

Intelligent Fuzzy PID 제어 알고리즘을 이용한 실시간 OS 기반 복강경 수술 로봇의 위치 제어 성능 강화에 관한 연구

論 文

57-3-29

A Study of Position Control Performance Enhancement in a Real-Time OS Based Laparoscopic Surgery Robot Using Intelligent Fuzzy PID Control Algorithm

宋承駿* · 朴俊佑** · 辛政昱** · 李德熙** · 金胤昊*** · 崔載舜†

(Seung-Joon Song · Jun-Woo Park · Jung-Wook Shin · Duck-Hee Lee · Yun-Ho Kim · Jaesoon Choi)

Abstract - The fuzzy self-tuning PID controller is a PID controller with a fuzzy logic mechanism for tuning its gains on-line. In this structure, the proportional, integral and derivative gains are tuned on-line with respect to the change of the output of system under control. This paper deals with two types of fuzzy self-tuning PID controllers, rule-based fuzzy PID controller and learning fuzzy PID controller. As a medical application of fuzzy PID controller, the proposed controllers were implemented and evaluated in a laparoscopic surgery robot system. The proposed fuzzy PID structures maintain similar performance as conventional PID controller, and enhance the position tracking performance over wide range of varying input. For precise approximation, the fuzzy PID controller was realized using the linear reasoning method, a type of product-sum-gravity method. The proposed controllers were compared with conventional PID controller without fuzzy gain tuning and was proved to have better performance in the experiment.

Key Words : Position Control, Fuzzy Controller, PID Controller, Gain Tuning, Surgery Robot

1. 서 론

기존의 선형 PID 제어는 구현이 용이하고 구조가 간단하여 산업적으로 가장 선호하는 제어 방식이다. 그러나 통상적으로 단순한 공정에 대해서는 우수한 제어 성능을 보여주지만, 실제 산업 공정은 비선형성과 시변성 등과 같은 복잡한 성질을 가지므로, 고정된 파라미터 값을 가지고 있는 기존의 선형 PID 제어기는 그 기능에 한계를 가질 수밖에 없다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 자기동조(self-tuning) PID 제어와 같은 적응제어 방식이 제안되었으나 대상 플랜트의 선형성을 전제하고 있으며 동작 환경에 대한 조건이 까다롭고 시스템의 복잡한 수학적 모델을 근거하여 제어하여야 하는 어려움이 있다. 실제로 산업 공정에 있어서 대부분의 PID 제어기들은 숙련된 기술자에 의해 수동 조작에 의한 시행착오법(trial-and-error method)으로 동조되고 있다. 본 논문에서 적용된 복강경 수술 로봇의 PID 제어기도 이런 시행착오법을 바탕으로 동조되었다. 대부분의 시행착오 방식은 파라미터 동조에 있어 많은 시간이 소비되고, 외란이

발생할 경우 적절히 동조된다는 보장이 없다. 또한 제어 시스템의 제어 구조가 복잡하거나 불확실할 경우 대상 시스템을 정확하게 나타내는 수학적 모델을 구하기가 어려울 뿐만 아니라 파라미터들을 적절히 동조하기가 어렵다. 따라서, PID 제어기의 파라미터의 체계적인 동조 방식을 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다[1-5].

가장 보편적인 PID 제어기의 파라미터에 대한 동조 방식은 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)에 의한 한계감도법이다 [6,7]. 이 방식은 산업 공장에서 가장 널리 사용되는 동조 방법이지만, 동조된 PID 제어기 파라미터를 사용한 폐환 제어 시스템의 성능이 만족스럽지 않은 경우 적절한 대안이 없다는 것이 단점이다. 본 논문에서는 지글러-니콜스가 제안한 한계감도법을 기본으로 하고, 퍼지 로직을 바탕으로 비례이득 계수를 산출하는 제어 방식을 적용하였다[8-10]. 퍼지 제어 규칙과 소속 함수를 통해 제어 성능에 미치는 영향을 구체적으로 설명할 수 있는 형태로 출력 표현에 비선형성을 구현하고 이를 조정하는 방법을 제시한다.

본 논문의 궁극적인 목표는 기존의 선형 PID 제어기의 한계를 극복하고, 퍼지 로직을 사용하여 PID 제어기의 이득 계수를 자동적으로 재조정할 수 있는 시스템을 구성하는 것이다. 퍼지 시스템이 제공하는 가변 이득은 추종 오차 값에 따라 비례 신호, 적분 신호 및 미분 신호의 가중치가 달라지도록 하며, 이를 통해서 추종 성능이 각 이득의 변화와 파라미터 변화에 대해서 선형 제어기에 비해 덜 민감해지는 효과를 가져 온다[11,12].

본 논문에서는 초기 구동 시에는 규칙 기반(rule-based) 퍼지 PID 제어기로 제어되다가 제어 상황에 따라 학습

* 正會員 : 高麗大 醫大 醫學科 醫用生體工學專攻 博士課程

** 準會員 : 國立癌센터 研究所 醫工學研究科 研究員

*** 準會員 : 高麗大 醫大 韓國人工臟器센터 研究員

† 교신저자, 正會員 : 高麗大 醫大 韓國人工臟器센터 研究教授 · 工博

E-mail : aequitas@korea.ac.kr

接受日字 : 2007年 10月 19日

最終完了 : 2007年 12月 23日

(learning) 퍼지 PID를 구동시켜 제어하는 방식을 제안한다 [13]. 규칙 기반 퍼지 PID제어기는 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되고 있으며 연구되고 있다[14]. 이 제어기는 숙련된 조작자의 경험에 의해 퍼지화 되고 제어 버퍼가 정의된다. 모든 제어 버퍼의 제어 규칙은 제어할 시스템의 구성 및 응용에 따라 정의된다. 그러나, 제어 시스템의 구동 중 제어 상태에 따라 제어 규칙이 재조정된다면 제어기의 제어 성능을 보다 우수하게 할 수 있을 것이다. 학습 기반 퍼지 PID제어기는 제어 시스템의 구동 중 제어 상황에 따른 제어 규칙 생성과 변형이 가능하다. 제어 버퍼의 제어 규칙은 설정 값과 구동 중의 제어 상황에 따라 새로운 제어 규칙을 생성하고 변형하는 것이 가능하다[15,16].

