DBpia

논문 19-45-01-15 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '20-01 Vol.45 No.01
https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.1.129

정밀 협업을 위한 IEEE1588v2 기반의 모듈형 원격 제어시스템 개발

이 정 도◆, 박 부 식°, 이 명 수*, 윤 종 호**

Development of Modular Remote Control System Based on IEEE1588v2 for Precision Collaboration

Jeong-do Lee◆, Pu-sik Park°, Myeong-Soo Lee*, Chong-ho Yoon**

요 약

최근 항공, 철도 등의 산업 분야에서 이더넷을 이용한 원격 제어 시스템이 늘어나고 이와 더불어 ICT 융합 산업 공구들의 빠른 응답성과 고도의 정밀성이 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 IEEE1588v2 기반의 시간 동기 기능을 임베디드 시스템으로 구현하여 두 공구 간의 정밀한 협업을 가능하게 하였다. 공구를 원격으로 제어하기 위해 각 임베디드 시스템 모듈에 UART to Ethernet 드라이버를 구현하였으며 모듈의 PPS 주기를 기존보다 짧게 변경시켜 더 정밀한 제어를 할 수 있게 하였다. 또한 KSZ8794기반의 3포트 이더넷 스위치 모듈을 통해 구현된 시스템의 성능을 분석하고 검증하였다. 시간 동기 마스터-슬레이브 모듈 간 시간 오차는 1-μs 이내이고 PPS 주기를 기존보다 짧게 변경시킨 결과를 평균, 평균오차, 표준오차를 통해 확인하였다.

Key Words : IEEE1588v2, Precision collaboration, PTP, UART, Ethernet, PPS, Industrial tool

ABSTRACT

Recently, the number of remote control systems using Ethernet is increasing in industries such as aviation, railway, etc., along with the fast response and high precision of ICT convergence industrial tools. In this paper, we implement IEEE1588v2 based time synchronization function as an embedded system to enable precise collaboration between the two tools. In order to control the tool remotely, UART to Ethernet driver is implemented in each embedded system module, and the module's PPS period is changed shorter than before to allow more precise control. In addition, the performance of the system implemented through the KSZ8794-based three-port Ethernet switch module is analyzed and verified. The time error between the time-synchronized master-slave module is within 1-μs and the result of changing the PPS period shorter than before is confirmed by the average, average error, and standard error.

※ 본 연구는 국토교통부가 지원하는 철도기술연구사업의 일환으로 수행되었습니다.(19RTRP-B109166-05)
※ 본 연구는 산업통상자원부가 지원한 '항공우주부품기술개발사업'의 일환으로 수행되었습니다. (2018-0-00846, 20003238)
◆ First Author : Korea Electronics Technology Insititute, ljdhihi@keti.re.kr, 정회원
° Corresponding Author : Korea Electronics Technology Insititute, pusik.park@keti.re.kr, 종신회원
* Korea Electronics Technology Insititute, leems@keti.re.kr
** Korea Aerospace University Aviation Electronics Information Engineering, yoonch@kau.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 201911-269-D-RU, Received October 31, 2019; Revised November 18, 2019; Accepted November 25, 2019

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

최근 급속도로 발전된 산업분야에서 빠른 응답과 고도의 정밀성을 구현하기 위하여 산업 공구들 간의 정밀한 시간 기준이 제공되어야 한다[1]. 또한 공장자동화, 유비쿼터스 컴퓨팅 등의 기술 등과 같은 다양한 기술들이 융합되는 스마트 팩토리에서 정밀한 협업은 필수적이다.

