

논문 2007-02-29

IEEE1394를 이용한 다관절 로봇의 분산 제어 네트워크 개발

(Control Network Design for Multi Body Robot
Based on IEEE1394)

조정산, 성영휘*

(Jung San Cho*, Young-Whee Sung**)

Abstract : This paper propose a control network system based on IEEE1394 for a multi body robot control. The IEEE1394 has the characteristic of high speed(400Mbps), real-time, stability and plug&play. And IEEE1394 also supports freeform daisy chaining, branching and hot plugging, which reduce cabling complexity and make a system simple. Especially, multi host and broadcast support network data sharing method which is suitable for control network for multi body robot. Through experiment, we show that the proposed control network can interface 48 joints (BLDC motors, gears and encoders) and four 6-axis force/torque sensors with 4KHz communication bandwidth, which is adequate for a multi body robot.

Keywords : IEEE1394, Control Network, multi body robot

1. 서론

로봇이 지능적인 동작을 수행하기 위해서는 외부 환경과 적절한 상호작용이 이루어져야 한다. 이를 위하여 주기적으로 센서로부터 데이터를 읽고, 환경에 따른 새로운 명령을 계산하여 그 명령을 구동부에 전송하게 되는데, 전통적으로 컴퓨터 제어 시스템은 다바이스와 점-대-점 방식으로 연결되는 중앙 집중 구조를 갖는다. 그러나 중앙 집중 구조는 복잡하고 가격이 비싸며, 확장과 모듈화가 어렵기 때문에 자립형 다관절 로봇에 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서 필드버스를 이용한 분산제어 방식으로 위의 단점을 보완하는 연구[1]가 이루어지고 있다. 특히 대표적인 자립형 다관절 로봇인 휴머노이드 로봇의 경우 30개 이상의 관절과 F/T센서, ARS 센서 등이 사용되는데 [2][3][4], 이러한 다



Height: 160Cm
Weight: 60Kg
DOF : 35
- Leg 12
- Arm 14
- Waist 6
- Neck 3
Sensor :
- F/T 4
- Limit 35
Actuator :
- BLDC Motor
- Harmonic

* 교신 저자 (Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 12. 7., 채택확정 : 2008. 02. 22.

조정산*, : 포항지능로봇연구소

성영휘** : 금오공과대학교

* 본 논문은 포항지능로봇연구소 자체 과제 연구비에서 지원하여 연구하였음.

그림 1. 포항 지능로봇연구소에서 개발 중인 화랑

Fig. 1. piro's humanoid :: Hwa-Rang

바이스들을 구성하여 제어하기 위해서는 시스템의 소형화, 경량화 및 효율적인 연산을 위하여 분산제어가 필수적이다 [5][6], 또한 안정된 동작을 위하여 각 관절이 유기적으로 제어되어야 하는데 [7], 이를 위해서는 하위 디바이스 또는 하위 제어기들과 상위 제어기 사이에 신뢰도가 높은 고속의 통신이 실시간으로 이루어져야 한다. 현재 대부분의 응용에서 CAN(Control Area Network)를 이용하여 제어네트워크를 구성하는데, 이 경우 높은 통신 대역폭을 기대하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 휴머노이드 로봇과 같은 다관절 로봇에의 적용을 목표로 IEEE1394를 이용하여 48개의 관절과 4개의 6축 힘/토크 센서를 25KHz의 통신 대역폭으로 인터페이스 하는 방법을 제안하고, 실험을 통하여 적용 가능성을 보인다. 2장에서는 IEEE1394를 이용한 제어네트워크의 장점과 그러한 장점을 바탕으로 설계 및 제작된 디바이스에 대한 설명을 하고, 3장에서는 IEEE1394의 데이터 읽기/쓰기 특성과 개발된 디바이스들을 연결하여 구성한 제어네트워크의 특성을 실험을 통해 보인다.

