

CMAC 신경회로망을 이용한 가솔린 분사 제어 시스템에 관한 연구

한아균 · 탁한호*

The injection petrol control system about CMAC neural networks

Ya-Jun Han · Han-Ho Tack*

Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Gyeongnam 52725, Korea

요 약

본 논문에서는 산소 센서를 이용하여 CMAC 신경회로망 학습제어에 의한 차량의 연료분사 제어방법에 대해 논한다. 기본 차량 내연기관과 연료 분사 제어시스템의 동역학적인 비선형성으로 인하여 불연속적인 연료를 분사한다. 정밀 연료 분사량 제어에 어려움을 발생시키기 때문에 엔진성능은 저하된다. 본 연구에서는 CMAC 신경회로망을 이용한 연료 분사시스템을 제안한다. CMAC 신경회로망은 매우 넓은 범위의 함수로부터 비선형 관계를 학습할 수 있고, 학습이 빠르며, 수렴 특성을 가지고 있다. 그리고 산소 센서의 출력특성을 파악하여 연료분사 속도를 계산해서 설정된 공연비 값을 유지시켜준다. 게다가 기존 가솔린 엔진의 구조변경이 없이 어떤 상황에서도 공연비를 정밀하게 제어할 수 있으며, 배기가스 배출량을 절감시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통해 일반적인 차량의 제어 방법과 비교 분석하였고, 제안된 방법이 차량의 연비 향상과 친환경 성능 등에 더 효과적임을 확인하였다.

ABSTRACT

The paper discussed the air-to-fuel ratio control of automotive fuel-injection systems using the cerebellar model articulation controller(CMAC) neural network. Because of the internal combustion engines and fuel-injection's dynamics is extremely nonlinear, it leads to the discontinuous of the fuel-injection and the traditional method of control based on table look up has the question of control accuracy low. The advantages about CMAC neural network are distributed storage information, parallel processing information, self-organizing and self-educated function. The unique structure of CMAC neural network and the processing method lets it have extensive application. In addition, by analyzing the output characteristics of oxygen sensor, calculating the rate of fuel-injection to maintain the air-to-fuel ratio. The CMAC may easily compensate for time delay. Experimental results proved that the way is more good than traditional for petrol control and the CMAC fuel-injection controller can keep ideal mixing ratio (A/F) for engine at any working conditions. The performance of power and economy is evidently improved.

키워드 : CMAC 신경회로망, 연료분사 제어, 산소제어, 공연비

Key word : CMAC neural network, automobile engine, injection petrol control, ideal mixing ratio

Received 10 November 2016, Revised 19 December 2016, Accepted 04 January 2017

* Corresponding Author Han-Ho Tack(E-mail:fmtack@gntech.ac.kr, Tel:+82-55-751-3332)

Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.2.395>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

현재 세계적으로 대두되고 있는 지구 환경문제에 의한 배출가스의 제한과 더불어 연소를 원리로 하는 동력원에서는 필수 불가결하게 발생하는 이산화탄소의 발생이 제한되고 있는 실정이며 이는 곧 고효율의 엔진개발이 필수적임을 의미한다. 가솔린 엔진 분사제어 분야의 기술발전은 석유의 고갈로 인해 저연비화, 고효율화, 고출력화를 목표로 이루어져 왔다. 또한, 산업의 발전과 차량의 증가에 의해 발생하는 대기오염 문제가 근래에 들어 심각한 위기에 도달하고 있다. 이를 극복하기 위해서 연비향상 및 배출가스 저감을 목적으로 고효율 엔진이 개발하는 것이 중요하다.