본 논문에서는 이러한 정밀 협업을 가능 하게 하기 위하여 IEEE1588v2 기반의 3포트 이더넷 스위치 모듈과 UART to Ethernet 드라이버를 설계 및 구현하여 산업 공구들 간의 동작 및 정지 시간을 맞추었다. 거기에 자동제어를 하기 위해 사용하는 PPS 주기를 일반적인 PPS 기준인 1 PPS(1s) 보다 줄인 1000 PPS(1000ms)를 사용하여 더 정밀한 타이밍으로 제어가 가능하게 하였다. 1000 PPS는 인용에서 사용하는 200 PPS보다 5배 정밀한 제어가 가능하다[2]. 이러한 결과를 오실로스코프 및 하이퍼터미널을 통해 검증하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 본 서론에 이어 제 2장에서는 IEEE1588v2 정밀 시간동기 프로토콜에 대해 다룬 후 3장에서는 시스템의 구성 및 시험환경을 기술한다. 4장에서는 모듈들의 시간 동기 성능 및 UART to Ethernet모듈이 데이터를 수신하였을 때 PPS 주기에 따른 시험 결과에 대해 다룬다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. IEEE1588v2 정밀 시간동기 프로토콜

이 장에서는 IEE1588v2 정밀 시간동기 프로토콜 및 시간동기화 절차에 대해 설명한다.

IEEE1588v2는 클럭 동기화 프로토콜의 표준으로서 하나 이상의 노드를 가지는 분산네트워크 시스템 상에서 각 노드들이 타임스탬핑(메시지 송신시의 시각을 기록하는 방법), 실시간 시스템의 관리와 같은 목적을 수행하기 위해 RTC(Real Time Clock) 을 기반으로 네트워크에 참여하는 노드간의 정밀한 클럭동기화 메커니즘을 제공한다[3].

IEEE1588v2 시스템은 분산네트워크 시스템을 기반으로 보통클럭(Ordinary Clock), 경계클럭(Boundary Clock), 투명클럭(Transparent Clock) 등의 IEEE1588v2 클럭 장치와 브리지와 같은 일반 이더넷 장치들로 구성된다[2].

상기 IEEE1588v2 프로토콜에서 마스터 클럭을 제외한 각 노드(슬레이브클럭)가 마스터 클럭과의 클럭 동기화를 위해 IEEE1588규격에 명시된 IEEE1588v2 메시지를 통해 마스터 클럭과의 시간정보를 교환함으로서 각 노드가 마스터 클럭과 시간을 동기화할 수 있다. 이때 네트워크상의 각 노드는 자신의 역할로써 마스터 클럭 또는 슬레이브 클럭의 관계를 설정하는 Best Master Selection 절차인 BMC 기능을 수행한다. 이를 위하여 각 노드는 자신의 로컬 클럭(Local Clock)에 대한 정보를 Sync메시지 또는 Announce 메시지에 수납하여 주기적으로 송신하여 자신의 능력을 광고한다. 이 결과로 각 노드는 상대적인 클럭 우선순위(Clock Priority)를 판단하여 GMC(Grand Master Clock) 을 결정한다[4].

2.1 시간동기화 절차

<그림 1>과 같이 {Sync, Followup, Delay_Req, Delay_Resp} 메시지를 사용하여 마스터클럭과 슬레이브클럭 간의 시간오차(Offset)와 전파지연시간(Delay)을 동시에 얻어 동기화를 수행한다. <그림 1>에서 A는 마스터 노드에서 전송한 'Sync' 메시지를 슬레이브 노드에서 수신할 때까지 걸리는 시간으로 오프셋과 딜레이를 더한 값이고 B는 슬레이브 노드에서 전송한 'Delay_Req' 메시지를 마스터 노드에서 수신할 때까지 걸리는 시간으로 딜레이에서 오프셋을 뺀 값이다.

