

논문 2007-44SC-3-11

# 이동형 차량용 무인사격시스템의 외란 제거 및 자세 제어

## (Disturbance Rejection and Attitude Control of the Unmanned Firing System of the Mobile Vehicle)

장 유 신\*, 계 중 읊\*\*

(YuShin Chang and JoongEup Keh)

## 요 약

시스템의 자세 제어는 사용되는 모터의 위치 제어로 대응되며, 이러한 시스템은 운용환경 시에 충격 진동이 발생하게 된다. 이러한 충격 진동 외란을 제거해야 요구하는 위치 제어를 수행할 수 있다. 로봇 제어 분야에서 불확실한 외란에 의한 로봇의 자세 제어는 가장 기본적인데서 중요한 분야중의 하나이다. 이러한 문제를 다루기 위하여 계산 토크 방식에 기초한 선형 제어 기법이나 적응 제어 기법, 강인 제어 기법 등을 이용한 연구 결과들이 발표되고 있다. 그러나 그러한 기법은 일반적으로 로봇의 정확한 동력학적 특성을 알아야 하며, 구현하기가 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 적응 규칙에 의하여 모델의 불확실성, 시스템의 변화, 외란으로 인해 발생하는 공칭 플랜트와의 오차를 보상하도록 제어 입력을 생성하는 내부 루프 부분과 공칭 플랜트 모델의 명령을 추종하도록 하여 제어 입력을 생성하는 외부 루프 부분으로 구성되는 방법인 외란관측기(Disturbance Observer : DOB) 제어 알고리즘을 제안한다. 또한 프로세서의 신뢰성과 수치 연산 및 알고리즘의 빠른 처리를 위해 현재 사용 빈도가 높은 TI사의 DSP시리즈 중에서 부동 소수점 연산 기능을 가지면서 모터 제어에 적합한 TMS320C2000 계열의 TMS320F2812를 사용하여, 운용 시 발생하는 진동 등에 대한 외란 제거를 목적으로 한다. 본 논문은 규명된 시스템 모델식을 바탕으로 DOB 제어 시뮬레이션을 수행하고 시뮬레이션으로 검증된 DOB 모터 자세 제어 알고리즘을 DSP에 적용하기 위해 코드변환하고 PMSM 모터 모델 시뮬링크 블록을 구성하여 외란 관측기 제어 알고리즘을 모터 실험 시스템에 적용함으로써 타당성을 검증하고 상용 제어기로 실제 현장에 적용 가능함을 입증한다.

## Abstract

Motion control of the system is a position control of motor. Motion control of an uncertain robot system is considered as one of the most important and fundamental research directions in the robotics. Some distinguished works using linear control, adaptive control, robust control strategies based on computed torque methodology have been reported. However, it is generally recognized within the control community that these strategies suffer from the following problems : the exact robot dynamics are needed and hard to implement, the adaptive control cannot guarantee the performance during the transient period for adaptation under the variation, the robust control algorithms such as the sliding mode control need information on the bounds of the possible uncertainty and disturbance. And it produces a large control input as well. In this dissertation, a motion control for the unmanned intelligent robot system using disturbance observer is studied. This system is affected with an impact vibration disturbance. This paper describes a stable motion control of the system with the consideration of external disturbance. To obtain the stable motion independently against the external disturbance, the disturbance rejection is strongly required. To address the above issue, this paper presents a Disturbance Observer(DOB) control algorithm. The validity of the suggested DOB robust control scheme is confirmed by several computer simulation results. And the experiments with a motor system is performed to give the validity of applicability in the industrial field. This results make the easier implementation of the controller possible in the field.

