 알고리즘은 다음과 같다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

- 단계 1> 랜덤한 염색체(스트링)을 n개 생성하여 초기 모집단 구성
- 단계 2> 적합도 함수로 부터 스트링 평가
- 단계 3> 적합도의 기대치에 따라 우성의 스트링들을 이용하여 새로운 스트링 복제
- 단계 4> 두개의 부모 스트링에서 임의의 교배점의 비트를 교차시켜 교배
- 단계 5> 스트링의 어떤위치에서 비트 전환시켜 돌연변이 생성
- 단계 6> 적합도가 낮은 스트링 제거
- 단계 7> 새로운 스트링을 모집단에 삽입

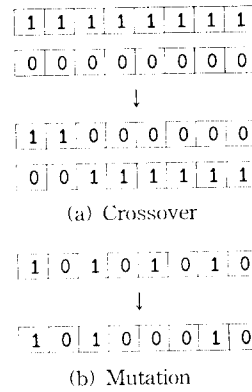


Fig.2 Crossover and mutation of string

단계2 에서 단계7까지의 1사이클을 세대라 부르며 이 사이클이 진행될수록 스트링은 적합도가 높은 집단으로 진화하게 된다.

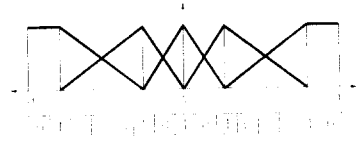


Fig.3 Fusion of GA and Fuzzy Membership function

이상의 유전 알고리즘에 기초하여 퍼지제어기의 멤버십 함수를 Fig 3과 같이 0과 1의 스트링으로 표현하였으며 1의 위치는 삼각형 멤버십 함수의 꼭지점을 나타내고 있다.⁽¹²⁾ 이러한 방식으로 전건부의 멤버십 함수와 후건부의 실수값을 자동 조절하였고 대칭으로 멤버십 함수를 구성하여 자기동조 계산량을 1/2로 감소시켰다. Fig.4는 유전알고리즘에 기초한 퍼지제어의 흐름도를 나타낸 것이다.

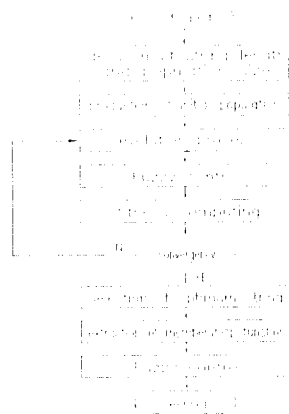


Fig.4 Flow-chart of GA-based Fuzzy Algorithm

3. 미세드릴가공용 GA-based Fuzzy 제어기 구축

3.1 실험장치 구성

미세드릴가공을 실현하는 전 시스템 구성은 Fig.5에 나타내었고 이를 제어하는 프로그램은 C 언어로 구현하였으며 아날로그 입출력, 디지털 입출력과 펄스 계수를 위해 AX5411 multilab 카드와 별도의 카운터 보드를 사용하였다.

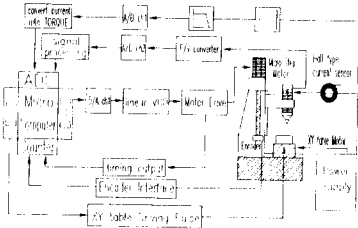


Fig.5 Experimental setup

미세드릴가공의 절삭력 정보는 홀소자 타입의 전류센서를 사용하여 주축용 모터의 전류값으로 부터 검출하였으며 5상 마이크로 스텝핑 모터의 구동펄스는 D/A 변환값에 따른 선형전압제어발전기로 조절하여 Z축의 이송속도를 제어하고 있다. 주축용 모터의 전류값에 의한 절삭력 측정법은 주로 토크 성분을 내포하는 것으로 측정계가 가공상에 간섭을 일으키지 않는 실용적인 감시방법 중의 하나이다. 그리고 미세드릴가공의 방법인 빈번한 스텝백이 발생하더라도 정확한 위치결정을 내기위해 모터 드라이브의 타이밍 신호에 의한 오픈루프 제어와 볼 스크류의 하단에 설치된 엔코더에 의한 세미클로즈드 루프를 혼용하고 있다.