본 논문에서는 현재 국립암센터에서 개발 중인 실시간 운영체제 기반의 복강경 수술 로봇 시스템(그림 1)의 각부 구조를 기술하고, 제작된 시작품의 모터 제어기에 제안된 퍼지 PID 위치 추종 제어기를 적용하여, 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서, 로봇의 위치 추종 성능을 시험하여 기존의 선형 PID 및 규칙 기반 퍼지 PID 제어기와 비교/분석 하였으며, 전 임상 동물 실험 모델을 목표로 신뢰도가 향상되고 안정성이 확보된 제어 시스템을 제안하고자 한다.

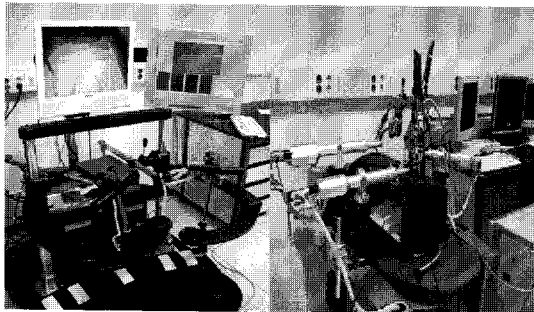


그림 1 국립암센터의 복강경 원격 수술 로봇 시스템(좌: 마스터 로봇, 우: 슬레이브 로봇)
Fig. 1 The laparoscopic telesurgery robot system of NCC(Left: Master robot, Right: Slave robot)

2. 시스템 구성

2.1 복강경 수술 로봇의 구성

복강경 수술로봇은 그림 1과 같이 복강 내에서 복강경과 수술기구를 제어하여 원격 수술 작업이 가능한 수술로봇(슬레이브 로봇)과 조종로봇(마스터 로봇)으로 구성된다[17-19]. 슬레이브 로봇에서 수술 기구는 기본적으로 복부의 피부와 근육층을 관통하는 트로카(trocar)에 삽입되어 동작하게 된다. 트로카에 삽입된 수술도구는 피치(pitch)방향 구동, 요(yaw)방향의 요동구동, 수술도구 길이 축을 중심으로 회전하는 회전구동, 수술도구 길이 방향의 이송운동 그리고 수술 병변의 절개 및 절단 등의 작동을 담당하는 수술도구 작동 구동의 5가지 구동을 하게 된다. 마스터 로봇은 이에 동일하게 대응되는 5개의 자유도를 구현하여야 하며, 제안된 시

스템에서는 각 관절구조가 슬레이브 로봇의 그것과 동일한 구조로 1:1 대응되도록 설계하였다. 마스터 로봇은 조작자의 양손으로 조작이 가능하도록 슬레이브 암(arm) 중 선택된 두 개의 암과 동기화되는 두 개의 로봇 암과 동기화되는 두 개의 로봇 암과 각종 기능 모드 선택을 담당하는 발판 페달(foot pedal)로 구성된다. 조작자는 발판 페달 및 그래픽 사용자 인터페이스(GUI: Graphic User Interface)를 이용하여, 슬레이브 로봇의 수술 기구 암과 복강경 카메라 암을 선택하여 제어 가능하도록 구성하였다[20].

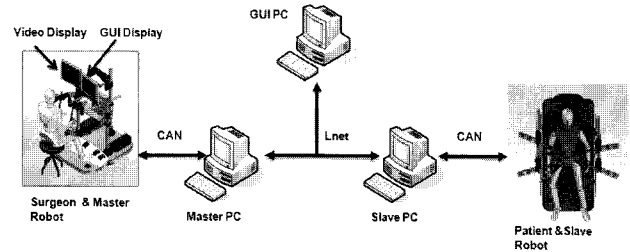


그림 2 마스터 로봇과 슬레이브 로봇, GUI로 구성된 전체 시스템 블록도

Fig. 2 Total system block diagram composed of master robot, slave robot and GUI

제안된 복강경 수술 로봇은 CAN(Controller Area Network) 프로토콜을 사용하여, 그림 2와 같이 리눅스 기반의 PC를 주 제어기로 하나의 CAN 버스 상에 로봇 각 축의 모터를 구동하기 위한 상용의 모터 서보제어기를 병렬 연결하는 방식으로 하드웨어를 구성하였다. 고용량의 연산과 다양한 하드웨어의 인터페이스가 필요하므로 전체 시스템의 운용을 위하여 리눅스 기반의 상용 실시간 운영체제의 하나인 RTLinux-Pro™ (FSMLabs Inc., 미국)를 운영체제로 하는 PC들의 클러스터 형태를 적용하였다. RTLinux-Pro™의 사용으로 각 단위 축 제어기(joint controller)에 대한 서보 제어기의 제어 기능을 실시간으로 처리 할 수 있게 되었고, 고용량의 수학 계산을 위한 병렬 처리 시스템 형태로의 확장이 용이하게 되었다.

각종 제어 신호와 같이 제어 시스템간의 공유가 필요한 데이터의 통신을 위해, 그림 3과 같이 Gigabit ethernet 망에 각 단위 PC들이 버스 구조로 연결되는 형태로 구성되었다. 이 연결은 RTLinux-Pro™ 운영체제에서 제공하는 UDP(User Datagram Protocol) 프로토콜 스택으로 hard real-time 통신이 가능한 Lnet™ 을 사용하였다. 이 연결을 통해 전송되는 마스터 로봇의 동작 명령으로부터 슬레이브 로봇의 해당 각 축의 구동 명령을 생성하고, 이를 해당 CAN 버스를 통해 각 서보 제어기에 전달하면, 단위 모터의 위치 및 속도의 제어는 각 서보 제어기가 수행하는 형태로 이루어졌다. 본 시스템에서는 각 로봇의 축마다 한 개의 독립된 CAN 채널을 갖도록 하고, 모터/엔코더 제어 신호가 상호 교환되도록 각 축 당 500 패킷/초의 데이터를 발생시키도록 제안하였다. 이에 맞추어 마스터/슬레이브간 위치 제어 명령의 갱신 주기는 1/500 초가 되었다.