**Keywords :** 이동형 차량, 무인사격시스템, 외란관측기, 외란제거, 자세제어

\* 삼성탈레스 기술개발팀  
(SAMSUNG THALES Co.LTD. R&D Team,  
RADAR System Group)

\*\* 교신저자, 국방기술품질원 기술기획단  
(Defense Agency for Technology and Quality  
Technology Planning Division)

접수일자: 2006년8월10일, 수정완료일: 2007년4월20일

## I. 서 론

최근 무인제어에서 강인 제어기의 필요성이 증가함에 따라 이를 설계하는 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 안정도 측면에 있어서 강인한 구조를 가지고 있는

LQ제어가 있고<sup>[1]</sup>, 주어진 정보 상태에 대하여 강인한 특성을 나타내는 슬라이딩 모드 제어가 있으며<sup>[2]</sup>, 시간 지연을 이용하여 외란을 표현하는 함수를 직접적으로 예측하여 제거함으로써 좋은 강인성을 나타내는 시간지연 제어 방식이 있다<sup>[3]</sup>. 또한 모델에 바탕을 두어 실제 시스템과 모델의 차이를 이용하는 제어 방법으로 적응 제어 분야 중 MRAC(Model Reference Adaptive Control)와 유사한 MRRC(Model Reference Robust Control)가 있다<sup>[4],[5]</sup>. 강인제어 분야에서도 모델을 기초로 한 방법이 많이 제안되고 있다. 특히 외란 관측기를 통한 강인제어 방법<sup>[6]</sup>은 모델링 오차, 시스템 파라미터 변화, 외란 등을 모두 외란으로 다루어 제거하는 방법이다. 그러나 여기서 사용되는 역 모델은 실제 구현할 수 없으므로 저역 통과 필터인 Q필터를 함께 사용함으로써 외란 관측기가 제거할 수 있는 외란의 주파수 대역이 저 주파수 영역으로 제한된다. 저역 통과 필터의 차단 주파수를 설계 변수로 결정할 수 있다. 그리고 적응 규칙에 의하여 모델의 불확실성, 시스템의 파라미터 변화, 외란으로 인해 발생하는 공칭 플랜트와의 오차를 보상하도록 제어 입력을 발생하는 모델 보상을 가지도록 설계하는 내부 루프 부분과 모델을 추종하도록 적합한 제어를 구성하여 제어입력을 생성하는 외부 루프 부분으로 구성되는 방법이 있다. 즉, 잘 설계된 모델 보상을 가지는 플랜트는 마치 공칭 플랜트처럼 동작하게 된다. 따라서 외부 루프에서는 공칭 플랜트에 대해 시스템 성능을 만족하도록 적합한 제어를 설계하면 되어 강인 안정도 및 강인 성능과 공칭 성능을 분리하여 생각할 수 있으므로 이해가 쉽고, 다양한 설계 기법을 적용할 수 있는 장점이 있다.

또한 일반적으로 외란이 있는 경우에 내부모델을 기초로 출력에서 외란의 영향이 나타나지 않는 외란 제거를 고려할 필요가 있어<sup>[7]</sup>, 추정된 외란을 피드포워드(Feedforward) 루프를 통해 제거시켜 주는 외란 관측기를 구성하여 외란 변동 등의 상황에서 보다 안정적인 동작을 할 수 있도록 한다<sup>[8],[9]</sup>.

그리고 무인사적시스템에는 프로세서의 신뢰성과 수치 연산 및 알고리즘의 빠른 처리를 위해 DSP(Digital Signal Processor)를 주 프로세서로 많이 사용하고 있다. 단일 프로세서로서 제어와 연산을 동시에 수행해야 하고, 전력 소모 또한 작아야 한다<sup>[10]</sup>. 시스템의 역할을 수행하기 위해서는 기본적으로 운전자 인터페이스, 센서 입력처리, 위치 제어, 발생하는 진동 외란 억제 등의 다양한 기능을 구현할 수 있어야 한다. 이러한 조건을

만족시키기 위해 본 논문에서는 현재 사용 빈도가 높은 TI사의 DSP시리즈 중에서 부동 소수점 연산 기능을 가지면서 모터 제어에 적합한 TMS320C2000계열의 TMS320F2812을 사용하여<sup>[11]</sup>, 운용 시 발생하는 진동 등에 대한 외란을 제거하고 모터의 자세 제어를 목적으로 한다.