3.2 GA-based FUZZY 제어기

미세드릴가공에 관한 숙련작업자의 경험적 지식을 퍼지화하려면 우선 미세드릴가공을 실현하는 방법에 대한 노하우가 필요하며 그 진행과정을 Fig.6에 나타내었다. 미세드릴가공의 가장 난점은 공구직경 감소에 따른 공구 파손임을 생각해 볼때 급작스러운 부하증가를 방지할 수 있도록 항상 일정한 절삭력으로 가공하는 것이 필수적이다. 따라서 가공 전문가가 가공을 진행하면서 부하가 걸리면 작업자는 이송을 줄여 가공을 하게 되며 이송을 낮추어도 부하가 여전히 일단 스텝백을 시켜서 칩을 제거한 후 다시 가공을 계속한다.

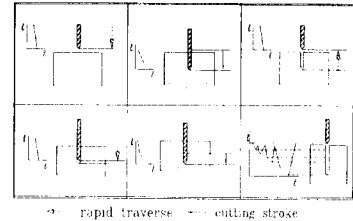


Fig.6 Process of micro drilling

이러한 가공과정을 제어하기 위해 다음과 같은 퍼지 추론규칙을 사용하였다.

Rule i : IF e is A_i and ce is B_i THEN u is C_i
 $e(t) = I(t) - I_r, ce(t) = I(t) - I(t-1)$ ---- (4)

e와 ce는 일정절삭력(I_r)에 대한 오차와 오차변화를 나타내는 입력변수이고 u는 가공기 이송속도의 변화를 유도하는 퍼지제어기의 출력변수를 나타내는 것이므로 이는 절삭력의 변동에 따라 이송속도를 연속적으로 조절할 수 있다는 것을 의미한다. Fig.7에 나타난 것처럼 A_i, B_i 의 전건부 멤버십함수는 삼각형 형태를 취하였고 C_i 의 후건부는 실수값을 선택하였으며 다음과 같은 언어변수를 사용하였다.

- NM : Negative Medium ----- (5)
- NS : Negative Small
- ZE : Zero
- PS : Positive Small
- PM : Positive Medium

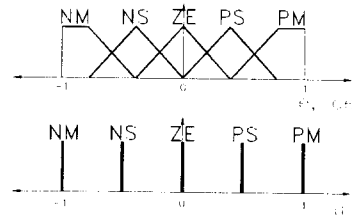


Fig.7 Membership function

적절한 퍼지규칙을 찾기 위해 본 논문에서 기준으로 사용한 유전 알고리즘의 적합도 함수는 다음과 같으며 높은 적합도를 가지는 스트링이란 적은 오차와 적은 오차 변화율을 의미한다.

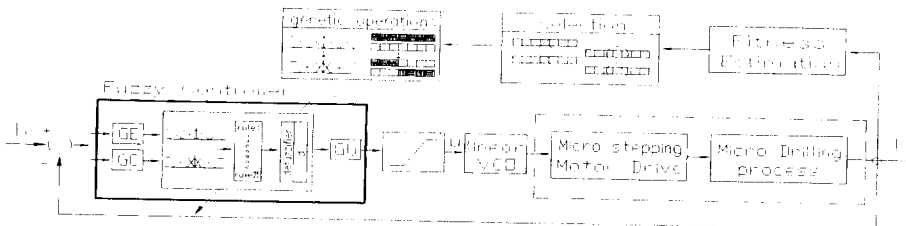


Fig.8 Basic scheme of the GA-based fuzzy control system

$$Fitness = \frac{K_1}{e} + \frac{K_2}{\Delta e} \quad (K_1, K_2 : const) \text{ ---- (6)}$$