II. 본 론

1. 다관절 로봇의 제어네트워크

전술한 바와 같이 다관절 로봇은 많은 관절과 센서로 구성되며 이들을 인터페이스하고 제어하기 위해서는 하나의 시스템으로 구성해 온 것이 일반적이다. 시스템 구성을 중앙 집중식으로 할 경우 많은 전원선과 신호선이 필요하고, 주변 장치들로 인하여 시스템이 커지며, 향후 독립적인 로봇 형태의 제작이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 디바이스들을 분산하고, 각각의 디바이스들을 다시 하나의 시스템으로 묶을 수 있는 네트워크가 필요하다. 이러한 제어네트워크는 매 샘플링 주기마다 데이터 수집과 명령 전달이 고속으로 이루어져야 하므로, 대량/고속의 데이터 전송이 가능해야 하고, 실시간성을 가져야 하며, 시스템 구성이 간결하고 효율적이면서 프로토콜 자체의 신뢰도가 높아야 되는 등 몇 가지 요구 조건들을 만족해야 한다.

제어 네트워크에서 데이터 속도 및 지연시간, 허용 가능한 네트워크 노드 수, 내잡음성을 고려한 적절한 필드버스를 선택하기 위해서는 상황에 따른 절충이 요구되는데, 하나의 조건을 최적화하면 다른 조건과 상충될 수 있으므로, 적절한 네트워크를 구성해야 한다. 즉, 적용분야에 맞도록 적합한 네트워

크를 구성해야 한다.

다관절 로봇의 제어 네트워크에 IEEE1394 [8]를 적용할 경우, 데이터 체인 연결로 배선이 간결해지고 무게를 줄일 수 있으며, 핫-플러깅 방식이므로 시스템 구성이 용이하다. 또한, 프로토콜 자체의 안정성이 높고, 많은 컴퓨터들이 IEEE1394 포트를 제공하여 별도의 디바이스 없이도 PC에서 직접 인터페이스가 가능하므로 실시간 동기 제어네트워크에 적합한 통신 프로토콜이다. 빠른 속도와 실시간성, 프로토콜 자체의 안정성, 플러그 앤 플레이, 멀티 호스트, 브로드 캐스팅 등의 특성을 가지는 IEEE1394를 이용하여 제어네트워크 구성 시 얻을 수 있는 이점을 아래와 같이 정리할 수 있다.

데이터 처리 속도와 안정성

현재의 1394a는 400Mbps, 1394b는 800Mbps의 통신 속도를 가지며, 3.2Gbps로 개발 진행 중이다. 빠른 속도에도 불구하고 프로토콜 자체의 안정도가 높으며, 프로토콜 프로세싱, 상태 체크 등이 하드웨어적으로 이루어져 상위 디바이스의 어플리케이션이 가벼워 마이크로프로세서가 가지는 부담과 시간이 줄어든다. 또한 규격화된 IEEE1394의 물리계층(커넥터, 케이블 등)도 잡음에 강하게 설계되어 안정성이 높다.

플러그 앤 플레이(Plug&Play)

네트워크상에 노드가 연결 또는 단절되면 버스 리셋이 발생하는 것을 이용하여 하위 디바이스의 연결 상태를 확인할 수 있으며, 초기 시스템의 구성을 파악할 수 있고, 새로운 디바이스의 연결에 대한 관찰이 가능하다. 또한 운용 중에 하위 디바이스에 전원 이상, 리부팅 등의 오류가 발생하게 되면, IEEE1394 네트워크에 버스 리셋이 하드웨어적으로 자동 발생되는데, 이는 시스템 전체의 오류로써 모니터링이 가능하다.

멀티 호스트, 브로드 캐스팅

(Multi Host and Broad Casting)

멀티 호스트 기능은 USB와는 달리 각각의 노드 모두가 버스 사용 권한을 가진다는 것을 의미하며, 이와 함께 브로드 캐스팅은 특정한 타겟 노드 없이 네트워크에 연결된 모든 노드에 데이터를 쓸 수 있음을 의미한다. 이는 모든 노드에서 네트워크상에 있는 데이터를 공유할 수 있으며, 데이터 쓰기에서 노드 간 확인하는 절차가 생략되어 시간을 절약할 수 있다.

