

논문 2013-08-36

고속 정밀 로봇 제어를 위한 실시간 중앙 집중식 소프트 모션 제어 시스템

(Real-Time Centralized Soft Motion Control System for High Speed and Precision Robot Control)

정 일 균*, 김 정 훈

(Il-Kyun Jung, Jung-Hoon Kim)

Abstract : In this paper, we propose a real-time centralized soft motion control system for high speed and precision robot control. The system engages EtherCAT as high speed industrial motion network to enable force based motion control in real-time and is composed of software-based master controller with PC and slave interface modules. Hard real-time control capacity is essential for high speed and precision robot control. To implement soft based real time control, The soft based master controller is designed using a real time kernel (RTX) and EtherCAT network, and servo processes are located in the master controller for centralized motion control. In the proposed system, slave interface modules just collect and transfer all sensor information of robot to the master controller via the EtherCAT network. It is proven by experimental results that the proposed soft motion control system has real time controllability enough to apply for various robot control systems.

Keywords : Soft motion, EtherCAT, Hard real time, Centralized, High speed and high precision

1. 개요

산업용 로봇 및 자동화 장비들은 병렬로봇과 같이 Pick-and-Place 등 다양한 분야에서 빠른 동작 성능과 정확성을 장점으로 다양한 어플리케이션에 사용되고 있다. 산업현장에서 고충량의 작업을 핸들링 등 Pick-and-Place 이외의 작업에도 인간과의 협력을 통하여 실용화 되고 있으며[1, 2], 고도의 프로그래밍 기술 없이도 로봇을 제어할 수 있는 기술과 함께 급격하게 발전하고 있다[3-5]. 이러한 연구들은 고속 네트워크를 기반으로 하고 있으며[6, 7], 고충량의 데이터를 이더넷 기반의 고속 네트워크를 산업용에 적용하여 실시간으로 데이터를 교환할 수 있는 연구가 진행되었다[8]. 이러한 산업용 고속 네트워크 인터페이스를 구현하기 위해서는 지

연시간, 메시지 전달 데드라인, 라운드 타임 등 필수적으로 보장되어야 하는 요소들이 있으며[9], 이더넷은 개방형 네트워크로 100Mbps 전달속도와 짧은 응답시간 및 싸이클링 타임을 가지는 산업용 네트워크이다. 이더넷은 수백개의 I/O와 연결될 수 있고, 응답지연이 짧기 때문에 고속 고정밀 다축 로봇 제어에 적합한 네트워크 이다[10, 11]. 최근 다품종 소량 생산이 일반화 되면서 다양한 산업용 어플리케이션에 적용하기 위하여 유연성과 확장성이 보장되는 소프트웨어 기반 제어가 제안되고 있으며[12, 13], 실시간 제어 성능을 소프트웨어적으로 보장하기 위하여 실시간 커널을 사용하여 소프트웨어 제어기의 실시간성을 확보하고 있다[14].

본 논문에서는 초고속 정밀 로봇제어를 위한 실시간 중앙 집중식 소프트 모션 제어 시스템을 제안한다. 제안된 제어 시스템은 100Mbps 통신 속도를 가진 네트워크로 이더넷을 사용하여 소프트웨어를 기반으로 하는 중앙집중식 중앙정보처리기(Master controller)를 기반으로 한다. 기존의 서보컨트롤러가 슬레이브에 내장되어 있는 분산방식의 모션 컨트롤러는 각 축의 상황변화에 대한 종합적인 대처

* Corresponding Author (mickey3d@keti.re.kr)

Received: 15 Feb. 2013, Revised: 18 Mar. 2013,

Accepted: 1 Nov. 2013.