직접 분사식 엔진은 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 장점을 동시에 구현한 기술이며, 연료를 연소실 내에 직접 분사하여 성층화된 연소 장을 이용하여 벽류 저감과 동시에 연비 향상효과를 얻고 있다. 그런데 기본 직접 분사식 가솔린 엔진의 경우 성층 연소를 이용하면 출력의 저하가 나타날 뿐만 아니라, 성층 연소로 인해서 이산화탄소의 배출량도 늘어난다[1]. 배기배출물 저감과 연비향상을 동시에 달성하기 위해서는 정밀 연료분사 제어 시스템이 필수적이다. 제어목표 값은 배기 및 연비와 같은 엔진성능 극대화를 위해 최적화 되어 있기 때문에, 빠르고 정밀하게 목표 값 추종이 가능한 분사제어 기술은 중요하다. 기본 차량 내연기관과 연료 분사 제어시스템의 동역학적인 비선형성으로 인하여 불연속적인 연료를 분사한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 CMAC(Cerebellar Model Articulation Controller) 신경회로망 기반의 가솔린 분사제어 시스템을 설계하였다. 인공 신경회로망은 생물학의 신경회로망에서 영감을 얻은 통제학적 학습 알고리즘으로 CMAC 신경회로망은 매우 넓은 범위의 함수로부터 비선형 관계를 학습할 수 있고, 학습이 매우 빠르며, 수렴 특성이 좋으므로 신경회로망 응용에서 좋은 알고리즘이라 할 수 있다[2]. CMAC 신경망은 지역적 구조로 비선형제어에 적용 시 좋은 성능을 보이는 것이 잘 알려져 있다. 한편으로 CMAC의 원대 중간 변수 변환 함수들은 퍼지 이론의 소속 함수들로 대체하여 CMAC의 출력을 부드럽게 하고 함수 어림 능력을 향상하였다[3]. 산소 센서는 산소 농도를 대기 중의 산소 농도와 비교 하여 농후 또는 희박 정도를 전기적 신호로 전환하여 ECU로 입력시킴

으로써 ECU가 연소실 내의 혼합기 농도를 파악한 후 이론 공연비와 차이가 있을 경우 피드백을 실시하여 연소실 내의 혼합기를 이론 공연비로 조절하여 배기가스의 발생을 줄이게 된다. 우선 산소 센서를 통해 공연비의 농후함에 따라 출력특성을 파악한다. 이때 CMAC 신경회로망을 적용하여 연료분사 속도를 계산해서 설정된 공연비 값을 유지시켜준다. 기존 가솔린 엔진의 구조변경 없이 균일한 공연비를 제어할 수 있기 때문에 연비저감 및 출력향상 등 직접 분사식 가솔린 분사 제어의 단점을 보완할 수 있다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문의 방법에 의한 설계된 제어시스템의 성능을 검증한다.

본 논문의 2장에서는 CMAC 신경회로망에 대한 설명하고, 3장에서 CMAC 신경회로망을 이용한 연료 분사제어시스템 설계방법을 제시하였고, 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 연료 분사 시스템의 성능을 검증하고 결론은 맺는다.

II. CMAC 신경회로망

CMAC는 인간의 소뇌를 단순 모델링한 신경회로망으로서 그림 1은 1975년 Albus[4,5]가 발표한 모델이다. 이 모델은 상위레벨 명령센터 또는 센서로부터의 정보는 양자화되고 개념적 메모리에 대한 주소로 사용된다.

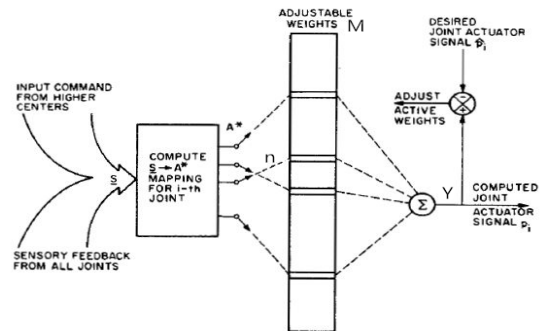


Fig. 1 CMAC model of Albus

그림 1에서 CMAC는 다음과 같은 순차적 사상(mapping)으로 구성되어 있다.

$$S - M - A - P \quad (1)$$

식 (1)에서 S는 입력 벡터, N은 중간 변수, A는 메모리 어드레스, P는 출력 벡터이다.

CMAC에서 상태에 대한 정보는 메모리에 분산되어 저장되고, 주소의 키로써 상태변수를 이용하여 검색하게 된다. 데이터 검색을 위해 상태변수들은 중간변수들로 사상된 다음 출력 값을 검색하기 위해 물리적 메모리 주소로 사상된다.

첫 번째, 사상 S-M에 대하여 각 상태변수 s는 그림 2의 단일 입력변수의 블록분할에서 보여진 것처럼 몇 개의 블록으로 분류되고, 각 블록은 다시 몇 개의 요소로 분류된다. 그림 2에서는 각 변수에 대하여 블록이 네 개의 층으로 구성되어 있다[4,5]. 각 층에서 각 블록은 인 식명으로 배치된다.