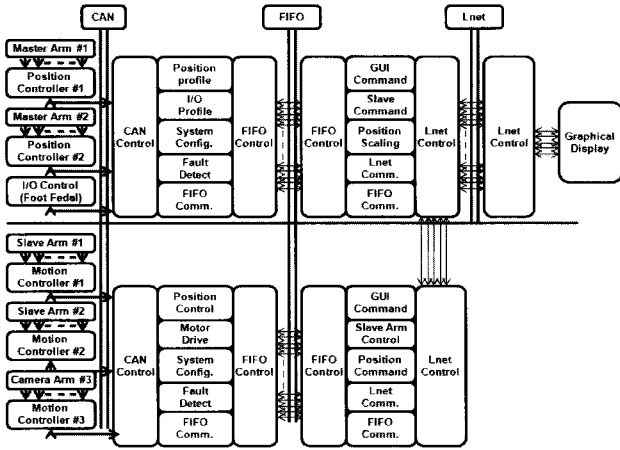


그림 3 제어 소프트웨어 구조
Fig. 3 Control software architecture

2.2 로봇 모션 제어

로봇의 각 축을 구동시키는 모터는 사용 축의 목적 및 용량에 따라 소형의 BLDC(Brushless Direct Current) 및 직류 모터를 사용하였다. 이들의 위치와 속도를 제어하는 각 단위 축 제어기로는 상용 서보 제어기(EPOS, Maxon Motors Inc., Swiss)를 개별 서보 제어기를 사용하였다. 모터 제어는 지령위치 추종을 위한 위치 제어 루프와 그 출력인 속도 명령 추종을 위한 속도 제어 루프의 두 단계로 구성되며, 위치 및 속도 제어 루프 다음으로 전류 제어 단계를 구분해 두어 외부에서 자체 제어 알고리즘 계산 후 전류지령을 제어기에 내리도록 구성하였다. 위치 및 속도 제어 루프의 샘플링 주기는 1KHz, 전류 제어 루프의 샘플링 주기는 10KHz이다.

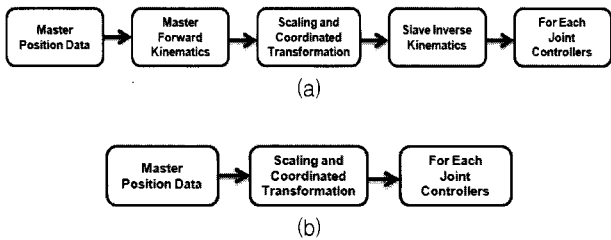


그림 4 마스터-슬레이브 제어 방식: 전형적인 마스터-슬레이브 제어 방식(a)과 단순화된 마스터-슬레이브 제어 방식(b)
Fig. 4 Implementation of master-slave control: (a)conventional implementation of master-slave control and (b)the simplified implementation of master-slave control

원격 로봇의 제어를 위해서는 일반적으로 마스터 로봇에서는 시스템의 기구학 방정식이 정의되고 스케일링과 변환 작업을 수행한다. 또한 슬레이브 로봇에서는 실시간 변화하에 주어지는 로봇 축의 최종단의 목표 위치에 맞추어 역기구학 방정식의 해를 구하여 각 축의 목표 위치와 속도를 생성하는 과정이 이루어져야 한다(그림 4(a)). 그러나 본 시스템의 경우 마스터-슬레이브 로봇의 구조를 각축의 운동이 기구학적으로 1:1로 대응하는 형태로 설계하여 기본적인 운

전을 위해서는 기구학 해석을 생략할 수 있는 구조를 제안하였다(그림 4(b)).

3. Intelligent fuzzy PID 제어기의 설계

3.1 Rule-based fuzzy PID 제어기의 구조

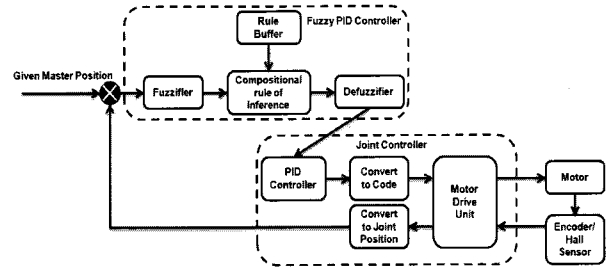


그림 5 규칙 기반 퍼지 PID 제어기의 구조
Fig. 5 Structure of rule-based fuzzy PID controller

일반적인 규칙 기반 퍼지 PID 제어기는 추종 오차와 오차의 변화량의 추론 입력에 대한 비례, 미분, 적분 신호를 합하여 제어 신호를 만드는 제어 방식이다. 제어기의 제어 규칙부는 그림 5와 같이 퍼지화(fuzzifier), 규칙 버퍼(rule buffer), 추론(inference) 및 비퍼지화(defuzzifier) 블록으로 구성되고, 그림의 우측 하부는 전형적인 PID 제어기와 프로세스 블록이다. 시스템의 초기에 PID 제어 이득 계수는 규칙 기반 퍼지 PID 제어기에 의해 조정된다. 그러나, 시스템 구동 중에 PID 제어기의 비례 이득(proportional gains) 계수는 학습 제어기에 의해 새롭게 생성된 제어 규칙에 의해 재조정된다. 그리고 이에 대응하는 미분(integral) 및 적분(derivative) 이득 계수는 지글러-니콜스 방법에 의해 재조정된다[6,7].

입력 신호인 추종 오차와 오차의 변화량은 퍼지 제어를 수행하기 위한 정량화 및 스케일링 작업을 통하여 퍼지화 블록에서 퍼지화된다. 잘못된 스케일링 팩터를 사용하였을 경우 퍼지 제어기의 동작 영역이 정규화된 전체 구간의 경계부에 집중되어서 제어 시스템의 출력에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 스케일링 팩터의 선정이 중요하다, 이는 단지 데이터의 특성에만 관련되는 것이 아니라 소속 함수의 형태, 위치, 대상 플랜트의 동특성 등에도 관련되기 때문에 선정이 쉽지 않으므로 신중을 기해야 한다 [21,22]. 본 논문에서는 정량화 및 스케일링 작업에 필요한 스케일링 팩터를 반복적인 실험을 통한 시행착오(trial and error) 방식을 사용하여 획득하였다. 추종 오차 분에 대한 스케일링 팩터를 SF_e 라 하고 오차의 변화량에 대한 스케일링 팩터는 SF_{de} 라 지칭한다. 이 두 스케일링 팩터를 이용하여 입력 신호는 특정 구간 범주의 퍼지 소속함수 값으로 정량화 된다.

