

실시간 적응 학습 진화 알고리즘을 이용한 자기 동조 PID 제어

장 성 옥·이 진 걸*

(2002년 10월 29일 접수, 2003년 7월 10일 심사완료)

The Self-tuning PID Control Based on Real-time Adaptive Learning Evolutionary Algorithm

Sung-Ouk Chang and Jin-Kul Lee

Key Words: Evolutionary Algorithm(진화알고리즘), Real-Time(실시간), Adaptive Learning Control(적응 학습 제어), Mutation(돌연변이), Search Region(탐색범위)

Abstract

This paper presented the real-time self-tuning learning control based on evolutionary computation, which proves its superiority in finding of the optimal solution at the off-line learning method. The individuals of the populations are reduced in order to learn the evolutionary strategy in real-time, and new method that guarantee the convergence of evolutionary mutations is proposed. It is possible to control the control object slightly varied as time changes. As the state value of the control object is generated, evolutionary strategy is applied each sampling time because the learning process of an estimation, selection, mutation is done in real-time. These algorithms can be applied; the people who do not have knowledge about the technical tuning of dynamic systems could design the controller or problems in which the characteristics of the system dynamics are slightly varied as time changes.

1. 서론

시스템의 수학적 모델을 바탕으로 하는 제어기의 설계는 연속, 미분가능과 같은 제약이 필요하며 모델링 과정에서 정확히 파악하기 힘든 파라미터나 외란요소에 대한 영향을 정확히 고려하여 제어기를 설계하는 것이 매우 어렵다.^(1,2)

한편 비례 미분 적분제어기의 경우 제어 게인의 튜닝(tuning)을 위하여 많은 실험이 필요하며, 제어기 설계자의 경험에 따라 성능이 차이를 나타내는 특성을 지니고 있다.^(3~5) 이러한 문제점을

해결하기 위하여 제어게인을 자동으로 튜닝하는 방법에 대한 연구가 행해져 왔다.⁽⁶⁾ 그러나 이러한 튜닝방식은 실시간으로 행해지는 제어기에서 오프라인으로 컴퓨터상에서 미리 제어게인을 튜닝한 뒤 선정된 게인을 이용하여 실험을 행하거나, 실험적으로 튜닝을 하는 경우에는 한번의 게인 튜닝으로 시스템의 과도 응답특성과 정상상태 응답특성을 고찰한 뒤 새로운 게인을 계속하여 튜닝하는 방식으로 나누어 진다.^(7,8) 이와같은 방식은 제어시스템이 시간에 따라 변화하는 경우에는 제어기가 변화하는 시스템에 적절하게 대응할 수 없으며, 시스템의 노후화로 인한 시스템 모델의 변화가 발생할 경우 적용하기 힘들다.

본 연구에서는 실험에서 실시간으로 매 샘플링 시간마다 학습의 성공과 실패를 판단하는 방식으로 학습을 행함으로써, 제어시스템의 변화에 대하여 실시간으로 제어게인을 튜닝하는 비례 미분

* Post-Doctor Researcher, Johns Hopkins University,
Dept. of Mechanical Engineering
E-mail : Sungouk@jhu.edu

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
TEL : 82-51-510-2330 FAX : 82-51-517-7716

적분 자기동조 학습제어를 행하였다. 따라서 시스템에 대한 지식이 없는 사람이 제어를 설계하고자 할 때나, 시스템의 노후화로 인한 모델식의 변화에 대하여 강인한 학습구조를 가지며, 시간에 따라 변화하는 제어시스템의 제어 및 적용 타당성을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 실시간 진화전략 알고리즘

