

공학박사 학위논문

컨테이너 크레인을 위한 *RCGA* 기반의
퍼지제어기

RCGA-Based Fuzzy Controller for Container Cranes

지도교수 소 명 옥

2007 년 8 월

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과 이윤형

本 論文을 李潤炯의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 陣 康 奎 (印)

委 員 工學博士 李 浚 柝 (印)

委 員 工學博士 吳 世 駿 (印)

委 員 工學博士 鄭 柄 健 (印)

委 員 工學博士 蘇 明 玉 (印)

2007年 6月 25日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 동향	1
1.2 연구 내용 및 구성	3
제 2 장 RCGA, 퍼지이론 및 T-S 퍼지모델	6
2.1 RCGA	6
2.1.1 실수코딩	7
2.1.2 초기 집단의 생성	8
2.1.3 유전 연산자	8
2.1.4 적합도 평가	11
2.1.5 적합도의 스케일링	11
2.1.6 엘리트 전략	12
2.1.7 종료 조건	12
2.2 퍼지이론	14
2.2.1 퍼지집합	14
2.2.2 퍼지로직 시스템	21
2.2.3 추론법의 비교	34
2.3 T-S 퍼지모델	35
2.3.1 Takagi-Sugeno 추론법	35
2.3.2 T-S 퍼지모델	37
제 3 장 컨테이너 크레인의 모델링	41
3.1 컨테이너 크레인의 개요	41
3.2 컨테이너 크레인의 수학적 모델링	47
3.2.1 트롤리와 컨테이너	47

3.2.2	트롤리 구동부	54
3.2.3	상태공간 해석	56
3.3	RCGA를 이용한 파라미터 추정	58
제 4 장	컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델	61
4.1	서브시스템	61
4.2	퍼지규칙의 추론	62
4.3	RCGA를 이용한 소속함수의 최적 조정	63
제 5 장	컨테이너 크레인의 제어시스템 설계	67
5.1	선형 서브제어기 설계	67
5.2	퍼지제어기 설계	73
5.2.1	RCGA기반 퍼지제어기 설계	73
5.2.2	퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기 설계	78
제 6 장	시뮬레이션 및 검토	84
6.1	컨테이너 크레인의 파라미터 추정	84
6.2	컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델	93
6.3	RCGA기반 퍼지제어기	101
6.4	퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기	111
제 7 장	결론	121
	참고문헌	123
	감사의 글	131

RCGA-Based Fuzzy Controller for Container Cranes

Yun-Hyung Lee

*Department of Mechatronics Engineering, Graduate School
Korea Maritime University*

Abstract

This thesis presents the RCGA-based fuzzy controller for container cranes which effectively performs set-point tracking control of trolley and anti-swaying control under system parameter and disturbance changes.

The first part of this thesis focuses on the derivation of the mathematical equation and Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy model of a nonlinear container crane system. The T-S fuzzy model is described by several fuzzy IF-THEN rules which locally represent linear input-output relations of the system according to operation conditions and their parameters. The fuzzy membership functions are adjusted by a RCGA.

The second part of this thesis presents a design methodology of the RCGA-based fuzzy controller which guarantees the robustness for changes to system parameters and disturbances, the fuzzy state observer which solves the problems of unmeasurable state variables. Sub-controllers are designed using another RCGA, which satisfy the given constraints for each subsystem and then the overall controller is performed with the combination of these sub-controllers by fuzzy IF-THEN rules. The fuzzy state observer is defined from the set of fuzzy rules with the state observer designed using a RCGA for each subsystem in order to solve the estimation error.

The last part of this thesis performs a simulation to demonstrate the efficacy of the proposed methods. In the results of simulation, the fuzzy model with the membership functions adjusted by a RCGA showed almost

similar dynamic characteristics compared to the outputs of the container crane for the input signal of step and sinusoidal types. The simulation results for the RCGA-based fuzzy controller showed not only the fast settling time compared to that of LQ controller for the significant change in parameters, reference input, initial conditions, and disturbances, but also stable and robust control performances without any steady-state error. Also, the fuzzy controller with fuzzy state observer demonstrated more robust control performance than that of LQ controller and showed almost similar response characteristics compared to the RCGA-based fuzzy controller.

Nomenclature

A, A'	fuzzy sets
A_1, A_2, \dots, A_n	fuzzy sets
A'_1, A'_2, \dots, A'_n	fuzzy sets
A_j^i	fuzzy sets
A, B, C	matrices
B_{eq}	viscous damping coefficient of motor
B_p	viscous damping coefficient of container
C, C'	fuzzy sets
$C^1, C^2, \dots, C^i, C^r$	fuzzy sets
C'^1, C'^2, \dots, C'^r	fuzzy sets
D, G, H	matrices in reduced-order fuzzy state observer
E, M, N	matrices with proper dimension
F	driving force of trolley
$F(\psi)$	objective function with penalty function
g	gravitational acceleration constant
g_1, g_2, g_3, g_4	constraint conditions
i_a	armature current of motor
I_c	inertial moment of container
$J(\psi)$	objective function
J_m	inertial moment of motor rotor
K	state feedback gain matrix
K_b	back e.m.f. constant of motor
K_g	gear ratio in gear box
K_t	torque constant of motor
L^i	observer gain matrix of the i th subsystem
ℓ	length from trolley to center of container
M	mass of trolley with actuator motor

M_p	maximum overshoot
M_t	mass of trolley without trolley motor
M_j^i	fuzzy sets
m	mass of container
N	population size
n_1	teeth number of motor pinion gear
n_2	teeth number of driven gear
P, P_c	common positive definite symmetric matrices
$P(k)$	population at generation k
$P(\Psi)$	penalty function
P_c	crossover rate
P_m	mutation rate
$\tilde{P}(k)$	population after crossover at generation k
$\bar{P}(k)$	population after reproduction at generation k
Q	weighting matrix
R	fuzzy relation or weighting coefficient
R_m	armature resistance of motor
r_d	radius of wire drum
S	fuzzy relation
s	string vector
\tilde{s}	string vector after crossover
\bar{s}	string vector after reproduction
T	total kinetic energy of container crane or maximum generation of genetic algorithm
T_{cp}	translational kinetic energy of container
T_{cr}	rotational kinetic energy of container
T_t	total kinetic energy of trolley
T_{tp}	translational kinetic energy of trolley
T_{tr}	rotational kinetic energy due to motor

t_r	rising time
t_s	settling time
u	control input or voltage applied to motor
V	potential energy of container crane
W	fuzzy relation or data window
w	output of the reduced-order fuzzy state observer
w_j	penalty constant of the j th constraint condition
x	horizontal position of trolley
\mathbf{x}	state vector
\mathbf{x}_c	augmented state vector
\mathbf{x}_f	state vector of fuzzy model
\mathbf{x}_m	state vector of linear model
\mathbf{x}_p	state vector of system
\dot{x}	horizontal velocity of trolley
$\hat{\mathbf{x}}$	state vector of fuzzy state observer
$\tilde{\mathbf{x}}$	error state vector
y	system output or trolley position
y_r	reference input
z	delay operator or state variable
α	swing angle of container from vertical line
$\dot{\alpha}$	swing angular velocity of container
η_g	efficiency of motor
η_g	efficiency of gearbox
η_i	coefficient of the reproduction operator
ρ^i	fitness of the i th fuzzy rule
τ_1	torque of motor pinion
τ_2	torque of wire drum
ω_1	angular velocity of motor pinion
ω_2	angular velocity of wire drum

Σ	summation operator
Π	product operator
\cup	fuzzy union operator
\wedge, \vee	fuzzy maximum and minimum operator
$\ast, \dot{+}$	t-norm and t-conorm operator
\ast	minimum or product operator
\times	cartesian product
\circ	compositional operator
\Rightarrow	fuzzy implication function
$\ \cdot \ $	norm

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

최근 국제간 컨테이너 물동량의 증가로 선진 항만들은 터미널의 생산성과 서비스 수준 향상을 통해 항만의 경쟁력을 높이려는 노력을 하고 있다. 자동화된 터미널에서 컨테이너의 양·적하 작업에 투입되는 컨테이너 크레인(Container crane)은 여러 장비들과 상호협동하기 때문에 그 역할은 대단히 중요하다. 또한, 물류의 병목현상이 주로 양·적하 작업에서 나타나게 되므로 터미널의 생산성은 컨테이너 크레인의 성능과 직접적인 연관성을 갖는다고 해도 과언이 아니다.

선박과 육상 터미널에서 이루어지는 컨테이너 크레인의 양·적하 작업은 크게 두 가지 동작, 즉 호이스트(Hoist) 동작과 트롤리(Trolley) 동작으로 구분할 수 있다. 호이스트 동작은 선박 또는 육상의 목표위치로 컨테이너를 이동시키기 위해 컨테이너를 집어 올리거나 내리는 동작을 말하며, 트롤리 동작은 집은 컨테이너를 목표위치로 이동시키는 동작을 말한다.

트롤리 장치와 컨테이너를 집는 스프레더(Spreader)사이에는 호이스트용 와이어로프(Wire rope)가 연결되어 있어 트롤리가 이동하면 필연적으로 컨테이너의 흔들림이 발생하게 되고, 트롤리 동작이 이루어지는 동안에 호이스트 동작도 동시에 이루어지므로 화물의 흔들림과 함께 호이스트용 와이어로프의 길이도 변한다. 또한 매 작업 사이클마다 집는 컨테이너의 무게는 화물의 내용물에 따라 수 톤에서 수 십 톤이 되어 이들 간에도 많은 차이가 있다.

이러한 상황에서 컨테이너 크레인은 짧은 시간 내에 트롤리를 목표위치에 오버슈트(overshoot)가 거의 없도록 이동시키고, 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 단시간에 컨테이너의 흔들림을 제어하여 운전자의 피로감을 경감시키고 작업 사이클 시간을 단축시킬 수 있어야 한다. 따라서 컨테이너 크레인의 하역효율을 높일 수 있는 방법은 호이스트 및 트롤리 동작을 빠르게 하는 방법과 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 컨테이너의 흔들림을 가능한 한 짧은 시간 내에 제어하는 방법을 생각할 수 있다. 전자(前者)의 방법은 트롤리 레일의 조건, 스프레더와 운전선의 전원공급 및 제어신호 입·출력 전선(Festoon cable)의 이동문제 그리고 상업용 호이스트 모터의 제한된 용량으로 인한 트롤리 및 호이스트 동작의

속도향상에 한계가 있기 때문에 주로 후자(後者)의 방법으로 하역효율을 높이려는 연구가 진행되고 있다[1].

컨테이너 크레인의 제어에 관한 초기의 연구로는 미국 Goertz사[2]의 언로더 개발과 영국의 Alsop 등[3]이 발표한 언로더 자동화 계획 논문, Manson[4]이 제안한 천정 크레인의 모터 속도제어, Morishita[5]가 발표한 트롤리 이동속도 선형 피드백 제어 방법 등이 있다. 또한, Yamaguchi[6]와 Okawa 등[7]이 제안한 흔들림 각에 대한 피드백 제어방법, Boustany와 Novel[8]이 제안한 동적 피드백 선형화를 이용한 적응제어 방법 등이 있다.

국내의 연구로 Park 등[9]은 로프 길이가 일정한 화물의 흔들림을 제어할 목적으로 화물의 흔들림 각의 변화율을 측정하고 이것을 피드백하여 단진자 운동에 감쇠 효과를 부여하는 디지털 제어 알고리즘을 제안하였고, Yoon 등[10]은 화물의 흔들림 감쇠와 정지위치 오차를 줄이기 위해 가속도 경로 계획방식, 속도 경로 폐회로 제어방식, 퍼지제어기의 설계방법을 제시하였다. Shin 등[11]은 위치제어 및 흔들림 제어를 위해 LQ제어기와 퍼지제어기를 설계하였고, Son 등[12]은 전동기의 구동부와 감속기어 계통까지 포함시켜 모델링하여 LQ제어기를 설계하고, PID 제어기와 비교하였다.

이러한 연구의 대부분은 호이스트용 와이어로프의 길이나 컨테이너의 질량이 일정하다는 가정에서 출발하므로 파라미터 변화에 대한 것을 고려하지 못하였다. 그러나 컨테이너 크레인의 운전환경을 살펴보면 매 작업 사이클 마다 처리되는 컨테이너의 질량이 화물의 내용물에 따라 많은 차이가 발생하고, 호이스트용 와이어로프의 길이 또한 양·적해지는 작업 중에 수시로 변한다. 이것은 기존의 연구가 실제 컨테이너 작업 환경과는 많은 차이가 발생하여 실제 환경에서는 강인한 제어를 수행할 수 없다는 것을 의미한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 현재까지 많이 응용되어 온 기준모델적응 제어(Model Reference Adaptive Control : MRAC)와 자기조정제어(Self-Tuning Control : STC) 등도 시스템의 결정적 성질에 의존하므로 제한된 제어환경에서만 성공적으로 작동하는 한계를 가지고 있다[13,14]. 따라서 최근에는 인간의 사고 능력과 적응능력을 모방하는 신경회로망, 퍼지제어, 유전알고리즘과 같은 지능형 제어기(Intelligent controller)가 연구되고 있으며, 이러한 연구방향과 더불어 종래의 제어기를 지능형 제어기와 여러 가지 방법으로 결합하여 강인한 제어기를 구성하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

1.2 연구 내용 및 구성

컨테이너 크레인은 복잡한 비선형시스템일 뿐만 아니라 가변되는 호이스트용 와이어로프의 길이와 컨테이너 질량에 따라 시스템의 파라미터가 변하고, 바람과 조석간만의 차이 등으로 발생하는 외란이 상존한다. 이 경우에 종래의 제어기법으로 트롤리를 목표위치에 정밀하게 추종시키고, 동시에 컨테이너의 흔들림 각을 빠른 시간 내에 제어한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

따라서 본 논문에서는 트롤리의 목표위치를 정밀하게 추종시키고 컨테이너의 흔들림 각을 최소화시킬 수 있는 유전알고리즘 기반의 강인한 퍼지제어기 설계 기법을 제안한다. 우선 제안하는 퍼지제어기의 소속함수를 얻기 위해 파라미터가 변화하는 경우에도 컨테이너 크레인의 동특성을 효과적으로 표현 가능한 T-S 퍼지모델을 얻는다. T-S 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 호이스트용 와이어로프 길이와 컨테이너 질량을 설계변수로 간주하고 이들의 변화에 따라 다수 개의 지역 선형모델(서브시스템)을 구한 후, 이 선형모델을 “IF-THEN” 퍼지규칙으로 결합한 것이다. 이때 선형모델의 파라미터와 퍼지모델의 소속함수는 컨테이너 크레인의 동특성과 일치하도록 입·출력 데이터와 실수코딩 유전알고리즘 (Real-Coded Genetic Algorithm : RCGA)[15,16]이 결합된 모델조정기법을 이용하여 최적으로 추정한다.

다음으로 각 서브시스템에 대해 주어진 제약조건을 만족하도록 RCGA를 이용하여 PI형의 상태피드백 제어기(서브제어기)를 구한 후, 이들을 다시 “IF-THEN” 퍼지규칙으로 결합하여 RCGA기반 퍼지제어기를 얻는다. 이것은 기존의 병렬분산보상기(Parallel Distributed Compensator : PDC)[17,18]를 보완한 확장형 병렬분산보상기(Extended Parallel Distributed Compensator : EPDC)로서 시스템의 모델이 0형인 경우에도 추종제어가 가능하도록 개선한 것이다.

상태피드백 제어기의 구현은 모든 상태변수의 피드백을 요구하므로 측정 불가능한 상태변수의 문제를 해결하기 위해 퍼지상태관측기를 설계하여 이용한다. 퍼지상태관측기는 시스템의 파라미터가 변동하는 경우에 발생할 수 있는 추정 오차 문제를 해결하기 위해 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 RCGA로 설계된 상태관측기를 퍼지결합한 것이다.

이와 같은 내용으로 본 논문은 모두 7장으로 구성되어 있으며, 각 장에서 수행한 연구내용은 다음과 같다.

제2장은 본 논문에서 최적화 도구로 사용한 RCGA의 개요에 대해 설명한다. 그리고 본 논문에서 제안하는 퍼지제어기 설계의 이론적인 배경이 되는 퍼지이론과 T-S 퍼지모델에 대해 살펴본다.

제3장에서는 컨테이너 크레인 시스템의 수학적 모델을 유도한 후, 특정 운전 환경에서 시스템을 선형모델로 표현한다. 또한, 컨테이너 크레인의 입·출력 데이터를 통해 모델의 동특성이 시스템의 동특성과 일치하도록 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용한 모델의 파라미터 추정 기법을 설명한다.

제4장에서는 제5장에서 제안하는 퍼지제어기의 소속함수를 얻기 위해 파라미터가 변화하는 경우에도 컨테이너 크레인의 동특성을 잘 표현할 수 있는 T-S 퍼지모델을 얻는다. 따라서 퍼지모델의 구현은 컨테이너 크레인의 파라미터가 변화하는 상황에 대응하기 위한 모델링 기법인 동시에 제5장의 제어기 설계를 위해 선행되어야 하는 중요한 과정이다. 이때 퍼지모델의 소속함수인 폭과 중심은 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용하여 최적으로 조정한다.

제5장은 컨테이너 크레인의 파라미터 변화와 외란에 대해 강인한 RCGA기반 퍼지제어기 설계 기법을 설명한다. 제안한 제어기는 주어진 제약조건을 만족시키도록 RCGA로 탐색된 PI형의 상태피드백 제어기(서브제어기)를 얻은 후, 이들을 “IF-THEN” 퍼지규칙으로 결합함으로써 얻어진다. 또한, 제어시스템 설계시 발생할 수 있는 측정 불가능한 상태변수 문제를 해결하기 위해 퍼지상태관측기를 설계하고, 이를 RCGA기반 퍼지제어기에 결합한 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기도 제안한다.

제6장에서는 컨테이너 크레인 시스템의 파라미터 추정 기법을 모형실험장치에 적용하여 그 타당성을 입증하고, T-S 퍼지모델의 유효성을 검증한다. 그리고 RCGA기반 퍼지제어기 및 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기를 컨테이너 크레인의 비선형시스템에 적용하고, 다양한 환경 하에서 시뮬레이션을 실시하여 강인함을 입증한다.

마지막으로 제7장에서는 본 논문에서 최종적으로 얻어진 결론을 요약하고 정리한다. 지금까지 설명한 본 논문의 내용과 구성을 도식적으로 나타내면 Fig. 1.1과 같다.

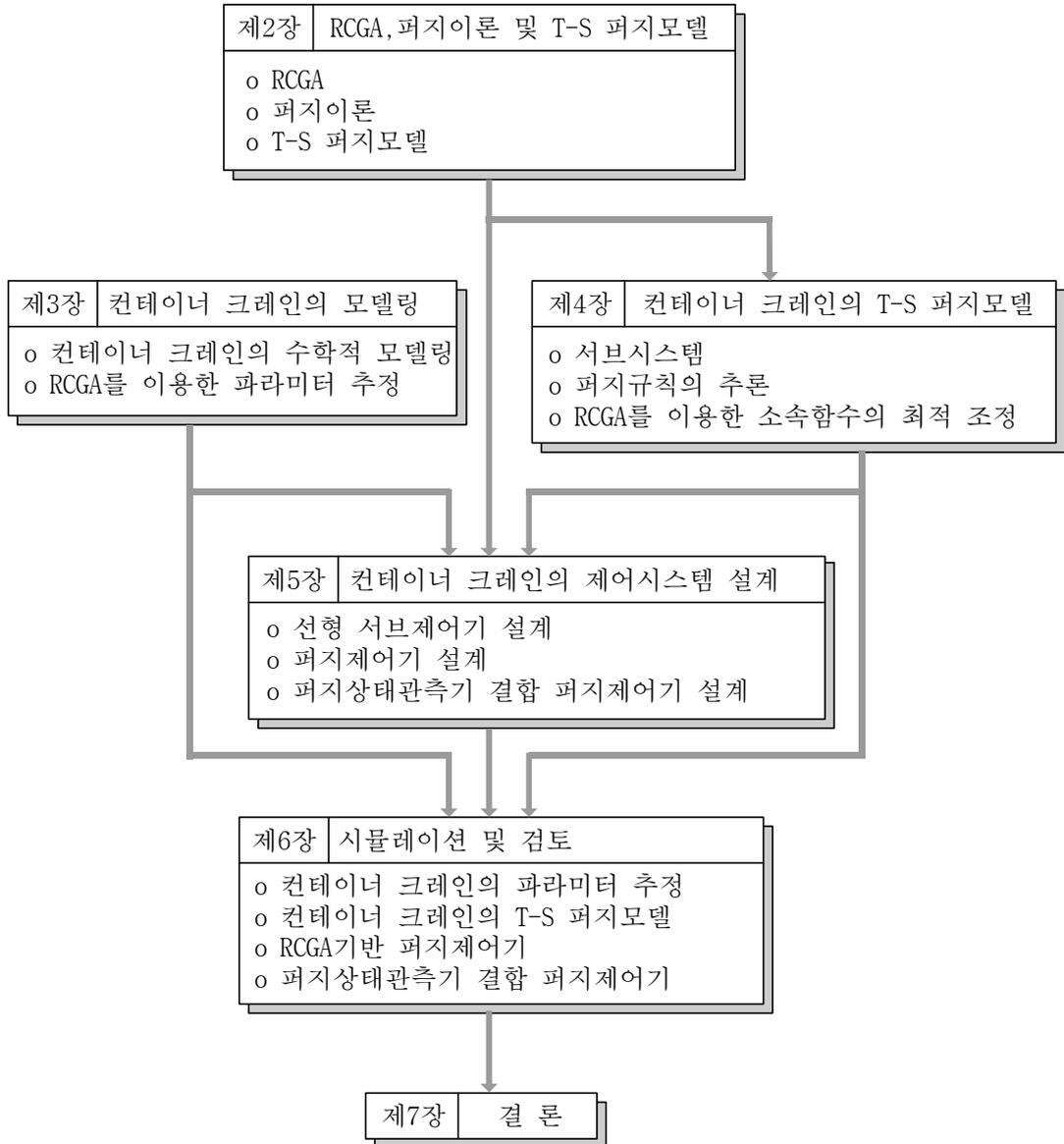


Fig. 1.1 Outline of this thesis

제 2 장 RCGA, 퍼지이론 및 T-S 퍼지모델

컨테이너 크레인 시스템을 효율적이고, 안전하게 운영하기 위해서는 알맞은 제어를 사용해야 한다. 이러한 제어를 설계하기 위해서는 우선 시스템을 잘 표현하는 모델이 필요한데 컨테이너 크레인은 운전 중에 호이스트용 와이어로프의 길이가 변화하고, 매 사이클 마다 컨테이너 질량이 변화하기 때문에 단일 모델로 시스템을 표현하는 것이 어렵다.

그러나 Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지모델은 이와 같이 시스템의 파라미터가 변화하는 환경에서도 비선형시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능하므로, 이를 이용하면 파라미터 변화와 외란의 변화에 대해 강인한 제어를 설계하는 것이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 퍼지모델의 서브시스템에 대해 RCGA로 선형 서브제어를 설계한 후, 이들을 퍼지결합하는 RCGA기반 퍼지제어를 설계하고자 한다.

여기에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 퍼지제어기 설계 과정에 발생하는 최적화 문제의 해결도구로 사용하는 RCGA, 제어기 설계의 이론적 배경이 되는 퍼지이론 및 T-S 퍼지모델에 대해 살펴보기로 한다.

2.1 RCGA

유전알고리즘은 자연환경에서 발견되는 자연선택(Natural selection)과 같은 유전 메커니즘을 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 최적화 기법이다[19-22]. 이는 1975년 Holland 교수[23]에 의해 처음으로 개발 되었고, Goldberg[19]에 의해 비약적인 발전을 이루었다. 유전알고리즘은 주어진 해 공간에서 최적의 값을 결정하기 위해 “적자생존(Survival of the fittest)”의 개념을 이용한다. 이를 위해 임의적으로 설정된 집단 혹은 세대는 상속되고, 서로간의 유전정보를 교환한다. 따라서 인위적인 진화(Artificial evolution)를 일으킬 집단(해 집단)이 필요하고, 이 집단 안에서 재생산(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)와 같은 자연 진화기구를 모방한 유전 연산자가 작동하게 된다.

이처럼 자연환경을 모사한 유전알고리즘은 연속성, 미분가능성, 다봉성과 같은 다양한 형태의 탐색공간으로부터 자유롭고, 목적함수 외의 탐색공간에 대한 사

전지식을 요구하지 않으며, 매우 크고 복잡한 공간일지라도 전역해 쪽으로 수렴시키는 것이 가능하다. 또한 기존의 탐색 기법[19, 23-25]이 갖는 “결정적”이라는 특징보다 “확률적”이라는 특성을 가지며, 보다 더 강인한 탐색이 가능한 장점 때문에 함수의 최적화[26,27], 신경회로망의 학습[28-30], 동적시스템의 파라미터 추정 및 제어[31-42], 신호처리[43,44], 스케줄링 문제의 최적화[45,46] 등의 많은 분야에서 성공적으로 응용되고 있다.

2.1.1 실수코딩

유전알고리즘은 해결하고자 하는 문제의 해를 직접 다루는 것이 아니라 이를 염색체(Chromosome) 혹은 자연 파라미터(Natural parameter)의 형태로 변형하여 사용한다. 일반적으로 이진코딩(Binary coding), 그레이코딩(Gray coding), 실수코딩(Real coding) 등의 여러 가지 코딩 방법이 사용되고 있으나 전통적으로 염색체를 표현하는데 사용되어 온 방법은 이진코딩(Binary coding)이다. 그러나 탐색공간이 크거나, 고정밀도의 해가 필요한 경우, 제약조건이 존재할 경우에는 염색체의 길이를 크게 해야 하고, 이는 연산 부담으로 나타나며 경우에 따라서는 탐색을 불가능하게 한다. 따라서 본 논문에서는 이진코딩 유전알고리즘의 이러한 단점을 극복하고 제약조건이 있는 경우에도 적절한 응용이 가능한 RCGA를 사용한다.

RCGA는 염색체를 실수로 표시하기 때문에 염색체의 실수 유전자(Gene)가 문제의 해 벡터와 일대일로 대응된다. 따라서 실수코딩 염색체는 다음과 같이 표시된다.

정의 2.1 (실수코딩 염색체)

실수코딩 염색체는 실수 값의 열로 표현된다.

$$s=(s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_i \ \cdots \ s_n) \quad (2.1)$$

여기서 $s_i \in \mathbb{R}$ 는 i 번째 유전자(요소), n 은 벡터의 차원이다.

실수코딩을 채용함으로써 염색체의 길이는 벡터의 차원 n 과 일치하게 되고, 문제공간에서 가까운 두 점은 표현공간에서도 서로 가깝게 되는 특징을 갖는다.

2.1.2 초기 집단의 생성

RCGA는 염색체로 이루어진 집단(Population) 안에서 모의진화를 수행하고, 세대를 거치면서 좋은 유전자를 보유하게 된다. 이 집단은 k 세대에서 식(2.2)와 같고, N 으로 나타나는 집단크기(Population size)는 세대가 변하더라도 항상 일정한 크기를 갖는 것으로 가정한다.

정의 2.2 (집단)

k 세대의 집단 $P(k)$ 는 염색체로 특징 지워지는 N 개의 개체들의 집합으로 정의된다.

$$P(k) = \{s_1(k), s_2(k) \cdots s_i(k) \cdots s_N(k)\} \quad (2.2)$$

특히 초기 집단 $P(0)$ 는 무작위로 생성되거나 또는 경험을 기반으로 생성될 수 있다. 진자는 난수발생기를 통하여 발생된 실수로 초기집단을 구성하고, 후자는 다른 간단한 탐색 알고리즘으로 해를 포함하는 근사적인 정의영역을 얻고, 이 안에서 균등확률로 점들을 선택해서 초기화시킨다. 본 논문에서는 무작위법으로 초기집단을 초기화한다. 따라서 염색체 요소들은 난수발생기를 통하여 발생하는 정의영역 $x_j^L \leq x_{ij}(k) \leq x_j^U$ ($1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n$) 내의 임의의 실수값으로 설정된다.

2.1.3 유전 연산자

집단 내에서 모의진화를 일으키기 위해서는 자연의 진화원리를 알고리즘으로 흉내 내어야 하며, 이를 위해 대부분의 유전알고리즘에서 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자(Genetic operator)를 사용한다.

w 재생산

재생산(Reproduction)은 자연의 적자생존 또는 자연도태를 모방하는 메커니즘으로 각 개체의 적합도를 기반으로 집단 내의 개체들을 선택하고, 새로운 집단을 형성하는 과정이다. 이를 통해 집단 내의 약한 개체들은 도태되고, 강한 개체가

선택되어 세대교체가 진행될수록 좋은 유전자를 가진 집단이 되게 한다. 재생산 연산자는 룰렛휠선택 재생산(Roulette wheel selection-based reproduction)[22], 토너먼트선택 재생산(Tournament selection-based reproduction)[19], 순위에 기초한선택 재생산(Ranking selection-based reproduction)[47-49], 구배와 유사한 재생산(Gradient-like reproduction)등이 있다. 본 논문에서는 Pham과 Jin[50]이 제안한 구배와 유사한 재생산을 사용한다.

w 교배

교배(Crossover)는 자연계 생물의 성적결합을 모방하는 것으로 이를 통해 부모 세대의 유전자가 서로 교환된다. 교배 연산자는 플랫 교배(Flat crossover)[51], 단순 교배(Simple crossover)[52], 산술적 교배(Arithmetical crossover)[53] 등이 있으며, 본 논문에서는 수정단순 교배[15]를 사용한다. 수정단순 교배는 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배와 교배점의 유전자를 식(2.3)과 같이 일차결합(Linear combination)하여 자손을 생성하는 산술적 교배를 결합한 형태이다.

$$\begin{aligned}\tilde{x}_j^u &= \lambda x_j^v + (1-\lambda)\bar{x}_j^u \\ \tilde{x}_j^v &= \lambda x_j^u + (1-\lambda)\bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n)\end{aligned}\tag{2.3}$$

여기서 \bar{x}_j^u 와 \bar{x}_j^v 는 집단에서 선택된 부모 염색체의 유전자이고, \tilde{x}_j^u 와 \tilde{x}_j^v 는 자손 염색체의 유전자이다. λ 는 곱인수(Multiplier)로서 고정되거나 각 유전자마다 독립적으로 결정될 수 있는 0과 1사이의 난수이다.

Fig. 2.1은 이 연산자의 연산 결과를 보여준다.

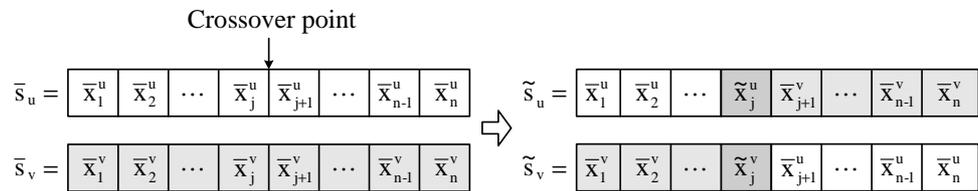


Fig. 2.1 Modified simple crossover

w 돌연변이

모의진화가 진행되는 동안 재생산과 교배를 통해 집단은 더욱 해에 근접한 염색체로 되고, 이는 염색체들이 서로 닮아가게 되는 요인이 된다. 그러나 이러한 현상이 진화 초기에 발생하면 유전자의 다양성 결핍으로 인해 지역해(Local solution)나 사점(Dead corner)에 빠지게 될 수 있다. 돌연변이(Mutation)는 이를 벗어나기 위한 전략으로 균등 돌연변이(Uniform mutation)[53], 경계 돌연변이(Boundary mutation), 동적 돌연변이(Dynamic mutation)[53] 등이 있으며, 본 논문에서는 동적 돌연변이를 사용한다. 이 돌연변이 연산자는 세대 초기에 전 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하다가 세대수가 증가하면서 탐색영역을 좁혀 지역적으로 탐색하기 때문에 돌연변이 확률을 다른 돌연변이 연산자보다 크게 선정하는 것이 가능하다. Fig. 2.2와 같이 j 번째 유전자에서 돌연변이가 일어나면 x_j 는 식(2.4)로부터 결정되어진다.

$$\tilde{s} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \dots & \tilde{x}_j & \tilde{x}_{j+1} & \dots & \tilde{x}_{n-1} & \tilde{x}_n \end{bmatrix} \Leftrightarrow s = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j & x_{j+1} & \dots & x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}$$

Fig. 2.2 Dynamic mutation

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

여기서 \tilde{x}_j 는 교배 연산을 거친 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된 j 번째 유전자이다. $\tilde{x}_j^{(L)}$, $\tilde{x}_j^{(U)}$ 는 각각 j 번째 유전자의 하한값과 상한값이고, τ 는 0 또는 1을 취하는 난수이다. 이때 $\Delta(k, y)$ 는 다음의 함수가 사용된다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b \quad (2.5)$$

여기서 r 은 0과 1사이의 실수 난수이고, T 는 유전알고리즘의 최대 세대수이며, b 는 불균형 정도를 나타내는 매개변수로서 사용자에 의해 결정된다.

2.1.4 적합도 평가

자연계에서 한 생물의 생존 능력은 그 환경에 대한 적합도를 반영하게 되는 것과 마찬가지로 유전알고리즘은 최적해로의 수렴 정도를 개체의 적합도 평가(Fitness evaluation)로 반영시킨다. 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성될 때마다 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가되고 적합도의 크기에 따라 다음 세대에서 선택되어 재생산되는 비율이 결정되게 된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려하기 위해서 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현되어야 하고, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 최대화 혹은 최소화 문제로 기술되는 목적함수로부터 적절한 적합도 함수는 다음과 같은 사상(mapping)을 통해 얻을 수 있다.

최대화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (2.6a)$$

최소화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = -F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (2.6b)$$

여기서 $f(\mathbf{s}(k))$ 는 적합도 함수, $F(\mathbf{x}(k))$ 는 목적함수, k 는 세대, γ 는 항상 $f(s) \geq 0$ 을 보장하는 상수로서 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 주므로 적절한 선정이 필요하다[15,53].

일반적으로 탐색 공간 내에서 목적함수의 최소치를 아는 것이 쉽지 않기 때문에 γ 는 경험적으로 아주 작은 값으로 선정된다. 그러나 γ 를 초기에 잘 선정해도 진화 도중에 값이 고정되면 선택압(Selection pressure)이 떨어지는 문제가 발생한다. 이것은 적합도 함수의 스케일링(Scaling)이 필요한 이유가 된다.

2.1.5 적합도의 스케일링

유전알고리즘이 특히 작은 집단을 취급할 때 개체집단의 적합도 평가는 그 성능에 크게 영향을 미친다. 만약 초기 세대의 집단에 초우량 개체가 출현하게 되면 재생산 연산자는 이 개체를 여러 번 복제하게 되고, 그 결과 이들이 집단을 지

배하게 되어 지역 최적점으로 급히 수렴하게 된다. 이와 반대로 후기 세대에는 집단이 강해지고 개체들이 한 점 주위로 군집되어 좋은 개체와 더 나은 개체를 구별하는 것이 쉽지 않게 된다. 그러므로 초기에는 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있도록 개체간의 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고, 후기에는 그 영향이 커지게 해서 선택압을 일정하게 유지시켜 줄 필요가 있다.

이 같은 역할을 하기 위해 스케일링[19]을 통한 정규화 방법과 스케일링 윈도우 기법을 통한 정규화 방법이 사용될 수 있다. 전자의 방법으로는 선형 스케일링(Linear scaling), 시그마 절단(Sigma truncation), 로그 스케일링(Logarithmic scaling) 등이 있다. 후자의 방법은 과거 집단의 개수인 스케일링 윈도우 W_s 를 사용하여 선택압을 유지하는 것으로써 γ 값을 과거의 다수 집단에서 발견되는 목적함수 값으로 계속 변경해 주는 방법이다. Grefenstette[54]는 W_s 의 크기에 따라 세 가지 스케일링 모드를 제안했는데 광범위한 시뮬레이션 결과 $W_s=1$ 인 경우가 효과적이라는 결과를 발표하였다. 따라서 본 논문에서도 W_s 를 1로 선정한 스케일링 윈도우 기법을 사용한다.

2.1.6 엘리트 전략

엘리트 전략(Elitist strategy)은 한 세대의 최적 개체의 소멸을 방지하는 전략으로, 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 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장한다. 이 방법은 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다[55].

2.1.7 종료 조건

유전알고리즘이 확률적인 탐색법이라는 사실을 생각할 때, 어느 시점이 전역 해에 도달한 것인지 알기가 쉽지 않다. 그러나 구체적인 적용에 있어서는 유전알고리즘을 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방법을 사용한다. 만약 최종 세대까지 진화한 염색체가 만족할 만한 해에 근접하지 못하면, 최종 세대수를 증가시켜 다시 모의진화를 진행시킨다. 또 다른 방법으로 목적함수 값의 허용치를

정하고, 세대에 관계없이 목적함수가 허용치 안에 들어오면 모의진화를 종료시키는 방법도 있다. 본 논문에서는 전자의 종료 조건을 사용한다.