퍼지 추론 블록은 퍼지 규칙 버퍼 블록으로부터 획득한 제어 규칙을 이용하여 입력 변수에 대한 출력 값을 유추한다. 여기서 퍼지 추론은 다수의 입력 변수들로부터 취득된 정보들과 정량화된 불확실성들을 병렬적으로 유추해가는 과정이다. 즉, 퍼지 추론 규칙은 퍼지 시스템의 제어 부에 해당되며, 퍼지 시스템의 특성과 성능을 결정짓는 동일한 성능

의 퍼지 추론 방법을 사용한다 하더라도 보다 우수한 퍼지 추론 규칙을 탑재한 퍼지 시스템이 보다 정확한 최종 출력 값을 유추하게 된다. 퍼지 추론규칙은 대상 모델의 동작 특성을 언어적 표현법으로 규정한 명제들이기 때문에, 우수한 퍼지 추론규칙이란 대상의 동작 특성을 보다 정확하게 규정하고 있는 퍼지 추론 규칙들이어야 한다. 본 논문에서 사용한 퍼지 추론 방법은 Mizumoto가 제안한 선형 추론 방식인 product-sum-gravity 방식의 일종인 simplified reasoning 방식을 적용하여 설계하였다[23]. 퍼지 추론에 의해 유추된 출력 값은 행렬 형태로 표시된 퍼지 집합이므로 실제 제어 프로세스에서 사용하기 위한 비퍼지화를 과정을 거치게 된다. 비퍼지화를 통해 생성된 출력 값인 비례 제어 이득 계수는 실질적인 제어기의 제어 입력 값이 되어 PID 제어를 수행하게 된다. 본 논문에서 사용된 비퍼지화 방식은 가중치 평균법(weighted average methods)을 적용하였다[24].

3.1.1 퍼지화 및 소속 함수의 설계

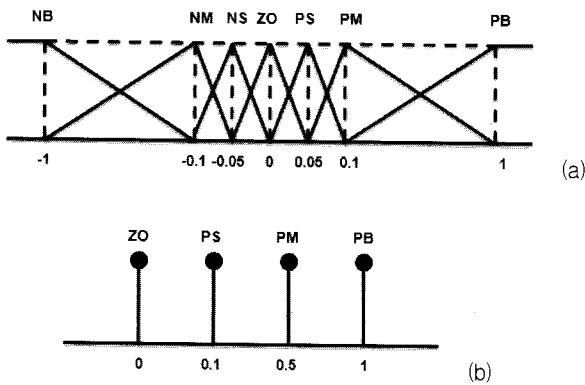


그림 6 정규화된 소속 함수: (a)정규화된 입력 소속함수와 (b)정규화된 출력 소속함수

Fig. 6 Normalized membership function: (a)normalized membership function of input variable and (b)normalized membership function of output variable

퍼지 PID 제어기의 두 개의 입력 변수, 즉 위치 오차(e) 및 위치 오차의 변화량(Δe)은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} e_{(n)} &= P_{cmd}(n) - P_{resp}(n) \\ \Delta e(n) &= e(n) - e(n-1) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, n 은 이벤트이고, P_{cmd} 는 마스터에서 전송된 제어 입력 값이고, P_{resp} 는 슬레이브 각 로봇 축의 서보 제어기에서 피드백된 응답 값이다.

마스터에서 전송된 제어 입력 값은 스케일링 팩터 SF_e 와 $SF_{\Delta e}$ 를 이용하여, 전체집합 $[-1, 1]$ 의 구간으로 정규화된 퍼지 구간 값이 전송되도록 구성하였으며, 이를 그대로 퍼지 PID 제어기의 퍼지 입력 값으로 사용하였다. 출력 변수는 전체집합 $[-1, 1]$ 의 구간으로 크기 변환을 하는 정규화 작업을 수행하였다. 본 논문에서 입력 변수는 그림 6과 같이 정규화된 삼각형 형태의 소속 함수를 갖도록 설계하였고, 출력 변수인 비례 이득 계수는 simplified reasoning 방식의 단순화된 형태의 소속함수로 설계하였다. 입력 및 출력 소속 함

수는 zero에 해당되는 한 개의 삼각형 소속함수와 positive, negative를 의미하는 여섯 개의 삼각형 소속함수로 구성되며, 소속함수의 소속 정도(degree of membership)는 전체집합 $[-1, 1]$ 사이의 값으로 결정된다. 비례 이득 계수는 표 1과 같이 7개의 언어적인 입력 소속함수를 서로 분리해 줌으로써 오차가 클 때와 오차가 적을 때에 각각 다른 제어 규칙이 적용될 수 있도록 하였다.

표 1 언어 변수
Table 1 Linguistic variable

| 언어 변수 | 설명 |
|-------|-----------------|
| NB | Negative Big |
| NM | Negative Medium |
| NS | Negative Small |
| ZO | ZerO |
| PS | Positive Small |
| PM | Positive Medium |
| PB | Positive Big |

3.1.2 퍼지 제어 규칙의 설정

퍼지 제어규칙은 가장 일반적인 Mamdani의 IF- THEN 제어 규칙으로 수행하였다. 입력 변수 e 와 Δe 는 각각 7개의 입력 소속함수를 갖도록 설계 하였으므로 표 2와 같이 총 49개의 퍼지 제어 규칙이 만들어 질 수 있다. 시스템 출력이 기준입력 위치로부터 멀어지고 있을 경우, 제어 규칙 중 PB 및 NB 값을 사용하여 반대쪽으로 끌어당기는 큰 제어 신호를 만들어 내고, 시스템 출력이 기준 위치를 향해 가고 있을 때는 PS 및 NS 값을 사용하여 가속시켜 준다.