I.K. Jung: KEIT

J.H. Kim: KIRO

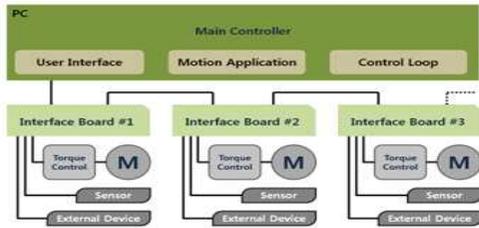


그림 1. 실시간 중앙집중식 소프트 모션 제어 시스템 구성도

Fig. 1 System configuration of real-time centralized soft motion control system



그림 2. 실시간 소프트 로봇 제어 시스템 전장 구성
Fig. 2 Implementation of real-time soft robot control system

및 최적화 구현의 어려운 반면, 중앙집중식은 중앙 정보처리기의 제어기에 서보컨트롤러가 소프트웨어적으로 내장되어 있어 알고리즘 최적화, 상황변화대처 등이 용이하다. 종속정보처리기(Slave controller)는 각 축의 정보를 수집하여 주제어기에 전달하고 축제어 명령을 서보앰프에 전달하는 역할을 한다. 이더넷 네트워크를 채용하고 있어 중앙집중식 모션 제어기의 실시간성 확보가 가능하다.

본 논문에서는 제안된 중앙집중식 실시간 소프트 모션 제어 시스템 설계, 해석 및 구현을 기술하며, 각 축을 1Khz 이하로 제어할 수 있어 다양한 고속 고정밀 로봇 제어에 적용 가능성을 실험적으로 증명한다.

II. 중앙 집중식 소프트 모션 제어 시스템

1. 중앙집중식 소프트 모션 제어 시스템

로봇의 실시간 모션 제어를 위해서는 각 축의 정보와 제어를 위한 각종 센서 정보들이 모션 제어를 위한 주 제어기에 전달되어야 한다. 이를 위하여 제안된 시스템에서는 100Mbps 대역폭을 가진 EtherCAT을 통하여 각종 센서의 정보를 주 제어기로 전송한다. 주 제어기에서는 전송받은 데이터를 처리하여 모션제어를 수행하고 이를 통하여 생성된

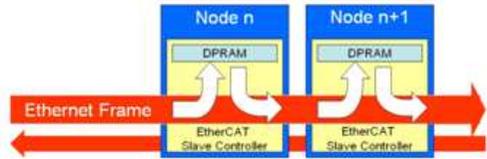


그림 3. 이더넷 프로세싱 온 더 플라이 구조
Fig. 3 Processing On-the-Fly of EtherCAT

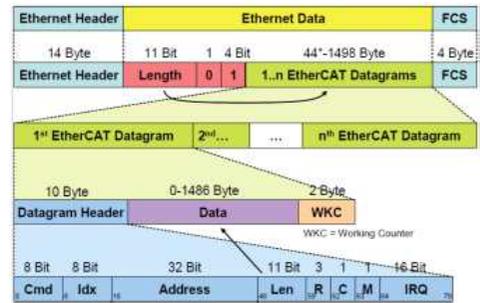


그림 4. 이더넷 프레임 구조
Fig. 4 EtherCAT frame structure

각 축의 제어 출력 값은 EtherCAT을 통하여 전송된다. 주 제어기의 실시간성은 실시간 운영 체제인 RTX와 종속 정보 처리기에서 EtherCAT을 통하여 전송되는 Time stamp를 참조하여 동작하는 실시간 감시기(Real time Observer)를 통하여 보장 된다.

그림 1, 2는 제안된 중앙집중식 소프트 모션 제어 시스템 구성도 및 전장 구성의 나타낸다. 중앙집중식 제어기는 모션, 축제어 블록이 모두 마스터 제어기에 포함되어 있다. 1장에서 기술된 것처럼, 소프트웨어 기반에 중앙집중식 제어기기기 때문에 다양한 시스템에 유연하게 적용되고 확장될 수 있다.