이상의 내용을 토대로 하여 일정 절삭력을 유지하기 위한 미세드릴가공용 GA-based Fuzzy 제어기를 Fig.8과 같이 구성하였다. GE, GC, GU는 입력력값을 노말라이징 하기 위한 환산계수이며 온라인 튜닝시 집단중 적합도가 낮은 개체에 대한 제어를 실행할때는 리미터를 설치하여 시스템의 급격한 변동을 방지하고 있고 최대 최소 이송 속도에 대한 제한을 설정하여 최소이송에 달하면 스텝백이 발생하도록 하였다. 실험에서는 전 가공과정에 있어서 유전 알고리즘을 적용하여 퍼지제어를 수행하는 경우와 Fig.9처럼 가공초기에 유전알고리즘에 의한 퍼지제어를 실시하여 적합도가 수렴하면 최적 멤버십함수를 선택한 후 스위칭하여 FLC와 스텝퍼이드 메카니즘으로 가공 제어하는 전문가 시스템 제어방식의 2가지 모델을 수행하였다. 즉 후자는 Fig.6과 같은 순력작업자의 조작을 충실히 실행할 수 있는 제어기를 의미한다.

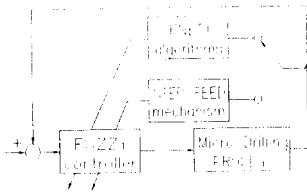


Fig.9 Expert control system

4. 실험 및 고찰

적용제어의 성능을 쉽게 판단하기 위해 강성이 다른 스테인레스와 황동을 용접한 다중공작물을 가공하여 절삭력을 능동적으로 제어하는 실험을 수행하였다. Fig.10은 Table 2를 기준으로 일정한 이송속도로 가공하는 경우 다중공작물의 절삭력 변동을 나타내고 있다.

Table 2. Initial Cutting condition

Workpiece	stainless(0.8t) brass(1.2t)
Tool material	HSS
Tool diameter	0.3mm
Spindle rpm	5000 rpm
Feedrate	5 mm/min

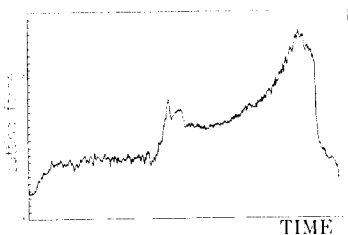


Fig.10 Variations of the uncontrolled current data

1층 가공물이 스테인레스이고 2층 가공물이 황동임을 고려할때 Fig.10의 절삭력 변동은 일반 직경의 드릴가공과는 상반되는 결과를 보여주고 있다. 즉 미세드릴가공에 걸리는 절삭력은 아주 미세하므로 가공물 강성에 따른 절삭력 변동보다는 가공시 발생하는 칩의 형태 또는 깊은구멍가공이 될수록 마찰력의 증대 등이 전체 절삭력에 영향을 미친다고 사료된다. 5mm/min의 동일한 이송조건에서 스테인레스의 경우는 칩이 아주 작게 발생하였지만 황동의 경우 연속형 칩 발생으로 인한 칩막힘 현상이 발생하여 절삭력이 증대하고 있으며 가공깊이가 깊어질수록 절삭력이 급증하고 있다. 단일 가공물에 있어서도 가공깊이에 따른 절삭력 증대는 동일하며 이처럼 미세드릴가공에 있어서 가공조건에 따른 절삭력의 변동을 예측하기란 쉽지가 않으므로 일정절삭력을 유지하며 가공을 실행하는 적응제어기의 구축이 요구된다.

4-2절에서 구축한 GA-based Fuzzy 제어기에 의해 Table 2의 절삭조건으로 일정 절삭력가공을 수행한 예와 제어기 출력을 Fig.11 및 Fig.12에 제시하고 있다.

