CAN통신을 이용한 분산제어 시스템의 시간지연보상을 위한 μ-제어기에 관한연구

A study on the μ-controller for the compensation of the network induced delays in the distributed

안세영* 임동진**
Se-Young Ahn* Dong-Jin Lim**

Abstract - CAN is a serial communication bus for real-time controls and automations in distributed control systems. In distributed control systems, occasionally a sensor module and a controller are not in the same node and physically separated. In order for the signal from a sensor node to reach the controller node, the signal must travel through network. CAN has a certain capabilities to deal with real-time data. However, when many nodes on the networks try to send data on the same network, the arbitration mechanism to solve the data collision problem is necessary. This situation causes the time delay which has detrimental effects on the performance of the control systems.

This paper proposes a method to solve the problem due to the time delay in distributed control system using CAN. Time delay is approximated to an element with a rational transfer function using Pade approximation and Mu-synthesis method is applied. Since time delay in the network is not constant, the time delay element is considered to be an uncertainty block with a bound. The proposed method is applied to the experimental system with CAN and proved to be effective.

Key Words :TTCAN, distributed control system, node, Mu-synthesis method, Pade approximation

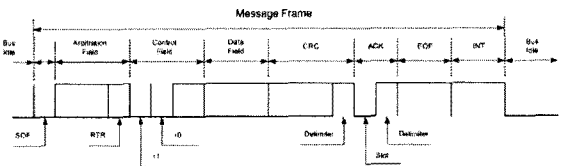
1. 서 론

현재 사용되어지는 CAN(Control Area Network) 네트웍상의 시스템들은 많은 제어기와 센서등 으로 연결된 복잡한 시스템으로 분산되어 구성되어있다. 이러한 분산 제어 시스템(distributed control systems)에서 사용되는 통신망은 실시간의 기능을 가진 통신망이 사용되지만, 현재 CAN은 네트웍의 오버헤드(overhead)와 버스상의 메시지의 우선순위를 가리는 중재과정으로 인하여 데이터 전송으로 인한 시간 지연(Time delay)을 피할 수가 없게 된다. 또한 시간지연 현상은 시간에 따라 변하기 때문에 이것을 예측하고 모델링 하기는 매우 어렵다. 이러한 시간 지연은 제어시스템의 성능뿐만 아니라 안정성에도 영향을 미친다. 이 논문은 Faik, Jonatan M. Smith, Ruzena Bajcsy가 사용한 파데 근사법(Pade approximation method)을 이용하여 데이터의 지연을 근사화 한다[1]. 그리고 네트웍에서 보장될 수 있는 시간 지연에 대한 상한 한계(upper bound)를 정하여 가중치(weight)와 불확실성(uncertainty)의 모델로 시간 지연요소를 근사화(approximation)하고 스텝 기준 입력을 추종하기 위한 μ-제어기를 설계하는 과정을 제시한다. 본 논문에서는 제시된 방법의 유효성을 보이기 위하여, CAN으로 연결된 실험용 분산 제어 시스템에 대해서 제시된 방법을 적용하고, 설계한 μ-제어기가 효과적으로 동작한 결과를 보여준다.

저자 소개
* 안 세 영 : 한양大學交 전기전자제어계측學科 碩士課程
Email: asy30@ihanyang.ac.kr
** 임 동 진 : 한양大學交 전기전자제어계측學科 副敎授
Email: limdj@hanyang.ac.kr

2. CAN통신 개요

CAN(Control Area Network)은 자동차 내의 각종 계측 장비들 간에 디지털 직렬 통신을 위하여 개발된 차량용 네트웍 시스템이다. 현재는 산업 자동화(Industrial automation)와 인베디드 시스템(Embedded systems)에 사용되며 새로운 모형과 기능으로 변화하고 있다. 그림 1은 CAN의 메시지 프레임을 보여준다.

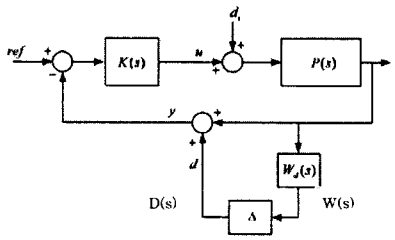


<그림1> CAN의 메시지프레임

CAN의 메시지의 구성은 데이터 프레임, 리모트 프레임, 에러 프레임, 오버로드 프레임등 4개의 프레임으로 이루어져 있다. 전송된 메시지가 11비트의 식별자(Identifier)를 가지고 있으며, 이 식별자를 통하여 우선순위가 높은 메시지가 전송되도록 한다. 만일 두개 이상의 노드가 동시에 메시지를 전송하면 각 메시지는 서로 식별자를 1비트씩 비교하여 제일 높은 우선순위의 메시지는 전송하고 낮은 우선순위의 메시지들은 전송이 중단된다. CAN 버스에서는 '0' 비트가 '1'비트에 대해

우세하다. 또한 전송하는 노드는 한 비트를 보낼 때마다 버스를 감시하고, 어떤 비트가 'r'비트를 보냈는데 버스를 감시한 결과 'd' 비트가 검출되었다면 이는 버스 내의 자기보다 높은 우선순위의 메시지가 전송되고 있는 것이므로 그 노드는 전송을 즉시 중단하고 수신모드로 전환하여 버스의 상태를 계속 감시한다. 만약 버스가 비활성 상태가 되었다면 자동적으로 메시지를 전송하게 된다. CAN의 문제점은 이렇게 반복되는 동작들이 데이터의 지연을 가중시키는 것이다. 실시간 특성을 개선한 TTCAN(Time-Triggerd CAN)은 설계시 정해진 시간 스캐줄에 좌우하기 때문에 데이터의 지연문제를 해결할 수 있지만 장비 및 시스템을 교환해야하는 문제가 따를 수 있다.

