工學碩士 學位論文

DC 모터의 속도제어를 위한 모델기반 퍼지제어기 설계

Design of a Model-based Fuzzy Controller

for DC Motor Speed Control

指導教授 陳 康 奎

2001 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

金 秉 滿

本 論文을 金秉滿의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 工學博士 蘇 明 玉 印

委 員 工學博士 河 潤 秀 印

委 員 工學博士 陳 康 奎 印

2000 年 12 月 22 日

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科 金 秉 滿

목　　차

ABSTRACT

In this paper, a methodology for designing a controller based on inverse dynamics for speed control of DC motors is presented. The proposed controller has robustness in disturbance and it consists of a prefilter, the inverse dynamic model of a system and a fuzzy logic controller. The prefilter prevents high frequency effects from the inverse dynamic model. The model of the system is characterized by a nonlinear equation with coulomb friction and viscous friction. The fuzzy logic controller(FLC) is characterized by fuzzy "If-then" rules which represent locally linear control output whose consequence part is defined as linear PI controllers. And it regulates the error between the set-point and the system output which may be caused by disturbances and it simultaneously traces the change of the reference input.

A real coded genetic algorithm estimates the parameters of both the model and the linear PI controller. And it is characterized by three basic genetic operators that can deal with real coding chromosomes.

An experimental work on a DC motor system is carried out to illustrate the performance of the proposed controller.

제 1 장 서 론

근래 기술의 발달로 인하여 자동화가 가속됨에 따라 시스템들은 그 규모가 커지고 복잡해짐으로서 파라미터 변동, 모델링 오차, 비선형성 등 여러 가지의 불확실성을 내포하게 되고 이로 인해 시스템을 해석하고 제어하기가 대단히 어렵게 되었다. 이러한 경우, 제어기는 제어환경에 따라 설정치 변경에 대한 시스템의 추종성능을 개선하거나 아니면 외란에 대한 조종성능이 만족스럽도록 설계되는데, 만약 서로 다른 환경에서 운전되거나 설정치 변경과 외란이 동시에 존재하면 만족스런 제어성능을 기대하기 어렵다.

이러한 문제를 해결할 수 있도록 최근에는 인간의 사고능력과 적응 능력을 갖는 지능형 제어기(Intelligent controller)가 연구되고 있다[1]. 이러한 연구방향으로서 퍼지제어기법을 이용한 퍼지논리 제어기(Fuzzy logic controller ; FLC) [4,19]와 내부모델제어(Internal model control ; IMC)[2]를 들 수 있다.

본 논문에서는 추종성능과 조종성능에 대한 적응성을 부여하기 위하여 역동력학과 퍼지기법을 이용한 2 자유도 제어기 설계기법을 제안한다. 제안된 기법은 내부모델제어의 일종으로서 Sugie 와 Yoshikawa 에 의해 제안된 TDFC(Two-Dgree-of-Freedom-Controller)[3]의 변형된 형태이다. 제안된 제어기는 입력단에 1 차 저역통과 필터와 역동력학 모델, 모델과 시스템간의 오차를 보정해 줄 수 있는 퍼지제어기로 구성되어 있다.

제안한 제어기에서 역동력학 모델은 모델조정기법을 이용하여 구한 비선형모델을 직접 사용하게 되고, 역동력학을 사용함으로써 발생되는 고주파

영향은 1차 저역통과 필터를 이용하여 감쇄한다. 모델의 불확실성, 외란 등으로 발생할 수 있는 오차를 보상하기 위하여 Takagi-Sugeno 형태의 퍼지제어기[4]가 설계되는데, 퍼지제어기는 기준입력변화에 대한 시스템 추종성능과 외란에 대한 조종성능을 동시에 개선할 수 있도록 고안되었다. 이를 위하여 전건부 입력 변수는 시스템과 병렬로 연결된 모델의 차에 의해 구해지는 외란의 크기가 되며, 후건부는 추종성능을 개선할 수 있는 PI 제어기와 조정성능을 개선할 수 있는 PI 제어기들로 구성된다. 또한, 모델 추정과정과 퍼지제어기의 후건부 PI 제어기 파라미터 동조과정에서 발생하는 최적화 문제는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded Genetic Algorithm; RCGA)[5]을 이용하여 해결한다[9,10].

제안된 제어기법을 산업현장에서 많이 사용하고 있는 DC 모터의 속도제어 시스템 설계 문제에 도입하여 그 유효성을 검증하도록 한다. DC 모터의 속도를 제어하는 방식에는 브리지 서보, 비례 전류 제어, 전기자제어, 주파수동기 제어 등이 연구되어 왔다[2,6,7]. 특히 구동을 위한 전용 IC를 갖추고 있지 못한 소형 모터의 경우 모터와 전원 사이에 아나로그적인 전압 조정기를 삽입하여 모터에 공급되는 전압을 제어하는 전기자 제어방식[8]이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서 사용된 시스템은 Feedback사의 MS150 모델로서 제안된 제어기법을 전기자 제어방식에 적용하여 DC 모터를 제어하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어대상 시스템의 모델링과 파라미터를 추정하고, 최적화 알고리즘으로서 실수코딩 유전알고리즘에 대하여 살핀다. 3장에서는 선정된 모델을 기반으로 역동력학 모델과 퍼지기법을 이용한 제어기를 설계하고, 4장에서는 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된

제어기 성능의 유효성을 검증하며, 5장에서는 앞서 얻은 결과를 바탕으로 결론을 내린다.

제 2 장 시스템 모델링 및 파라미터 추정

이 장에서는 제어대상인 전기자 제어 DC 모터의 수학적 모델을 얻고 유전 알고리즘을 이용하여 그 파라미터를 추정하는 문제를 다룬다. 여기서 유전 알고리즘은 파라미터의 추정과정에서 일어나는 비선형 최적화 문제의 해를 얻는 도구로 사용되므로, 이에 대한 기본 메커니즘도 살펴본다.

2.1 시스템의 모델

DC 모터 구조는 크게 계자(Stator)와 전기자(Rotor)로 구분할 수 있다. 계자는 모터의 내부에 일정한 자기장을 만드는 역할을 하게 되고, 전기자는 외부로부터 전류를 공급 받아 회전 자계를 만드는데 여기에는 구동 권선이 이용되고 있다. 전기자에는 연속적으로 회전이 가능하도록 정류자(Commutator)가 설치되어 있고, 브러시를 거쳐 공급되는 전류를 차례차례 전환하여 전기자가 어느 위치에 있어도 일정한 방향으로 회전하도록 해준다[11].

전기자 제어 DC 모터를 등가적으로 표시하면 그림 2.1과 같이 나타낼 수 있다. 제어목적은 전기자에 인가해 주는 입력전압 $u(t)$를 조절하여 모터의 출력 각속도 $\omega(t)$를 희망하는 설정치에 유지케 하는 것이다.

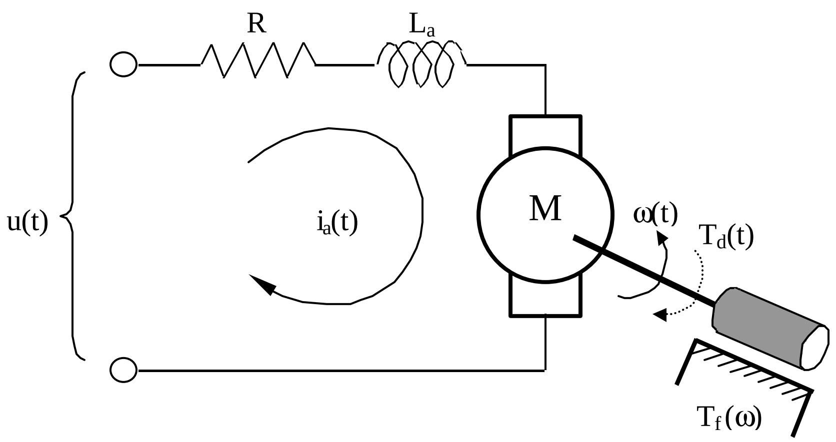


그림 2.1 DC **모터의 등가회로**

Fig. 2.1 Equivalent circuit of a DC motor

모터에 의해서 발생되는 토크 T는 전기자 전류 $i_a(t)$와 공극자속 ψ의 곱에 비례하며, 공극자속은 계자전류 $i_f(t)$에 비례한다. 그러므로 발생되는 토크 T는 다음과 같다.

