

CAN(Controller Area Network)을 이용한 아라고 원판 시스템 제어

이원무*, 정준홍*, 최수영*, 박기현*
*성균관대학교 정보통신공학부

Control of Arago's Disk System using CAN(Controller Area Network)

Wonmoo Lee*, Joonhong Jung*, Sooyoung Choi*, Kiheon Park*
*School of Information and Communication Eng., SungKyunKwan Univ.

Abstract - This thesis is concerned with the control of Arago's disk system using CAN (Controller Area Network). CAN protocol is used widely for the real time control in networked control systems(NCS). A networked control system using CAN is constructed to perform position control of Arago's disk. The mathematical model of overall system is derived to design an appropriate controller analytically. Various operating points of the Arago's disk system in the real time control are chosen as stable region(45°), marginally stable region(90°) and unstable region(120°), and the experiment for the position control of arago's disk system is done for each operating point. The performance of the suggested NCS is verified by experiments. It is shown that the NCS using CAN has stability and excellency in real time control.

1. 서 론

최근, 제어대상 시스템이 점점 더 대규모화되고 복잡해짐에 따라 기존의 중앙집중식 제어 구조로는 더 이상 전체 시스템을 효과적으로 제어할 수 없게 되었다. 즉, 중앙 프로세서가 모든 제어장치를 일괄적으로 제어하는 중앙집중식 제어방식은 현장에 분산되어 있는 기기들을 모두 연결하기 위한 통신 선로가 크게 증가하여 설치비용이 늘어날 뿐 아니라, 전체 시스템을 복잡하게 만들게 되어 결과적으로 시스템 유지, 정비 및 확장을 어렵게 만들 수 있다. 최근, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 시스템 구성요소를 네트워크에 연결된 하나의 노드로 간주하고, 이를 공유매체에 연결하는 버스방식의 통신구조를 갖는 분산형 제어시스템이 활발히 연구되고 있다.

CAN은 현재 제어용 네트워크에 가장 널리 사용되고 있는 프로토콜 중의 하나로서, 1980년대 초반 독일의 Robert Bosch社에 의해 차량용 네트워크로 연구 개발되었다. 이후, 1993년 고속 통신 데이터 네트워크 표준안(ISO11898)과 저속 데이터 통신 네트워크(ISO11519) 표준안이 선정되면서 가장 인정받는 제어용 네트워크 프로토콜로 자리 잡았다. CAN은 저가의 하드웨어 장치로 효율성이 높은 네트워크를 구축할 수 있으며, 프레임 오버헤드가 작아 크기가 작은 주기적인 데이터 전송에 적합하다. 또한, 강력한 오류 처리 기능을 내장하고 있어 전송 데이터의 신뢰성이 매우 높다. 이는 제어응용에 가장 적합한 프로토콜이라는 것을 보여준다[1],[2],[3],[4].

본 논문에서는 CAN을 이용하여 아라고 원판 시스템을 실시간 제어하였다. 이를 위하여 첫째, CAN의 데이터 전송방법, 메시지 프레임 형식, 오류 처리 방식 등 CAN 프

로토콜을 분석하였다. 둘째, 제어 시스템에서 센서, 구동기, 그리고 제어기의 역할을 수행하는 CAN 노드를 설계, 제작하여 CAN 네트워크 제어 시스템을 구축하였다. 셋째, 제어 대상 플랜트로 선정된 아라고 원판 시스템의 동작 특성을 분석하고 제작한 아라고 원판 시스템을 CAN 네트워크와 연결하여 CAN을 이용한 실시간 제어실험을 수행하였다. 마지막으로 실험을 통해 CAN에서 실시간 제어가 이루어질 때, 아라고 원판 시스템의 안정 동작점과 불안정 동작점에서의 제어가 어느 정도까지 안정화가 가능한가 확인하여 설계된 CAN을 이용한 아라고 원판 시스템 제어에 만족할 만한 성능을 가지고 있음을 입증 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 아라고 원판 시스템

아라고 원판 시스템은 직류 전동기를 이용하여 원판을 회전시킴으로써 원판에 자속변화를 유기기켜 자석막대에 일정량의 힘을 가하게 되고, 이 힘으로부터 유기기되는 자석막대의 회전 토크를 추의 무게로 지지시켜 일정 제어 각을 유지하는 시스템이다. 자석막대의 제어각도는 포텐서미터에 의해 측정되며, 이 측정된 값을 기준 제어각과 비교하여 일정한 각을 유지할 수 있는 제어기를 설계한다. 그림 1은 실제 제작된 아라고 원판 시스템의 전체 구성을 간략화 하여 나타낸 것이다.

