

클러스터 웹서버 제어시스템의 Time-delay 및 전달 특성 분석

남의석

극동대학교 유비쿼터스IT학과

Analysis of Transfer Characteristics and Time-delay of Control System based on Clustering Web Server

Eui-Seok Nahm

Dept. of Ubiquitous IT, Far East University

요약 인터넷을 통한 정보 전달 방법은 Ethernet과 ATM, CAN과 같은 다양한 통신 전달 프로토콜 및 방법을 통해 이루어지고 있다. 현재 연구된 네트워크상의 시간 지연 현상에 대한 연구는 일부 네트워크 모델을 바탕으로 연구되고 있으나 다양한 통신 환경 하에서 발생하는 시간 지연 현상에 대해 최적의 모델링 방법을 제시해 주고 있지 못하고 있다. 따라서 다양한 네트워크 환경에 적합하도록 인터넷 기반 비동기 샘플치 시스템 모델에 대한 연구가 필요하다. 아울러 인터넷을 통해 구성된 페루프 시스템은 기존 제어 시스템과 다른 동작 특성과 외란 특성을 가지므로 인터넷 환경에 적합하게 설계된 견실 제어 방법이 필요하다. 따라서 안정성이 극히 요구되는 각종 산업 기기 등에 대한 웹기반 정밀 원격 제어를 원활히 수행하기 위해서는 웹 환경에 최적화된 강인 제어 이론 개발이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 원격지 플랜트에 대한 실시간 원격 제어를 안정적 및 효율적으로 수행하도록 인터넷상의 데이터 전송시 시간 지연 현상 분석 및 인터넷 기반 제어시스템의 전달 특성 분석하였다.

주제어 : 클러스터, 시간지연, 전달 특성, 인터넷 제어

Abstract : Ethernet, ATM, and CAN are wide-utilized communication protocols for information transfer by internet. Many researches about Network Time-delay have been based on network modeling. But almost of them have not shown an optimal solution in various communication environments. So, asynchronous sample system modeling based internet is needed to be robust in various network environments. Also as closed loop system in internet has a different operational characteristics and noise characteristics comparing with conventional control system, new robust control method is needed in instruments which demand to be safe and precise for internet environments.

In order to achieve the safe and precise real-time control in remote plant, this paper is aimed to analysis the transfer characteristics and time-delay of control system in cluster web server.

Key words : cluster, time-delay, transfer characteristics, internet control

Received 16 May 2014, Revised 20 June 2014

Accepted 20 August 2014

Corresponding Author: Eui-Seok Nahm(Dept. Ubiquitous IT, Far East Univ.)

Email: nahmes@kdu.ac.kr

ISSN: 1738-1916

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

기존의 제어 시스템은 센서(sensor)와 구동기(actuator)를 통해 획득한 출력 신호를 전용 제어선을 통한 전송과정을 통해서만 실시간으로 제어 목적을 달성할 수 있었다. 그러나 이러한 중앙 집중식 제어 시스템은 플랜트와 근접한 곳에 위치하여야 하는 공간적 제약성과 제어기를 위한 전용 제어망이 필요로 하는 비용상의 문제점이 존재한다[3][4]. 초고속 광통신 망을 근간으로 하는 인터넷의 보급으로 정보의 다양한 전달 형태 및 획득의 용이성이 가능하게 되었다. 즉, 인터넷을 이용함으로써 제어 목적을 달성하기 위한 공간적 제약성을 해결하게 되었으며 웹을 기반으로 하는 비주얼(visual)한 접근은 보다 효율적으로 제어 효과를 확인할 수 있는 장점을 얻을 수 있다. 특히 인터넷을 통한 실시간 제어는 다양한 제어 대상 플랜트에 대한 접근 용이성과 효율적이고 가변적인 제어 시스템의 구현이 가능한 장점을 가진다. 그러나 현재 인터넷을 통한 정보 전달 과정에서 갖고 있는 중요한 제한 사항들인 통신 대역폭의 한계와 통신 과부하에 의해 랜덤하게 발생하는 통신 정체 현상은 안전하고 신뢰성 있는 실시간 제어를 구성하는 데 있어서 중대한 문제점으로 등장하고 있다. 따라서 인터넷 기반 하에서 네트워크상의 통신 문제로 인한 제어기의 성능 감소를 예방하고 안정적인 동작을 보장하기 위해서는 인터넷 상의 통신 지연 현상 등에 대한 분석 및 모델링 개발이 필요하다. 특히 Ethernet을 중심으로 네트워크 전달시에 지연 현상에 대해 효과적으로 모델링할 수 있는 최적 확률 모델링 방법이 필요하다[1][2].

