

# CAN 을 통신매체로 하는 역진자 시스템의 제어

## Control of an Inverted Pendulum System with CAN for Communication Medium

조 성 민, 최 현 철, 홍 식 교\*  
(Sung-Min Cho, Hyoun-Chul Choi, and Suk-Kyo Hong)

**Abstract :** In a networked control system (NCS), time delays which are larger than one sampling period can change the control period. As a result, it may cause system instability. This paper presents a control method for an NCS using the controller area network (CAN), where time delays arise in the control loop. Specifically, a simple yet efficient method is proposed to improve control performance in the presence of time delays. The proposed method, which can be regarded as a gain scheduling method, selects a suitable LQ control gain among several gains to deal with the problems due to the change of control period. It is found that the gain can be scheduled in terms of the relation between the gain and the sampling period, which is represented by first-order algebraic equations. The proposed method is evaluated with an inverted cart pendulum system where the actuator and sensors are connected through the CAN. Experiment results are presented to show the efficiency of the proposed method.

**Keywords :** time delay, gain scheduling, controller area network, inverted pendulum

### I. 서론

오늘날 많은 제어시스템들은 다양한 센서와 구동기들을 필요로 하기 때문에 구조가 점점 복잡해지고 있다. 중앙집중형 점대점(point-to-point) 접속방식의 시스템에서는 센서 및 구동기 수에 비례하여 배선량이 늘어나며, 이에 따라 확장 및 유지 보수에 어려움이 커진다. 이러한 문제점 때문에 이러한 점대점 접속방식의 제어 시스템이 네트워크 기반 제어 시스템(Networked Control System: NCS)으로 대체되고 있다[1-4].

네트워크를 제어시스템의 통신경로에 적용하면 시스템 재구성 및 배선작업이 용이하고 비용이 적게 든다는 이점이 있지만, 시스템을 구성하는 여러 기기들이 한정된 매체인 네트워크 버스를 공유하기 때문에 데이터 교환과정에서 데이터 처리시간 및 전송시간에 대한 영향을 고려해야 하는 문제가 있다. 이러한 시간에 의하여 시간지연이 발생하는데, 이 시간지연은 제어 시스템의 성능 및 안정성을 크게 해칠 수 있다 [1,3,4].

네트워크 기반 제어시스템에서 시간지연이 시스템에 미치는 영향에 대해 그 동안 많은 연구가 이루어졌다. Zhang과 Branicky [1]는 무작위적 시간지연이 발생하는 NCS의 안정성에 대하여 고찰하였고, 그 결과로 특정 NCS 시스템의 안정성 기준을 하나의 예로 제시하였다. Luck과 Ray [3]는 무작위 시간지연이 발생하는 시스템에 대하여 고찰하고 버퍼를 이용하여 무작위한 시간지연을 일정하게 만들었다. 그리고, n-스텝 시간지연된 시스템 상태를 추정하기 위한 관측기를 제안하였으며, 시변 시간지연을 일정한 시간지연으로 만들어 제어기를 설계하고 제안된 방법의 타당성을 보였다. Nilsson 등[4]은 동적계획법(dynamic programming)을 이용하여 무작위

로 변하는 시간지연을 보상하는 최적 제어기를 제안하였으며 그 방법의 우수성을 보였다.

한편, 1990년대 이후 이득계획 기법에 대한 연구가 활발히 진행되었다[8,9]. 1990년대 이전에도 이득계획 기법에 의한 제어 시스템 설계 사례가 있었으나, 주로 항공기 제어, 자동차 엔진 제어 등 몇몇 제한된 분야에만 적용되었다[9]. 그러나 1990년대 들어서, LPV (Linear Parameter Varying) 시스템 방법론[10,12]에 의한 이득계획 기법의 이론적 토대와 선형행렬부등식 (Linear Matrix Inequality: LMI) 방법[11]과 같은 수학적 해석 도구의 개발로 인해 이득계획 기법에 대한 관심이 증대되어 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[9,10].

본 논문에서는 네트워크 기반 제어시스템을 구성하는 기기들 사이의 통신과정에서 발생하는 시간지연이 시스템에 미치는 영향을 분석하고 이를 보상하여 시스템을 안정화하는 제어기를 설계한다. 시간지연이 발생하면 제어 주기가 변할 수 있기 때문에 고정된 제어 이득을 갖는 제어기법으로는 이 변화에 의한 영향을 보상할 수 없다. 그러나 네트워크 기반 제어시스템에 대한 기존 연구들 중 시간지연에 의한 제어 주기의 변화를 명시적으로 다룬 것이 별로 없다. 본 논문에서는 제어 주기가 변할 수 있다고 가정하여, 그 변화에 따라 상태궤환 이득값을 변경해주는 이득계획(gain scheduling) 기법을 제안한다. 특히, Controller Area Network (CAN) 을 통신매체로 이용하는 역진자 시스템에 이 방법을 적용하고 실험을 통해 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 CAN을 이용한 역진자 시스템에 대하여 다룬다. 특히, CAN 프로토콜에 의한 데이터 교환 과정과 그에 따른 시간지연 발생 및 영향에 대하여 다룬다. III절에서는 시간지연에 의한 영향을 최소화하기 위한 방법으로서 이득계획기를 제안한다. IV절에서는 시간지연이 있을 경우 이득계획 기법에 의한 역진자 시스템의 수레위치 추종제어 실험을 통해 제안된 방법의 유용성을 보이고, V절을 통해 결론을 맺는다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 5. 17., 채택확정 : 2005. 12. 28.