자연세계의 진화과정을 기본모델로 하는 진화 전략 알고리즘은 부모의 교배에 의한 새로운 개체의 생성과정과 생성된 자식과 부모개체간의 경쟁을 통한 우성인자의 적자생존인 선택과정으로 크게 나누어진다.⁽⁹⁾ 자연세계의 진화과정을 살펴 보면 교배에 의한 진화보다는 돌연변이에 대한 영향이 더 큰 것으로 연구보고 되고 있다.⁽¹⁰⁾ 진화전략 알고리즘은 기본적인 알고리즘 특성상 부모개체와 자식개체간의 경쟁으로 인하여 자연스런 탐색범위조정과 평가, 선택이 이루어지는 구조이므로, 경쟁할 수 있는 부모와 자식간의 개체수가 미리 형성되어야 하고, 개체수를 줄이면 국소탐색에 그치거나 많은 학습시간을 요구하게 된다. 이러한 많은 경쟁할 수 있는 개체의 형성 및 탐색 방법 때문에 진화전략 알고리즘 적용 시 오프라인(off-line) 학습으로 최적의 해를 탐색하는 연구가 주로 행하여 졌다.^(11,12) 한편, 진화전략 알고리즘을 실시간으로 학습적용하기 위해서는 피드백 시스템(feedback system)에서 샘플링타임 안에 모든 학습이 완료되어야 하므로 개체수가 부모, 자식 각각 1개로 한정되어야 하며 이러한 개체수의 감소에 따른 학습시간의 증가, 탐색범위의 조정문제, 수렴성에 대한 고찰 등의 문제가 해결되어야 한다.⁽¹³⁻¹⁵⁾

본 연구에서는 실시간으로 학습이 가능하고 부모·자식간의 개체수를 각각 1개로 한정하였을 때, 개체수의 감소에 따른 탐색범위 조정의 어려움을 해결하기 위하여 시스템의 제어시 발생하는 오차(error)량을 이용하여 다음과 같은 수식을 사용하였다.^(16,17)

$$\sigma(t+1) = \sigma(t) \cdot \exp(N(0, e(t))) \quad (1)$$

$$x(t+1) = x(t) + N(0, \sigma(t+1)) \quad (2)$$

식 (1), (2)는 진화 전략알고리즘의 돌연변이를 수식으로 나타낸다. 여기서, 수식 (1), (2)는 부모세대에서 자식세대로 진화하는 과정중 부모의 돌연변이 연산자 $\sigma(t)$ 가 $\sigma(t+1)$ 로 갱신되는 수식을 나타내고 있으며, 물리적인 의미로는 제어 알고리즘(control algorithm)의 탐색영역을 나타낸다. $N(0, \sigma(t+1))$ 은 평균이 영(zero)이고 표준편차가 $\sigma(t+1)$ 인 표준정규분포를 나타낸다. 한편 $x(t)$ 는 돌연변이를 통해서 생성된 최종적인 인자를 나타내고 있으며, 이 논문에서는 비례 미분 적분 게인값을 의미한다. 즉 파라미터에 대한 탐색영역이 Fig. 2에 나타난 바와같이 오차량에 따라서 $\sigma(t+1)$ 의 값이 증감하게 되며 탐색영역도 자동으로 조절하며, 매년 조정되는 $\sigma(t+1)$ 의 값이 $x(t+1)$ 의 값으로 최종출력을 나타낸다.

본 논문에서는 비례 미분 적분 제어기(PID Controller)에 적용하였으므로 진화연산의 최종출력은 비례 미분 적분제어기의 게인을 매 샘플링 타임마다 갱신하는 구조이다. 한편 식 (1), 식 (2)에서 나타난 돌연변이에 대한 결과를 아래와 같은 적합도 함수를 사용하여 실시간으로 평가하여 적합도가 증가하는 방향으로 제어 게인을 조정하는 방식을 택하였다.

$$p^i(\text{fitness}) = \begin{cases} 1 & e^i(\delta) > \epsilon \\ 0 & e^i(\delta) < \epsilon \end{cases} \quad (3)$$

$$q^i(\text{fitness}) = \begin{cases} 1 & E^i(\delta) > \epsilon \\ 0 & E^i(\delta) < \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $e^i(\delta) = \text{state}^i - \text{state}^{i-1}$, $E^i(\delta) = e^i(\delta) - e^{i-1}(\delta)$ 이며, state 는 실린더의 위치제어를 위한 위치신호를 의미하고 fitness 는 적합도를 나타낸다. 한편, 임의의 양의 작은값을 $|\epsilon| < 0.01$ 로 나타내었다. 진화의 결과를 평가하는 최종 평가함수 $F^i(\text{fitness})$ 는 $p^i(\text{fitness})$, $q^i(\text{fitness})$ 와의 관계로부터 다음과 같이 구성하였다.

$$F^i(\text{fitness}) = (p^i(\text{fitness}) \text{ XOR } q^i(\text{fitness})) \quad (5)$$

2.2 자기동조 학습제어기

Fig. 1 은 진화전략 알고리즘을 이용한 자기동조 비례 미분 적분 학습제어기의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와같이 비례 미분 적분 제어기의 게인은 매 샘플링타임마다 진화 전략 알고리즘에 의하여 실시간으로 갱신된다.