$$T \propto \psi \cdot i_a(t) \quad (2.1a)$$

$$\psi = K_f \cdot i_f(t) \quad (2.1b)$$

$$T = K_f \cdot i_f(t) \cdot K_1 \cdot i_a(t) \quad (2.1c)$$

여기서 $i_a(t)$는 전기자 전류, $i_f(t)$는 계자전류, T는 토크, K_f와 K_1 는 각각 상수이고, 계자가 영구자석(Permanent magnet)인 경우 토크는 전기자 전류에 비례하게 된다.

$$T = K_t \cdot i_a(t) \quad (2.2)$$

전기자가 회전할 때, 자속과 각속도의 곱에 비례하는 전압이 전기자에 유도된다. 자속이 일정하면 유도되는 역기전력은 다음과 같다.

$$e_m(t) = K_b \cdot \omega(t) \quad (2.3)$$

여기서 $\omega(t)$는 회전자의 각속도, $e_m(t)$는 역기전력, K_b는 역기전력 상수이다.

전기자 제어 DC 모터의 내부에 흐르는 전류는 입력전압 $u(t)$에 의해 제어되고 전기자 회로에 대해 키르호프 전압법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$L_a \frac{d\,i_a(t)}{dt} = u(t) - R\, i_a(t) - e_m(t) \qquad (2.4)$$

여기서 $u(t)$는 전기자에 인가되는 입력전압이고, R과 L_a는 각각 전기자 회로의 저항과 인덕턴스이다. 일반적으로 L_a가 전기자 회로에 미치는 영향이 적은 것으로 간주되어 무시하고 식 (2.3)을 식 (2.4)에 대입하고 정리하면 아래와 같다.

$$i_a(t) = -\frac{K_b}{R}\,\omega(t) + \frac{1}{R}\,u(t) \qquad (2.5)$$

식 (2.2)의 토크가 점성마찰과 쿨롱마찰이 동시에 고려되는 회전체에 전달되면 그 운동방정식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = K_t\, i_a(t) - T_d(t) - T_f(\omega) \qquad (2.6)$$

여기서 $T_d(t)$는 외란이고, $T_f(\omega)$는 ω에 따라 다른 특성을 가지는 비선형 마찰 모델이며, K_t는 토크 상수이고, J는 회전자의 등가 관성 모멘트이다.

표 2.1 DC 모터의 파라미터

Table 2.1 Parameters of the DC motor

Parameters	Unit	Descriptions
u	[V]	Control input voltage
i_a	[A]	Armature current
i_f	[A]	Field current
e_m	[V]	Back emf
ψ	[Φ]	Air gap flux
R	[Ω]	Armature winding resistance
L_a	[H]	Armature inductance
ω	[rad/s]	Rotor angle velocity
T_d	[N·m]	Disturbance
T_f	[N·s/m]	Nonlinear friction model
K_t	[N·m/A]	Torque constant
K_b	[V·s/rad]	Back emf coefficient
J	[kg·m^2]	Inertia moment of the rotor

특히 회전체의 비선형 마찰모델 $T_f(\omega)$**를 도식적으로 나타내면 그림** 2.2 **와 같고 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다**.

$$T_f(\omega)=\begin{cases}\alpha_1\omega(t)+\beta_1 \ , & \omega(t)>0 \\ \alpha_2\omega(t)-\beta_2 \ , & \omega(t)<0\end{cases} \tag{2.7}$$

여기서 α_1, α_2 **는 점성마찰 계수이고**, β_1, β_2 **는 쿨롱마찰 계수이다**.

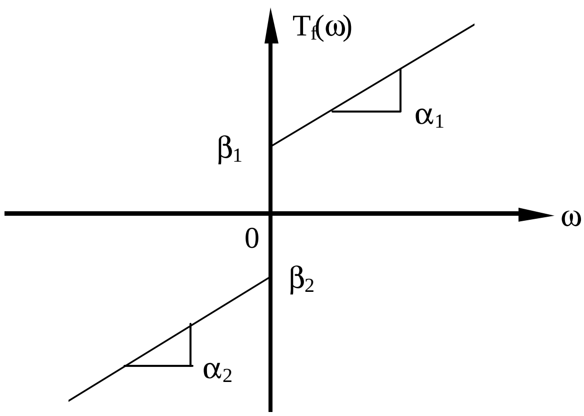


그림 2.2 **비선형 마찰모델**

Fig. 2.2 Nonlinear friction model

외란 $T_d(t)$를 제외하고 식 (2.5)–(2.7)을 결합한 후 다시 쓰면

$$\dot{\omega}(t)=\begin{cases} -a_1\omega(t)+b\,u(t)-c_1 \ , & \omega(t)>0 \\ -a_2\omega(t)+b\,u(t)+c_2 \ , & \omega(t)<0 \end{cases} \qquad (2.8)$$

이 되고, 이 때 $a_1= (\alpha_1 R+K_t K_b)/JR$, $a_2= (\alpha_2 R+K_t K_b)/JR$, $b= K_t/JR$, $c_1= \beta_1/J$, $c_2= \beta_2/J$ 의 관계를 가진다. 식 (2.8)의 입출력 관계를 간단히 표시한다면

$$\omega(t)= \Phi(\omega(0),u(t);f\ ) \qquad (2.9)$$

이 되고, 여기서 $f = [a_1, a_2, b, c_1, c_2]^T$ 이다.

만약 식 (2.8)에서 쿨롱마찰이 무시된다면 즉, $c_1=c_2\approx 0(a_1= a_2= a)$이면 다음과 같은 전달함수로 표시되고 DC 모터의 전형적인 선형 모델식이 된다.

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)}=\frac{b}{s+a} \qquad (2.10)$$

흔히 해석상의 편리성 때문에 비선형 쿨롱마찰의 영향은 작은 것으로 가정되어 무시되곤 하지만, 여기서 유발하는 모델링 오차는 정교한 제어를 방해하는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 식 (2.8)의 비선형성 방정식을 그대로 사용한다.

2.2 적응자로서의 실수코딩 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic algorithm: GA)은 "유성생식"과 다윈의 "자연선택"을 알고리즘형태로 구현한 최적화 탐색법으로서 1975 년 Holland 에 의해서 개발되었다[12]. GA 는 염색체 개체 집단(잠정적인 해 집단) 안에서 육종(Breeding)과 선택(Selection)을 구현하기 위해 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자를 사용한다. 유전 연산자는 개체를 선택하고 이들간의 정보 형성과 교환을 장려하여 집단을 개량함으로써 여러 방향으로의 탐색을 실행하게 된다.

GA 는 구배(Gradient)에 기초한 탐색 알고리즘과는 달리 연속성, 미분가능성, 단봉성과 같은 탐색공간에 대한 부가정보를 요구하지 않고, 매우 크고 복잡한 탐색공간에서도 전역해에 수렴하는 장점[13] 때문에 함수의 최적화[14], 신호 및 화상 처리[15], 시스템 식별 및 제어[16] 등 다양한 분야에서 최적화 도구로 응용되고 있다.

