이더캐트를 이용한 모바일 역진자 시스템의 제어

The control of a Mobile Inverted Pendulum with EtherCAT

한 종 호¹, 류 태 열², 이 장 명[†]

Han Jong-Ho¹, Ryu Tae-Yeol², Lee Jang-Myung[†]

Abstract The Industrial Ethernet technology enables advanced control architectures and offers several advantages for high precision multiple motors actuation. This paper presents the implementation and analysis of a motor drive with EtherCAT, an industrial standard for real time Ethernet. Considering the characteristics of the implemented software and the network interface, the motion and time-response of motor actuation for the networked Mobile Inverted Pendulum have been analyzed. Using the analysis with the task execution times measured from the developed drive, the performance characteristics of the drive in respect of the maximum achievable throughput have been verified by comparing to the conventional RS232.

Keywords: EtherCAT, Mobile Inverted Pendulum, Field-bus, Real-Time Ethernet

1. 서론

현재 여러 분야에서 다양한 종류의 로봇을 연구 및 개발을 하고 있다. 하지만 현재의 기술력으로는 로봇을 실시간으로 제어하는 것에 대한 문제점에 크게 대응하지 못하고 있는 실정이다. 그 이유 중 하나로는 일반적으로 사용하는 시리얼 통신의 속도가 매우 느린 편이라 할 수 있다. 최대 통신 속도가 115kbps의 낮은 데이터 전송 속도와 1:1방식의 통신이므로 중앙 집중식 제어가 될 수 밖에 없는 구조로, 이 구조가 가지는 문제점에 대응하기 위하여 다양한 통신 시스템들이 연구되었고 아직 개발을 하고 있다. 그 통신들 중에 요즘에 각광을 받고 있는 Ethernet 기반의 네트워

크 통신인 EtherCAT을 사용하는 빈도가 점점 더 늘어가고 있는 추세이다. 그 이유인 즉, Ethernet기반이다 보니 속도 면에서 시리얼 통신보다 훨씬 빠르다는 점과 통신에 대한 호환 문제에 큰 강점을 가지고 있다는 것이다. 또한 일반적으로 사용되는 랜(LAN) 케이블 말고도 광케이블을 이용하여 여러 개의 모터를 제어하는 연구가 개발이 되고 있다^[7]. Ethernet은 또한 인터넷으로 접속하여 제어도 가능하므로 전 세계의 장치들과도 상호 연결을 할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

그래서 최근에 많은 제어 시스템들은 다양한 센서와 구동부를 사용하고 있고, 구조가 복잡해지고 디지털 I/O의 수요가 많아짐에 따라 처리해야 할 데이터가 급증하게 되므로 이에 네트워크 기반 제어 시스템(Network Control System)으로 대체되는 추세이다^[1-7].

그래서, 본 논문에서는 Ethernet기반의 EtherCAT 필드버스 기술을 적용하여 기존 통신 프로토콜과 EtherCAT의 차이를 검토해 보고^[2,3], 구현 매체로는 최근 가장 많이 연구되고 가장 쉽게 접근할 수 있는 모바일 역진자 시스템을 만들고 적용하여 기본 통신 방식과 EtherCAT의 통신 시스템의 제어가 타당한지 검토하고 비교 분석 해보고자 한다.

Received : Nov. 23. 2011; Reviewed : Jan. 9. 2012; Accepted : Jun. 13. 2012

※ This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the Human Resources Development Program for Specialized Environment Navigation/Localization Technology Research Center support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency) (NIPA-2012-H1502-12-1002)

※ This research was financially supported by the Ministry of Knowledge Economy(MKE), Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) through the Inter-regional Cooperation Project.

[†] Corresponding author: Electronics Engineering, Pusan national University (jmlee@pusan.ac.kr)

¹ Electronics Engineering, Pusan national University (gkswhdgh114@pusan.ac.kr)

² Electronics Engineering, Pusan national University (si10kr@hanmail.net)

이 논문에서는 EtherCAT의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같이 구성된다. 우선 2장에서는 EtherCAT에 대하여 간략하게 설명하고, 3장에서는 모바일 역진자의 수학적 모델과 제어기 설계에 대한 모델링을 유도하며, Lagrange equation을 이용하여 시스템 동역학을 얻고, 4장에서는 선형 시스템에서 2차 성능 지수를 가지는 최적 제어기의 성능을 평가하기 위하여 모바일 역진자 시스템을 구성하고, 실제 실험을 통해 제어성능을 검증한다. 그리고, 마지막으로 결론을 맺는다.