진화 전략 알고리즘은 매 샘플링 타임마다 발생하는 오차량의 변화율을 이용하여 평가함수에서 학습의 성공·실패를 판단하며, 돌연변이에 의한 새로운 개체를 매 순간 발생시킨다. 따라서 실시간 자기 동조 학습제어기는 비례 미분 적분 제어기의 제어 게인을 이용한 비례 미분 적분 자기동조 학습제어기의 출력 u^i 는 매 샘플링 타임마다 갱신되며 갱신된 제어게인은 전기·유압 서보 시스템을 구동시키고 변위출력 y_o^i 를 발생시킨다. 이러한 비례 미분 적분 자기동조 학습제어기는 비례 미분 적분 제어기에서의 비례게인, 적분게인, 미분게인을 진화 알고리즘의 돌연변이 연산에 의한 개체생산 및 적합도 함수의 평가결과에 따라 비례 미분 적분제어 게인값이 틀리지므로 진화전략 알고리즘의 실시간 학습능력에 따라 제어기 전체의 성능이 영향을 받는다.

3. 실험장치 구성

실시간 적응 학습제어 알고리즘을 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였으며 그 외관을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 유압 서보 시스템은 최대 출력 7.5 [kW]의 전동기에 연결된 가변용량형 피스톤 펌프를 사용하였다. 실험에서 사용된 서보 밸브는 정격유량 38 [ℓ /min] 인 제품을 사용하였으며, 유압실린더는 양 로드 실린더를 사용하였다.

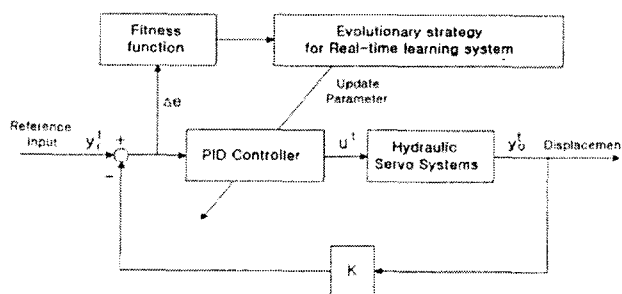


Fig. 1 Schematic diagram of PID self-turning learning control in real time

실린더의 위치신호를 전기적인 신호로 변환하기 위한 변위 변환기로서 포텐서미터를 사용하였으며, 제어기로의 입출력을 위하여 12비트 A/D, D/A변환이 가능한 DAC(Data Acquisition Card)를 사용하였다. 본 연구에서의 유압 서보 시스템의 실험 장치에서 사용된 장비의 제원은 Table 1에 나타내었다.

실험에서 사용된 샘플링 시간(sampling time)은 1[ms]이며, 펌프에서의 초기 토출압은 70[kg/cm²]이다. 비례 미분 적분제어 게인의 튜닝은 매 샘플링타임마다 진화 전략 알고리즘에서 돌연변이

Table 1 Specifications of the experimental apparatus

Instruments	Specification	Model number
Electric Motor	7.5 kW	HICO
Hydraulic Pump	28 cc/rev	A10V28DR1RPID
Relief Valve	210 kg/cm ²	OR-G03-P
Solenoid Valve	24 V	4WE100-A0/LG24N
Cylinder		Double rod
Servo Valve	38 ℓ /min	J076-103
Servo Amp.	± 75 mA	J121-001
Potential Meter	20 cm	
Oscilloscope	100 MHz	54600B
PentiumII-450	450 MHz	IBM Compatible
DAC	12 bit	PCL-818
Power Supply	200 W	ED-330