2.2.1 파라미터의 표현

전통적으로 GA 는 해 파라미터를 직접 다루기 보다는 이를 자연 파라미터 형태로 변환하여 사용해 왔으며, 이를 위해 이진코딩(Binary encoding)이 자주 이용되어 왔다. 이진코딩 염색체를 채용하는 GA 는 다양한 분야에 적용되어 좋은 성능을 보이고 있지만, 몇 가지 단점을 가지고 있다. 첫째, 해의 정의영역을 확대하거나, 정밀도를 높이게 되면 염색체의 길이가 길어지게 되어 연산부담이 증가하게 된다. 둘째, 제약조건이 부가된 문제를 다루게 될 때 이진

코딩에 기초한 연산자들은 부적합한 해를 생성할 수 있으며 또 제약조건을 다루는데 어려운 점이 있다. 셋째, 이진 염색체의 성능을 평가하기 위하여 염색체의 복호화가 필요하고 연산시간을 소모하게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위해 자주 이용되고 있는 코딩법 중의 하나가실수코딩(Real encoding)[10] 이다. 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)은 프로그래밍이 간편하고 기존의 GA 에서 적합도 평가 시 필수적으로 요구되는 복호화의 과정을 생략하게 되므로 연산속도를 높일 수 있다. 또한 해에 관한 사전지식이 없는 경우에도 매우 큰 정의영역을 정하는 것이 가능하며 제약조건을 위한 메커니즘 도입이 가능하다는 장점에 의해 항공기 자세제어 문제, 시간지연을 갖는 시스템제어를 위한 지능제어기의 파라미터 동조[1]에 응용되었다.

그림 2.3 은 k 세대에서의 실수 염색체 하나를 나타낸 것이다. 해벡터 $\mathbf{x}(k)\in\Re^n$ 의 염색체를 $\mathbf{s}(k)$라 하면 염색체의 길이 λ은 해벡터 $\mathbf{x}$ 의 차원 n 과 일치하게 된다.

해벡터: $\mathbf{x}(k)^T =$

x_1	x_2	· · ·	x_n
11.444	227.431	· · ·	- 0.850

염색체: $\mathbf{s}(k) =$

s_1	s_2	· · ·	s_λ
11.444	227.431	· · ·	- 0.850

그림 2.3 실수코딩 염색체

Fig. 2.3 A real coding chromosome

2.2.2 유전 연산자와 탐색전략

기존의 이진코딩 GA 는 유전적 계승과 생존경쟁이라는 자연현상을 알고리즘으로 구현하기 위하여 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자(Genetic operator)를 채용하고 있으며, 탐색성능을 높이기 위하여 여러 가지 탐색전략을 채용하고 있다. RCGA 도 기본 유전 연산자로 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 채용하고, 현 세대에서의 최적 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장하기 위하여 엘리트전략을 채택한다[10]. 여기서는 기본 유전 연산자와 엘리트 전략에 대하여 고찰해 본다.

(a) **재생산**(Reproduction)

재생산은 자연계의 적자생존의 현상을 모방하여 각 개체의 적합도를 평가하고, **적합도에 따라 개체를 선택하여 새로운 집단을 형성하는 과정을 말한다**. **재생산 연산자는 루울렛휠 선택에 기초한 재생산**(Roulette wheel selection-based reproduction), **토너먼트 선택에 기초한 재생산**(Tournament selection-based reproduction), **구배와 유사한 재생산**(Gradient-like reproduction)**등 여러 기법들이 있으나 본 논문에서는 구배와 유사한 재생산을 사용하였다**.

구배와 유사한 재생산은 루울렛휠 재생산을 채용하는 유전알고리즘이 작은 집단을 다룰 때 생기는 문제점들을 보완하기 위하여 Jin[1]**등에 의해 제안된 연산자로서**, **구배법과 유사한 수식을 통해 개체들을 재생산하도록 한다**. **이 연산자에 의하면 집단내 개체들은 자신과 최적 개체와의 정규화된 적합도 차이와**, **자신과 최적 개체와의 벡터 차의 상수곱에 따라 변경되어 새롭게 재생산되는데**, **궁극적으로 집단내 모든 개체들을 현 세대의 최적 개체 쪽으로 끌어 모으려는 방향으로 동작하고 연산과정은 다음의 단계를 거친다**.

Step 1 : 집단 P(k)내 개체들의 적합도 $f_i(k)(1\le i \le N)$를 계산하고, 최적의 개체를 찾는다.

$$\mathbf{s}_b(k) = \underset{1\le i\le N}{\arg\max}\,[f_i(k)] = [x_{b1}(k)\ x_{b2}(k) \cdots x_{bn}(k)]^T \qquad (2.11a)$$

$$f_b(k) = \max_{1\le i\le N}[f_i(k)]\ (>0) \qquad (2.11b)$$

Step 2 : 각 개체에 새로운 값을 할당한다.

$$\bar{x}_{ij}(k) = x_{ij}(k) + \eta_i \frac{[f_b(k) - f_i(k)]}{f_b(k)}[x_{bj}(k) - x_{ij}(k)](1\le j \le n) \quad (2.12)$$

여기서 N 은 집단의 크기, n은 염색체의 길이를 나타내며 $\bar{x}_{ij}(k)$ 는 재생산후 i 번째 염색체의 j 번째 요소이며, 재생산 계수 η_i 는 평균이 η이고 분산이 σ^2 인 정규분포 $N(\eta, \sigma^2)$를 따르도록 설정된다.

Step 3 : 재생산된 염색체 $\bar{\mathbf{s}}_i(k) = (\bar{x}_{i1}(k)\ \bar{x}_{i2}(k) \cdots \bar{x}_{in}(k))$ $(1\le i \le N)$을 교배급원으로 복사한다.

그림 2.4 구배와 유사한 재생산 연산

Fig. 2.4 Operation of the gradient-like reproduction

(b) 교배(Crossover)

자연계 생물들의 개체 증식은 부모 세대의 성적결합 즉, 교배를 통해 이행되며 이를 통해 서로간의 유전인자를 교환하게 된다. GA 에서도 개체간의 정보교환을 통해 새로운 점을 탐색하기 위하여 자연계의 교배현상을 모방한다. 교배연산자로는 플랫교배(Flat crossover), 단순교배(Simple crossover), 산술적 교배(Arithmetical crossover) 등이 있으며, 본 논문에서는 산술적 교배를 사용하였다.

산술적 교배는 실수코딩 단순교배에서 일어나는 교배지점에서의 불연속성을 해결하기 위해 도입된 방법으로서, 선택된 두 염색체의 일차결합(Linear combination) 형태를 취하게 된다.

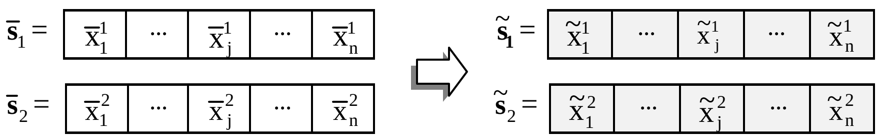


그림 2.5 산술적 교배

Fig. 2.5 Arithmetical crossover

산술적 교배에 의해 염색체내 각 요소는 다음 식으로 계산된다.

$$\tilde{x}_j^1 = \lambda \bar{x}_j^1 + (1-\lambda)\bar{x}_j^2 \qquad (2.13a)$$

$$\tilde{x}_j^2 = \lambda \bar{x}_j^2 + (1-\lambda)\bar{x}_j^1 \quad (1 \le j \le n) \qquad (2.13b)$$

여기서 $\bar{x}_j$ 는 교배급원에서 선택되어진 어버이 염색체 요소이다. λ는 고정되거나 아니면 각 요소마다, 염색체마다 독립적으로 결정될 수 있는 상수이다.

(c) 돌연변이(Mutation)

유전알고리즘이 지역해(Local solution)나 사점(Dead corner)을 벗어나기 위한 전략으로 염색체내 임의의 요소를 확률적인 방법에 의해 변형시키는 것이 돌연변이이다. 돌연변이 연산자로는 균등돌연변이(Uniform mutation), 경계돌연변이(Boundary mutation), 동적돌연변이(Dynamic mutation) 등이 있고, 본 논문에서는 동적돌연변이[18]를 사용하였다. 돌연변이에 의해 임의의 k 세대는 다음의 진화과정을 거친다.