표 2 제안된 퍼지 룰 버퍼
Table 2 Proposed fuzzy rule buffer

| Δe / e | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | ZO | PS | PS | PM | PM | PB | PB |
| NM | PS | ZO | PS | PS | PM | PM | PB |
| NS | PS | PS | ZO | PS | PS | PM | PM |
| ZO | PM | PS | PS | ZO | PS | PS | PM |
| PS | PM | PM | PS | PS | ZO | PS | PS |
| PM | PB | PM | PM | PS | PS | ZO | PS |
| PB | PB | PB | PM | PM | PS | PS | ZO |

3.1.3 퍼지 추론 및 비퍼지화

퍼지 추론으로 가장 일반화 된 방식은 min-max gravity 방식이다. 본 논문에서는 이러한 비선형적인 추론 방식으로는 선형제어기와 동일한 출력 표면을 표현할 수 없으므로, 그림 7과 같이 Mizumoto가 제안한 선형 추론 방식인 product-sum-gravity 방식의 일종인 simplified reasoning 방식을 적용하였다.

Mamdani의 IF-THEN 규칙에 의하여 규칙 $[e(n) \text{ and } \Delta$

$e(n)$]에 대한 사실 [e and Δe]의 적합도 $h(n)$ 은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(n) = \mu_{e(n)}e(n) \times \mu_{\Delta e(n)}\Delta e(n) \quad (2)$$

여기서, $\mu_{e(n)}e(n)$ 와 $\mu_{\Delta e(n)}\Delta e(n)$ 는 각각 입력 변수 e 와 Δe 가 소속함수에 소속되는 정도를 나타낸다.

비퍼지화 과정은 식 (2)에 의해 얻어진 각 퍼지 제어 규칙의 적합도 $h(n)$ 을 각 규칙의 추론 결과인 $z(n)$ 의 가중치로서 사용하는 가중치 평균법(weighted average methods)을 적용하였으며, 식 (3)과 같이 유추된다.

$$c = \frac{a \cdot b \cdot z_1 + a \cdot (1-b) \cdot z_2 + (1-a) \cdot b \cdot z_3 + (1-a) \cdot (1-b) \cdot z_4}{a \cdot b + a \cdot (1-b) + (1-a) \cdot b + (1-a) \cdot (1-b)} \\ = a \cdot b \cdot z_1 + a \cdot (1-b) \cdot z_2 + (1-a) \cdot b \cdot z_3 + (1-a) \cdot (1-b) \cdot z_4 \quad (3)$$

식(3)에서, a 와 b 는 식(4)와 같이 주어진다.

$$a = \mu_{e_1}(e) = \frac{e_2 - e}{e_2 - e_1} \\ b = \mu_{\Delta e_1}(\Delta e) = \frac{\Delta e_2 - \Delta e}{\Delta e_2 - \Delta e_1} \quad (4)$$

여기서, e_1 과 e_2 는 각각 입력변수 e 가 속한 소속함수의 최소·최대값이고, Δe_1 과 Δe_2 는 각각 입력변수 Δe 가 속한 소속함수의 최소·최대값이다.

식 (3)의 z_1, z_2, z_3, z_4 는 각각 그림 7의 4가지 경우에 대한 각 규칙의 추론 결과값이다. 위의 비퍼지화 과정이 끝나면 PID 제어기의 비례이득 계수가 구해진다.

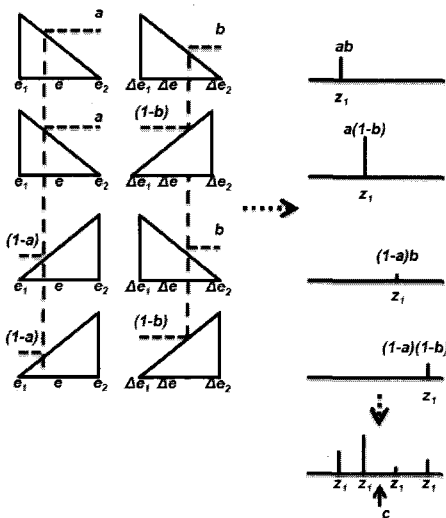


그림 7 단순화된 추론 방식
Fig. 7 Simplified reasoning method

3.1.4 PID 제어 이득 계수

본 논문에서는 퍼지 제어기를 이용하여 PID 이득 중에 비례 이득계수만을 재조정한다. 이에 대응하는 미분 이득계

수와 적분 이득계수는 지글러-니콜스 방식을 이용하여 계산한다. 비퍼지화 블록에서 출력된 퍼지 신호 K_P 는 PID Gains 블록에서 비례 이득계수 K_P 에 더해져서 제어기에 재조정된다.

$$K_{P(After - Apps)} = K_{P(Before - Apps)} - K_{PI} \times K_{CP} \quad (5)$$

여기서 i 는 샘플링 상수이고, $K_{P(After - Apps)}$ 는 규칙 기반 퍼지 PID 제어기를 적용한 증가형 PID 이득계수이고, $K_{P(Before - Apps)}$ 는 재조정되기 전의 이득계수이다. K_{CP} 는 디스케일링 팩터(descaling factor)이다.

재조정된 비례 이득계수를 바탕으로 지글러-니콜스 방식을 사용하여 미분 이득계수 및 적분 이득계수를 계산한다. 이 방식은 페루프에 의해 최적의 PID 이득 계수를 구하는 방법으로 조절계의 비례동작만으로 값을 구한다. 조절계에서 비례 이득계수를 줄여가면서 제어 루프가 한계 진동이 되도록 한 후, 그 결과로서 주기를 구하여 적분 및 미분 동작을 결정하고, 비례 동작은 한계 진동이 발생되었을 때의 PID 이득 계수를 구하여 조절계에 적용시키면 진폭 감쇄비가 25% 이하로 된다. 이 방식은 이득 계수를 구하기 위하여 제어 루프를 변형할 필요가 없다. 적분 시간 상수 T_I 는 진동 주기 T_{OSC} 의 50%이고 미분 시간 상수 T_D 는 12.5% 라고 가정하면 PID 제어기의 미분 및 적분 이득계수는 식(6)과 같이 얻어진다.

$$K_{I_i} = \frac{2K_{P_i}}{T_{OSC}}, \quad K_{D_i} = 0.125 \times K_{P_i} \times T_{OSC} \quad (6)$$

PID 이득계수 K_P, K_I, K_D 는 서로 다른 비율로 변화하므로, 각각의 디스케일링 팩터가 필요하다. K_P 값의 변화에 따른 K_D 및 K_I 계수의 재조정값은 다음과 같다.

$$K_{I(After - Apps)} = K_{I(Before - Apps)} - K_{I_i} \times K_{CI} \\ K_{D(After - Apps)} = K_{D(Before - Apps)} - K_{D_i} \times K_{CD} \quad (7)$$

여기서, K_{CI} 및 K_{CD} 는 디스케일링 팩터이고, K_{I_i} 및 K_{D_i} 는 샘플링 I 번째의 K_{P_i} 값에 대응하여 식 (7)로 계산된 K_I, K_D 값이다.