현재 인터넷을 통한 정보 전달 방법은 Ethernet과 ATM, CAN과 같은 다양한 통신 전달 프로토콜 및 방법을 통해 이루어지고 있다. 현재 연구된 네트워크상의 시간 지연 현상에 대한 연구는 일부 네트워크 모델을 바탕으로 연구되고 있으나 다양한 통신 환경 하에서 발생하는 시간 지연 현상에 대해 최적의 모델링 방법을 제시해 주고 있지 못하고 있다. 따라서 다양한 네트워크 환경에 적합하도록 인터넷기반 비동기 샘플치 시스템 모델에 대한 연구가 필요하다. 아울러 인터넷을 통해 구성된 폐루프 시스템은 기존 제어 시스템과 다른 동작 특성과 외란 특성을 가지므로 인터넷 환경에 적합하게 설계된 건설 제어 방법이 필요하다. 따라서 안정성이 극히 요구되는

각종 산업 기기 등에 대한 웹기반 정밀 원격 제어를 원활히 수행하기 위해서는 웹 환경에 최적화된 강인 제어 이론 개발이 필요하다[5][6].

따라서, 본 논문에서는 원격지 플랜트에 대한 실시간 원격 제어를 안정적 및 효율적으로 수행하도록 인터넷상의 데이터 전송시 시간 지연 현상 분석 및 인터넷 기반 제어시스템의 전달 특성 분석하고자 한다.

2. 시간지연 현상 모델링

2.1 인터넷상의 시간 지연 현상에 대한 최적 모델링

일반적으로 제어 대상 시스템의 성능에 영향을 끼치는 인터넷상의 시간 지연 현상은 다음 세 가지로 구분할 수 있다.

- 센서와 제어기 사이의 통신 지연 현상 : τ^{sc}
- 제어기 내부의 계산 지연현상 : τ^c
- 제어기와 액츄에이터 사이의 통신 지연 현상 : τ^{ca}

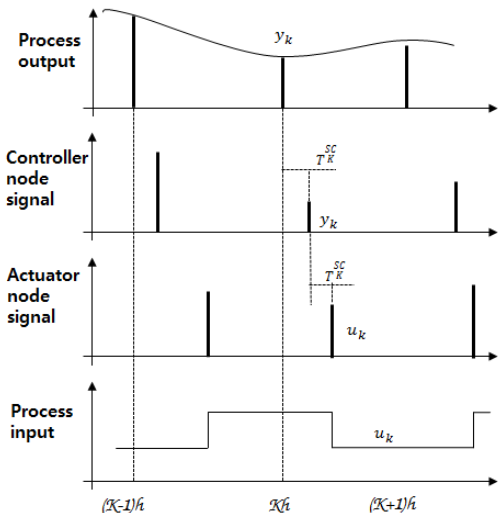
매 샘플 시간에 작용하는 제어 대상 시스템에 대한 총괄적인 제어 지연 시간은 위에 열거된 지연 현상들의 합이 된다 ($\tau^k = \tau_k^c + \tau_k^s + \tau_k^a$). 제어기 구성에서 중요한 특징은 이들 지연 현상은 랜덤한 특성을 갖는 점이다. 따라서 일반적인 샘플치 시변 시스템에 대한 제어기 설계 방법을 바로 적용할 수 없는 문제점이 존재한다. 네트워크상의 시간 지연 현상을 해결하기 위한 방법 중의 하나는 제어기의 입출력 단에 메모리를 설치하여 양단의 시간 지연 현상을 일정하게 하는 것이다. 그러나 이 방법은 인터넷을 통한 Event-driven 형태의 비동기 시스템을 구성하기에 부적절하며 시스템의 성능 저하를 가져올 수 있다. 제어대상 시스템에 대한 제어기의 안정적 동작을 보장하기 위해서는 네트워크상의 시간 지연 현상에 대한 모델링을 바탕으로 시간 지연 현상을 제어 시스템 구성시 고려하는 방법이 효율적이다. 본 논문에서는 확률적 방법을 통해 인터넷상의 통신환경에 의한 시간 지연 현상에 대해 효율적으로 모델링을 할 수 있는 방법에 대해 연구하고자 한다[7][8].

2.2 확률 기법을 이용한 시간 지연 현상 모델링

인터넷상에서 시간 지연 현상을 가져오는 원인은 다음과 같이 요약될 수 있다[9][10].