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k,\ x_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k,\ \tilde{x}_j - x_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \qquad (2.14)$$

여기서 $\tilde{x}_j$ 는 교배 연산을 거친 염색체내에서 돌연변이 확률에 의해 선택되

어진 j 번째 요소이다. $x_j^{(L)}, x_j^{(U)}$ 는 j 번째 염색체 요소의 하한치, 상한치이고, τ 는 0 또는 1 을 취하는 난수이다. 이때 $\Delta(k, y)$는 다음의 함수가 이용되었다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot (1-\frac{k}{T})^{v} \tag{2.15}$$

여기서 r 은 0 과 1 사이의 실수 난수이고, T 는 최대 세대수이며, v는 사용자에 의해 정의되는 돌연변이해의 분포정도를 나타내는 매개변수이다. 이 연산자의 특징은 세대초기에는 전체 탐색공간에 대해 균등한 확률로 탐색을 하게 되지만, 세대수가 증가함에 따라 지역적인 탐색을 하게 된다.

(d) 엘리트 전략

유전알고리즘은 세가지 유전연산자의 확률적 속성 때문에 한 세대의 최적 개체가 소멸되는 경우가 발생할 수도 있고, 이는 탐색을 침체시키는 원인이 되기도 하다. 엘리트 전략(Elitist strategy)은 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 일련의 모의진화를 수행한 후 최적 개체가 소멸된 것이 확인 되면, 현 세대의 가장 약한 개체 또는 임의로 선택된 개체를 저장된 최적 개체와 교환함으로써 집단내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장한다. 그림 2.6 은 엘리트 전략을 포함한 RCGA 의 동작과정을 보여준다.

```
Real_Coded_Genetic_Algorithm( )
  Set k=0;
  Create an initial population P(k);
  Evaluate the fitness of each individual in P(k);
  WHILE(not termination condition)
    k=k+1;
    Reproduce a population pool P(k) from P(k-1);
    Crossover and mutation P(k);
    Evaluate P(k);
    Apply elitism;
  END WHILE
```

그림 2.6 실수코딩 유전알고리즘의 동작과정

Fig. 2.6. Operation of the Real Coded Genetic Algorithm

2.2.3 적합도 평가

자연계에서 한 생물의 생존능력은 그 환경에 대한 적합도(Fitness)로 반영되듯이, GA 에서도 개체간의 우열은 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영된다. 세 연산자를 거쳐 새로운 집단이 완성될 때마다 개체들의 적합도는 목적함수에 의해 평가되고 적합도에 따라 다음 세대에서의 재생산 선택 비율이 조정되며 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받게 된다. 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 기술되고 음의 값을 가져서는 안 된다. 따라서 적합도 함수는 목적함수의 적절한 사상이 요구되는 경우가 발생하기도 한다.

2.3 모델의 파라미터 추정

식 (2.8)**의 모델에서 미지의 파라미터는** f **로서**, **이는 시스템의 입출력 데이터와** RCGA **를 이용하여 다음의 목적함수가 최소값을 갖도록 결정된다**.

$$J(f) = \int_0^{t_f} \left| \omega_p(t) - \omega_m(t) \right| dt \qquad (2.16)$$

여기서 $\omega_p(t)$**와** $\omega_m(t)$**은 각각 시스템과 모델의 출력이고**, t_f**는 최종 적분 시간으로서 이 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다**.

따라서 최소화 문제에서 적합도 함수는 $f : \mathbf{S} \rightarrow \Re^{+}$ (**S** **는 염색체 공간**)**의 관계를 만족하기 위하여 다음과 같이 사상된다**.

$$f(\mathbf{s}) = -J(f) + \delta \qquad (2.17)$$

δ**는 전 세대 동안** $f(\mathbf{s}) \geq 0$ **의 관계를 만족시키기 위한 상수이다**.

그림 2.7 **은 모델 조정기법**(Model adjustment technique)**을 이용하여 시스템의 파라미터를 추정하는 과정을 나타낸 것으로서 시스템과 모델을 병렬로 연결하고 동일한 입력을 인가한 후 각각의 출력으로부터 계산되는 식** (2.16)**의 목적함수가 최소값을 갖도록 적응자인** RCGA **가 모델의 파라미터를 조정하게 된다**.

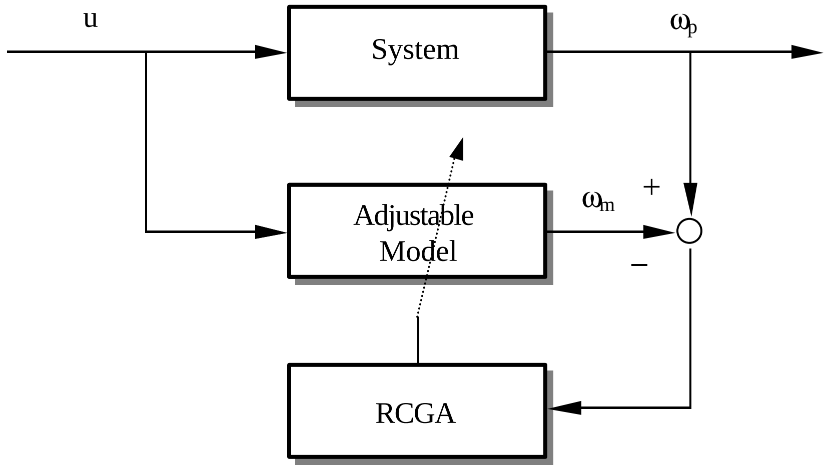


그림 2.7 실수코딩 유전알고리즘을 이용한 파라미터 동조

Fig. 2.7 Parameter estimation of a DC motor using a RCGA

그림 2.8은 목적함수 J(f)로부터 형성되는 탐색공간의 한 예를 그린 것이다. 여기서 $a_1 = a_2 = a$으로, $c_1 = c_2 = 0.8$이라고 가정하였고, 정현파 입력 $u = 0.1\sin(1.5t)$에 대한 식 (2.16)의 목적함수값을 구한 것이다.

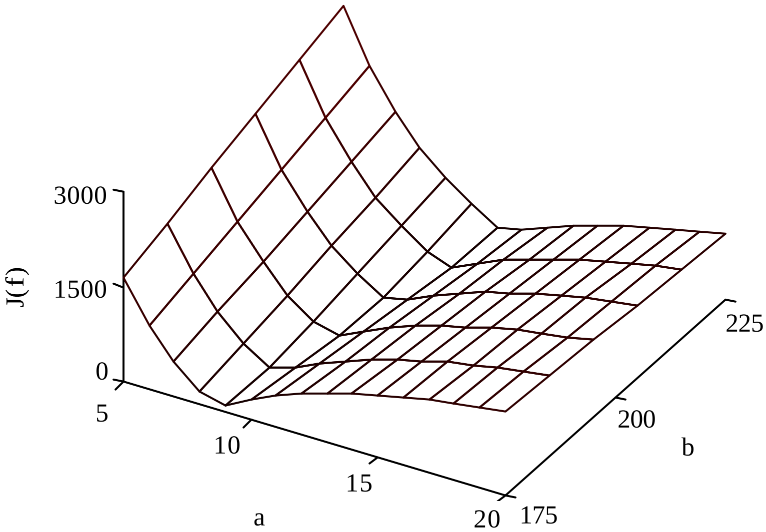


그림 2.8 목적함수로 구성되는 탐색공간

Fig. 2.8 Search space formed by the objective function

제 3 장 역동력학을 이용한 제어기 설계

3.1 모델기반제어

모델을 기반으로 하는 제어(Model-based control)[17]의 한 기본적인 개념은 그림 3.1과 같이 개회로 제어시스템의 역동력학 모델을 시스템의 제어기로 사용함으로써 설정치 ω_r 과 시스템 출력 ω_p 가 일치하도록 하는 것이다.

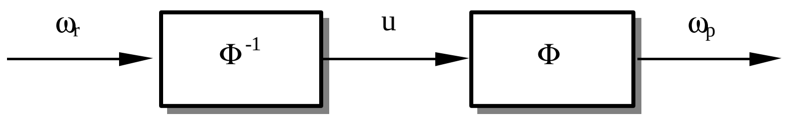


그림 3.1 모델기반제어

Fig. 3.1 Model-based control

이 방법은 시스템이 최소위상(Minimum phase)이고 모델이 실제 시스템과 차이가 없을 경우에는 만족스러운 성능을 제공한다. 그러나 대부분의 제어 환경에서는 외란이 존재하고, 모델링오차가 불가피하며, 시스템의 정확한 파라미터를 얻는 것은 어려울 뿐만 아니라, 얻는다 해도 운전도중에 이들이 변하게 된다. 따라서 외란, 모델링 오차, 시스템 파라미터의 변동에 의한 오차

를 보정해 줄 수 있는 적절한 메커니즘이 필요하게 된다.