조성민 : (주)삼성전자(apostel\_12@hotmail.com)

최현철, 홍식교 : 아주대학교 전자공학부

(begun@ajou.ac.kr/skhong@ajou.ac.kr)

**II. CAN 을 이용한 역진자 시스템**

CAN을 이용하여 네트워크화된 역진자 제어시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 전체 시스템은 크게 역진자와 데이터를 수집하기 위한 계측부, 시스템의 제어를 위한 제어부, 그리고 역진자의 수레를 구동시키는 구동부로 나뉜다. CAN 프로토콜을 이용하면 계측부는 클럭에 동기되어 동작하고 제어부와 구동부는 사건발생에 의해 동작하는 방식으로 시스템을 운영할 수 있다. 이러한 방식을 각각 클럭구동(clock driven)방식과 사건구동(event driven)방식이라 일컫는다. 이렇게 운영하면, 계측부는 일정한 시간마다 센서로부터 데이터를 얻어내어 이 정보를 제어부로 전송하고, 제어부와 구동부는 이러한 데이터를 받는 즉시 동작한다.

**1. CAN 프로토콜에 의한 데이터 교환 과정**

CAN 프로토콜은 ISO의 OSI 참조 모델 중 하위 2개층인 데이터링크 계층 및 물리 계층을 사용하여 디바이스들 사이의 정보 교환 방식을 정의하고 있으며, 데이터링크 계층이 미디어에 접근할 때 일어나는 충돌을 감지하고 중재할 수 있도록 CSMA/AMP (Carrier Sense Multiple Access/Arbitration on Message Priority) 방식을 적용하고 있다[3,6]. CAN은 토큰이나 허가가 필요하지 않기 때문에 반응이 빠르며 최대 1Mbps 전송속도로 통신이 가능하기 때문에 실시간 통신에 유리하며, 오류 자동 검출 기능이 있어 신뢰성이 높다.

CAN 통신방식은 방송형(broadcast) 통신방식과 원격요청형(remote request) 통신방식으로 나뉜다. 방송형 통신방식은 송신 노드가 네트워크를 통해 메시지를 방송하면 네트워크를 구성하는 모든 노드들은 송신 노드의 메시지를 감지하고 메시지 식별자를 통해 그 메시지가 자신에 해당하는 메시지인지 판단한 후 그에 따라 응답하는 방식이다. 원격요청형 통신방식은 송신 노드가 수신 노드에 해당하는 메시지 식별자를 데이터 프레임에 실어 버스에 보내어 응답을 요청하면 그 식별자에 해당하는 노드가 응답하는 방식이다.

본 논문에서는 시스템을 구성하는 계측부와 구동부, 제어부 사이의 통신을 위해 방송형 통신방식을 이용하였다. 방송형 통신방식을 적용하면, 계측부에서 메시지를 전송할 때 다른 모든 노드들이 이를 감지하지만 메시지 식별자와 메일박스 식별자가 일치하는 제어부에서만 메시지를 받아들일 수 있다. 이와 동일하게, 제어부에서 발신된 메시지는 식별자가 일치하는 구동부에서만 수신할 수 있다. 그림 1에 이러한 방송형 통신방식의 예를 나타내었다.

**2. CAN 통신시 시간지연과 그 영향**

CAN 표준 2.0A [6]에 의하면, 데이터 메시지 프레임의 크기는 최소 47비트에서 최대 134비트이다. 이 표준에 의한 CAN통신의 최대속도가 1Mbps이므로 통신속도를 최대값으로 설정할 경우의 전송 시간은 최대 134μs이다. 데이터를 전송할 때 전송중재에 의한 시간지연이 발생하는데 이 시간지연의 크기는 네트워크 버스에 연결되어 있는 노드 수와 메시지 우선순위에 따라 변한다. 시스템에서  $m$  개의 노드가 동시에 전송을 시도하려고 할 때,  $n$  번째 우선순위를 갖는 메시지의 시간지연( $\tau_n$ )은 다음 식으로 표현된다[3].

$$\tau_n = (\tau_p + \tau_t) + \tau_t(n-1), \quad 0 < n < m$$

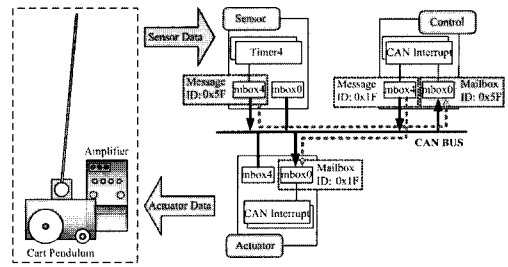


그림 1. 시스템 구성도.