2. EtherCAT 개요

본 장에 앞서 EtherCAT에 대한 이론을 간략하게 정리해보고자 한다. 각 파트를 나누어서 기본 개념과 프로토콜 및 EtherCAT에 사용되는 계층 구조에 대하여 소개한다^[7-14].

2.1 EtherCAT의 기본 개념

EtherCAT은 Ethernet의 네트워크 기반으로 프로토콜과 PC기반의 OSI 7계층 중 물리(신호와 배선), 데이터(MAC 패킷 및 프로토콜), 응용 3가지 계층으로 분류하여 구성된다. 이 EtherCAT에서는 필드버스 시스템의 성능에 대하여 새로운 표준을 제시하였으며, 컨트롤러 CPU, 특히 산업용 컴퓨터의 CPU의 성능이 빠르게 성장하는 동안, 전통적인 필드버스 시스템에서 제어시스템의 성능의 한계를 극복 할 수 있게 만들었다. 또한 토폴로지에 대한 유연성과 환경설정 및 취급방법이 간단한 특성을 가지고, 기존의 Ethernet포트를 그대로 사용할 수 있어, 비용에 때문에 필드버스 네트워크를 사용할 수 없었던 기존의 어플리케이션에서도 필드버스를 적용할 수 있게 되었다^[1-4].

이 EtherCAT은 100Mbps 이상의 통신 속도를 보장하며 제어시스템 내부의 각 모듈들이 네트워크를 중심으로 독립적으로 모듈화 되어있기 때문에 새로운 모듈의 확장성이 우수하며, 분산 클럭(Distributed Clock)을 지원함으로써 수많은 모듈들의 동기화(Synchronization)를 이루기 때문에 실시간 제어 기능을 가지고 있다.

2.2 EtherCAT의 프로토콜

EtherCAT은 표 1과 같이 100Mbps 이상의 통신 속도와 256개의 분산 디지털 I/O에 약 11us, 1000개의 분산 디지털 I/O에 약 30us, 그리고 200개 아날로그

Table 1. EtherCAT protocol performance

Process Data	Update Time
256 distributed digital I/O	11us = 0,01ms
1000 distributed digital I/O	30us
200 analog I/O (16 bit)	50 us ↔ 20 kHz
100 servo axes (8 byte input and output data)	100 us
1 fieldbus master gateway (1486 bytes input and output data)	150 us

I/O에 50 us 등과 같은 업데이트 속도를 가지며, 터미널 블록, 디지털 I/O 모듈화 디바이스의 각각의 I/O 블록 사이의 데이터 전송은 모듈내부의 데이터 이동을 최대 1Gbps/s의 전송속도와 약 1.5ns의 지연 시간 성능을 가진다^[7-8].

EtherCAT의 데이터 전송은 Broad Cast 방식으로 마스터에서 데이터 프레임을 전송하면, 마스터와 연결된 모든 슬레이브에서 수신 받아 해석 및 처리를 하는데, EtherCAT에서 슬레이브는 데이터 프레임이 슬레이브 노드를 통과하는 동안 해당 노드에 전달된 데이터를 읽어 데이터를 수신하고 전송할 데이터가 있을 경우 입력한 데이터를 삽입하여 전송하게 된다.

EtherCAT의 데이터 프레임 수신은 EtherCAT 인터페이스의 물리계층과 EtherCAT MAC/DLL를 통해 데이터 프레임을 수신 받은 후 마이크로프로세서로 전송된다. 마이크로프로세서는 Ethernet 프로토콜 상으로 전송하기 위한 데이터 프레임의 크기를 미리 정의하고 있다가, 버퍼가 다 채워질 때까지 데이터를 수신 받는다. 수신 받은 데이터 프레임을 다 채우면, 이를 한꺼번에 Ethernet인터페이스를 통해 Ethernet프로토콜로 전송한다.

EtherCAT의 데이터 프레임 송신은 Ethernet 네트워크의 데이터를 프레임 단위로 Ethernet 인터페이스의 물리계층(PHY)과 Ethernet MAC를 통해 수신되며, 수신된 데이터 프레임은 마이크로프로세서를 통해 데이터를 분류하고, 분류된 데이터를 EtherCAT 인터페이스의 Ether CAT MAC/DLL를 통해 개별적으로 프레임을 구성하고 물리계층을 통해 순서대로 다시 EtherCAT 프로토콜로 전송된다.