2. 주 제어기

주 제어기에 고속 네트워크로 적용된 이더넷은 OSI(Open Systems Interconnection)에 따른 7계층 중 4개의 계층만 포함함으로써 불필요한 프로토콜처리에 사용되는 부하를 최소화 하고 노드간 충돌을 방지하기 위한 Master-Slave 구조로 되어 있다. Master에서만 최초 패킷을 전송시킬 수 있으며 Slave는 Master가 전송한 패킷을 읽거나 수정할 수 있고 허가되지 않은 패킷 생성은 할 수 없다. 특이할 점은 패킷이 먼저 도착한 Slave에서 패킷을 읽거나 수정하면서 다음 Slave로의 전송이 동시에 이루어지게 된다. EtherCAT은 Processing

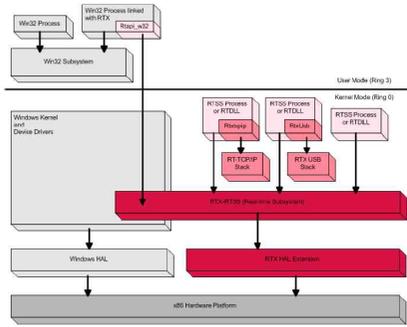


그림 5. RTX 운영체제 구조
Fig. 5 RTX O/S structure

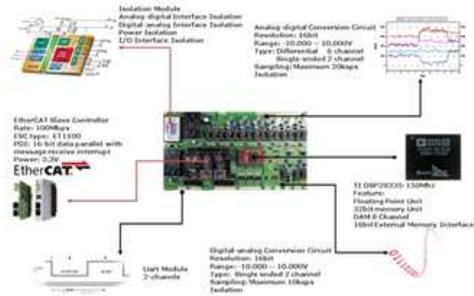


그림 7. 종속 정보 처리기
Fig. 7 Slave data handler configuration

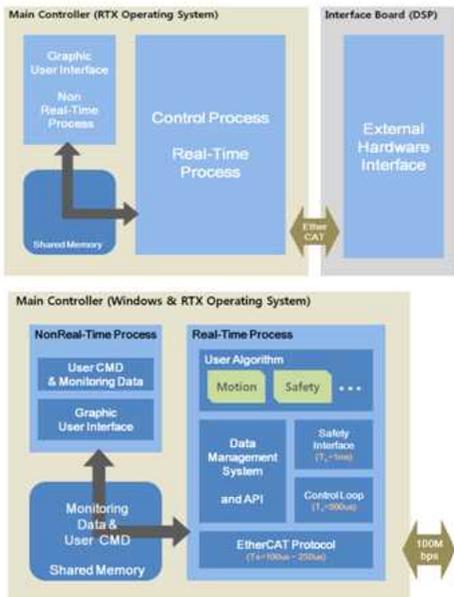


그림 6. 주 제어기를 위한 소프트웨어 플랫폼
Fig. 6 Software platform for the Master controller

On-the-Fly 방식을 사용함으로써 100Mbps 속도의 버스에서 효율을 90%이상 상승시키면서도 패킷 충돌 없이 수십us의 응답 속도를 낼 수 있다.[7, 8] 더욱이 Master로 사용되는 PC에 별도의 하드웨어가 필요한 다른 Ethernet기반의 통신 방식과 다르게 표준 Ethernet Card만 있으면 소프트웨어적인 처리를 통하여 Master로 동작할 수 있는 장점이 있어 소프트웨어 기반 제어기의 고속 네트워크로 주로 사용되는 개방형 네트워크이다. 그림 3, 4는 이더넷 전달특성 및 프레임 구조를 보여준다.

주 제어기에 실시간성 확보를 위하여 실시간 커널을 적용한다. 본 논문에서 제안한 소프트웨어 주 제어기에서는 RTX를 실시간 커널로 채용하였다.

그림 5와 같이 RTX는 멀티 프로세서 환경에서 Windows환경과 프로세서를 분리하여 할당함으로써 비실시간 프로세서가 실시간 프로세서에게 영향을 미칠 수 있는 환경을 최대한 배제하고 Windows에 영향을 받지 않는 독립적 프로세스 스케줄러와 별도의 HAL (Hardware Abstraction Layer)를 가지고 있어 프로세스들의 실시간 동작을 가능하게 한다. RTX를 사용한다고 할지라도 운영체제는 PC라는 하드웨어 환경에서 동작하는 하나의 소프트웨어라는 한계를 갖고 있기 때문에 하드웨어적으로 발생하는 내부 타이머의 정주기성 손상에 대하여 해결할 수 있는 방법이 존재하지 않는다. 그리하여 본 논문에서는 고속 통신을 이용하여 외부로부터 절대적 시간을 참조할 수 있는 클럭을 참조함으로써 Hard real-time성을 보장하는 방법을 제시한다.