그러므로 양자화된 하나의 상태는 여러 개의 층에 속하는 블록명의 집합으로 특징지을 수 있다.

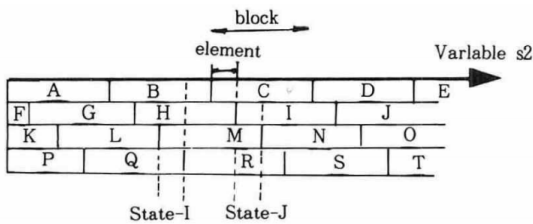


Fig. 2 Block separation of CMAC at uni-input variable

두 번째, 사상 M-A는 중간변수들이 메모리 어드레스로 사상되는데, 이 사상과정에서 해시코드(hash coding)가 이용된다. 해시코드는 크고 간헐적으로 밀집된 메모리 어드레스 공간을 보다 적고 밀접한 메모리 공간으로 압축하기 위한 메모리 어드레스 기법인데, 해시코드를 사용하여 메모리를 효율적으로 이용할 수 있다.

마지막으로 상태에 대한 물리적 메모리 어드레스의 모든 내용은 출력을 만들기 위해 합해지는데 이 과정이 A-P 사상이다. 결과적으로 한 상태를 포함하는 물리적 메모리 영역의 모든 하이퍼큐브(hypercube)들은 상태의 출력을 계산하는데 공헌하게 된다. 각 하이퍼큐브는 여러 개의 상태를 포함하여 공유하게 된다. 메모리를 공유하는 것은 CMAC가 일반화된 좋은 특성을 갖고 있음을 나타내며, 하이퍼큐브의 크기는 블록 수에 의해서 결정되기 때문에 일반화의 정도를 조절할 수 있다.

$y(i)$ 를 상태 i 에 대한 CMAC의 출력이라 하고 I 를 상태 i 를 위한 블록명, $m(I)$ 를 블록 I 에 해당하는 메모

리의 값이라고 하면, 상태 i 에 대한 값 $y(i)$ 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$y(i) = \sum_I^0 m(I) \quad (2)$$

한편 상태 i 에 학습시켜야할 목표 값을 y_d 라고 하면 y_d 와 $y(i)$ 의 차이 값에 비례하는 갱신량 ω 가 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\omega = \xi(y_d - y(i)) \quad (3)$$

여기서 ξ 는 [0 1]의 값을 갖는 학습 계수이다. 그런데 상태 i 에는 다수의 메모리가 관여되어 있으므로 이 메모리의 수를 C 라고 하면 상태 i 를 구성하고 있는 개개의 메모리는 다음 식 (4)와 같이 ω 값을 C 로 나눈 값 $\dot{\omega}$ 에 의해 갱신된다.

$$\dot{\omega} = \xi \frac{(y_d - y(i))}{C} \quad (4)$$

III. CMAC를 이용한 연료 분사 제어

3.1. CMAC을 이용한 연료 분사제어 시스템

자동차 연료분사에 관하여 전자제어를 위한 센서에는 공기유량 센서, 흡기온도 센서, 대기압 센서, 스로틀 포지션 센서, 산소 센서, 냉각수 온도 센서 등이 있다. 자동차의 중앙처리 장치인 ECU는 이들 센서에서 보내오는 정보를 이용하여 연료분사를 제어한다[6].

본 논문에서는 차량의 산소 센서의 정보에 대해서 CMAC 신경회로망을 적용시켜 균일한 공연비를 제어한다. 대기 중으로 방출되는 배기가스 배출량의 최소화를 위해서는 삼원촉매장치의 정화효율을 극대화하여야 한다. 이를 위해서는 엔진에서 발생하는 배기 가스량을 줄여야 하며, 배기가스 중의 산소 농도로 연소실 내의 혼합기 상태를 간접적으로 판단할 수 있다[7,8]. 산소 센서는 배기 다기관 내에 설치되어 배기 다기관으로 배출되는 연소가스 중의 산소 농도를 대기 중의 산소 농도와 비교 하여 농후 또는 희박 정도를 전기적 신호로 전환하여 ECU로 입력시킴으로써 ECU가 연소실 내의 혼합기 농도를 파악한 후 이론 공연비와 차이가 있을 경우 피드백을 실시하여 연소실 내의 혼합기를 이론 공연비로 조절하여 배기가스의 발생을 줄이게 된다. 본

논문에서 제안하는 CMAC 신경회로망을 이용한 연료 분사제어 시스템의 구조는 그림 3과 같다.