시간동기를 위해 마스터가 'Sync' 메시지를 슬레이브에게 전송한다. 이때, 'Sync' 메시지는 'Announce' 메시지의 전송과 마찬가지로 <originTimestamp> 에 0을 수납하여 전송하고, 실제 송신시각 t1 은 뒤따르는 'Follow_Up' 메시지에 수납되어 전달된다. 'Sync' 메시지를 수신한 슬레이브는 수신한 시각 t2를 버퍼에 저장한다. 슬레이브는 마스터에 'Delay_Req' 메시지

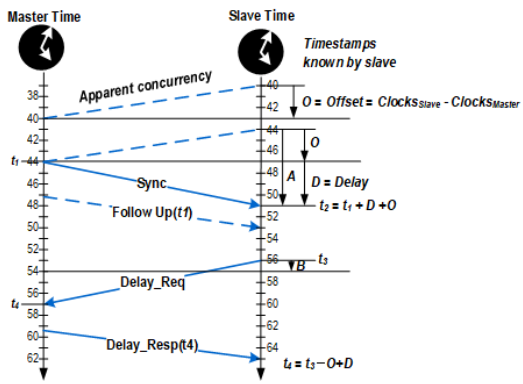


그림 1. IEEE1588v2동기화 과정
Fig. 1. IEEE1588v2 synchronization process

www.dbpia.co.kr

의 전송 시점에 타임스탬프 t3 를 생성 후 이를 저장하고 'Delay_Req' 메시지를 전송한다. 슬레이브 노드가 송신한 'Delay_Req' 메시지를 수신한 마스터는 수신한 시각 t4를 버퍼에 저장하고 슬레이브에게 'Delay_Resp' 메시지에 t4를 수납하여 전송한다[2]. 'Delay_Resp' 메시지를 받은 슬레이브는 t1, t2, t3, t4의 시간으로<Mean Path Delay>와 <Offset from Master>를 구한다.

여기서 <Mean Path Delay>는 식 (1)과 같이 마스터 노드와 슬레이브 노드 간 전송시간의 평균값을 의미하고, <Offset from Master>는 식 (2)와 같이 슬레이브와 마스터의 시간차이를 의미한다. 시간오차(Offset)가 0보다 크면 슬레이브가 마스터보다 시간이 빠른 것이고 오프셋이 0보다 작으면 슬레이브가 마스터보다 시간이 느린 것이다.

$$Mean\,Path\,delay = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (1)$$

$$Offset\,from\,Master = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (2)$$

Ⅲ. 시스템 구성 및 시험환경

이 장에서는 모듈형 제어 시스템에 사용되는 제어 메시지, 하드웨어와 소프트웨어 구성 및 시험환경에 대해 설명한다.

3.1 제어 메시지

제어메시지는 <그림 2>와 같이 총 8 바이트 크기로 산업 공구의 회전 방향(Command), 회전 속도(Payload) 그리고 협업을 위한 동작 시간(Time)으로 구성되어 있다.

Command: 크기는 1바이트로 시계방향(f), 반시계방향(b) 그리고 정지 신호(s)를 포함한다.

Payload: 크기는 2바이트로 산업 공구의 속도를 포함한다. 속도는 1에서 9까지 있다.

Time: 크기는 6바이트로 시간, 분, 초가 2 바이트씩 들어가며 각각의 산업 공구가 동시에 작동하고 멈출 시간정보를 포함한다.

1	2	3~8
Command	Payload	Time

그림 2. 모듈형 원격 제어 메시지
Fig. 2. Modular remote control messages

제어메시지는 <그림 3>과 같이 Command 값에 따라 3종류로 분류된다. 산업공구가 시계방향(Auto Forward) 또는 반시계방향(Auto Backward)으로 작동하게 하는 메시지와 작동 후 멈추게 하는 메시지(Stop)로 구분된다.

Auto Forward	Speed	Time
'f'	'1' ~ '9'	'xxxxxx'

Auto Backward	Speed	Time
'b'	'1' ~ '9'	'xxxxxx'

Stop	Speed	Time
's'	NULL	'xxxxxx'

그림 3. 모듈형 원격 제어 메시지 종류
Fig. 3. Modular remote control messages

3.2 IEEE1588v2 이더넷 스위치 모듈

IEEE1588v2 이더넷 스위치 모듈은 STM32F407 프로세서를 사용하여 최대 168MHz로 동작하면서 DMA기반의 Timestamping 기능을 제공할 수 있는 IEEE1588v2를 지원한다. 또한 <그림 4>에서 보이는 바와 같이 KSZ8794 스위치 칩을 사용하여 3 포트 통신이 가능하게 설계하였다.