Fig. 1. System configuration.

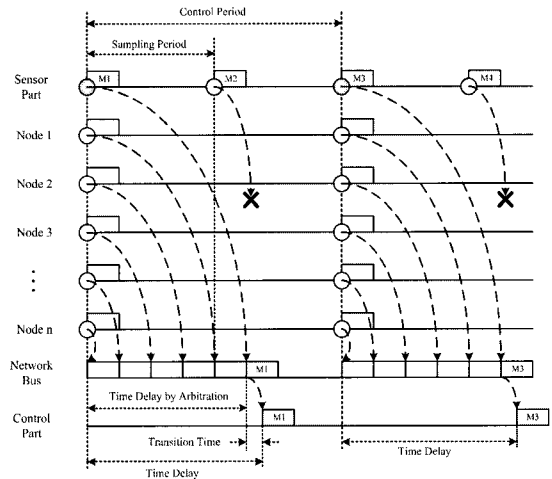


그림 2. 네트워크 기반 시스템의 시간지연 영향.

Fig. 2. Effects of time-delay in NCS.

여기서,  $\tau_p$  는 데이터 전송에 필요한 준비시간,  $\tau_t$  는 데이터 전송에 드는 시간이다.

그림 2는 계측부가 데이터를 제어부로 전송할 때 전송중재 과정이 필요하고 이 때 발생하는 시간지연에 의해 제어 주기가 변할 수 있음을 보여준다. 여기서, 제어 주기란 유효한 데이터 표본 사이의 주기(이 예에서는 계측부의 M1과 M3 사이의 시간)를 의미한다. 최하의 우선순위를 갖는 계측부가 일정한 간격으로 데이터를 전송하고 이 보다 우선순위가 높은 노드들이 데이터를 전송하는 경우를 가정하자. 이 때, 최하의 우선순위를 갖는 센서부는 이들이 전송을 마칠 때까지 기다려야 한다. 이상적인 경우, 즉 계측부에서 제어부로 데이터를 전송하는 과정에서 발생하는 시간지연이 계측부의 표본화 주기보다 작은 경우라면 사건동작 방식의 제어부와 구동부는 계측부와 동일한 제어 주기로 동작 한다. 그러나 시간지연이 표본화 주기보다 크게 되면 그림 2와 같이 계측부의 첫 번째 메시지 M1의 전송시간이 표본화 주기보다 크게 되면, 두 번째 메시지 M2는 전송이 불가능하게 된다. 이 과정에서 데이터 손실이 발생하고 제어부와 구동부의 제어 주기가 계측부의 표본화 주기와 다르게 된다. 즉, 주어진 시스템의 기본 표본화 주기를  $h_0$  라 하고 시간지연을  $\tau$  라 할 때, 제어 주기  $h$  는 다음과 같이 주어진다.

$$h = \tau + \tau_0 = mh_0 \quad (1)$$

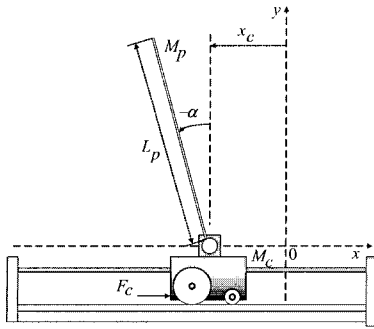


그림 3. 역진자 좌표계.  
Fig. 3. Inverted pendulum coordinates.

여기서,  $m$  은 양의 정수로서 기본 표본화 주기의 배수를 나타내고,  $\tau$  는  $(m-1)h < \tau < mh$  범위의 값을 갖고  $\tau_0$  는  $0 < \tau_0 < h_0$  범위의 값을 갖는다.

3. 역진자 시스템의 수학적 모델

실험에 사용된 수레형 역진자에 대한 좌표계는 그림 3과 같고, 진자의 기울기  $\alpha$  에 대해  $\alpha = 0^\circ$  에서 선형화한 모델은 (2), (3)과 같다[5].

$$(M_c + M_p)\ddot{x}_c + M_p l_p \ddot{\alpha} = F_c - B_{eq} \dot{x}_c \quad (2)$$

$$(I_p + M_p l_p^2)\ddot{\alpha} - M_p g l_p \alpha = -M_p l_p \ddot{x}_c - B_p \dot{\alpha} \quad (3)$$

여기서,  $x_c$  는 수레의 위치,  $\alpha$  는 진자의 각,  $F_c$  는 수레에 작용하는 힘,  $g$  는 중력가속도를 나타내며,  $M_c$  및  $M_p$  는 각각 수레의 질량 및 진자의 질량을 나타내고  $l_p$ ,  $I_p$ ,  $B_{eq}$  및  $B_p$  는 각각 진자의 유효 길이, 진자의 관성모멘트, 수레의 등가적 점성마찰력 상수 및 진자의 점성마찰력 상수를 나타낸다.