2. IEEE1394 기반의 하위 디바이스 개발

1절에서 설명한 IEEE1394의 장점을 제어네트워크에 적용하기 위해서는 그에 알맞은 디바이스 개발과 시스템 구성이 필요하다. 따라서 제어네트워크에서 IEEE1394의 최대 효율을 이끌어내기 위한 방법을 모색해보고 그에 따른 적합한 디바이스를 설계하고 제작하였다. 제어네트워크에서는 멀티미디어 어플리케이션에 비하여 소량의 데이터를 여러 노드와 주고받는데, IEEE1394에서는 64bit 데이터를 전송하기 위한 패킷에서 헤드가 160bit, 테일이 32bit가 필요하다. 이는 시간적인 면에서 오버헤드로 작용된다. 또한 물리 계층에서 소모되는 시간에 비해 상위 계층에서의 처리 시간이 훨씬 많아서 전체 처리시간에서 데이터의 양에 따른 소모 시간의 차이가 많지 않다. 따라서 IEEE1394를 제어네트워크에 사용하기 위해서는 패킷의 데이터양은 많고, 패킷의 수는 적을수록 유리하다. 만약 모터와 센서가 각각 하나의 디바이스로 인터페이스 되고, 각 디바이스가 하나의 노드로 연결되면 위와 같은 이유로 IEEE1394의 장점을 살리기 어렵다. 특히, 센서 인터페이스의 경우 원시 데이터(raw data)를 물리적인 값으로 변환하고 필터링하는 신호처리가 필요하고, 이는 샘플링 시간과 연계되므로 상위 제어기에서 처리할 경우 상당한 부하로 작용되며, 정밀한 제어에 있어 문제를 야기할 수 있다. 또한 토크 명령의 경우 상위 제어기의 계산상 오류나 통신상 오류를 하위제어기에서 확인하지 않으면 시스템이 발산할 위험이 있다.

센서 또는 DAC의 경우는 아날로그 신호로서 신호선의 길이가 길어짐에 따라 신호의 왜곡이 발생하므로 신호 선을 짧게 할 필요가 있다. 이는 모터 또는 센서와 가까이 디바이스를 연결하고 이후는 CAN을 이용한 복층 네트워크로 구성하여 중간 단계의 디바이스가 하위에서 데이터를 수집하여 IEEE1394네트워크에 데이터를 실는 방식으로 해결하였다. 광학식 엔코더의 신호는 디지털이고, 산업현장과는 달리 제한된 크기의 로봇에서는 신호선의 길이가 한정되므로 하나의 디바이스에 많은 채널을 가지도록 설계하였다. 하위 인터페이스 디바이스에서 신호를 선처리(pre-process)하면 상위 제어기의 부하를 줄이고, 샘플링 시간이 짧아 시스템 대역폭을 크게 할 수 있으며, 상위 제어기로부터 입력되는 명령의 오류를 체크하여 시스템의 불안정성을 보완할 수 있다. 이러한 점들을 고려하여 아래와 같은 방법으로 설계된 하위 디바이스를 그림 2에 나타내었다.



	<p>piro1394PC</p> <ul style="list-style-type: none"> •1394 and PCI interface •66MHz PCI •Hub of Control Network •Sampling Time : 500usec/4board •CAN, RS232 interface, PWM, GPIO •Supply Power : +5V
	<p>piro1394</p> <ul style="list-style-type: none"> • IEEE1394a protocol : 400Mbps • 512 Byte read process Time : 84usec • Size : 7cm x 7cm x 1cm (W x L x H) • I/O interface : RS232, CAN, SPI, PWM, I2C, ADC, GPIO • Mother module of the interface module
	<p>piroQEP</p> <ul style="list-style-type: none"> •Quadrature Encoder Pulse Interface •Resolution : 32 bit •Channel : 16Ch •Counter Frequency : 20MHz •Sampling Time : 150usec/ 16ch
	<p>piroADC_CAN</p> <ul style="list-style-type: none"> •Resol./Ch : 14 bit / 8 Ch •Throughput : 500KSPS •Sampling Time : 200usec/8ch •CAN, RS232, Differential Input, Variable Input Limit, GPIO •Supply Power : ±12V
	<p>piroDAC_CAN</p> <ul style="list-style-type: none"> •Resolution / Channel : 11 bit / 8Ch •PWM frequency : 100KHz •Sampling Time : 500usec/4board •CAN, RS232 interface, PWM, GPIO •Supply Power : +5V
	<p>piroDIO</p> <ul style="list-style-type: none"> •Digital input / output module •Channel <ul style="list-style-type: none"> - Input : 16 - Output : 16 •Interface Range : 5 ~ 24V

그림 2. 다관절 로봇 제어를 위해 개발된 디바이스
 Fig 2. Developed piroDevices for the Control Network for the multi body robot

