

CAN 시간지연에 대한 아라고 진자의 위치제어 성능분석

Analysis of the Position Control Performance under the Time Delay in the Controller Area Network

박태동* · 이재호** · 윤수진*** · 박기현****
Taedong Park* · Jeaho Lee** · Sujin Youn*** · Kiheon Park****

Abstract – In this paper, the position control performance of networked control systems is analyzed when time delay through the network is considered. Integrating a control system into a network has great advantages over the traditional control system which uses point to point connection: it allows remarkable reduction in wiring, makes it easy to install and maintain the system, and improves compatibility. However, a networked control system has the critical defect that network uncertainties, such as time delay, can degrade the control system's performance. Therefore, the major concern of a networked control system is analyzing the effect of network uncertainties. This paper is concerned with PID controller performance for stability region, critical stability region and instability region under the time delay in the Controller Area Network.

Key Words : Controller Area Network(CAN), Time Delay, Networked Control Systems, PID Controller

1. 서 론

Controller Area Network(CAN)는 1980년 중반에 차량 내 전자 장치의 종가로 통신 기능이 대두됨에 따라 Bosch에서 제정한 OSI 참조 모델의 1, 2계층을 이용하는 차량용 네트워크 시스템이다. 이후에 ISO 국제 표준으로 제정되고, 개발 이후 차량과 같은 열악한 환경에서 분산 제어 시스템의 통신기능으로써 우수하게 동작되어 신뢰성이 입증된 통신 시스템이다. 또한, CAN은 제한된 범위 내에서 최대 1MBit/s @ 40m의 고속 통신 속도를 제공하고, 메시지 기반 프로토콜로서 모든 노드가 고유의 식별자를 가지고 있어 서브 노드간의 충돌을 방지하고 송·수신을 중재할 수 있는 Carrier Sense Multiple Access/Arbitration on Message Priority(CSMA/AMP)방식을 적용함으로서 안정된 통신 환경을 제공하고 있다[1]. 이러한 장점들로 인해서 실시간 처리를 요구하는 공장 자동화 시스템이나 혹은 선박, 기차등 분산 제어 환경에서의 효율적인 통신 방법으로 CAN이 널리 이용되고 있다. 그러나 통신 시스템의 불확실 요소 중 시간지연은 실시간 처리를 요구하는 제어 시스템의 제어 성능을 크게 악화 시킬 수 있는 요인이 된다[2],[3].

본 논문에서는 시간지연 요소 중 제어기와 구동기간의 데이터 전송지연만이 존재한다고 가정하고, 시간지연이 없을 때의 제어기 성능과, 시간지연이 있을 때의 제어기 성능이 안정 영

역, 임계 안정 영역, 불안정 영역에서 어떻게 달라지는지 모의 실험과 실제 실험을 통하여 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시간지연 시스템의 모델링

네트워크 제어 시스템에서 센서, 제어기, 구동기의 되먹임 경로는 네트워크를 통하여 구성된다. 그러므로 네트워크 제어 시스템의 성능 분석을 위해서는 시스템 모델이 필요하다. 네트워크 시스템에서 제어기 성능에 가장 크게 영향을 미칠 수 있는 시간지연을 모델링하기 위해서 시간지연을 플랜트와 제어기간의 지역입력으로 하는 새로운 제어 시스템 등가 모델을 유도한다.

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C_p x_p(t)$$

$$x_p(t) \in R^n, u(t) \in R^k, y(t) \in R^m$$

위와 같은 선형 시불변 시스템을 안정화시키기 위한 제어기 를 다음과 같이 나타내자.