- 네트워크간의 대기 상태를 기다리기 위한 지연
- 다량의 메시지 전송시, 전송대기를 위한 지연
- 메시지 전달 오류시, 재전송을 위한 지연
- 네트워크상의 트래픽(traffic)에 의한 데이터 충돌(collision)시 재전송을 위한 대기 상태

네트워크상의 시간 지연현상을 모델링하는 방법 중의 하나는 시간 지연 현상을 가우시안 확률 분포를 따르는 랜덤한 현상으로 간주하여 모델링하는 것이다. 그러나 실제 네트워크상에서 전송 시간은 마지막 전송 지연 시간과 깊은 관계가 있다. 즉 네트워크 부하는 전송간의 시간보다 낮은 시간 상수를 가지고 변한다는 가정아래 네트워크간의 부하 변동을 확률적 방법을 통해 모델링이 가능하다. 위에 열거된 네트워크 전송 특성을 바탕으로 Markov chain을 통한 네트워크상의 시간 지연 현상에 대해 모델링할 수 있다. 시간 지연 현상이 존재하는 시스템 모델링에 기반한 시스템을 시간 지연 도약 선형 시스템(Time-delayed jump linear system)이라고 한다[9].



[Fig. 1] System Signal Period in Control System

제어 대상 샘플치 시스템이 다음과 설정되었을 때,

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gv \tag{1}$$

네트워크 상의 시간 지연 현상을 고려한 샘플치 도약 선형 시스템은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma_0(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca})u(k) + \Gamma_1(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca})u(k-1) + v(k) \tag{2}$$

여기서,

$$\Phi = e^{Ah}$$

$$\Gamma_0(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \int_0^{h\tau_k^{sc} - \tau_k^{ca}} e^{As} ds B \tag{3}$$

$$\Gamma_1(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \int_{h\tau_k^{sc} - \tau_k^{ca}}^h e^{As} ds B$$

상태 잡음 v_k 는 다음 식(4)와 같이 정의된다.

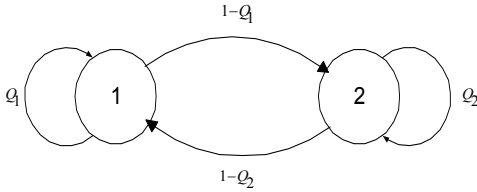
$$R_1 = E\{v_k v_k^T\} = \int_0^h e^{A(h-s)} R_0 A^T e^{A(h-s)} ds \tag{4}$$

즉 네트워크 시간지연현상이 관계식을 통해 멀티레이트 샘플주기를 갖는 시스템으로 고려되게 된다.

2.3 웹기반 전송 시간 지연 현상에 적합한 모델링 방법

전철의 Markov chain은 일반적으로 상태 전이 행렬에 대한 확률 특성을 알고 있어야 한다. 즉 네트워크를 통한 자료의 전송시 한정적인 데이터에 근거한 모델링은 정확한 시스템의 시간 지연 현상을 대표하기 어렵다. 인터넷 기반의 제어 시스템은 Ethernet, ATM, CAN등과 같은 다양한 네트워크 전달 매체를 통해 구성된다. 기존의 음성 인식 시스템에서 본격적으로 연구된, HMM(Hidden Markov Model)을 이용하여 랜덤한 네트워크상의 시간 지연 현상에 대한 확률 특성을 파악하려는 시도들이 행해지고 있다. HMM은 관찰 가능한 상태에 대한 통계적 처리를 통해 숨겨진 모델의 추출을 통해 상태 전이 행렬 유도를 할 수 있는 특성을 갖고 있기 때문이다. 본 논문에서는 HMM을 바탕으로 다양한 네트워크 모델에 적합하도록 확률적 모델링 방법을 제시하고자 한다. 이것은

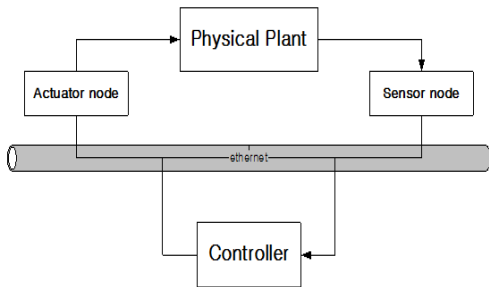
신뢰성 있는 웹 기반 샘플링 시스템을 개발하는데 기본 바탕이 된다[11][12].