IEEE1588v2 이더넷 스위치 모듈에서 IEEE1588v2는 <그림 5>와 같이 주로 5개의 state를 사용한다. 먼저 state를 PTP_INITIALIZING으로 설정하고 timer와 clock등을 init 해준다. 그리고 PTP_LISTENING로 설정된 후 다른 디바이스의 announce message를 수신하여 마스터클럭 또는 슬레이브클럭의 관계를 설정하는 Best Master Selection 절차인 BMC(Best Master Clock) 기능을 수행한다. 자신보다 더 나은 클럭을 가진 디바이스(better master)가 있으면 PTP_SLAVE로 가고 없으면 PTP_MASTER로 간다.

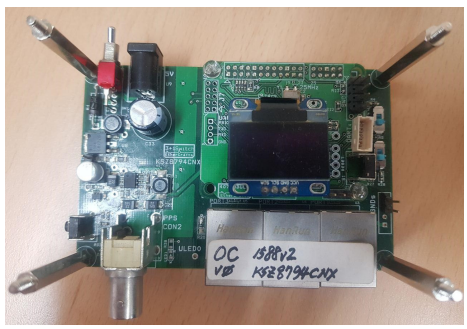


그림 4. IEEE1588v2 이더넷 스위치 모듈
Fig. 4. IEEE1588v2 Ethernet Switch Module

www.dbpia.co.kr

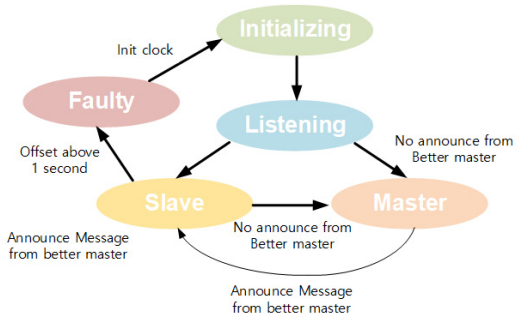


그림 5. IEEE1588v2 동작 상태천이도
Fig. 5. Modular remote control system test environment

PTP_SLAVE state에서 마스터로부터 sync 메시지를 받았는데 ofm(offset from master)이 1초 이상 차이가 나면 마스터의 초를 강제로 맞추고 PTP_FAULTY state로 간다. 그리고 PTP_INITIALIZING state에서 clock을 init 해준다. 디바이스가 마스터가가 되면 sync, follow_up, delay_resp message에 자신의 타임스탬프값을 실어 보내고 슬레이브로부터 delay_ req message를 받아 슬레이브들이 마스터의 클럭에 동기 할 수 있게 하고 슬레이브가 되면 마스터의 sync, follow_up, delay_resp message를 받고 마스터로부터 delay_resp message에 자신의 타임스탬프 값을 실어 보낸다.

3.3 Uart to Ethernet 모듈

Uart to Ethernet 모듈 또한 IEEE1588v2 이더넷 스위치 모듈과 같이 IEEE1588v2를 지원하는 STM32F407 프로세서를 사용하였다. <그림 6>에서 보이는 바와 같이 이더넷 포트 하나를 통해 스위치 모듈과 연결하고 UART 핀을 사용하여 드릴과 연결하였다.