## II. 외란 관측기의 개요

외란 관측기는 Ohnishi에 의해 처음 제안된 것으로 외란에 의해 발생하는 실제 플랜트 출력과 공칭 플랜트 출력의 차이를 보상하여 실제 플랜트가 공칭 플랜트처럼 거동하도록 만들어 주는 것이다. 이를 통해 제어기는 외란과 섭동의 영향을 받지 않는 상태에서 공칭 플랜트처럼 실제 플랜트를 제어하게 된다. 제어 명령과는 별도로 실제 시스템을 공칭 플랜트처럼 동작하도록 하는 제어 입력을 생성하는 구조로 구성된다. 이로써 모델링 오차와 매개변수의 변화, 그리고 외란을 함께 제거할 수 있다. 외란 관측기의 뛰어난 외란 제거 성능은 근본적으로 실제 시스템을 공칭 플랜트로 동작하도록 하는 성질에 기인한다. 최근 강인 제어 및 외란 흡수 제어의 여러 분야에 널리 적용되고 있다. 외란을 역모델에 의해 재구성하고 이것을 피드백하여 제거하는 것이 외란관측기의 기본개념이다. 그림 1은 외란관측기의 기본구조이고 그 구조는 매우 간단하며, 연산도 현저히 적다. 외란이 인가된 실제 플랜트의 출력으로부터 공칭 플랜트 전달함수의 역을 이용하여 외란을 추정하여 제어 입력을 보상해주게 된다. 여기서 Q는 저주파 통과 필터인데, 공칭 플랜트 전달함수의 역수는 일반적으로 인과성(Causality)이 보장되지 않으므로 외란 관측기의 인과성을 보장하기 위하여 추가된다. 특히 이 Q필터가 외란 관측기의 특성을 결정짓는 가장 중요한 요소가 된다.

그림 1에서  $u$ 는 주 제어입력,  $u^*$ 는 재구성된 제어 입

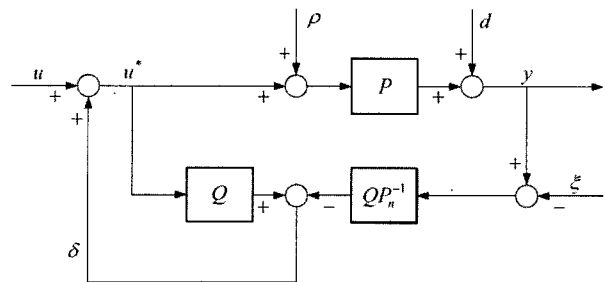


그림 1. 외란관측기 구조

Fig. 1. Structure of the Disturbance Observer.

력,  $\rho, d$  는 외부 외란,  $y$ 는 실제 플랜트 출력,  $\xi$ 는 측정 잡음 입력을 나타낸다.  $P$ 는 실제 플랜트 전달 함수이며,  $P_n^{-1}$ 은 공칭 플랜트 전달함수의 역,  $Q$ 는 저역통과필터이다<sup>[12]</sup>.

### III. 이동형 차량용 외란관측기 제어 시뮬레이션

이동형 차량용 무인로봇시스템의 모델링으로 도출된 2자유도 플랜트 전달함수 모델에 대해 모델 보상을 가지도록 설계된 내부 루프 부분으로 DOB 제어 알고리즘 시뮬레이션을 수행한다. 다음 식 (1)은 상대차수 2인 도출된 전달함수를 나타낸다.

$$P_2(s) = \frac{6.19s^2 + 44.13s + 6.263 \times 10^5}{s^4 + 226s^3 + 1.092 \times 10^5 s^2 + 2.219 \times 10^7 s + 5.538 \times 10^8} \quad (1)$$