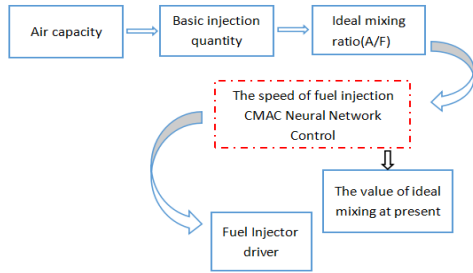


Fig. 3 Fuel distribution control system using CMAC

산소 센서의 출력특징을 파악하며 CMAC 신경회로망을 적용하여 연료 분사 속도를 계산해서 설정된 공연비 값을 유지시키며, 기존 가솔린 엔진의 구조변경 없이 넓은 범위의 공연비를 정밀하게 연료 분사 제어함으로써 연료 소비량과 배기가스 배출량을 저감시킬 수 있다. 그리고 산소센서의 출력특징은 그림 4와 같다.

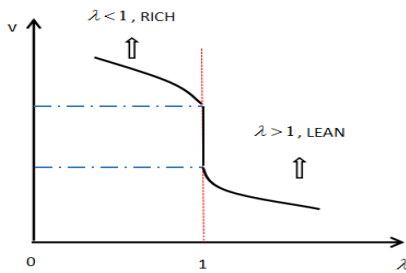


Fig. 4 Output of oxygen sensor

가솔린이 완전 연소되려면 연료대비 14.7배 질량의 산소가 필요하다. 이런 비율 단위는 λ 라는 단위를 사용하고, 연료와 산소의 비율이 정확히 맞추어져 완전 연소되는 비율을 $\lambda = 1$ 이라고 한다. 연료가 많은 상태를 RICH라고 하며 $\lambda < 1$ 이 되고, 산소가 많은 상태는 LEAN이라고 하며 $\lambda > 1$ 이 된다. $\lambda = 1$ 을 기준으로 RICH와 LEAN 상태로 움직이게 된다. 보통 LEAN 상태에서는 100mV 미만의 전압을 출력하고, RICH한 상태일 경우 1000mV의 전압을 출력한다. 그림 4에서 보는 것처럼 특성이 선형화하지 못하고 $\lambda = 1$ 의 기준으로 출력이 급반전하게 된다.

3.2. 공연비의 연료 분사속도 함수

공연비는 공기와 연료의 혼합비율로써 이론 공연비인 14.7:1일 때 가장 연료의 효율이 좋다. ECU에서는 혼합기의 혼합비율을 최대한 이론 공연비에 맞추도록 제어하다. 본 논문에서는 공연비의 농후함에 따라 연료 분사속도를 계산하여 설정된 공연비 값을 유지시켜서 연료 소비량과 배기가스 배출량을 저감시킬 수 있다. 공연비에 대한 연료 분사 속도를 구하는 식은 다음 식 (5)와 같다.

$$\dot{m} = \frac{V_e \eta_{vol} P_m \omega_e}{4\pi R \beta T_m} \quad (5)$$

식 (5)에서 P_m 는 매니폴드 압력, T_m 는 매니폴드 온도, V_e 는 실린더 전용적, R 는 공기계수, β 는 공연비, ω_e 는 엔진 공전 속도, η_{vol} 는 섭취 효율이다.

엔진 내부연료 상태의 결정적인 중요한 요인은 매니폴드 압력과 엔진 공전속도이다. 본 논문에서 CMAC 신경회로망의 입력은 매니폴드 압력과 엔진 공전속도를 정해 주고, 산소 센서의 출력은 연료 분사 속도 \dot{m} 를 정해준다. CMAC는 센서의 출력이 이 목표 값과 일치할 수 있도록 학습된다. 그리고 식 (4)에 따라 학습시켜야 할 목표 분사속도는 $\Delta \dot{m}$ 라고 하면 CMAC의 학습 갱신량 \dot{w} 은 다음 식 (6)과 같다:

$$\dot{w} = \xi \frac{\Delta \dot{m} - f(\dot{m})}{C} \quad (6)$$

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_{old} \frac{\beta_{curr}}{\beta - 1} \quad (7)$$

여기서 \dot{m}_{old} 는 최종 연료 분사량, β_{curr} 는 현재의 공연비, β 는 설정된 공연비이며, 본 논문에서 $C=32$ 를 설정하였다.