주 제어기는 산업용 혹은 일반 PC로 구성이 가능하며 소프트웨어적인 제어 플랫폼을 통하여 구성되어 있다. 동작하는 소프트웨어는 실시간 프로세스와 비실시간 프로세스로 분리되어 구성되어있으며 실시간 프로세스는 제어와 관련된 직접적 동작을 수행하고 비실시간 프로세스는 GUI나 모니터링과 같은 사용자 인터페이스에 관련된 동작을 수행한다. 그림 6은 제안된 소프트웨어 플랫폼을 나타낸다.

3. 종속 정보 처리기

각종 센서 인터페이스를 통하여 제어 대상이 되는 로봇의 센서 정보를 수집하여 주제어기로 EtherCAT을 통하여 전송하고 주 제어기로부터 측당 제어 출력을 전기 신호화 하여 전달하는 역할을 수행한다. 또한 주 제어기의 실시간성을 감시하기

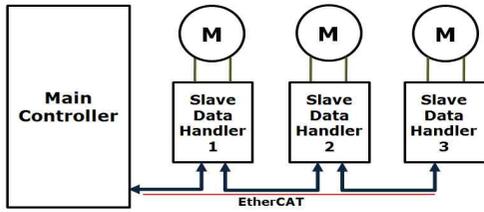


그림 8. 소프트 모션 제어 시스템 구성

Fig. 8 Setup of the Soft Motion Control System

위하여 50us주기로 Time Stamp를 생성하여 전송한다. 종속정보 처리기는 DSP 28335를 프로세서로 사용하였고 아날로그 출력 형태 센서를 받아들이기 위한 ADC 8ch, 모터 드라이버와 인터페이스를 위한 DAC 2ch, Digital I/O 16ch, Incremental Encoder 입력을 받기위한 QEP 회로 2ch, 절대엔코더 인터페이스를 위한 CAN/SCI 통신 각 1ch, 로봇용 Gripper Hand와 같은 펄스 입력 디바이스들의 조작을 위한 PWM 2ch, EtherCAT 통신을 위한 통신 모듈 1ch로 구성되어 있다(그림 7). 종속 정보 처리기는 중앙제어기의 소프트웨어적 데이터를 전기적 신호로 변환하는 작업과 중앙 제어기를 감시하는 동작을 하는 것 외에 별도의 알고리즘이 동작하고 있지 않다.

III. 소프트 모션 제어 시스템 분석

그림 8, 9는 중앙 집중식 소프트 모션 제어 시스템 분석 및 성능시험 평가를 위한 시스템 구성 및 실험 환경을 나타내고 있다. 1개의 주 제어기와 3개의 종속 정보 처리기가 EtherCAT 네트워크로 구성되어 있으며 각 종속 처리기에는 최대 2축의 모터 제어가 가능하도록 구성되어있다. X86 쿼드코어 PC와 IntelPRO1000 이더넷인터페이스카드, RTX SMP 버전을 이용하여 마스터 제어기가 구성되었으며, EtherCAT네트워크로 연결된 3개의 종속 정보 처리기가 연결되어 최대 6축까지 동시에 제어할 수 있다.

1. 실시간 통신 정주기성

주 제어기와 종속 정보 처리기는 100us 간격으로 패킷을 전송하며 통신 정주기성에 대한 측정 실험을 하였다. 표 1의 결과는 패킷을 10,000,000회 전송하여 하드웨어 타이머로 측정 후 주 제어기로 전송한 결과이다. 실험 결과상으로 98~ 103us의 범위에 97% 이상의 수신율을 볼 수 있다. 이더넷

표 1. 슬레이브의 통신 정주기성 실험 결과
Table 1. Cyclic Communication Test for Slave Data Handler (100us / 10M Count)