Fig. 2.3은 지금까지 설명한 RCGA의 진화 과정을 보이고 있다.

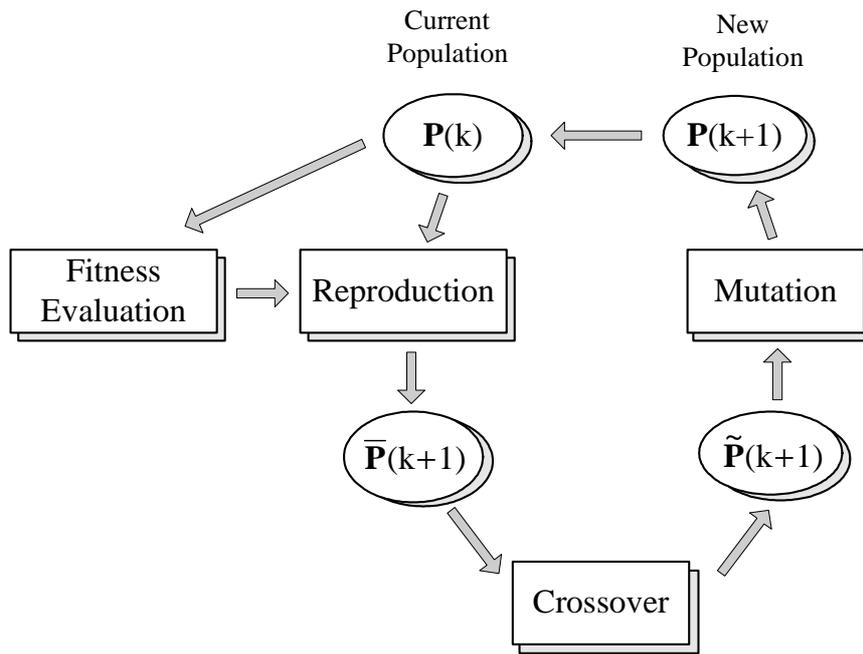


Fig. 2.3 Operation of a RCGA

2.2 퍼지이론

퍼지이론은 인간의 언어 및 사고와 관련된 애매함(Fuzziness)을 수리적으로 취급하는 것이 가능하며, 시스템의 특성이 복잡하여 정량적인 방법으로 해석하기 어렵거나 정보가 정성적이고 부정확한 경우에 유리하고, 전통적인 논리시스템보다 실제 현상의 근사적이고 부정확한 성질을 표현하는데 효과적인 장점을 가진다. 따라서 많은 실제적인 문제에서 퍼지로직을 적용하는 경우가 많이 있다.

시스템의 모델링 관점에서 퍼지로직은 실제의 시스템에 대한 정확한 모델을 얻을 때 정확도에 있어서는 근사 방법을 택하면서 계산의 복잡도를 줄이는 절충 방안이 될 수 있다. 한편, 시스템의 제어 관점에서는 복수개의 “IF-THEN” 형식으로 나타나는 서브시스템의 제어입력을 병렬로 퍼지추론하여 복잡한 입출력 관계를 실현하는 것이 가능하므로 선형제어 만으로 제어가 어려울 때 효과적으로 이용될 수 있다.

특히, 컨테이너 크레인과 같이 운전 중에 파라미터가 변화하거나 갑작스러운 외란이 존재하는 등의 예외 종류가 많은 경우에 퍼지제어기는 조건부 규칙의 형태로 논리형 제어를 수행하기 때문에 선형제어기로는 달성하기 어려운 제어를 수행하는 것이 가능하다.

따라서 여기서는 본 논문에서 제안하고자 하는 RCGA기반 퍼지제어기의 이론적 배경이 되는 퍼지이론과 퍼지로직 시스템에 대해 살펴본다.

2.2.1 퍼지집합

보통집합(Crisp set)은 원소의 소속이 명확한 집합으로서 일반적으로 원소나 열법 또는 조건제시법으로 표시된다. 그러나 퍼지집합(Fuzzy set)은 그 이름에서 의미하듯이 원소의 소속정도가 불분명한 집합이다. 즉, 어떤 집합에 속하는 것으로부터 속하지 않는 것에 이르기까지의 변화가 점진적인 것을 의미한다. 이러한 완곡한 변화는 “속도가 빠르다” 또는 “날씨가 덥다”와 같은 인간의 언어적 표현을 모델링하는데 효과적이고, 그 특성은 퍼지집합의 소속함수(Membership function)에 의해서 기술된다.

정의 2.3 (퍼지집합과 소속함수)

X 가 원소 x 로 이루어진 전체집합(Universe of discourse)이라면 X 내에 정의되는 퍼지집합 A 는 다음과 같은 순서쌍으로 표시된다.

$$A = \{(x, A(x)) \mid x \in X\}, \quad A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (2.7)$$

여기서 $A(x)$ 는 집합 A 에 대한 x 의 소속함수이고, 이것은 0과 1사이의 값을 가지며, 원소 $x \in X$ 가 집합 A 에 소속되는 정도를 나타낸다. 만약 소속함수 $A(x)$ 의 값이 “0” 또는 “1” 중의 하나로 되면 보통집합이 된다. 전체집합이 X 일 때, 일반적으로 퍼지집합 A 는 다음과 같이 이산형과 연속형 중의 하나로 표현될 수 있다.

이산형 :

$$A = \sum_{x_j \in X} A(x_j) / x_j \quad (2.8a)$$

연속형 :

$$A = \int_x A(x) / x \quad (2.8b)$$

여기서 식(2.8)의 문자 “ \sum ”과 “ \int ”는 쌍 $(x, A(x))$ 의 합이나 적분연산의 의미가 아니라 연결을 나타내며, “/”도 나눗셈 연산의 의미가 아니라 단지 소속함수와 원소를 구분하기 위한 분리기호이다.

퍼지집합의 구축은 전체집합의 정의와 소속함수의 특성에 따라 다르며, 소속함수의 특성은 아주 주관적이다. 퍼지제어에서 자주 사용되는 소속함수에는 삼각형, 사다리꼴, 가우스형, 범종형 및 시그모이드형 등이 있다.

퍼지집합에서 중요한 역할을 하는 퍼지 부분집합의 개념은 다음과 같이 정의된다.

정의 2.4 (퍼지 부분집합)

전체집합 X 내에 있는 두 퍼지집합 A 와 B 의 소속함수가 각각 $A(x)$ 와 $B(x)$ 일 때, 모든 x 에 대해 만약 $A(x) \leq B(x)$ 이면 퍼지집합 A 는 퍼지집합 B 의 퍼지

부분집합(Subset)이고, 기호로 다음과 같이 표시한다.

$$A \subseteq B \Leftrightarrow A(x) \leq B(x), \quad \forall x \in X \quad (2.9)$$

전체집합 X 에서 정의되어지는 여집합, 합집합 및 곱집합에 대한 퍼지집합의 기본연산은 다음과 같이 정의될 수 있다.

정의 2.5 (여집합)

전체집합 X 내에 있는 퍼지집합 A 의 소속함수가 $A(x)$ 일 때, 퍼지 여집합 (Complement) \bar{A} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{A} = \int_x \bar{A}(x)/x \quad (2.10)$$

$$\text{단, } \bar{A}(x) = 1 - A(x)$$

식(2.10)을 표준 여집합 함수라고 하며, 이 외에 Sugeno[56]와 Yager[57]의 여집합 함수도 많이 사용된다.

정의 2.6 (합집합)

전체집합 X 내에 있는 두 퍼지집합 A 와 B 의 소속함수가 각각 $A(x)$ 와 $B(x)$ 일 때, 퍼지 합집합(Union) $C=A \cup B$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$C = A \cup B = \int_x C(x)/x \quad (2.11)$$

$$\text{단, } C(x) = \max(A(x), B(x)) = A(x) \vee B(x)$$

여기서 \vee 는 maximum 연산자를 의미한다.

위와 같은 표준 합집합 이외에도 Yager[57], Dombi[58], Dubois-Prade[59]가 제안한 합집합 함수가 있다.

정의 2.7 (교집합)

전체집합 X 내에 있는 두 퍼지집합 A 와 B 의 소속함수가 각각 $A(x)$ 와 $B(x)$ 일 때, 퍼지 교집합(Intersection) $C=A \cap B$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C = A \cap B = \int_x C(x)/x \quad (2.12)$$

$$\text{단, } C(x) = \min(A(x), B(x)) = A(x) \wedge B(x)$$

여기서 \wedge 는 minimum 연산자이다.

교집합 함수도 합집합 함수와 마찬가지로 Yager[57], Dombi[58], Dubois-Prade[59]가 제안한 교집합 함수가 있다.

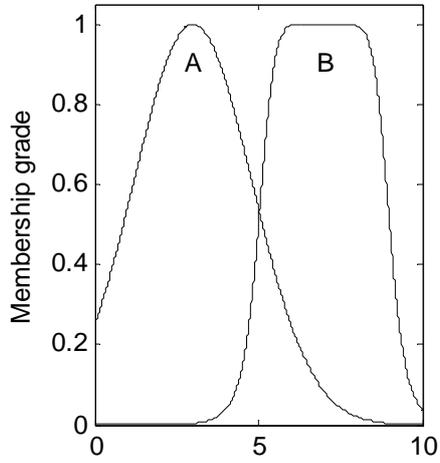
또한, “t-norm”과 “t-conorm”을 사용하여 퍼지-AND와 퍼지-OR를 각각 여러 가지 형태로 정의할 수도 있다[59]. “t-norm”은 퍼지집합의 AND에 대한 집합 연산자로, “t-conorm”은 퍼지집합의 OR에 대한 집합 연산자로 많이 사용된다.

Fig. 2.4는 지금까지 설명한 네 가지의 기본연산을 도시적으로 설명한 것이다. Fig. 2.5는 변수에 따른 Sugeno[56]와 Yager[57]의 여집합 함수 모양을 나타내고, Fig. 2.6은 Yager[57]의 합집합과 교집합 연산을 나타낸다.

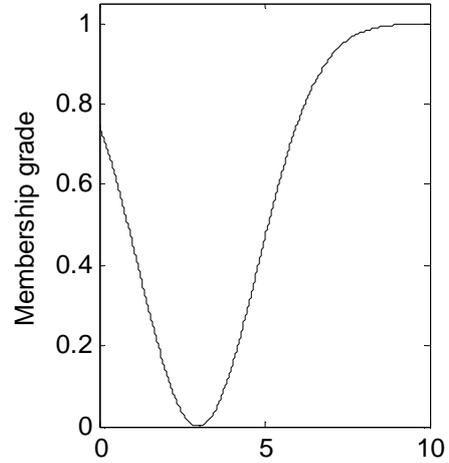
정의 2.8 (곱집합)

전체집합 X_1, X_2, \dots, X_n 내에 있는 퍼지집합 A_1, A_2, \dots, A_n 의 소속함수가 각각 $A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)$ 일 때, A_1, A_2, \dots, A_n 의 곱집합(Cartesian product)은 다음과 같이 정의된다.

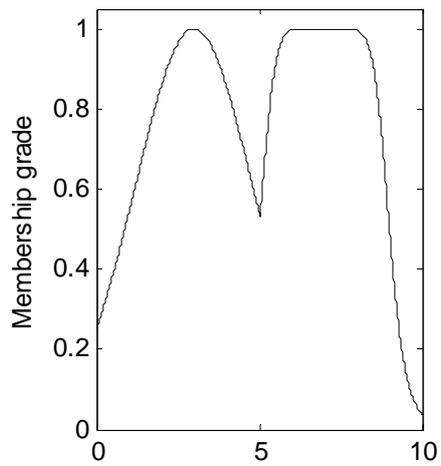
$$A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n = \{((x_1, x_2, \dots, x_n), A_1(x_1) \wedge A_2(x_2) \wedge \dots \wedge A_n(x_n)) \mid \forall x_i \in X_i\} \quad (2.13)$$



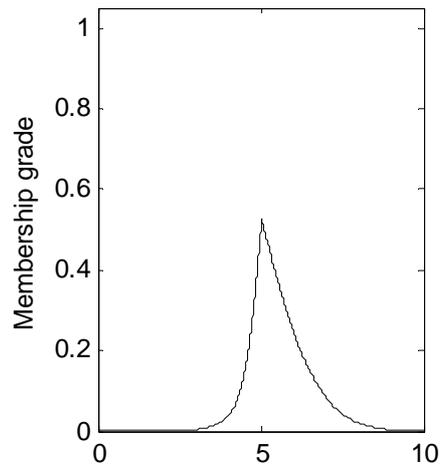
(a) Fuzzy set A and B



(b) Fuzzy \bar{A}



(c) Fuzzy $A \cup B$



(d) Fuzzy $A \cap B$

Fig. 2.4 Standard operations of fuzzy sets

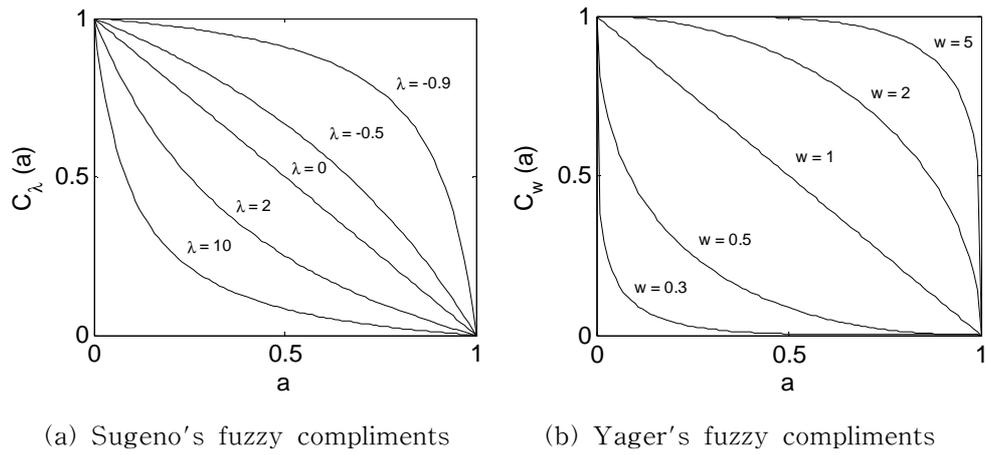


Fig. 2.5 Sugeno and Yager class of fuzzy complements

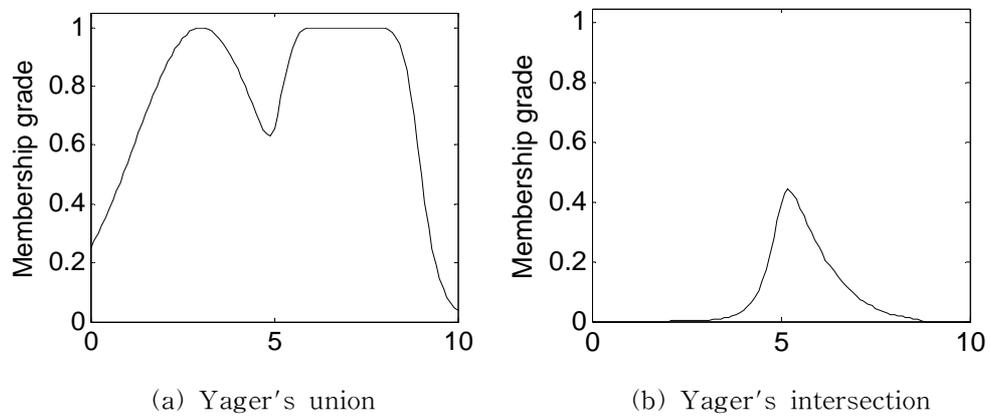


Fig. 2.6 Fuzzy union and intersection of Yager

정의 2.9 (퍼지관계)

전체집합 X_1, X_2, \dots, X_n 내에 있는 퍼지집합 A_1, A_2, \dots, A_n 의 소속함수가 각각 $A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)$ 이고, X_1, X_2, \dots, X_n 의 곱집합이 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 이라면, n 차원의 퍼지관계(Fuzzy relation) R 은 곱집합 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 의 퍼지 부분집합으로서 다음과 같이 표시된다.

$$R = \{(x_1, x_2, \dots, x_n), R(x_1, x_2, \dots, x_n)\} \mid \forall x_i \in X_i\} \quad (2.14)$$

여기서 $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 $A_1(x_1) * A_2(x_2) * \dots * A_n(x_n)$ 또는 $A_1(x_1) \dot{+} A_2(x_2) \dot{+} \dots \dot{+} A_n(x_n)$ 로 R 의 소속함수이고, 기호 “*”는 “t-norm”, “ $\dot{+}$ ”는 “t-conorm”을 나타낸다[60,61].

정의 2.10 (퍼지관계의 합성)

만약 R 과 S 가 각각 $X \times Y$, $Y \times Z$ 에서 정의되는 퍼지관계라면 두 퍼지관계의 합성(Composition) $R \circ S$ 는 다음과 같이 W 로 정의되며 역시 퍼지관계가 된다.

$$W = R \circ S = \{(x, z), W(x, z)\} \mid x \in X, z \in Z\} \quad (2.15)$$

단, $W(x, z) = R(x, y) * S(y, z)$ 또는 $R(x, y) \dot{+} S(y, z)$ 로서 $R \circ S$ 의 소속함수이다. “t-norm”을 sup-min으로 사용하면, $W(x, z) = \bigvee_y \{R(x, y) \wedge S(y, z)\}$ 로 된다.

여기서 \bigvee 는 max, \wedge 는 min을 의미하는 연산자이다.

2.2.2 퍼지로지적 시스템

퍼지로지적 시스템은 퍼지집합 이론, 퍼지 “IF-THEN” 규칙 및 퍼지추론을 기반으로 하는 시스템 표현 기법이다.

일반적으로 퍼지로지적 시스템(Fuzzy logic system)의 기본구조는 Fig. 2.7과 같이 퍼지화부(Fuzzification interface), 지식베이스부(Knowledge base), 퍼지추론부(Fuzzy inference engine) 및 비퍼지화부(Defuzzification interface)의 네 부분으로 이루어져 있으며 각각의 기능 및 특징을 살펴보면 다음과 같다.

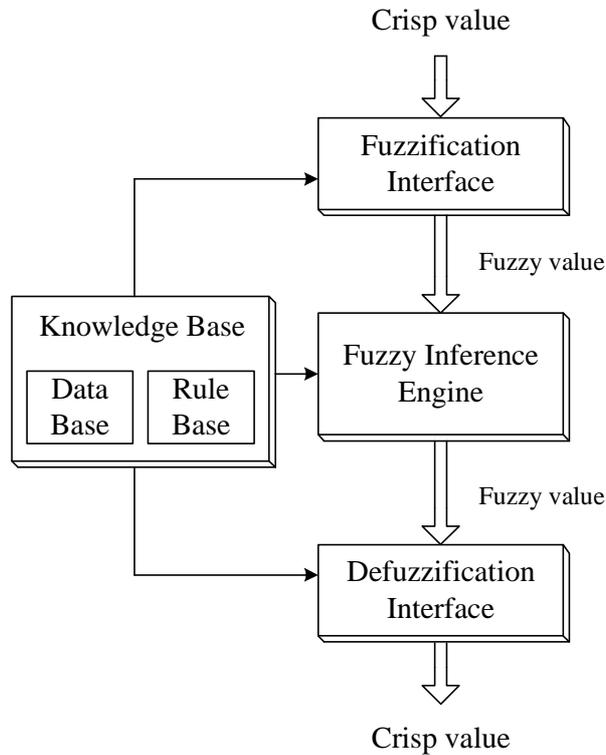


Fig. 2.7 Basic structure of fuzzy logic system

1) 퍼지화부

퍼지화부(Fuzzification interface)는 시스템에서 존재하는 실제 입력 데이터를 받아들여 대응되는 퍼지집합으로 변환하는 부분이다. 즉, 시스템에서 측정된 데이터는 명확한(Crisp) 값이고, 퍼지로지 시스템에서의 데이터 조작은 퍼지집합을 기반으로 이루어지므로 수치적인 입력 값의 퍼지화가 필요하다. 이렇게 크기가 조절된 입력은 PB(Positive big), ZE(Zero), NB(Negative big)등과 같은 퍼지집합의 라벨로 간주된 언어적 값으로 변환된다. 퍼지화 방법으로는 입력 데이터에 잡음이 없을 때 주로 사용하는 싱글톤 퍼지화(Singleton fuzzifier)와 잡음이 포함된 경우에 사용하는 가우시안 퍼지화(Gaussian fuzzifier) 및 삼각형 퍼지화(Triangular fuzzifier)가 있다[62].

2) 지식베이스부

지식베이스부(Knowledge base)는 데이터베이스(Data base)와 규칙베이스(Rule base)로 이루어져 있다. 데이터베이스는 전형적으로 전체집합의 양자화/정규화, 입·출력 공간의 퍼지분할(Fuzzy partition), 규칙에 사용된 소속함수의 선택 등에 대한 정보를 포함하고 있다. 여기서 양자화는 연속적인 전체집합을 컴퓨터 구현에 적합한 이산적인 양으로 이산화하는 것이고, 정규화는 전체집합을 폐구간으로 변환하는 것이며, 퍼지분할은 전체집합에서 정의된 퍼지집합의 수를 결정하는 것이다. 그리고 각 퍼지집합은 수치적인 값으로 변환하기 위해 선정되는 소속함수의 종류와 형태에 따라 그 특성이 주어진다. 주로 사용되는 소속함수는 삼각형, 사다리꼴, 가우스형 및 범종형 등이며, 소속함수의 선택과 그 중첩 정도는 설계자의 선호도 또는 실제적인 상황에 따라 많이 다르다.

규칙베이스는 퍼지 제어규칙에 대한 입·출력 변수의 선택과 언어적인 퍼지 제어규칙을 포함하고 있다. 일반적으로, 전형적인 퍼지제어기의 입·출력 관계는 규칙문장 “IF-THEN”의 집합에 의해 결정되며, 제어규칙의 퍼지조건문은 두 퍼지집합 A와 C간의 관계를 의미하므로 퍼지관계 R로, 또는 퍼지 조건함수의 기호 “ \Rightarrow ”를 사용하여 식(2.16)과 같이 “ $A \Rightarrow C$ ”로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{IF } x \text{ is } A, \text{ THEN } z \text{ is } C \quad \Delta \quad A \Rightarrow C \\ \Delta \quad R \end{aligned} \quad (2.16)$$

여기서 x 와 z 는 언어적 변수이고, A 와 C 는 각각 소속함수가 $A(x)$ 와 $C(z)$ 이며, 전체집합 X 와 Z 내에 정의되는 “Small”, “Big”등과 같은 퍼지집합이다. “ x is A ”를 전건부(전제), “ z is C ”를 후건부(결론)라고 한다. 퍼지규칙의 퍼지 조건문 “ $A \Rightarrow C$ ”를 퍼지관계로 변환하는 방법은 주로 퍼지 conjunction으로 해석하는 방법과 퍼지 disjunction으로 해석하는 방법이 있다[63].

퍼지 제어규칙 중의 문장 접속사 “and”와 “also”에 대한 연산은 대개의 경우 각각 “t-norm”과 “t-conorm” 연산자를 사용한다.

중요한 문제는 이러한 제어규칙을 효율적으로 구하는 방법이며, 다음과 같은 몇 가지 방법이 제안되어 있다.

- (a) 전문가의 경험이나 제어공학자의 지식을 이용하는 방법[64]
- (b) 제어대상의 퍼지모델을 이용하는 방법[65]
- (c) 제어규칙을 수정할 수 있는 학습기능을 부여하는 방법[66]
- (d) 숙련된 조작자의 제어동작을 모방하는 방법[17]

3) 퍼지추론부

퍼지추론부(Fuzzy inference engine)는 인간의 추론형태를 흉내 내는 퍼지로지 시스템의 핵심 부분으로, 퍼지조건과 합성규칙의 추론[67]을 사용하여 규칙베이스에 있는 퍼지 제어규칙을 이용하여 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론하는 기능을 가지고 있다.

정의 2.11 (합성규칙의 근사추론)

R 이 X 내에 있는 퍼지집합 A 와 Z 내에 있는 퍼지집합 C 와의 퍼지관계이고, A' 가 X 내에 있는 퍼지집합이라면 다음과 같이 “sup-*” 합성규칙 추론이 주어진다.

$$C' = A' \circ R = \{(z, C'(z)) \mid z \in Z\}$$

$$\text{단, } C'(z) = \sup_{x \in X} \{A'(x) * R(x, z)\} \quad (2.17)$$

식(2.17)에서 기호 “ \circ ”는 sup-* 합성연산자를 나타내고, 실제 응용 분야에서

“*”는 보통 min 또는 product 연산자로 사용되는 sup-min과 sup-product 연산자이다[62].

다입력-단일출력(Multiple input single output ; MISO) 퍼지로지 시스템의 경우에 n 개의 전건부로 이루어진 r 개의 퍼지 “IF-THEN” 규칙을 가진 퍼지 제어 규칙 R^i 는 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$R^i: \mathbf{IF} \ x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } \cdots x_j \text{ is } A_j^i \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i \\ \mathbf{THEN} \ z \text{ is } C^i \quad \mathbf{Also}, \quad i \in I, j \in J \quad (2.18)$$

여기서 $I = \{1, 2, \dots, r\}$, $J = \{1, 2, \dots, n\}$ 이고, $R^i (i \in I)$ 는 i 번째의 퍼지 제어규칙을 나타내며, r 은 퍼지 제어규칙의 수이다. 그리고 문장 연결자 “Also”는 각 규칙들을 연결한다. $x_j (j \in J)$ 와 z 는 각각 논의영역 $X_j (j \in J)$ 및 Z 내에 있는 값을 취하는 언어적 변수이며, $A_j^i (i \in I, j \in J)$ 및 $C^i (i \in I)$ 는 소속함수의 종류와 형태에 따라서 특성이 주어지는 언어적 변수의 퍼지집합이다.

다음은 퍼지로지 시스템에서 자주 사용되는 몇 가지 중요한 추론법에 대해서 설명한다.

w 추론법 1 :

n개의 퍼지 싱글톤 입력 $A'_1 = x_{10}, A'_2 = x_{20}, \dots, A'_n = x_{n0}$ 가 주어질 때, 만약 Mamdani[68-70]의 min 연산과 sup-min 합성규칙을 사용하면 C' 의 소속함수 $C'(z)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C'(z) &= \bigcup_{i \in I} \{ [A_1^i(x_{10}) \Rightarrow C^i(z)] \wedge \dots \wedge [A_n^i(x_{n0}) \Rightarrow C^i(z)] \} \\
 &= \bigvee_{i \in I} \{ [A_1^i(x_{10}) \wedge \dots \wedge A_n^i(x_{n0})] \wedge C^i(z) \} \quad (2.19) \\
 &= \bigvee_{i \in I} \{ \rho^i \wedge C^i(z) \}
 \end{aligned}$$

여기서 규칙의 점호강도 $\rho^i = A_1^i(x_{10}) \wedge A_2^i(x_{20}) \wedge \dots \wedge A_n^i(x_{n0})$ 는 출력에 대한 i번째 규칙의 적합도를 나타낸다.

Fig. 2.8은 두개의 명확한 입력 x_{10} 와 x_{20} 이 주어지고, 퍼지-AND와 퍼지-OR 연산자에 대하여 각각 min 연산과 max 연산을 사용하는 max-min 합성을 적용할 때, 추론법 1에 대한 2규칙 퍼지추론 시스템이 어떻게 퍼지추론 결과 C' 를 결정하는지 도식적으로 보여주고 있다.

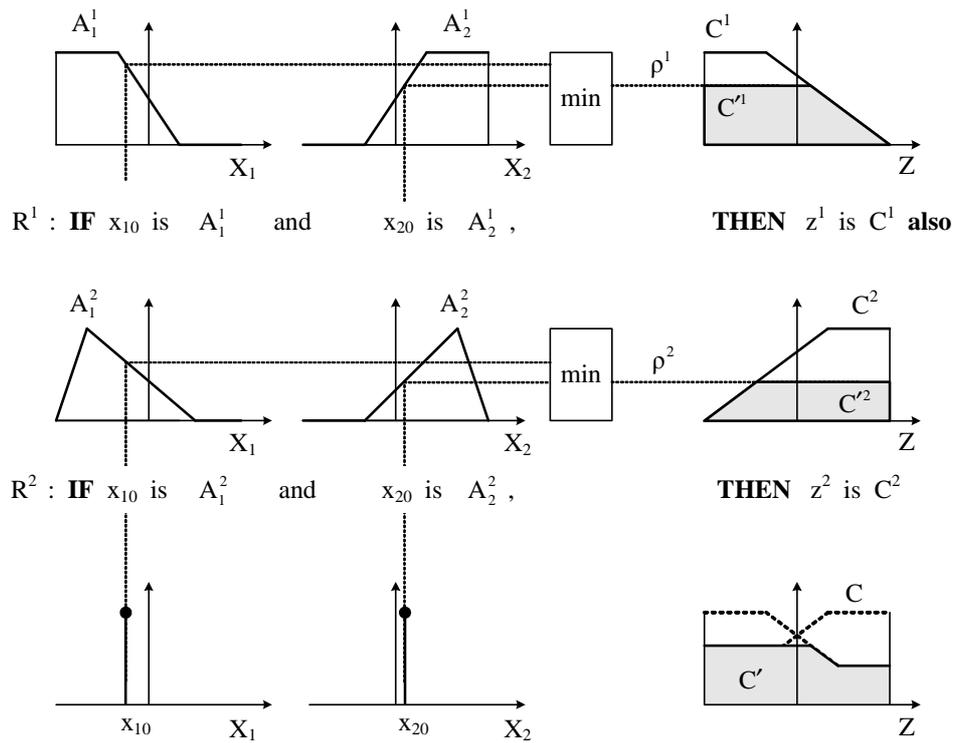


Fig. 2.8 Fuzzy inference process of method 1

w 추론법 2 :

n개의 퍼지 싱글톤 입력 $A'_1 = x_{10}, A'_2 = x_{20}, \dots, A'_n = x_{n0}$ 가 있을 때, 만약 Larsen[71]의 product 연산과 sup-product 합성규칙을 사용하면 C' 의 소속함수 $C'(z)$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$C'(z) = \bigvee_{i \in I} \{ \rho^i \cdot C^i(z) \} \quad (2.20)$$

여기서 규칙의 강도 $\rho^i = A_1^i(x_{10}) \cdot A_2^i(x_{20}) \cdot \dots \cdot A_n^i(x_{n0})$ 는 출력에 대한 i번째 규칙의 적합도를 나타낸다. Fig. 2.9는 두개의 명확한 입력 x_{10} 와 x_{20} 이 주어지고, 퍼지-AND와 퍼지-OR 연산자에 대하여 각각 대수곱(Product) 연산과 max 연산을 사용하는 max-product 합성을 적용할 때 추론법 2에 대한 2규칙 퍼지추론 시스템이 퍼지추론 결과 C' 를 어떻게 결정하는지 보여준다. max-product 합성을 사용하므로 추론된 각 규칙의 출력은 비율이 감축된 퍼지집합으로 된다.

만약 퍼지-AND와 퍼지-OR 연산자의 선택을 다르게 하면 다른 변화도 가능하다. 대표적인 방법으로 AND 와 OR 연산을 각각 product와 sum으로 선택하는 product-sum-gravity 추론법이 있으며, 이는 추론법 3에서 살펴본다.

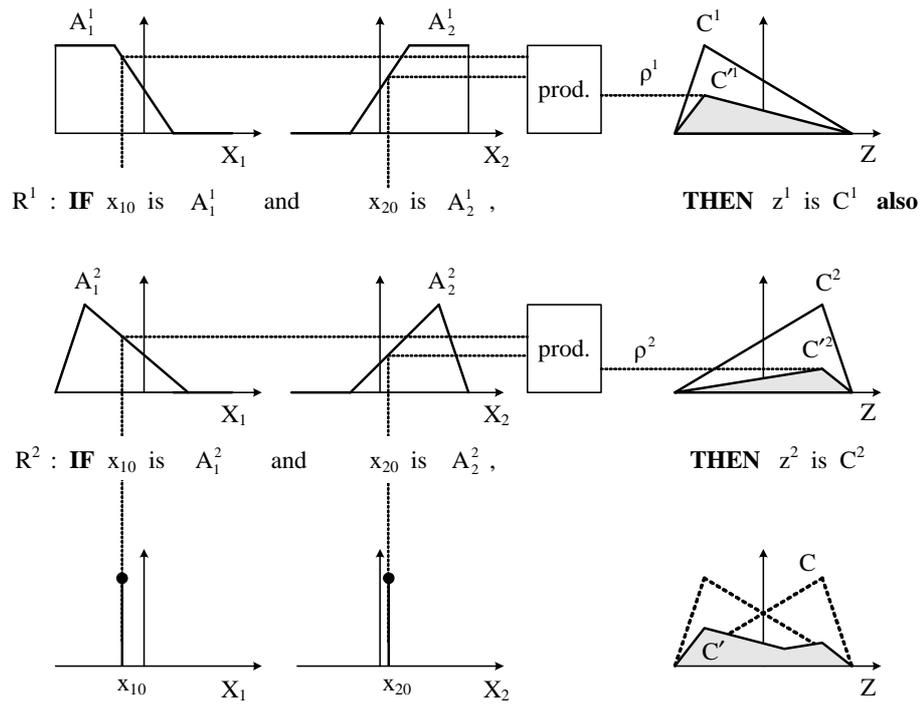


Fig. 2.9 Fuzzy inference process of method 2

w 추론법 3 :

추론법 3은 Mizmotto등[72-75]에 의해 제안된 방법으로 product-sum-gravity 방법으로도 불리며, 각 퍼지 “IF-THEN” 규칙의 후건부는 추론법 1, 2와 마찬가지로 퍼지집합으로 표현되어 진다.

만약 n개의 퍼지 싱글톤 입력 $A'_1 = x_{10}, A'_2 = x_{20}, \dots, A'_n = x_{n0}$ 가 주어질 때, Mizmotto의 product 연산과 sum 합성규칙을 사용하면 C' 의 소속함수 $C'(z)$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$C'(z) = \sum_{i=1}^n \{\rho^i \cdot C^i(z)\} \quad (2.21)$$

여기서 규칙의 강도 $\rho^i = A_1^i(x_{10}) \cdot A_2^i(x_{20}) \cdot \dots \cdot A_n^i(x_{n0})$ 는 출력에 대한 i번째 규칙의 적합도를 나타낸다.

이 추론법에서 product 연산을 min 연산으로, sum 연산을 max 연산으로 바꾸면 추론법 1의 Mamdani 추론법과 동일한 것이 된다. Fig. 2.10은 두개의 명확한 입력 x_{10} 와 x_{20} 이 주어지고, 퍼지-AND와 퍼지-OR 연산자에 대하여 각각 Product 연산과 sum 연산을 사용하는 product-sum 합성을 적용할 때 추론법 3에 대한 2규칙 퍼지추론 시스템이 어떻게 퍼지추론 결과 C' 를 결정하는지를 보여 준다.

이 추론법에서 만약 후건부가 퍼지 싱글톤으로 정의되어 있으면 연산시간의 향상을 기대할 수 있는 simplified product-sum-gravity 추론법[76,77]이 되며, Fig. 2.11에 추론 방식을 도식적으로 나타내었다. 이 추론 결과는 product-sum-gravity 추론 결과와 서로 동가이며, 선형적인 추론결과를 보인다.

지금까지 설명한 추론법 1과 추론법 2 그리고 추론법 3은 출력이 퍼지집합이므로 여러 가지 비퍼지화 방법 중의 하나로 비퍼지화 되어야 실제 시스템에 적용 가능한 데이터가 된다는 것을 유의해야 한다(추론법 3은 비퍼지화 방법 중에서 무게중심법을 사용하는 것으로 정의되어 있다).