역진자 수레의 구동기로 DC모터가 사용되었으므로 실험을 위한 시스템 모델을 구할 때 이에 대한 고려가 필요하다. DC모터 동역학을 고려할 때, 수레에 작용하는 힘  $F_c$  는 다음과 같이 주어진다[5].

$$F_c = \frac{K_g K_i}{R_m r} V_m - \frac{K_g^2 K_{emf} K_i}{R_m r^2} \dot{x}_c \quad (4)$$

여기서,  $K_g$  는 모터의 기어비,  $r$  은 피니언의 반지름,  $K_i$  는 모터의 토크상수,  $K_{emf}$  는 역기전압 상수,  $R_m$  는 모터의 저항을 나타내고  $V_m$  은 모터에 인가된 전압을 나타낸다. 표 1에 실험에 사용된 시스템 변수 값들을 제시하였다.

상태변수를  $x = [x_c, \alpha, \dot{x}_c, \dot{\alpha}]^T$  으로 정의하고 입력 변수를  $u = V_m$  으로 정의한 후, 표 1에 제시된 값을 (2), (3), (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 수레형 역진자 시스템의 선형화된 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

이 때  $A$  와  $B$  는 다음과 같이 주어진다.

표 1. 역진자 모델 파라미터.

Table 1. Parameters for inverted pendulum model.

$g$	Acceleration of gravity [m/s <sup>2</sup> ]	9.81
$M_c$	Total mass of cart [kg]	0.7031
$M_p$	Mass of pole [kg]	0.2300
$l_p$	Effective length of pole ( $L_p/2$ ) [m]	0.3302
$I_p$	Pole's moment of inertia [kg-m <sup>2</sup> ]	0.0079
$B_{eq}$	Cart viscous friction force coefficient [N-s/m]	4.3
$B_p$	Pole's viscous friction torque coefficient [N-m-s/rad]	0.0024
$K_i$	Motor torque constant [Nm/A]	0.00767
$K_{emf}$	Motor back-emf constant [V/(rad/s)]	0.00767
$K_g$	Motor gear ratio	3.71
$R_m$	Motor resistance [ $\Omega$ ]	2.6
$r$	Radius of motor pinion gear [m]	0.00635

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2.2630 & -5.6713 & 0.0073 \\ 0 & 27.8037 & 13.0609 & -0.0896 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 1.3189 \ -0.0727]^T$$

4. 이산화된 시간지연 시스템 모델

이 절에서는 네트워크 기반 시스템을 이산화된 시간지연 시스템으로 간주하여 그에 해당하는 모델을 구한다. 네트워크 기반 시스템에 해당하는 시간지연 시스템 모델을 얻기 위해 우선 다음과 같이 가정한다.

- 1) 시스템 상태는 주기적으로 측정된다.
- 2) 제어부와 구동부는 데이터가 전달됨과 동시에 동작한다.
- 3) 이전의 시간 지연 값은 메모리에 저장된다.

전술한 바와 같이, 시간지연은 데이터의 전달을 늦출 뿐 아니라 제어기 설계의 전제조건인 시스템 제어 주기의 균일성을 깨뜨린다. 또한 이 때의 제어 주기는 계측부 표본화 주기의 정수배만큼 늘어난다. 이러한 성질로부터, 다음과 같이 제어 주기보다 작은 시간 지연을 입력에 갖는 상태회환 제어 시스템을 고려하자[7].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad t \in [kh + \tau, (k+1)h + \tau),$$

$$u(t^+) = -Kx(t - \tau), \quad t \in \{kh + \tau, k = 0, 1, 2, \dots\} \quad (6)$$

여기서,  $x \in \mathbb{R}^n$  는 상태변수이고  $u \in \mathbb{R}^m$  는 구분연속이며  $kh + \tau$  에서 값이 변하는 제어입력이며, 시스템 행렬은 적절한 차수를 갖는다. 제어 주기를  $h$  로 하면, 위 식으로부터 다음과 같이 이산화된 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma_0(\tau)u[k] + \Gamma_1(\tau)u[k-1] \quad (7)$$

여기서,

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

$$\Gamma_0(\tau) = \int_0^{h-\tau} e^{As} B ds,$$

$$\Gamma_1(\tau) = \int_{h-\tau}^h e^{As} B ds$$

이고  $\tau$  ( $0 < \tau < h$ ) 는 시간지연 값이다. 이 방정식에서 1-스텝 시간지연된 입력을 상태로 간주하여 다음과 같이 시간지연이 없는 확대차수(augmented) 상태방정식을 얻는다.

$$z[k+1] = \tilde{A}z[k] + \tilde{B}u[k] \tag{8}$$

여기서,

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C \ 0]$$

$$z[k] = \begin{bmatrix} x[k] \\ u[k-1] \end{bmatrix}$$

이다.

