

불특정 시간지연을 갖는 가상 디바이스 네트워크에서의 실시간 분산제어

송기원, 정용기, 최기상, 최기흥*
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
*한성대학교 기계시스템공학과

Real-time Control on Virtual Device Network(VDN) with Uncertain Time Delay

Ki Won Song, Yong Gi Kim, Gi Sang Choi, Gi Heung Choi*
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul
Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung University*
E-mail : fhqjtmxm@hanmail.net

Abstract

본 논문에서는 가상 디바이스 네트워크에 대한 개념과 틀을 제시하였다. 디바이스 제어 네트워크로서 LonWorks 네트워크를 선택하고, 데이터 네트워크로서 이더넷을 선택하여 가상 디바이스 네트워크를 구성하였다. 가상 디바이스 네트워크의 전달 특성을 데이터 네트워크의 전달 특성과 함께 조사하였다. 가상 디바이스 네트워크 상에서의 실시간 제어를 위해 불특정한 시간지연을 보상할 필요가 있다. 유한한 H_2 노음을 갖는 Smith 예측 제어를 이용한 직류서보모터의 제어실험을 통하여 제안된 제어기의 타당성을 검증하였다.

I. 서론

인터넷의 인터넷의 편재와 유용성은 산업 현장, 빌딩자동화나 홈 오토시스템 분야의 정보에 대한 접근이 가능할 것을 요구하고 있다. 이를 위해 산업현장에서 사용되는 필드 버스와 불리는 제어 네트워크와 데이터 네트워크와의 통합이 필요하다. 두 네트워크의 통합을 가상 디바이스 네트워크(VDN)라고 한다. 이를 통해서 데이터 네트워크나 인터넷 상에서 분산제어와 예측원격감시는 물론 전사적 자원관리시스템으로 통합이 가능하다.

이러한 배경 하에서 가상 디바이스 네트워크의 기본적인 개념과 틀을 제안한다. 디바이스 제어네트워크로 LonWorks 네트워크를, 데이터 네트워크로 Ethernet을 선택하여 이를 통합할 수 있는 LonTalk/IP 게이트웨이/웹 서버를 구현하여 가상디바이스 네트워크를 구성한다. 구성된 가상 디바이스 네트워크상에서 전달 특성에 대한 조사 연구를 수행한다. 가상 디바이스 네트워크 상의 불특정 시간지연을 최소화하기 위해 유한한 H_2 노음

을 갖는 Smith 예측 제어를 이용한 분산제어시스템을 설계하고, 직류 서보 모터의 속도제어실험을 통하여 분산제어시스템의 구현 가능성을 검증하도록 한다.

II. 가상 디바이스 네트워크

본 절에서는 가상 디바이스 네트워크를 구현하기 위해서 디바이스 네트워크에 고려되는 특징을 기반으로 하여 LonWorks 네트워크에 기반한 분산제어 네트워크에 관하여 살펴본다. 데이터 네트워크로서의 이더넷과 LonWorks 디바이스 네트워크와의 통합체로서의 가상 디바이스 네트워크에 대한 개념과 틀을 제시하고 있다.

2.1 LonWorks 기반 분산제어 네트워크

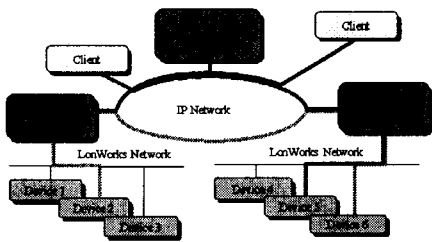
일반적으로 분산제어 네트워크 (DCN: Distributed Control Networks)에 대한 개념과 설계는 온라인 실시간 제어 네트워크에 통합되어 있는 센서나 구동장치에 근거를 두고 있다. 분산제어 네트워크의 능력과 내부구조에 대한 요구사항을 주의 깊게 평가할 필요가 있다. 많은 가용의 필드버스 프로토콜 가운데 LonWorks의 상호 운용가능성, 지능적인 분산형 네트워크 구조, 다양한 통신 매체 지원과 빌딩 자동화와 반도체 업계의 표준이라는 점이 LonWorks를 디바이스 제어네트워크로 선택하도록 하고 있다.