Uart to Ethernet 모듈은 아래 <그림 7>과 같이 PC에서 오는 UDP 제어 메시지를 이더넷으로 수신하면 netRecvCallback 함수가 호출되어 메시지의 데이터를 한 바이트씩 큐에 넣는다. 그리고 PPS 신호와 EXTI

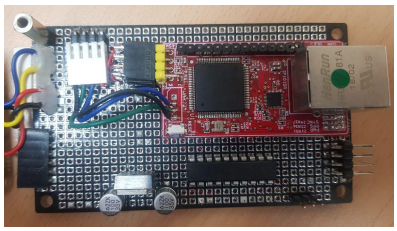


그림 6. Uart to Ethernet 모듈
Fig. 6. Uart to Ethernet Module

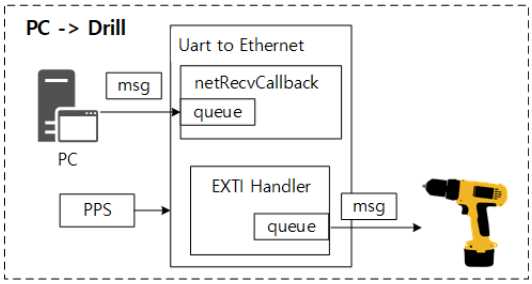


그림 7. Uart to Ethernet 모듈 blcok diagram
Fig. 7. Uart to Ethernet Module blcok diagram

Handler 핀을 연결하여 PPS 신호가 들어올 때마다 큐에 있는 데이터를 한 바이트씩 꺼내어 UART로 드릴에 전송한다.

3.4 모듈형 제어 시스템 구조 및 시험 환경

시스템 구성은 <그림 8>과 같이 3포트 Ethernet Switch가 있는 STM32F407모듈(마스터)과 이더넷으로 연결되는 2개의 Uart to Ethernet 모듈(슬레이브), 컴퓨터 그리고 Uart to Ethernet 모듈과 Uart로 연결되는 2개의 드릴로 구성되어 있다.

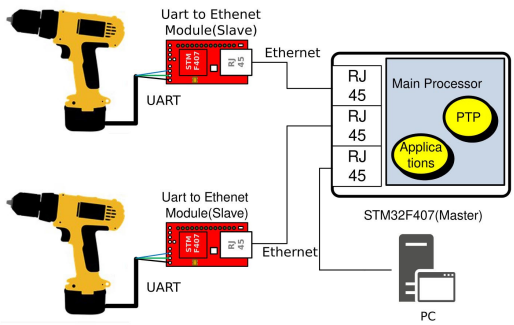


그림 8. 모듈형 원격 제어시스템의 구조
Fig. 8. Structure of Modular Remote Control System

시험환경은 <그림 9>와 같이 3포트 Ethernet Switch가 있는 STM32F407모듈(마스터)을 2개의 Uart to Ethernet 모듈(슬레이브)과 컴퓨터와 각각 연결하고 컴퓨터에서 드릴에 제어 메시지를 보내 드릴이 제어되는지 확인하였다. 또한 오실로스코프로 마스터와 슬레이브 간의 시간동기 성능을 분석하였다.

• 하드웨어
KSZ8794 + STM32F407 모듈
Uart to Ethernet 모듈 2개
디월트 드릴 2개

www.dbpia.co.kr

• 소프트웨어

Compiler : CooCox

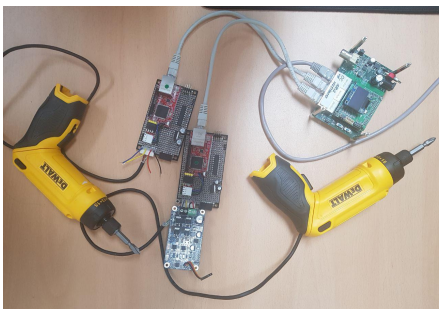


그림 9. 모듈형 원격 제어 시스템 시험 환경
Fig. 9. Modular remote control system test environment

Ⅳ. 성능분석

이 장에서는 오실로스코프로 마스터와 슬레이브 간의 시간동기 성능에 대한 분석과 PPS 주기에 따른 지연 시간값의 차이와 결과에 대해 분석한다.