3.1.5 학습 퍼지 제어기

학습 퍼지 PID 제어기는 그림 8과 같이 규칙 기반 퍼지 PID 제어기에 규칙 생성 및 재조정 부분이 추가된 구조이다. 규칙 생성 및 재조정은 언어 규칙 테이블, 이전 주기의 K_P 버퍼 그리고, 규칙 보강(reinforcement)의 블록들로 구성된다. 만약 위치 추종이 설정점(setpoints)에 도달할 경우, 언어 규칙 테이블로부터 어떠한 gain correction(K_{PC}) 값도 생성되지 않고 학습 퍼지 PID 제어기는 실행되지 않고 규칙 기반 퍼지 PID 제어기만으로 제어를 수행한다. 그러나, 위치 추종이 설정점을 벗어날 경우, 언어 규칙 테이블로부터 새로운 K_{PC} 값이 생성된다. 표 3은 언어 제어 규칙이고, 언어 규칙 버퍼에 사용되는 언어 변수는 표 4와 같다.

3. 실험

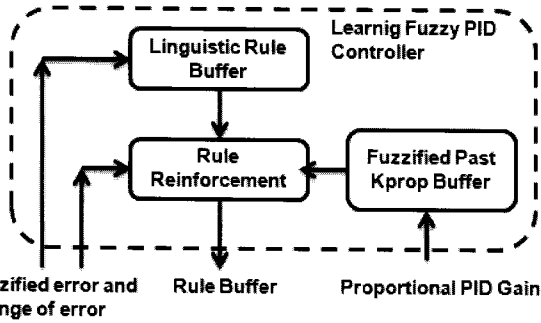


그림 8 학습 퍼지 PID 제어기
Fig. 8 The learning fuzzy PID controller

제안된 학습 퍼지 PID 제어기에 있어서, 현재 시점의 제어 결과는 n 샘플링 전의 조작량에 원인이 있다고 판단하여, 현재 시점보다 n 샘플링 전에 사용한 규칙을 수정한다. 이 값($K_{prop}(I-N)$)과 K_{PC} 값에 의해 규칙 보강 블록에서 새로운 제어 규칙이 생성되고, 이를 규칙 기반 퍼지 PID 제어기의 규칙 버퍼에 적용한다.

$$K_{prop}(I) = K_{prop}(I-N) + K_{PC} \quad (8)$$

여기서, $K_{prop}(I-N)$ 은 지난 주기들의 K_{prop} 버퍼 블록이고, N 은 지난 샘플링 개수, I 는 샘플링 상수이다. K_{PC} 는 gain correction 값이다. 샘플링 개수는 시스템의 지연 시간(delay time)과 관련하여 개수를 정의하며, 현 시스템에서의 샘플링 개수는 6으로 정의하였다.

표 3 언어 규칙 테이블
Table 3 Linguistic rule table

| Δe e | NH | NL | ZO | PL | PH |
|-------------------|----|----|----|----|----|
| NH | PH | PH | ZO | NH | NH |
| NL | PL | PL | ZO | NL | NL |
| ZO | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO |
| PL | PL | PL | ZO | NL | NL |
| PH | PH | PH | ZO | NH | NH |

표 4 언어 변수
Table 4 Linguistic variable

| 언어 변수 | 설명 |
|-------|---------------|
| NH | Negative High |
| NL | Negative Low |
| ZO | ZerO |
| PL | Positive Low |
| PH | Positive High |

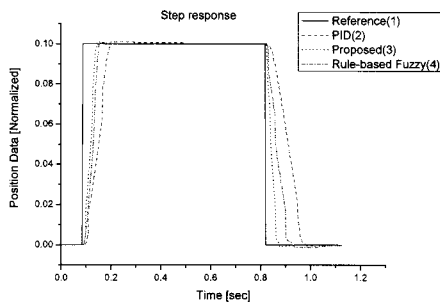
제안된 퍼지 PID 제어기의 신뢰도 및 안정성을 시험하기 위하여, 현재 개발 중인 복강경 수술로봇 시스템의 슬레이브 로봇에 제어를 적용하여 모의 성능 시험을 수행하였다. 5축의 슬레이브 로봇 축 중, 실제 수술 기구가 설치되는 이송 축은 수술 기구의 종류에 따라 각각 다른 중량을 가지고, 동작 형태는 다양하며 시간적으로 빠르게 변하므로 부하 변동에 의한 비선형성이 두드러지게 발생한다. 시스템의 작동 중 부하 변동에 의한 제어기의 제어 성능을 향상시키기 위하여 제안된 퍼지 PID 제어기를 이 이송 축에 적용하였으며, 그 실험 결과를 바탕으로 기존의 선형 PID제어기 및 규칙 기반 퍼지 PID제어기보다 제안된 제어기의 우수성을 증명하였다. 선형 PID 제어기는 지글러-니콜스 방식에 의해 그 이득 계수를 산출하였고, 기존의 규칙 기반 퍼지 PID 제어기 및 제안된 퍼지 제어기의 미분 및 적분 이득 계수 산출 시에 적용하였다. 본 실험은 이송 축을 대상으로 실제 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서, 로봇의 동작 성능을 시험하였다. 동작은 사용자의 임의 동작과 보다 정량적 파악을 위한 정현파 형태의 모의 동작의 두 가지 형태를 지령으로 사용하였다.

이 장에 제시되는 모든 그래프의 단위는 x 축은 시간 (1/250초), y 축은 정량화된 구간 [-1, 1] 값이다. 마스터 로봇과 슬레이브 로봇을 함께 나타낸 그래프에서 실선은 마스터 로봇의 위치이고, 점선은 슬레이브 로봇의 추종 위치를 나타낸다. 모의 실험에 사용한 제어 알고리즘은 기존의 선형 PID 제어, 규칙 기반 퍼지 PID 제어, 그리고 제안된 퍼지 PID 제어 알고리즘을 바탕으로 실험을 통하여 비교하였다. 모의 실험은 마스터 로봇에서 연속적인 사인파 위치 명령을 가했을 경우의 슬레이브 로봇의 위치 추종 실험과 가변 주기의 사인파 위치 명령을 가했을 경우의 두 가지 작업에 대하여 이송 축을 대상으로 실시하였다. 또한 마지막 그래프는 조작자가 직접 마스터 로봇의 이송 축을 수동으로 조작한 경우의 슬레이브 로봇의 위치 추종 실험을 한 결과이다.