2.3 EtherCAT의 물리계층

EtherCAT의 물리 계층은 최대 4개의 포트구로 구성

되며, 각 포트별로 MII(Media Independent Interface)와 EBUS를 지원하는데, 각 포트별로 사용하고자 하는 포트를 MII와 EBUS 중 하드웨어 설정으로 선택하게 된다. MII인터페이스는 기존의 Ethernet과 연계하기 위한 포트로서 고속 Ethernet의 IEEE802.3 표준규격을 따른다. MII의 기본적인 기능인 니블(Nibble)단위의 데이터 송수신, 충돌감지신호, 송수신 클록, 송수신 오류 등도 역시 지원하고 있다. EtherCAT의 EBUS 인터페이스는 LVDS(Low Voltage Differential Signals)를 의미하는 것으로 이 LVDS는 최대 1Gbps의 고속 데이터 전송을 위한 인터페이스이며 주로 시스템 내부의 보드와 보드 사이 또는 칩과 칩 사이의 고속의 데이터 전송에 사용한다.

LVDS(Low Voltage Differential Signals)는 고속 디지털 인터페이스로, 고속 데이터 전송 속도를 위한 낮은 전력 소비 및 뛰어난 잡음 내성의 특징을 가지고 있다. LVDS 표준은 LVDS 인터페이스의 송신기 및 수신기의 전기적 특성을 정의한다. LVDS는 낮은 전압 스윙의 차동 신호를 사용하여 고속으로 데이터를 전송한다. 하나의 선을 사용하는 기존의 싱글 앤드(single end)신호와 대조적으로 차동 신호(Differential Signal)는 두 개의 보완적인 선을 이용하여 신호를 전송한다. 다시 말해 상반된 극성의 두 개 신호가 생성되고, 그 후 데이터 전송은 두 개의 신호를 서로 참조한다. 본 전송 구조는 데이터 전송 시스템에 접지만을 참조하는 싱글 앤드 시스템으로는 불가능한 대규모의 동위 상 전압 제거 및 잡음 내성을 가지게 된다.

2.4 EtherCAT의 데이터 링크 계층

EtherCAT의 데이터 링크 계층의 구조는 MII/EBUS의 물리계층 연결을 위한 포트와 Auto-Forwarder, Loop-back Function, FMMU, SyncManager, Monitoring, Reset, PHY Management, Distributed Clock, Memory, PDI, EEPROM/I2C, Status/LEDs 등으로 구성하고 있다. EtherCAT의 데이터 링크 계층 내부의 각 블록을 살펴보면, EtherCAT Interface(MII/EBUS)는 물리 계층에서 사용되는 100BaseTX, 100BaseFX, LVDS 등을 지원하며 마스터(Master)와 슬레이브(Slave) 또는 슬레이브와 슬레이브 사이의 통신 연결을 담당하고 PDI(Process Data Interface)는 EtherCAT Slave Controller에서 사용하는 어플리케이션

입출력 I/O로 최대 32비트의 Digital I/O와 SPI의 슬레이브, 8/16bit의 마이크로프로세서 I/O등을 지원한다. EtherCAT Processing Unit은 EtherCAT Data 스트림을 수신(Receive)받아 해석(analyse)하며, 처리하는(Process) 일을 담당한다.

EtherCAT Processing Unit은 ET1100의 포트 0와 포트 3 사이에 위치하고 있으며 Auto-Forwarding, Loop-back Function, PDI 등의 주요 기능 블록(Function Block)을 포함하고 이들의 인터페이스 연결 등을 관리한다. Auto-Forwarder는 Ethernet 프레임의 수신받고 이를 체크한 후 Loop-back Function으로 전송하고 Loop-back Function은 포트 0에 위치하고 있으며 수신된 데이터 프레임을, 하나의 포트에 연결된 링크가 없거나 해당 포트를 사용하지 않을 경우, 그 다음의 논리 포트에 전송하는 기능을 수행한다.

2.5 EtherCAT의 응용 계층

EtherCAT의 응용 계층은 데이터 링크계층의 SoE(Sercos over EtherCAT) Service Channel, File Access, TCP/IP등의 AL Stack을 이용하여 다양한 모터 제어 등에 사용할 수 있다. CoE(CANopen over EtherCAT), EoE(Ethernet over EtherCAT) 등을 이용하여 EtherCAT 기반의 CAN 통신과 Ethernet 통신으로의 확장이 가능하다. 이때 SoE(Sercos over EtherCAT) Service Channel, File Access, TCP/IP와 관련된 응용 서비스와의 통신은 Mailbox를 이용하고, Mailbox를 이용하지 않은 응용 서비스는 프로세스 데이터(Process Data)를 이용하여 통신한다.