LonWorks 기반 분산 제어네트워크는 전통적인 주종형 제어 네트워크와 차이를 나타내고 있다. 전통적인 주종형 제어 네트워크는 장비 제조업체에 대한 기술 의존도를 높이기 되기 때문에 시스템 업그레이드나 교체 비용을 증가시키고 비즈니스 네트워크와의 통합이 용이하지 않다. 따라서 기업의 효율성과 생산성 향상이 어려운 뿐만 아니라 새로운 기업환경에 대한 대처 능력을

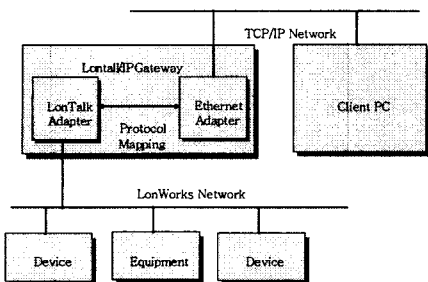
떨어뜨리게 된다. 반면에, LonWorks 기반 분산형 제어네트워크는 주종형 제어네트워크가 지닌 결점들을 보완할 수 있고, 기업환경 변화에 따라 능동적인 시스템 변경이 가능한 장점을 지니고 있다.

2.2 가상 디바이스 네트워크

TCP/IP 를 포함하는 인터넷 프로토콜 집합으로서 IP 네트워크는 기업을 위한 통합 네트워크임에 틀림없다. 이것은 인터넷을 경유하여 비즈니스 네트워크와 원격지의 디바이스 네트워크의 통합을 위한 분명한 선택이 되게 한다. IP 네트워크와 디바이스 네트워크의 통합에 의해서 인터넷은 기업 LAN 을 경유하여 지역적으로 분산된 하위 시스템들로 이루어진 기업 시스템의 원격지 일부분을 위해 직접 이용될 수 있다. 즉, IP 네트워크를 통하여 서로 떨어져 있는 디바이스 네트워크를 연결함으로써, 많은 지역에 퍼져 있는 디바이스 네트워크들이 이음새 없는 ‘가상 디바이스 네트워크(VDN: Virtual Device Network)’로 간단히 통합될 수 있다 [1]. 예를 들면 서로 떨어져 있는 발전소나 공장들에 설치되어 있는 필드 기기들이 가상적으로 마치 가까운 거리에서 단일 네트워크에 연결된 것처럼 상호 동작하며 정보를 주고 받고 하나로 통합되어 관리되는 것을 들 수 있다. 따라서, 가상 디바이스 네트워크는 인터넷 상에 위치한 하나 또는 그 이상의 감시 제어 응용시스템들로 연결된 하나 또는 여러 개의 원격 네트워크를 포함한다. [그림 1]에 가상 디바이스 네트워크의 일반적인 구조를 나타내었다. 가상 디바이스 네트워크의 핵심은 peer to peer(일대일) 네트워크라는 것이다.



[그림 1] 가상 디바이스 네트워크의 일반적인 구조



[그림 2] 클라이언트-서버 환경에서 LonTalk/IP 네트워크

[그림 2]에는 IP 네트워크 상에서 LonWorks 의 LonTalk 프로토콜을 구현하는 전형적인 구조를 나타내었다. [그림 2]와 같은 클라이언트/서버 환경에서 서버는 LonWorks 네트워크를 근거리에서 제어 및 감시하고, 클라이언트는 LonWorks 네트워크를 원격으로 제어하고 감시할 수 있다 [2]. 서버는 LonTalk 어댑터를 통하여 LonWorks 네트워크 상의 네트워크 변수들을 획득하여 인터넷 어댑터를 사용하여 IP 네트워크로 전송하게 된다. 클라이언트는 서버로부터 송신된 네트워크 변수들을 수신하고 그와 관련된 제어 명령으로 회신할 수 있다.

III. 가상 디바이스 네트워크의 전달특성

가상 디바이스 네트워크상에서 효과적인 실시간 서보제어를 위해서는 전달 지연이 작아야 하며 보상될 수 있어야 한다. 따라서 가상 디바이스 네트워크의 전달지연 특성을 조사할 필요가 있다. 가상 디바이스 네트워크의 전달 특성은 데이터 네트워크나 디바이스 네트워크에서 보다 좀더 복잡하다. H. Shahnasser and Q. Wang 은 LonTalk/IP 네트워크의 전달지연을 감시하고 측정하였다. 측정결과 데이터 네트워크의 전달지연은 데이터 네트워크의 트래픽에 의한 것이며, LonWorks 네트워크상의 전달지연은 중앙처리장치에 근거한 소프트웨어의 수행시간에 의한 것이라고 짧게 결론지었다 [2].