그림 3은 실험용 이족 보행 로봇의 제어 네트워크에 적용하기 위하여 48개의 모터와 엔코더, 4개의 6축 F/T 센서를 인터페이스 하는 시스템 블록 다이어그램을 나타낸다. piroQEP는 광학식 엔코더의 펄스를 카운트하며, piro1394는 SPI통신을 이용하여 카운트된 데이터를 읽어 물리적인 각도와 각속도 값으로 변환하고, 이를 IEEE1394 네트워크에 공유한다. piroADC_CAN는 6축의 F/T센서의 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환하고 다시 전압 값으로 변환한다. 변환된 전압 값을 지역통과 필터를 통하여 필터링하고 캘리브레이션 매트릭스를 이용하여 6축의 힘과 토크 값으로 변환한 후, CAN을 통하여 piro1394에 전송하며, piro1394에서는 4개의 센서 데이터를 통하여 ZMP를 구하고, 힘과 토크 그리고 ZMP값을 IEEE1394 네트워크에 공유한다. piroPCI는 IEEE1394 네트워크상에 공유된 데이터를 수집하여 주제어기와 공유하는 메모리(Dual port RAM)에 저장하며, 네트워크상의 오류를 관찰하고, 그 정보를 주제어기에 전달한다.

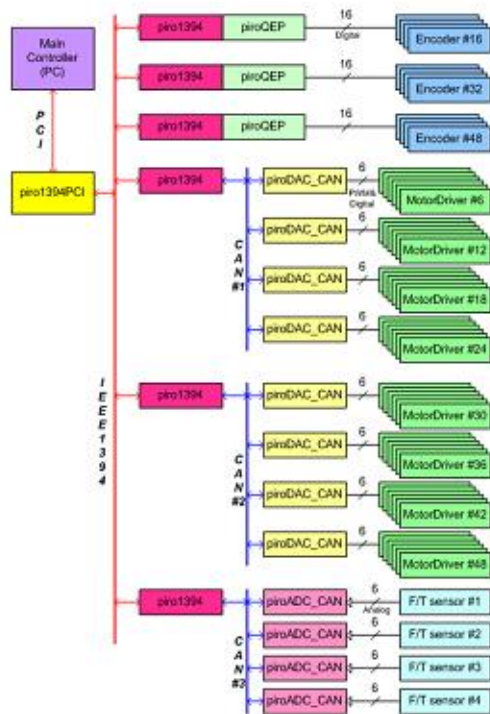


그림 3. 다관절 로봇 제어를 위한 시스템 블록의 예
(관절 : 48, F/T sensor : 4)

Fig. 3. An example for the system block diagram for multi body robot(48 joints, 4 F/T sensors)

주 제어기에서는 수집된 정보를 이용하여 새로운 명령을 계산하고 이를 piroPCI의 공유 메모리에 저장하며, piroPCI는 데이터를 IEEE1394 네트워크에 공유한다. 공유된 데이터는 piro1394에서 piroDAC_CAN에 맞는 데이터 포맷으로 변환하여 CAN 네트워크에 공유하고, 각각의 piroDAC_CAN은 PWM 신호로 변환하여 모터드라이버에 전송한다.

III. 실험

제안된 제어 네트워크를 실험하기 위해 주 제어기는 Intel Pentium 4 3.0GHz CPU로 구성된 PC에 Windows XP 운영체제를 이용하였으며, 실시간 제어를 위하여 RTX [9] 를 사용하였다.

1. IEEE1394 데이터 읽기/쓰기 실험

주제어기와 piro1394의 통신 실험으로 읽기/쓰기 소요시간을 RTX의 100nsec 분해능의 타이머를 이용하여 측정하였다. 그림 4는 8바이트부터 256바이트까지 4바이트씩 증가시키면서 각 바이트별 소요시간을 100번 측정하여 평균을 취해 나타낸 것이다. 그림 4에서 보듯이 호스트가 하위 디바이스로부터 데이터 읽기(Read Request Block)시에 소요되는 시간은 8바이트일 때 약 50usec, 256바이트일 때 약 100usec이며, 호스트에서 하위 디바이스에 데이터 쓰기(Write Request Block)에 소요되는 시간은 8바이트일 때 약 50usec, 256바이트일 때 약 95usec이다. 브로드캐스팅으로 데이터 쓰기(Write Request Block Broadcasting)에 소요되는 시간은 8바이트일 때 약 38usec, 256바이트일 때 약 48usec로 브로드캐스팅 방식이 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