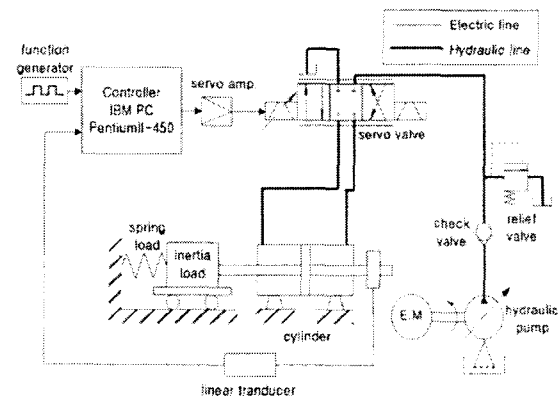


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup on the hydraulic servo system

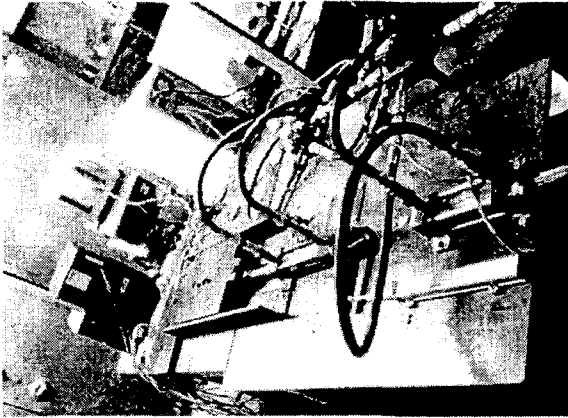


Fig. 3 The experimental setup of the electro-hydraulic servo system

연산으로 발생하는 새로운 개체에 의하여 실시간으로 갱신되며, 갱신된 제어입력은 서보앰프에서 증폭되어 서보밸브를 구동하고 서보밸브는 유압 실린더(hydraulic cylinder)를 구동하게 된다. 이러한 실린더의 변위는 변위센서에 의하여 위치가 검출되고, 기준입력 위치신호와 비교하여 오차량을 검출한다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2에서 나타낸 실험 장치를 이용하여 실시간으로 제어 계인을 튜닝하면서 스스로 학습하는 비례 미분 적분 자기동조 학습제어기를 사용한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

본 논문은 비례 미분 적분 제어기의 계인을 매 샘플링시간마다 실시간으로 튜닝(tuning)하는 구조이다. 튜닝을 위해서 사용된 알고리즘은 실시간 진화 전략 알고리즘이다. 샘플링 시간마다 새로운 계인으로 튜닝되며 그 결과 실시간 진화 알고리즘에 의해서 비례 미분 적분 계인값이 샘플링 시간마다 바뀌는 구조이므로 계인값을 한가지의 경우에 대해서 값을 나타내는 것은 의미가 없으며 한번 사용된 계인값이 다음 시행에서 반복적으로 사용되지 않는다. 한편 비례 미분 적분 계인값의 초기값이 너무 클 경우 발산이나 큰값이 초기에 잘못 제어기로 적용됨에 따른 제어불능 상태에 대한 문제점을 생각해서 초기값을 0에서 0.001 사이의 작은 값 안에서 세팅하였다. 즉 그 값안에서 임의 값을 랜덤하게 발생시켜서 초기값으로써 사용하였으며 거의 0의 값에 가까운

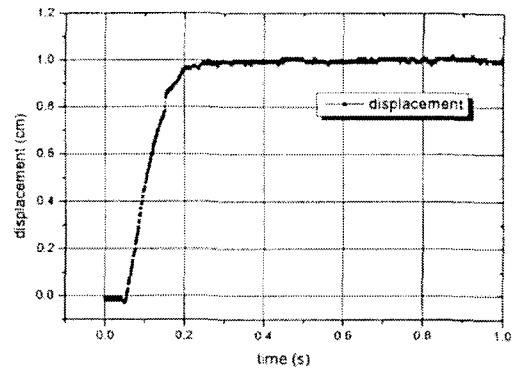


Fig. 4 The experimental result of real-time learning system using PID self-tuning learning control