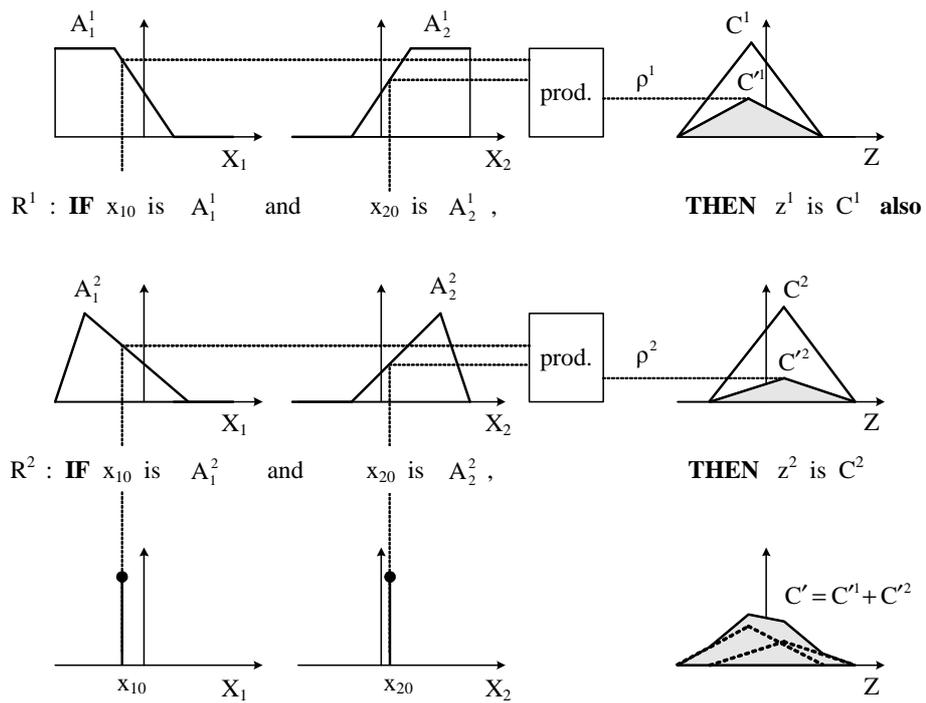


Fig. 2.10 Fuzzy inference process of method 3

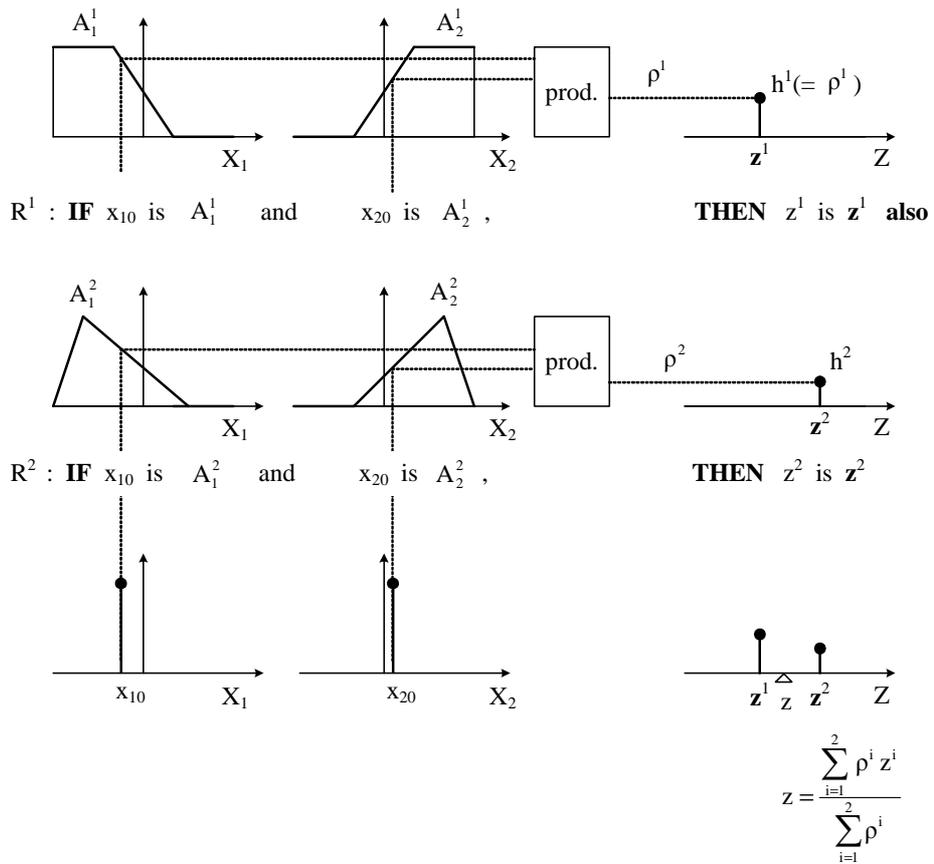


Fig. 2.11 Fuzzy inference process of simplified product-sum-gravity method

4) 비퍼지화부

비퍼지화부(Defuzzification interface)는 추론엔진에서 추론한 퍼지출력의 결과를 명확한 값으로 변환하는 부분이다. 추론법 1과 추론법 2 그리고 추론법 3을 사용하는 경우 최종적으로 추론된 결과 C' 는 퍼지집합이다. 이러한 퍼지출력은 실제 시스템에 사용하기에는 적합하지 않으므로 비퍼지화를 통해 명확한 출력으로 변환시켜야 한다.

퍼지출력에 대한 비퍼지화 방법에는 여러가지 방법이 있으며[79], 일반적으로 널리 사용되는 방법은 무게중심법(Center of gravity ; COG)과 최대평균법(Mean of maximum ; MOM)이다.

무게중심법은 최종 퍼지집합의 면적중심에 해당하는 z 를 명확한 출력으로 환산하며, 식(2.22)와 같이 정의된다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z^i \cdot C'(z^i)}{\sum_{i=1}^n C'(z^i)} \quad (2.22)$$

여기서 $C'(z^i)(1 \leq i \leq n)$ 는 지지값(Support value) z^i 의 소속값이고, n 은 출력변수의 양자화 레벨의 개수이다.

최대평균법은 식(2.23)처럼 최대 소속정도를 나타내는 요소의 값을 평균하여 명확한 출력을 구하는 방법이다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z^i}{n} \quad (2.23)$$

여기서 $z^i(1 \leq i \leq n)$ 는 최종적으로 얻어진 퍼지추론 결과에서 최대 소속정도를 주는 지지값(Support value)이고, n 은 이러한 지지값의 갯수이다.

이 이외에도 면적이분법(Bisector of area ; BOA), 최대법(Largest of maximum ; LOM) 및 최소법(Smallest of maximum ; SOM) 등이 있으며, Fig. 2.12는 몇 가지의 비퍼지화 방법을 도시적으로 나타낸 것이다.

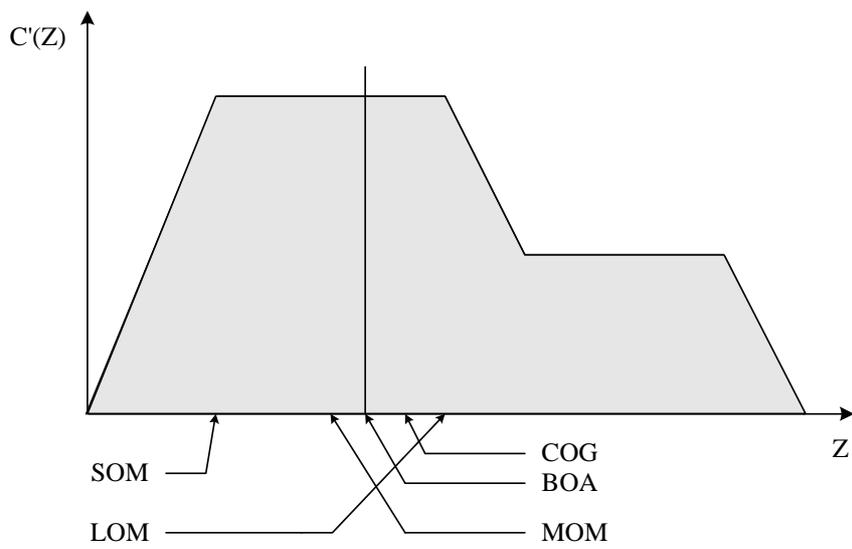


Fig. 2.12 Various schemes of defuzzification

2.2.3 추론법의 비교

지금까지 설명한 퍼지로지 시스템에서 가장 흔하게 사용하는 추론법은 추론법 1과 같은 Mamdani의 min-max 추론이다. 이 방법이 모든 퍼지로지 시스템에서 최선의 방법이라고 할 수는 없지만, 대부분의 경우에 이 방법을 채택하고 있다. 그러나 근래에 다른 추론 방법들이 생겨나면서 min-max 이외의 방법을 사용하는 경우도 증가하는 추세이다.

여기서는 앞에서 설명한 추론법 중에서 비선형 추론결과를 보이는 추론법 1과 선형 추론결과를 보이는 추론법 3, simplified product-sum-gravity 추론법을 살펴보고자 한다.

추론법 1과 추론법 3 그리고 simplified product-sum-gravity 추론법의 추론결과를 보간(Interpolation)하여 2차원 평면으로 나타내면 Fig. 2.13과 같다.

그림에서 알 수 있듯이 추론법 1은 퍼지 추론 과정을 거치면서 비선형성이 발생하고 있지만 추론법 3과 simplified product-sum-gravity 추론법은 선형 추론이 일어나고 있음을 알 수 있다. 최근 이와 같은 추론특성을 이용하여 선형 PID 제어기와 연관한 연구들이 발표되고 있다[74,75,79].

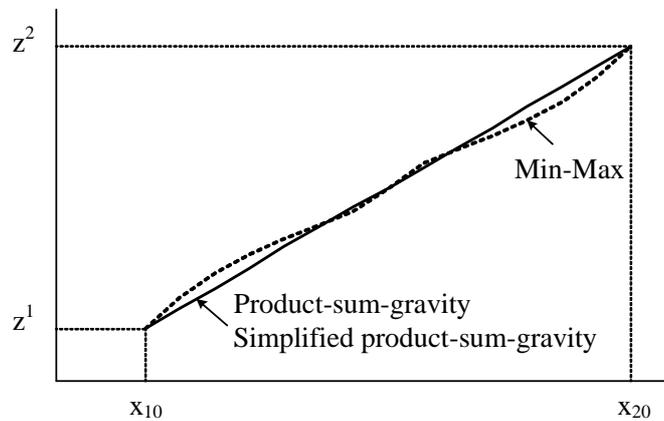


Fig. 2.13 Interpolation results of some inference methods

2.3 T-S 퍼지모델

컨테이너 크레인은 서론에서 설명한 대로 매 작업 사이클마다 컨테이너 질량이 다르고, 작업 동안에는 호이스트용 와이어로프 길이가 변화하는 시스템이다. 이것은 파라미터 변화에 대응할 수 있는 제어가 필요한 이유를 제공한다.

이를 위해 본 논문의 제5장에서는 T-S 퍼지모델을 이용한 퍼지제어를 제안하여 파라미터 변화에 대응할 수 있는 퍼지제어를 개발할 것이다. 여기서는 우선 제안하고자 하는 퍼지제어의 이론적 배경이 되는 T-S 퍼지모델에 대해 살펴보기로 한다.

2.3.1 Takagi-Sugeno 추론법

T-S 퍼지모델은 Takagi-Sugeno 등이 제안한 추론법[17]의 확장으로 볼 수 있는데 먼저 이들이 제안한 추론법을 살펴보고, 다음으로 T-S 퍼지모델에 대해 설명한다.

2.2절에서 설명한 추론법 1은 전건부 변수가 증가하면 관계의 차원이 지수적으로 증가하여 계산량이 증가하고, 전건부 변수와 후건부 변수 사이의 인과관계를 얻는 것이 매우 어려워진다. Takagi-Sugeno 추론법은 이에 대한 하나의 대안으로 제안되었으며, 다음과 같이 후건부에 함수를 사용하는 퍼지규칙으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} R^i : & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } \cdots \text{ and } x_j \text{ is } A_j^i \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^i \\ & \text{THEN } z^i = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \end{aligned} \quad (2.24)$$

여기서 $R^i (i = 1, 2, \dots, r)$ 는 i 번째 제어규칙을 의미하고, r 은 규칙의 수이다. $A_j^i (j = 1, 2, \dots, n)$ 는 전건부의 퍼지집합이고, $z^i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 후건부로서 입력변수의 함수이다. $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 규칙의 전건부에 의해 지정된 퍼지영역 내에서 시스템의 출력을 적절히 기술할 수 있는 임의의 함수이다.

Fig. 2.14는 후건부가 상수인 경우에 대한 2규칙의 퍼지추론 과정을 나타낸다. 각 규칙은 명확한 출력을 가지기 때문에 전체 출력은 가중평균(Weighted

average)을 통해 구해지고, 이와 같이 비퍼지화의 과정이 없어 시간이 절약된다. 가중평균 연산자는 특히 퍼지추론 시스템을 훈련하는데 있어서 계산량을 더욱 줄이기 위해서 가중합 연산자($z = \rho^1 z^1 + \rho^2 z^2$)로 바꿀 수도 있다. 그러나 이러한 간략화는 점호강도의 합이 1에 가깝지 않으면 소속함수의 언어적 의미를 상실할 수 있으므로 유의해야 한다.

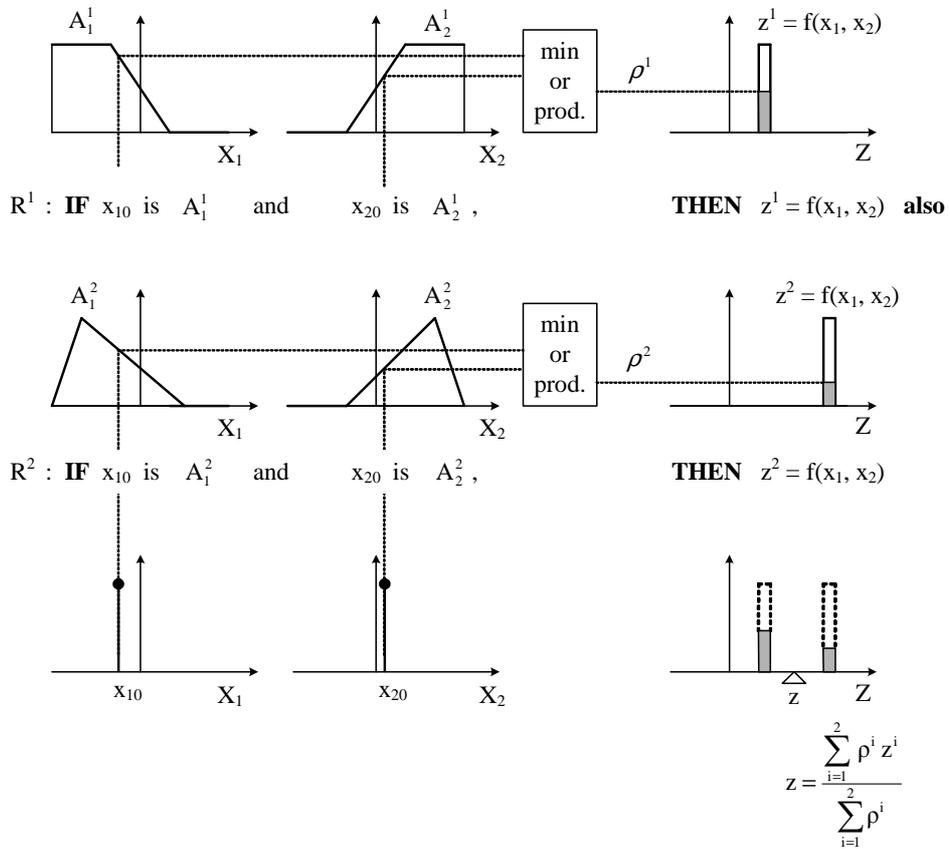


Fig. 2.14 Fuzzy inference process of Takagi-Sugeno method

2.3.2 T-S 퍼지모델

많은 실제적인 문제에서 인간의 전문적인 지식은 “IF-THEN” 규칙을 사용하여 퍼지 시스템의 모델을 조합하는 언어적인 묘사가 가능한데, 여기서는 본 논문에서 다루고자 하는 T-S 퍼지모델에 대해 살펴본다.

T-S 퍼지모델은 Takagi-Sugeno 추론법[17]의 특별한 형태로서 식(2.25)와 같은 1차항의 결합으로 시스템을 묘사하며, 암시된 퍼지규칙이 적더라도 고차의 비선형 함수를 잘 모델링할 수 있는 장점을 가진다[17,80-82].

$$R^i : \mathbf{IF} \ x_1 \text{ is } M_1^i \text{ and } \cdots \ x_j \text{ is } M_j^i \text{ and } \cdots \ x_n \text{ is } M_n^i \quad (2.25)$$

$$\mathbf{THEN} \ y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \cdots + a_j^i x_j + \cdots + a_n^i x_n, \quad \text{for } i=1,2,\dots,r$$

여기서 $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n] \in \mathbf{R}^n$ 는 입력벡터, R^i 는 i 번째 퍼지규칙, r 은 퍼지 규칙의 개수, a_j^i 는 후건부의 상수 파라미터, M_j^i 는 전건부의 퍼지집합을 의미한다.

주어진 입력 \mathbf{x} 에 대해 퍼지모델의 최종 출력은 y^i 를 가중평균하여 구할 수 있다.

결국 식(2.25)로 나타나는 퍼지모델의 물리적 의미는 입력벡터 \mathbf{x} 가 규칙의 전건부에 의해 특성이 결정되어진 퍼지 부공간에 제한될 때, 퍼지 시스템의 출력은 후건부 함수로부터 형성된 각각의 출력을 가중평균하여 구해진다는 것을 의미한다.

Fig. 2.15는 이와 같은 T-S 퍼지모델의 기본 개념을 도식화한 것으로 T-S 퍼지모델은 몇몇 선형시스템의 조합으로 비선형시스템을 잘 근사화 할 수 있음을 보여준다.

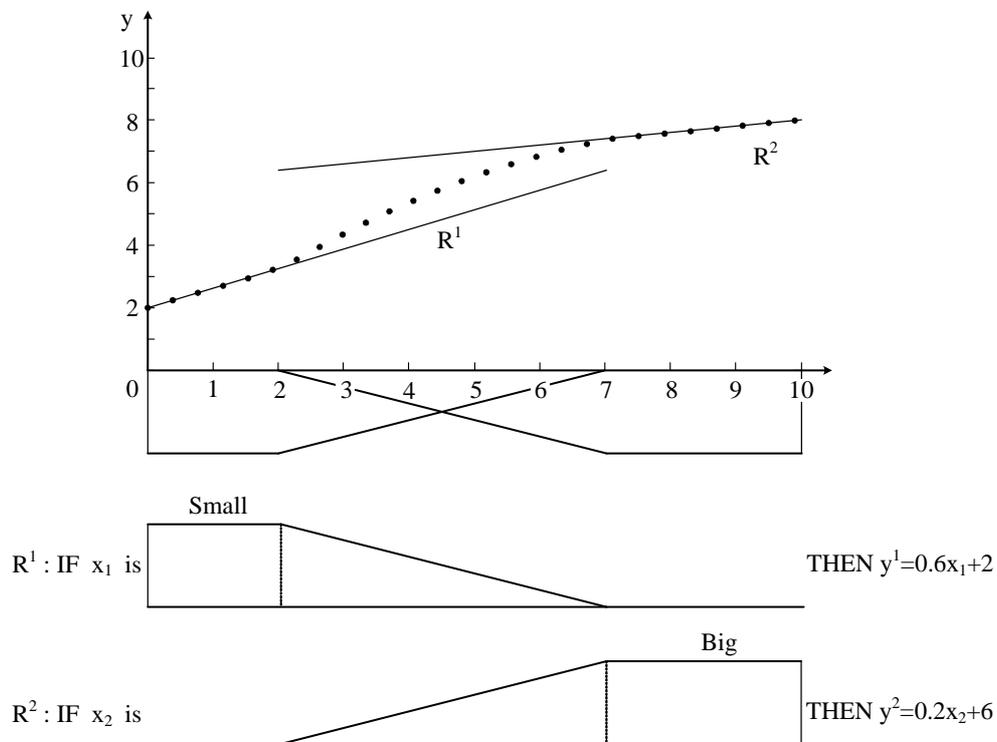


Fig. 2.15 Example of Takagi-Sugeno fuzzy model

식(2.25)로 표현되는 T-S 퍼지모델은 후건부가 입력변수의 함수이다. 이를 동적 시스템의 관점에서 다시 표현하면 식(2.26)과 같이 비선형시스템을 몇 개의 선형모델로 기술하는 것이 가능하다.

시스템 규칙:

$R^i : \mathbf{IF} \ x_1 \text{ is } M_1^i \text{ and } \dots \ x_j \text{ is } M_j^i \text{ and } \dots \ x_n \text{ is } M_n^i$

THEN $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u}$, for $i = 1, 2, \dots, r$ (2.26)

여기서 x_j 와 M_j^i 는 각각 전건부의 변수와 퍼지집합이고, r 은 “IF-THEN” 규칙의 수이다. $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 는 상태벡터, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 는 입력벡터이고, $\mathbf{A}^i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}^i \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 을 만족하는 행렬이다. 특히 후건부에 $\mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u}$ 로 표현된 선형모델을 서브시스템(subsystem)이라고도 부르며, 흔히 서브시스템은 비선형시스템의 여러 동작점에서 선형화하여 얻어진다[17,80-82].

만약 입출력 쌍 (\mathbf{x}, \mathbf{u}) 이 주어지면 최종적인 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 추론된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\sum_{i=1}^r \rho^i \{ \mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u} \}}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (2.27)$$

여기서 \mathbf{x} 와 ρ^i 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2.28)$$

$$\rho^i = \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j) = \prod_{j=1}^n \mu_j^i, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, r \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \rho^i > 0 \\ \rho^i \geq 0 \end{cases}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, r \quad (2.30)$$

식(2.29)에서 μ_j^i 는 M_j^i 에 대한 소속함수 x_j 의 소속정도이다. ξ^i 를 다음과 같이 정의하면

$$\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (2.31)$$

식(2.27)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^r \xi^i \{ \mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u} \} \quad (2.32)$$

여기서 ξ^i 는 식(2.30)과 식(2.31)로부터 다음의 관계를 생각할 수 있다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \xi^i = 1 \\ \xi^i \geq 0 \end{cases}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, r \quad (2.33)$$

제 3 장 컨테이너 크레인의 모델링

3.1 컨테이너 크레인의 개요

컨테이너 크레인은 컨테이너 터미널 에이프런(Apron)의 레일 위에 설치되어 선박과 육상 사이에서 적하 및 양하를 담당하는 핵심장비이다. 이는 취급화물의 종류, 형태, 설치위치 등에 따라 갠트리 크레인(Gantry crane), RMQC(Rail mounted quay side crane)등으로 호칭되고 있다.

컨테이너 크레인은 Fig. 3.1과 같이 트롤리 거더와 붐 위에 설치된 레일을 따라 움직이는 트롤리가 설치되어 있으며, 와이어로프에 의해 트롤리가 움직이는 와이어로프 트롤리 형식이 많이 사용된다.

컨테이너 크레인은 형태와 크기별로 구분될 수 있는데 형태별로는 A형 구조(A-frame type), 수정된 A형 구조(Modified A-frame type), 2중 중첩식 붐 A형 구조(A-frame with articulated boom type), 롱 백리치 구조(Long back reach type), 롱 스팬 구조(Long span type), 로우 프로파일 구조(Low profile type) 등이 있으며, 크기별로는 피더 형식(Feeder type), 파나마스 형식(Panamax type), 포스트-파나마스 형식(Post-panamax type) 등이 있다. 현재 국내의 항만에서는 수정된 A형 구조와 포스트-파나마스 형식의 컨테이너 크레인을 가장 많이 사용하고 있다.

컨테이너 크레인의 동작은 컨테이너가 위 아래로 이동하는 호이스트 동작, 바다측이나 육지 측으로 이동하는 트롤리 동작, 크레인 전체가 좌우로 움직이는 갠트리 동작, 붐 상하 이동의 붐 호이스트 동작으로 구분된다. 이러한 네 가지 동작 중 작업의 시작과 종료에서는 갠트리 및 붐 호이스트 동작, 컨테이너 선박의 홀드 사이를 이동시에는 갠트리 동작, 특정 홀드에서의 작업은 호이스트 동작과 트롤리 동작의 반복으로 이루어진다.

트롤리의 전진 또는 후진(바다측 또는 육지측으로 이동)은 기계실에 설치된 트롤리용 구동 모터에 전압을 인가하여 모터를 정·역방향으로 작동시킴으로써 가능하다. 이때 발생한 모터의 토크는 축단에 설치되어 있는 기어박스를 통하여 트롤리용 와이어 드럼을 회전시키고, 이 드럼에 감겨 있는 와이어로프가 트롤리의 양쪽으로 연결되어 와이어로프의 어느 한쪽을 당김으로써 트롤리의 이동이 이루어진다. 한편, 호이스트용 구동 모터는 기계실의 와이어 드럼에서 거더 후부를

거처 트롤리의 시브(Sheave)를 통과하여 스프레더와 수직 하방으로 연결되어 있는 호이스트용 와이어로프를 감거나 풀어서 스프레더를 위 아래로 움직이게 한다.

컨테이너 크레인은 다음과 같은 장치들로 구성되어 있다. 크레인이 계류 중에 바람에 밀리거나 넘어지지 않도록 하기 위한 앵커(Anchor) 및 타이다운(Tie down) 장치, 작업 중에 바람에 밀리지 않도록 하기 위한 레일 클램프(Rail clamp) 등의 지상 안전장치가 있다. 또한 트롤리용 와이어로프 자중에 의한 처짐 현상으로 인한 트롤리의 동작지연 방지를 위해 트롤리용 와이어로프에 긴장을 주는 로프 텐션너(Rope tensioner)가 있으며, 이 장치는 와이어로프 트롤리 형식에만 사용된다. 그리고 컨테이너 선박이나 야드에 기울어지거나 비틀어져 놓여 있는 컨테이너를 바로 잡기 위해서 그 각도에 맞게 스프레더를 기울이는 틸팅 장치(Tilting device)가 있으며 틸팅 동작의 종류는 트림(Trim), 스큐(Skew), 리스트(List), 로테이팅(Rotating), 앤티-스내깅(Anti-snagging) 등이 있다. 마지막으로 붐을 완전히 올렸을 때 붐을 크레인 구조물에 고정시켜 붐용 와이어로프에 긴장을 주지 않게 하기 위한 붐 랫치(Boom latch) 장치가 있다.

컨테이너 크레인의 두드러진 특징은 전문적으로 컨테이너를 인양할 수 있도록 특수 구조로 설계된 스프레더에 있다. 스프레더의 세부동은 컨테이너의 코너 캐스팅(Corner casting)에 스프레더의 콘(Cone)을 끼워 90°로 회전시켜 잠그고 풀어주는 트위스트 록(Twist lock) 기능, 콘이 코너 캐스팅에 잘 들어가도록 안내판 역할을 하는 플리퍼(Flipper) 기능, 컨테이너의 특정 길이(20, 40피트)에 맞춰 취급할 수 있도록 스프레더를 신축시키는 텔레스코픽(Telescopic) 기능 등이 있다. 스프레더는 수동 트위스트 록에 의해 헤드블럭(Head block) 장치의 하부에 연결되어 있으며 스프레더의 세부동작은 헤드블럭에 설치된 유압장치에 의해 작동된다.

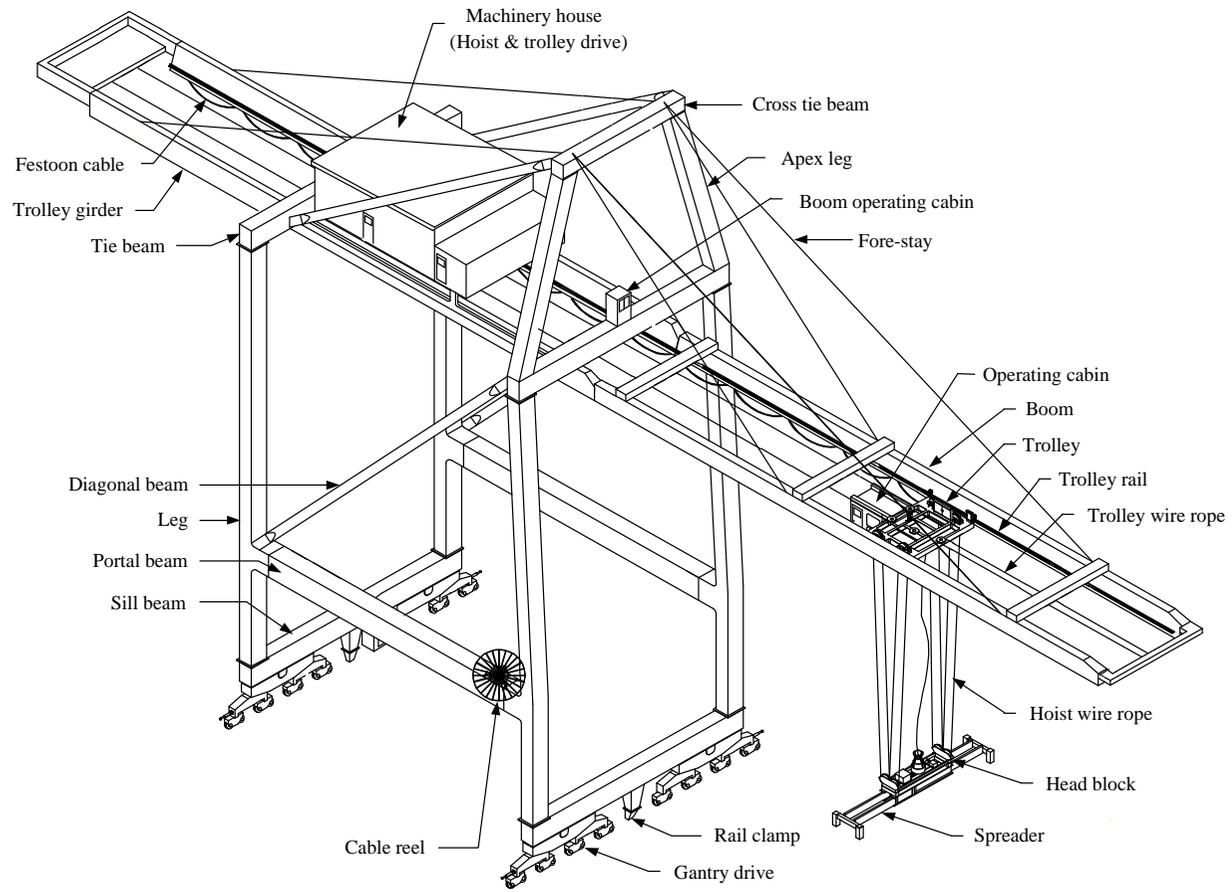


Fig. 3.1 Structure of a container crane system

컨테이너 크레인의 작업은 트롤리와 호이스트 동작으로 이루어지는 홀드단위 작업이 대부분이기 때문에 컨테이너 화물의 이송 작업은 대부분 평면 운동으로 볼 수 있고, Fig. 3.2에서와 같이 적하나 양하 시 “ \cap ” 또는 “ \cup ”의 형태를 이룬다.

컨테이너 크레인의 작업을 세분하면 스프레더가 운반할 컨테이너를 집는 동작(Picking), 컨테이너를 적정 높이로 들어올리는 호이스트 업(Hoist up) 동작, 들어 올린 컨테이너를 목표 위치까지 이동시키는 트롤리(Trolley) 동작, 컨테이너를 원하는 지점까지 내리는 호이스트 다운(Hoist down) 동작, 컨테이너를 제 위치에 놓는 위치선정(Placing) 등의 다섯 가지로 나눌 수 있다. 일반적인 컨테이너의 운동패턴은 호이스트 업 동작이 이루어진 후 얼마 동안 트롤리 가속이 이루어지다가 등속운동을 하고, 목표위치에 가까워지면 감속운동을 하면서 호이스트 다운 동작으로 최종 목표위치에 도달하게 된다. 보통 운동패턴의 대부분은 호이스트와 트롤리 동작이 동시에 이루어지고 있기 때문에 트롤리 위치변경과 함께 호이스트용 와이어로프의 길이도 변화한다. 특히 목표위치 근처에서는 컨테이너를 내려놓기 위해 와이어로프 길이가 비교적 심하게 변화하기 때문에 와이어로프의 길이 변화에 대해 대응할 수 있는 제어기 설계 기법이 필요하다.

작업의 효율성과 제어의 측면에서 살펴보면 가속 또는 등속 구간에서의 컨테이너 흔들림은 크게 문제가 되지 않고, 트롤리가 목표위치에 도달한 시점에서 컨테이너의 흔들림을 단시간에 제거하여 트롤리의 전·후진이 발생하지 않는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 일반적으로 컨테이너가 선박 홀드(Hold)의 셀 가이드(Cell guide)에 원활하게 들어가거나 트레일러 새시(Trailer chassis) 위에 안전하게 얹히거나 스프레더의 트윈스트 록이 컨테이너의 코너 캐스팅에 무리 없이 들어가기 위해서는 컨테이너나 스프레더의 흔들림 폭이 가능한 한 작아야 하기 때문이다. 만약 흔들림이 그면 외부 물체와 충돌로 사고의 우려가 높고 화물을 원하는 지점에 정확하게 위치시키지 못하게 된다.

컨테이너 크레인의 동작에 따른 최고 이동속도는 호이스트 동작의 경우 90 [m/min] (정격하중일 때), 트롤리 동작의 경우는 220 [m/min], 갠트리 동작의 경우는 45 [m/min]이다. 호이스트 동작의 경우에는 컨테이너 정격하중 40.6톤에 대한 상용 모터의 용량에 한계가 있고, 트롤리 동작의 경우에는 페스톤 케이블(Festoon cable)의 이동속도가 제한되고, 갠트리 동작의 경우에는 크레인 자체 중량으로 인한 큰 관성력 때문에 위에서 설명한 최고 이동속도에서 더 이상 개선되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 컨테이너 크레인의 작업효율을 높일 수 있는 방법은 호이스트 및 트롤리 동작의 최고 이동속도를 높이는 것과 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 컨테이너의 흔들림을 짧은 시간 내에 제어하는 방법을 생각할 수 있으나 전자의 방법은 앞에서 설명한대로 한계가 있기 때문에 현재는 후자의 방법으로 작업효율을 개선하려는 경향이 많아지고 있다.

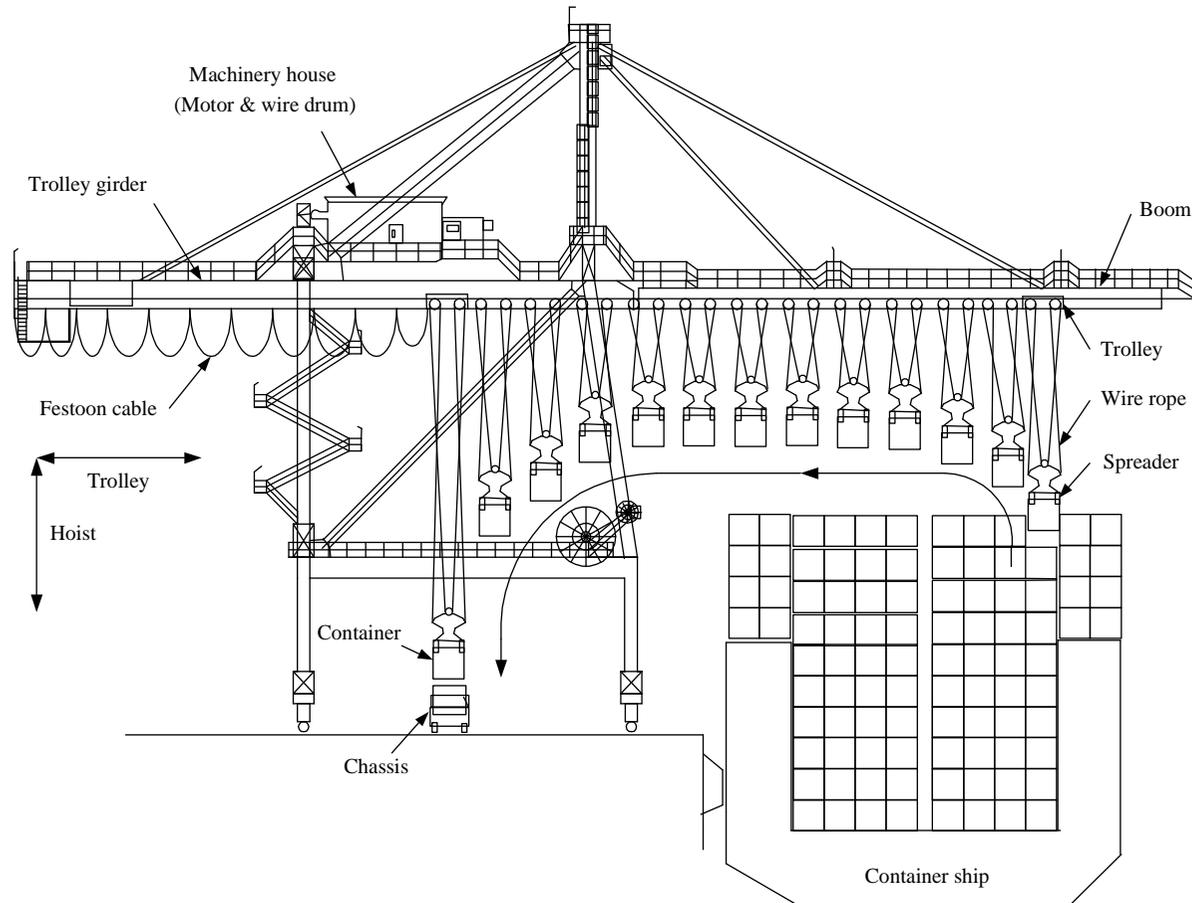


Fig. 3.2 Working cycle of a container crane system

3.2 컨테이너 크레인의 수학적 모델링

컨테이너 크레인의 수학적 모델을 얻는 연구는 여러 문헌[1,10]에서 찾아볼 수 있다. 본 논문에서는 라그랑지(Lagrange) 운동방정식을 이용해서 모델을 얻기로 한다.