### III. 이득계획 기법을 이용한 최적 제어

(8)과 같은 시스템의 성능지수를 다음과 같이

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{z^T[k]Qz[k] + u^T[k]Ru[k]\}, Q > 0, R > 0 \tag{9}$$

으로 정의하면 이를 최소화하는 최적 상태회환 제어기 설계 문제는, 다음과 같은 이산 Riccati 방정식을 만족하는 양한정 행렬  $P$  를 구하는 문제로 귀결된다.

$$\tilde{A}^T P \tilde{A} - P + Q - \tilde{A}^T P \tilde{B} (R + \tilde{B}^T P \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T P \tilde{A} = 0 \tag{10}$$

이 때의 최적 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u[k] = -(R + \tilde{B}^T P \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T P \tilde{A} z[k] \tag{11}$$

본 논문에서 제안하는 이득계획 기법은 상태 종속적 Riccati 방정식 기법[9,13,14]에 이론적 기반을 둔다. 특별히, 이산화된 시스템 모델이 제어 주기 및 시간지연에 따라 변한다는 점에 착안하여 이에 따른 상태 종속적 이산 Riccati 방정식을 세우고 그 결과로 상태 종속적 최적 상태회환 제어 입력을 구한다. 이러한 경우 Riccati 방정식의 해는  $h$  와  $\tau$  에 대한 함수로 주어진다.

여기서 계산량을 줄이고 문제를 간단히 하기 위하여 (1)의  $\tau_0$  가  $0 < \tau_0 < h_0$  의 범위에서 균일하게 분포된다고 가정한다. 그러면 시간지연이 표본화 주기의  $m-1$  배보다 크고  $m$  배보다 작기 때문에 그 값은  $\tau = mh_0 - \tau_0$  으로 주어진다. 따라서, 이 때  $\tau_0$  의 평균값 ( $h_0/2$ ) 을  $\tau_0$  의 대표 값으로 이용하면 시간지연과 제어 주기의 관계를  $\tau = h - h_0/2$  으로 나타낼 수 있다. 따라서 Riccati 방정식이 제어 주기에만 종속되는 것으로 간주될 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 본 논문에서 다루는 이득계획 기법이란, 제어 주기 변화에 따른 최적 제어 이득을 구한 후 이 값들을 가지고 이득계획을 행하는 것을 의미한다. 이 개념을 그림 4에 나타내었다.

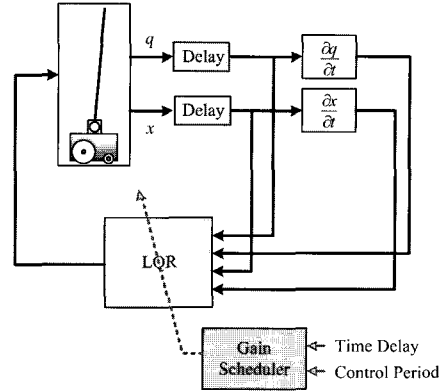


그림 4. 이득계획 기법 개념도.

Fig. 4. Gain scheduling concept.

제어 주기에 따라 계획된 최적 상태회환 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u[k] = -(R + \tilde{B}^T(h)P(h)\tilde{B}(h))^{-1} \{\tilde{B}^T(h)P(h)\tilde{A}(h)\}z[k] \tag{12}$$

이 때의  $P(h)$  는 다음과 같은 상태 종속적 Riccati 방정식의 유일한 해이다.

$$\tilde{A}^T(h)P(h)\tilde{A}(h) - P(h) - \{\tilde{A}^T(h)P(h)\tilde{B}(h)\} \cdot \{R + \tilde{B}^T(h)P(h)\tilde{B}(h)\}^{-1} \{\tilde{B}^T(h)P(h)\tilde{A}(h)\} + Q = 0 \tag{13}$$

일반적으로 이러한 이득계획 기법은 느린 파라미터 변화에 대하여 그 성능을 보장한다고 알려져 있다[9]. 본 논문에서는 비교적 빠른 파라미터 변화(제어 주기 변화)에 대해서도 이득계획 기법이 유용하다는 것을 실험을 통해 보인다.

### IV. CAN 통신을 이용한 역진자 시스템 제어 실험

#### 1. 시스템 구성

본 논문의 실험을 위해 사용된 전체 시스템의 구성도를 그림 5에 나타내었다. 실험을 위해 CAN통신을 지원하는 TI사의 TMS320LF2407 DSP(digital signal processor) [16] 를 탑재한 보드를 이용하여 계측부, 제어부, 구동부 노드를 구성하였다. TMS320LF2407은 인코더 펄스 계수기를 내장하고 있으며, 덧셈과 곱셈이 동시에 이루어지는 DSP의 특징 때문에 다량의 신호처리와 행렬 연산이 많이 필요한 응용에 적합하다. 노드들 사이의 CAN 통신을 위해 두 가닥 선을 꼬아 CAN 규격에 따라 버스를 구성하였다. 실험에 사용된 CAN통신 노드들의 실물사진을 그림 6에 나타내었다.