3. 시스템 모델



<그림2> 시간 지연을 근사화한 제어시스템

통신상에서 나타나는 시간 지연 요소가 포함된 피드백 제어 시스템에 대한 모델을 일반적으로 그림 2와 같이 나타낸다. 플랜트에서 제어기로 피드백(feedback)시 나타나는 시간 지연(backward network delays)요소를 고려하였다. 본 논문에서는 불확실한 시간 지연 요소를 변형된 파데 근사법(a modified Pade approximation method)을 이용하여 근사화한다.

$$g_p(s) = g(s)(1 + l(w)\Delta(s)),\ |\Delta| \le 1$$

g(s) : nominal plant

$g_p(s)$: the set of delay uncertain plant

Δ : complex perturbation

$l(w)$: multiplicative uncertainty

여기서 $l(w)$ 의 bound는 Owens과 Raya에 의해 다음과 같이 정의되어진다[2].

$$l(\omega) = \begin{cases} \left| e^{-j\tau\omega} - 1 \right|, & \forall \omega < \pi/\tau \\ 2, & \forall \omega \ge \pi/\tau \end{cases}$$

이 bound는 무리수이므로 해석상은 가능하나 합성(synthesis)에는 부적절하다. 따라서 파데 근사화(Pade approximation)방법으로 근사화 시킨다.

$$e^{-\tau ds} = 1 - \frac{\tau s}{1 + \frac{\tau}{s}s}\Delta = 1 + w(s)\Delta,\ |\Delta| \le 1$$

τ : 시간 지연(time delay), Δ : complex perturbation

여기서 $w(s)$ 는 $l(w)$ 보다 어떤 주파수 범위에서 작은 가중치를 가지므로 Wang에 의해 제시된 w_d 를 사용한다[3]. $w_d(s) = \dfrac{\tau s}{1 + \frac{\tau s}{3.465}}$

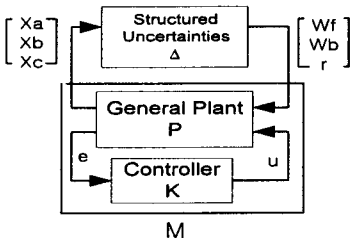
4. μ-제어기 설계

본 논문에서는 μ-제어기법을 사용하여 제어기를 설계한다. μ제어기법은 다중입력-다중출력(multi-input multi-output) 시스템에서의 성능 강인성과 함께 모델 불확실성(model uncertainties)에 대한 안정도 강인성을 만족하는 제어기 설계를 가능하게 해준다.

μ-제어 기법은 주어진 성능 강인성과 안정도 강인성 요구조건에 대하여

$$\| \mu(F_l(P, K)) \|_\infty < 1$$

을 만족하도록 안정한 제어기 K를 설계하는 것이라 할 수 있다. 이러한 제어 기법에 의해 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 3>M- Δ 구조 형태

$$M = P'_{11} + P'_{12}K(I - P'_{22}K)^{-1}P'_{21}$$

$$P'_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_2PK_2 & 0 & 0 \\ -W_3PK_2 & -W_3 & W_3 \end{bmatrix},$$

$$P'_{12} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2PK_2 \\ -W_3PK_2 \end{bmatrix},$$

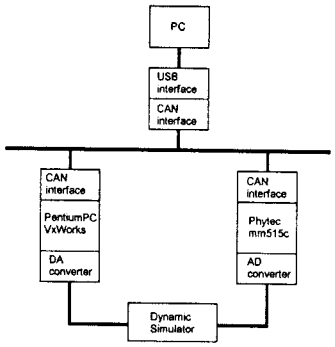
$$P'_{21} = [\,-PK_2\ \ -1\ \ -1\,],\ P'_{22} = -PK_2$$

$\Delta = diag[\,\Delta_f, \Delta_b, \Delta_p\,]$ 로 모델 불확실성 블록이며, Δ_p 는 가상적인 불확실성 블록을 나타낸다.