라그랑지 방정식은 기계시스템의 해석에 있어서 뉴턴(Newton)의 운동방정식과 더불어 잘 알려진 모델링 방법 중의 하나이다. 라그랑지 방식의 이점은 적용하고자 하는 문제에 대하여 그 운동을 가장 편리하게 표시할 수 있는 좌표계를 사용할 수 있다는 것이다. 다만 이 경우 그 좌표계에 구하는 좌표들 값을 지정하면 그 역학계의 각 부분 위치가 완전히 결정되어야 한다는 가정이 따른다. 이것은 다루는 역학계가 가지고 있는 자유도 하나하나에 대하여 각각 1개씩의 좌표가 마련되어야 한다는 것을 의미하고, 이 같은 조건을 홀로노믹(Holonomic)조건이라 한다.

컨테이너 크레인의 제어를 위한 시스템은 크게 트롤리, 컨테이너, 트롤리 구동 모터로 구분할 수 있으므로 여기서는 이에 대한 수학적 모델을 구한다.

3.2.1 트롤리와 컨테이너

Fig. 3.3은 본 논문에서 제어대상으로 고려하는 컨테이너 크레인 시스템의 동역학적 절대 직교 좌표계를 단순화하여 정의한 것이고, 이 좌표로부터 운동방정식을 유도하기로 한다. 이 시스템에서 α 는 호이스트용 와이어로프의 수직에 대한 각도로서 시계 방향이 양의 각이며, $\dot{\alpha}$ 는 각속도, x 는 트롤리의 수평방향 위치, \dot{x} 는 트롤리의 수평방향 속도, m 은 컨테이너의 질량, M 은 구동부를 포함한 트롤리의 질량, ℓ 은 트롤리에서 컨테이너 중심까지의 거리, g 는 중력가속도, F 는 트롤리에 가해지는 힘이다.

우선 컨테이너의 중심좌표 (x_0, y_0) 는 Fig. 3.3으로부터 식(3.1)과 같이 얻을 수 있다.

$$x_0 = x - \ell \sin \alpha \quad (3.1a)$$

$$y_0 = -\ell \cos \alpha \quad (3.1b)$$

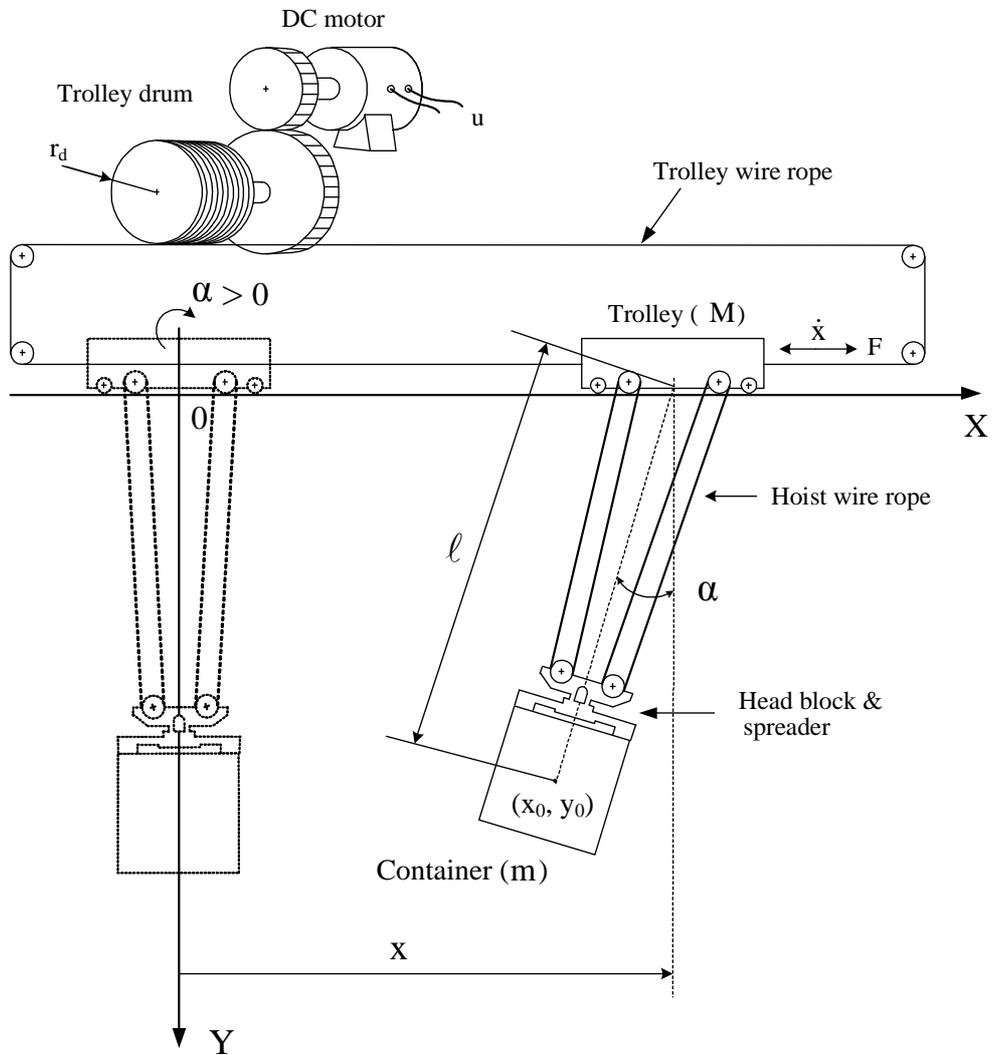


Fig. 3.3 Coordinate system of a container crane

컨테이너 크레인 시스템의 총 위치에너지 V 는 시스템 혹은 시스템 구성요소의 에너지 양으로 나타난다. 위치에너지는 일반적으로 기준점에서의 수직변위에 의한 것과 스프링 같은 탄성체의 변위에 의한 것으로 구분할 수 있으나 여기서 V 는 오직 중력에만 영향을 받는다.

트롤리는 수직변위를 가지지 않고, 오직 수평으로만 운동하기 때문에 컨테이너 크레인 시스템의 총 위치에너지는 컨테이너의 중력 위치에너지만을 고려하면 된다. 따라서 V 는 다음과 같다.

$$V = -m g \ell \cos \alpha \quad (3.2)$$

다음으로 컨테이너 크레인 시스템의 운동으로 기인한 총 운동에너지 T 는 트롤리 운동에 의한 운동에너지와 컨테이너 자체의 운동에너지로 구분할 수 있는데, 트롤리 운동에 의한 운동에너지는 다시 트롤리의 평행이동 운동에너지와 트롤리 구동 모터의 회전 운동에너지로 나누어 생각할 수 있다.

우선 트롤리의 평행이동에 의한 운동에너지 T_{tp} 는 식(3.3)과 같다.

$$T_{tp} = \frac{1}{2} M_t \dot{x}^2 \quad (3.3)$$

여기서 M_t 는 구동부를 제외한 트롤리의 질량을 의미한다. 다음으로 구동 모터에 의한 회전 운동에너지 T_{tr} 를 구하면 다음과 같다.

$$T_{tr} = \frac{1}{2} J_m \left(\frac{K_g}{r_d} \right)^2 \dot{x}^2 \quad (3.4)$$

여기서 J_m 은 모터의 회전관성 모멘트, r_d 는 모터의 피니언 반지름, K_g 는 기어 박스의 기어비를 의미한다.

따라서 트롤리의 총 운동에너지는 식(3.3)와 식(3.4)의 합으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_t &= T_{tp} + T_{tr} \\ &= \frac{1}{2} M_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_m \left(\frac{K_g}{r_d} \right)^2 \dot{x}^2 \\ &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

단, $M = M_t + J_m \left(\frac{K_g}{r_d} \right)^2$ 이다.

다음은 컨테이너의 총 운동에너지를 구하기 위해 먼저 컨테이너의 평행이동 운동에너지 T_{cp} 를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_{cp} = \frac{1}{2} m \left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2} \right)^2 \quad (3.6)$$

여기서 \dot{x}_0 와 \dot{y}_0 는 각각 다음과 같다.

$$\dot{x}_0 = \dot{x} - \ell \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (3.7a)$$

$$\dot{y}_0 = -\ell \dot{\alpha} \sin \alpha \quad (3.7b)$$

다음으로 컨테이너의 회전 운동에너지 T_{cr} 를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_{cr} = \frac{1}{2} I_c \dot{\alpha}^2 \quad (3.8)$$

여기서 I_c 는 다음과 같이 정의되는 컨테이너의 관성모멘트이다.

$$I_c = \frac{1}{12} m \ell^2 \quad (3.9)$$

따라서 컨테이너의 총 운동에너지는 식(3.6)과 식(3.8)의 합으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_c &= T_{cp} + T_{cr} \\ &= \frac{1}{2} m \left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\alpha}^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

그러면 컨테이너 크레인 시스템의 총 운동에너지 T 는 식(3.5)와 식(3.10)으로 표현되는 두 운동에너지 합으로 표현할 수 있으므로 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T &= T_t + T_c \\
 &= \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\left(\sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}\right)^2 + \frac{1}{2}I_c\dot{\alpha}^2 \\
 &= \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - m\ell\dot{x}\dot{\alpha}\cos\alpha + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2(I_c + m\ell^2)
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

이제 x 와 α 에 대한 두 가지 라그랑지 방정식을 고려해 보면 라그랑지안 (Lagrangian)과 라그랑지 방정식은 각각 다음과 같다.

$$L(x, \dot{x}, \alpha, \dot{\alpha}, t) = T(x, \dot{x}, \alpha, \dot{\alpha}) - V(x, \alpha, t) \tag{3.12}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Q_x \tag{3.13a}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q_\alpha \tag{3.13b}$$

$$\begin{aligned}
 L &= T - V \\
 &= \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - m\ell\dot{x}\dot{\alpha}\cos\alpha + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2(I_c + m\ell^2) + mg\ell\cos\alpha
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

쿨롱(Coulomb) 마찰력을 무시하고 식(3.13)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Q_x = F - B_{eq}\dot{x} \tag{3.15a}$$

$$Q_\alpha = -B_p\dot{\alpha} \tag{3.15b}$$

여기서 Q_x 와 Q_α 는 x 와 α 에 대한 일반화된 힘, F 는 트롤리가 모터에 의해 구동

되는 힘, B_{eq} 는 모터 피니언의 점성계동계수, B_p 는 컨테이너의 점성계동계수이다.

식(3.14)와 식(3.15)를 식(3.13)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$(M+m)\ddot{x}^2 - m\ell\ddot{\alpha}\cos\alpha + m\ell\dot{\alpha}^2\sin\alpha = F - B_{eq}\dot{x} \quad (3.16)$$

$$-m\ell\ddot{x}\cos\alpha + (I_c + m\ell^2)\ddot{\alpha} + mg\ell\sin\alpha = -B_p\dot{\alpha} \quad (3.17)$$

이제 식(3.16)과 식(3.17)을 \ddot{x} 와 $\ddot{\alpha}$ 대하여 정리하면 아래와 같은 2계 비선형 연립 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{-(I_c B_{eq} + m\ell^2 B_{eq})\dot{x} - (m^2\ell^3 + I_c m\ell)\dot{\alpha}^2 \sin\alpha}{(M+m)I_c + Mm\ell^2 + m^2\ell^2 - m^2\ell^2\cos^2\alpha} \\ &+ \frac{-m\ell B_p\dot{\alpha}\cos\alpha - m^2\ell^2 g \cos\alpha \sin\alpha + (I_c + m\ell^2)F}{(M+m)I_c + Mm\ell^2 + m^2\ell^2 - m^2\ell^2\cos^2\alpha} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= \frac{-m\ell B_{eq}\dot{x}\cos\alpha - m^2\ell^2\dot{\alpha}^2\cos\alpha\sin\alpha}{(M+m)I_c + Mm\ell^2 + m^2\ell^2 - m^2\ell^2\cos^2\alpha} \\ &+ \frac{-(M+m)B_p\dot{\alpha} - (M+m)m g \ell \sin\alpha + Fm\ell\cos\alpha}{(M+m)I_c + Mm\ell^2 + m^2\ell^2 - m^2\ell^2\cos^2\alpha} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Table 3.1은 미분방정식에 나타난 컨테이너 크레인의 각종 파라미터의 의미를 정리한 것이다.

Table 3.1 Parameters of the container crane

Parameters	Unit	Descriptions
B_{eq}	[N·s/m]	Viscous damping coefficient of motor
B_p	[N·m·s/rad]	Viscous damping coefficient of container
F	[N]	Driving force of trolley
g	[m/s ²]	Gravitational acceleration constant
I_c	[kg·m ²]	Inertial moment of container
ℓ	[m]	Length from trolley to center of container
M	[kg]	Mass of trolley with actuator motor
m	[kg]	Mass of container
x	[m]	Horizontal position of trolley
\dot{x}	[m/s]	Horizontal velocity of trolley
α	[rad]	Swing angle of container from vertical line
$\dot{\alpha}$	[rad/s]	Swing angular velocity of container

3.2.2 트롤리 구동부

구동부로서 DC 모터를 식(3.18)과 식(3.19)에 추가하여 트롤리에 미치는 힘 F 와 구동 모터에 인가되는 전압 u 의 관계를 구한다.

Fig. 3.4는 모터를 포함한 트롤리용 구동부를 나타내고 있다.

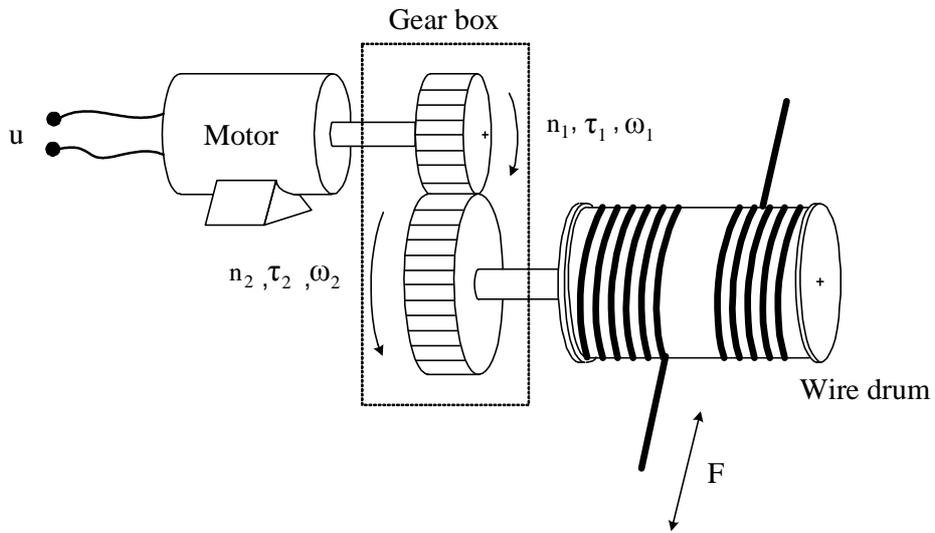


Fig. 3.4 Actuator part for the container crane

트롤리용 DC 모터에 전압을 가하면 모터에 회전력이 발생되고, 이 회전력이 기어박스를 거쳐 트롤리에 힘 F 가 작용하게 된다.

DC 모터의 인가전압을 u , 전기자전류를 i_a , 역기전력 상수를 K_b , 모터의 회전각속도를 ω_1 , 와이어 드럼의 회전각속도를 ω_2 , 모터의 회전력을 τ_1 , 와이어 드럼 축의 회전력을 τ_2 라 정의하면 트롤리를 구동시키는 힘 F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 모터의 인덕턴스 값은 미소하므로 무시한다.

$$u = i_a R_m + K_b \omega_1 \quad (3.20)$$

$$\tau_1 = K_t i_a \quad (3.21a)$$

$$\tau_2 = F r_d \quad (3.21b)$$

기어박스의 기어비 $K_g=n_1/n_2$ 이면, 와이어 드럼의 회전각속도 ω_2 와 회전력 τ_2 는 각각 $\omega_2=\omega_1/K_g$, $\tau_2=K_g\tau_1$ 이 된다.

트롤리 이동속도 $\dot{x}=r_d\omega_2$ 이므로 위 식들을 다시 정리하면 다음과 같이 트롤리에 미치는 힘 F 와 구동 모터에 인가되는 전압 u 의 관계를 구할 수 있다.

$$F = \frac{\eta_g K_g \eta_m K_t}{R_m r_d} u - \frac{\eta_g K_g^2 \eta_m K_b K_t}{R_m r_d^2} \dot{x} \quad (3.22a)$$

$$u = \frac{R_m r_d}{\eta_g K_g \eta_m K_t} F + \frac{K_g K_b}{r_d} \dot{x} \quad (3.22b)$$

여기서 η_g 와 η_m 은 각각 기어박스의 효율과 모터의 전기·기계적 효율을 의미하며, 손실이 없는 것으로 가정한다. Table 3.2는 구동부의 각종 파라미터들을 정리한 것이다.

Table 3.2 Parameters of the container crane actuator part

Parameters	Unit	Descriptions
i_a	[A]	Armature current of motor
K_b		Back e.m.f. constant of motor
K_g		Gear ratio in gear box
K_t	[V/rad/s]	Torque constant of motor
n_1		Teeth number of motor pinion gear
n_2		Teeth number of driven gear
R_m	[Ω]	Armature resistance of motor
r_d	[m]	Radius of wire drum
u	[V]	Voltage applied to motor
τ_1	[N·m]	Torque of motor pinion
τ_2	[N·m]	Torque of wire drum
ω_1	[rad/s]	Angular velocity of motor pinion
ω_2	[rad/s]	Angular velocity of wire drum

3.2.3 상태공간 해석

앞 절에서 구한 x 와 α 에 대한 2계 비선형 연립 미분방정식에서 α 의 변화가 미소하다고 가정하여 $\alpha \cong 0$ 근방에서 테일러(Taylor) 급수 전개하여 선형화하고 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{-(I_c + m\ell^2)B_{eq}\dot{x} - m\ell B_p\dot{\alpha} + (I_c + m\ell^2)F - m^2\ell^2 g\alpha}{(M+m)I_c + Mm\ell^2} \quad (3.23)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{-m\ell B_{eq}\dot{x} - (M+m)B_p\dot{\alpha} - (M+m)m g\ell\alpha + m\ell F}{(M+m)I_c + Mm\ell^2} \quad (3.24)$$

구동부를 포함한 전체 선형 운동방정식으로 표현하기 위해 식(3.23), 식(3.24)에 식(3.22a)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{-m^2\ell^2 g}{(M+m)I_c + Mm\ell^2}\alpha + \frac{-m\ell B_p}{(M+m)I_c + Mm\ell^2}\dot{\alpha} \\ &+ \frac{-\{(K_g^2 K_t K_b(I_c + m\ell^2) + B_{eq}R_m r_d^2(I_c + m\ell^2))\}}{R_m r_d^2\{(M+m)I_c + Mm\ell^2\}}\dot{x} \\ &+ \frac{K_g K_t(I_c + m\ell^2)}{R_m r_d\{(M+m)I_c + Mm\ell^2\}}u \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= \frac{-(M+m)m g\ell}{(M+m)I_c + Mm\ell^2}\alpha + \frac{-(M+m)B_p}{(M+m)I_c + Mm\ell^2}\dot{\alpha} \\ &+ \frac{-\{m\ell(K_g^2 K_t K_b + B_{eq}R_m r_d^2)\}}{R_m r_d^2\{(M+m)I_c + Mm\ell^2\}}\dot{x} + \frac{K_g K_t m\ell}{R_m r_d\{(M+m)I_c + Mm\ell^2\}}u \end{aligned} \quad (3.26)$$

식(3.25)과 식(3.26)에서 $x_1 = x$, $x_2 = \alpha$, $x_3 = \dot{x}$, $x_4 = \dot{\alpha}$ 로 상태변수를 정의하고 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (3.27)$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

여기서 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 이다.

단,

$$a_{32} = \frac{-m^2 \ell^2 g}{(M+m)I_c + M m \ell^2}$$

$$a_{33} = \frac{-\{(K_g^2 K_t K_b (I_c + m \ell^2) + B_{eq} R_m r_d^2 (I_c + m \ell^2))\}}{R_m r_d^2 \{(M+m)I_c + M m \ell^2\}}$$

$$a_{34} = \frac{-m \ell B_p}{(M+m)I_c + M m \ell^2}$$

$$a_{42} = \frac{-(M+m)m g \ell}{(M+m)I_c + M m \ell^2}$$

$$a_{43} = \frac{-\{m \ell (K_g^2 K_t K_b + B_{eq} R_m r_d^2)\}}{R_m r_d^2 \{(M+m)I_c + M m \ell^2\}}$$

$$a_{44} = \frac{-(M+m)B_p}{(M+m)I_c + M m \ell^2}$$

$$b_3 = \frac{K_g K_t (I_c + m \ell^2)}{R_m r_d \{(M+m)I_c + M m \ell^2\}}$$

$$b_4 = \frac{K_g K_t m \ell}{R_m r_d \{(M+m)I_c + M m \ell^2\}}$$

3.3 RCGA를 이용한 파라미터 추정

3.2절에서 구한 컨테이너 크레인의 수학적 모델의 정확도는 모델 내부 파라미터 값의 정확도에 의해 결정되나 기술적 혹은 환경적인 문제로 내부 파라미터의 정확한 값을 알지 못하는 경우가 빈번히 발생하기도 한다. 이 경우에는 시스템의 입·출력 데이터에 근거하여 모델의 파라미터를 추정해야 하는데, 일반적으로 시스템의 입·출력 신호와 그 도함수를 모두 직접 계측해야 한다는 문제점을 가진다. 이것은 기술적 또는 경제적으로 용이하지 않고, 가능하다 하더라도 잡음의 영향을 쉽게 받아서 정확한 추정이 어렵게 된다.

파라미터 추정에 관한 기존의 연구로 Mathew와 Fairman[83]의 다중적분 근사법에 근거한 방법이 있는데, 이는 다중적분으로 인해 초기치 문제가 발생할 수 있어 온라인 추정에는 적합하지 않다. Sagara 등[84]은 이를 보완하기 위하여 연속시간 시스템으로부터 이산시간 모델을 얻고 종래의 추정법을 적용하는 기법을 제안하였으나 이 방법도 연속시간 시스템의 파라미터가 이산모델의 파라미터로부터 유일하게 결정되지 않는다는 문제점과 시스템의 차수가 커지면 적용하기 어려운 단점을 가진다. 또한 실제 환경에서는 잡음과 모델 자체의 부정확성 등으로 탐색공간이 다봉(Multimode)이 되어 위에서 설명한 기존의 방법은 지역해(Local solution)에 수렴할 가능성이 높다.

따라서 본 논문에서는 컨테이너 크레인의 입·출력 데이터가 주어진 경우에 파라미터 추정이 가능하도록 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용한 파라미터 추정법을 제안하고자 한다.

모델조정기법(Model Adjustment Technique)은 Fig. 3.5와 같이 제어대상과 병렬로 연결된 조정모델에 동일한 입력을 적용하고, 모델의 동특성이 시스템의 동특성에 가까워지도록 적용자로 모델의 파라미터를 조정하는 방법으로서 이를 이용하면 시스템의 파라미터 추정이 가능하다.

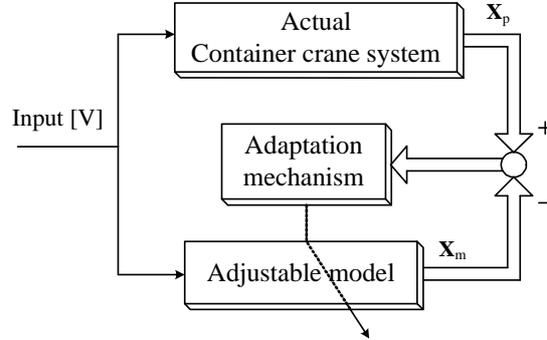


Fig 3.5 RCGA-Based model adjustment technique

조정모델은 식(3.27)의 선형·시불변 상태방정식이 사용되므로 행렬 A 의 원소와 B 의 원소가 조정된다. 적응 메카니즘은 RCGA를 사용하므로 검색체는 다음과 같이 표시된다.

$$s=(a_{32}, a_{33}, a_{34}, a_{42}, a_{43}, a_{44}, b_3, b_4) \quad (3.28)$$

결국 검색체 s 의 각 유전자들은 다음 조건이 만족되도록 최적 조정된다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_m] \cong \mathbf{0} \quad (3.29)$$

개체의 적합도를 평가하기 위해 식(3.30)과 같은 목적함수를 사용하였으며, RCGA는 궁극적으로 시스템과 조정모델 사이의 상태벡터 놈(Norm)이 최소로 되도록 8개의 파라미터를 탐색하게 된다.

$$J(\phi) = \int_{(k-W+1)T}^{kT} \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_m\| dt \quad (3.30)$$

여기서 ϕ 는 미지의 파라미터 벡터, W 는 데이터 윈도우의 크기이며 \mathbf{x}_p 와 \mathbf{x}_m 은 각각 컨테이너 크레인 시스템과 조정모델의 상태이다. 목적함수를 계산하기 위해서는 모델을 초기화하기 위한 1개의 입출력 데이터 쌍과 모델을 구동하기 위

한 W 개의 입출력 데이터 쌍이 버퍼에 저장되어야 한다. 따라서 목적함수는 W 크기에 해당하는 유한시간 범위에서 계산되며, 새로운 데이터 쌍 $[u(kT), \mathbf{x}_p^T(kT)]$ 이 얻어질 때마다 버퍼의 내용은 쉬프트(shift)되고 갱신된다. Fig. 3.6은 데이터 버퍼의 구조를 보여주고 있다.

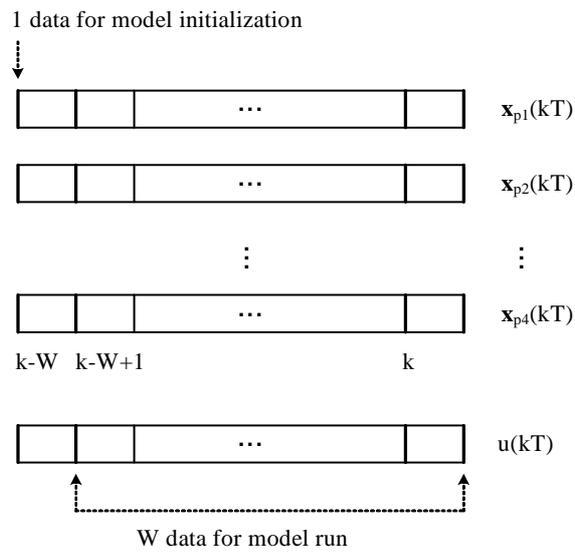


Fig 3.6 Data buffer for model identification using RCGA

제 4 장 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델

3.2절과 3.3절의 방법을 통해 얻은 선형모델은 시스템의 파라미터가 고정된 경우에만 그 정확도가 유지된다. 그러나 컨테이너 크레인 시스템은 작업 사이클마다 컨테이너 질량이 변화하고, 컨테이너를 이송하면서 호이스트용 와이어로프 길이가 변하므로 3.2절과 3.3절에서 구한 단일 선형모델은 파라미터가 변하는 실제 환경에서는 시스템과 동일한 동특성을 보이지 못한다.

따라서 여기서는 시스템 파라미터가 변화하는 환경에서도 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능한 T-S 퍼지모델을 구현하는 문제를 다룬다. 이렇게 구현한 T-S 퍼지모델의 소속함수는 제5장에서 제안하는 RCGA기반 퍼지제어기 설계에 그대로 사용되기 때문에 본 논문에 있어서 T-S 퍼지모델의 구현은 제어기 설계 이전 단계에 이루어져야 하는 중요한 과정이다.

4.1 서브시스템

일반적으로 T-S 퍼지모델의 전건부는 식(2.26)에서 확인할 수 있듯이 서브시스템의 상태변수 중에 하나로 구성된다. 이것은 2.3절에서 설명한 대로 비선형 시스템은 몇몇 동작점에서 얻어지는 선형모델(서브시스템)의 퍼지결합으로 표시할 수 있음을 의미한다. 그러나 컨테이너 크레인은 외부변수(External variable)인 호이스트용 와이어로프 길이 l 과 컨테이너의 질량 m 에 따라 서브시스템이 정의되므로, 설계변수로 l 과 m 을 선정하면 퍼지모델의 전건부 변수는 기존의 T-S 퍼지모델과 다르게 외부변수인 l 과 m 으로 표현된다.

본 논문에서는 모형실험장치의 사양을 고려하여 l 의 가능한 변화폭은 0.4 [m]에서 1.2 [m]로 가정하고, 퍼지 소속함수를 이용하여 SM(Small), MD(Medium), LG(Large)로 입력공간을 퍼지분할한다. 한편, m 의 가능한 변화폭은 0.2 [kg]에서 0.6 [kg]로 가정하고, LT(Light), HV(Heavy)로 퍼지분할 한다. 그러면 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델은 다음과 같이 6개의 규칙으로 표현하는 것이 가능하다.

퍼지모델:

$$\begin{aligned}
 R^1 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^1 \text{ and } m \text{ is } M_2^1 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^1 \mathbf{x} + \mathbf{B}^1 u \\
 R^2 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^2 \text{ and } m \text{ is } M_2^2 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^2 \mathbf{x} + \mathbf{B}^2 u \\
 R^3 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^3 \text{ and } m \text{ is } M_2^3 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^3 \mathbf{x} + \mathbf{B}^3 u \\
 R^4 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^4 \text{ and } m \text{ is } M_2^4 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^4 \mathbf{x} + \mathbf{B}^4 u \\
 R^5 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^5 \text{ and } m \text{ is } M_2^5 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^5 \mathbf{x} + \mathbf{B}^5 u \\
 R^6 : \quad & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^6 \text{ and } m \text{ is } M_2^6 \quad \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^6 \mathbf{x} + \mathbf{B}^6 u
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

여기서 M_1^i 와 M_2^i 는 각각 Table 4.1과 같은 의미를 가지는 전건부의 퍼지집합이다.

Table 4.1 Description of premise fuzzy sets

M_1^i	Description	M_2^i	Description
M_1^1	Small	M_2^1	Light
M_1^2	Small	M_2^2	Heavy
M_1^3	Medium	M_2^3	Light
M_1^4	Medium	M_2^4	Heavy
M_1^5	Large	M_2^5	Light
M_1^6	Large	M_2^6	Heavy

4.2 퍼지규칙의 추론

식(4.1)에서 입력으로 ℓ 과 m 이 주어지면, i 번째 규칙의 전건부 적합도는 식(2.29)와 같이 되어 전체 규칙의 추론결과는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\sum_{i=1}^r \rho^i \{\mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u}\}}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (4.2)$$

$$= \sum_{i=1}^r \xi^i \{\mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u}\}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.3)$$

여기서 ξ^i 는 식(2.31)과 동일하다.

4.3 RCGA를 이용한 소속함수의 최적 조정

일단 컨테이너 크레인의 비선형시스템이 식(4.1)과 같은 T-S 퍼지모델로 표현되면 퍼지모델의 동특성과 비선형시스템의 동특성이 가까워지도록 전건부 입력 변수들의 공간을 퍼지분할 하고, 퍼지 소속함수의 파라미터를 적절히 조정해야 하는데 본 논문에서는 제2장에서 언급한 RCGA를 이용해 최적으로 조정한다.

퍼지 분할에 이용되는 퍼지집합으로 호이스트용 와이어로프 길이 ℓ 에 대해서는 식(4.4)로 정의되는 사다리꼴 형태의 “외부(Exterior)” 퍼지집합과 식(4.5)와 같은 삼각형 형태의 “내부(Interior)” 퍼지집합으로 구성하고, 컨테이너 질량 m 에 대해서는 식(4.5)와 같은 사다리꼴 형태의 소속함수를 사용한다.

$$M_j^i = \begin{cases} \frac{v_i^j - a_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}}, & a_{ij} \leq v_i^j \leq b_{ij} \\ 1, & b_{ij} \leq v_i^j \leq c_{ij} \\ \frac{v_i^j - c_{ij}}{d_{ij} - c_{ij}}, & c_{ij} \leq v_i^j \leq d_{ij} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$M_j^i = \begin{cases} \frac{z_i^j - o_{ij}}{p_{ij} - o_{ij}} & , \quad o_{ij} \leq z_i^j \leq p_{ij} \\ \frac{q_{ij} - z_i^j}{q_{ij} - p_{ij}} & , \quad p_{ij} \leq z_i^j \leq q_{ij} \\ 0 & , \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.5)$$

여기서 $\{a, b, c, d\}$ 는 사다리꼴 소속함수의 각 모서리 위치를 의미하고, $\{o, p, q\}$ 는 삼각형 소속함수의 왼쪽 모서리, 중심, 오른쪽 모서리 위치를 나타낸다.

사다리꼴 소속함수를 가지는 전건부 퍼지집합은 $M_j^i = \{(i,j) \mid (1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (3,2), (4,2), (5,1), (5,2), (6,1), (6,2)\}$ 이고, 삼각형 소속함수를 가지는 전건부 퍼지집합은 $M_j^i = \{(i,j) \mid (3,1), (4,1)\}$ 이다. 전건부 퍼지집합의 파라미터는 $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ 와 o_{ij}, p_{ij}, q_{ij} 가 되며, 이중에 조정되는 파라미터는 $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ 와 o_{ij}, q_{ij} 가 된다.

이와 같이 퍼지모델의 소속함수를 최적으로 조정하는 비선형 최적화 문제를 해결하기 위해 적응 메커니즘으로 RCGA를 적용한 모델조정기법을 사용하며, 이 과정을 통해 퍼지모델과 비선형시스템의 동특성이 서로 가까워지도록 퍼지 소속함수가 조정된다. 따라서 ℓ 과 m 을 설계변수로 선정하여 구현되고, 소속함수가 조정된 퍼지모델은 파라미터가 변화하여도 비선형시스템의 동특성을 효과적으로 표현할 수 있다. Fig. 4.1은 지금까지 설명한 퍼지 모델링 기법을 나타낸다.

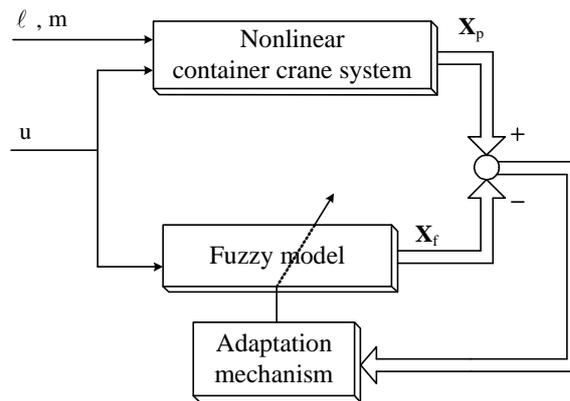


Fig. 4.1 Schematic diagram for fuzzy modeling of the container crane

RCGA는 집단이 진화해 가는 동안 개체간의 우열을 가리기 위한 적합도 함수를 사용하며 적합도 함수는 다음의 목적함수로부터 계산된다. 특히 목적함수는 온라인 추정치를 얻기 위하여 식(4.6)과 같이 유한시간 동안만 계산된다.

$$J(\phi) = \int_{(k-W+1)T}^{kT} \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_f\| dt \quad (4.6)$$

여기서 \mathbf{x}_p 와 \mathbf{x}_f 는 각각 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델의 상태이고, W 는 데이터 윈도우의 크기로서 퍼지모델의 정확도와 계산시간 사이에서 적절하게 타협되는 상수이다. 온라인 추정치를 얻기 위해 목적함수가 유한 시간 범위에서 계산되면, 모델을 초기화하기 위한 4개의 입출력 데이터 쌍과 모델을 구동하기 위한 W 개의 입출력 데이터 쌍이 버퍼에 저장되어야 한다. 새로운 데이터 쌍 $[u(kT), \mathbf{x}_p^T(kT)]$ 이 얻어질 때마다 버퍼의 내용은 쉬프트(shift)되고 갱신된다. Fig. 4.2는 이러한 데이터 버퍼의 구조를 보여주고 있다

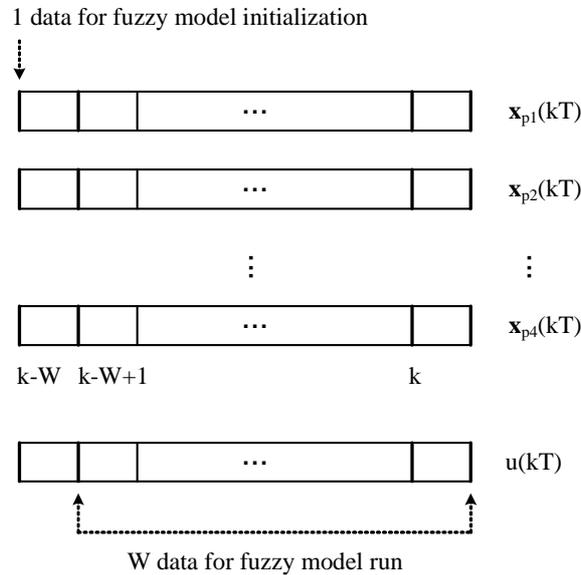


Fig. 4.2 Data buffer for fuzzy modeling

RCGA는 실수코딩을 채용하기 때문에 탐색하는 파라미터와 염색체의 유전자가 일대일로 대응되므로 염색체는 Fig. 4.3과 같이 소속함수의 모서리 값을 의미하는 10개로 구성된다.