Time (us)	Slave Data Handler 1	Slave Data Handler 2	Slave Data Handler 3
72	0.00%	0.00%	0.00%
75	0.00%	0.00%	0.00%
78	0.00%	0.00%	0.00%
81	0.47%	0.47%	0.48%
84	0.16%	0.15%	0.15%
87	0.00%	0.00%	0.00%
90	0.00%	0.00%	0.00%
93	0.00%	0.00%	0.00%
96	0.76%	0.76%	0.76%
99	92.21%	92.21%	92.19%
102	5.76%	5.77%	5.77%
105	0.05%	0.05%	0.05%
108	0.00%	0.00%	0.00%
111	0.00%	0.00%	0.00%
114	0.00%	0.00%	0.00%
117	0.58%	0.58%	0.59%
120	0.01%	0.01%	0.01%
123	0.00%	0.00%	0.00%
126	0.00%	0.00%	0.00%
129	0.00%	0.00%	0.00%



그림 9. 성능시험 평가 시스템

Fig. 9 Performance test system

통신을 담당하는 종속정보처리기의 DSP에서 이전 패킷과 현재 패킷을 받았을 때 자체 카운터에 의하여 측정된 정보이기 때문에, 제어 축의 실제 제어명령 도달시간주기와 같다. DSP의 카운터를 사용했기 때문에 시스템 오버로드에 의한 측정오차는 고려하지 않았다. 그림 10은 3개 종속정보처리기의 실시간 통신 정주기성의 확률분포를 나타낸다.

최대오차 3us에 비하여 전체 제어주기는 1-10kHz로 충분히 길기 때문에 실시간 통신 정주

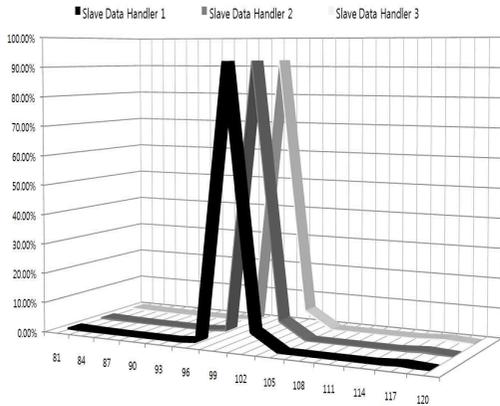


그림 10. 슬레이브의 통신 정주기성 실험 결과 (100us / 10M Count)

Fig. 10 Cyclic Communication Test Result for Slave Data Handler (100us / 10M Count)



그림 11. 각 축의 동기화 신호 (변동폭 14ns)

Fig. 11 The Synchronous Signal of Each Slave (Jitter 14ns)

기성은 고속 고정밀 로봇제어에 적용이 가능하다는 것이 실험적으로 증명된다.

2. 다축 동기성

각 축의 동기화 기능은 로봇 제어 시스템을 구성함에 있어 중요한 기능이다. EtherCAT통신은 프로토콜상 1ns 정도의 동기화 기능을 제공하도록 되어있지만 환경과 변수에 따라 약간의 변동이 있을 수 있다. 현재 구성된 시스템에서는 약 14ns의 동기신호 오차를 가진다. 그림 11는 각 종속 정보 처리기의 동기 신호를 측정한 결과이다. 14us는 일반적인 DSP에서 액세스 할 수 있는 인터럽트 분해능에 비하여 충분히 적은 수치이므로, 다축 동기 제어에 적용이 가능하다.