3. 모바일 역진자 시스템

EtherCAT을 이용한 모바일 역진자 제어시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 전체 시스템은 모바일 역진자와

Fig. 1. The configuration of system

데이터를 수집하기 위한 센서부, 시스템 제어를 위한 제어부, 모터 구동을 위한 구동부로 구성된다^[15-18].

3.1 모바일 역진자의 수학적 모델

로봇을 설계하거나 이미 설계된 로봇의 움직임을 조사하려면, 실제로봇을 대상으로 다양한 변수 값들을 직접 측정하여야 한다. 하지만 로봇의 크기나 가격 등의 문제로 실제 로봇에 적용이 어려운 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에 실제 로봇의 동역학(Dynamics)을 구하여 로봇이 움직이는 행동을 알아 볼 수 있다. 하지만 이러한 로봇의 움직임은 실제 로봇의 움직임을 고려한 것이 아니라, 기구 학의 수식적인 관계를 나타내므로, 실제 로봇의 움직임을 나타내기 위해서는 각 조인트에 적용 되는 힘이나 토크 값을 구해야 한다. 각 조인트의 토크 값은 다양한 힘으로 구성되어 있는데, 이 값을 구하면 토크 값에 의한 로봇의 움직임을 동적으로 나타낼 수 있게 된다. 여기서, 동역학을 유도하는 방법으로는 뉴턴-오일러 (Newton-Euler) 방식과 오일러-라그랑지 (Euler-Lagrange) 방법이 있는데 에너지를 기반으로 동역학적 모델 접근 방식으로 비교적 간단한 운동에서 로봇의 운동에 작용하는 여러 가지 변수를 효과적으로 구할 수 있게 하고 이해를 도모하는데 많이 사용되는 오일러-라그랑지 방법을 사용한다. 두 바퀴로 구성되는 동적 균형 로봇의 기본 아이디어는 간단하므로, 본 장에서는 Lagrange equation을 이용하여 시스템의 동역학을 유도한다.

Lagrange equation 은 식(1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_q \quad (1)$$

여기서, $L = T - V$ 로 운동에너지(global kinetic energy)와 위치에너지(global potential energy)의 차로 정의된다. F_q 는 회전 변수 ∂q 에 작용하는 비보존되는 일반화된 토크를 나타낸다. 먼저, 좌표축을 그림 5와 같이 설정하고 위치벡터 r_1 및 r_2 를 다음과 같이 설정한다.

$$\vec{r}_1 = R\theta\vec{i} + R\vec{j} \quad (2-a)$$

$$\vec{r}_2 = (R\theta + L\sin\psi)\vec{i} + (R + L\cos\psi)\vec{j} \quad (2-b)$$

Fig. 2. The set of coordinate axis

여기서, R 은 바퀴의 반지름, θ 는 기준 좌표계에서 원점에서부터 이동했을 때의 바퀴가 회전한 각도, ψ 는 몸체의 기울어진 각도를 의미한다. 구해진 위치벡터를 시간에 대해 미분을 하면 식(3)에서 속도벡터를 알 수 있다.

$$\vec{v}_1 = R\dot{\theta}\vec{i} \quad (3-a)$$

$$\vec{v}_2 = (L\cos\psi\dot{\psi} + R\dot{\theta})\vec{i} + (-L\sin\psi\dot{\psi})\vec{j} \quad (3-b)$$

운동에너지는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$T_1 = \frac{1}{2}m(\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1) + \frac{1}{2}M(\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_2) \quad (4-a)$$

$$T_2 = \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta} - \dot{\psi})^2 \quad (4-b)$$

T_1 은 병진운동에 관한 운동에너지, T_2 는 회전운동에 관한 운동에너지를 나타낸다. 식(4)에서 m 은 바퀴의 질량, M 은 몸체의 질량, J_w 는 바퀴의 회전관성, J_m 은 모터의 회전관성, J_ψ 는 몸체의 회전관성을 의미한다. Lagrange equation 에서 T 는 T_1 과 T_2 의 합으로 이루어진다.

위치에너지는 식(5)와 같이 표시되며,

$$V = mgR + Mg(R + L\cos\psi) \quad (5)$$

여기서, g 는 중력가속도를 의미한다.