실험에 사용된 역진자 시스템은 Quanser사가 제작한 수레형 역진자 시스템[15]으로 피니언/랙 구조의 기계장치에 DC 모터로 구동되는 수레가 얹혀져 있다. 이 실험에서는 상태회환 제어를 고려하므로 모든 상태를 측정해야 한다. 그러므로 원칙적으로는 변위 뿐만 아니라 속도 측정을 위한 센서가 필요하다. 그러나 광학 인코더 측정값을 수치적으로 미분하여 속도에 대한 정보를 얻어낼 수 있기 때문에 이 실험에서는 상태 측정을 위한 센서로 광학 인코더만을 사용하였다. 수치미분에 의한 잡음 문제는 적절한 대역폭을 갖는 저역통과 필터를 사용하여 해결한다.

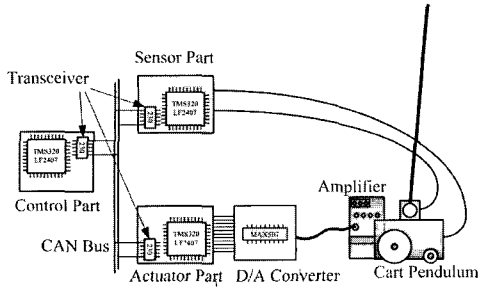


그림 5. CAN을 이용한 역진자 시스템의 구성도  
Fig. 5. Cart-type inverted pendulum system using CAN.

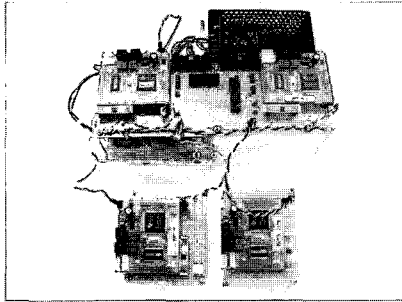


그림 6. CAN 통신 노드 (제어부, 계측부, 구동부).  
Fig. 6. CAN communication nodes (control, sensor, and actuator nodes).

2. 이득계획 LQ 제어기 설계

(7), (8)을 이용하여, 위 식으로부터 1ms부터 10ms 까지의 제어 주기에 대한 이산 확대차수 상태방정식을 구한 후 가중 행렬을  $Q = \text{diag}(0.4, 4.5, 0, 0, 0)$ ,  $R = 0.0002$  로 놓고 (12), (13)을 이용하여 각각의 제어 주기에 따른 LQ 제어기 이득을 구하면 그림 7의 실선과 같다. 이 때, 그림 7의 가로축은 제어 주기를 나타낸다. 그림 7을 보면, 주기의 증가에 따른 상태 제환 이득( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ )의 변화가 완전한 직선은 아니지만 점선으로 표현된 직선의 식과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이득계획이 온라인상에서 이루어지는 것을 감안하여 계산량을 줄이기 위해, 본 논문에서는 상태제환 이득 식을 이 점선으로 근사화하여 사용한다. 이 때의 근사화된 직선의 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 1832.8 h - 199.7795 \\
 K_2 &= 116.4848 h - 27.2457 \\
 K_3 &= 598.9091 h - 44.5477 \\
 K_4 &= 313.8895 h - 49.4697 \\
 K_5 &= 29.3690 h - 0.0164
 \end{aligned} \tag{14}$$

3. 실험 결과

본 논문에서는 CAN통신에 의한 시간지연이 있을 경우 이득계획 기법에 의한 역진자 시스템의 수레 위치 추종제어 성능을 실험을 통해 알아본다. 수레 위치 응답이 기준입력을 추종하는 것은 역진자가 안정화됨을 의미한다. 만약 시간지연이 발생하면 수레 위치 응답이 영향을 받게 되며 따라서

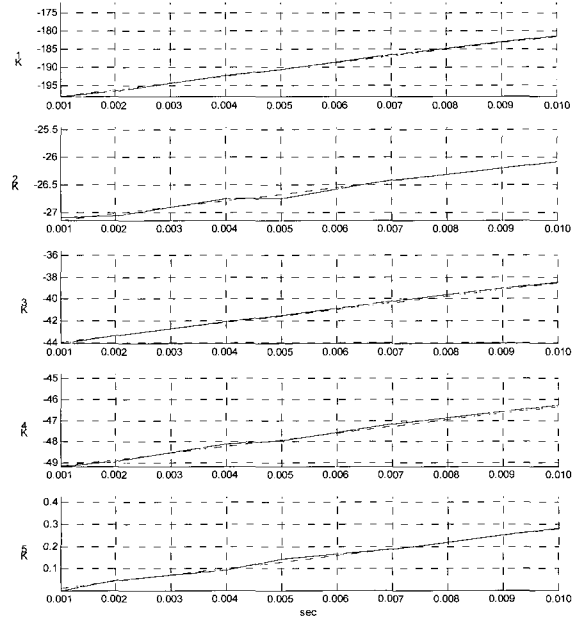


그림 7. 시간지연이 고려된 상태제환 이득값.  
Fig. 7. Feedback control gain with time-delay vs. sampling period.