이 기법을 그대로 DC 모터의 속도제어에 적용할 경우에도 부하변동, 온도, 마찰 등에 의하여 파라미터가 변하면 역모델과 실제 시스템간의 차이가 발생하고 이로 인한 오차가 유발되어 만족스런 제어성능을 기대하기가 어렵다.

3.2 역동력학 모델을 이용한 제어기

본 논문에서는 앞서 설명한 모델과 시스템간의 오차를 보정해 줄 수 있는 메커니즘으로 퍼지제어기와 역동력학을 결합한 2 자유도 제어기를 설계한다. 이 제어기는 Sugie 와 Yoshikawa 에 의해 제안된 TDFC(Two-Degree-of-Freedom-Controller)[3]의 변형된 형태로서, 입력단에 1 차 저역통과 필터와 역동력학 모델 Φ^{-1}, 동력학 모델 Φ, 퍼지제어기(FLC)로 구성되어 있고 제안된 제어기 형태는 그림 3.2 의 점선 내부와 같다.

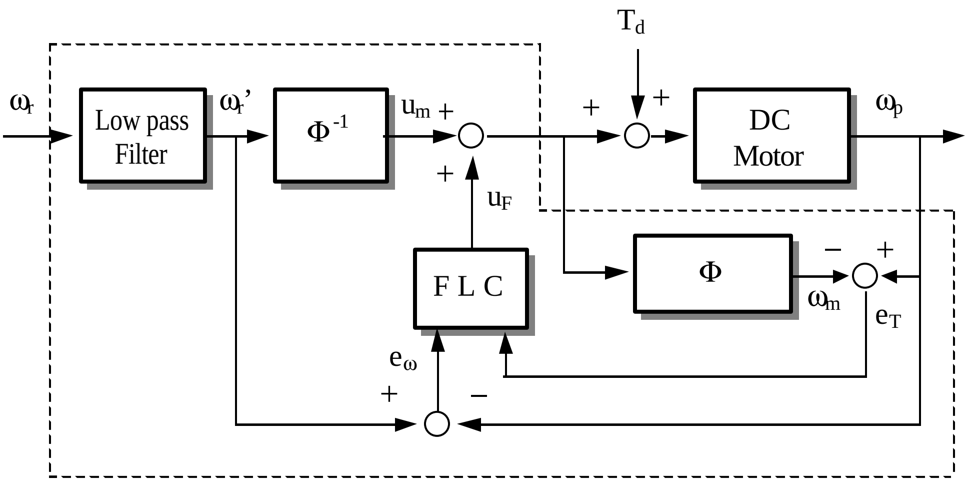


그림 3.2 **제안한 제어기의 블록선도**

Fig. 3.2 Block diagram of the proposed controller using inverse dynamics

일반적으로 대부분의 시스템은 분모 차수가 분자 차수보다 높아 역동력학 모델은 미분항을 가지게 되고 기준입력의 갑작스런 변화와 잡음과 같은 고주파 신호에 민감한 동작하여 제어기를 포화시킬 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 역동력학 모델의 고주파 효과를 억제하고자 제안된 1 차 저역통과 필터는 식 (3.1)과 같다.

$$\dot{\omega}_r' = -\frac{\omega_r' - \omega_r}{\tau} \qquad (3.1)$$

여기서 ω_r은 기준입력이고 ω_r'는 필터의 출력, τ는 저역통과 필터의 시정수로서 일반적으로 작은 값으로 설정된다.

제어기 내부의 역동력학 모델(Φ^{-1}) 의 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다

$$u_m = \Phi^{-1}(\dot{\omega}_r', \omega_r' \; ; \; f) \qquad (3.2)$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{b}(\dot{\omega}_r' + a_1\omega_r' + c_1) \; , \; \omega_r' > 0 \\ \frac{1}{b}(\dot{\omega}_r' + a_2\omega_r' - c_2) \; , \; \omega_r' < 0 \end{cases}$$

여기서 계수 $\{a_1, a_2, b, c_1, c_2\}$는 2 장의 모델추정 과정으로부터 구한 값이 된다.

3.3 퍼지제어기 설계

제안된 퍼지제어기의 결론부는 Takagi-Sugeno 형태[4]로서 다수의 PI 제어기

로 구성되어 있다. 이는 추종성능과 조종성능을 동시에 향상시키기 위해 설계된 것으로서, 각각의 PI 제어기 파라미터는 설정치 변경에 대한 시스템 추종성능과 부하변동과 같은 외란에 대한 조종성능을 개선하도록 RCGA 를 이용하여 최적 조정된다.

이때 퍼지제어기는 두 제어 환경에 적응적으로 동작하기 위해 외란이 포함된 시스템의 출력과 시스템에 병렬로 연결된 모델의 출력을 비교하여 외란의 크기를 추정하고 이를 입력변수로 사용하게 된다.

$$e_T = \omega_p - \omega_m \tag{3.3}$$

여기서 ω_p 는 DC 모터의 출력이고, ω_m 은 병렬로 연결된 모델의 출력이다.

퍼지제어기는 다음의 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R^1 : \textbf{If } e_T \text{ is } F^1, \textbf{ then } u_F^1 = K_P^1 e_\omega + K_I^1 \int e_\omega \, dt \tag{3.4a}$$

$$R^2 : \textbf{If } e_T \text{ is } F^2, \textbf{ then } u_F^2 = K_P^2 e_\omega + K_I^2 \int e_\omega \, dt \tag{3.4b}$$

M M

$$R^i : \textbf{If } e_T \text{ is } F^i, \textbf{ then } u_F^i = K_P^i e_\omega + K_I^i \int e_\omega \, dt \tag{3.4i}$$

M M

$$R^\lambda : \textbf{If } e_T \text{ is } F^\lambda, \textbf{ then } u_F^\lambda = K_P^\lambda e_\omega + K_I^\lambda \int e_\omega \, dt \tag{3.4λ}$$

여기서 $R^i(1 \le i \le \lambda)$는 i번째 규칙, λ은 퍼지규칙의 수이고, e_T 는 시스템과 모델 간의 오차, F^i $(1 \le i \le \lambda)$는 퍼지집합, e_ω는 시스템의 출력과 기준입력의 차이고, K_P^i, K_I^i $(1 \le i \le \lambda)$는 각각 i번째 PI 제어기의 비례이득과 적분이득이며, u_F^i $(1 \le i \le \lambda)$는 i번째 규칙에 의한 제어입력이다.

전건부의 입력변수 공간은 퍼지분할되고 양쪽 끝단에 정의된 퍼지집합의 소속함수로는 시그모이드형을, 내부 퍼지집합의 소속함수로는 가우시안 형의 함수를 이용하였다. 이를 나타내면 식 (3.5)와 같다.

$$F^j = \frac{1}{1 + e^{-\mu_j (x - o_j)}} \quad (j=1 \text{ 또는 } \lambda) \qquad (3.5a)$$

$$F^j = e^{\frac{-(x - m_j)^2}{2(\sigma_j)^2}} \quad (2 \le j \le \lambda - 1) \qquad (3.5b)$$

식 (3.4)의 전체 규칙에 대한 추론결과, 퍼지제어기의 출력은 다음과 같다.

$$u_F = \sum_{i=1}^{\lambda} \xi^i \, u_F^i \qquad (3.6)$$

여기서 $\xi^i = \rho^i \Big/ \sum_{k=1}^{\lambda} \rho^k$ 이며, $\rho^i = F^i(e_T)$이고 항상 $\sum_{k=1}^{\lambda} \rho^k > 0$ 의 관계가 성립하는 것으로 가정한다.