앞에서 구한 운동에너지와 위치에너지를 식(1)에 대입하여 계산하면 아래 식(6), (7)과 같은 시스템의 동역학 모델을 구할 수 있다

$$(J_w + J_m n^2 + (m+M)R^2)\ddot{\theta} + (LMR \cos \psi - J_m n^2)\ddot{\psi} + LMR \sin \psi \dot{\psi}^2 = \tau_\theta \quad (6)$$

$$(LMR \cos \psi - J_m n^2)\ddot{\theta} + (J_\psi + L^2 M + J_m n^2)\ddot{\psi} - gLM \sin \psi = \tau_\psi \quad (7)$$

식(6)과 식(7)의 우변항의 τ_θ 는 모터에 의해서 발생 하는 토크이며 τ_ψ 는 역진자에 작용하는 토크로서 그와 크기는 같고 방향은 반대인 토크로 작용한다.

4. LQR 선형제어기 설계

모바일 역진자 로봇의 제어를 위해 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템에 적합한 선형제어기인 LQR제어기를 Matlab을 이용하여 설계하고 선형화된 Model과 LQR 제어기 설계가 타당한 것인지 알아본다 [19-20].

4.1 동역학 선형화

식 (6)과 식 (7)의 동역학을 먼저 선형화 하면

$$(J_w + J_m n^2 + (m+M)R^2)\ddot{\theta} + (LMR - J_m n^2)\ddot{\psi} = \tau_\theta \quad (8)$$

$$(LMR - J_m n^2)\ddot{\theta} + (J_\psi + L^2 M + J_m n^2)\ddot{\psi} - gLM \psi = \tau_\psi \quad (9)$$

이 때, 일반적인 DC모터의 방정식을 이용하여 모터의 토크 T 를 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$T = n \frac{K_t}{R_m} \left(v + K_b (\dot{\psi} - \dot{\theta}) \right) + f_m (\dot{\psi} - \dot{\theta}) \quad (10)$$

여기서 v 는 모터에 인가되는 전압, $(\dot{\psi} - \dot{\theta})$ 는 로봇의 몸체를 기준으로 바퀴가 돌아간 각속도를 의미한다. 이때, K_t 는 모터의 토크상수, R_m 은 모터저항, f_m 은 모터 축의 마찰계수, K_b 는 역기전력 상수이다. 모터 인덕턴스는 무시했다. 식 (10)을 이용해서 식 (9)의 외력을 구하면 아래의 식(11)을 구할 수 있다.

$$\tau_\theta = \alpha v + \beta (\dot{\psi} - \dot{\theta}) \quad (11)$$

여기서, $\alpha = \frac{nK_t}{R_m}$, $\beta = \alpha + f_m$ 이다.

식 (9)에 식 (11)을 대입하고 정리하면 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} (J_w + J_m n^2 + (m+M)R^2)\ddot{\theta} + (LMR - J_m n^2)\ddot{\psi} + \beta \dot{\theta} - \beta \dot{\psi} &= \alpha u \\ (LMR - J_m n^2)\ddot{\theta} + (J_\psi + L^2 M + J_m n^2)\ddot{\psi} - \beta \dot{\theta} + \beta \dot{\psi} - gLM \psi &= -\alpha u \end{aligned} \quad (12)$$

여기에 제어입력 u 를

$$u = v \quad (13)$$

로 두고 식 (12)를

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} = Hu \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} (J_w + J_m n^2 + (m+M)R^2) & LMR - J_m n^2 \\ LMR - J_m n^2 & J_\psi + L^2 M + J_m n^2 \end{bmatrix} \\ F &= \begin{bmatrix} \beta & -\beta \\ -\beta & \beta \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -gLM \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)와 같이 정리할 수 있다.

식 (14)를 이용하여 상태방정식으로 나타내면 아래 식 (16)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A(3,2) & A(3,3) & A(3,4) \\ 0 & A(4,2) & A(4,3) & A(4,4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B(3) \\ B(4) \end{bmatrix} u \quad (16)$$

식 (16)안의 행렬식을 구해보면 식 (17과 같다.

$$\begin{aligned}
 A(3,2) &= -gMLE(1,2)/\det(E) \\
 A(4,2) &= gMLE(1,1)/\det(E) \\
 A(3,3) &= -[\beta E(2,2) + \beta E(1,2)]/\det(E) \\
 A(4,3) &= [\beta E(2,1) + \beta E(1,1)]/\det(E) \\
 A(3,4) &= [\beta E(2,2) + \beta E(1,2)]/\det(E) \\
 A(4,4) &= -[\beta E(2,1) + \beta E(1,1)]/\det(E) \\
 B(3) &= \alpha[E(2,2) + E(1,2)]/\det(E) \\
 B(4) &= -\alpha[E(2,1) + E(1,1)]/\det(E)
 \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 제어기 설계