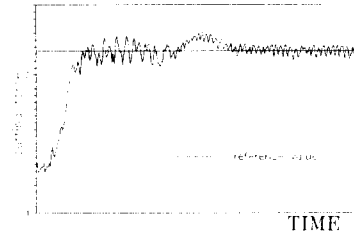


Fig.11 Adaptive force control of Micro Drilling

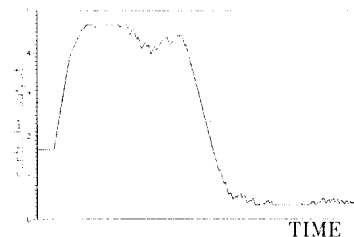


Fig.12 Variations of controller output

초기 스테인레스 가공시는 절삭력을 기준값까지 올리기 위해 제어기 출력값이 급증하며 스테인레스와 황동의 용접층에서 절삭력이 급상승하기 때문에 Fig.11에 있어서도 약간의 절삭력 상승이 나타난 후 곧이어 일정 절삭력 가공이 수행되고 있다. 황동부분의 칩막힘에 따른 절삭력 상승을 방지하기 위해 제어기 출력은 Fig.12처럼 거의 하한값까지 도달하게 되며 이는 적응제어 방식으로만 미세한 절삭력을 완벽하게 조절하기는 용이하지 않다는 것을 의미한다. 따라서 GA-based Fuzzy 제어기에 의한 가공과 스텝백가공을 혼용하여 가공전문가의 가공방법과 유사하게 가공할 수 있는 제어기가 요구되며 Fig.13과 같은 절삭력 변동을 나타내는 황동 미세드릴가공에 있어서 가공전문가 제어방식에 의해 가공할 때의 초기가공조건과 가공예를 Table 3, Fig.14 및 Fig.15에 나타내고 있다.

Table 3. Initial Cutting condition

Workpiece	Brass
Tool type	HSC0 ECEX(coting)
Tool diameter	0.2mm
Spindle rpm	5000 rpm
Feedrate	7.5 mm/min