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) \quad (2)$$

$$y_c(t) = C_c x_c(t) + D_c u_c(t)$$

$$x_c(t) \in R^n, u_c(t) = w(t) - y(t), y_c(t) = u(t), w(t) : 외부입력$$

시간지연을 발생시키는 요소는 네트워크 지연(τ_{nd}), 계산 지

저자 소개

- * 박태동 : 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程
- ** 이재호 : 成均館大學 情報通信工學部 博士課程
- *** 윤수진 : 成均館大學 情報通信工學部 學士課程
- **** 박기현 : 成均館大學 情報通信工學部 教授 · 博博

연(τ_{cd})으로 나누어 볼 수 있다[6]. 또한 네트워크 지연은 전송 지연(τ_{td}), 전파지연(τ_{pd}), 큐 지연(τ_{qd})으로 나눌 수 있다. 계산된 제어 입력 데이터가 네트워크를 통해 구동기까지 전송되는 시간(τ_{sp})은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau_{ap} &= \tau_{com,c} + \tau_{nt.ca} + \tau_{com,a} \\ \tau_{nt.ca} &= \tau_{queue,c} + \tau_{trans.ca} + \tau_{prop.ca}\end{aligned}\quad (3)$$

식(1)의 플랜트를 네트워크에 연결된 디지털 제어기로 안정화하기 위해서 제어기와 구동기 경로의 시간지연을 플랜트의 시간 지연 입력으로 고려하면 식(4)와 같은 변형된 플랜트 방정식으로 나타낼 수 있다[4],[5].

$$\begin{aligned}\overline{x}_p(k+1) &= \overline{A}_p \overline{x}_p(k) + \overline{B}_p u(k) \\ y(k) &= \overline{C}_p \overline{x}_p(k) ; \overline{x}_p^T(k) = [x_p^T(k) \ u^T(k-1)] \\ \overline{A}_p &= \begin{bmatrix} e^{A_p h} & \int_{h-\tau_q}^h e^{A_p s} B_p ds \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \overline{B}_p = \begin{bmatrix} \int_0^{h-\tau_q} e^{A_p s} B_p ds \\ I \end{bmatrix} \\ \overline{C}_p &= [C_p \ 0] \quad h = \text{sampling period}\end{aligned}\quad (4)$$

또한 식(2)와 같이 나타낸 연속시간에서의 제어기 모델을 식(4)와 같은 이산화 모델을 제어하기 위하여 센서로부터 제어기까지의 시간지연은 없다고 가정하고 제어기의 이산화 모델을 유도하면 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\overline{x}_c(k+1) &= \overline{A}_c \overline{x}_c(k) + \overline{B}_c u_c(k) \\ y_c(k) &= \overline{C}_c \overline{x}_c(k) + \overline{D}_c u_c(k) ; \overline{x}_c^T(k) = [x_c^T(k) \ u_c^T(k-1)] \\ \overline{A}_c &= e^{A_c h}, \overline{B}_c = \int_0^h e^{A_c s} B_c ds \\ \overline{C}_c &= C_c, \quad \overline{D}_c = D_c \quad h = \text{sampling period}\end{aligned}\quad (5)$$

2.2 PID 제어기

PID 제어기는 구조가 간단하고 제어성능이 비교적 우수하며, 제어이득 조정이 복잡한 모델을 필요로 하지 않아 산업 현장에서 많이 이용되고 있다. 하지만 적용대상이 단일 입·출력 시스템에 한정되어 있다는 단점이 있다. 본 논문에서 이용된 디지털 PID 제어기는 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 제어기가 포함된 시스템 전체 구성도는 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$M(z) = [K_P + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1})]E(z) \quad (6)$$

$$K_P = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_I}{2} = P \text{ gain}$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = I \text{ gain}$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = D \text{ gain}$$