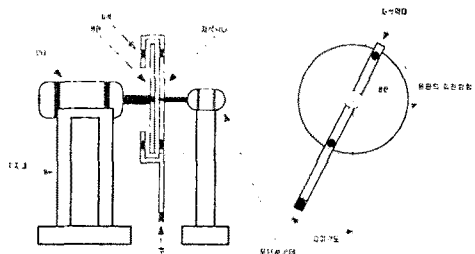


그림 1 아라고 원판 시스템 구성도
Fig. 1 The configuration of Arago's Disk System

아라고 원판 시스템은 크게 나누어 직류 전동기를 포함한 원판의 회전 부분(직류 전동기부 모델)과 이 원판의 회전에 의한 자속의 변화로 생기는 힘에 의해 나타나는 각도의 변화 부분(아라고 원판부 모델)으로 나누어진다. 아라고 원판 시스템 모델링은 위의 두 부분을 각기 모델링한 후 결합하여 구한다. 여기서, 모델링에 의해 구한 동적 방정식에는 비선형 요소가 포함되어 있으므로, 선형화하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 참고문헌[8]을 이용하여 하나의 동작점에서 선형화된 상태방정식 결과를 구하였다[9].

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u, \quad y = C\Delta x$$

$$\text{여기서, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_1 \cos x_{10} & k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 & k_5 \\ 0 & 0 & k_6 & k_7 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_8 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

2.2 CAN(Controller Area Network)의 개요

CAN은 1980년대 초반 독일의 Robert Bosch社에서 개발한 차량용 통신 프로토콜로서, 분산 제어 시스템의 실시간 제어와 자동화를 위한 직렬 통신망이다. CAN 프로토콜은 OSI(Open System Interconnection) 7계층 모델을 기준으로 최하위 두 계층인 물리 계층과 데이터 링크 계층만으로 구성되어 있다. 따라서, CAN을 이용하여 실제 응용시스템을 구축할 때는 적용대상을 고려하여 적절한 응용 계층을 설계해야 하는 특징을 갖고 있다. CAN은 높은 데이터 신뢰성을 가지고 있으며, 전기적 장애(noise 등)에 거의 영향받지 않고, 네트워크 상의 에러를 감지하고 교정하는 능력이 뛰어나다. 또한, 프레임 오버헤드가 작아 크기가 작은 데이터의 주기적인 전송에 적합하다는 장점으로 차량용 네트워크는 물론, 다양한 영역의 분산 제어 시스템 설계 시 널리 적용되고 있다[1],[5],[6].

2.2.1 CAN 계층 구조

CAN의 계층 구조는 표 1과 같이 OSI 7계층 중 최하위 두 계층인 물리 계층과 데이터 링크 계층으로 구성되어 있으며, 상위 계층인 응용 계층에서 적절한 응용 프로그램을 작성하여 전체 네트워크를 구축한다[1],[5],[6].

표 2 CAN의 계층 구조
Table 1 CAN layer Architecture

Application Layer	80C196KC20
Data Link layer	PCA82C200
Object Layer	
Transfer Layer	
Physical Layer	
Physical Layer	PCA82C250

2.2.2 CAN 프로토콜

CAN 프로토콜은 데이터 프레임, 리모트 프레임, 오버로드 프레임, 그리고 에러 프레임으로 나눌 수 있는 4가지 메시지 형태를 제공한다[1],[2],[5]. 이 외에 각각의 프레임을 구분하기 위해 3비트의 인터프레임 스페이스(Interframe Space)가 있다. 단, 에러 프레임과 오버로드 프레임, 그리고 여러 개의 오버로드 프레임이 연속될 때는 인터프레임 스페이스를 사용하지 않는다. CAN은 메시지 필터링에 의한 주소 지정 방식을 사용한다. 데이터 프레임이나 전송 요청 프레임의 중재 필드에는 11비트의 확인자(Identifier)를 갖고 있어 메시지를 수신한 노드에서는 프레임의 확인자 비트를 필터링 하여 자신에게 온 메시지인지를 확인해