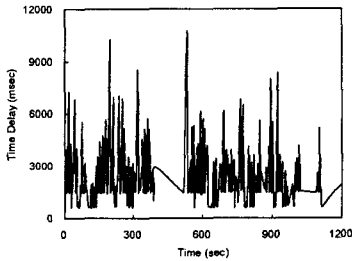
가상 디바이스 네트워크의 전달 특성을 조사하기 위해서 양방향 전달 시간(RTT: round trip time)이 디바이스 네트워크 상의 디바이스와 데이터 네트워크 상의 클라이언트 사이에 측정된다. 양방향 전달 시간을 측정하기 위해 클라이언트가 32 비트 부동소수점 수로 표현된 톱니파 신호를 웹 서버/게이트웨이로 송신하면, 웹 서버/게이트웨이는 이 신호를 디바이스 네트워크 상의 디바이스에 전달한다. 디바이스 네트워크 상의 디바이스는 웹 서버/게이트웨이로부터 신호를 수신한 후, 이를 다시 웹 서버/게이트웨이를 통해서 데이터 네트워크 상의 클라이언트로 되돌려 보낸다. 클라이언트에서 보냈던 신호가 다시 클라이언트로 되돌아 왔을 때 양방향 전달 시간이 계산되고, 전과 똑같은 과정이 계속 반복된다. 자바 애플릿 형태로 작성된 클라이언트 프로그램은 데이터 네트워크와 디바이스 네트워크 사이의 양방향 전달 시간을 측정하기 위해 사용된다.

[그림 3, 4]에 양방향 전달 시간(RTT: Round Trip Time)을 측정할 결과를 나타내고 있다. 그림에서 관찰되는 상당히 긴 시간지연 특성은 데이터 네트워크의 전달 특성과 디바이스 네트워크의 전달 특성뿐만 아니라 게이트웨이가 웹 변수를 LonWorks 네트워크 변수로 변환하고, LonWorks 네트워크 변수를 웹 변수로 변환하는데 소요되는 시간 때문이다.

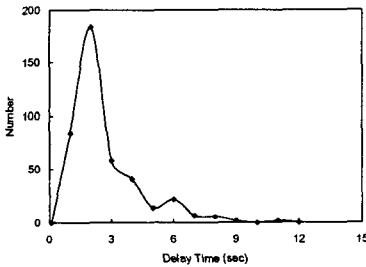
IV. 가상 디바이스 네트워크 상에 구현된 실시간 분산제어

가상 디바이스 네트워크 상의 실시간 분산제어시스템(DCS) 설계에서 고려해야 할 것은 센서에서 제어기까지의 정보 전달과정과 제어기에서 구동장치까지의 정

보전달과정에서 나타나는 시간 지연이다 [3]. 이산 제어기의 제어출력 신호는 네트워크 채널을 통과하면서 시간지연을 겪은 후 플랜트에 명령신호로 입력된다. 플랜트의 출력 또한 네트워크 채널을 통과하면서 시간지연을 겪은 후 제어기에 입력된다. 이때 플랜트의 지연된 출력 신호는 제어기의 입력신호로 사용되기 때문에 전체적인 제어시스템의 안정성과 성능을 저하시키게 된다. 때때로 긴 시간지연은 분산제어시스템의 안정성을 보장할 수 없게 만들기도 한다.

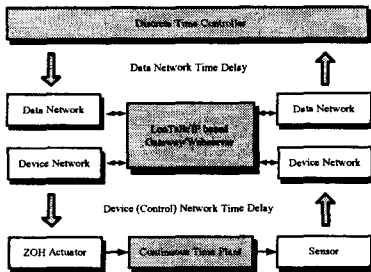


[그림 3] 양방향 전달 시간 변화



[그림 4] 양방향 전달 시간 분포

4.1 시간 지연



[그림 5] 가상 디바이스 네트워크 상에서 시간지연을 갖는 분산 제어시스템에 대한 블록선도

[그림 5]에는 가상 디바이스 네트워크 상에서 시간지연을 갖는 분산 제어시스템에 대한 블록선도를 나타내었다. 네트워크상에서 구현되는 제어시스템에서 발생하는 시간지연은 제어기의 시간지연, 디바이스의 시간

지연, 그리고 네트워크의 시간 지연을 들 수가 있다. Gregory C. Walsh 와 그 동료들은 네트워크상에서 구현된 제어시스템 (NCS: Networked Control System) 의 안정성에 대하여 연구를 수행하였다. 네트워크 제어시스템의 성능을 보장하는데 필요한 최대 허용가능 전송 간격 (MATI: Maximum Allowable Transfer Interval)을 도입하였다 [4]. Zhang 은 디바이스 네트워크 상에서 야기되는 시간지연을 갖는 네트워크 제어시스템 모델을 제시하고, 네트워크 제어시스템에 대한 안정성 영역과 이산적인 사건과 연속적인 동역학을 갖는 혼합 시스템 기법을 사용하여 시스템의 안정도를 분석하였다 [5].