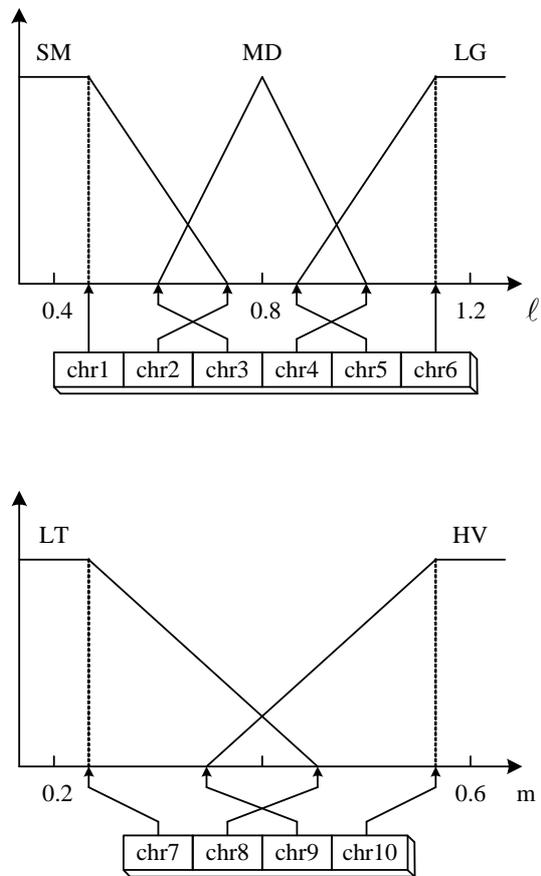


Fig. 4.3 The expression of chromosome

제 5 장 컨테이너 크레인의 제어시스템 설계

제어 알고리즘의 대부분은 시스템이 주로 운전되는 동작점 부근에서 얻어진 선형모델에 근거하여 설계되어진다. 그러나 컨테이너 크레인은 앞에서 설명한 것과 같이 운전 중에 시스템 파라미터가 변화하는 시스템이므로 제3장에서 얻은 선형모델을 사용하여 설계한 제어기로는 원하는 제어목적 달성이 매우 어렵다.

따라서 본 장에서는 컨테이너 크레인의 운전에 따른 파라미터 변화에 효과적으로 대응할 수 있는 퍼지제어를 설계한다. 이 제어기는 제4장에서 설명한 T-S 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 서브제어기(Sub-controller)를 설계하고, 이를 퍼지모델의 소속함수로 퍼지결합함으로써 얻어진다.

5.1 선형 서브제어기 설계

우선, 여기서는 제안하고자 하는 퍼지제어기 설계의 전 단계로서 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 서브제어기를 설계하는 기법에 대해 살펴본다.

T-S 퍼지모델의 각 서브시스템을 다음과 같이 일반화하여 다시 생각하자.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\tag{5.1}$$

여기서 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 시스템의 상태벡터, $y(t) \in \mathbb{R}$ 는 출력으로서 트롤리의 위치, $u(t) \in \mathbb{R}$ 는 제어입력이고, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ 이다. 한편 행렬쌍 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 가 가제어(Controllable)하면, 상태 피드백 제어가 가능하다. 2차형식의 평가함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J_1 = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + u^T \mathbf{R} u) dt\tag{5.2}$$

여기서 \mathbf{Q} 는 양의 반한정 대칭행렬이고, \mathbf{R} 은 양의 하중계수이다.

식(5.2)의 평가함수를 최소화하는 의미에서 상태피드백 제어법칙은 다음과 같다.

$$u = -\mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{x} \quad (5.3)$$

여기서 \mathbf{K} 는 피드백 이득행렬로서 실수행렬이고, \mathbf{P} 는 식(5.4)와 같은 Riccati 방정식의 해행렬이다.

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (5.4)$$

식(5.3)과 같은 제어형태는 제어대상이 1형 시스템(Type 1 system)으로 모델링된 경우에 추종제어(Tracking control)와 더불어 조정기(Regulating) 문제에 적용이 가능하다.

한편, 컨테이너 크레인의 선형모델은 제3장에서 보인바와 같이 1형인 시스템이므로 식(5.3)의 제어법칙을 사용하여도 추종제어가 가능하다. 그러나 여기서는 계단상의 외란이나 잡음이 존재하는 환경 하에서도 출력이 기준입력에 정상상태오차 없이 잘 추종할 수 있도록 하기 위해서 PI형의 상태피드백 제어기를 적용한다.

식(5.5)와 같이 오차 보상을 위한 새로운 상태변수 z 를 정의한다.

$$z = \int (y - y_r) dt \quad (5.5)$$

식(5.1)의 서브시스템과 식(5.5)를 결합하면 다음과 같이 시스템의 동역학을 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (5.6)$$

식(5.6)을 간단히 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c u - \mathbf{D}_c y_r \quad (5.7)$$

여기서 $\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{D}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix}$ 이다.

원래 시스템인 식(5.1)이 가제어하고 $\text{rank}(\mathbf{A}_c) = n+1$ 의 관계가 만족되면 식(5.7)로 표현된 확장시스템도 가제어하게 된다[85].

확장시스템에 근거하여 식(5.8)과 같은 2차형식의 평가함수를 선정할 수 있다.

$$J_2 = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}_c^T \mathbf{Q}_c \mathbf{x}_c + u^T R_c u) dt \quad (5.8)$$

선정된 2차형식의 평가함수 J_2 를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 상태피드백 제어입력은 식(5.9)와 같다.

$$\begin{aligned} u &= -R_c^{-1} \mathbf{B}_c^T \mathbf{P}_c \mathbf{x}_c \\ &= -\mathbf{K} \mathbf{x}_c \\ &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + k_2 \int (y_r - y) dt \end{aligned} \quad (5.9)$$

여기서 $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1 \quad k_2]$ 는 피드백 이득행렬, \mathbf{P}_c 는 다음 Riccati 방정식의 해행렬이다.

$$\mathbf{A}_c^T \mathbf{P}_c + \mathbf{P}_c \mathbf{A}_c - \mathbf{P}_c \mathbf{B}_c R_c^{-1} \mathbf{B}_c^T \mathbf{P}_c + \mathbf{Q}_c = \mathbf{0} \quad (5.10)$$

식(5.9)에서 알 수 있듯이 상태피드백 제어입력은 PI 제어기의 형태를 갖추고 있다. Fig. 5.1은 PI형의 상태피드백 제어시스템을 나타내고 있다.

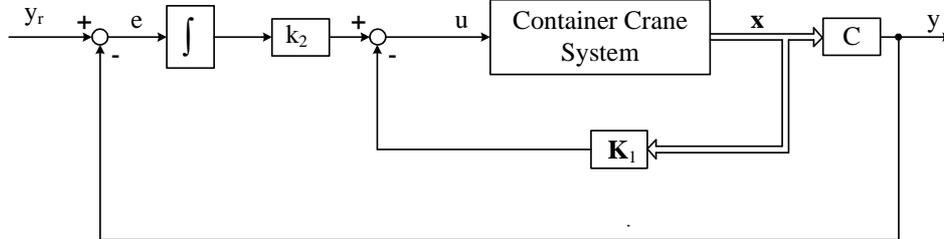


Fig. 5.1 Block diagram of PI-type state feedback control system

앞에서 설명한 기존의 서브제어기 설계 기법은 식(5.2) 또는 식(5.8)의 목적함수를 최소로 하도록 \mathbf{K} 를 얻는 전형적인 비제약성 최적화 문제로 볼 수 있다. 그러나 이것은 설계자에게 주어지는 시스템의 설계사양과 같은 제약조건을 전혀 고려하지 못한다는 문제점을 가진다. 이러한 제약조건이 수반되면 앞의 방법은 비선형 최적화 문제가 되어 해석적인 방법으로는 해결할 수 없게 된다.

따라서 여기서는 RCGA를 사용하여 제약조건 즉, 설계사양이 주어진 경우에도 \mathbf{K} 를 선정할 수 있는 서브제어기 설계 기법을 제안한다. 이를 위해서는 RCGA가 주어진 제약조건을 다룰 수 있어야 한다. 일반적으로 유전알고리즘에서 제약조건을 해결하는 방법은 크게 거부전략(Rejecting strategy), 복구전략(Repairing strategy), 유전 연산자와의 보완 전략(Modifying genetic operator strategy), 벌점전략(Penalizing strategy)등이 있으며 본 논문에서는 벌점전략을 사용하므로 이에 대해서만 간단히 살펴보도록 한다.

벌점전략[86,87]은 유전 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 되면 벌점을 부과하는 기법이다. 이는 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역과 부적합한 영역으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고, 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있기 때문에 가능한 방법이다.

본 논문에서는 컨테이너 크레인의 제어특성을 고려하여 다음 조건이 추가된 경우를 생각한다.

- w 트롤리의 이동시 오버슈트가 발생하지 않아야 한다.
- w 트롤리를 목표위치까지 신속하게 이동시켜 컨테이너의 빠른 이송이 가능해야 한다.
- w 트롤리가 목표위치에 도착한 시점에서는 화물의 흔들림은 단시간 내에 제어해야 한다.
- w 시스템 구동 시 제어입력은 시스템 제원에 근거해 과도하지 않아야 한다.
- w 돌발적인 외란에 대해서 컨테이너의 흔들림을 억제해야 한다.

위의 요소를 만족시키기 위하여 식(5.11)과 같은 최대 오버슈트(M_p), 정정시간(t_s), 최대 흔들림 각(α_{max}), 최대 입력(u_{max})에 대한 제약조건을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 g_1 &: \text{최대 오버슈트}(M_p) \\
 g_2 &: \text{정정시간}(t_s) \\
 g_3 &: \text{최대 흔들림 각}(\alpha_{max}) \\
 g_4 &: \text{최대 입력}(u_{max})
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

그러면 제약조건을 위반 정도에 따라 벌점을 부가하도록 벌점함수 $P(\psi)$ 를 식(5.8)에 추가한 새로운 평가함수 $F(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$F(\psi) = J_2(\psi) + P(\psi) \tag{5.12}$$

여기서 $P(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$\text{단, } P(\psi) = \begin{cases} 0 & , \psi \text{가 적합한 해인 경우} \\ \sum_{j=1}^4 w_j g_j^2 & , \psi \text{가 부적합한 해인 경우} \end{cases}
 \tag{5.13}$$

여기서 w_j 는 각 제약조건에 대응되는 벌점상수로서 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이고, g_j 는 제약조건이다.

이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하면서 $F(\psi)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다. Fig. 5.2는 RCGA를 이용한 서브 제어기의 설계 기법을 나타낸다.

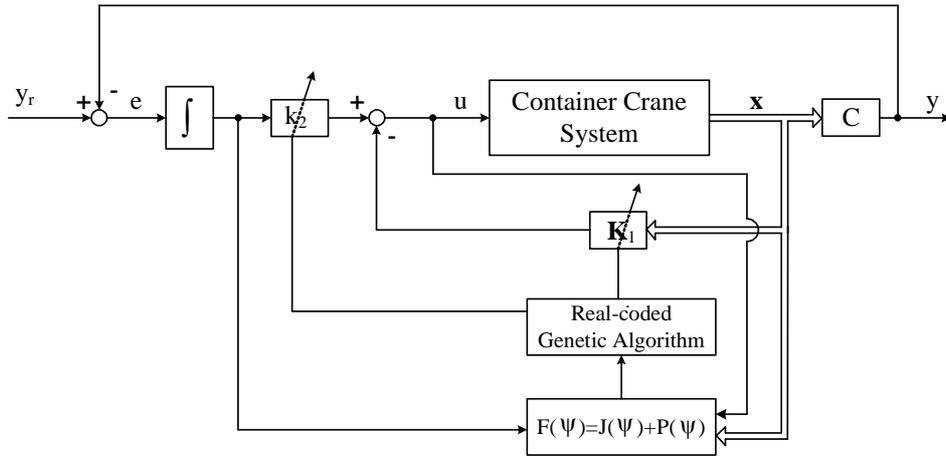


Fig. 5.2 Optimization of a constrained state feedback gain using RCGA

5.2 퍼지제어기 설계

일반적으로 퍼지제어는 불확실한 정보를 다룰 수 있고, 전문가의 지식을 직접 언어규칙으로 표현할 수 있으며, 제어대상의 수학적 모델을 요구하지 않는 장점 때문에 복잡하고 불확실한 시스템의 제어에 많이 이용되어 왔다. Mamdani에 의하여 모형 증기기관의 제어에 직접 응용된 이후[68], 퍼지제어는 최근까지 제어분야에 널리 응용되어 왔다[80-82,88-92].

전통적으로 기존의 퍼지제어기 설계 방법은 지식 베이스를 전문가의 경험에 의존하여 주관적으로 구성함으로써 체계적이면서 최적으로 설계하는 것이 어려웠으나, 최근 제4장에서 설명한 T-S 퍼지모델이 제시됨으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있는 계기가 마련되었다.

따라서 여기에서는 이러한 퍼지제어의 장점을 이용해 컨테이너 크레인의 파라미터가 변화하는 경우에도 원하는 제어목적을 달성할 수 있는 RCGA기반 퍼지제어기 설계방법을 제안한다.

제안하는 퍼지제어기는 제4장에서 설명한 T-S 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 주어진 제약조건을 만족하도록 RCGA로 설계된 서브제어기를 퍼지모델의 소속함수를 이용하여 퍼지결합한 것이다. 이때 모든 상태변수는 계측 가능하여 직접 이용할 수 있다고 가정한다. 만약 그렇지 못한 환경에서는 퍼지상태관측기를 설계하고, 퍼지제어기에 결합하여 사용할 수 있는데 이에 대한 구체적인 방법은 5.2.2절에서 설명하기로 한다.

5.2.1 RCGA기반 퍼지제어기 설계

제4장에서 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델은 호이스트용 와이어로프 길이 ℓ 과 컨테이너 질량 m 에 따라 다음과 같이 주어졌다.

퍼지모델:

$$R^i : \text{IF } \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i$$

$$\text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \mathbf{u}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.14)$$

PI형의 상태피드백 제어형태로 가져가기 위해서 식(5.5)에서 정의한 상태변수를 사용하면, 다음과 같은 확장 퍼지모델을 얻을 수 있다.

확장 퍼지모델:

$\mathbf{R}_c^i : IF \ell$ is M_1^i and m is M_2^i

$$THEN \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c^i \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c^i u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.15)$$

단, $\mathbf{x}_c = [\mathbf{x}^T \ z]^T \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$, $\mathbf{A}_c^i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^i & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_c^i = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^i \\ 0 \end{bmatrix}$ 이다.

원래의 각 서브시스템이 가제어하고, $\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{B}^i & \mathbf{A}^i \\ 0 & \mathbf{C} \end{bmatrix} = n+1$ 의 관계가 만족되면

확장시스템도 가제어하게 된다[93].

그러면 확장 퍼지시스템의 추론 결과는 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\sum_{i=1}^6 \rho^i \left(\mathbf{A}_c^i \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c^i u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r \right)}{\sum_{i=1}^6 \rho^i} = \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{A}_c^i \right) \mathbf{x}_c + \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{B}_c^i \right) u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (5.16)$$

여기서 $\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^6 \rho^i}$ 이다.

한편, 확장 퍼지시스템은 식(5.9)를 이용해 다음과 같이 표현되는 i 번째 제어 입력을 통해 점근적으로 안정하게 만드는 것이 가능하다.

제어규칙:

$\tilde{\mathbf{R}}^i$: \mathbf{IF} ℓ is M_1^i and m is M_2^i

$THEN$ $u^i = -\mathbf{K}^i \mathbf{x}_c$

$$= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y) dt, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.17)$$

여기서 $\mathbf{K}^i = [\mathbf{K}_1^i \quad k_2^i]$ 는 i 번째 규칙에 해당하는 피드백 이득행렬로서 극배치법, 최적제어기법 등으로 구할 수 있으나, 본 논문에서는 5.1절에서 설명한 RCGA를 이용한 기법을 통해 얻는다.

그러면 RCGA기반 퍼지제어기의 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \rho^i u^i}{\sum_{i=1}^6 \rho^i} = \sum_{i=1}^6 \xi^i u^i \\ &= -\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{K}^i \mathbf{x}_c \\ &= \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(-\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y) dt \right) \end{aligned} \quad (5.18)$$

식(5.18)과 같은 형태의 제어방법은 Tanaka 등이 처음으로 제안한 병렬분산 보상기(Parallel distributed compensator)의 확장개념으로 볼 수 있다.

Tanaka 등은 문헌[18,94]에서 퍼지시스템과 동일한 퍼지집합을 사용하고, 후건부에 선형 상태피드백 제어를 사용한 병렬분산보상기를 적용하였다.

Fig. 5.3은 병렬분산보상기의 개념을 도식적으로 나타낸 것이다.

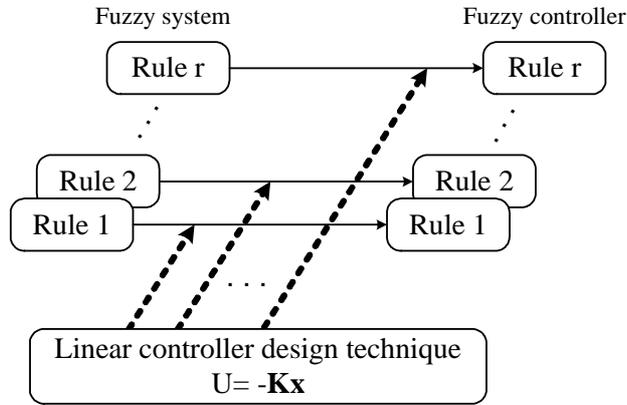


Fig. 5.3 Parallel distributed compensator

그러나 이와 같은 선형제어($u = -Kx$)를 이용하면 0형으로 모델링되는 시스템은 계단상의 기준입력에 대한 추종문제를 해결할 수 없는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 식(5.18)과 같은 확장형 병렬 분산보상기(Extended parallel distributed compensator)를 제안한다.

또한, 제4장에서 최적 조정된 T-S 퍼지모델의 소속함수를 퍼지제어기에 그대로 사용하여 퍼지모델과 RCGA기반 퍼지제어기 사이에 일관성이 유지되도록 한다.

본 논문에서 적용한 확장형 병렬분산보상기 개념을 이용한 RCGA기반 퍼지제어기 구성은 Fig. 5.4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 제어기는 T-S 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 설계된 서브제어기를 퍼지결합함으로써 이루어진다.

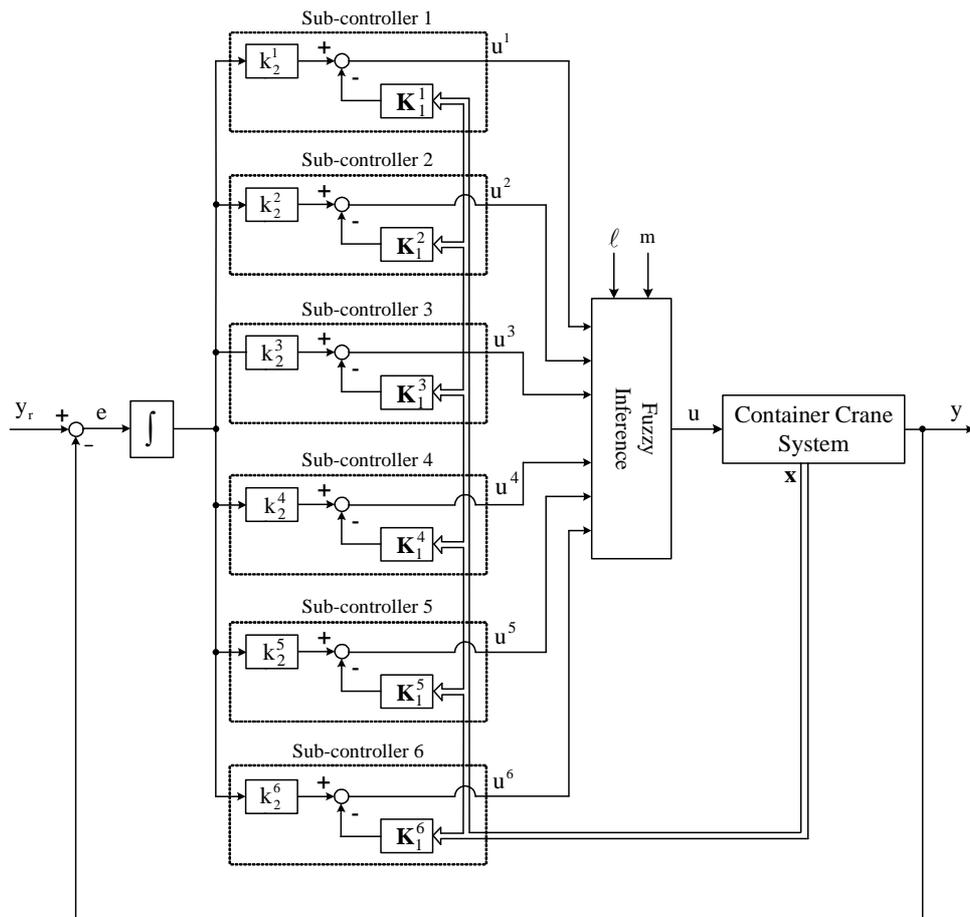


Fig. 5.4 Schematic diagram of the proposed RCGA-based fuzzy controller

5.2.2 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기 설계

앞 절에서 설계된 RCGA기반 퍼지제어기는 시스템 전체의 상태변수 피드백이 요구된다. 기술적 또는 경제적인 이유로 모든 상태변수를 계측하기가 어려운 경우에는 계측신호 만으로 나머지 신호를 추정하게 된다. 이것의 대표적인 방법이 바로 상태관측기인데, Luenberger 상태관측기[95-97]가 최초의 연구로 알려져 있다. Luenberger 상태관측기는 비선형시스템의 선형모델이 필요하기 때문에 관측기의 성능은 시스템 모델의 정확성에 크게 의존하게 된다. 만약 실제 시스템과 일치하는 모델을 얻기 어려운 경우, 또는 동작하면서 시스템 파라미터들이 변동하는 경우에는 추정 오차를 유발하고 이로 인하여 전체 제어시스템이 불안정하게 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 점을 일부 해결할 수 있도록 하기 위해 퍼지상태관측기를 설계하는 문제를 다룬다.

먼저 식(5.14)의 컨테이너 크레인 퍼지모델에서 $y \in \mathbb{R}^1$ 즉, 트롤리의 위치 신호만을 계측하는 환경을 고려하여 y 와 u 로 부터 전체 상태변수를 추정하는 전차수 상태관측기 문제를 살펴본다.

행렬쌍 $(\mathbf{A}^i, \mathbf{C})$ ($1 \leq i \leq 6$)는 제3장에서 언급한 바와 같이 가관측하므로, 서브시스템의 각 후건부 상태방정식에 대하여 Luenberger 형의 전차수 상태관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}^i u + \mathbf{L}^i (y - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.19)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 \mathbf{x} 의 추정치, \mathbf{L}^i 는 i 번째 상태관측기의 이득행렬이다.

그러면 이들을 퍼지규칙으로 결합할 수 있고, 다음과 같이 표현 가능한 전차수 퍼지상태관측기(Full-order fuzzy state observer)를 얻을 수 있다.

전차수 퍼지상태관측기:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}^i : & \text{ IF } \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i \\ & \text{ THEN } \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}^i u + \mathbf{L}^i (y - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5.20)$$

따라서 전차수 퍼지상태관측기는 다음과 같이 추론된다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \rho^i (\mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}^i \mathbf{u} + \mathbf{L}^i (y - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}))}{\sum_{i=1}^6 \rho^i} \\ &= \sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}^i \mathbf{u} + \mathbf{L}^i (y - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}))\end{aligned}\quad (5.21)$$

만약 식(5.21)의 \mathbf{L}^i 가 안정한 행렬이라면 상태관측기의 초기조건이 시스템과 서로 다를 경우에도 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 \mathbf{x} 를 추정하는 것이 가능하다.

전차수 퍼지상태관측기를 사용한 제어기의 퍼지규칙은 식(5.17)을 사용하므로, 전차수 퍼지상태관측기가 결합된 퍼지제어기의 출력은 최종적으로 다음과 같이 추론된다.

$$\mathbf{u} = \frac{\sum_{i=1}^6 \rho^i \mathbf{u}^i}{\sum_{i=1}^6 \rho^i} = \sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{u}^i = - \sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{K}_1^i \hat{\mathbf{x}} + k_2^i \int (y - y_r) dt)\quad (5.22)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 로 정의하고, 이를 식(5.22)에 대입하면 \mathbf{u} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = - \sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) + k_2^i \int (y - y_r) dt)\quad (5.23)$$

그러므로 전체 폐루프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{A}^i \right) \mathbf{x} - \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{B}^i \right) \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) + k_2^i z) \right)\quad (5.24)$$

전차수 상태관측기는 계측신호를 포함한 모든 상태를 추정하는데 연산 관점에서 보면 비효율적이다. 따라서 컨테이너 크레인 시스템에서 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도가 계측가능하다($q=2$)고 가정하면, 축소차수 상태관측기로 나머지 $2(n-q)$ 개의 상태만을 추정하면 된다. $\mathbf{E}^T = [\mathbf{C}^T \ \mathbf{T}^T]$ 로 정의되는 행렬 \mathbf{E} 가 비특이행렬이 되도록 $2 \times 4((n-q) \times n)$ 행렬 \mathbf{T} 를 선정하고, 식(5.14)의 후건부 상태방정식에서 $\mathbf{z} = \mathbf{E}\mathbf{x}$ 로 등가변환하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$\hat{\mathbf{R}}^i : IF \ell$ is M_1^i and m is M_2^i

$$THEN \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_1 \\ \dot{\mathbf{z}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^i & \mathbf{A}_{12}^i \\ \mathbf{A}_{21}^i & \mathbf{A}_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^i \\ \mathbf{B}_2^i \end{bmatrix} u, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.25a)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{I}_q \ \mathbf{0}] \mathbf{z} = \mathbf{z}_1 \quad (5.25b)$$

여기서 $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1^T \ \mathbf{z}_2^T]^T$ 이고, $\mathbf{A}_{11}^i (q \times q)$, $\mathbf{A}_{12}^i (q \times (n-q))$, $\mathbf{A}_{21}^i ((n-q) \times q)$ 그리고 $\mathbf{A}_{22}^i ((n-q) \times (n-q))$ 는 각각 $\mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{E}^{-1}$ 로부터 적절한 차원을 갖도록 분할된 행렬이다. \mathbf{B}_1^i 와 \mathbf{B}_2^i 는 $\mathbf{E}\mathbf{B}$ 로부터 적절한 차원을 갖도록 분할된 행렬이고, $\mathbf{I}_q (q \times q)$ 는 단위행렬이다.

식(5.25a)의 관계를 식(5.25b)에 적용하면, 미지의 변수 $\mathbf{z}_2 \in \mathbf{R}^2$ 에 대한 방정식으로 표현할 수 있다.

$\hat{\mathbf{R}}^i : IF \ell$ is M_1^i and m is M_2^i

$$THEN \dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{A}_{22}^i \mathbf{z}_2 + \mathbf{A}_{21}^i \mathbf{y} + \mathbf{B}_2^i u, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.26)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{A}_{12}^i \mathbf{z}_2$$

여기서 $\mathbf{y}' = \dot{\mathbf{y}} - \mathbf{A}_{11}^i \mathbf{y} - \mathbf{B}_1^i u$ 이므로 식(5.26)은 기지의 신호 \mathbf{y} 와 u 의 함수로 이루어진 것을 알 수 있다.

식(5.25)의 각 서브시스템은 행렬쌍 $(\mathbf{A}_{22}^i, \mathbf{A}_{12}^i)$ 이 가관측하면 상태관측기의 구성이 가능한데, 만약 $(\mathbf{A}^i, \mathbf{C})$ 가 가관측하다면 $(\mathbf{A}_{22}^i, \mathbf{A}_{12}^i)$ 도 가관측하게 된다[93].

이제 식(5.26)의 후건부에 대하여 상태관측기를 설계하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}}_2 = (\mathbf{A}_{22}^i - \mathbf{L}^i \mathbf{A}_{12}^i) \hat{\mathbf{z}}_2 + \mathbf{A}_{21}^i \mathbf{y} + \mathbf{B}_2^i u + \mathbf{L}^i \dot{\mathbf{y}}' \quad (5.27)$$

여기서 \mathbf{L}^i 는 상태관측기의 이득행렬이다. 식(5.27)에서 $\dot{\hat{\mathbf{z}}}_2$ 를 추정하기 위해서는 \mathbf{y} 의 미분신호 $\dot{\mathbf{y}}$ 가 필요하다. 그러나 계측 가능한 출력신호에 잡음이 포함되어 있다면 $\dot{\mathbf{y}}$ 는 잡음을 증폭시키므로 $\dot{\mathbf{y}}$ 를 소거하기 위하여 새로운 변수 \mathbf{w} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{w} = \hat{\mathbf{z}}_2 - \mathbf{L}^i \mathbf{y} \quad (5.28)$$

이를 식(5.27)에 대입하고, 퍼지규칙으로 결합하면 축소차수 퍼지상태관측기는 다음과 같이 표현된다.

축소차수 퍼지상태관측기:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}^i : & \text{IF } \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i \\ & \text{THEN } \dot{\mathbf{w}} = \mathbf{H}^i \mathbf{w} + \mathbf{D}^i \mathbf{y} + \mathbf{G}^i u, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \mathbf{H}^i &= \mathbf{A}_{22}^i - \mathbf{L}^i \mathbf{A}_{12}^i \\ \mathbf{D}^i &= \mathbf{H}^i \mathbf{L}^i + \mathbf{A}_{21}^i - \mathbf{L}^i \mathbf{A}_{11}^i \\ \mathbf{G}^i &= \mathbf{B}_2^i - \mathbf{L}^i \mathbf{B}_1^i \end{aligned}$$

따라서 축소차수 퍼지상태관측기의 최종 출력은 다음의 식으로 추론된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{w}} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \rho^i (\mathbf{H}^i \mathbf{w} + \mathbf{D}^i \mathbf{y} + \mathbf{G}^i u)}{\sum_{i=1}^6 \rho^i} \quad (5.30) \\ &= \sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{H}^i \mathbf{w} + \mathbf{D}^i \mathbf{y} + \mathbf{G}^i u) \end{aligned}$$

마지막으로 $z=Ex$ 의 관계로부터 상태관측기의 출력은 다음과 같이 된다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}\mathbf{y} + \mathbf{M}\hat{\mathbf{z}}_2 \quad (5.31)$$

여기서 \mathbf{N} 과 \mathbf{M} 은 $\mathbf{E}^{-1} = [\mathbf{N} : \mathbf{M}]$ 의 관계를 가지는 행렬이다. 이 중에서 \mathbf{y} 는 계측되는 신호이고, 축소차수 상태관측기가 관측하는 최종 상태 $\hat{\mathbf{z}}_2$ 는 식(5.28)에서 구할 수 있다.

식(5.29)에서 이득행렬 \mathbf{L}^i 를 행렬 \mathbf{H}^i 의 모든 고유치가 음의 실수부를 갖도록 선정한다면 시스템과 상태관측기의 초기상태가 다르더라도 $\hat{\mathbf{z}}_2$ 가 \mathbf{z}_2 를 추정할 수 있다. 일반적으로 상태관측기 이득행렬 \mathbf{L} 의 선정에는 극배치법 등이 사용되나 여기서는 Lee 등[41]이 제안한 RCGA를 이용한 탐색기법을 사용하기로 한다. 이 방법은 RCGA가 행렬 \mathbf{H}^i 의 고유치를 모두 음의 실수부를 갖도록 탐색하는 방법이다.

축소차수 퍼지상태관측기를 사용할 경우의 제어입력은 근본적으로 식(5.23)과 같은 형태이지만 $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{N}\mathbf{y} + \mathbf{M}\mathbf{z}_2) - (\mathbf{N}\mathbf{y} + \mathbf{M}\hat{\mathbf{z}}_2) = \mathbf{M}\tilde{\mathbf{z}}_2$ 의 관계가 성립하므로 이를 식(5.22)에 대입하면 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기 출력 \mathbf{u} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= - \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(\mathbf{K}_1^i \hat{\mathbf{x}} + k_2^i \int (y - y_r) dt \right) \\ &= - \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x} - \mathbf{M}\tilde{\mathbf{z}}_2) + k_2^i \int (y - y_r) dt \right) \end{aligned} \quad (5.32)$$

그러므로 전체 폐루프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{A}^i \right) \mathbf{x} - \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i \mathbf{B}^i \right) \left(\sum_{i=1}^6 \xi^i (\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x} - \mathbf{M}\tilde{\mathbf{z}}_2) + k_2^i z) \right) \quad (5.33)$$

Fig. 5.5는 이렇게 구성된 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기를 나타내고 있다. 그림에서 퍼지상태관측기는 제어환경에 따라서 전차수 퍼지상태관측기 혹은 축소차수 퍼지상태관측기를 사용할 수 있다.

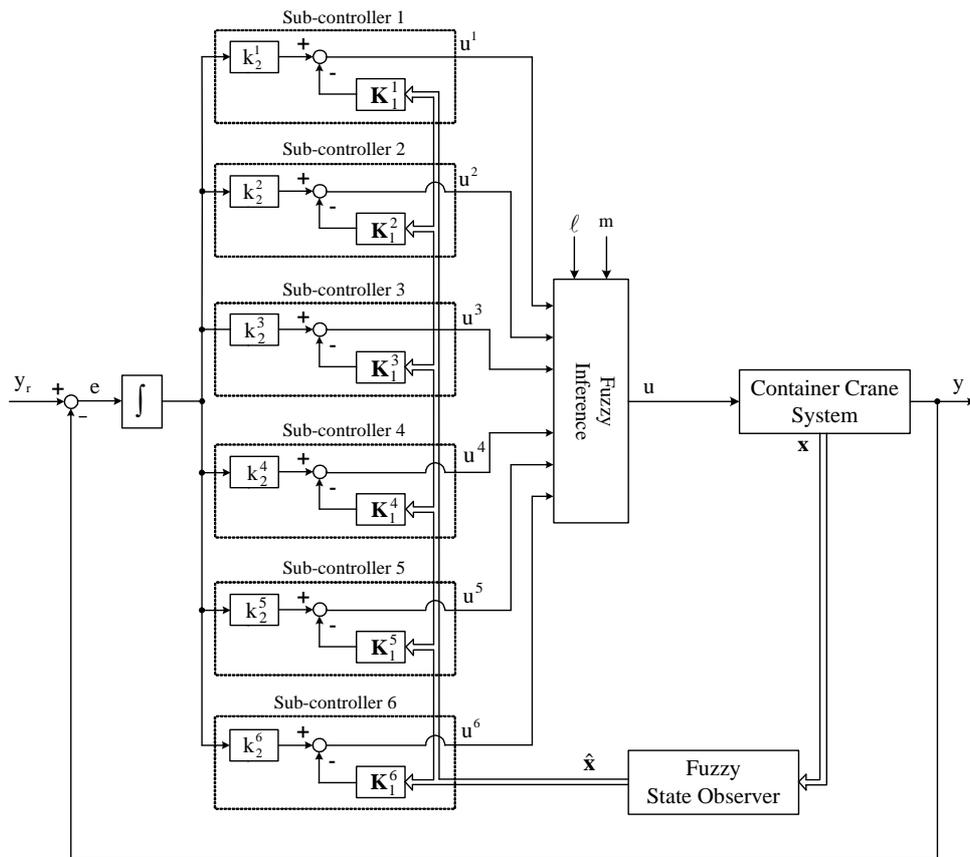


Fig. 5.5 Schematic diagram of the proposed RCGA-based fuzzy controller with fuzzy state observer

제 6 장 시뮬레이션 및 검토

제2장에서는 본 논문에서 최적화 도구로 사용한 RCGA와 제안한 제어기의 이론적 배경이 되는 퍼지이론 및 T-S 퍼지모델을 설명하였다. 제3장에서는 제어기 설계의 선행 단계로 컨테이너 크레인의 입·출력 데이터가 주어지는 경우 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용한 파라미터 추정 방법을 보였고, 제4장에서는 호이스트용 와이어로프 길이와 컨테이너 질량을 설계변수로 고려하여 다수 개의 서브시스템(선형모델)을 얻고, 이 서브시스템의 퍼지결합에 사용되는 소속함수를 RCGA로 조정하는 T-S 퍼지 모델링 기법을 제안하였다. 제5장에서는 제4장에서 얻은 퍼지모델의 서브시스템에 대해 제약조건을 만족하도록 RCGA를 이용하여 서브제어기를 구한 후, 이들을 퍼지모델의 소속함수로 퍼지결합한 RCGA기반 퍼지제어기와 상태변수를 측정할 수 없는 제어환경을 고려한 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기를 설계하였다.