4.1 마스터와 슬레이브 간의 시간동기 성능 분석

<그림 10>은 마스터(STM32F407 모듈, 노란색)와 슬레이브(UART to Ethernet 모듈, 파란색, 초록색)들의 PPS를 오실로스코프로 측정한 그림이다. 그래프의 한 칸이 500ns이고 PPS의 상승 엣지에서 캡처하였다. 슬레이브들이 마스터에 대해 1μs이내에서 동기화되고 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 10. 오실로스코프로 측정한 마스터(STM32F407 모듈)와 슬레이브들 (UART to Ethernet 모듈)의 PPS
Fig. 10. PPS of master (STM32F407 module) and slaves (UART to Ethernet module) measured by oscilloscope

4.2 PPS 주기에 따른 지연 시간 성능 분석

지연 시간은 데이터를 수신한 시점으로부터 PPS의 상승 엣지일 때 데이터를 송신한 시점까지 걸리는 시간이다. <그림 11>과 같이 주기가 1s이면 데이터의

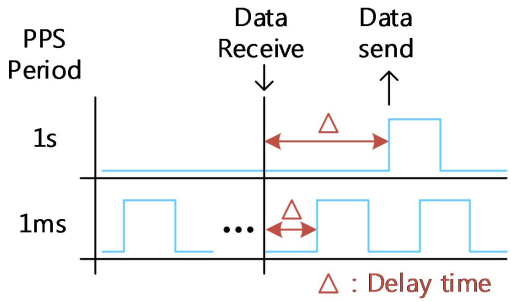
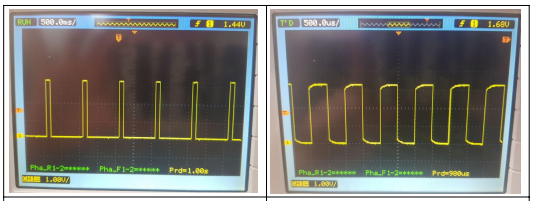


그림 11. Uart to Ethernet 모듈의 PPS
Fig. 11. PPS of Uart to Ethernet Module

수신 시점에 대해 상대적으로 지연 시간이 길수밖에 없다. 하지만 주기가 1ms이면 데이터 수신 시점에 상관없이 1s일 때보다 지연 시간이 짧아서 드릴을 더 정밀하게 제어할 수 있다.

Uart to Ethernet모듈의 MCU에 있는 PPS control 레지스터를 이용해 PPS의 주기를 일반적인 기준 1 PPS (1s)에서 1000PPS (1ms)로 변경하였다. 그리고 <그림 12>와 같이 오실로스코프를 사용해 모듈의 PPS를 측정하였다. 왼쪽 그림 (a)는 PPS 주기가 1s일 때이고 오실로스코프 그래프 한 칸이 500ms이다. 오른쪽 그림 (b)는 PPS 주기가 1ms이고 오실로스코프 그래프 한 칸이 500μs이다.

데이터를 수신한 시점의 타임스탬프 값과 수신하였을 때 PPS상승 엣지 시점의 타임스탬프 값을 계산하여 지연 시간을 계산하였다. 그리고 <표 1>과 같이 PPS 주기가 1s와 1ms였을 때 지연 시간의 평균, 평균오차, 표준오차에 대해 구하였다. 표본은 1000개이다.



1s (한칸 : 500ms)	1ms (한칸 : 500us)

그림 12. Uart to Ethernet 모듈의 PPS
Fig. 12. PPS of Uart to Ethernet Module

표 1. PPS 주기가 1s와 1ms였을 때 Delay time의 평균, 평균오차, 표준오차
Table 1. Average, average, and standard error of Delay time when PPS cycles were 1s and 1 ms.