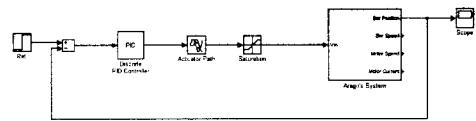


그림 1 시스템 블록도

2.3 CAN을 이용한 아라고 원판 제어 시스템

CAN의 시간지연이 제어기 성능에 어떠한 영향을 미치는지 실험적으로 분석하기 위하여 그림 2와 같은 시스템을 구성하였다. 제어대상으로는 아라고 원판 시스템으로 유도 전동기의 구동 원리가 되는 회전 자계에 의한 토크의 생성 원리를 이용하고 있으며, 진자의 자세 유지를 목적으로 하는 시스템이라 할 수 있다. 이 시스템의 장점은 진자의 위치에 따라서 안정영역, 임계 안정 영역, 불안정 영역이 나타나는 시스템으로 이 세 영역에 대해서 제어기의 설계를 달리할 수 있다. 아라고 원판 시스템의 선형화된 수학적 모델은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다[8]. 본 논문에서는 세 영역에 대해서 각각 시간지연이 없을 때, 자세 유지를 위한 최적의 PID계수를 조정하고, 임의적으로 제어기와 구동기간의 시간지연을 가하면서 제어 범위 내에서 외관입력을 주었을 때, 정상상태로 돌아오는데 까지 걸리는 시간을 측정하여 네트워크에서 발생할 수 있는 시간지연의 영향을 시뮬레이션의 결과와 실제 실험 결과를 비교하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x}_1 \\ \dot{\Delta x}_2 \\ \dot{\Delta x}_3 \\ \dot{\Delta x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_1 \cos x_{10} & k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 & k_5 \\ 0 & 0 & k_6 & k_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_8 \end{bmatrix} \Delta u \quad (7)$$

$$y = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix}$$

식(7)에서 $k_1 \cos x_{10}$ 에 의하여 진자의 위치가 45도 일 때는 안정영역, 90도 일 때는 임계 안정 영역, 90도 이상에서는 불안정영역으로 각기 다른 제어기를 구성할 수 있다.

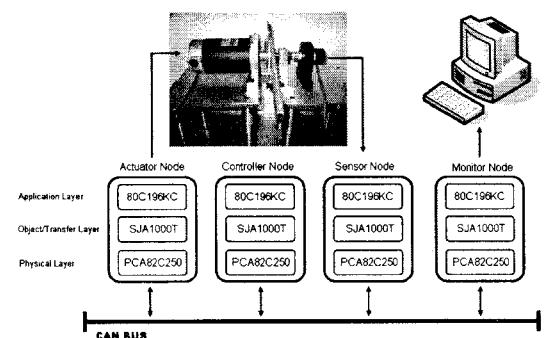


그림 2 아라고 원판 제어 시스템 구성도

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

CAN의 시간 지연이 제어기 성능에 어떠한 결과를 나타내는지 분석하기 위하여 위에서 제시한 플랜트 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 수행방법은 세 영역에 대해서 각각 최적의 제어를 수행할 수 있는 PID 제어 계수를 찾고 시간 지연을 가하면서 제어 범위 내에서 외란을 주었을 때, 다시 진자의 위치가 되돌아오는 시간을 관측하여 보았다. 결과는 그림 3과 같다. 그래프에서 알 수 있듯이 진자의 위치가 45도인 안정한 영역에서는 시간 지연 요소가 제어기 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 임계 안정 영역인 90도와 불안정 영역인 110도에서는 적은 시간지연에 의해서도 제어가 불가능해짐을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있다.

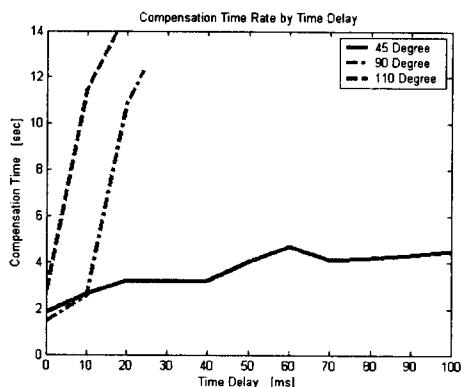


그림 3 시간지연에 의한 외란 보정시간 추이(시뮬레이션)