값을 사용하였으므로 초기값의 영향으로 인한 안정성 문제는 발생하지 않았다. 그러므로 여러번의 시행으로 인한 결과를 고찰해 본 결과 비례 미분 적분 자기동조 학습제어기는 매우 안정적인 특성을 나타내었으며, 실험결과에서 나타나는 초기 0.05[s] 정도의 데드영역(dead zone)은 진화로 인한 계인튜닝의 결과 학습이 실패한 영역을 나타내고 있다. 따라서 진화 전략 알고리즘을 이용한 실시간 적응 학습제어를 이용하여 비례 미분 적분 계인을 튜닝할 경우, 학습을 실패시에도 최소한 샘플링 시간 한 스텝 전단계의 결과를 유지하며, 학습 성공시에는 실험결과에서 보는 바와같이 뛰어난 추종성을 나타내고 있다.

비례 미분 적분 제어기를 적용한 실제 기계시스템의 위치제어는 제품초기의 제어계인을 유지하여 지속적으로 튜닝이 요구되지 않으나, 사용시 발생하는 마모나 시스템의 변동에 대해서는 지속적으로 대처하기가 매우 어렵다. 따라서 이러한 자기동조 비례 미분 적분 학습제어기를 적용함으로써 제어시스템의 노후화로 인한 모델식의 변화로 인한 제어계인의 새로운 튜닝작업에 매우 유용하게 적용가능함을 알 수 있다.

5. 결론

비례 미분 적분 제어기는 시스템에서 발생하는 오차량을 이용하여 비교적 간단하게 적용가능하다는 장점을 가지고 있으나, 제어계인의 튜닝시 시스템에 대한 지식이 필요하고 및 시스템의 노

후화등으로 인한 새로운 게인 튜닝등의 필요한 단점이 있다.^(18,19) 이러한 어려움은 인공지능에서 주로 적용되고 있는 학습알고리즘을 이용함으로써 극복 가능하다.^(20,21)

본 연구에서는 오프라인(Off-line) 상태에서 이미 최적의 해를 탐색하는 분야에서 그 우수성이 입증된 진화 알고리즘을 이용하여 비례 미분 적분 제어게인을 자동으로 학습하는 알고리즘을 적용하여 보았다. 일반적인 제어시스템은 온라인(On-line)상태에서 실시간으로 제어시스템을 운용하며, 제어기의 설계 또한 실시간으로 적용하는 것이 필요하다.^(22~28) 따라서 진화전략 알고리즘을 실시간으로 학습시키기 위하여 개체수를 줄이고 시스템에서 발생하는 오차에 의한 자동탐색 범위 조절을 이용하여, 비례 미분 적분 제어 게인의 튜닝이 매 샘플링 시간마다 이루어짐으로써 실시간 자기동조 비례 미분 적분 학습제어를 행하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 자기동조 비례 미분 적분 학습제어기의 설계를 위한 실시간 진화 알고리즘을 적용할 때 실시간 학습을 통한 학습시간 및 성공률을 높이는 부분으로 연구를 계속 진행한다면, 제어시스템의 노후화로 인한 모델식으로 변화로 인한 제어게인의 새로운 튜닝 작업에 매우 유용하게 적용 가능하며, 또한 제어시스템에 대한 제어를 매 샘플링 시간마다 새롭게 적응 학습제어를 행함으로써, 시간에 따라 제어시스템의 모델이 조금씩 변화하는 곳에서도 적용 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kim N. I., Lee J. W., 2000, "Design the Sliding Mode Controller on the Estimator against Disturbance," *Journal of KSME.*, Vol. 24, No. 4, pp. 866~873.
- (2) Hong J. S., Park S. H., Kim H. S., Oh J. U., Jung J., 2000, "Active Vibration Control on the closed plate acting sound vibrated based on Multi Channel Control Algorithms," *Journal of KSME.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1390~1397.
- (3) Chang S. O., Lee J. K., 2000, "Development of a Hydraulic Servo System Real-Time Simulator Using a One-Board Microprocessor and Personal Computer," *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Control and Measurement*, pp. 128~132, 9-12 July.
- (4) Chang S. O., Lee J. K., 2000, "Development of a Hydraulic Servo System Real-Time Simulator Using a One-Board Microprocessor and Personal Computer," *Journal of KSPE*, Vol. 17, No. 8, pp. 94~99.
- (5) Chang S. O., Lee J. K., 2000, "A Study on the Application of the Real-Time Simulator," *Proceedings of the 15th Korea Automatic Control Conference*, October 19-21.
- (6) Han J. O. et al, 1999, "Development of Self-tuning Fuzzy-PID controller for the power plant control of steam Generator for Nuclear Power Plant," *Proceeding of the 14th KACC*, pp. 140~143.
- (7) KIM B. M. et al, 1999, "GA based PID gain tuning of AWC system in Hot strip mills," *Proceeding of the 14th KACC*, pp. 225~228.
- (8) Vega P., Prada C., and Aleixandre V., 1991, "Self-Tuning predictive PID controller," *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 3.
- (9) Fogel D. B., 1995, *Evolutionary Computation. Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, Pisonaway, NJ : IEEE Press.
- (10) Vonk E., Jain L. C., Johnson R. P., 1997, *Automatic Generation of Neural Network Architecture Using Evolutionary Computation*, World Scientific Publishing Co.
- (11) Fogel D. B., Atmar J. W., 1990, "Comparing Genetic Operators with Gaussian Mutations in Simulated Evolutionary Processes Using Linear Systems," *Biological Cybernetics*, Vol. 63:2, pp. 111~114.
- (12) Back T., 1996, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford, NY.
- (13) Schwefel H. P., 1995, *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley, NJ.
- (14) Michalewicz Z., Fogel D. B., 2000, *How to Solve It: Modern Heuristic*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 161~184/335~341.
- (15) Sanchez E., Tomassini M., eds., 1996, *Toward Evolvable Hardware: The Evolutionary Engineering Approach*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 19~