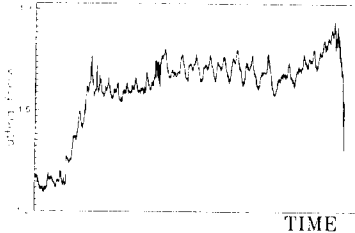


Fig.13 Variations of the uncontrolled current data

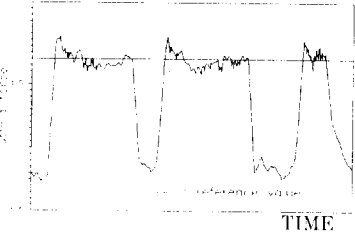


Fig.14 Expert system control of micro drilling

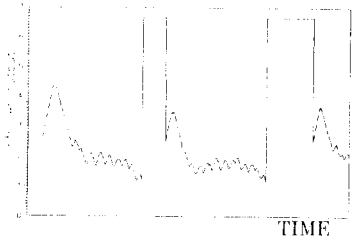


Fig.15 Variations of controller output

이 경우는 적합도가 안정한 값으로 수렴을 하면 유전 작용은 생략하고 최종 선택된 퍼지규칙에 의해 일정 절삭력 가공과 스텝백 가공을 동시에 수행한 것으로 초기 유전 알고리즘과 퍼지추론의 합성에 의한 제어는 각각의 피삭재, 절삭유, 가공지름 등에 따라 적절한 멤버십 함수를 탐색하는 일종의 가공조건 결정이라 생각할 수 있으며 이후 가장 높은 적합도를 가지는 스트림에 의한 퍼지 규칙과 스텝백으로 가공제어하는 것이다. Fig.14 및 Fig.15에 있어서 가공시는 기준절삭력값에 근접하고 있고 절삭력이 증가하여 최저이송속도에 도달하면 스텝백이 발생함을 보이고 있다. 스텝백이 발생하였을때는 급승이송을 위해 제어기 출력이 최대로 나타나고 있고 절삭력은 공회전시 초기값으로 떨어지게 되며 재가공위치에 도달하였을때는 초기이송속도로 가공이 재개되고 있음을 보이고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 미세드릴가공을 효과적으로 실현하기 위해 초기가공조건 선정에 관한 실험을 선행한 후 간략화된 퍼지제어기와 최적화에 적합한 유전 알고리즘을 결합함으로써 동적으로 제어전략을 조절할 수 있는 미세드릴 가공용 적응제어 방법에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미세드릴가공의 절삭력은 일반드릴가공의 경우와는 달리 피삭재의 강성보다는 칩의 발생형태 및 가공깊이에 더 민감하게 나타났다.
- 2) 일정 절삭력을 유지하기 위한 GA-based Fuzzy제어기와 칩막힘으로 인해 절삭력이 급증하는 것을 방지하기 위한 스텝백 메카니즘을 혼용하여 미세드릴가공에 있어서 가공속련자의 가공방법과 유사한 전문가 시스템에 의한 제어방식을 구축하였다.

참고문헌

1. E.Brinksmeier, "Prediction of Tool Fracture in Drilling", Annals of the CIRP, Vol.39, pp.97-100, 1990.
2. Y.Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", Transactions of the ASME, Vol.114, NOVEMBER, pp.386-392, 1992.
3. M.A.Mannan, S.Broms, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements", Annals of the CIRP, Vol.38, pp.347-350, 1989.
4. Y. S. Tarng, Y. S. Wang, "AN ADAPTIVE FUZZY CONTROL SYSTEM FOR TURNING OPERATIONS", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.33, No.6, pp.761-771, 1992.
5. Y.S.Tarng, S.T. Hwang and Y.S.Wang, 1993, "A NEURAL NETWORKCONTROLLERFOR CONSTANT TURNING FORCE", Int.J.Mach.Tools Manufact., Vol.34, No.4, pp.453-460
6. M.K.Kim, M.W.ChoandK.Kim, "APPLICATION OF THE FUZZY CONTROL STRATEGY TO ADAPTIVE FORCE CONTROL OF NON-MINIMUM PHASE END MILLING OPERATIONS", Int.J.Mach.Tools Manufact., Vol.34, No.5, pp.677-696, 1993.
7. Ibrahim Nur Tansel, Christine Mekdecı and Oscar Rodriguez, "MONITORING DRILL CONDITIONS WITH WAVELET BASED ENCODING AND NEURAL NETWORKS", Int.J. Mach. Tools Manufact., Vol.33, No.4, pp.559-575, 1992.
8. Ibrahim Nur Tansel, "IDENTIFICATION OF THE PREFAILURE PHASE IN MICRODRILLING OPERATIONS USING MULTIPLE SENSORS", Int.J.Mach.Tools Manufact., Vol.34, No.3, pp.351-364, 1992.
9. 水本雅晴, "ファジイ制御に對する最近の手法", システム/制御/情報, Vol.38, No.11, pp.590-595, 1994.
10. 市川芳明, "遺傳的アルゴリズムの制御系設計", 電學論D, 113卷, 12號, pp.1361-1362, 1993.
11. 山田新一, "GAを用いたファジイ適應制御", 電學論D, 114卷, 10號, pp.943-946, 1994
12. 中西洋八郎, "遺傳的アルゴリズムによるファジイ制御", システム/制御/情報, Vol.38, No.11, pp.590-595, 1994.
13. 정성중, "공작기계 자동화를 위한 적응제어 기술의 개발 동향", 대한기계학회지, 第28卷, 第3號, pp.635-644, 1988.
14. Li-Xin Wang, ADAPTIVE FUZZY SYSTEMS AND CONTROL, Prentice-Hall, Inc, pp.9-28, 1994.