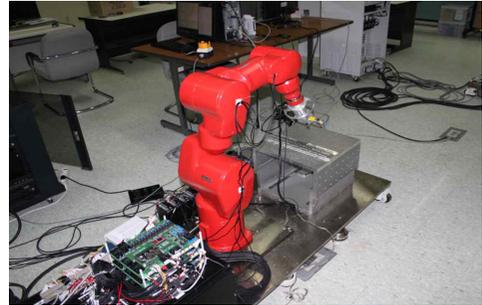


그림 12. 6축 로봇 제어 시스템

Fig. 12 6 axis robot manipulator control system

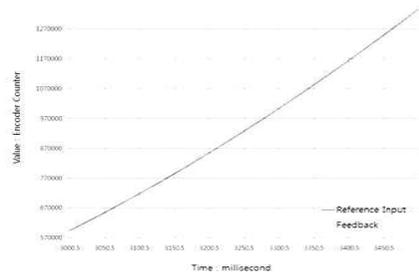


그림 13. 시스템의 단축 제어 성능 : 위치 제어

Fig. 13 An axis control result of the system : position control

3. 시스템 딜레이

다축 제어 시스템에서는 축수가 증가함에 따라 전체 네트워크 시스템 응답성이 저하된다. 제안된 시스템에서 고려할 딜레이는 ET1100 이더넷 칩과 DSP사이의 딜레이, 노드 딜레이, 시스템 대역 및 패킷 사이즈를 실험적으로 측정했을 때, 수식(1)과 같이 모델링 된다.[15]

$$t_{response}(i) = 55.975us + 0.305 \times Slave(i), \text{ if } N_{slave} : 8 \quad (1)$$

IV. 모션제어 실험 결과

그림 12와 그림 13는 소프트웨어 기반 모션 제어 시스템의 한 축에 대한 제어 결과를 나타낸다. 그림 12의 로봇 제어 시스템[16] 환경에서 부하 상태의 위치제어 응답 실험이 수행되었고 로봇의 부하가 가장 많이 적용되는 3축의 실험결과이다. 모션 제어 프로세스에서 생성된 각 축의 제어 지령은 주 제어기의 서보 제어 엔진을 통하여 내부적으로 보간(Interpolation)된 후 서보 제어기로 전송된다. 그

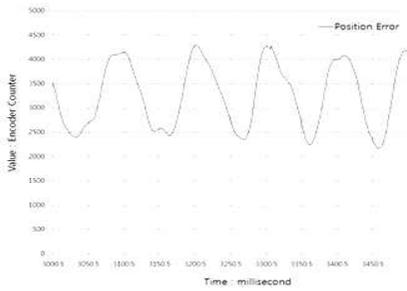


그림 14. 시스템의 단축 제어 성능 : 위치 제어 에러

Fig. 14 An Axis control result of the system : position control error

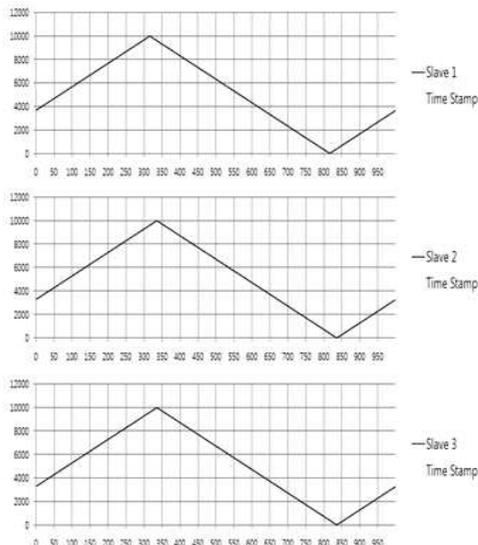


그림 15. 실시간 제어를 위하여 종속 정보 처리기로부터 전송받는 Time Stamp

Fig. 15 The time stamp from Slave Data Handler for real time control

림 14에서와 같이, 소프트웨어 기반의 서보 제어임에도 불구하고 평균적으로 0.3도 이하의 위치 오차를 보인다. 이는 적절한 게인 튜닝과 추가적 알고리즘의 적용으로 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

제안된 제어기의 실시간 성능 감시를 위하여 각 종속 정보 처리기로부터 획득하는 Time Stamp를 이용한다(그림 15). 각 종속 처리기는 50us간격으로 증가하는 Time Stamp를 10Khz의 통신주기마다 패킷에 포함하여 전송하며 이것의 변화량의 감시를 통하여 실시간 성능의 모니터링에 참조 정보로 사

용 가능하다. 주제어기, 종속정보처리기의 패킷 수신에 문제가 있을 때, 시스템을 정지시킬 수 있어 Hard real-time성을 구현할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 EtherCAT과 실시간커널을 이용한 소프트웨어 주 제어기 그리고 종속 인터페이스 모듈로 이루어진 소프트웨어 기반의 중앙집중식 모션 제어기를 제안하고 정주기성, 시지연 등 시스템 특성을 분석하였다. 제안된 제어기는 10Khz의 실시간 데이터 교환과 2Khz주기의 위치제어 주기를 가지고 있어 고속 고정밀 로봇 제어 시스템에 적용될 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 기존 하드웨어 중심의 제어기의 성능을 최대한 유지하면서 소프트웨어 중심의 제어기가 갖는 유연성을 가질 수 있어 다양한 로봇 제어 시스템에 적당한 제어기이다.