따라서 제6장에서는 제안된 컨테이너 크레인 시스템의 파라미터 추정, T-S 퍼지 모델링, 퍼지제어기 설계 및 퍼지상태관측기 설계 기법을 모형실험장치 및 컨테이너 크레인의 비선형시스템에 적용하고, 제안한 방법의 유효성을 검증한다.

6.1 컨테이너 크레인의 파라미터 추정

3.3절에서 제안한 파라미터 추정 방법은 컨테이너 크레인 시스템의 입·출력 데이터 정보를 필요로 한다. 그러나 실제로 상용되고 있는 컨테이너 크레인 시스템의 입·출력 데이터는 획득하기 어렵기 때문에 여기서는 컨테이너 크레인의 모형실험장치를 이용해 그 유효성을 살펴보기로 한다.

모형실험장치는 Quanser Consulting사의 Linear Motion Servo Plant “Gantry Crane”[98]으로 6 [V] DC 모터에 의해 래크-피니언(Rack-pinion) 구조로 병진 운동하는 트롤리와 트롤리의 위치 및 컨테이너의 흔들림 각을 측정할 수 있는 각각의 증분형 엔코더(Incremental encoder)를 가지고 있다. 또한 장치를 운전시키기 위해 전력 증폭기를 포함한 모듈(Module)을 가지고 있고, 신호전달은 AD/DA Converter와 MultiQ로 이루어진 Data Acquisition and Control Board(DACB)가 장착된 PC를 통해 수행된다. Fig. 6.1은 모형실험장치의 구성을 보여준다.

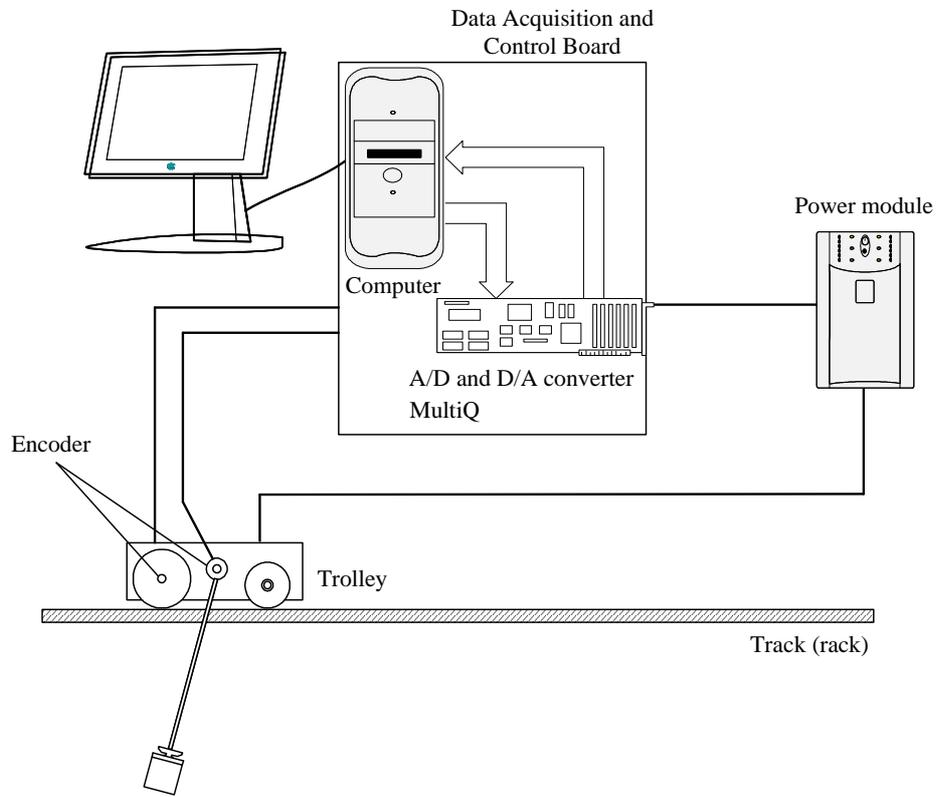


Fig. 6.1 The experimental apparatus for container crane

몇 가지 주요한 모형실험장치의 파라미터 값은 Table 6.1에 표시하였다. 각 파라미터의 의미는 Table 3.1과 Table 3.2에 표시되어있다.

Table 6.1 Parameter values of the experimental apparatus

Parameters	Value [Unit]	Parameters	Value [Unit]
I_c	0.0079 [kg·m ²]	m	0.23 [kg]
K_g	3.71	M	0.703 [kg]
K_t	0.0076 [V/rad/s]	R_a	2.6 [Ω]
ℓ	0.33 [m]	r_d	0.0063 [m]

모형실험장치에서 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도는 각각의 엔코더를 이용해 측정이 가능하지만, 트롤리의 속도와 컨테이너의 흔들림 각속도를 측정하기 위한 센서는 별도로 설치되어 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 미분필터(Differentiating filter)에 고주파 신호를 감쇄시킬 수 있도록 저역통과 필터를 결합한 형태의 필터를 설계하여 사용한다.

우선 엔코더를 통해 1 [ms]로 샘플링하여 수집한 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 분석한 결과를 Fig. 6.2에 나타내었다. 차단주파수(Cut-off frequency)는 두 신호 모두 10 [Hz]로 선정하여 동일한 미분필터를 사용한다.

최종적으로 선정된 저역통과 미분필터는 다음과 같은 IIR(Infinite Impulse Response) 2차 Butterworth 필터이다.

$$F(z) = \frac{1.889z^2 - 1.889}{z^2 - 1.911z + 0.915} \quad (6.1)$$

이와 등가인 연속시간 필터는 다음과 같다.

$$F(s) = \frac{3950s}{s^2 + 88.89s + 3950} \quad (6.2)$$

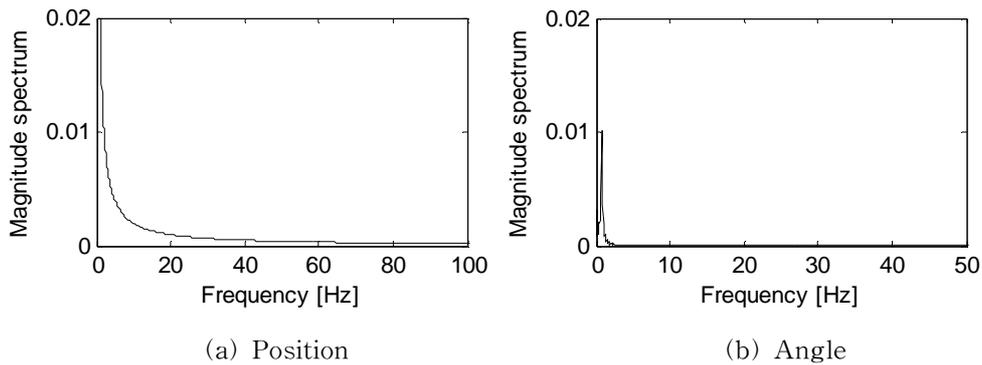


Fig. 6.2 Magnitude spectrum of trolley position and container swing angle

식(6.1)과 식(6.2)의 보드선도(Bode diagram)를 Fig. 6.3에 동시에 나타내었다. 디지털 필터와 아날로그 필터는 서로 등가임을 알 수 있으며, 미분필터지만 저역통과 필터가 결합되어 고주파신호에서 감쇄특성을 보인다.

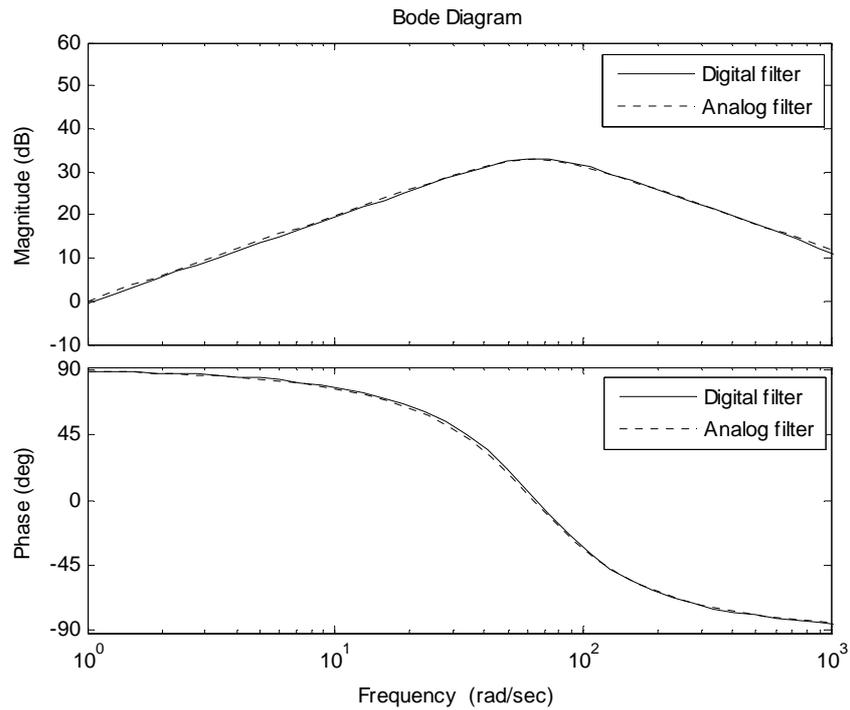
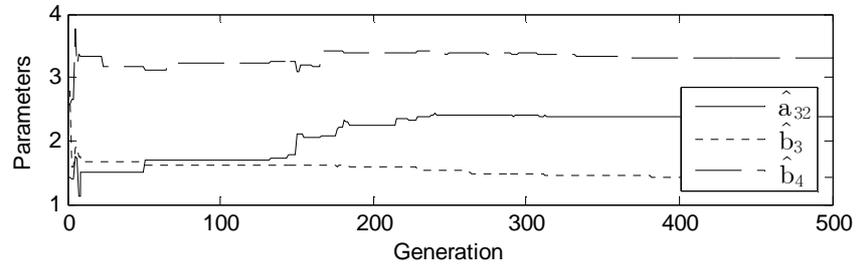


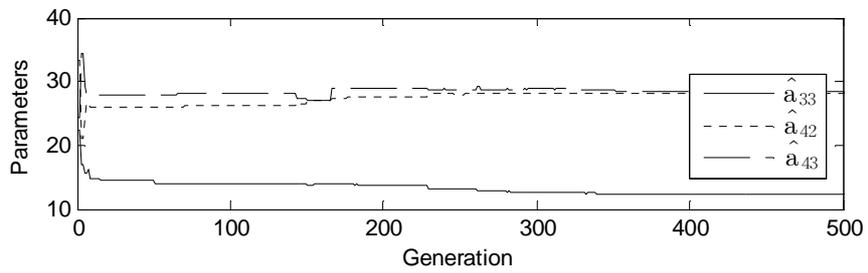
Fig. 6.3 Bode diagram of differentiating filter

이제 모형실험장치를 통해 입·출력 데이터를 획득하고, 3.2절에서 설명한 방법으로 파라미터 추정을 실시한다. 계단상의 입력인 0.55 [V]를 DC 모터에 인가하였으며, 모형실험장치 트랙(Track) 길이의 특성으로 데이터는 7.0 [s]동안 수집하였다.

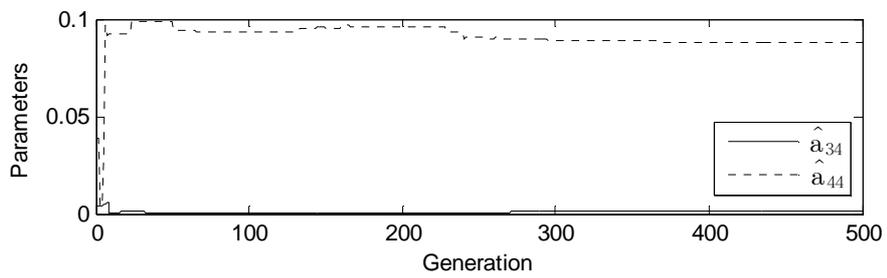
Fig. 6.4는 RCGA를 이용해 컨테이너 크레인의 파라미터를 추정하는 하나의 예이다. 이때 사용된 RCGA의 파라미터로는 집단크기 $N=30$, 재생산 계수 $\eta_i=1.8$, 교배 확률 $P_c=1.0$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 를 선택하였다.



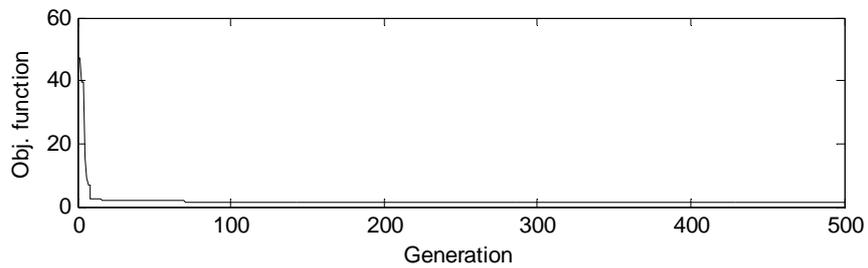
(a) Parameters : \hat{a}_{32} , \hat{b}_3 , \hat{b}_4



(b) Parameters : \hat{a}_{33} , \hat{a}_{42} , \hat{a}_{43}



(c) Parameters : \hat{a}_{34} , \hat{a}_{44}



(d) Performance index

Fig. 6.4 Parameter identification of the container crane using RCGA

일반적으로 유전알고리즘으로 얻어지는 추정치의 정밀도는 초기집단의 선택에 크게 좌우되므로 이를 배제하기 위하여 독립된 seed로 10회의 모의실험을 실시하고 평균하여 최종적으로 모델의 파라미터를 결정한다. Table 6.2는 최종적으로 얻어진 결과를 보여주고 있다.

Table 6.2 Identification results from experimental data

parameters	Values	parameters	Values
\hat{a}_{32}	-2.4096	\hat{a}_{33}	-10.9699
\hat{a}_{34}	-0.0591	\hat{a}_{42}	-28.6091
\hat{a}_{43}	-26.8945	\hat{a}_{44}	-0.1539
\hat{b}_3	1.2778	\hat{b}_4	3.0984

이로부터 고유치를 구해보면, $[0 \ -0.24 \pm j4.83 \ -10.6275]$ 가 되어 1형인 시스템임을 알 수 있다. 또한, 추정된 모델에 대해 가제어행렬과 가관측행렬을 구해보면 모두 급수(Rank) 4가되어 가제어하고, 가관측한 시스템임을 알 수 있다.

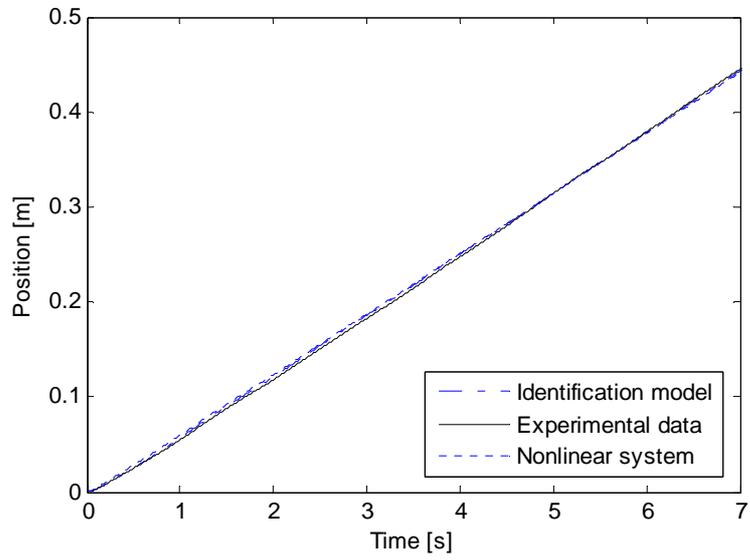
이제 RCGA를 이용해 파라미터를 추정된 선형모델의 타당성을 살펴본다. Fig. 6.5는 추정된 선형모델의 출력과 모형실험장치에서 얻은 데이터 그리고 식(3.17)과 식(3.18)로 표현된 비선형모델에 모형실험장치 파라미터를 적용한 경우의 출력을 동시에 나타낸 것이다. 단, 비선형모델의 모터 피니언의 점성제동계수 B_{eq} 와 컨테이너의 점성제동계수 B_p 는 모형실험장치의 출력을 고려하여 각각 7.2와 0.0074로 선정한다. 그림의 (a)는 트롤리의 위치, (b)는 컨테이너의 흔들림 각도, (c)는 트롤리 속도, (d)는 컨테이너의 흔들림 각속도이다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 추정된 선형모델은 모형실험장치의 데이터 그리고 비선형모델의 출력과 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, 모형실험장치는 실제 컨테이너 크레인과 달리 호이스트용 구동 모터가 설치되어있지 않아 구조적으로 호이스트용 와이어로프의 길이를 변화시키지 못한다. 그러나 본 논문에서는 호이스트용 와이어로프의 길이뿐만 아니라 컨테이너 질량도 변화가 가능한 것으로 고려하므로 모형실험장치의 파라미터를 적용한 식(3.17)과 식(3.18)의 비선형모델을 컨테이너 크레인의 비선형시스템으로 간주하기로 한다.

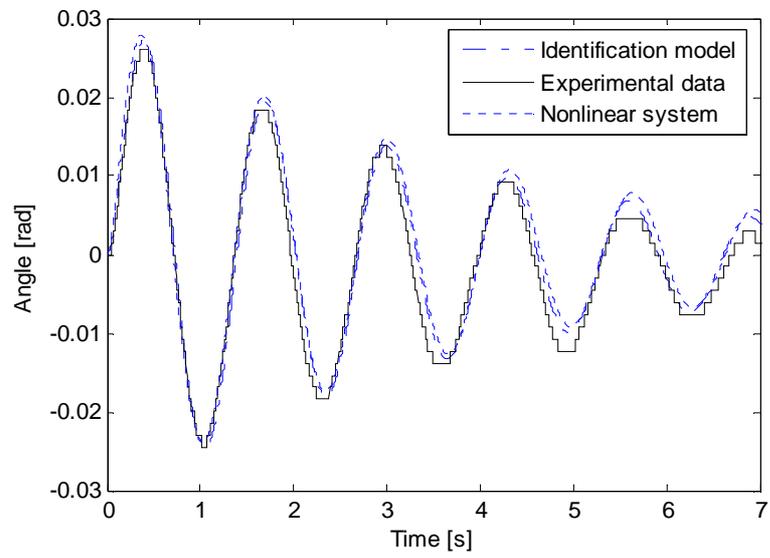
Fig. 6.5에서 모형실험장치의 데이터와 추정된 선형모델의 시뮬레이션 출력 사이에 약간의 불일치가 보이기도 하는데, 이는 다음과 같은 이유라 생각된다.

- (1) 랙-피니언(Rack-pinion)과 감속기어에 백래쉬(Backlash)가 존재한다.
- (2) 모형실험장치의 케이블이 실험 도중 끌려 마찰의 영향이 추가될 수 있다.
- (3) 트롤리가 이동하는 트랙이 완전히 평형을 이루지 못할 수 있다.
- (4) 트롤리의 속도와 컨테이너의 흔들림 각속도는 각각 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도 신호를 저역통과 미분필터에 통과시켜 생성하는데, 이때 잡음이 섞일 수 있다.
- (5) 또한 필터에 의해 신호의 지연이 발생할 수 있다.
- (6) 파라미터의 불확실성(Uncertainty)이 있을 수 있다.
- (7) 전압원에서 전류 혹은 전압의 포화(Saturation)가 생길 수 있다.
- (8) 구동부(모터)의 불감대(Dead-band)가 존재한다.
- (9) 구동부와 기어박스의 효율이 실제로는 100 [%]가 아니다.
- (10) 트롤리의 쿨롱(Coulomb) 마찰이 존재한다.

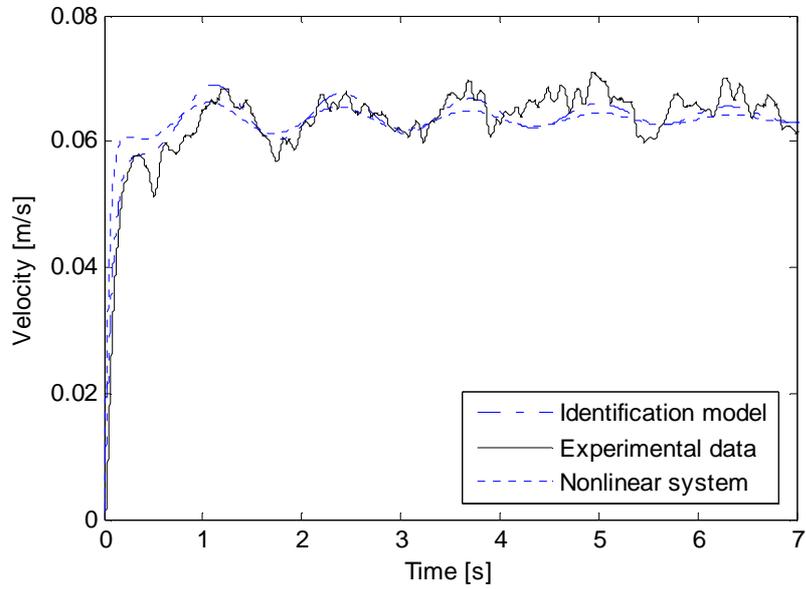
특히 Fig. 6.5의 (b)에서 보이는 흔들림 각도의 오차는 (1)-(3)의 이유가 가장 큰 요인이 되고, (c)와 (d)의 오차는 (4)-(6)에 기인한다.



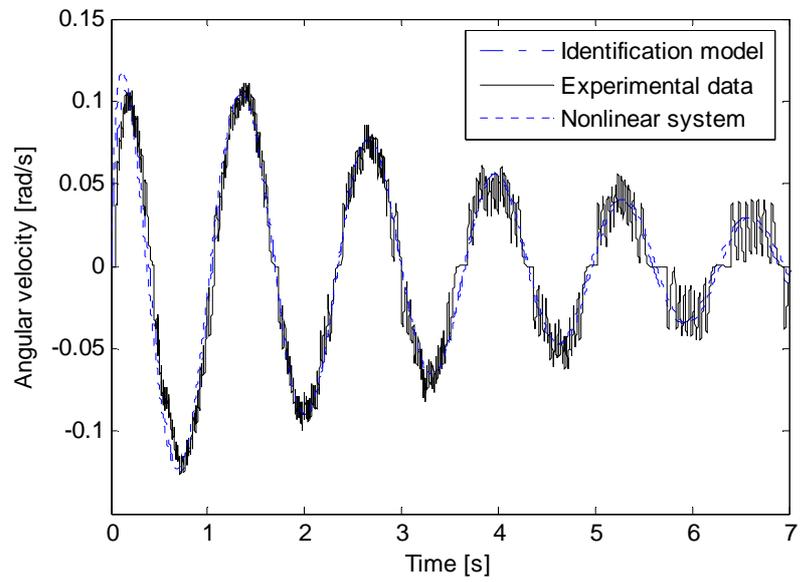
(a) Trolley position



(b) Swing angle



(c) Trolley velocity



(d) Swing angular velocity

Fig. 6.5 Verification of the identified model of the container crane

6.2 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델

다음으로 제4장에서 제안한 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델의 타당성을 살펴본다. 우선 설계변수인 호이스트용 와이어로프 길이 ℓ 과 컨테이너의 질량 m 에 따른 서브시스템은 제3장에서 설명한 파라미터 추정기법을 이용하면 Table 6.3과 같이 구할 수 있다.

Table 6.3 Subsystems for T-S fuzzy model

$\mathbf{A}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -22.057 & -37.153 & -0.2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 4.291 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.4[\text{m}], m = 0.2[\text{kg}]$
$\mathbf{A}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -28.095 & -32.798 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 3.788 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.4[\text{m}], m = 0.6[\text{kg}]$
$\mathbf{A}^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -11.028 & -18.576 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 2.145 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.8[\text{m}], m = 0.2[\text{kg}]$
$\mathbf{A}^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -14.047 & -16.399 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.894 \end{bmatrix}$	$\ell = 0.8[\text{m}], m = 0.6[\text{kg}]$
$\mathbf{A}^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -7.352 & -12.384 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 1.43 \end{bmatrix}$	$\ell = 1.2[\text{m}], m = 0.2[\text{kg}]$
$\mathbf{A}^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -9.365 & -10.932 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}^6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.262 \end{bmatrix}$	$\ell = 1.2[\text{m}], m = 0.6[\text{kg}]$

퍼지모델의 소속함수는 제4장에서 설명한 바와 같이 컨테이너 크레인 비선형 시스템의 동특성에 접근하도록 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용해 최적화된다. 이때 RCGA의 제어변수는 집단 크기 $N=30$, 재생산계수 $n_i=1.8$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 를 사용하였다. 데이터 윈도우 $W=4000$, 샘플링 주기 $T=0.01$ 로 선정하고, 입력은 임의의 신호인 $u=3.02\sin(0.5t)+2.05\sin(0.3t)+1.5\sin(1.0t)$ 를 사용하였다.

Fig. 6.6은 최종적으로 조정된 소속함수를 나타내며, Fig. 6.7은 RCGA가 소속함수 파라미터를 탐색하는 과정이다.

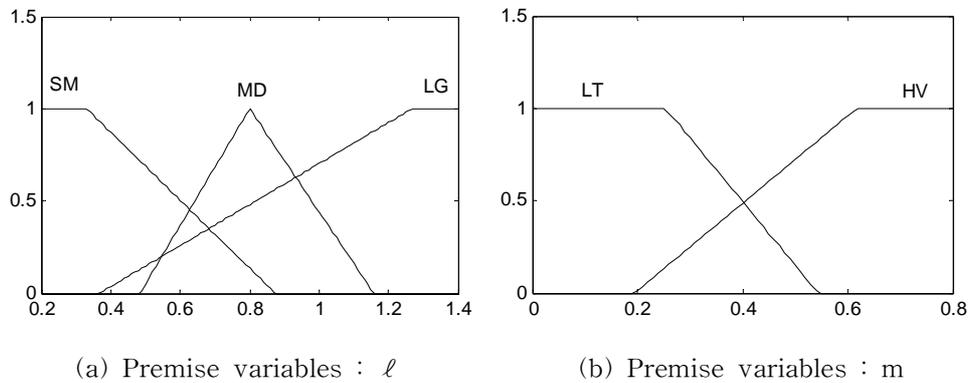


Fig. 6.6 Membership functions after tuning with RCGA

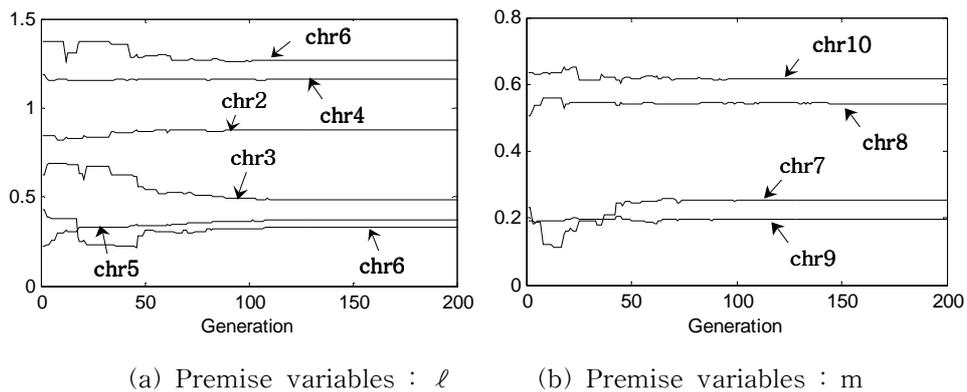


Fig. 6.7 Searching process of membership functions

Table 6.4는 RCGA에 의해 탐색된 소속함수의 파라미터 값을 나타낸다.

Table 6.4 Chromosome values for the membership function

	<i>chr1</i>	<i>chr2</i>	<i>chr3</i>	<i>chr4</i>	<i>chr5</i>	<i>chr6</i>
ℓ	0.331444	0.873211	0.485049	1.158003	0.367622	1.267454
	<i>chr7</i>	<i>chr8</i>	<i>chr9</i>	<i>chr10</i>		
m	0.253613	0.543612	0.195882	0.616477		

이제 RCGA에 의해 소속함수가 조정된 퍼지모델이 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 얼마나 잘 표현하는지를 알아보기 위해 계단상의 입력과 임의의 사인파조합 입력을 인가해 본다.

먼저 ℓ 과 m이 Fig. 6.8과 같이 4.1절에서 가정한 변화폭 내에서 변화하는 상황에서 계단상의 입력을 인가한 경우이다.

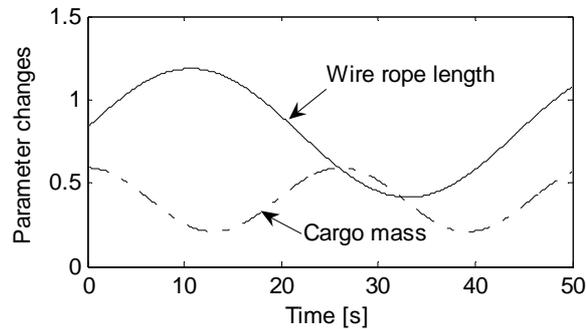


Fig. 6.8 Change of parameters : ℓ and m

Fig. 6.9는 퍼지모델의 출력과 컨테이너 크레인의 비선형시스템 출력을 동시에 나타낸 것으로 퍼지모델은 비선형시스템의 동특성에 잘 근접함을 확인할 수 있다. Fig. 6.10은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델, 비선형시스템과 네 번째 서브시스템($\ell=0.8$, $m=0.6$) 사이의 오차로서 선형모델(서브시스템)은 파라미터가 변화하는 실제 환경에서는 적용하기 어려운 모델임을 확인할 수 있다.

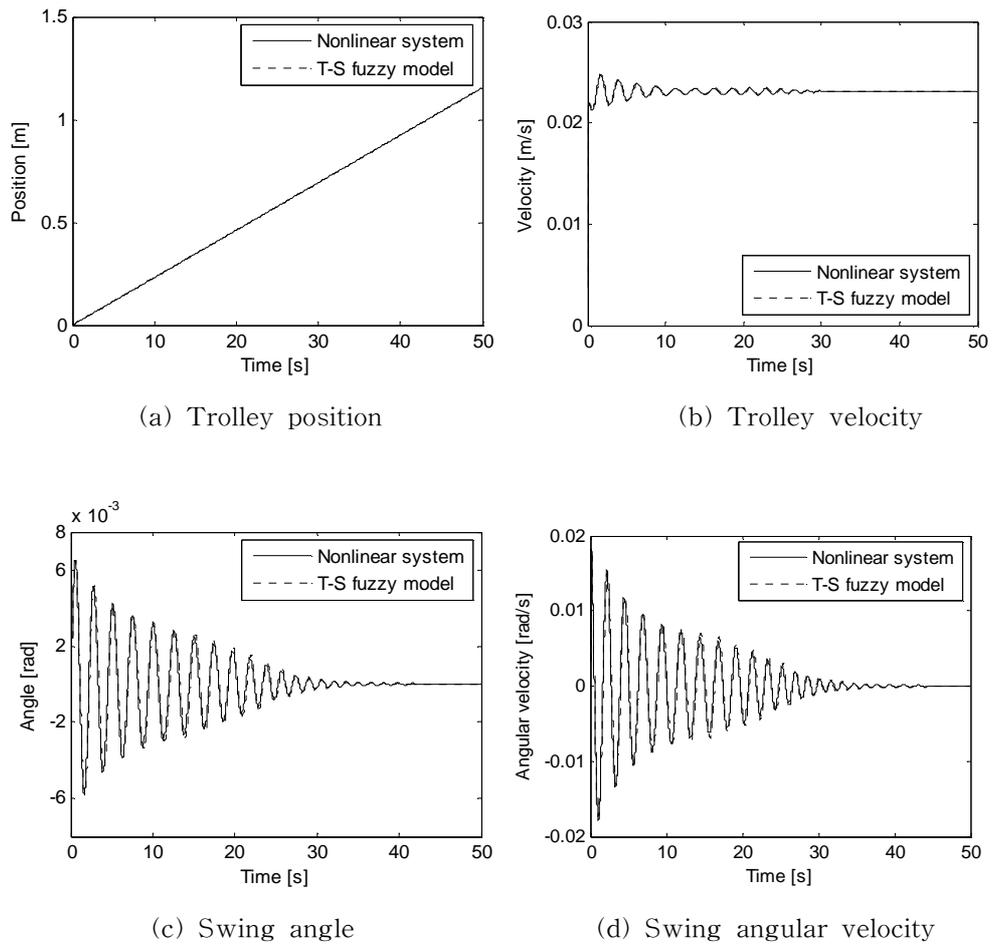
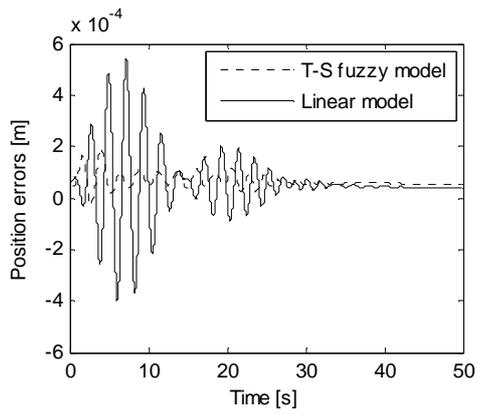
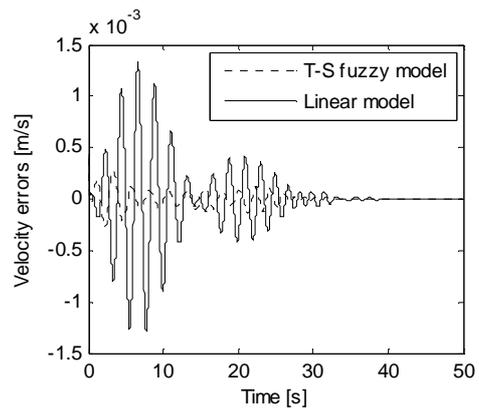


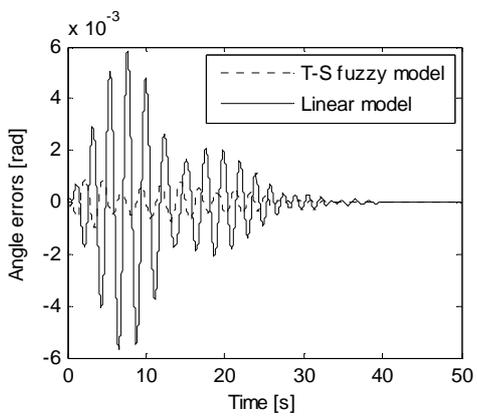
Fig. 6.9 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for container crane



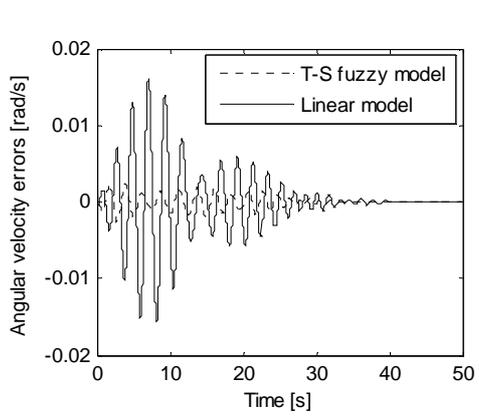
(a) Errors of trolley position



(b) Errors of trolley velocity



(c) Errors of swing angle



(d) Errors of swing angular velocity

Fig. 6.10 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system

다음은 Fig. 6.11과 같은 임의의 사인과 조합신호를 인가한 경우이다. 모형실험장치 사양과 일관성을 유지하기 위해 최대입력전압이 $\pm 6[V]$ 를 초과하지 않도록 하였다.

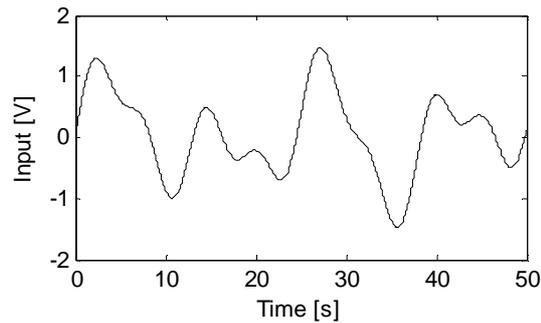


Fig. 6.11 Test input signal for validation of T-S fuzzy model

이 경우에도 T-S 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템 출력에 잘 접근하고 있음을 Fig. 6.12를 통해 확인할 수 있다.