[Fig. 2] State Transition of Markov Chain Model

3. 네트워크 기반 분산 제어 시스템 특성

네트워크를 이용한 실시간 제어시스템(networked control system ; NCS)에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. NCS는 첫째, 다양한 시스템에 설치가 용이한 장점을 가지며 둘째로 배선구성을 단순화 할 수 있고 시스템의 유지 및 보수가 용이한 장점을 가지고 있다. 산업 현장에서 사용되는 제어 시스템은 분산 제어시스템으로 구현되고 있으며 특히, 시스템의 중요 요소들인 제어 및 정보신호는 네트워크 망을 통해 교환하고 있다. 그림 3은 NCS의 구조를 나타내고 있다[13][14].



[Fig. 3] Structure of NCS

통신 네트워크 상에서 불가피하게 발생하는 랜덤한 전송지연 현상의 원인들은 크게 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째로 네트워크의 대역폭의 제한성, 두번째로 통신 단자에서 과중한 부하현상 그리고 다중 사용자로 집중적인 네트워크망 사용 등이 그 원인이다. 이러한 시간 지연 현상은 시스템의 제어 효율성 뿐만 아니라 시스템의 안정도까지도 저하시키는 주요 요인이 된다. 1988년,

Halevi 와 Ray는 연속치 플랜트와 이산시간 제어기의 연결을 clock-driven 방식의 통신 네트워크로 구성된 집적된 통신과 제어시스템(integrated communication and control system: ICCS)을 제안하였다.

ICCS에서는 clock-driven 방식의 이산치 제어기가 필요로하는 시스템 상태 정보를 정의된 샘플링 주기 내에서 갱신되는 것으로 가정하였다. 그러나 ICCS는 복잡한 신호 처리 과정 중에서 발생하는 데이터 동기상의 불일치(missynchronization), 메시지 거부 현상(message rejection event) 등의 단점들을 가지며 이러한 단점은 전체적으로 전송시간 지연의 주요 원인이 된다. Nilsson은 네트워크 지연 현상을 Markov chain model로써 모델링하고, 액츄에이터(actuator)로부터의 데이터 전송특성을 고려한 LQG 기반의 event-driven 방식의 통계적인 제어기를 제안하였다. 특히, 이때 필요한 제어신호와 측정신호는 time stamp 단위로 제공된다. 이때 제어기에 필요한 매개변수들은 이전 시간지연의 누적된 통계적 자료로부터 유도할 수 있다. Walsh는 Try-Once-Discard(TOD) 방식의 제어 네트워크 프로토콜을 제안하였다. TOD는 연속치 시스템에서 시간지연에 따른 NCS에 대한 안정도 판별을 제공해주는 알고리즘이다.

4. 전달 특성 분석

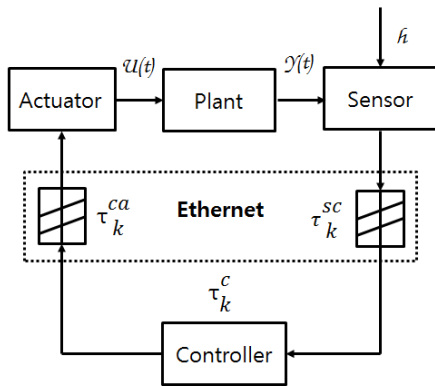
네트워크를 통하여 메시지 전송상에서 불가피하게 발생하는 시간지연에 따라 시스템의 네트워크와 처리 방식(메세지 처리 순서를 결정하는 방식)에는 다양한 전송 특성을 갖는다. 전송 시간지연을 과거에는 단순한 상수값으로 가정하였으나 인터넷 등과 같은 공중망방식의 네트워크상에서 전송과정상의 시간지연은 임의의 시변특성을 갖는다. 예를 들면, 전송지연시간은 네트워크의 부하, 통신망 내의 통신우선권, 그리고 전기적 노이즈 등에 따라 변할 수 있다. 그리고 센서와 구동기 또한 제어기를 어떻게 동조시키느냐 따라 몇 가지의 설정을 할 수 있다. 기존에 선행된 NCS에 대한 연구결과에 따라 제어기와 주변 기기와의 연결 방식에는 clock-driven 방식(시간방식)과 event-driven 방식(이벤트방식)이 있다. 일반적인 분산 디지털 제어 시스템에서 발생하는 시간 지연현상을 다음과 같이 요약 될 수 있다.