최종적으로, 제안된 제어기의 출력은 역동력학의 출력과 퍼지제어기의 출력의 합으로서 다음의 식 (3.7)와 같다.

$$u = u_m + u_F \tag{3.7}$$

제 4 장 실험 및 결과검토

4.1 제어시스템 구성

제안된 제어기법의 유효성을 검증하기 위하여 실제장치에서 실험을 실시하였다. 제어대상으로는 Feedback 사의 DC 서보 시스템인 MS150 을 사용하였고, 이 시스템은 전기자 제어 DC 모터, 모터 구동용 증폭기, 속도 센서(Tacho Generator) 등으로 구성되어 있다. 제어 알고리즘을 구현하는 제어기로는 AD/DA 변환기가 내장된 PC 를 사용하였다.

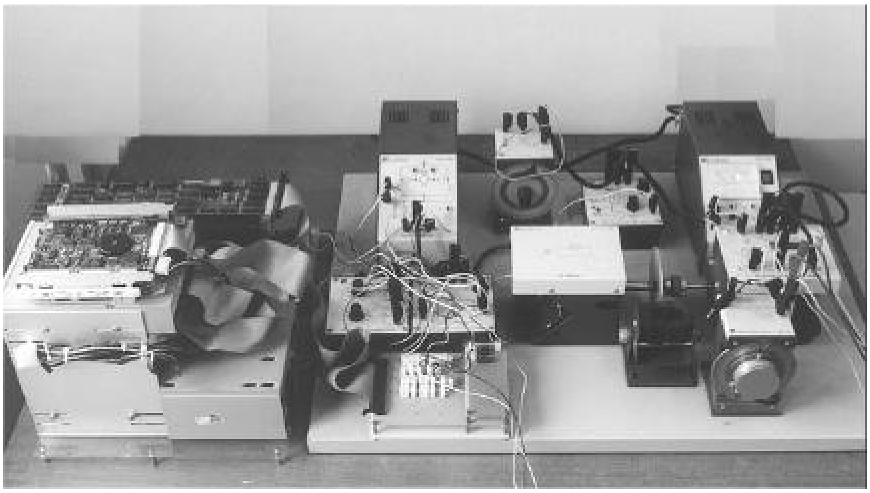


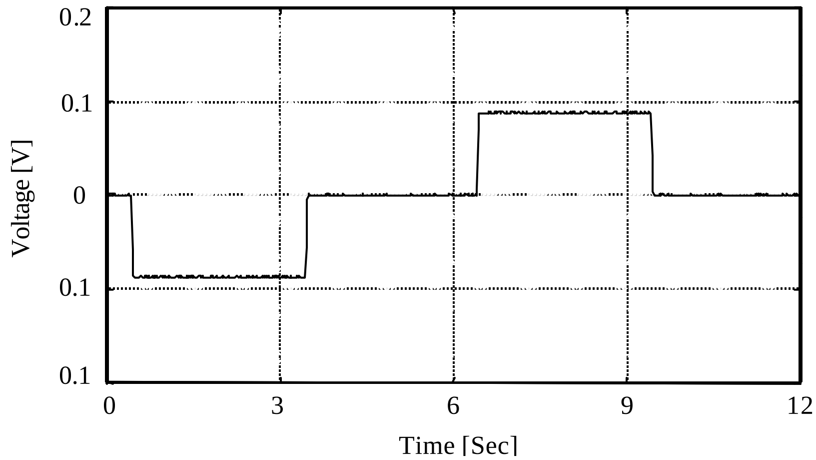
그림 4.1 DC 모터 속도제어 시스템

Fig. 4.1 DC Motor speed control system

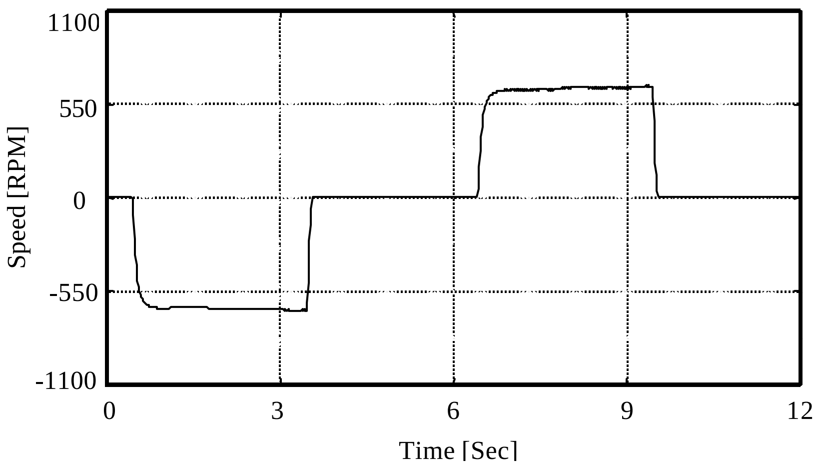
4.2 제어대상의 파라미터 추정

파라미터 추정에는 그림 4.2과 같은 86[mV]의 계단상 입력에 대한 시스템의 입출력 신호가 사용되었다. 적응자로서 RCGA가 사용되었고 식 (2.16)의 목적함수를 최소가 되도록 모델의 파라미터를 최적 조정하게 된다. RCGA의 매개 변수로는 집단의 크기 N= 20, 재생산 계수 η= 1.7, σ= 1.0, 교배확률 P_c= 0.9, 돌연변이 확률 P_m= 0.05를 사용하였다.

그림 4.3는 RCGA가 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다. 그림에서 보면 약 50세대의 진화에서 최적해 부근에 수렴하고 있고, 100세대 이후에 추정치 a_1= 11.444, a_2= 11.426, b= 227.431, c_1= 0.850, c_2= 0.728을 얻었다. 추정된 모델은 두 입출력 데이터 세트를 가지고 검정되었다. 그림 4.4(a)는 추정에 사용된 입출력 데이터를 가지고 시스템과 모델의 출력을 그린 것이고, 그림 4.4(b)는 정현파 입력신호 u=0.12sin(0.5t) + 0.05sin(1.4t) + 0.05sin(2t)에 의한 시스템의 출력과 모델의 출력을 나타낸 것이다.