특히 T-S 퍼지모델은 임의의 입력신호로 인해 초기에 발생하는 컨테이너의 급격한 흔들림도 아주 작은 오차범위에서 비선형시스템에 잘 접근하고 있다.

Fig. 6.13은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델, 비선형시스템과 네 번째 서브시스템 사이의 오차를 나타내고 있으며 역시 선형모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 많은 차이를 보인다.

6.2절의 시뮬레이션을 통해 T-S 퍼지모델은 파라미터가 변화하는 상황에서도 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

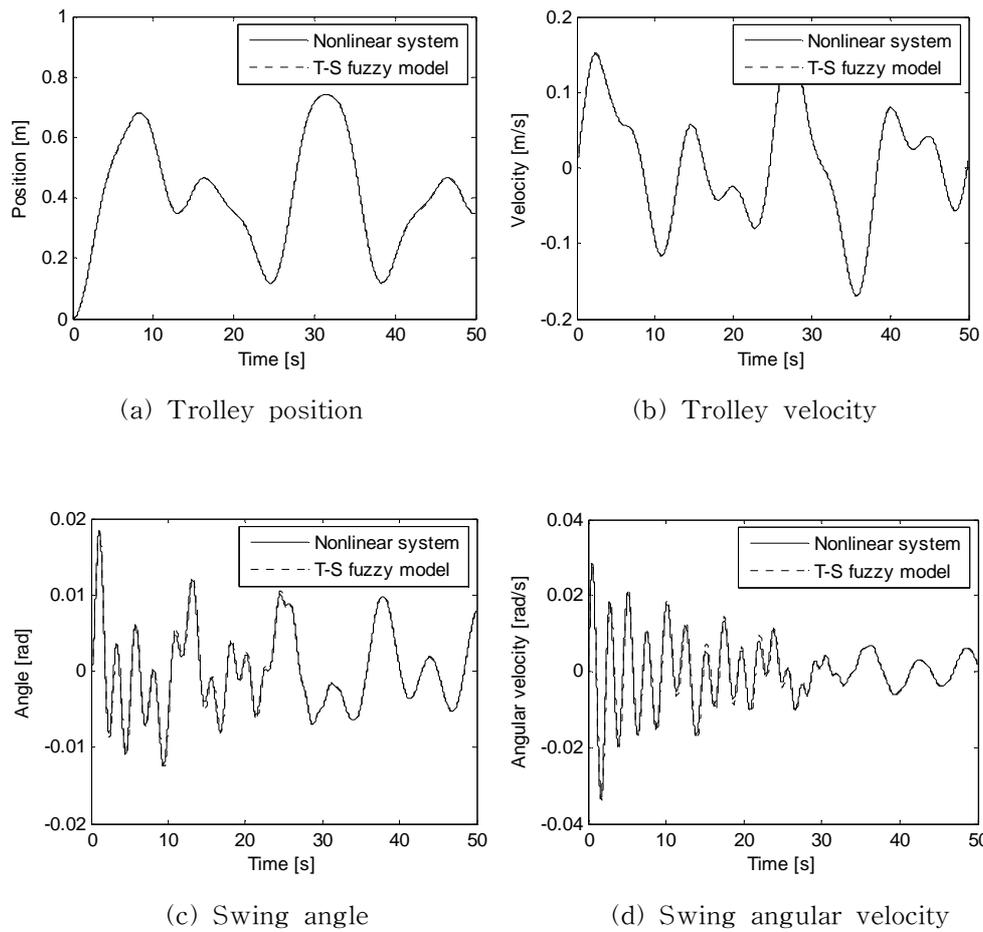
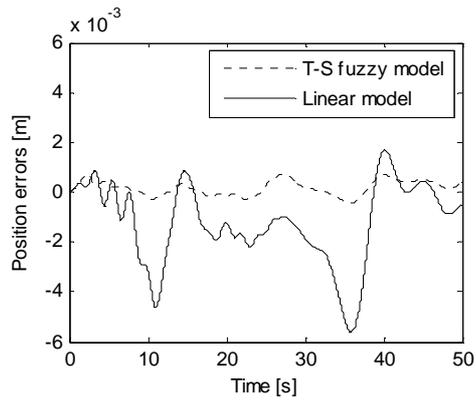
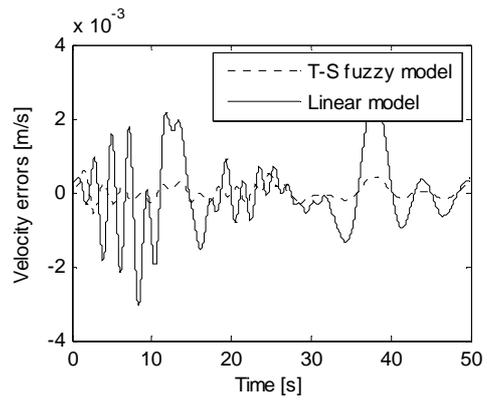


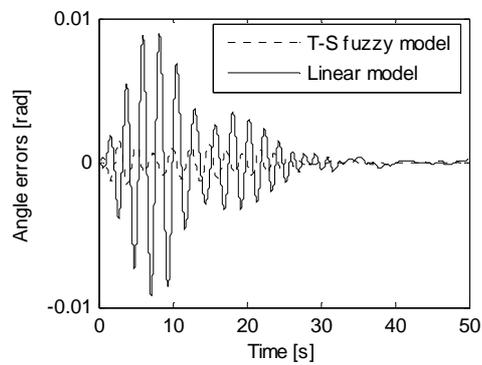
Fig. 6.12 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for container crane



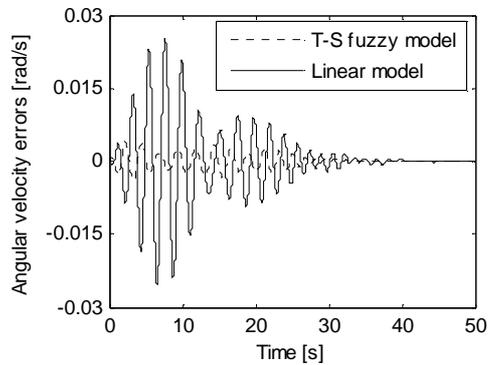
(a) Errors of trolley position



(b) Errors of trolley velocity



(c) Errors of swing angle



(d) Errors of swing angular velocity

Fig. 6.13 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system

6.3 RCGA기반 퍼지제어기

컨테이너 크레인은 작업과정에서 파라미터가 변화하기 때문에 하나의 동작점에서 구한 선형모델을 이용한 기존의 제어기는 정밀한 제어를 수행하기 어렵다. 따라서 5.2절에서 컨테이너 크레인의 파라미터 변화에 대해 강인한 제어를 수행할 수 있는 RCGA기반 퍼지제어기 설계기법을 제안하였다. 여기서는 제안한 제어기의 유효성을 확인한다.

제4장에서 구현한 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델은 다음과 같다.

퍼지모델:

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}^i : \text{IF } \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i \\ & \text{THEN } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^i \mathbf{x} + \mathbf{B}^i u, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6.3)$$

여기서 전건부 퍼지집합 M_1^i 과 M_2^i 는 Table 4.1과 같고, 후건부의 서브시스템은 Table 6.3과 같다. 또한, 이 퍼지모델에 대한 소속함수는 6.2절에서 RCGA로 조정된 Fig. 6.6이다.

식(6.3)을 식(5.15)와 같이 확장시스템으로 표시하면 다음과 같다.

확장 퍼지모델:

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_c^i : \text{IF } \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i \\ & \text{THEN } \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c^i \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c^i u - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} y_r, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6.4)$$

여기서

$$\mathbf{A}_c^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 & 0 \\ 0 & -22.057 & -37.153 & -0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 4.291 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 & 0 \\ 0 & -28.095 & -32.798 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 3.788 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 & 0 \\ 0 & -11.028 & -18.576 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 2.145 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 & 0 \\ 0 & -14.047 & -16.399 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c^4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.894 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 & 0 \\ 0 & -7.352 & -12.384 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c^5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 1.43 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_c^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 & 0 \\ 0 & -9.365 & -10.932 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_c^6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.262 \\ 0 \end{bmatrix}$$

원래의 각 서브시스템이 가제어하고, $\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{B}^i & \mathbf{A}^i \\ 0 & \mathbf{C} \end{bmatrix} = 5$ 의 관계가 만족되므로 확장시스템도 가제어하다.

식(6.4)의 서브시스템에 대하여 식(5.9)의 제어규칙을 적용하고, 이를 퍼지결합하면 다음과 같다.

제어규칙:

$\tilde{\mathbf{R}}^i : \mathbf{IF} \ell$ is M_1^i and m is M_2^i

$$\begin{aligned} \text{THEN } u^i &= -\mathbf{K}^i \mathbf{x}_c \\ &= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x} + k_2^i \int (y_r - y) dt, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6.5)$$

이때, 원래의 시스템에서 제어를 수행하면 \mathbf{x} , y 대신에 원래 비선형 시스템의 상태와 출력인 \mathbf{x}_p , y_p 를 피드백하게 되므로 식(6.5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$\tilde{\mathbf{R}}^i : \mathbf{IF} \ell$ is M_1^i and m is M_2^i

$$\begin{aligned} \text{THEN } u^i &= -\mathbf{K}^i \mathbf{x}_p \\ &= -\mathbf{K}_1^i \mathbf{x}_p + k_2^i \int (y_r - y_p) dt, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (6.6)$$

여기서 $\mathbf{K}^i (1 \leq i \leq 6)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^1 &= [96.136 \quad 17.052 \quad 27.673 \quad -12.155 \quad 80.509] \\ \mathbf{K}^2 &= [122.772 \quad 32.592 \quad 41.124 \quad -17.948 \quad 99.504] \\ \mathbf{K}^3 &= [103.288 \quad 12.747 \quad 32.289 \quad -26.101 \quad 82.822] \\ \mathbf{K}^4 &= [125.151 \quad 14.547 \quad 41.450 \quad -32.984 \quad 99.563] \\ \mathbf{K}^5 &= [115.190 \quad -9.915 \quad 35.708 \quad -46.657 \quad 86.901] \\ \mathbf{K}^6 &= [98.426 \quad -5.883 \quad 30.640 \quad -40.309 \quad 73.336] \end{aligned} \quad (6.7)$$

위의 \mathbf{K}^i 는 식(6.8)의 제약조건을 만족시키는 동시에 식(5.12)의 평가함수를 최소화 하도록 RCGA로 탐색된 것이다. 식(5.12)에서 J_2 는 식(6.9)와 같이 선정하고, 각 제약조건에 대응되는 별점상수로 M_p 에 대한 w_1 은 1.55×10^4 , t_s 에 대한 w_2 는 3×10^5 , α_{\max} 에 대한 w_3 는 1×10^4 , u_{\max} 에 대한 w_4 는 5.65×10^4 로 설정한다.

이때 RCGA의 제어 파라미터는 집단의 크기 $N=30$, 재생산계수 $n_i=1.8$, 교배 확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 를 사용하였다.

제약조건

$$g_1 : M_p \leq 0.0 [\%]$$

$$g_2 : t_s \leq 3.0 [s]$$

$$g_3 : \alpha_{\max} \leq 0.5 [\text{rad}] \quad (6.8)$$

$$g_4 : u_{\max} \leq 6.0 [V]$$

$$J_2^i = \int_0^\infty \left((\mathbf{x}_c^i)^T \mathbf{Q}_c^i \mathbf{x}_c^i + u^T \mathbf{R}_c^i u \right) dt, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.9)$$

단, $\mathbf{Q}_c^i = \text{diag}([45 \ 35 \ 10 \ 8 \ 6])$, $\mathbf{R}_c^i = 2.5$, ($1 \leq i \leq 6$)이다.

그러면 전체 규칙의 추론을 통해 얻어지는 RCGA기반 퍼지제어기 출력 u 는 최종적으로 다음과 같다. 이때 퍼지결합에 사용된 소속함수는 Fig. 6.6으로서 퍼지모델에 사용된 소속함수를 그대로 사용한다.

$$u = \sum_{i=1}^6 \xi^i u^i = \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(-\mathbf{K}_1^i \mathbf{x}_p + k_2^i \int (y_r - y_p) dt \right) \quad (6.10)$$

이제 최종적으로 설계된 RCGA기반 퍼지제어기의 유효성을 살펴보기 위해 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션 환경은 컨테이너 크레인의 적하 상황을 가정하여 m 은 0.6 [kg]의 고정된 값으로 설정하고, ℓ 은 갈수록 짧아지다가 다시 증가하도록 설정한다.

우선 기준입력 변화에 대한 제어시스템의 추종성능을 검토하기 위해 이동거리에 대해 계단상의 기준입력을 변경시켜 보았다. 비교 목적으로 호이스트용 와이어로프의 길이가 중간인 네 번째 서브시스템($\ell=0.8$ [m], $m=0.6$ [kg])에 대해 설계된 선형제어도 동시에 나타낸다. 이 선형제어기는 $Q=\text{diag}([178 \ 224 \ 20 \ 40 \ 220])$ 와 $R=0.01$ 을 사용하여 설계된 LQ제어기로 $K=[228.066 \ 207.844 \ 106.632 \ -40.278 \ 148.324]$ 의 상태피드백 이득행렬을 갖는다.

Fig. 6.14에서 확인할 수 있듯이 RCGA기반 퍼지제어기는 정상편차와 오버슈트 없이 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고, 동시에 목표위치에서 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다. 선형제어기는 정상편차와 오버슈트는 없으나, 목표위치 도달시간과 컨테이너 흔들림 안정시간이 제안한 제어기보다 길다.

Fig. 6.15와 Fig. 6.16은 외란에 대한 제어시스템의 강인성을 살펴보기 위한 것으로, 파라미터의 변화 조건은 Fig. 6.14의 시뮬레이션 환경과 동일하게 설정한다. Fig. 6.15는 트롤리가 목표위치로 이동 중인 1.5 [s]에서 0.01 [s]간 0.1 [rad]의 외란을 인가한 경우이고, Fig. 6.16은 목표위치에 도달한 후인 6 [s]에서 0.01 [s]간 0.1 [rad]의 외란을 부가한 경우이다. 이와 같은 형태의 외란은 돌풍과 같은 갑작스런 외부변화로 컨테이너가 급격히 흔들리는 상황을 고려한 것이다. 제안한 RCGA기반 퍼지제어기는 파라미터가 변화하는 상황에서의 외란 인가에도 만족스러운 응답을 보인다.

다음으로 초기조건에 대한 영향을 살펴보기 위해 컨테이너의 흔들림 각도가 0.2 [rad]으로 기울어진 상태에서 초기 각속도 0.5 [rad/s]로 움직이고 있는 경우를 고려한다. Fig. 6.17은 이에 대한 응답으로 RCGA기반 퍼지제어기는 초기조건 변화에 강인한 제어성능을 보이고 있다.

마지막으로 급격한 파라미터의 변화에 대한 응답을 알아보기 위해 호이스트용 와이어로프 길이가 큰 폭으로 변화된 것으로 가정한다. 이것은 실제 운전환경에서 존재하는 상황은 아니지만 가장 가혹한 형태의 파라미터 변화를 고려한 것이다. Fig. 6.18은 호이스트용 와이어로프 길이가 1.5 [m]로 변화한 것으로 퍼지제어기는 급격한 파라미터 변화에 대해서도 강인한 성능을 보이고 있다.

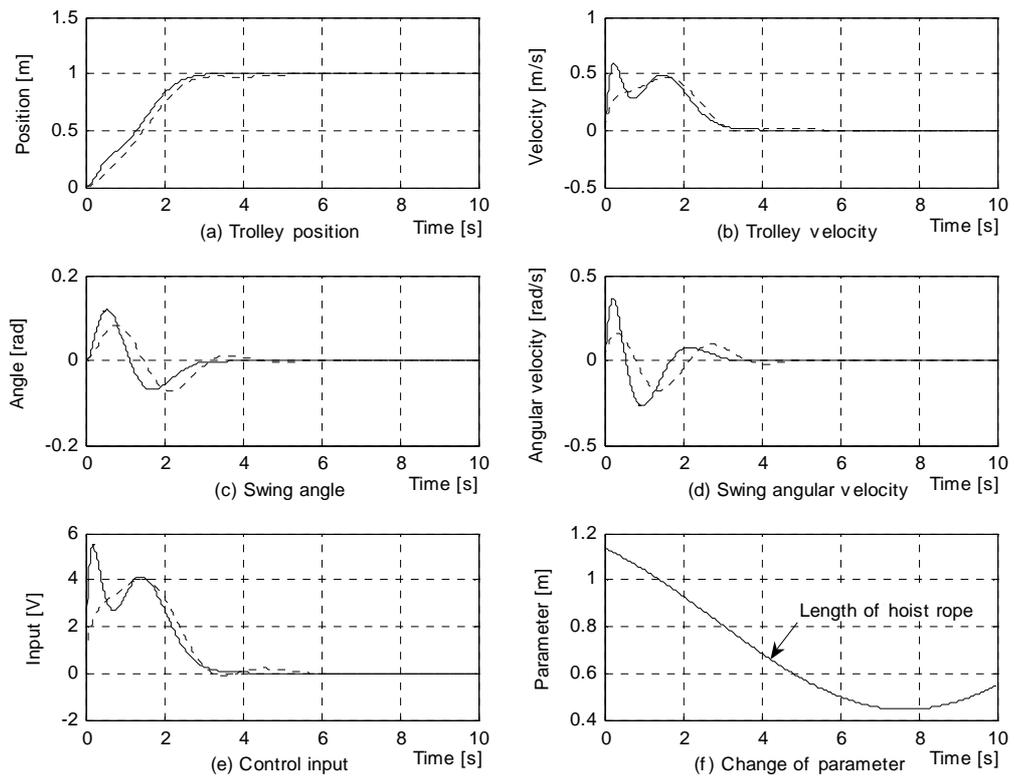


Fig. 6.14 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line)

(ℓ : sinusoidal change, m : 0.6 [kg])

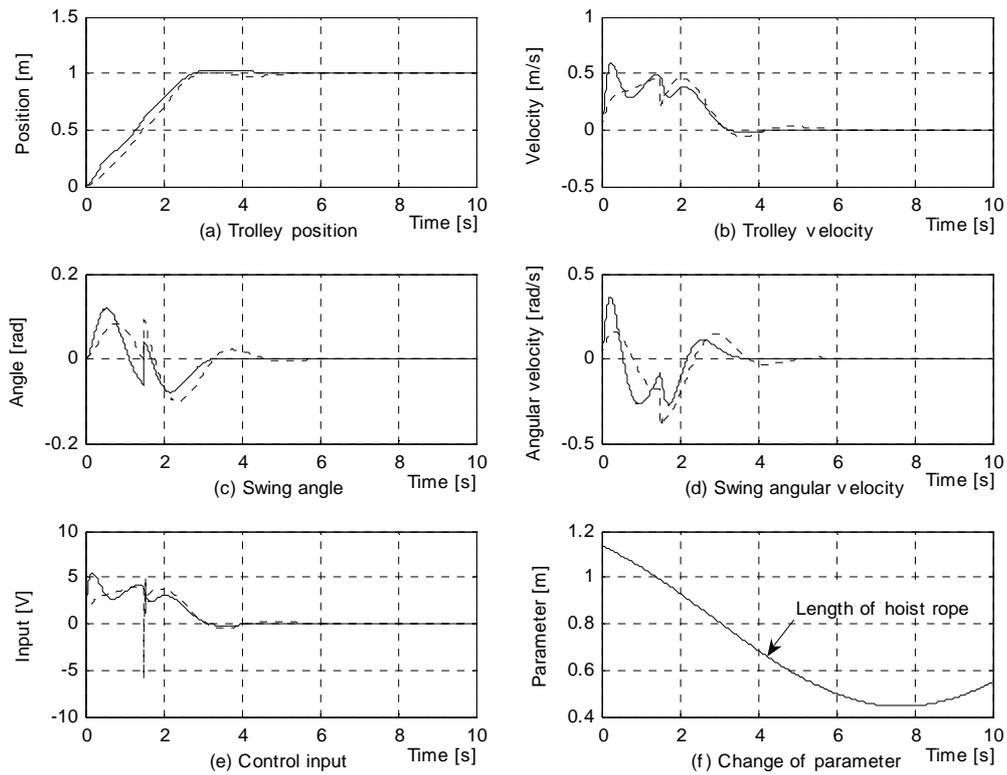


Fig. 6.15 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) (stepwise change of disturbance : 0.1 [rad] in transient state)

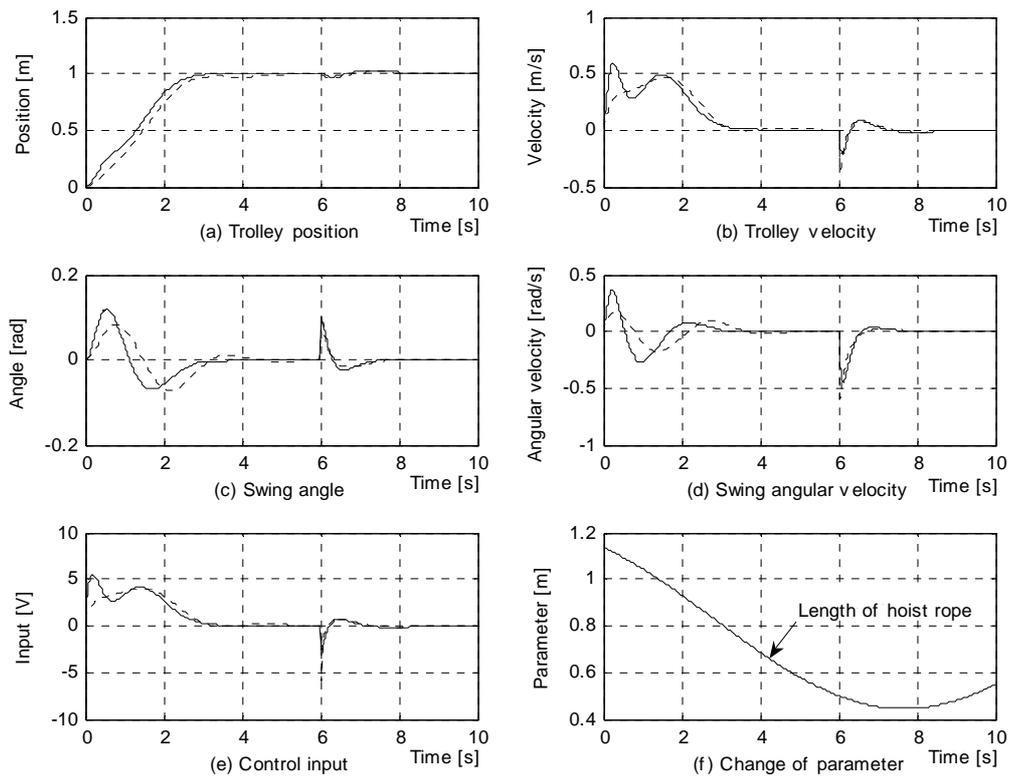


Fig. 6.16 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) (stepwise change of disturbance 0.1 [rad] in steady-state)

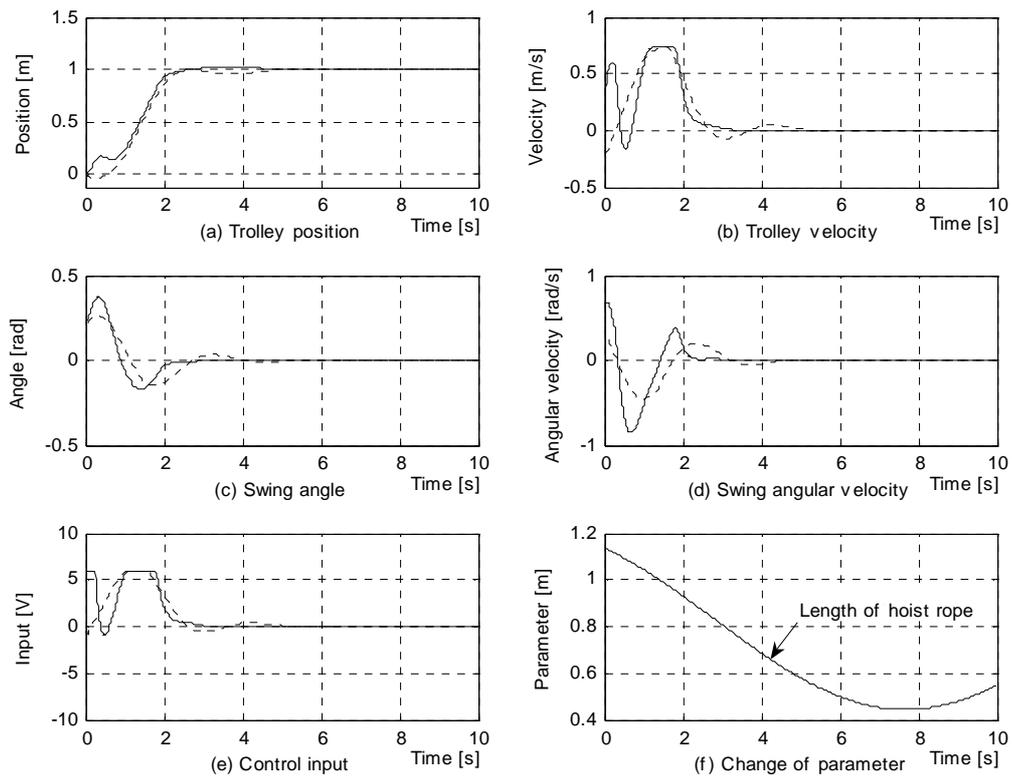


Fig. 6.17 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) when $\mathbf{x}_p(0) = [0 \ 0.2 \ 0 \ 0.5]^T$

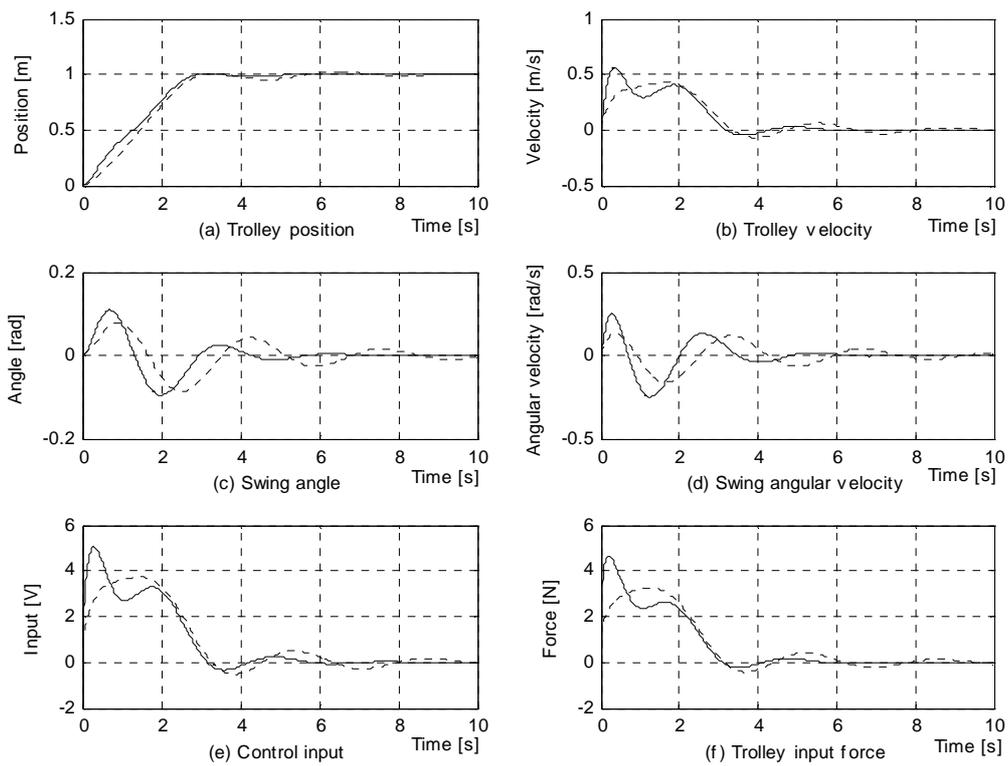


Fig. 6.18 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller (solid line) and linear controller(dotted line) (stepwise change of parameter ℓ : 1.5 [m])

6.4 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기

6.3절에서는 컨테이너 크레인의 모든 신호를 계측할 수 있다고 가정하였다. 만약 시스템의 신호를 모두 계측하기 어려운 경우에는 상태관측기를 이용하여 추정해야 한다. 5.2.2절에서 전차수 퍼지상태관측기가 결합된 퍼지제어기 설계기 법도 설명하였으나, 여기서는 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도는 비교적 쉽게 계측이 가능하므로 트롤리 속도와 컨테이너의 흔들림 각속도를 추정하는 축소차수 퍼지상태관측기만 고려하여 시뮬레이션을 실시한다.

먼저 \mathbf{E} 를 단위행렬 $\mathbf{I}(4 \times 4)$ 로 선정하면, 행렬 \mathbf{N} , \mathbf{M} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

그러면 식(5.25)에서 \mathbf{A}^i 와 \mathbf{B}^i 를 분할한 행렬 \mathbf{A}_{11}^i , \mathbf{A}_{12}^i , \mathbf{A}_{21}^i , \mathbf{A}_{22}^i 그리고 \mathbf{B}_1^i 와 \mathbf{B}_2^i 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}^i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{12}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, 6 \\ \mathbf{A}_{21}^1 &= \begin{bmatrix} 0 & -1.953 \\ 0 & -22.057 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^1 = \begin{bmatrix} -19.815 & 0 \\ -37.153 & -0.2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^1 = \begin{bmatrix} 2.288 \\ 4.291 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{21}^2 &= \begin{bmatrix} 0 & -5.174 \\ 0 & -28.095 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^2 = \begin{bmatrix} -17.492 & 0 \\ -32.789 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^2 = \begin{bmatrix} 2.020 \\ 3.788 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{21}^3 &= \begin{bmatrix} 0 & -1.953 \\ 0 & -11.028 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^3 = \begin{bmatrix} -19.815 & 0 \\ -18.576 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^3 = \begin{bmatrix} 2.288 \\ 2.145 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{21}^4 &= \begin{bmatrix} 0 & -5.174 \\ 0 & -14.047 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^4 = \begin{bmatrix} -17.492 & 0 \\ -16.399 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^4 = \begin{bmatrix} 2.020 \\ 1.894 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{21}^5 &= \begin{bmatrix} 0 & -1.953 \\ 0 & -7.352 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^5 = \begin{bmatrix} -19.815 & 0 \\ -12.384 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^5 = \begin{bmatrix} 2.288 \\ 1.430 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{21}^6 &= \begin{bmatrix} 0 & -5.174 \\ 0 & -9.365 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22}^6 = \begin{bmatrix} -17.492 & 0 \\ -10.932 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2^6 = \begin{bmatrix} 2.020 \\ 1.262 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.12)$$

또한, $(\mathbf{A}^i, \mathbf{C})$ 가 가관측하므로 $(\mathbf{A}_{22}^i, \mathbf{A}_{12}^i)$ 도 가관측하게 되어 축소차수 퍼지상태 관측기를 다음과 같이 구성할 수 있다.

축소차수 퍼지상태관측기:

$$\hat{\mathbf{R}}^i : \mathbf{IF} \ell \text{ is } M_1^i \text{ and } m \text{ is } M_2^i$$

$$\text{THEN } \dot{\mathbf{w}} = \mathbf{H}^i \mathbf{w} + \mathbf{D}^i \mathbf{y} + \mathbf{G}^i \mathbf{u}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.13)$$

여기서 \mathbf{L}^i 는 i 번째 규칙의 축소차수 상태관측기 이득행렬로서 RCGA를 이용하여 행렬 \mathbf{H}^i 의 고유값이 음의 값을 갖도록 탐색된다[41].

$$\begin{aligned} \mathbf{L}^1 &= \begin{bmatrix} 8.744 & -3.811 \\ 4.877 & 0.341 \end{bmatrix}, & \mathbf{L}^2 &= \begin{bmatrix} 5.759 & -0.790 \\ 0.622 & 2.574 \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}^3 &= \begin{bmatrix} 3.926 & 0.232 \\ 12.699 & 2.703 \end{bmatrix}, & \mathbf{L}^4 &= \begin{bmatrix} 5.918 & -1.400 \\ 14.128 & 1.606 \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}^5 &= \begin{bmatrix} 4.708 & -0.688 \\ 1.033 & 1.813 \end{bmatrix}, & \mathbf{L}^6 &= \begin{bmatrix} 8.078 & -1.630 \\ 13.528 & 1.472 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.14)$$

따라서 $\mathbf{H}^i, \mathbf{D}^i, \mathbf{G}^i$ ($1 \leq i \leq 6$)는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^1 &= \begin{bmatrix} -28.560 & -3.811 \\ -0.548 & -42.031 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^1 &= \begin{bmatrix} -28.560 & 1.857 \\ -42.031 & -22.605 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^1 &= \begin{bmatrix} 2.288 \\ 4.291 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}^2 &= \begin{bmatrix} -23.251 & 0.790 \\ -33.421 & -2.574 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^2 &= \begin{bmatrix} -23.251 & -4.384 \\ -33.421 & -30.670 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^2 &= \begin{bmatrix} 2.020 \\ 3.788 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}^3 &= \begin{bmatrix} -23.741 & -0.232 \\ -31.276 & -13.732 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^3 &= \begin{bmatrix} -23.741 & -2.186 \\ -31.276 & -13.732 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^3 &= \begin{bmatrix} 2.288 \\ 2.145 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}^4 &= \begin{bmatrix} -23.411 & 1.400 \\ -30.528 & -1.606 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^4 &= \begin{bmatrix} -23.411 & -3.774 \\ -30.528 & -15.654 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^4 &= \begin{bmatrix} 2.020 \\ 1.894 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}^5 &= \begin{bmatrix} -24.523 & 0.688 \\ -13.418 & -1.813 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^5 &= \begin{bmatrix} -24.523 & -1.265 \\ -13.418 & -9.165 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^5 &= \begin{bmatrix} 2.288 \\ 1.430 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}^6 &= \begin{bmatrix} -25.571 & 1.630 \\ -24.461 & -1.472 \end{bmatrix}, & \mathbf{D}^6 &= \begin{bmatrix} -25.571 & -3.544 \\ -24.461 & -10.837 \end{bmatrix}, & \mathbf{G}^6 &= \begin{bmatrix} 2.020 \\ 1.262 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.15)$$

그러면 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기의 출력은 비선형시스템의 측정상태와 추정상태를 각각 두개씩 피드백하므로 최종적으로 다음과 같이 추론된다.

이때 퍼지결합에 사용된 소속함수는 Fig. 6.6으로 퍼지모델, RCGA기반 퍼지제어기에 사용된 소속함수와 동일하다.

$$\begin{aligned}
 u &= - \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(\mathbf{K}_1^i \hat{\mathbf{x}}_p + k_2^i \int (y_p - y_r) dt \right) \\
 &= - \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x}_p - \mathbf{M} \tilde{\mathbf{z}}_2) + k_2^i \int (y_p - y_r) dt \right) \quad (6.16) \\
 &= - \sum_{i=1}^6 \xi^i \left(\mathbf{K}_1^i (\mathbf{x}_p - \mathbf{M} \tilde{\mathbf{z}}_2) + k_2^i z \right)
 \end{aligned}$$

제안한 제어기의 유효성을 살펴보기 전에 우선 축소차수 퍼지상태관측기가 시스템의 상태를 잘 추정하는지 살펴본다. Fig. 6.19는 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지상태관측기의 응답을 나타낸 것이다. 이는 퍼지상태관측기의 초기치가 $\mathbf{0}$ 으로 설정되고, 시스템이 $(\mathbf{x}_{p0}, u_0) = ([0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0]^T, 0.55)$ 의 상태에서 동작할 때의 응답이다. 그림에서 축소차수 퍼지상태관측기는 파라미터가 변화하는 환경에서도 컨테이너 크레인의 비선형시스템 상태를 잘 추정하고 있다.