현대 제어에서는 다변수 시스템의 제어기를 설계하기 위한 방법으로 상태변수 피드백 제어기인 LQR (Linear Quadratic Regulator) 제어기를 사용한다. 이 제어기는 정확한 시스템 모델을 이용하여 최적 제어기의 설계가 가능하다. 본 논문에서도 이런 상태 변수를 피드백하는 시스템 모델을 이용한 LQR시스템을 적용한다. 2.1과 3.1절에서 각각 로봇의 동역학 모델과 모터의 동역학 모델을 유도하여 비선형 시스템을 선형으로 근사화 한 후, 시스템 상태방정식으로 간단하게 표현하기 위한 과정으로 시뮬레이터 기반인 LQR 제어기를 설계한다. 또한 선형 시스템에서 2차 성능 지수를 가지는 최적 제어기로서 많은 장점을 가지고 있으므로, LQR 선형제어기법을 사용하기 위해, 표 2의 로봇 기구부 및 모터 관련 파라미터를 식 (16)에 대입하고, 상태가중치 행렬을 나타내는 Q와 제어가중치행렬 R로 두고 구해보면, 식(18)과 같이 나타내어진다.

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, R = 1 \quad (18)$$

MATLAB의 LQR 툴박스를 이용해 다음과 같은 제어 게인 값 K를 구하였다.

$$K = [-1.6 \quad -53.2 \quad -1.19 \quad -2.23] \quad (19)$$

식(19)에 의해서 구해진 제어입력은 u의 값은 식 (20)과 같다.

$$u = -KX, X = [e_\theta \quad e_\psi \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T \quad (20)$$

여기서, 바퀴의 회전각 각도 기준신호 θ_{ref} , 몸체의 기울어진 각도 ψ_{ref} 와 실제 각도 값의 에러인 회전각 에러 $e_\theta = \theta - \theta_{ref}$ 기울임 각도 에러 $e_\psi = \psi - \psi_{ref}$ 를 나타낸다.

설계된 LQR 제어기는 그림 3과 같이 구성이 된다.

Fig. 3. The configuration of controller

5. 실험 결과 및 검토

1. 마스터 디바이스로는 Beckhoff사의 TwinCAT을 사용한다. TwinCAT은 EtherCAT의 윈도우 기반에서 자동화를 지원하는 소프트웨어이다. 구성은 System manager, PLC Control 등으로 지원한다. TwinCAT은 하드웨어를 소프트웨어방식으로 스로트와 CPU 대신 태스크 방식으로 패러렐 와이어링에서 필드버스 구조로 직접적인 접근이 가능한 구조이다. 이는 PC에 변화 없이, 다른 하드웨어를 필요로 하지않고 표준 Window를 리얼 타임 작동 시스템으로 활용 할 수 있게 하며, TCP/IP를 통해 원격 조정이 가능하다.

2. 슬레이브 디바이스는 ET1100(Redone-ESK)과 Atmega128을 통해 인터페이스를 그림 7와 같이 구현했다. 시리얼 인터페이스는 아날로그 I/O 모듈, 센서, 엔코드 또는 단순한 디바이스 드라이브 등을 처리 할 수 있게 구성 되었다.

그림 4에서 Physical Layer는 하드웨어적인 연결을 담당하는 영역으로 데이터 전송 매체를 일반 LAN(Local Area Network)을 이용하는 전자식 케이블

Fig. 4. The configuration of system layer

로 연결된다. Data Link Layer는 EtherCAT통신 네트워크를 통해 데이터를 전송하는 기능으로 이를 위한 EtherCAT슬레이브 컨트롤인 ET1100(Redone-ESK)이 구성되었다. 표 2는 ET1100에 대한 구성 설명이다.

그림 5와 같이 어플리케이션 계층으로 개발된 모터

Table 2. ET1100

Technical data	ET1100
Number of EtherCAT ports	4 (max 4x MII)
FMMUs	8
SYNC manager	8
DPRAM	8 kbyte
Distributed clocks	Yes(64bit)
Process data interfaces	32bite Digital I/O
Housing	BGA 128 10x10 mm

Fig. 5. The configuration of motor driver

드라이브 하드웨어는 Atmega128, 플래쉬 ROM, EtherCAT 슬레이브 컨트롤러(ESC) 그리고 H-bridge 등으로 구성된다. ESC는 물리 및 링크 계층의 기능을 하드웨어적으로 처리하며 dual-ported RAM을 내장하여 Atmega128과 블로킹 없는 데이터 전송을 지원한다.