(a) Input signal



(b) Output signal

그림 4.2 **파라미터 추정을 위한 입출력 신호**

Fig. 4.2 Input-output signal for parameter estimation

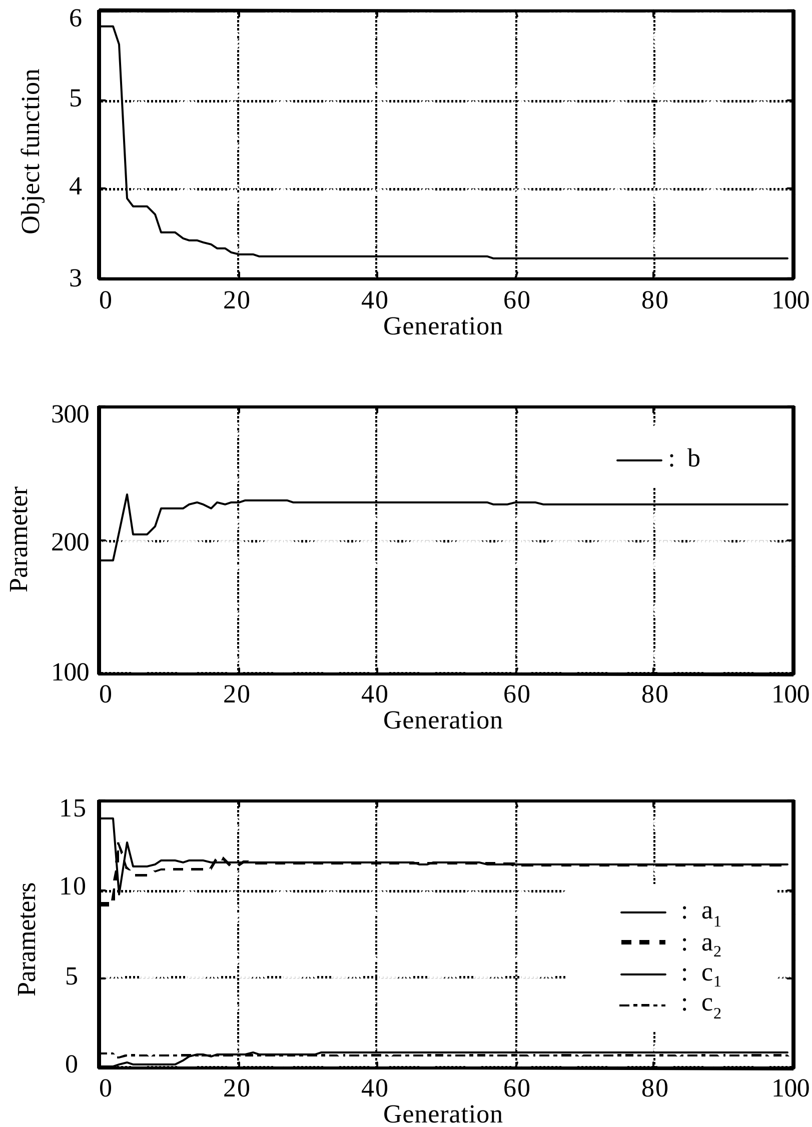
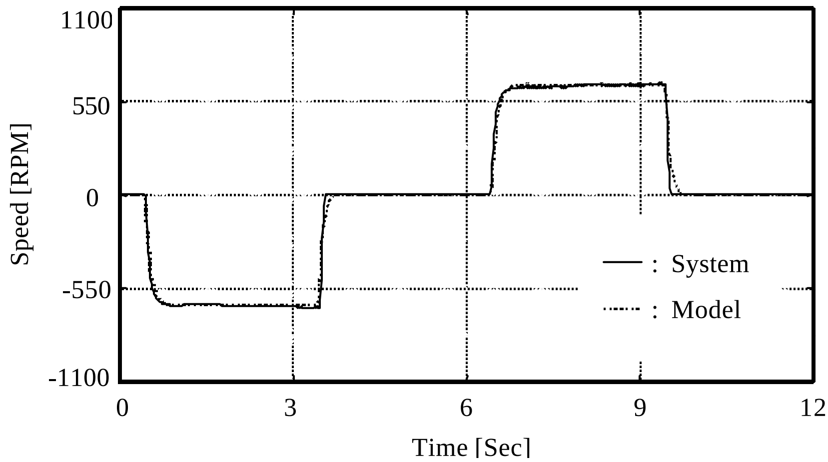
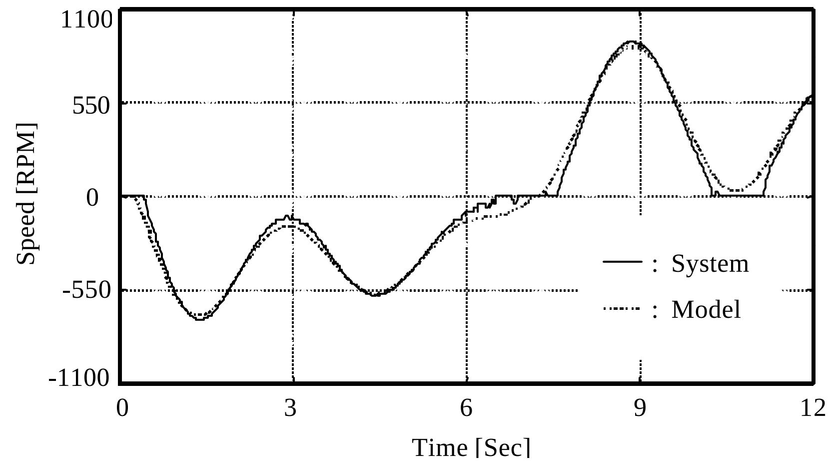


그림 4.3 RCGA **을 이용한 파라미터 추정**

Fig. 4.3 Parameter estimation using a RCGA



(a) With the input-output signal used in estimation



(b) With the input-output signal not used in estimation

그림 4.4 추정된 모델의 검정

Fig. 4.4 Estimated model varidation

4.3 제어기 설계

퍼지제어기의 전건부 입력변수는 시스템과 병렬로 연결된 모델의 출력의 차로서 시행착오적인 반복 실험을 통하여 그림 4.5과 같이 퍼지분할 하였고 F^1, F^2, F^3는 각각 NB, ZO, PB로 표기하였다. 이 때 사용된 소속함수의 파라미터는 $\mu_1 = -8.0$, $o_1 = -1.0$, $m_2 = 0.0$, $\sigma_2 = 0.5$, $\mu_3 = 8.0$, $o_3 = 1.0$ 이다.

퍼지규칙의 결론부에는 기준입력 변화에 대한 추종성을 개선해 주는 PI 제어기와 외란 등에 의한 조종성을 개선해 주는 PI 제어기가 퍼지 결합되어 있다. 전자는 입력변수가 퍼지 값 ZO를 가질 때 주도적으로 동작되는 제어기로서 무부하 시 계단상의 기준입력 변화에 대해 식 (4.1)의 목적함수가 최소가 되도록 RCGA를 이용하여 조정되었고, 그 결과 $K_P = 0.4087$, $K_I = 4.1937$을 얻었다. 후자는 퍼지집합 NB와 PB에 해당하는 제어기로서 계단상의 부하변동에 의해 식 (4.1)의 목적함수가 최소가 되도록 RCGA로 조정되었고, $K_P = 0.3817$, $K_I = 5.3913$을 얻었다.

$$J(K_P, K_I) = \int_0^{t_f} \left(\left| \omega'_r - \omega_p \right| + \alpha \left| u \right| \right) dt \qquad (4.1)$$

여기서 t_f는 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도의 충분히 큰 값이고, α는 하중계수로서 0.005가 사용되었다.

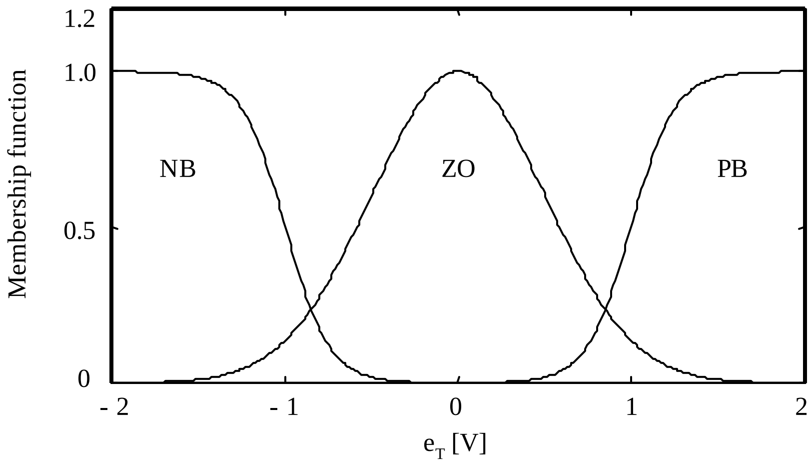


그림 4.5 **입력공간에 대한 퍼지분할**

Fig. 4.5 Fuzzy partition of input space

4.4 응답실험

앞서 설계한 제어기의 성능을 검증하기 위해 실제 시스템에서 응답 실험을 실시하였다. Prefilter 의 시정수는 0.01 으로, 샘플링 시간은 5.5 [msec] 로 선정하였다. 제안한 방법을 PI 제어기와 비교 검토하기 위하여 그림 4.6과 같이 일반적인 PI 제어기를 설계하고 시스템의 응답 특성을 비교하였다. 비교 대상이 된 PI 제어기의 파라미터는 기준입력 변동에 대해 식 (4.1)의 목적함수가 최소가 되도록 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 추정되었고, K_P = 0.3421, K_I = 3.9998 로 선정되었다.