IV. 실험 및 결과 분석

제안된 CMAC 신경회로망을 기반의 가솔린 분사제어 방법을 구현하기 위하여 P-III CPU가 장착된 PC상에서 Matlab으로 시뮬레이션을 행하였다. 제안된 방법을 무부하 회전 속도와 가변 속도, 두 가지 상황에서 실험하였다. 가솔린 직접 분사 제어방법과 CMAC 신경회

로망을 적용한 연료 분사 제어 방법을 시뮬레이션을 통하여 공연비의 결과를 나타내었다. 두 경우 모두 자동차 외부 환경을 일정하게 설정하였다.

무부하 회전 속도 상황에서 기존 직접 분사 제어방법 결과는 그림 5와 같고, CMAC 분사 제어방법 결과는 그림 6으로 나타내었다.

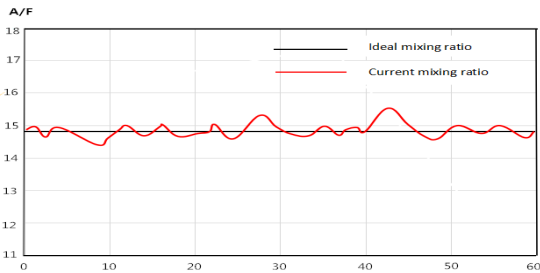


Fig. 5 Fuel distribution control with direct distribution

여기서 가로축은 시간, 세로축은 공연비이고, 그림 5는 직접 분사식 연료 분사방법에 대한 결과로 실제 공연비의 값과 이론 공연비의 값이 14.7로 차이가 크고, 희박(LEAN)영역에서 실제 공연비 값은 최대 16정도 나타내고 과농(RICH)영역에서 14정도 나타내었다. 그림 6은 CMAC 신경회로망을 적용한 연료 분사 제어방법으로 실제 공연비 값과 이론 공연비 값의 오차 범위 -2%~2% 사이에 유지하는 것을 나타냈다. CMAC 신경회로망을 적용한 연료 분사 제어방법은 기존 직접 분사식 제어방법 보다 공연비 값이 더 정밀하게 유지하는 것으로 알 수 있었다.

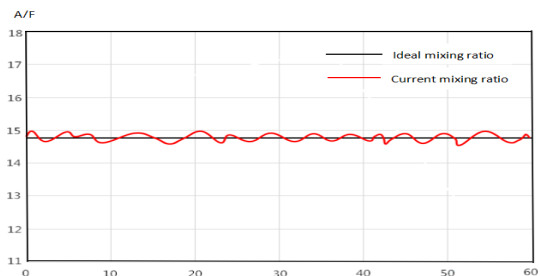


Fig. 6 Fuel distribution control with CMAC

가변 속도 상황에서 기존 직접 분사 제어 방법 결과는 그림 7과 같고, CMAC 분사 제어 방법 결과는 그림 8에 나타내었다. 가변 속도 조건에서 그림 7과 같이 직접

분사식 연료 분사 제어방법을 적용한 공연비 값은 불안정성을 보였고, 이론 공연비의 값이 14.7로 차이가 크며, 희박(LEAN)영역에서 실제 공연비의 값은 최대 17정도 나타내었다. 그림 8은 CMAC 신경회로망을 적용한 연료 분사 제어방법이 실제 공연비 값과 이론 공연비 값의 오차 범위 -2%~5% 사이에 안정하게 유지하는 것을 나타내었다. CMAC 신경회로망을 적용한 연료 분사 제어방법은 기존 직접 분사식 제어방법 보다 안정성능이 뛰어나고 공연비 값도 정밀하게 유지하는 것으로 판단 할 수 있다.