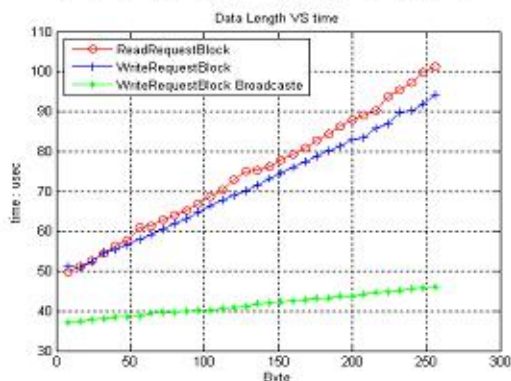


그림 4. 바이트 크기에 따른 읽기/쓰기 소요시간
Fig. 4. Byte size versus Read/write time

그림 5는 같은 크기의 데이터를 액세스할 때, 소요시간의 반복성을 측정하기 위하여 128바이트 크기의 데이터를 10msec 주기로 1초 동안 액세스할 때의 소요시간을 나타내었다. 그래프의 X축은 샘플링 시간(최대 1초) Y축은 데이터 액세스 소요시간을 의미한다. 그림 5에서 알 수 있듯이 소요시간의 가변 범위가 5usec 이내로 소요시간의 반복성이 우수하며, 실시간성이 보장됨을 알 수 있다.

2. 48개 관절과 4개의 F/T 센서 인터페이스

48개의 관절(모터, 엔코더)과 4개의 6축 F/T 센서로 구성되는 시스템을 실시간으로 제어하기 위하여 실시간 인터페이스가 이루어져야 하는데, 매 샘플마다 엔코더 인터페이스 디바이스(piroQEP)로부터 각도와 각속도 데이터를 읽고(3회), F/T 센서 인터페이스 디바이스(piroADC)로부터 4개의 센서 데이터를 읽으며(1회), 그 결과를 바탕으로 계산된 새로운 토크 명령을 DAC 디바이스(piroDAC)에 쓰기(1회 브로드 캐스팅)를 반복한다. 계산 시간(Computation time)은 제어 알고리즘에 따라 달라질 수 있으므로 고려하지 않고 통신에 소요되는 시간만을 측정하였으며, 각각의 디바이스와 인터페이스 하기 위한 프로토콜, 데이터 크기 및 소요시간을 [표 1] 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 48개의 관절과 4개의 F/T 센서를 인터페이스 하는데 소요되는 시간은 약 250usec로 4KHz의 통신 대역폭을 가짐을 알 수 있다.

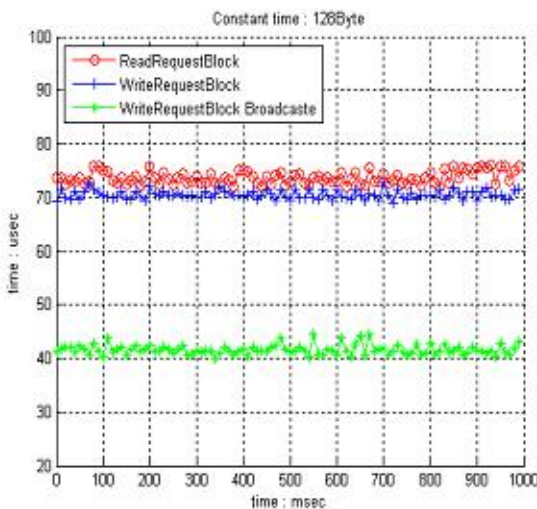
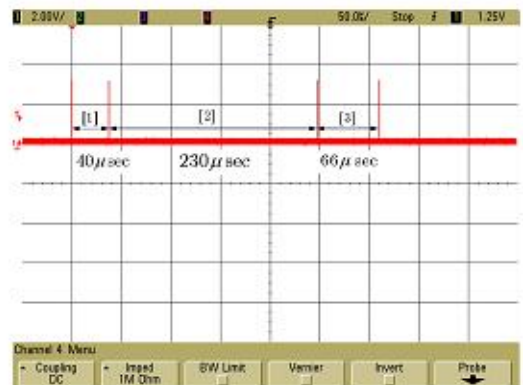