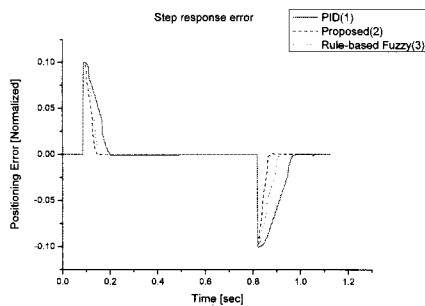
그림 9는 위의 세 가지 알고리즘을 이용하여 마스터 로봇의 계단 위치 명령에 따른 슬레이브 로봇의 단위 입력에 대한 위치 추종 실험을 한 결과이다. 이송축의 급격한 변화에 따른 슬레이브 이송축의 위치 추종은 제안된 퍼지 PID 제어기에서 더 빠른 추종이 가능한 것을 확인하였다. 또한, 그림 9(b)와 같이 실제 오차를 구하면 기존의 선형 PID 제어보다 규칙 기반 퍼지 PID제어 및 제안된 퍼지 PID 제어 알고리즘의 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 마스터 로봇의 가변 주기의 사인파 위치 명령에 대한 슬레이브 로봇의 위치 추종 실험을 한 결과이다. 위치 명령이 급격히 변할수록 세 가지 알고리즘 모두 오차량이 늘어나지만, 제안된 퍼지 PID 제어기의 오차량의 범위가 가장 안정됨을 확인할 수 있다.

마지막으로, 그림 11은 제안된 퍼지 PID 제어 알고리즘을 이용하여 조작자가 직접 마스터 로봇의 이송 축을 수동으로 조작한 경우의 슬레이브 로봇의 위치 추종 실험을 한 결과이다. 마스터 축의 위치 변화에 따른 슬레이브 축의 위치 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.



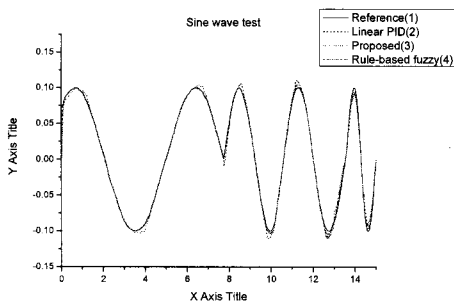
(a)



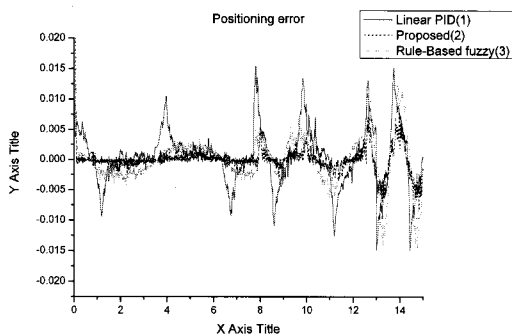
(b)

그림 9 계단 위치 명령에 따른 이송 축의 위치 추종에 대한 결과 파형:(a) 추종 결과와 (b) 위치 오차

Fig. 9 Result of the position tracking performance of the translation joint with step position command: (a)tracking result and (b)positioning error



(a)



(b)

그림 10 가변주기의 사인파 위치 명령에 따른 이송 축의 위치 추종에 대한 결과 파형: (a) 응답 결과와 (b) 위치 오차

Fig. 10 Result of the position tracking performance of the translation joint in with the variable period sine wave command: (a)tracking result and (b)positioning error

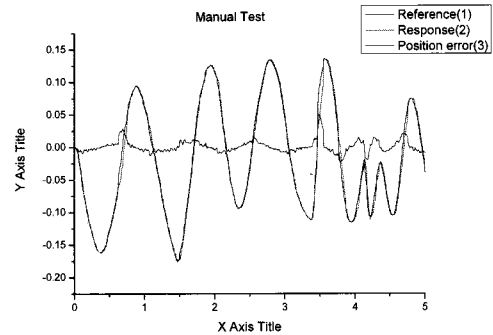


그림 11 조작자의 인위적인 위치 명령에 따른 이송 축의 위치 추종에 대한 결과 파형

Fig. 11 Result of the position waveform of the translation axis in the position command of the artificial manipulation of surgeon

3. 결 론

본 논문에서는 규칙 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘과 학습 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 결합한 구조의 제어기를 현재 개발 중인 복강경 수술 로봇에 적용하였다. 제안된 퍼지 PID제어기는 퍼지 규칙과 소속함수의 설계를 통하여 구현되며, 시스템의 구동 중 상황에 따라 퍼지 규칙을 가변시키는 구조를 적용하여, 비례 이득 값을 유추하고, 이를 토대로 적분 이득 값 및 미분 이득 값을 유추하는 구조의 제어기를 구현하였다.

기존의 선형 PID제어기는 제어기의 이득 값을 산출하기 위하여 시행착오를 통하여 제어기의 이득 값을 조정하거나 수학적 모델링을 통하여 복잡한 계산을 요하였다. 또한 규칙 기반 퍼지 PID 제어기는 그 성능의 우수함은 널리 알려져 있으나, 시스템의 상황에 따른 제어 규칙이 항상 일정하다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 시스템의 상황에 따라 PID 제어기의 최적의 이득 값을 구할 수 있도록 가변적인 제어 규칙을 이용한 퍼지 PID 제어기를 적용하였다.