외란 관측기의 외란 제거 성능은 주로 Q필터의 분자 차수에 의존하며, 강인성은 Q필터의 상대 차수와 분모 차수에 의존하게 된다. 다시 말해 외란 관측기를 사용할 경우 저주파에서 외란의 영향이 제거되고, 실제 플랜트는 측정 잡음의 영향만을 받는 공칭 플랜트와 동일하게 거동한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 정도가 높은 센서를 사용하여 측정 잡음을 무시한다면 공칭 플랜트와 동일하게 거동하게 되며, 외란관측기에 의한 외란의 영향이 거의 제거됨을 알 수 있다. 그러므로 저주파 영역에서는 모델링 오차와 외란을 제거하기 위해 Q(s)는 1이 되도록 설계하면 된다. 다음 식 (2)는 적용된 Q필터를 나타낸다.

$$Q_{20}(s) = \frac{1}{2.5e-007s^2 + 0.001s + 1} \quad (2)$$

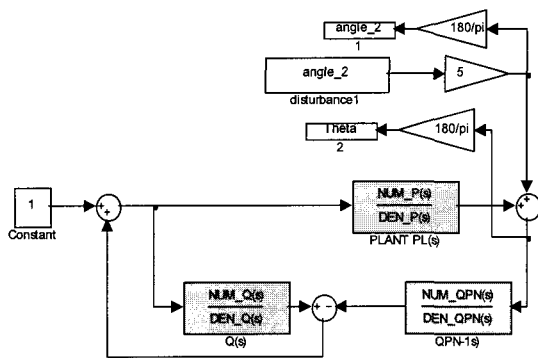


그림 2. DOB 매트랩 시뮬링크 블록도  
Fig. 2. Disturbance Observer Matlab Simulink Block diagram.

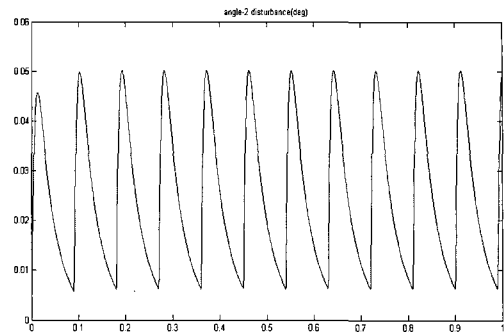


그림 3. 입력 외란  
Fig. 3. Input Disturbance.

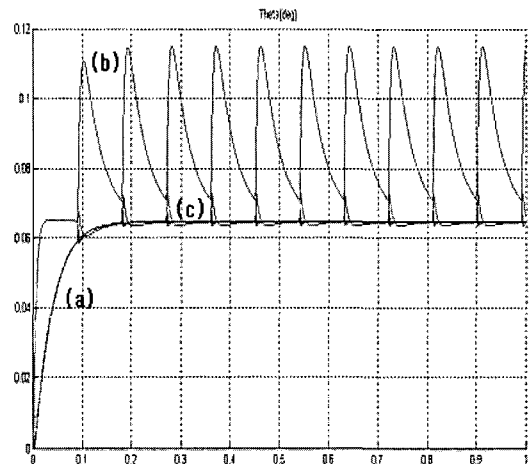


그림 4. 제어 시뮬레이션 결과 비교  
Fig. 4. Results of the Control Simulation with Matlab Simulink.

그림 2와 같이 DOB 제어 매트랩 시뮬링크 블록을 구성하여 시뮬레이션을 수행한다.

그림 3과 같이 크기 0.05인 11Hz의 하모닉 성분으로 이루어진 외란을 인가한다. (x축 시간(초), y축 출력 각도(deg))

그림 4는 DOB 제어 매트랩 시뮬링크로 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 외란이 인가되지 않은 기본 모델의 출력 각도(a), 0.05크기의 주기성 외란을 인가했을 때 외란이 그대로 반영된 출력 각도(b), 그리고 동일한 외란이 인가되었을 때 DOB 알고리즘을 적용하여 외란이 제거된 출력 각도 결과(c)를 나타낸다. 결과를 확인해보면 DOB 알고리즘을 적용하였을 때 외란이 95% 정도 제거되는 성능을 확인할 수 있다. 여기서 x축은 시간(초)을 나타내고, y축은 출력각도(deg)를 나타낸다.