서 받아들이고 그렇지 않으면 무시하게 된다. 이와 같은 메시지 전달 방식은 기존의 CAN 네트워크에 추후 다른 노드를 추가하더라도 소프트웨어나 하드웨어의 재구성이 필요 없기 때문에, 노드들의 추가/제거가 자유로이 이루어 질 수 있어 유연성 있는 시스템 구축에 적합하다. CAN에서 메시지를 전송하는데 사용되는 방식을 CSMA/AB(Carrier Sense Multiple Access with Arbitrary Bit-wise)라 한다. CAN 버스에 연결된 각각의 노드는 독립적인 클럭(Clock)을 사용하여 동작하기 때문에, 프레임을 송수신하는 노드간의 위상변화를 보상하기 위한 특별한 알고리즘을 가진다. NRG 코딩 방식을 사용하는 CAN에서 비트 타이밍은 버스 상에서 메시지를 전달하는데 있어 각 노드를 동기화 시키는데 중요한 역할을 하며 CAN 버스의 전송률을 변화시킬 경우 이에 따른 적절한 비트 타이밍 변화가 필요하다. CAN은 안정되고 신뢰성 있는 데이터 전송을 위해 전달 계층과 데이터 링크 계층에서 강력한 에러 검출 기능을 제공한다. 여러 종류의 에러 검출은 CAN 칩(Chip)에 내장되어 있는 CAN 프로토콜에 의해 자동으로 수행된다. 또한, 각 노드는 네트워크 유지 목적으로 에러를 카운터 하여 노드의 고장 유무를 판별하고 네트워크 참여를 여부를 결정 한다[1],[2],[5].

2.3 전체 시스템 구성

본 연구에서 CAN을 이용하여 아라고 원판 시스템을 제어하기 위해 구성한 전체 시스템의 블록 선도는 그림 2와 같다.

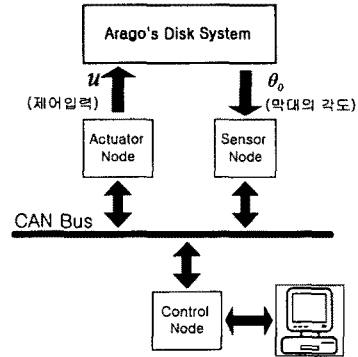


그림 2 전체 시스템 블록 선도
Fig. 2 Block diagram of total system

구성된 전체 시스템은 크게 아라고 원판 시스템부와 CAN 네트워크부로 나눌 수 있다. 두 부분은 센서 노드와 구동 노드를 통해 연결되어 실시간 제어 실험을 수행하였다. 아라고 원판 시스템으로부터 자석막대의 각도를 센서 노드의 AD 컨버터로 받아들인 후, 센서 노드에서 제어 노드로 송신할 데이터 프레임을 CAN 버스에 실게 되면 제어 노드에서 데이터 프레임을 수신한다. 수신된 메시지는 제어 노드에 있는 PID 제어기 프로그램을 통해서 제어 입력 데이터를 만들고, 이 데이터는 데이터 프레임화 해서 CAN 버스에 실고 구동 노드는 그 프레임을 수신하여 제어 입력 신호만을 추출하여 DA 컨버터를 통해 아라고 원판 시스템의 직류 전동기 구동 회로를 거쳐서 직류 전동기의 속도 제어를 하게 한다. 이렇게 함으로써 피드백 제어를 통하여 아라고 원판 시스템의 자석막대를 원하는 각도로 조절할 수 있었다.

2.4. 실험 결과

아라고 원판 시스템에서 자석막대 자세 유지 각도를 안정 영역 45도, 임계 안정 영역 90도, 불안정 영역 120도로 정하여 제어 실험을 하였다. 실시간 제어가 요구되는 아라고 원판 시스템에서, CAN 네트워크를 피드백 루프로 사용하는데 따른 가장 큰 문제점은 각각의 노드에서 데이터를 처리·송수신할 때 발생하는 시간 지연이다. 전체 시스템에서 발생할 수 있는 시간 지연 요소로는 센서 노드의 AD변환 시간, 구동 노드의 DA변환 시간, 그리고 네트워크 상에서 프레임이 송수신 하는데 걸리는 시간, 그리고 무엇보다도 제어 노드에서 제어 입력을 계산하는데 걸리는 시간(Computation Delay)이 가장 크다. 이 외에도 CAN에서 전송하는 프레임의 크기의 증감, Node 개수의 증감, 그리고 네트워크 버스의 경로 및 길이 등의 네트워크 환경 변화에 따라 많은 영향을 받는다[10],[11]. 본 실험에서는 이러한 문제점들을 계산과 시행착오를 거쳐서 가장 최적화된 네트워크 컨트롤 시스템을 구축하였다. 각 동작점의 제어를 위해 사용한 PID 제어기의 K_P , K_I , K_D 이득값은 시뮬레이션과 실험을 통해서 결정하였다.

다음의 그림 3과 그림 4는 각각 45도, 120도를 자석막대의 기준 입력 각도로 설정하였을 때 실제 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 각각의 그래프는 포텐서미터에서 측정 한 전압을 나타내고 있다.