4.2 제어기 설계

직류서보모터의 운동방정식은 개루프 속도응답 특성을 관찰하여 식(1)로 구하였다.

$$u = 0.3232\dot{x} + 1.0772x \tag{1}$$

u 는 토크 명령에 해당하는 전압이고, x 는 서보모터의 속도를 나타낸다. 직류서보모터의 토크 명령과 속도간의 전달함수(G)는 식(2)로 표현될 수 있다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{0.3232s + 1.0772} \tag{2}$$

[그림 5]의 블록선도를 바탕으로 연속시간에서 PI 제어기를 설계하면 식(3)으로 설계할 수 있고, 식(3)의 이산 시간 등가 표현은 식(4)로 표시될 수 있다.

$$G_c(s) = 0.4 + \frac{0.15}{s} \tag{3}$$

$$G_c(z^{-1}) = 0.4 + \frac{0.15T_s}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \tag{4}$$

식(4)에 근거하여 시간지연을 고려하지 않았을 때와 가상 디바이스 네트워크상의 시간지연을 고려하여 Pade 근사법을 적용했을 때의 공칭 플랜트의 전달함수를 각각 G_{mo} 와 G_m 이라고 하면 식(5)처럼 표현된다.

$$G_{mo} = \frac{1}{ms + b}, G_m = G_{mo} \left(\frac{1}{1 + \tau s} \right) \tag{5}$$

성능지수를 도입하여 성능지수 J 를 최소화하는 제어기를 설계하는데 W 는 가중함수를 나타낸다. 제어기를 설계할 때 단위계단응답 특성을 고려하여 설계할 경우 가중함수는 $1/s$ 로 놓을 수 있다. 이때 전달함수 WM 는 허수 축 위에 극점을 갖는다. 유한한 H_2 노음을 갖기 위해서는 제어기 설계과정에 식(7)의 제한 조건이 부과될 수 있다. 즉, W 의 극점을 소거하기 위해서 $s=0$ 에서 M 이 영점을 갖도록 식(11)이 성립해야 한다.

$$J = \|WM\|_2 \tag{6}$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} M(s) = 0 \tag{7}$$

그러면 (8)식이 성립하고, 제한 조건을 만족하는 모든 안정한 $Q(s)$ 들은 식(29)로 표현될 수 있다.

$$Q(0) = \frac{1}{G_m(0)} = b \tag{8}$$

$$Q(s) = b + sQ_1 \tag{9}$$

따라서, J 에 대하여 식(10)이 표시된다.

$$\|WM\|_2^2 = \left\| \frac{m\tau s + m + b\tau}{(ms+b)(\tau s+1)} \frac{Q_1(s)}{(ms+b)(\tau s+1)} \right\|_2^2 \quad (10)$$

여기서 Strictly Proper Stable Functions(SPSF)의 집합 개념을 도입하면 (10)식은 (11)식으로 전개된다 [6].

$$\begin{aligned} \|WM\|_2^2 &= \left\| \frac{(ms+b)\tau + m}{(ms+b)(\tau s+1)} \frac{Q_1(s)}{(ms+b)(\tau s+1)} \right\|_2^2 \\ &= \left\| \frac{\tau}{(\tau s+1)} + \frac{m-Q_1(s)}{(ms+b)(\tau s+1)} \right\|_2^2 \\ &= \left\| \frac{\tau}{(\tau s+1)} \right\|_2^2 + \left\| \frac{m-Q_1(s)}{(ms+b)(\tau s+1)} \right\|_2^2 \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)를 최소화하는 유일한 최적의 Q_1 에 대하여 부적당한 Q_{im} 은 식(12)로 선택되고, 식(13)이 유도된다.

$$Q_{im} = m \quad (12)$$

$$Q_{im} = ms + b \quad (13)$$

suboptimal 한 Q 에 대해서 식(13)의 고주파성분을 식(14)를 도입하여 차단하면, 구하고자 하는 Q 는 식(15)로 설계가 되고, Q 내부의 제어기 G_c 는 식(16)으로 설계되어 PI 제어기의 형태가 됨을 알 수 있다.