#### IV. 이동형 차량용 모터 모델 실험

시뮬레이션으로부터 검증된 내부 루프 부분의 DOB를 적합한 제어기(위치 제어기, 속도 제어기, 전류 제어기)를 가지는 외부 루프 부분을 구성하여 모터 모델에 적용하여 외란이 인가될 때 시스템의 자세 제어를 시뮬레이션으로 검증한다. 외란 제거를 위해 설계된 Q필터는 분모차수가 2이고 분자차수가 0이며 필터 시정수는 0.0005이다. 설계된 Q20필터를 적용하여 DOB 시뮬레이션을 수행하여 만족할 만한 외란 제거 성능을 확인한다.

그림 5는 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) 모터 시스템 시뮬링크 블록을 구성하여 DOB 알고리즘을 적용한 시뮬링크 블록선도이다. 시뮬링크 블록 구성에는 먼저 위치제어(Position Control) 블록과 비례-적분(PI) 속도제어(Speed Control) 블록이 포함되고 전류제어(Current Control) 블록이 포함된다. 또한, PWM(Pulse Width Modulation, 펄스폭 변조) 블록과 3상 좌표계, 직각 좌표계, 정지 좌표계, 동기 좌표계의 좌표 변환과 전류 및 토크에 관한 블록으로 구성된다.

일반적으로 무인시스템의 제어에는 프로세서의 신뢰성과 수치 연산 및 알고리즘의 빠른 처리를 위해 DSP(Digital Signal Processor)와 Power PC를 주 프로세서로 많이 사용해 왔다. 그러나 본 무인로봇시스템의 경우에는 단일 프로세서로서 제어와 연산을 동시에 수행해야하고, 전력 소모 또한 적어야 한다. 본 시스템의 제어 장치의 역할을 수행하기 위해서는 기본적으로 운용자 인터페이스, 센서 입력처리, 운용 시 발생하는 진동 억제 등의 다양한 기능을 구현할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 현장에서 사용 빈도가 높

은 TI사의 DSP시리즈 중에서 부동 소수점 연산 기능을 가지면서 모터 제어에 적합한 TMS320C2000 계열의 TMS320F2812을 사용하여, 운용 시 발생하는 진동 등의 외란 억제를 위한 모터 제어를 수행한다. 시뮬링크를 이용한 시뮬레이션과 DSP의 연동을 통한 모터 제어에 관하여 연구한다. 기존에는 모터 제어를 위한 프로그래밍 방식인 CCS(Code Composer Studio) 프로그램을 통하여 DSP 코어(core)를 바로 제어하는 것이었으나, 시뮬레이션과 실제 제어 프로그램에 많은 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 방식이 아닌 MATLAB 시뮬링크 환경에서 작업되어 바로 코드변환으로 MATLAB과 DSP(TMS320F2812)간의 연동을 통하여 제어를 구현하는 것으로 시뮬레이션과 프로그래밍을 동일한 환경인 시뮬링크 내에서 구현하여 검증할 수 있게 한다.

그림 7은 모터 모델에 외란을 인가하고 DOB를 적용하지 않았을 때 외란이 그대로 출력에 반영된 기준입력

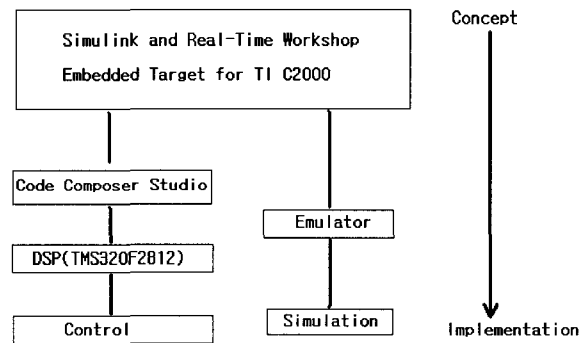


그림 6. DSP 적용 시스템의 구성 개념  
Fig. 6. Concept of the DSP Implementation System.