- 센서와 제어기 사이의 지연: τ^{sc}
- 제어기와 액츄에이터 사이의 지연 : τ^{ca}
- 제어기의 연산 지연 : τ^c

매 샘플 시간에 작용하는 제어 대상 시스템에 대한 전체적인 제어 지연 시간은 위에 언급한 지연 현상들의 총합이 된다 ($\tau^k = \tau_k^{sc} + \tau_k^c + \tau_k^{ca}$). 랜덤한 시간 지연 특성으로 인해 기존의 샘플치 시변 시스템에 대한 제어기법을 바로 적용하기 어렵다. 제어대상 시스템에 대한 제어기의 안정적 동작을 보장하기 위해서는 네트워크상의 시간 지연 현상에 대한 확률적 모델링을 바탕으로한 시간 지연 현상을 제어 시스템 구성 시 고려하는 방법이 필요하다. 그림 5는 clock-driven controller의 구조를 나타낸다. 주어진 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + g_w w(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (5)$$

step discretization을 통해서 식(6)과 같은 등가 시스템 모델을 구할 수 있다.



[Fig. 4] Distributed Digital Control System with time-delay

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) \\ z(k) &= (1 - \zeta(k))y(k) + \zeta(k)y(k-1) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $A_d = e^{Ah}$

$$w(k) = \int_0^h e^{A\alpha} g_w w(t) d\alpha \quad \zeta(k) \in 0,1 \quad (7)$$

이다. 특히 $\zeta(k)$ 값은 센서로부터 제어기로의 plant 신호가 정확히 정해진 샘플링 순간의 도달 여부를 의미한다. 즉, 성공적으로 신호가 도달했을 때 $P\zeta(k) = 1 = \alpha_k$ 이며 z 의 기대값은 $Ez(k) = \alpha_k Ex(k) + (1 - \alpha_k) Ex(k-1)$ 이 된다.

시스템 모델에 대한 최적의 선형 필터를 얻기 위한 과정은 식(9)와 같이 주어진 가격함수를 최소화 하는 것으로 생각할 수 있다.

$$J_k = E e_k^T e_{k|k} \quad (9)$$

여기서 $e_k = x(k) - \hat{x}(k|k)$ 는 예측 오차를 나타낸다. 비편향된 순차적인 연산구조를 갖는 선형 필터는 식 (10)과 같다.

$$\hat{x}(k|k) = L_k \hat{x}(k|k-1) + K_k z(k) \quad (10)$$

$$\hat{x}(k|k-1) = A_d \hat{x}(k-1|k-1)$$

여기서,

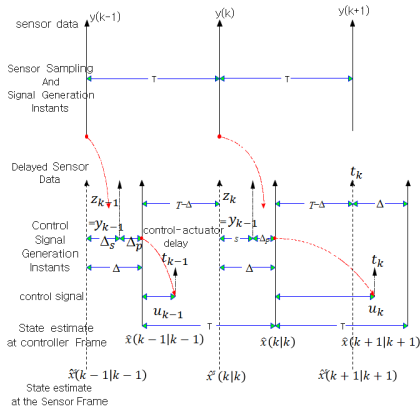
$$L_k = I - K_k [\alpha_k C + (1 - \alpha_k) CA_d^{-1}] \quad (11)$$

$$(12)$$

$$\begin{aligned} K_k &= [\alpha_k \sum_{i=0}^{k-1} C^T + (1 - \alpha_k) A_d^{-1} \sum_{i=0}^{k-1} C^T] \\ &\times [\alpha_k C + (1 - \alpha_k) CA_d^{-1}] E \{ x(k) x(k)^T | z_k \} \\ &\times [\alpha_k C + (1 - \alpha_k) CA_d^{-1}]^T \alpha_k (1 - \alpha_k) \\ &+ [C - CA_d^{-1}] E \{ x(k) x(k)^T | z_k \} [C - CA_d^{-1}]^T \\ &- \{ (1 - \alpha_k) CA_d^{-1} Q_{k-1} A_d^{-T} C^T + (1 - \alpha_k) R_{k-1} + \alpha_k R_k \}^{-1} \end{aligned}$$

또한, 상태 예측 오차 상관 행렬은 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{k-1} &= E e_k^T e_{k|k} | z_k \quad \sum_{i=0}^{k-1} = A_d \sum_{i=0}^{k-1} A_d^T + Q_k \\ Q_k &= E w_k^T w_k | z_k \end{aligned} \quad (13)$$



[Fig. 5] Time-delay in clock-driven controller

반면에 event-driven controller는 센서노드로부터의 plant output을 받고 그 즉시 제어 신호를 액추에이터노드로 보낸다.