이 시뮬레이션 결과를 근거로 그림 2와 같은 실제 시스템에서 실험을 수행한 결과는 그림 4와 같고, 실제 실험 역시 시뮬레이션의 실험방법과 동일하게 수행하였다. 그림 4를 통해서 알 수 있듯이 수학적 모델을 통한 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 크게 다르지 않음을 알 수 있는데, 안정 영역에서는 제어기와 구동기간의 시간지연이 제어기 성능에 크게 영향을 끼치지 않는 반면에, 임계 안정 영역과 불안정 영역에서는 20ms 이상의 시간지연을 가질 때, 제어가 불가능해짐을 알 수 있다. 그러므로 CAN을 이용하여 네트워크 제어

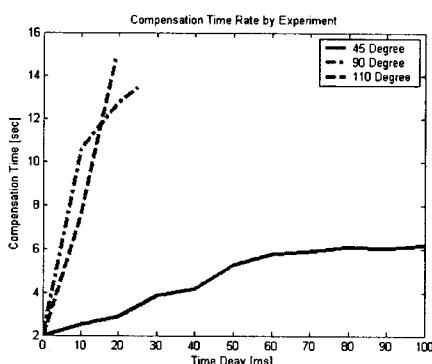


그림 4 시간지연에 의한 외란 보정시간 추이(실제 실험)

시스템을 구성하게 되었을 때, 안정한 제어 성능을 보장받기 위해서는 네트워크의 시간지연이 최대 20ms 이하가 되어야 안정한 제어 성능을 보장 받을 수 있음을 이 실험 결과를 통하여 알 수 있다.

3. 결 론

네트워크 제어 시스템이 널리 이용되기 시작하면서 불확실 요소에 대하여 제어 성능을 향상시키기 위한 이론적인 연구가 많이 진행 되어왔다. 그 중에서도 시간지연이 제어 시스템에 있어서 해결되어야 할 문제임이 많이 강조되었다. 따라서 본 논문에서는 PID 제어기로 구성된 분산 제어 시스템에서 제어기와 구동기간의 데이터 전송에 대한 시간지연이 어떠한 영향을 나타내는지 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하고자 하였다. 결과에서도 알 수 있듯이, 플랜트가 안정한 영역에서는 네트워크의 시간지연이 제어기의 성능을 악화시키기는 하지만 제어가 불가능하지는 않았다. 하지만 임계 안정 영역이나 불안정 영역에서는 작은 시간 지연에서도 제어가 불가능하며, 정상상태에 있어서도 불안정해짐을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서는 CAN을 이용하여 네트워크 제어 시스템을 안정하게 구성하기 위해서는 최대 20ms 이하의 시간지연을 갖도록 하여야 안정하게 제어될 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Konrad Etschberger, "Controller Area Network Basics, Protocols, Chips and Applications", IXXAT Press
- [2] Wei Zhang, Michael S. Branicky, and Stephen M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems", IEEE Control Systems Magazine Vol. 21, Issue 1, pp 57-65, 2001
- [3] Feng-Li Lian, James R. Moyne, Dawn M. Tilbury, "Performance Evaluation of Control Networks : Ethernet, ControlNet, and DeviceNet", IEEE Control Systems Magazine Vol. 21, Issue 1, pp 66-83, 2001
- [4] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, "Computer-Controlled Systems Theory and Design", Prentice-Hall International
- [5] 정준홍, "시간지연과 데이터 손실을 고려한 네트워크 제어 시스템의 안정성 분석" 성균관 대학교 공학박사 학위논문, 2004
- [6] Feng-Li Lian, James Moyne, and dawn Tilbury, "Network Design Consideration for Distributed Control Systems", IEEE Trans. Control Sys. Tech., Vol. 10. no. 2, pp. 297-307, Mar. 2002.
- [7] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Systems", Prentice Hall
- [8] 최규호, "아라고 원판 시스템의 위치 제어에 관한 연구", 성균관 대학교 공학석사 학위논문, 1994