5. 시뮬레이션 결과 및 실제시스템 적용

그림 4는 앞장에서 제시한 제어기를 적용시켜 실제 시스템과 시뮬레이션을 위해 VxWork가 포팅된 PC와 프로그램을 작성할PC를 두고 그 사이를 CAN모듈인 Phytec의 mm515c로 CAN 네트웍망을 구성했다. 현실적으로 소규모의 실험상으로 제어할 만한 데이터의 지연이 없으므로 프로그램적으로 데이터의 지연을 주었다. 시뮬레이션의 샘플링 타임은 1/400sec를 주고 실험하였다. 프랜트 모델, 지연요소를 근사화한 불확실성 함수, 성능가중치함수의 전달함수는 다음과 같다.

$$P(s) = \frac{10}{s(0.1s+1)},\ W_d(s) = \frac{\tau s}{\frac{\tau s}{3.465} + 1},\ We = \frac{1}{s+1},\ \tau = 0.025$$

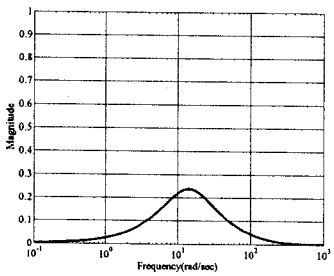


<그림 4>적용시스템 구성도

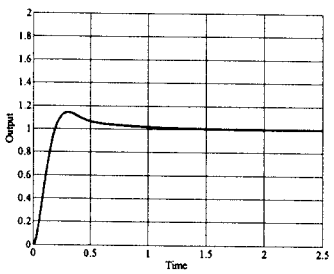
마지막으로 제어기의 전달함수는 K(s) =

$$\frac{1061s^4+1.3\times10^4 s^3+2.992\times10^4 s^2+1.592\times10^4 s+98.84}{s^5+504.9\,s^4+1.24\times10^4 s^3+2.068\times10^4 s^2+9179\,s+56.89}$$

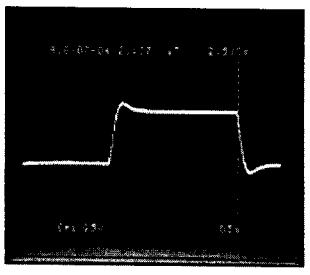
이다. 다음은 μ제어기를 적용시켜 계단입력을 주었을 때의 결과들이다.



<그림 5> 폐루프시스템의 주파수 크기 응답

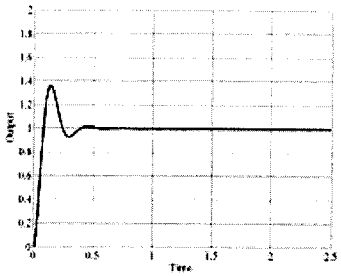


<그림 6> 지연시간이 0.016sec일 때 시뮬레이션 결과

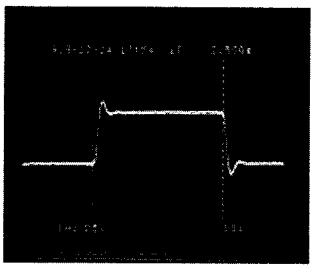


<그림 7> 지연시간이 0.016sec일 때 실제시스템의 실험 결과

그림 5의 주파수응답은 그림 2의 지연요소에서 W(s)/D(s)를 구한 것 이다. 10rad/sec 일 때 0.25의 크기로 지연시간 0.016sec의 4배까지 안정하다고 할 수 있다. 그림 6은 Matlab의 Simulink을 이용한 시뮬레이션이며, 그림 7은 실제 실험 결과이다. 두 실험 모두 계단함수 입력에 이상 없이 추정됨을 볼 수 있다. 그림 8과 9는 과도응답을 개선시키기 위해 그림 6,7과 같은 지연상태에서 성능가중치함수를 변경해 보았다. 변경한 후 주파수응답은 40rad/sec 일 때 크기는 0.53으로 안정도는 감소 하지만 과도응답이 빨라짐을 확인할 수 있다.



<그림 8> 성능가중치함수$We=4/(0.1s+1)$로 변경 후 시뮬레이션 결과



<그림 9> 성능가중치함수$We=4/(0.1s+1)$로 변경 후 실제 시스템 실험 결과

6. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 CAN네트웍에서 나타나는 시간 지연에 따른 시스템의 안정성과 성능 저하를 보상하기 위하여 μ제어기법을 이용하여 계단 추종 제어기를 설계하였다. 이를 실제 시스템에 적용시키고 시뮬레이션응답과 비교 하였다. 두 결과는 모두 계단입력을 유사하게 추정함을 볼 수 있었다. 또한 성능가중치 함수를 변경하여 과도응답 특성을 개선할 수 있었다.

추후 연구 과제로는 시뮬레이션에 있어서 부하의 변동이 심한 상황을 고려하여 급변하는 네트웍 상황과 프로토콜이 다른 무선으로 된 시스템에서의 제어기 성능의 유효성을 추후 과제로 관심이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] Faik Goktas, Jonthan M. Smith, Ruzena Bajcsy *"μ-Synthesis For Distributed Control Systems with network-Induced Delay"* 1996 IEEE Conference on Decision and Control

[2]D.H.Owens and A.Raya. *"Robust stability of smith predictor controllers for time-delay systems."* Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 129, 1982.

[3]Z.Wang, P.Lundstrom, and S, Skogestad. *"Representation of uncertain time delays in the h_∞ framework."*

[4] 최병묵. "분산제어 시스템에서의 시간 지연 보상을 위한 2-자유도 μ제어기 연구" .석사학위논문, 2001