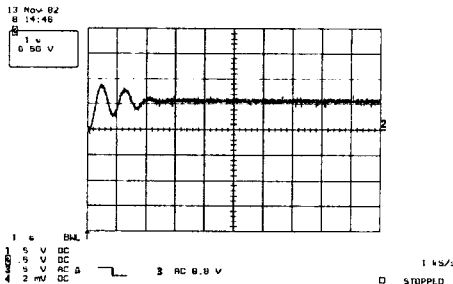


그림 3 45도에서 제어되는 아라고 원판 시스템의 포텐서미터 출력 파형

Fig. 3 Potentiometer output of Arago's Disk System controlled at 45 degree

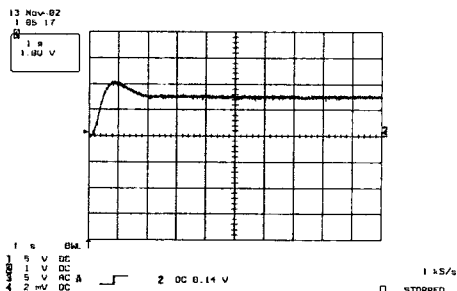


그림 4 120도에서 제어되는 아라고 원판 시스템의 포텐서미터 출력 파형

Fig. 4 Potentiometer output of Arago's Disk System controlled at 120 degree

3. 결 론

본 논문에서는 CAN을 이용하여 실제 아라고 원판 시스템을 제어할 수 있는 네트워크 제어시스템을 구축하고, 실험을 통해 CAN 네트워크를 이용한 제어시스템이 만족할 만한 성능을 가지고 있음을 확인하였다. 이를 위해 국제표준으로 자리잡아 널리 사용되고 있는 CAN 프로토콜을 분석하고, 일반적인 제어 시스템에서 센서, 구동기, 그리고 제어기 역할을 수행하는 CAN 노드를 직접 설계, 제작하여 네트워크를 통해 아라고 원판 시스템을 제어할 수 있는 전체 시스템을 구축하였다. 제어 대상인 아라고 원판 시스템을 수학적으로 모델링하여 시뮬레이션을 통해 PID 제어기의 이득값을 결정하고, CAN 네트워크를 이용하여 아라고 원판 시스템의 제어 실험을 하였다. CAN의 실시간 제어 실험에서, 제어 대상인 아라고 원판 시스템의 각 동작점 안정영역 45도, 임계안정영역 90도 그리고 불안정영역 120도로 선정하며 자석막대의 각도유지를 목적으로 실험하였다. 본 실험에서는 CAN 네트워크 구성 노드들의 하드웨어 성능 향상과 소프트웨어 최적화를 통해 피드백 루프 시간지연을 10msec이하로 줄일 수 있었다. 그 결과 아라고 원판 시스템의 안정 영역(90도 이하)과 불안정 영역(90도 이상)을 CAN 네트워크를 통해 제어함으로써, CAN이 실시간 제어에서 안정성과 우수성을 가지고 있음을 확인하였다. 향후, 본 논문에서 구축한 CAN을 이용한 아라고 원판 시스템 제어는 일반적인 네트워크 제어시스템 설계시 참조할 수 있는 실제적인 응용사례가 될 수 있을 것이라 기대하며, 실시간의 다입력 다출력을 갖는 대규모 시스템에 CAN을 적용하는 문제는 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] BOSCH, CAN Specification, Part A/B, 1991.
- [2] 윤상진, "CAN(Controller Area Network)을 이용한 멀티플렉싱 기법개발", 성균관대학교 공학석사학위 논문, 2002
- [3] "CAN high-speed physical layer", CAN in Automation (CiA), <http://www.can-cia.de>, 2002.
- [4] "CAN fault-tolerant physical layer", CAN in Automation (CiA), <http://www.can-cia.de>, 2002.
- [5] SJA 1000 Stand-alone CAN Controller - Product Specification, Philips Semiconductors, 4, 2000.
- [6] 이원무 외, "CAN을 이용한 Smart Sensor/ Actuator Node 개발", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 7, 2002.
- [7] J.G.Niesten and O.T.Tan, "The induction machine operating demonstrated by Arago's Disk", IEEE trans. on Education, vol.32 NO.2 pp.160-162, 5, 1989.
- [8] 최균호, "아라고 원판 시스템의 자세 제어에 관한 연구", 성균관대학교 공학석사학위 논문, 1994.
- [9] 이원무 "CAN(Controller Area Network)을 이용한 아라고 원판 시스템 제어" 성균관 대학교 공학석사학위 논문, 2002.
- [10] Wei Zhang, Michael S. Branicky, and Stephen M. Philips, "Stability of Networked Control Systems", IEEE Control Systems Magazine, PP.84~99, 2, 2001.
- [11] Gregory C. Walsh and Hong Ye, "Scheduling of Networked Control Systems", IEEE Control Systems Magazine, PP.57~65, 2, 2001.