References

- [1] N. Hogan, "Controlling Impedance at the Man/Machine Interface," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1226-1229, 1989.
- [2] K. Kosuge, Y. Fujisawa, T. Fukuda, "Control of a Man-Machine System Interacting with the Environment," *Advanced Robotics*, Vol. 8, No. 4, pp. 427-441, 1994.
- [3] E.T. Wolbrecht, V. Chan, D.J. Reinkensmeyer, J.E. Bobrow, "Optimizing Compliant, Model-Based Robotic Assistance to Promote Neurorehabilitation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp.286-297, 2008.
- [4] Y. Yang,, L. Wang, J. Tong, L. Zhang, "Arm Rehabilitation Robot Impedance Control and Experimentation," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biometrics*, pp.914-918, 2006.
- [5] R. Kikuuwe, N. Takesue, H. Fujimoto, "A Control Framework to Generate Non energy-Storing Virtual Fixtures: Use of Simulated Plasticity," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 4, pp.781-793, 2008.
- [6] G. Prytz, "A performance analysis of

EtherCAT and PROFINET IRT,” Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp.408-415, 2008.

[7] “EtherCAT Technical Introduction and Overview,” Beckhoff GmbH Germania, 2004.

[8] H. Hu, L. Yu, P.W. Tsui, Q. Zhou, “Internet-based robotic systems for tele-operation,” International Journal Assem, Automation, Vol. 21, No. 2, pp.143-151, 2001.

[9] J. Baillieul, P.J. Antsaklis, “Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems,” Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, pp.9-27, 2007.

[10] J.H. Park, Suk Lee, Kyung Chang Lee, Young Jin Lee, “Implementation of IEC61800 based EtherCAT Slave Module for Real-time Multi-axis Smart Driver System,” Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, pp.682-685, 2010.

[11] H. Bruynickx, P. Sopotens, B. Konickx, “The Real-Time Motion Control Core of the Orocos Project,” Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp.2766-2771, 2003

[12] K. Nilsson, R. Henriksson, A. Blomdell, “Industrial robot motion control with real-time Java and EtherCAT,” Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation , pp.1453-1456, 2007.

[13] P. Donglin, X. Sheng, W. Zhang, H. Ding, “An application of real-time operating system in high speed and high precision motion control systems,” Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp.887-1001, 2007.

[14] A. Berbalace, A. Luchetta, G. Manduchi, M. Moro, A. Soppelsa, C. Taliercio, “Performance Comparison of VxWorks, Linux, RTAI and Xenomai in Hard Real-Time Application,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 55, No. 1, pp.435-439, 2008.

[15] I.K. Jung, S. Lim, “An EtherCAT based control system for human-robot cooperation

,” Prodeedings of International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, pp.341-344, 2011.

[16] C.H. Park, J.H. Kyung, D.I. Park, “Development of an industrial robot manipulator for the easy and safe human-robot cooperation,” Proceedings of International Conference on Control Automation and System, pp.678-681, 2010.

저 자 소 개

정 일 균



2001년 프랑스 INSA 석사 및 DEA.

2004년 프랑스 INPT CNRS-LAAS 박사.

현재 KETI 지능로봇릭스 연구센터 책임연구원.

관심분야: 임베디드 시스템, 로보틱스.

Email: mickey3d@keti.re.kr

김 정 훈



2008년 한신대 컴퓨터공학과 학사.

2012년 연세대 전기전자공학과 석사

현재 한국로봇융합연구원 의료서비스 연구센터 주임연구원.

관심분야: 네트워크 기반 제어 시스템, 실시간 고속 통신망(EtherCAT), 임베디드 시스템, 시스템 엔지니어링.

Email: brain2012@gmail.com