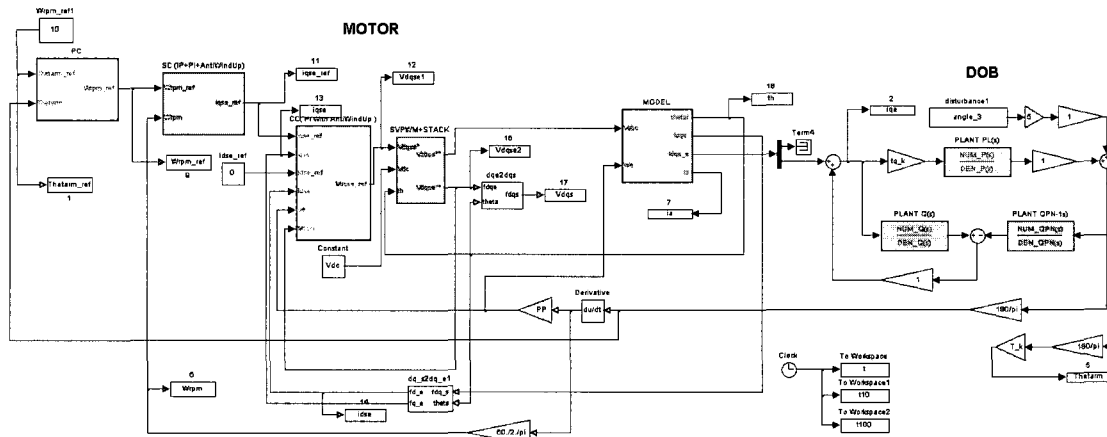


그림 5. DOB 적용 모터 모델 시뮬링크 블록도  
Fig. 5. Disturbance Observer Motor model Matlab Simulink Block diagram.

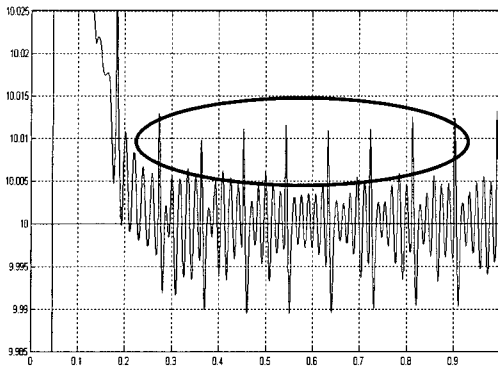


그림 7. DOB 적용 전 외란 인가된 모터 모델 출력각도 결과

Fig. 7. Output Angle Results of the disturbance motor model without DOB.

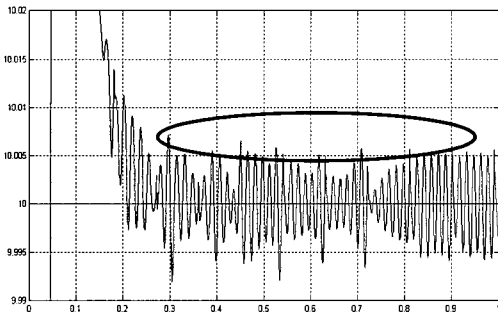


그림 8. DOB 적용 후 외란 인가된 모터 모델 출력각도 결과

Fig. 8. Output Angle Results of the disturbance motor model with DOB.

10도에 대한 출력각도 결과를 나타낸다. 여기서 x축은 시간(초)을 나타내고, y축은 출력각도(deg)를 나타낸다. 그림에 표시된 원형 부분은 외란의 영향을 받은 출력각도를 나타낸다.