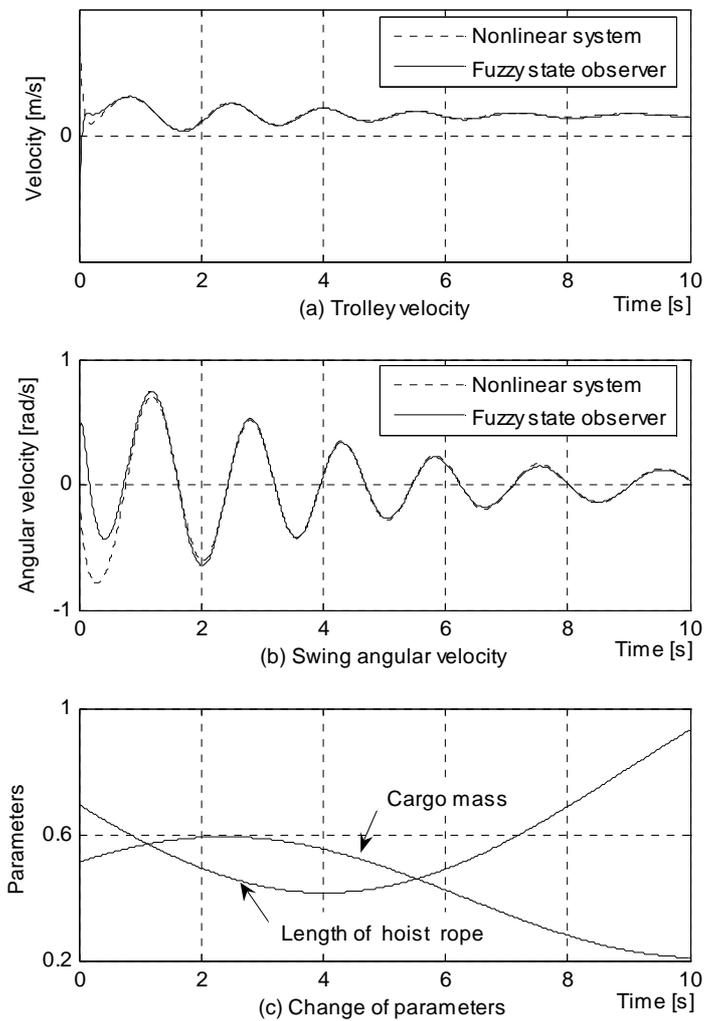


Fig. 6.19 Responses of the nonlinear system and the reduced-order fuzzy state observer

제안한 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기의 유효성을 살펴본다. 시뮬레이션 과정에서 파라미터 변화는 6.3절의 RCGA기반 퍼지제어기와 동일하게 설정한다.

Fig. 6.20은 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기와 선형제어기의 응답을 동시에 나타낸 것이다. 선형제어기는 $Q=\text{diag}([178 \ 224 \ 20 \ 40 \ 220])$ 와 $R=0.01$ 을 사용하여 설계된 LQ제어기로 앞 절의 RCGA기반 퍼지제어기와 비교된 것과 동일한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기는 정상편차와 오버슈트 없이 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고, 컨테이너의 흔들림도 잘 제어하고 있으나, 축소차수 퍼지상태관측기가 결합된 선형제어기는 목표위치 도달 시간과 컨테이너의 흔들림이 안정화 되는 시간이 길다.

다음은 외란에 대한 강인성을 살펴보기 위해서 과도상태인 1.5 [s]와 정상상태에 도달한 6.0 [s]에서 각각 0.1 [rad]의 계단상 외란을 0.01 [s]간 인가한다. Fig. 6.21과 Fig. 6.22를 통해 알 수 있듯이 축소차수 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기는 외란에 대해서도 강인한 성능을 보이고 있다.

한편, Fig. 6.23은 초기조건의 변화에 대한 영향을 살펴보기 위해 컨테이너의 흔들림 초기각도가 0.2 [rad]으로 기울어진 상태에서 초기 각속도 0.5 [rad/s]로 움직이고 있는 상황을 가정한 것이다. 역시, 제안한 제어시스템은 초기조건의 영향에 대해서도 강인한 제어성능을 보이고 있다.

마지막으로 가혹한 파라미터의 변화에 대해 살펴보기 위해 호이스트용 와이어로프의 길이가 전혀 다른 길이로 변환 것으로 가정한다. Fig. 6.24는 호이스트용 와이어로프 길이를 1.5 [m]로 변화시킨 것으로 제안한 제어시스템은 급격한 파라미터 변화에 대해서도 강인한 성능을 보이고 있으나, 선형제어기는 컨테이너의 흔들림을 제대로 제어하지 못하고 있다.

6.3절과 6.4절의 시뮬레이션을 통해서 제안한 제어시스템은 파라미터가 변화하고 외란이 존재하는 환경에서도 선형제어기보다 정정시간이 빠르고, 컨테이너의 흔들림 각 제어시간이 짧을 뿐만 아니라 정밀한 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

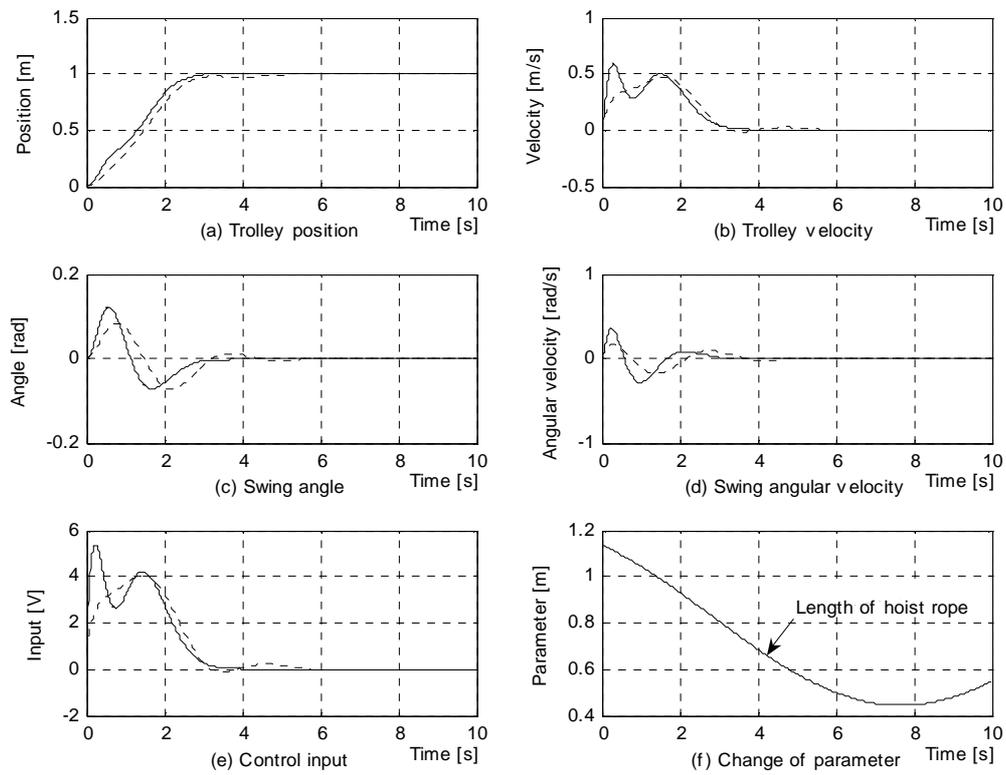


Fig. 6.20 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) with reduced-order fuzzy observer (sinusoidal change of parameter : ℓ , fixed parameter m : 0.6 [kg])

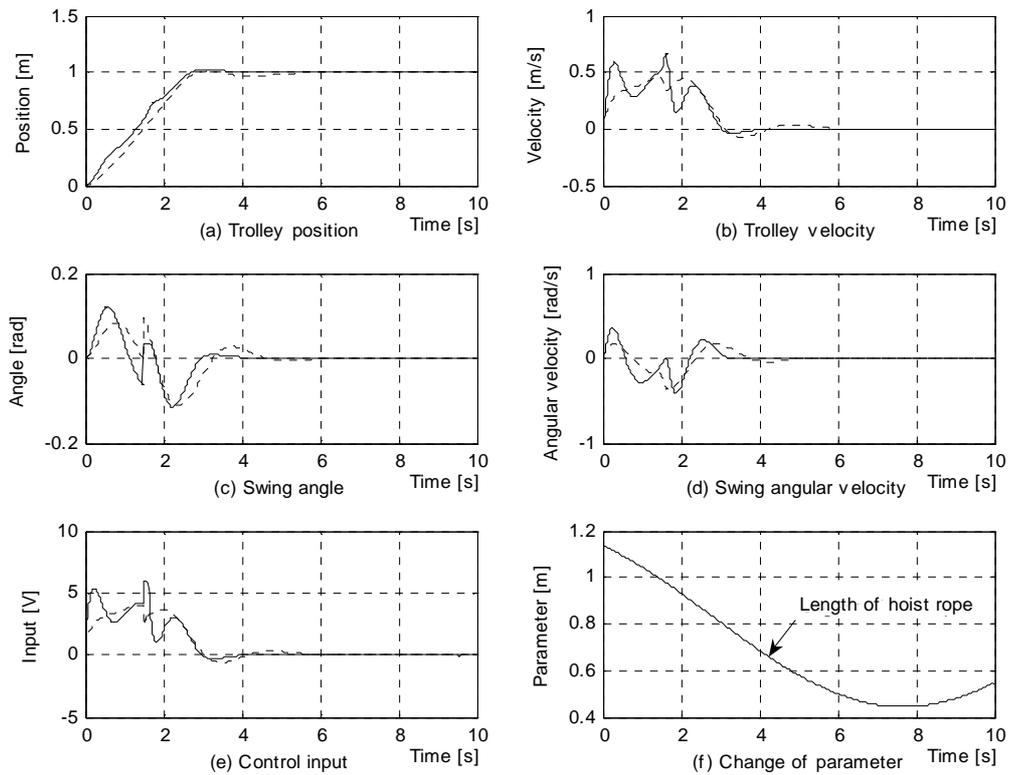


Fig. 6.21 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) with reduced-order fuzzy observer (stepwise change of disturbance : 0.1 [rad] in transient state)

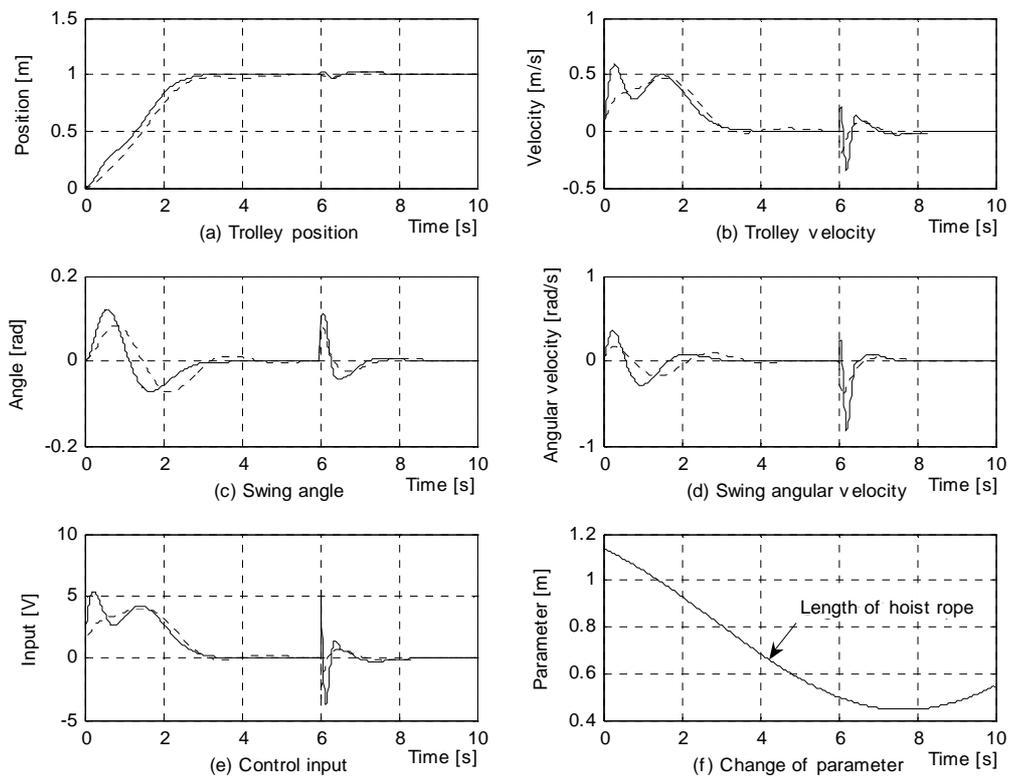


Fig. 6.22 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) with reduced-order fuzzy observer (stepwise change of disturbance : 0.1 [rad] in steady-state)

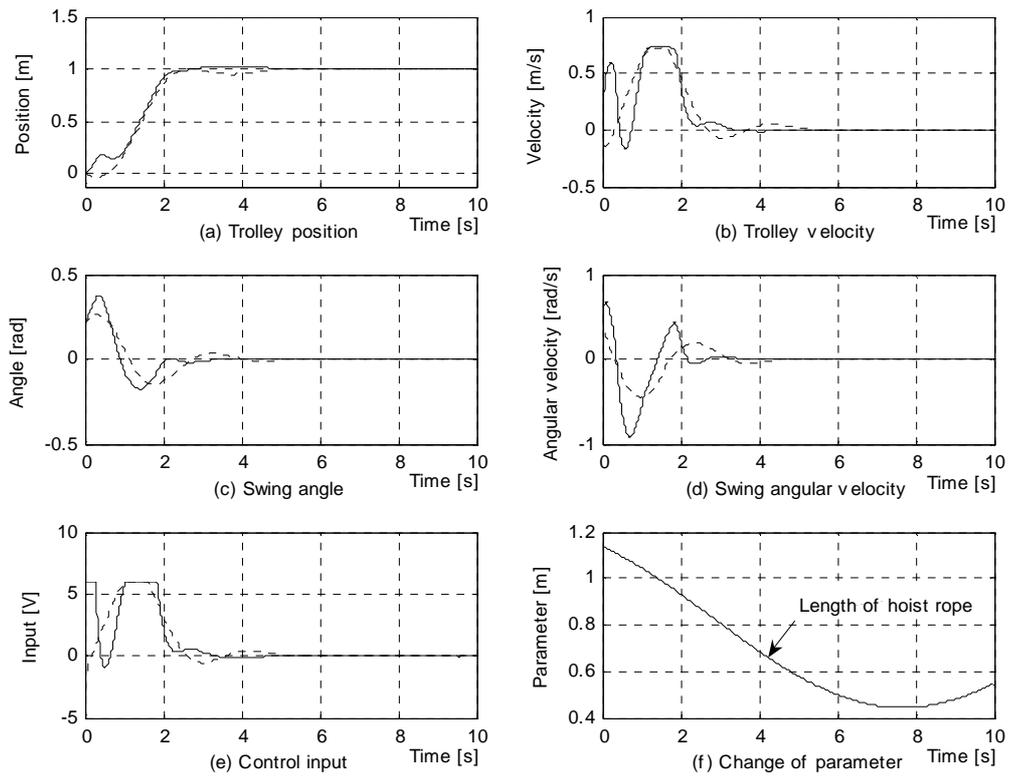


Fig. 6.23 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) with reduced-order fuzzy observer

$$(\text{Initial values : } \mathbf{x}_p(0) = [0 \ 0.2 \ 0 \ 0.5]^T, \hat{\mathbf{z}}_2(0) = [0 \ 0]^T)$$

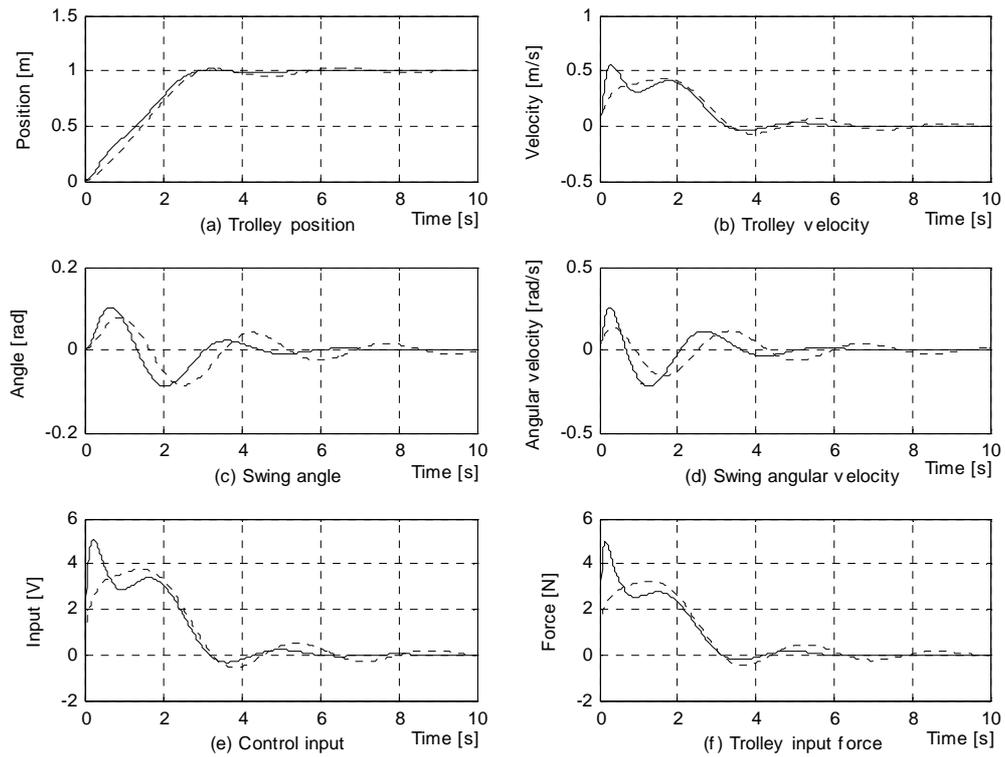


Fig. 6.24 Step responses of the RCGA-based fuzzy controller(solid line) and linear controller(dotted line) with reduced-order fuzzy observer (stepwise change of parameter ℓ : 1.5 [m])

제 7 장 결 론

컨테이너 크레인은 일반적으로 비선형성이 강할 뿐만 아니라 가변되는 호이스트용 와이어로프의 길이 및 컨테이너 질량에 따라 파라미터의 변화가 심하고, 외란이 상존하는 시스템이다. 이 경우 종래의 제어기법으로 트롤리를 목표위치에 정밀하게 추종시키고, 동시에 컨테이너의 흔들림 각을 최소로 제어한다는 것은 극히 어려운 과제 중의 하나이다.

따라서 본 논문에서는 호이스트용 와이어로프 길이 및 컨테이너 질량 변화를 설계변수로 고려하여 비선형시스템의 선형모델 파라미터를 추정하고, T-S 퍼지모델링 기법을 이용하여 트롤리의 정밀한 목표위치 추종제어와 컨테이너의 흔들림 각을 최소화시킬 수 있는 강인한 RCGA 기반의 퍼지제어기를 설계하고 그 성능을 확인하였다.

선형모델의 파라미터는 컨테이너 크레인 모형실험장치의 입·출력 데이터를 통해 모델의 동특성이 실험장치의 동특성과 일치하도록 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용하여 추정하였다. 그리고 T-S 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 파라미터 변화에 따라 다수 개의 선형 서브모델로 분할한 후, 각 소속함수의 파라미터인 폭과 중심을 RCGA 기반의 모델조정기법으로 최적화시켰다. 또한, 각 서브시스템에 대해 제약조건을 만족하도록 RCGA를 이용하여 각각의 서브제어기를 구한 후, 이들을 퍼지모델의 소속함수로 퍼지결합하여 RCGA 기반 퍼지제어기를 설계하였다. 한편, 측정 불가능한 상태변수의 문제를 해결하기 위해 퍼지상태관측기를 설계하고 RCGA기반 퍼지제어기에 결합한 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기도 제안하였다.

제안된 기법들을 컨테이너 크레인 모형실험장치와 비선형시스템에 적용하여 실험 및 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. RCGA 기반의 모델조정기법을 이용하여 선형모델의 파라미터를 추정한 결과 추정한 모델의 시뮬레이션 출력은 모형실험장치에서 취득한 데이터와 거의 일치하였다.
2. 컨테이너 크레인의 파라미터가 변화하는 환경 하에서 T-S 퍼지모델에 대해

시뮬레이션을 실시한 결과 RCGA 기반의 모델조정기법으로 소속함수가 조정된 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하고 있음을 확인하였다.

3. 시뮬레이션 결과 RCGA기반 퍼지제어기는 컨테이너 크레인의 파라미터 및 외란 변화에 대해 LQ제어기보다 강인한 응답특성을 나타내었다.
4. 다양한 시뮬레이션을 통해 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기의 성능을 확인한 결과 RCGA기반 퍼지제어기와 거의 동일한 응답특성을 나타내었다.

이상의 결과로 미루어 보아 본 논문에서 제안한 RCGA기반 퍼지제어기 및 퍼지상태관측기 결합 퍼지제어기 설계 기법은 다른 비선형시스템의 제어에도 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 실제로 상용되고 있는 컨테이너 크레인 시스템의 데이터를 획득할 수 없었던 관계로 현장 시험을 실행하지 못한 점은 향후의 연구과제로 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 최재준, “퍼지-LQ 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 강인한 제어기 설계”, 한국해양대학교 박사학위논문, 2002.
- [2] R. C. Goertz, “United State Patent Office 2806610”, 1957.
- [3] C. F. Alsop, G. A. Forster and F. R. Holmes, “Ore Unloader Automation-a Feasibility Study”, IFAC 東京大會論文集, VII-22~VII-35, 1966.
- [4] G. A. Manson, “Time Optimal Control Methods Arising from the Study of Overhead Cranes”, Ph. D. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, U.K., 1977.
- [5] I. Morishita, “A New Control Algorithm for the Grab Swing Elimination in the Automatic Operation of Traveling Cranes”, 計測自動制御學會論文, Vol. 14, No. 6, pp. 127-132, 1978.
- [6] O. Yamaguchi, “Anti-swing Control of Overhead Crane”, 材料また Process, Vol. 7, pp. 347, 1994.
- [7] T. Okawa, O. Yamaguchi and H. Sekine, “Computer Control of Overhead Crane”, NKK 기보, No. 149, pp. 40-45, 1995.
- [8] F. Boustany and B. Andra-Novel, “Adaptive Control of Non-completely Controlled Mechanical Systems Using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design”, Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 6, pp. 589-610, 1992.
- [9] 박병석, 윤지섭, 이재설, “무진동 크레인의 제어 알고리즘 설계”, 한국자동제어 학술회의 논문집, Vol. 1, pp. 260-265, 1989.
- [10] 윤지섭, “무진동 크레인의 구현을 위한 여러 가지 제어방식의 비교 연구”, 대한기계학회논문집, 제19권 9호, pp. 2399-2411, 1995.
- [11] 신선근, 최재준, 소명옥, “하역효율 향상을 위한 컨테이너 크레인의 제어기 설계”, 한국박용기관학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 110-116, 2000.
- [12] 손정기, 최재준, 소명옥, 남택근, 권순재 “LQ 제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계”, 한국박용기관학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 544-553, 2002.

- [13] R. E. Skelton, *Dynamic Systems Control*, John Wiley & Sons, 1988.
- [14] M. Drouin, H. H. Kandil and M. Marition, *Control of Complex System*, Plenum Press, 1991.
- [15] 진강규, 주상래, “실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구”, *제어·자동화·시스템공학 논문지*, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275, 2000.
- [16] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2002.
- [17] T. Tagaki and M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control”, *IEEE Trans. on SMC*, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132, 1985.
- [18] M. Sugeno, K. Tanaka, “Successive Identification of Fuzzy Model and its application to prediction of a Complex System”, *Fuzzy Sets and System*, Vol. 42, pp. 315-334, 1991.
- [19] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [20] Whitley, Darrell, *A Genetic Algorithm Tutorial*, *Statistics and Computing* (4): 65-85, 1994.
- [21] M. Gen, R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, A Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [22] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [23] J. Matyas, “Random Optimization”, *Automation and Remote Control*, Vol.26, pp. 246-253, 1965.
- [24] J. L. Kuester and J. H. Mize, *Optimization Techniques with Fortran*, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1973.
- [25] G. V. Reklaitis, A. Ravindran and K. M. Ragsdell, *Engineering Optimization: Methods and Applications*, John Wiley and Sons, 1983.
- [26] 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, 1975.
- [27] J. D. Schaffer et al., “A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization”, *Proc. 3rd*

- Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 51-60, 1989.
- [28] D. J. Montana and L. Davis, "Training Feedforward Neural Networks Using Genetic Algorithms", Proc. 11th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp. 762-767, 1989.
- [29] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, "Genetic Algorithm to Select Optimal Neural Network Topology", Proc. 35th Midwest Symposium on Circuit and Systems, Washington, 1992.
- [30] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, "MLP Optimal Selection Via Genetic Algorithms", Proc. Int. Conf. Neural Networks and Genetic Algorithms, 1993.
- [31] R. Das and D. E. Goldberg, "Discrete-time Parameter Estimation with Genetic Algorithms", Proc. 19th Annual Pittsburgh Conf. on Modeling and Simulation, pp. 2391-2395, 1988.
- [32] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 퍼라미터 추정", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 4, No. 1, pp. 76-81, 1998.
- [33] 황기현, 김태유, 임승욱, 박준호, "유전알고리즘을 이용한 모델추종형 퍼지 제어기의 설계", 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지시스템 종합학술대회 발표논문집, pp. 38-41, 1996.
- [34] 소명옥, 오세준, 이윤형, "Speed Control System for Marine Diesel Engine Using Genetic Algorithm", 한국박용기관학회지, Vol. 28, No. 2, pp. 237-242, 2004.
- [35] 이윤형, 소명옥, 정병건, 진강규, 진선호, "RCGA에 기초한 선박 가스터빈 엔진용 PID제어기의 동조", 한국박용기관학회지, Vol. 29, No.1, pp. 116-123, 2005.
- [36] 이윤형, 소명옥, 안종갑, 김민정, 유희한, 조권희, 진강규, "실수코딩 유전알고리즘을 이용한 열 시스템 모델의 식별", 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회논문집, pp. 51-52, 2006.
- [37] 신명호, 김민정, 이윤형, 소명옥, 진강규, "PPGA 기반의 시스템 파라미터 추정과 PID 제어기 동조", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 12, No.7, pp. 644-649, 2006.
- [38] 안종갑, 이윤형, 유희한, 소명옥, 진강규, "RCGA를 이용한 도립진자 시스

- 템의 파라미터 추정 및 안정화 제어”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 30, No.6, pp. 746-752, 2006.
- [39] 이윤형, 소명옥, 황승욱, 안종갑, 김민정, 진강규, “시간지연을 갖는 적분시스템용 PID 제어기의 동조규칙”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 30, No.6, pp. 753-759, 2006.
- [40] 이윤형, 유희한, 조권희, 소명옥, “RCGA 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 최적 상태 피드백 제어”, 한국항해항만학회지, Vol. 31, No. 3, pp. 247-252, 2007.
- [41] 이윤형, 안종갑, 진강규, 소명옥, “상태관측기를 이용한 도립진자 시스템의 제어”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 31, No.4, pp. 462-467, 2007.
- [42] 김민정, 이윤형, 소명옥, 하운수, 황승욱, 진강규, “RCGA를 이용한 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙”, 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 31, No. 4, pp. 448-454, 2007.
- [43] D. M. Etter, M. J. Hicks and K. H. Cho, “Recursive Adaptive Filter Design Using an Adaptive Genetic Algorithm”, Proc. '82 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Paris, France, pp. 635-638, 1982
- [44] D. J. Montana, “Automated Parameter Tuning for Interpretation of Synthetic Images”, Handbook of Genetic Algorithms, VNR Computer Library, 1989.
- [45] D. Abramson and J. Abela, “A Parallel Genetic Algorithm for Solving the School Timetabling Problem”, The 15th Australian Computer Science Conf., Hobart, 1992.
- [46] E. burke, D. Elliman and R. Weare, “A Genetic Algorithm Based University Timetabling System”, Proc. 2nd East-West Int. Conf. on Computer Technologies in Education, pp. 35-40, 1994.
- [47] M. G. Bulmer, “The Methemathical Theory of Quantitative Genetics”, Clarendon Press, 1980.
- [48] D. Whitley, “The Genetic Algorithm and Selection Pressure: Why Rank-based Allocation of Reproductive Trials in Best”, Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 116-121, 1989.

- [49] H. Schwefel, "Numerical Optimization of Computer Models", Wiley, 1981.
- [50] D. T. Pham and G. Jin, "A Hybrid Genetic Algorithm", Proc. 3rd World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, Vol. 2, pp. 748-757, 1996.
- [51] N. J. Radcliffe, "Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms", Complex Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 183-205, 1991.
- [52] A. Wright, Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, Foundations of Genetic Algorithms 1, G. J. E. Rawlin(Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1991
- [53] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structure = Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996.
- [54] J. J. Grefenstette, "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms", IEEE Trans, Syst., Man, Cybern., Vol. 16, No. 1, pp. 122-128, 1986.
- [55] K. A. De Jong, "An Analysis of the Behavior of a Class Genetic Adaptive Systems", Doctoral Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [56] M. Sugeno, "Fuzzy Set Theory Versus Bayesian Statistics", IEEE Trans. Systems, Man. and Cybern., Vol. 7, No. 3, pp. 216-219, 1977.
- [57] R. R. Yager, "On a General Class of Fuzzy Connectives", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 235-242, 1980.
- [58] J. Dombi, "A General Class of Fuzzy Operators, The De Morgan Class of Fuzzy Operators and Fuzziness Measures Induced by Fuzzy Operators", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 149-163, 1982.
- [59] D. Dubois, H. Prade, Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, 1980.
- [60] M. Mizumoto, "Pictorial Representations of Fuzzy Connectives, Part I: Cases of t-norms, t-conorms and Averaging Operators", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 31, pp. 217-242, 1989.
- [61] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I & Part II", IEEE Trans. Systems, Man. and Cybern., Vol. 20, No. 2, pp. 404-435, 1990

- [62] L. X. Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall, 1997.
- [63] 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용, 홍릉과학출판사, 1991.
- [64] E. H. Mamdani, "Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers", Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 8, No. 6, pp. 669-678, 1976.
- [65] D. Willaelys, N. Malvache and P. Hammad, "Utilisation of Fuzzy sets for System Modelling and Control", Proc. 16th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, New Orleans, LA, pp. 1435-1439, 1977.
- [66] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic Self-organising Process Controller", Automatica, Vol. 15, pp. 15-30, 1979.
- [67] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. Syst., Man and Cybern., Vol. 3, pp. 28-44, 1973.
- [68] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", IEE Proc. Control and Science, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [69] H. J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [70] Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Servo Systems", IEEE Control System Mag., pp. 65-72, 1989.
- [71] P. M. Larsen, "Industrial Application of Fuzzy Logic Control", Int. J. Man Mach. Studies, Vol. 12, No. 1, pp. 3-10, 1980.
- [72] M. Mizumoto, Fuzzy Controls by product-sum-gravity Method, Advancement of Fuzzy Theory and Systems in China and Japan, Int. Academic Publishers, 1990.
- [73] M. Mizumoto, Fuzzy Controls under product-sum-gravity Method and New Fuzzy Control Methods, Fuzzy Control Systems, CRC Press. pp. 275-294. 1993.
- [74] M. Mizumoto, "Realization of PID controls by fuzzy control methods", Fuzzy Set and System, Vol. 70, pp. 171-182, 1995.
- [75] W. Z. Qiao, M. Mizumoto, "PID type fuzzy controller and parameters adaptive method", Fuzzy Set and System, Vol. 78, pp. 23-35, 1996.

- [76] M. Maeda, S. Murakani, "An automobile tracking control with a fuzzy logic", Proc. of 3rd Fuzzy Systems Symposium, pp. 61-66. 1987.
- [77] H. Ichihashi, T. Watanabe, "Learning Control by Fuzzy Models using a Simplified Fuzzy Reasoning", J. of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, Vol. 2, No. 3, pp. 429-437, 1990.
- [78] M. Mizumoto, "Improvement Methods of Fuzzy Controls", Proc. 3rd IFSA Congress, Seattle, WA, pp. 60-62, 1989b.
- [79] L. Zheng, "A Practical Guide to Tune of Proportional and Integral(PI) like Fuzzy Controllers", IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 633-640, 1992
- [80] K. Tanaka, "Design of Model-based Fuzzy Controller Using Lyapunov Stability Approach and Its Application to Trajectory Stabilization of a Model Car", Theoretical Aspects of Fuzzy Control, John Wiley & Sons, Inc., pp. 31-50, 1995.
- [81] K. Tanaka, T. Ikeda, H. O. Wang, "Controlling Chaos via Model-based Fuzzy Control System Design", Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, pp. 1448-1493, 1997.
- [82] C. Tseng, B. Chen, H. Uang, "Fuzzy Tracking Control Design for Nonlinear Dynamic Systems via T-S Fuzzy Model", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 381-392, 2001.
- [83] A. V. Mathew, F. W. Fairman, "Transfer Function Matrix Identification", IEEE Trans. Circuit and Systems, Vol. CAS-21, No. 5, pp. 584-588, 1974.
- [84] S. Sagara, Z. Yang and K. Wada, "Identification of Continuous Systems Using Digital Low-pass Filters", Int. J. Syst. Sci., Vol. 22, No. 7, pp. 1159-1176, 1991.
- [85] B. Porter and A. Bradshaw, "Design of Linear Multivariable Continuous Time Tracking Systems," Int. J. Systems Science, Vol. 5, No. 12, pp. 1155-1164, 1974.
- [86] A. E. Bryson and Y. C. Ho, Applied Optimal Control, Ginn and Company, 1969.

- [87] A. E. Smith and D. E. Tate, "Genetic Optimization using a Penalty Function", Proc. 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms, pp. 499-505, 1993.
- [88] G. Jin, "Intelligent Fuzzy Logic Control of Processes with Time-Delays", PhD Thesis, University of Wales Cardiff, UK, 1996.
- [89] 소명옥, "뉴로-퍼지 技法을 利用한 非線型 시스템의 制御", 한국해양대학교 박사학위논문, 1997.
- [90] W. Hwang and W. E. Thompson, "Design of Intelligent Fuzzy Logic Controllers Using Genetic Algorithms", Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 1383-1389, 1994.
- [91] D. T. Pham and G. Jin, "Evolutionary Design of an Adaptive Fuzzy Logic Conrtollers for Processes with Time Delays", Proc. '94, IEEE Int. Conf. on SMC, San Antonio, TX, Vol. 1, pp. 431-436, 1994
- [92] L. X. Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control-Design and Stability Analysis, Prentice-Hall, 1994.
- [93] C. Chen, Linear System Theory and Design, Holt, Rineheart and Windston, 1984.
- [94] H.Wang, K. Tanaka, and M. Griffin, "Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi and Sugeno's Fuzzy Moel", in Proc. FUZZY-IEEE, Japan, pp.531-538, 1995.
- [95] D. G. Luengberger, "Observing the State of a Linear System," IEEE Trans. on Military Electronics", Vol. MIL-8, pp. 74-80, 1964.
- [96] D. G. Luengberger, "Observers for Multivariable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-11, No. 2, pp. 190-197, 1966.
- [97] D. G. Luengberger, "An Introduction to Observers", IEEE Trans. on, Automatic Control, Vol. AC-16, No. 6, pp. 596-602, 1971.
- [98] QUANSER User Manual, Linear Motion Servo Plants: IP01 and IP02, Gantry Crane.

감사의 글

논문 집필을 마치는 이 순간은 끝인 동시에 또 다른 시작을 의미하기에 기쁜 마음과 함께 큰 부담감이 마음 한구석에 자리하고 있습니다. 지금까지 해왔던 것보다 더욱 열심을 내어야함을 다시금 다짐하면서, 이 결실이 있기까지 도움을 주신 많은 분들께 감사를 표하고자 합니다. 누구보다 우선 학부과정에서부터 지금까지 많은 학문적 가르침을 통해 연구의 동기를 불어넣어 주실 뿐만 아니라, 인격적 가르침을 몸소 실천으로 보여주시는 소명옥 지도교수님께 감사를 드립니다. 항상 부족한 제자를 아껴주시고, 보살펴 주시는 은혜는 잊지 못할 것입니다.

본 논문의 집필에 많은 도움을 주시고, 평소 학문의 길에서 많은 가르침과 생각의 깊이를 넓혀 주시는 진강규 교수님께 감사를 드립니다. 또한 심사과정에서 면밀한 지도로 논문의 깊이를 더해주시는 오세준 교수님, 정병건 교수님 그리고 동아대학교 전기공학과 의 이준탁 교수님께 깊이 감사드립니다.

학위과정 중에 깊은 가르침을 주신 선박전자기계공학부의 유희한 교수님, 기관시스템공학부의 조권희 교수님, 김종도 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 학회 참가해서 뵈는 때 마다 격려해 주시고, 많은 자문을 해주신 목포해양대학교 기관시스템공학부의 남택근 교수님께도 감사드립니다. 더 가까이 계셨으면 더욱 많은 가르침을 받았을 텐데 하는 아쉬움이 항상 마음에 남아 있습니다.

학부과정에서부터 많은 격려와 가르침을 주시는 한국항만연수원의 최재준 교수님께 감사드립니다. 교수님의 마음 깊으신 배려와 격려는 항상 마음에 간직하고 있습니다. 또한 많은 것을 나누어 주시는 안종갑 교수님께도 감사를 드립니다.

늘 가까이에서 힘을 주시는 우리 자동제어 연구실의 멤버인 하용이 형, 경석이 형, 기탁이 형께 감사드립니다. 그리고 지금은 세일세레스에서 근무하고 있는 우철이에게도 고마운 마음을 전합니다. 학창시절 가장 친하게 지낸 동기인 승영이 형도 이 순간 생각이 납니다.

마지막으로 손자 걱정애 여념이 없으신 할머니님과 부모님, 동생 장희 그리고 친척들과 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2007년 7월... 자동제어 연구실에서...