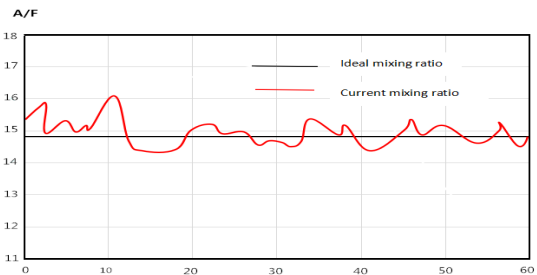


Fig. 7 Fuel distribution control with direct distribution

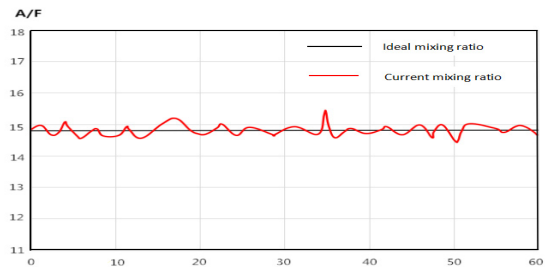


Fig. 8 Fuel distribution control with CMAC

V. 결론

본 논문에서는 기존의 직접 분사식 분사 제어방법이 가지는 문제점을 해결하기 위하여 CMAC 분사 제어방법을 제안하였다. 제안된 연료 제어방법은 연료 분사 속도를 이용하여 공연비 수치를 계산하였다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 결과를 분석한 결과 기존의 연료 제어방법 보다 제안된 CMAC 분사 제어방법이 공연비의 값이 더 균일하고 안정하게 유지시킨 것을 확인할 수 있었다. CMAC 신경회로망 기반의 가솔린 분사 제어방

법을 이용하면 공연비를 정밀하게 제어할 수 있고, 기존 직접 분사식 제어방법보다 연비저감 및 출력향상 등의 장점을 가지고 있다.

향후 연구 과제로는 단순히 산소 센서의 정보만을 이용하여 연료 분사 제어하는 것이 아니라 자동차에 여러 가지 센서의 정보를 모두 CMAC 학습 제어방법에 적용하여 높은 성능을 가진 연료 분사 제어 시스템을 개발하는 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2016

REFERENCES

[1] B. D. In, S. K. Park, and K. Y. Lee "A study on characteristics of combustion according to injection strategy in DISI engine," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 68-76, Jan. 2012.

[2] J. J. Yoo, T. J. Chung, and J. S. Choi, "Learning control

based on CMAC neural networks," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 8, no. 3, pp. 11-20, Sep. 1993.

[3] S. Kwon "A Cooperative Fuzzy and CMAC Control for Cartpole System," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 16, no. 3, pp 349-356, Jun. 2006.

[4] J. S. Albus, "Data storage in the cerebellar model articulation controller(CMAC)," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 97, no. 3, pp. 228-233, Sep. 1975.

[5] J. S. Albus, "New approach to manipulator control: the cerebellar model articulation controller," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 97, no. 3, pp. 220-227, Sep. 1975.

[6] A. L. Bucazk, R. E. Uhrig "Hybrid Fuzzy-Genetic Technique for Multisensor Fusion," *Information Sciences*, vol. 93, no. 3, pp.120-126, Sep.1996.

[7] D. G. Copp, K. J. Burnham, and F. P. Locker "Model comparison for feedforward Air/Fuel Ratio control," *UKACC international conference on Control'98*, Wales: vol. 1, pp. 670-675, Sep. 1998.

[8] I. K. Jenog, C. Choi, J. H. Shin, and J. J. Lee "A modified genetic algorithm for neurocontrollers," *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Perth: vol. 1, pp. 306, Nov. 1995.



한아군(Ya-Jun Han)

경남과학기술대학교 전자공학과 공학사
경남과학기술대학교 대학원 전자공학과 공학석사
경남과학기술대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
※관심분야 : 로봇틱스, 공장자동화,



탁한호(Han-Ho Tack)

부경대학교 전자공학과 공학사
동아대학교 전자공학과 공학석사
한국해양대학교 전자통신공학과 공학박사
신일전기<주> 전기기기설계담당
<주> 흥창 부설연구소(연구원)
University of British Columbia(UBC), Vancouver, CANADA, 연구교수
경남과학기술대학교 융합기술공과대학 전자공학과 교수
※관심분야 : 멀티미디어시스템, 신경회로망, 퍼지시스템, 로봇틱스, 공장자동화, 트랜스포테이션, 기계진동 및 동역학