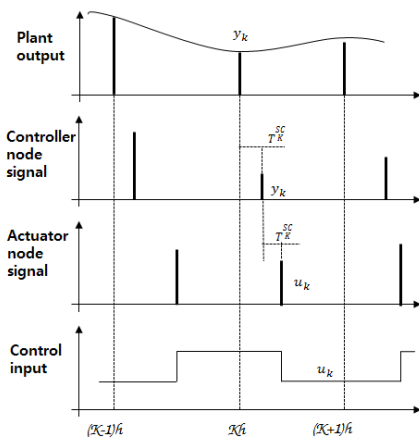
식(14)와 같은 시스템을 고려하면,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ u(t) &= -Kx(t - \tau_k) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$ 이다.

식의 간략화를 위해서 network-induced 지연은 서로 독립적이고 input 신호의 지연 τ_k 는 한번의 샘플링 주기 h 보다 작다고 가정하면 식 (15)을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t - \tau) \quad (15)$$



[Fig. 6] Time-delay in event-driven controller

그림 6는 각 샘플링 순간에서의 event-driven controller의 지연 현상을 나타내고 있다. 샘플링 주기 h 로 시스템을 샘플링함으로써 식(16)와 같은 등가 이산치 방정식을 얻을 수 있다.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_{1d} u(k) + B_{2d} u(k-1) \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_d &= e^{Ah} \\ B_{1d} &= \int_{\tau}^h e^{A\alpha} B_u d\alpha \\ B_{2d} &= \int_0^{\tau} e^{A\alpha} B_u d\alpha \end{aligned}$$

이다. 식(17)과 같은 가격 함수를 고려하면,

$$J_N = x(N)^T Q x(N) + E \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

이다. <Theorem 1.> 주어진 plant 식(16)에 잡음이 없다면 즉, $y(k) = x(k)$ 인 경우, 가격함수 식(17)을 최소화하는 제어입력은 식(19)로 주어진다.

$$u(k)^* = -L(\tau^{sc}) \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1)^* \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서,

$$\begin{aligned} L(\tau^{sc}) &= (Q_{22} + \widetilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} [Q_{12}^T + S^{21} \widetilde{S}_{k+1}^{22}] \\ \widetilde{S}_{k+1}^{22}(\tau_k^{sc}) &= E_{\tau_k^{ca}} G^T(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) S_{k+1} G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) \tau_k^{sc} \\ G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) &= \begin{bmatrix} A_d & B_{1,d} & B_{2,d} \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다.

5. 웹기반 제어 시스템의 시간 지연 현상에 대한 확률적 모델링

데이터 네트워크 내의 통신 지연에서 좀 더 실제적인

모델은 Markov chain을 기초로 한 임의의 지연 분포와 같은 모델이다. 이러한 시스템을 위해 몇몇의 분석과 설계 기법이 제안되었다. 모든 샘플에서의 두 가지 변화를 만드는 Markov chain의 시스템의 일반적 분석 결과가 일반화 되어질 수 있는데, 이것은 Markov chain의 state가 측정 및 제어 신호를 보낼 때 둘 다 변화하게 만든다.

- The Markov Communication Network

Markov chain의 state에 의해 주어지는 확률분포에 기인하는 임의의 변수 τ_k 에서 네트워크 지연은 나타난다.

예를들면, τ_k 는 루프 내에서 $\tau_k = [\tau_k^c, \tau_k^a]^T$ 과 같이 지연을 나타내는 벡터일 수 있다. Markov chain은 지연이 발생했을 때 state 벡터 $r_k \in \{1, 2, \dots, s\}$ 를 가짐을 나타내고

$[k, k+1]$ 사이에서 변화가 발생한다. Markov chain에서 $Q = \{q_{i,j}\}$, $i, j \in \{1, 2, \dots, s\}$ 는 transition matrix를 나타낸다.

이때 $q_{i,j} = P(r_{k+1} = j | r_k = i)$ 이고, Markov chain state의 확률은 $\pi_i(k) = P(r_k = i)$ 이다.

그리고, Markov chain state 분포 벡터는

$$\pi(k) = [\pi_1(k) \ \pi_2(k) \ \dots \ \pi_s(k)]$$

r_k 에 대한 확률 분포는 귀납법에 의하여

$$\pi(k+1) = \pi(k)Q, \ \pi(0) = \pi_0$$

이 때, π_0 는 r_0 에 대한 각각의 확률 분포이다.

Y_k 를 시간 t 에 대응하는 임의의 구성요소에 의해 생성되는 σ -algebra 라고 정의하면, $Y_k = \{e_0, \dots, e_k, \tau_0, \dots, \tau_k, r_0, \dots, r_k\}$ 이 되고, 이때, e_i 는 프로세스내의 노이즈이다.