그림 6은 실제 사용한 Redone-ESK를 사용하였다. 노란색은 Physical Layer를 나타내고, 빨간색은 Data Link Layer를 오렌지색과 파란색은 사용자 어플리케이션과 어플리케이션으로 나타낸다.

그림 7은 실험에 사용된 EtherCAT 통신 노드들과 밸런싱 로봇이다. 각도 측정을 위한 자이로 센서와 가속도 센서는 로봇의 몸체 가운데에 위치하며 컨트롤러와 모터드라이브는 로봇에 장착 되어있다. 각도센서는 NTREX사의 NTARS를 사용하고 프로세서는 ARM Cortex-M3(LM3S8962)를 사용한다. 모터는 DC모터를 사용하며 모터드라이브는 H-bridge형 모터드라이브 모

Fig. 6. Real EtherCAT and ET1100 board(Redone-ESK)

그림 7. The EtherCAT communication node

Table 3. The parameter of robot

기호	수치
g (중력가속도)	9.8 m/s^2
m (바퀴질량)	0.370 [kg]
n (기어비)	51
R (바퀴반지름)	0.0625 [m]
H (몸체길이)	0.215 [m]
L (몸체 중심까지의 거리)	$H/2$
M (몸체질량)	2.4 [kg]
J_w (바퀴의 회전관성)	0.001445
(몸체의 회전관성)	0.1505
J_m (모터의 회전관성)	0.00001
R_m (권선저항)	2.82 [Ohm]
K_t (모터상수)	0.57625 [Nm/A]
K_b (역기전력 상수)	0.5362 [Vsec/rad]
f_m (마찰계수)	1.7747

들을 사용한다. 로봇의 파라미터는 다음의 표 3과 같다.

구성된 실험 장비를 이용하여 성능을 검증하고자 Inverted pendulum 로봇을 약 2미터 정도를 로봇이 직진하도록 제어 입력을 설정하고 그에 따른 데이터를 확인 하였다. 그림 8은 실제 구성된 로봇이다.

그림 9는 로봇의 각도 데이터를 나타낸다. 그림 9에서 점선(빨간색)은 기존의 RS232 통신을 사용했을 때 각도데이터, 실선(파란색)은 EtherCAT 통신을 사용했을 때 로봇의 각도데이터를 나타낸다. 실험의 결과에서 보듯이 EtherCAT 통신을 사용하는 경우가 각도 데

Fig. 9. The data of angle

이터의 편차가 작음을 알 수 있다. 즉, Inverted pendulum이 안정적으로 수직 방향으로 유지되고 있음을 의미한다.

그림 10은 로봇의 포지션 데이터를 나타낸다. Inverted pendulum 로봇으로 RS-232와 EtherCAT 통신의 성능을 평가하기 위하여 2미터 정도로 이동하게 하여 실험을 실시하였다. 여기서, 점선(빨간색)은 RS-232 통신을 사용했을 때 로봇의 포지션을 실선(파란색)은 EtherCAT 통신을 사용했을 때의 포지션을 나타내며 중심선(검정색)은 기준입력이다. 실험결과 EtherCAT 통신을 사용했을 때 로봇의 제어성능이 향상 됨을 확인할 수가 있다. 이는 RS232 통신의 시간지연 영향을 빠른 속도의 EtherCAT 통신으로 극복되어 성능이 향

Fig. 8. Inverted pendulum robot

Fig. 10. The data of position

상되었다는 것 알 수 있다.

그림 11은 로봇의 속도제어 데이터를 나타낸다. 여기서, (a) 300mm/s와 (b) 400mm/s의 값 속도로 데이터를 비교하였다. 각 그림에서 점선(빨간색)은 RS-232 통신을 사용했을 때 모터의 속도를 실선(파란색)은 EtherCAT 통신을 사용했을 때의 모터 속도를 나타내며 중심선(검정색)은 기준입력을 나타낸다. 실험결과 EtherCAT 통신을 사용했을 때 로봇의 속도 제어능력이 향상됨을 확인할 수가 있었다. 이는 EtherCAT 통신을 이용하였을 때 기준 입력과 가깝게 제어가 된다는 것을 알 수 있다.