PPS 주기	평균(ns)	평균오차	표준오차
1s	464786471	21559	268121301
1ms	444618	667	278981

www.dbpia.co.kr

PPS 주기가 1s일 때에 비해 1ms일 때 평균, 평균오차, 표준오차가 많이 적기 때문에 드릴을 더 정밀하게 제어할 수 있다.

V. 결 론

최근 급속도로 발전된 산업분야에서 빠른 응답과 고도의 정밀성을 구현하기 위하여 산업 공구들 간의 정밀한 시간 기준이 제공되어야 한다.

이에 본 논문에서는 IEEE1588v2 기반의 이더넷 스위치 모듈과 Uart to Ethernet 모듈을 이용하여 시간동기 시스템을 구축하여 산업 공구들 간의 정밀한 협업을 할 수 있게 하였고 PPS 주기를 변경하여 산업공구를 더 정밀하게 제어할 수 있는지 시험해보았다. 시험 결과 마스터 모듈과 슬레이브 모듈들 사이에 1μs 이내의 정밀한 동기 정밀도를 오실로스코프로 확인하였다. 또한 PPS 주기를 기존 1s 대신 1ms로 변경하여 시험한 결과 1ms일 때 드릴을 더 정밀하게 제어할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문의 결과는 산업공구를 정밀 제어할 뿐만 아니라 산업용 이더넷 시스템 개발에 사용할 수 있을 것이다.

References

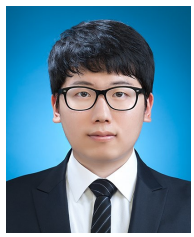
[1] M.-H. Kim, T.-H. Lim, J.-S. Jeong, and S.-H. Kim, "A development of an industrial SPMSM servo drive system using TMS320F2812 DSP," *The Trans. Korean Inst. Power Electron.*, pp. 138-147, Apr. 2005.

[2] R. Marquiss, *Pulse Control Basics for Motion Control*(2019), Retrieved Nov. 18, 2019, from https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/pulse-control-basics-motion-control

[3] IEEE Std 1588-2008 - *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, IM/ST - TC9 - SensorCommittee Technology, Mar. 2008.

[4] J. C. Eidson and B. Hamilton, "IEEE-1588 Node synchronization improvement by high stability oscillators[J]," *IEEE 1588 Wrkshps., Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, pp. 102-112, Sep. 2003.

이 정 도 (Jeong-do Lee)



2016년 2월 : 한국항공대학교 항공정보통신공학과 학사 졸업
2018년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사 졸업
2018년 1월~현재 : 전자부품연구원 임베디드SW연구센터 연구원

<관심분야> 시간동기, TSN(Time Senstive Network), 임베디드 소프트웨어, TCN (Train Communication Network)

박 부 식 (Pu-sik Park)

1999년 2월 : 한국항공대학교 전자 공학 학사 졸업
2001년 8월 : 한국항공대학교 공학석사 졸업
2002년 1월~현재 : 전자부품연구원 임베디드SW연구센터 책임연구원

<관심분야> TSN (Time Sensitive Network), AFDX (Avionics Full-Duplex Switched Ethernet), AeroRing, TCN (Train Communication Network), Seamless Redundancy, 항공IT융합, 철도IT융합 등
[ORCID:0000-0002-4308-5708]

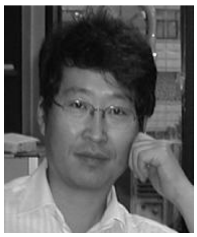
이 명 수 (Myeong-Soo Lee)

1989년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
1989년 1월~1996 10월 : 현대전자주식회사
1996년 10월~현재 : 전자부품연구원 임베디드SW연구센터 수석연구원

<관심분야> 시스템 하드웨어, 소프트웨어

www.dbpia.co.kr

윤 종 호 (Chong-ho Yoon)



1984년 : 한양대학교 전자공학과 학사 졸업
1986년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
1990년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업

<관심분야> 차량용 이더넷, TSN(Time Sensitive Network), 시간동기

www.dbpia.co.kr