$$L = \frac{1}{\lambda s + 1}, \quad \lambda > 0 \quad (14)$$

$$Q = LQ_{im} = \frac{ms+b}{\lambda s+1} \quad (15)$$

$$G_c = \frac{Q}{1-G_m Q} = \frac{m}{\lambda} + \frac{b}{\lambda s} \quad (16)$$

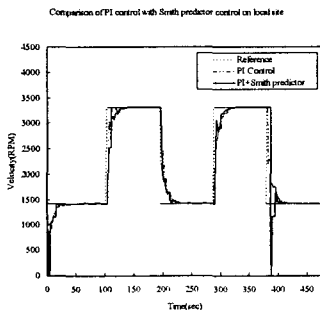
제안된 Smith 제어기는 식(17)과 식(18)로 표현된다.

$$\frac{U}{E} = \frac{Q}{1-G_m Q} = \frac{m\tau s^2 + (m+b\tau)s + b}{\tau\lambda s^2 + (\tau+\lambda)s}, \quad \tau: \text{time delay} \quad (17)$$

$$u(k) = \frac{1}{A} \left\{ \begin{aligned} &Be(k) - Ce(k-1) + De(k-2) \\ &+ Eu(k-1) - Fu(k-2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

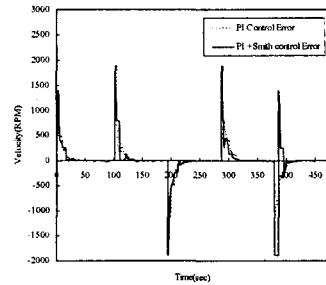
여기서, $A = \frac{\tau\lambda}{T_s^2} + \frac{\lambda+\tau}{T_s}$, $B = \frac{m\tau}{T_s^2} + \frac{(m+b\tau)}{T_s} + b$,

$C = \frac{2m\tau}{T_s^2} + \frac{(m+b\tau)}{T_s}$, $D = \frac{m\tau}{T_s^2}$, $E = \frac{2\tau\lambda}{T_s^2} + \frac{(\tau+\lambda)}{T_s}$, $F = \frac{\tau\lambda}{T_s^2}$ 이다.



[그림 5] PI 제어기와 Smith 제어기의 속도제어 결과

Comparison of PI control error with Smith predictor control on local site



[그림 6] PI 제어기와 Smith 제어기의 속도추종 오차

본 연구에서 직류모터의 서보제어 실험은 근거리 네트워크환경에서 실시 되었다. 제어논리에 사용된 최대 허용 가능한 시간지연은 3 초로 제한하였고, 이에 따라 매개변수 λ 를 1.8로 조절하였다.

[그림 5, 6]에 근거리 네트워크 환경에서 PI 제어기와 Smith 예측기를 도입한 제어기의 단위 계단응답 실험결과를 나타내었다. 실험결과 Smith 예측기를 도입한 제어기의 경우가 PI 제어기의 경우보다 안정화에 걸리는 시간이 작음을 알 수 있고 빠른 시간 내에 추종오차를 줄이는 것을 알 수가 있다.

V. 결론

본 논문에서는 가상 디바이스 네트워크의 개념과 기본 구조를 제시하였다. 가상 디바이스 네트워크의 전달 특성을 조사하여 불특정한 시간지연을 나타냄을 제시하였다. 실시간 분산제어시스템을 구현하기 시간지연을 최소화하기 위해 Smith 예측제어기를 도입하였다. 가상 디바이스 네트워크상에서의 직류 서보모터에 대한 제안된 제어기와 PI 제어기를 적용한 실험을 수행하였다. 유한한 시간지연을 갖는 상황에서 제안된 제어기의 안정성과 성능을 입증하였다. 보다 향상된 성능을 위해서는 가상 디바이스 네트워크의 전달지연에 대한 정확한 예측모델에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] D. Gaw, "LonWorks over the Internet: Technical Issues and Applications", Technical Note, Coactive Aesthetics, Inc., 1999.
- [2] H. Shahnasser and Q. Wang, "Controlling Industrial Devices over TCP/IP by Using LonWorks", *GLOBECOM 98, IEEE, Vol. 2*, pp. 1309-1312, 8-12 Nov. 1998.
- [3] Feng-Li Lian, James Moyne, and Dawn Tilbury, "Network Design Consideration for Distributed Control Systems", *IEEE Trans. Cont. Sys. Tech., Vol. 10*, pp 297-307, 2002.
- [4] Gregory C. Walsh, Hong Ye, and Linda G. Bushnell, "Stability Analysis of Networked Control Systems", *Proc. American Control Conference, San Diego, California*, pp. 2876-2880, June 1999.
- [5] Wei Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 84-99, February 2001.
- [6] Weidong Zhang and Xiaomong Xu, "Simple Predictor for Processes with Time Delay", *Proc. AACC, San Diego, California*, pp. 822-826, June 1999.