그림 8은 동일한 외란이 인가되었을 때 DOB를 적용하여 내부 루프와 외부 루프로 구성된 모터 모델 실험에 대한 출력 각도 결과를 나타낸다. 여기서 x축은 시간축(초)이고, y축은 출력각도축(deg)를 나타낸다. 그림에 표시된 부분을 보면, 그림 7의 결과와는 달리 외란이 95% 정도 제거되는 성능을 가짐을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서 이동형 차량용 무인사격시스템의 외란 관측기를 이용한 자세 제어에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 제어 알고리즘에 적합한 시

스템의 플랜트 전달함수 모델을 도출하고, 외란 제거를 위한 제어 알고리즘으로 내부 루프 부분의 외란 관측기를 구성하여 시뮬레이션으로 검증하였다. 또한 적합한 제어기인 위치 제어기, 속도 제어기, 전류 제어기를 가지는 PMSM 모터 모델 시뮬링크 블록을 구성하여 내부 루프와 외부 루프 부분으로 DOB 알고리즘을 구성하고 DSP 적용을 위해 매트랩 Toolbox와 CCS로 코드 변환을 수행하여 모터 모델에 대한 실험으로 실제 적용성을 검증하였다. 다시 말해, 제어기의 설계와 외란 제거의 최적화를 구현하였고, 다양한 변화값에 대해서 긍정적인 결과를 얻었으며 실제적인 매트랩 시뮬레이터와 DSP의 연동에 의해 실제 시스템의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Peter Dorato, *Linear Quadratic Control an Introduction*, Pentice-Hall, 1995.
- [2] Vadim I. Utkin, "Variable Structure System with Sliding Mode," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, April, 1977.
- [3] Kamal Youcef-Toumi, Osamu Ito, "A Time delay Controller for System with Unknown Dynamics," *ASME Journal of DSMC*, Vol. 112, pp. 133-142, March, 1990.
- [4] Karl Johan Astrom, *Adaptive Control*, Prentice-Hall, 1989.
- [5] Mineo Tsuji, Yousuke Umasaki, Ryo Nakayama and Katsuhiro Izumi, "A Simplified MRAC based Sensorless Vector Control Method of Induction Motor," *PCC-Osaka 2002*, pp. 1090-1095, 2002.
- [6] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Transactions on Japanese Society of Electrical Engineering*, JSEE, Vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [7] Hisao Kubota, Kouki Matsuse and Takayoshi Nakano, "Field oriented induction motor drives without speed sensor based on adaptive flux observer and disturbance torque compensation," *IECON 91*, pp. 1855-1860, 1991.
- [8] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice-Hall PTR, 1998.
- [9] N. Kenzo and N. Hidekazu and H. Mitsuo, *Matlab을 이용한 제어계 설계*, 동경전기대학출판부, pp. 87-102, 1998.
- [10] 박기호, "소형·저 전력 프로세서를 이용한 소화기 사격통제장치 주 제어보드 설계기법 연구," *한국군사과학회지*, 제8권, 제2호, pp. 30 -37, 2005. 6.

- [11] Texas Instrument, TMS320R2811, TMS320F2812 Digital Signal Processors Data maunal (SPRS257B), February, 2005.
- [12] Takaji Umeno, Yoichi Hori, "Robust Speed Control DC Servomotors Using Modern Two Degrees-of-Freedom Controller Design," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, pp. 363-368, October, 1991.

저 자 소 개



장 유 신

1996년 부산대학교 제어기계  
공학과 학사졸업.  
1998년 부산대학교 대학원  
정밀기계공학과 석사졸업.  
2006년 부산대학교 대학원 지능  
기계공학과 박사졸업.

2006년~현재 삼성탈레스 책임연구원.  
<주관심분야 : 서보제어, 시스템규명, 강인제어,  
로봇시스템, 무인항법시스템>



계 중 읍-교신저자

1989년 홍익대학교 기계공학과  
학사졸업.  
1996년 부산대학교 대학원  
기계공학과 석사졸업.  
2000년 부산대학교 대학원 지능  
기계공학과(메카트로닉스  
전공)박사졸업.

1989년~현재 국방기술품질원 기술기획단  
연구원.  
<주관심분야 : 강인제어, 무인화(로봇)시스템, 감  
시정찰 및 정밀타격 무기체계 분야>