- 47/221~249.
- (16) Chang S. O., Lee J. K., 2001, "New approach to real time adaptive learning control of neural networks based on an evolutionary algorithm(I)," *2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 12-16, June.
- (17) Chang S. O., Lee J. K., 2001, "New approach to real time adaptive learning control of neural networks based on an evolutionary algorithm(II)," *2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 12-16, June.
- (18) Gene F., Franklin et al, 1997, *Digital Control of Dynamic systems*, Third Ed., Addison Wesley.
- (19) Astrom K., Hagglund T., 1994, *PID Controller : Theory, Design, and Tuning*, Second Ed.
- (20) Haykin S., 1999, *Neural Networks : A comprehensive foundation*, second Ed., Prentice-Hall Inc.
- (21) J.S.Jang, C.S.Sun, and E.Mizutani, 1997, *Neuro-Fuzzy and soft Computing : A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall Inc.
- (22) Chang S. O., Lee J. K., 2001, "Real-time Adaptive Learning Control Based on Evolutionary algorithm (I)," *Proceeding of KSME*, Jeju University, pp. 724~729.
- (23) Chang S. O., Lee J. K., 2001, "Real-time Adaptive Learning Control Based on Evolutionary algorithm (II)," *Proceeding of KSME*, Jeju University, pp. 730~733.
- (24) Chang S. O., Lee J. K., "A Consideration on Load Disturbance Characteristics of Real-Time Adaptive Learning Controller Based on an Evolutionary Algorithm-Application to an Electro-Hydraulic Servo System," *International Conference on Control, Automation and System (ICCAS2001)*, Je-Ju, KOREA., October 19-21., 2001.
- (25) Chang S. O., Park Y. H., and Lee J. K., " A New Method of the Evolutionary Algorithm for Adaptive Learning Control," *IFAC 2002 World Congress (b02)*, Barcelona, SPAIN., July 21-26., 2002.
- (26) Chang S. O., Lee J. K., 2002, "Adaptive Learning Control for Real Time Evolutionary Algorithms," *Journal of KSME*, Vol. 26, No. 6, pp. 1092~1098.
- (27) Chang S. O., Lee J. K., 2002, Adaptive Learning Control for Electro-Hydraulic Servo System based on Real Time Evolutionary Algorithm," Vol. 8, No. 7, pp. 584~588.
- (28) Chang S. O., *A Real Time Evolutionary Algorithm for Adaptive Learning Control*, Ph.D. Dissertation, Pusan National University, August 2002.