그림 5. 일정한 바이트 크기에 대한 반복성
Fig 5. The repeatability for a same byte size

표 1. 디바이스별 데이터 형식 및 소요시간
Table 1. The required time and data format for each device

	torque command	Encoder	F/T sensor
protocol	WRB_Bc ¹	RRB ²	RRP ³
data	torque (16bit)	position (52bit), velocity (52bit)	Px(52bit), Py(52bit), Pz(52bit), Tx(52bit), Ty(52bit), Tz(52bit)
Length	2L ³ × 48N ⁴ = 96byte	6L ³ × 16N ⁴ = 128byte	16L ³ × 6N ⁴ = 96byte
time	40usec	75usec	66usec
repeat	1	5	1
total	40usec	225usec	66usec

WRB_Bc¹ : Write Request block Broadcasting
RRB² : Read Request Block
L³ : Length of data (byte)
N⁴ : Number of data



- [1] Torque command write
- [2] Encoder Read
- [3] P/T sensor Read

그림 6. 48개의 관절과 4개의 F/T 센서 인터페이스 타이밍도

Fig. 6. The timing diagram for 48 joints and 4 F/T sensors interface

IV. 결 론

본 논문에서는 포항지능로봇연구소에서 개발 중인 다관절 로봇 제어를 위한 제어네트워크에 대하여 기술하였다. 실험을 통하여 IEEE1394와 그에 적합하게 설계한 하위 디바이스들을 이용하여 48개의 관절 모터와 4개의 F/T 센서를 4Khz 이상의 통신 대역폭으로 인터페이스 할 수 있음을 보였다. 현재 제안된 시스템 구성도와 브로드캐스팅 기능을 통한 데이터 공유 방식의 미들웨어를 개발하고 있으며, 향후 다관절 로봇에 적용할 예정이다.

참고문헌

- [1] Ruiz, L, DalleMagna, P, Decotignie, J.D. "Using Firewire as industrial network" Proceedings of SCCC '99, XIX International Conference of the Chilean pp.201-208, Nov, 1999)
- [2]"MAHRU Spec.", <http://humanoid.kist.re.kr/>
- [3]"Albert Hubo Spec.", <http://ohelab.kaist.ac.kr/>
- [4]"ASIMO's Spec." <http://asimo.honda.com/>
- [5]Bum-Jae You, Young-Jin Choi, Mun-Ho Jeong, Doik Kim, Yong Hwan Oh, ChangHwan Kim, Jung San Cho, Minchul Park, and Sang-Rok Oh, "Network-based Humanoids 'MAHRU' and 'AHRA'" Proceedings of International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp.376-379, Nov, 2005.
- [6]Kazuhiko AKACHI, Kenji KANEKO, Noriyuki KANEHIRA, Shigehiko OTA, Go MIYAMORI, Masaru HIRATA, Shuuji KAJITA, Fumio KANEHIRO "Development of Humanoid Robot HRP-3P", Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Dec, 2005
- [7]Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura, "Whole-body Cooperative COG Control through ZMP Manipulation for Humanoid Robots", 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines(AMAM2003), SaP-III-4, Kyoto, Mar., 2003
- [8]Don Anderson "FIREWIRE SYSTEM ARCHITECTURE 2nd Ed" MINDSHARE, INC.,1999
- [9]Ardence, INC. "RTX® - Real-time Extension for Control of Windows®" www.ardence.com
- [10]TheSycon, INC. "Versatile High Performance IEEE1394 Device Driver for Windows Reference Manual" version2.0 July 15, 2005

저 자 소 개

조정산



2002년 : 금오공과대학교
제어계측전공 학사.
2004년 : 금오공과대학교
전자제어공학 석사
현재 : 포항지능로봇연구소
연구원

관심분야 : 인간형 로봇, 임베디드,
매니플레이터, 실시간 제어
Email: choecrc@postech.ac.kr

성영취



1988년 : 고려대학교 전자공
학 학사.
1991년 : 한국과학기술원 전
기전자공학 석사
1996년 : 한국과학기술원 전
기전자공학 박사
현재 : 금오공과대학교 부교수.

관심분야 : 인간형로봇, 여유자유도
매니플레이터, 지능제어
Email: ywsung@kumoh.ac.kr