(a) 300mm/s

(b) 400mm/s

Fig. 11. The data of velocity control (a)300mm/s,(b)400mm/s

6. 결론

본 논문에서는 네트워크 기반 제어시스템의 필드버스 통신 과정에서 기존 프로토콜과 EtherCAT을 비교 검토하고 EtherCAT의 특징과 구조를 파악함으로써 디지털 I/O 레벨에서의 실시간 동시성과 공시성을 구현하고 성능을 검증하기 위하여 실제 모바일 역진자에 적용하여 실험을 해보았다. 우선 모바일 역진자 로봇의 동역학 모델을 Lagrange equation을 유도하고, LQR 선형제어기를 설계하였다. 실제 제작된 모바일 역진자 로봇을 이용해 실험을 통하여 EtherCAT을 이용한 제어가 우수한 제어성능을 가짐을 확인하였다. 앞으로 다양한 로봇과 자동화 시스템에 실시간 제어 효과를 크게 얻을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] EtherCAT Technology Group, <http://www.ethercat.org>.
- [2] IEC61158-2/3/4/5/6-12, Industrial communication network-Fieldbus specifications-type12 elements (EtherCAT).
- [3] IEC61784-2 (Ed.1.0), Industrial communication networks-Profiles- Part 2; Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3.
- [4] M.-Rostan, "EtherCAT enabled Advanced Control Architecture," Advanced semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), IEEE/SEMI, pp39-40, 2010.
- [5] Giannuca. Sena, "Distribute-merge switch for EtherCAT Networks," IEIIT -CNR.
- [6] Giannuca. Sena, A High-Performance CAN-like Arbitration Scheme for EtherCAT.
- [7] Kwang.-seok. Lee, "Development Optic-EtherCAT Sensor/Actuator Network Module for Robot Control Network," Sunchon Nnational University, 2007.
- [8] L. Wang and J. Qi, "The real-time networked data gathering systems based on EtherCAT," International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, pp 513-515, 2009.

- [9] J. Qi and L. Wang, "Networked motion control system design based on EtherCAT," Second International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation, pp 77-79, 2009.
- [10] SEMI E54.20, Standard for Sensor Actuator Network Communications for EtherCAT.
- [11] ISO 17545-4 Industrial automation systems and integration-Open systems application integration framework, EtherCAT Profiles.
- [12] Min.-young. Sung, "Implementation and Analysis of a Networked Motor Drive using Real-Time Ethernet," The Korean Institute of Information Scientists and Engineers, vol 17, no 8, 2011.
- [13] TwinCAT Information [Online]. Available: www.bECKHOFF.com, 2010.
- [14] Yong.-Seun. Moon, "A Study on Development of Soft-Motor Controller using EtherCAT," Korean Institute of Intelligent Systems, vol 17, no 6, pp827-828, 2007.
- [15] Il.-Kyun. Jung, "An EtherCAT based Control System for Human-Robot Cooperation," Methods and Models Automation and Robotics 16th Conference, pp341-343, 2011.
- [16] Segway korea, <http://www.segway-korea.com>.
- [17] Hyung.-Gi. Min, Ji.-Hoon. Kim, Ju.-Han. Yoon, Eun.-Tae. Jeung, and Sung.-Ha. Kwon, "A Control of Balancing Robot," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, ISSN : 1976-5622, pp 1202, 2010.
- [18] Jee.-Hyun. Park, "Implementation of IEC 61800 based EtherCAT Slave Module for Real-time Multi axis Smart Drive System," International Conference on Control, Automation and Systems, pp 683-684, 2010.
- [19] Hyun.-nuk. Ha, "A control of Mobile Inverted Pendulum using Single Accelerometer," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 16, no. 5, pp 440-445, 2010.
- [20] Young.-kuk. Kwon, "Optimal ARS Control of an Inverted Pendulum Robot for Climbing Ability Improvement," Pusan National University, 2011.

한 종 호

2010 진주산업대 전자공학과 (공학사)
 2012 부산대학교대학원 로봇 협동과정(석사)
 2012~현재 부산대학교 전자 전기 박사과정

관심분야: 지능제어시스템, 마이크로프로세서응용, 밸런싱 로봇

류 태 열

1987 부산대학교 기계설계학과(공학사)
 2012 부산대학교대학원 로봇 협동과정(석사)

관심분야: 제어 네트워크, 인공근육, 센서 융합

이 장 명

1980 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982 서울대학교 동대학원 (석사)
 1990 미국 남가주 대학교 (USC) (공학박사)

1992~현재 부산대학교 전자 전기 통신 공학부 교수
 관심분야: 지능로봇 시스템 제어, 마이크로프로세서 응용, 특수환경 Localization 및 Navigation