의 확률 분포는 $P(\tau_k \in F | Y_{k-1}, r_k) = P(\tau \in F | r_k)$ 를 의미하는 Markov chain의 state r_k 에 의해 모든 측정 가능한 집합 F 에서 추정된다. 연속 관측 밀도에 의한 Markov chain이 사용될 것이다. 가변적인 네트워크 부하에 의한 확률밀도 함수도 유사한 방법으로 얻을 수 있다.

$f_i(\tau_k) = P(\tau_k | r_k = i)$ for $i \in [L, M, H]$ 여기서 L, M, H 는 각각 네트워크에 걸린 부하가 낮음, 보통, 높음을 의미한다. 이산 관측 밀도에 의한 경우는 f_i 가 Dirac 함수일 때의 특수한 경우이다.

- Closed Loop Sampled System

제어 과정은 다음과 같은 선형 형태로 추정할 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \tag{20}$$

이 때, 행렬 A, B 는 적절한 크기의 행렬이며, $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m, v(t) \in R^n$ 이다. 제어된 입력은 $u(t)$ 이며, 영평균과 공분산 R_v 로 표현되는 백색 잡음이다. 간략화를 통해 센서에서 작동기로의 지연은 샘플링 주기 h 보다 작음을 알 수 있다. 다시 말하면, $\tau_k^c + \tau_k^a < h$ 이다. 만약, 이 조건이 만족되지 않는다면, 제어 신호는 작동기에 잘못 도달하게 되어 분석을 더욱 어렵게 만든다[15].

즉, 센서에서 작동기로의 지연이 h 보다 작다는 가정은 센서에서 제어기로의 지연이 h 보다 작도록 지연 배열을 할 수 있다. 이것의 일반화는 프로세스 state가 좀 더 오래된 몇몇의 제어 신호와 함께 연장되는 조건을 필요로 한다.

네트워크로부터의 영향은 마코프 체인에 기초한 확률 분포를 가지고 있는 변수 τ_k 에서 나타난다. 샘플링 순간에서 이산화는 다음과 같다.

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} + v_k \tag{21}$$

여기서 $\Phi = e^{Ah}$ 이다.

$$\Gamma_0(\tau_k^c, \tau_k^a) = \int_0^{h - \tau_k^c - \tau_k^a} e^{As} ds B \tag{22}$$

$$\Gamma_1(\tau_k^c, \tau_k^a) = \int_{h - \tau_k^c - \tau_k^a}^h e^{As} ds B \tag{23}$$

$$y_k = Cx_k + w_k, \text{ where } y_k \in R^p \tag{24}$$

통계학적 프로세스 v_k, w_k 는 영평균과 공분산 행렬 R_1, R_2 각각에 의한 Gaussian 백색잡음과는 관련이 없다.

식 (20)부터 식 (24)까지의 시스템을 위한 일반적인 선형 제어기는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$x_{k+1}^c = \Phi^c(\tau_k, r_k)x_k^c + \Gamma^c(\tau_k, r_k)y_k \tag{25}$$

$$u_k = C^c(\tau_k, r_k)x_k^c + D^c(\tau_k, r_k)y_k \tag{26}$$

이 때, $\Phi^c, \Gamma^c, C^c, D^c$ 내의 τ_k, r_k 의 형태는 제어가 네트워킹 지연과 네트워크 상태를 완전히 또는 부분적으로 알고 있다는 것을 의미한다.

식 (20)부터 식 (26)에 의해 페루프 시스템은 다음과 같이 썩어질 수 있다.

$$Z_{k+1} = \Phi(\tau_k, r_k)Z_k + \Gamma(\tau_k, r_k)e_k \quad (27)$$

$$\text{이 때, } Z_k = \begin{bmatrix} x_k \\ x_k^c \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\Phi(\tau_k, r_k) = \begin{bmatrix} \Phi + \Gamma_0(\tau_k)D^c(\tau_k, r_k)C & \Gamma_0(\tau_k)C^c(\tau_k, r_k) & \Gamma_1(\tau_k) \\ \Gamma^c(\tau_k, r_k)C & \Phi^c(\tau_k, r_k) & 0 \\ D^c(\tau_k, r_k)C & C^c(\tau_k, r_k) & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$e_k = \begin{bmatrix} v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad (30)$$

and

$$\Gamma(\tau_k, r_k) = \begin{bmatrix} I & \Gamma_0(\tau_k)D^c(\tau_k, r_k) \\ 0 & \Gamma^c(\tau_k, r_k) \\ 0 & D^c(\tau_k, r_k) \end{bmatrix} \quad (31)$$

e_k 의 배열 R 은 $R = E(e_k e_k^T) = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}$ 이다.