시스템의 성능도 영향을 받는다. 따라서 수레 위치에 대한 제어응답을 통하여 설계된 제어기의 성능을 확인할 수 있다.

CAN통신시 발생하는 시간지연으로 인한 제어 주기 변화를 감지하기 위하여, 센서부의 데이터에 전송 시점에 대한 정보를 포함시켜 제어부로 보낸다. 그러면 제어부는 그 내용으로부터 얻은 시간과 데이터를 받은 실제 시간을 비교하여 지연된 시간을 계산하고 그에 따라 제어 주기 변화를 감지한다.

3.1 고정이득 및 이득계획 LQ 제어의 성능 비교

이 절에서는 앞 절에서 설계한 이득계획 LQ 제어기와 고정된 이득을 갖는 일반적 LQ 제어기의 성능을 비교한다. 이 실험에서는 고정된 시간지연 값을 고려하였다. 실험에 사용된 시간지연 값은 6.282ms이다.

비교 대상인 고정이득 LQ 제어기의 이득 값은 가중 행렬을  $Q = \text{diag}(0.4, 4.5, 0, 0)$ ,  $R = 0.0002$  로 놓고 (5)의 1ms 제어 주기에 대한 ZOH 등가 이산시간 상태방정식을 통해 구한다. 이 때의 이득 값은 다음과 같이 주어진다.

$$K = [-44.0488 \quad -198.1028 \quad -49.1466 \quad -27.0627]$$

고정이득 LQ 제어기 설계시 시간지연을 고려하지 않기 때문에 비록 실제 제어 주기가 변하더라도, 즉 이 예와 같이 제어 주기가 7ms으로 변하더라도, 이 제어기는 1ms 주기에 대한 이득값만을 사용하게 된다.

제한된 이득계획 LQ 제어기의 이득 값은 (14)에  $h = 7ms$  을 대입한 값이다. 단, 제한된 제어기의 이득 값은 실험시 on-line상에서 계산된다.

그림 8은 고정된 시간지연이 발생하는 경우 역진자 수레의 위치응답을 보여준다. 점선은 시간지연이 없을 때 고정이득 LQ 제어에 의한 수레의 위치응답(w/o delay)을 나타내고, 가는 실선은 6.282ms의 일정한 시간지연이 발생할 때 고정이득 LQ 제어에 의한 수레의 위치응답(LQR)을 나타낸다. 또한

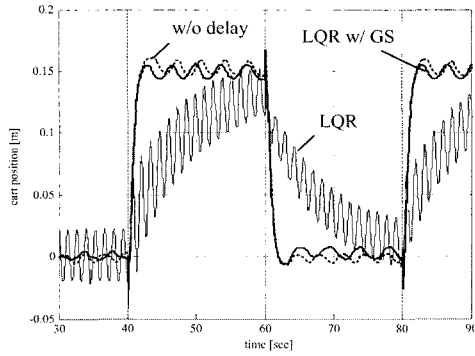


그림 8. 고정된 시간지연이 발생하는 경우 역진자 수레 위치.  
Fig. 8. Cart positions in fixed time-delay case.

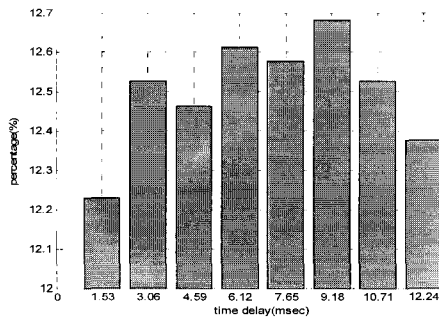


그림 9. 무작위한 시간지연의 분포.  
Fig. 9. Distribution of random time delays.

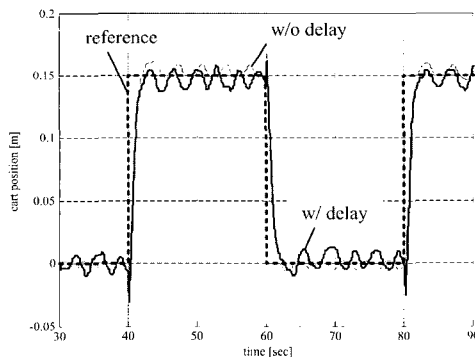


그림 10. 무작위한 시간지연이 발생하는 경우 역진자 수레 위치.  
Fig. 10. Cart positions in random time-delay cases.