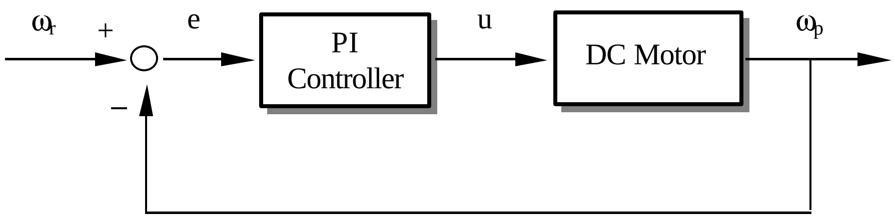


그림 4.6 PI 제어시스템의 블록선도

Fig. 4.6 Block diagram of a PI control system

4.4.1 기준입력 변화에 대한 응답 검토

그림 4.7은 제안된 제어기의 기준입력 변화에 대한 추종성능을 검증하기 위하여 6 [sec]간격으로 기준입력을 계단상으로 변경시켰을 때 제안된 시스템과 RCGA 동조된 PI 제어시스템의 응답을 나타낸 것이다. 둘 다 기준입력 변동에 대해 만족스러운 응답특성을 보이고 있으나, 제안된 시스템이 더 나은 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

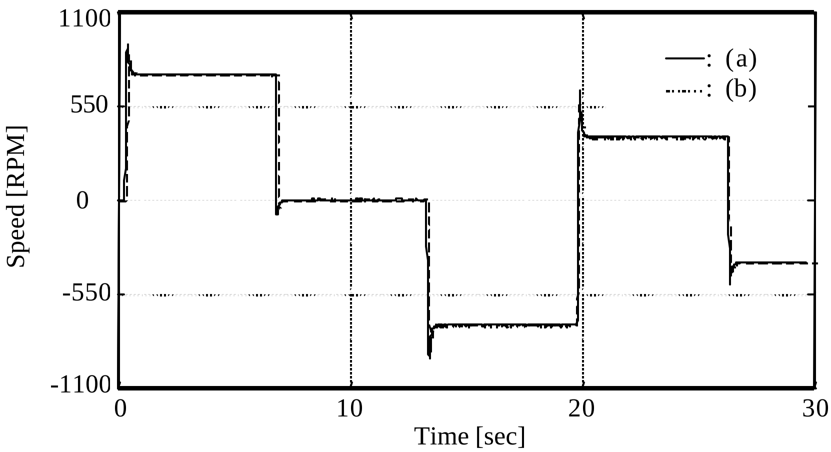


그림 4.7 계단상의 입력변화에 대한 제안한 제어기(a)와 PI 제어기(b)의 응답비교

Fig. 4.7 Response comparison of the proposed controller(a) and the PI controller(b) to step input changes

4.4.2 부하변동에 대한 응답 검토

부하변동에 대한 제안된 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 기준입력이 변경된 후 3 [sec]가 경과한 후 시스템 출력이 정상상태에 있을 때 각각 ±0.2[V]의 부하 변동으로 고려할 수 있는 계단상의 외란을 인가했을 때, 응답을 그린 것이 그림 4.8 이다.

그림에서와 같이 외란 변화에도 불구하고 시스템의 출력은 즉시 기준입력에 회복하는 것을 알 수 있고 PI 제어기보다 우수한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

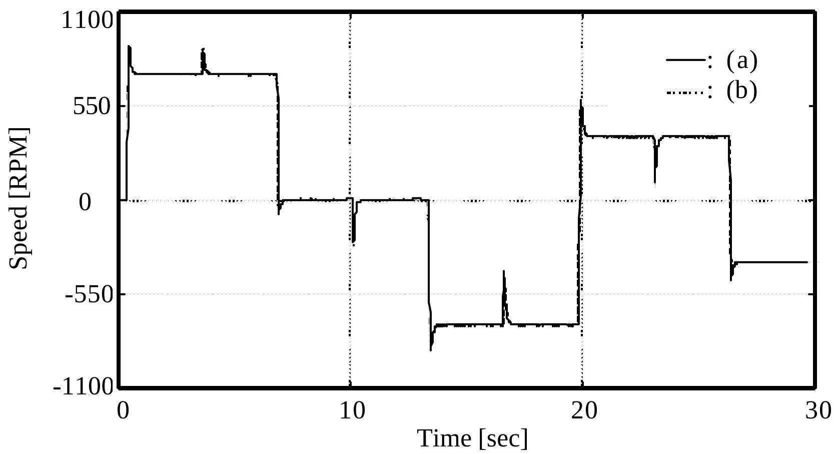


그림 4.8 외란에 대한 제안한 제어기(a)와 PI 제어기(b)의 응답비교

Fig. 4.8 Response comparison of the proposed controller(a) and the PI controller(b) to disturbance changes

제 5 장 결 론

본 논문에서는 동력학과 퍼지기법을 이용하여 DC 모터의 속도 제어용 제어기를 설계하는 한 방법을 제시하였다. 이를 위해 먼저 DC 모터 회전체의 쿨롱마찰을 고려한 비선형 모델을 얻고 RCGA 를 이용하여 그 파라미터를 추정하였다. 제안한 기법에 의한 제어기는 비선형 역동력학 모델, 역동력학에 의해 유발될 수 있는 고주파 영향을 감쇄하기 위한 Prefilter 그리고 모델의 불확실성, 외란, 파라미터 변동 등에 의해 유발될 수 있는 모델과 시스템간의 오차를 보상하기 위한 퍼지제어기 등으로 구성된다. 특히 퍼지제어기는 Takagi-Sugeno 형태로서, 결론부는 기준입력 변화에 대한 시스템의 추종성을 개선하는 PI 제어기와 외란에 대한 조정성을 개선하는 PI 제어기가 퍼지 결합되었다. PI 제어기의 파라미터는 RCGA 로 동조하였다.

제안된 기법을 검증하기 위하여 Feedback 사의 MS 150 시스템에 대하여 실험을 실시하였다. 기존의 PI 제어기와 비교한 결과 만족할 만한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

한편 본 연구에서는 제어대상을 1 차 시스템으로 근사화하였으나, 차후 연구과제로 고차의 시스템으로 확대하는 연구가 필요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

[1] G. Jin, “Intelligent Fuzzy Logic Control of Processes with Time Delays”, Ph.D. Thesis, University of Wales Cardiff, United Kingdom, 1995

[2] C. E. Garcla and M. Morarl, “Internal Model Control I: A Unifying Review and Some New Results”, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 21, No. 2, pp. 308-323, 1982

[3] T. Sugie and T. Yoshikawa, “General solution of Robust Tracking Problem in Two-Degree-of-Freedom Control Systems”, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-31, pp. 552-554, 1986

[4] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control”, IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-15. No. 1, pp.166-132, 1985

[5] G. Jin and S. Joo, “A Study on a Real-Coded Genetic Algorithm”, Journal of Control Automation and Systems Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275, 2000

[6] W. Leonhard, Control of electrical Drives, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996

[7] **허남호**, **남광희**, **역동력학을 이용한 교류 전동기 전류제어기**, **제어자동화 시스템공학회지**, **제** 6 **권**, **제** 1 **호**, pp.26-32, 2000

[8] P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, John Wiley & Sons, Inc., N. Y.,1997

[9] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc., N. Y.,1997

[10] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000

[11] 이주헌, 모터제어기술, 성안당, 1997

[12] J. H. Holland, Adaptation in natural and artificial systems, The University of Michigan Press, Michigan, 1975

[13] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley Publishing Co. Inc., N.Y. 1989

[14] K. A. De Jong, “An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptation Systems”, Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975

[15] D. M. Etter et al., “Recursive Adaptive Filter Design Using and Adaptive Genetic Algorithm”, Proc. ’ 82 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Paris, France, pp. 635-638, 1982

[16] K. Kristinsson and G. A. Dumont, “system Identification and Control Using Genetic Algorithms”, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.22, No.5, pp. 1033-1046, 1992

[17] IEEE Press, The Control Handbook, Vol. Ⅰ,Ⅱ, W. S. Levine(Ed), CRC Press, Inc., 1996

[18] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures= Evolution Programs, Springer-Berlag, Berlin Heidelberg, 1996

[19] H. T. Nguyen et al., Theoretical aspects of fuzzy control, John Wiley & Sons, Inc., 1995