6. 결론

본 논문을 통하여 웹기반 제어 시스템의 분야에서는 네트워크 기반 분산 제어 시스템의 특성 분석, 인터넷상의 데이터 전송시 시간지연 현상 분석 및 인터넷 기반 제어시스템의 전달 특성 분석 및 웹기반 제어 시스템의 시간 지연 현상에 대한 확률적 모델링 연구의 성과가 있다.

본 논문의 결과로서 원격지에 위치한 계측기기에 대해서 인터넷을 통해 동작 시작과 종료 및 세부 동작을 수행할 수 있는 원격 제어 프로그램을 개발하였으며 시연을 통해 그 유효성을 확인할 수 있었다. 이와 같이 구성된 시스템을 이용하여 측정된 영상 및 데이터를 전송받아 수요자가 바로 사용할 수 있게 함으로써 고가의 물성 분석기기 이용의 효율성을 극대화할 수 있다. 개발된 시스템은 화상 및 데이터의 송수신이 필요한 다른 학문 분야에서도 손쉽게 적용 가능하도록 그 구조를 유연하게 구성하였다.

REFERENCES

- [1] J. Overstreet and A. Tzes, "Internet-Based Real-Time Control Engineering Laboratory," IEEE Control Systems Magazine, vol. 9, no. 3, pp. 19-33, October 1999.
- [2] G. Bruzzone, R. Bono, M. Caccia and G. Veruggio, "Internet mission control of the ROMEO Unmanned Underwater Vehicle using the CORAL Mission Controller," OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century, vol. 3, pp. 1081-1087, 1999.
- [3] K. Mitchell, G. Kerdoncuff and G. May, "Microelectronics processing education using the Internet," Proc. of the 25th Annual Conference on Frontiers in Education, pp. 5-13, Nov. 1995.
- [4] A. Leleve, P. Fraisse, P. Dauchez and F. Pierrot, "Modeling and Simulation of Robotic Tasks Teleoperated through the Internet", Proceeding of the 1999 IEEE/SEMI Int. Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 299-303 September 1999.
- [5] H.Chan and U. Ozguner, "Closed-Loop Control of Systems over a Communication Network with Queues," Int. J. Control, vol. 62, no. 3, pp. 493-510, 1995.
- [6] J. Nilsson, B. Bernhardsson, and B. Wittenmark, "Stochastic Analysis and Control of Real-Time Systems with Random Time Delays," Automatica, vol. 34, no. 1, 1998.
- [7] J. Nilsson and B. Bernhardsson, "LQG Control over a Markov Communication Network," Proceeding of the 36th Conference on Decision & Control, pp. 4586-4591 December 1997.
- [8] Y. Ji and H. J. Chizeck, "Controllability, Stabilizability, and Continuous-time Markovian Jump Linear Quadratic Control," IEEE Trans. Auto. Control, vol. 35, no. 7, pp. 777-788, 1990.
- [9] J. C. Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar and B. A. Francis, "State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems," IEEE Trans. Auto. Control,

- vol. 34, no. 8. pp. 831-847, 1989.
- [10] H. Dolye, K. Zhou and K. Glover and B. Bodenheimer, "Mixed H_2 and H_∞ Performance objectives II: Optimal control," IEEE Trans. Auto. Control, vol. 39, pp.1575-1587, 1992.
- [11] B. Bamieh and J. B. Pearson, " A General Framework for Linear Periodic Systems with Application to H_∞ Sampled-Data Control," IEEE Trans. Auto. Control, vol. 37, no. 4, pp. 418-435, 1992.
- [12] H. T. Toivonen, "A mixed H_2/H_∞ control problem for sampled-data systems," Int. J. Control, vol. 70, no. 4, pp. 579-602, 1998.
- [13] S. P. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishman, Linear Matrix Inequalities in System and Control Thoery, SIAM, 1994.
- [14] G. Dullerud and R. Smith, "Sampled-Data Model Validation: An Algorithm and Experimental Application," Int. J. Robust and Nonlinear Control, vol. 6, no. 9, pp. 1065-1078, 1996.
- [15] J. Gray, D. Siewiorek, "High-availability computer systems," Computer, Vol. 24, No. 9, pp.39-48, Sept. 1991.

남 의 석(Nahm, Eui-Seok)



- 1991년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학석사)
- 1998년 2월 : 연세대학교 전기오학과(공학박사)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 극동대학교 유비쿼터스IT학과 교수

- 관심분야 : 제어시스템, 홈네트워크, 지능형시스템
- E-Mail : nahmes@kdu.ac.kr