본 연구는 현재 개발 중인 복강경 수술 로봇 시작품의 이송축에 적용한 실험을 통하여 기존의 선형 PID제어 알고리즘 및 규칙 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘 보다 제안된 퍼지 PID 제어 알고리즘을 적용하였을 경우 제어가 안정하게 이루어지고, 위치 추종이 잘 이루어짐을 확인하였다. 또한 수술 시와 유사한 수준의 부하 및 동작 조건에서의 각종 시험에서 시스템의 추종 성능이 적합한 수준임을 확인하였다. 따라서 이송축뿐만 아니라, 나머지 축에 대한 실험이 진행될 예정이며, 향후 다양한 추가적 기능과 개선된 편의성과 안정성을 위한 보완이 필요하며 관련된 개발이 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2006-000-11368-0)과 2007년도 국립암센터 기관고유사업(0510242-3) 지원으로 이루어진 것으로, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Gawthrop and P.E. Nomikos, "Automatic tuning of commercial PID controllers for single-loop and multi-loop applications," *IEEE Control System Magazine*, vol. 10, No. 1, pp. 34-42, January 1990.
- [2] Q.G. Wang, T.H. Lee, H.W. Fung, Q. Bi and Y. Zhang, "PID tuning for improved performance," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, No. 4, pp. 457-465, July 1999.
- [3] Y. Nishikawa, N. Sannomya, T. Ohta and H. Tanaka, "A methods for auto-tuning of PID control parameters," *Automatica*, vol. 20, No. 3, pp. 321-332, 1984.
- [4] D.P. Atherton, "PID controller tuning," *IEE Computing and Control Engineering Journal*, pp. 44-50, April 1999.
- [5] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers," *Instrument Society of America*, 1988
- [6] T. Shigemasa, Y. Iino and M. Kanda, "Two degrees of freedom PID auto-tuning controllers," *대한전자공학 학회 학술회의 논문집, 제2권*, pp. 724-728, 1987. 1.
- [7] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of ASME*, vol. 64, pp. 759-768, November 1942.
- [8] W. Li, "Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, No. 4, pp. 449-463, November 1998.
- [9] B. Hu, G.K.I. Mann, and R.G. Gosine, "New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, No. 5, pp. 521-539, October 1999.
- [10] M. Mizumoto, "Realization of PID controls by fuzzy control methods," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 4, 709-715, March 1992.
- [11] C. Liu, J. Xu, and C.C. Hang, "Comparison between a fuzzy PID controller and a kind of nonlinear PID controller," *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, vol 3, pp. 2736-2741, December 1997.
- [12] Z. Zhao, M. Tomizuku, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controller," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, No 5, pp. 1392-1398, September-October 1993.
- [13] H.B. Kazemian, "Development of an intelligent fuzzy controller," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 517-520, December 2001.
- [14] S. Assilian, "Artificial intelligence in the control of real dynamic systems," Ph.D. Thesis, Queen Mary College, University of London, 1974.
- [15] Y. Shi and M. Mizumoto, "A learning algorithm for tuning fuzzy inference rules," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems Conference Proceedings*, vol. 1, pp. 378-382, August 1999.
- [16] H.B. Kazemian, "Study of learning fuzzy controllers," *Expert Systems: The International Journal of Knowledge Engineering and Neural Networks*, vol. 18, No. 4, pp. 186-193, September 2001.
- [17] V. Sangveraphunsiri and T. Karmwilaiikom, "Development of a Six Degree-of-Freedom Master-Slave Manipulator System," *Proceeding of the 15th Thailand Mechanical Engineering Network*, November 2001.
- [18] G.S. Guthart and J.K. Salisbury, "The IntuitiveTM telesurgery system: overview and application," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 618-621, April 2000.
- [19] S.C. Low and L. Phee, "A review of master-slave robotic system for surgery," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 1, pp. 37-42, December 2004.
- [20] J.C. Lee, J.W. Park, S.Y. Hong, C.H. Lee, J.W. Shin, S.J. Park and Y.H. Jo, "A new compact slave manipulator for telerobotic abdominal surgery," *17th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology*, September 2005
- [21] L. Zheng, "A practical guide to tune of proportional and integral(PI) like fuzzy controller," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 633-640, March 1992.
- [22] R. Palm, "Tuning of scaling factors in fuzzy controllers using correlation functions," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 691-696, March 1993.
- [23] M. Mizumoto, "Product-sum-gravity method = Fuzzy singleton-type reasoning method = Simplified fuzzy reasoning method," *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy systems*, vol. 3, pp. 2098-2102, September 1996.
- [24] Y.C. Liou and S.M. Guu, "Linear-Time Algorithm for the Fuzzy Weighted Average Method," *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 19, No. 3, pp. 7-12, 2002.

저 자 소 개



송 승 준 (宋 承 駿)

1978년 3월 22일생. 2000년 동국대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2007년~현재 고려대의학과 의용생체공학전공 박사과정.

Tel : 02) 920-6454

Fax : 02) 922-4204

E-mail : semosong@korea.ac.kr



이 덕 희 (李 德 熙)

1974년 11월 1일생. 2001년 한양대학교 전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 의용생체공학과 졸업(공학석사). 2005년~현재 국립암센터 연구소 의공학연구과 연구원.

Tel : 031) 920-2244

Fax : 031) 920-2242

E-mail : ducku@ncc.re.kr



박 준 우 (朴 竣 佑)

1974년 9월 25일생. 1998년 서울대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 협동과정 의용생체공학전공 졸업(공학박). 2004년~현재 국립암센터 연구소의공학연구과 박사후연구원.

Tel : 031) 920-2244

Fax : 031) 920-2242

E-mail : jpark@ncc.re.kr



김 윤 호 (金 胤 昊)

1976년 6월 21일생. 2001년 한양대 전기전자컴퓨터제어학부 졸업. 2003년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학석사). 2007년~현재 고려대 한국인공장기센터 연구원.

Tel : 02) 920-6454

Fax : 02) 922-4204

E-mail : qt356@naver.com



신 정 옥 (辛 政 昱)

1976년 10월 28일생. 1995년~2000년 경북대학교물리학과 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(박사수료). 2004년~현재 국립암센터 양성자치료센터 연구원.

Tel : 031) 920-0287

Fax :

E-mail : jungwook.shin@gmail.com



최 재 순 (崔 載 舜)

1971년 4월 15일생. 1995년 서울대 제어계측공학과 졸업. 2003년 동 대학원 의용생체공학협동과정 졸업(공학박). 2007년~현재 고려대 한국인공장기센터 연구교수.

Tel : 02) 920-6459

Fax : 02) 922-4204

E-mail : aequitas@korea.ac.kr