굵은 실선은 6.282ms의 일정한 시간지연이 발생할 때 제안된 이득계획 LQ 제어에 의한 수레의 위치응답(LQR w/ GS)을 나타낸다. 그림 8의 결과로부터 알 수 있듯이, 진폭 0.15m, 40초의 주기를 갖는 기준입력에 대해 시간지연이 없는 경우 고정된 LQ 제어를 적용하면 수레 위치가 약 0.015m 진폭, 4초 주기를 갖는 진동성분을 포함한 상태로 주어진 입력을 추종한다. 비록 이 응답에 진동성분이 포함되나 진폭과 진동수가 상대적으로 작기 때문에 이를 허용 수준의 응답으로 볼 수 있다. 이 때 고정된 시간 지연을 인가하였을 경우 이득계획 LQ 제어를 적용하면 이와 비슷한 제어 성능을 갖는다.

반면에 고정된 시간 지연의 경우 고정이득 LQ 제어를 적

용하면 수레의 위치응답은 20초 이상의 도달시간과 약 0.05m, 1.33초 주기의 진동성분을 포함한 상태로 나타나며, 도달시간이 길기 때문에 주어진 기준입력을 제대로 따르지 못할 뿐 아니라 진동이 심하기 때문에 시스템 기구에 무리를 주게 되어 바람직하지 않다.

3.2. 시간지연이 무작위적일 때 이득계획 LQ 제어의 성능

이 절에서는 무작위한 시간지연이 있을 경우 이득 계획 LQ 제어기법의 성능을 알아본다. 그림 9는 실험을 통해 얻은 무작위한 시간지연 분포를 나타낸다. 이 분포는 최소 1.53ms, 최대 12.24ms 크기와 각각 6.9ms, 3ms인 평균과 표준편차를 갖는다. 신호가 계측부에서 제어부로 전송될 때마다 이러한 분포를 갖는 시간지연 값들을 매년 발생시켰다.

그림 10은, 그림 9와 같은 분포를 나타내는 시간지연이 계측부와 제어부 사이 통신 과정에서 발생했을 때 시간지연이 고려된 이득 계획기를 이용하는 역진자 시스템의 수레의 위치응답을 나타낸다. 점선은 기준입력(reference)이며, 가는 실선은 시간 지연이 없을 때 수레의 위치응답(w/o delay)을 나타내고 굵은 실선은 무작위한 시간지연 상황에서 이득계획 제어를 사용했을 때 수레의 위치응답(w/delay)을 나타낸다. 이 결과를 보면 이득계획 LQ 제어 기법이 시간지연에도 시스템을 안정화한다. 그러나, 고정이득 을 갖는 LQ 제어로는 이 시스템을 안정화할 수 없었다. 따라서 변하는 기준 입력에 대한 수레 위치 응답은 그림에 도시하지 않았다.

V. 결론

본 논문에서는 네트워크 기반 제어시스템의 통신과정에서 발생하는 시간지연의 영향을 분석하고 이를 보상하여 시스템을 안정화하는 제어를 설계하였다. 특히, 계측부와 제어부 사이 통신과정에서 발생하는 시간지연에 의한 제어 주기 변화와 데이터 손실 문제를 제기하였고, 이러한 문제들이 시스템에 미치는 악영향을 줄이기 위한 방법을 제안하였다. 이 방법은 제어 주기의 변경에 따라 적합한 LQ 제어 이득을 시스템에 제공하는 것으로 일종의 이득계획 기법이다. 제안된 기법의 유용성을 보이기 위해, 시간지연이 발생하는 CAN 기반 역진자 시스템의 수레 위치 추종제어에 제안된 이득계획 LQ제어 기법을 적용하는 실험을 행하였다. 실험 결과, 고정된 시간지연이 발생하는 경우뿐 아니라 무작위적 시간지연이 발생하는 경우에도 제안된 이득계획 LQ 제어 기법이 고정된 LQ 제어 기법에 비해 더 우수한 성능을 보였다.

참고문헌

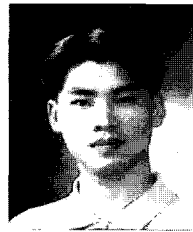
- [1] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of networked control systems," *IEEE Control System Magazine*, pp. 84-99, February 2001.
- [2] G. C. Walsh and H. Ye, "Scheduling of networked control systems," *IEEE Control System Magazine*, pp. 57-65, February 2001.
- [3] R. Luck and A. Ray, "An observer-based compensator for distributed delays," *Automatica*, vol. 26, no. 5, pp. 903-908, 1991.
- [4] J. Nilsson, B. Bernhardsson, and B. Wittenmark, "Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays," *Automatica*, vol. 34, no. 1, pp. 57-64, 1998.

- [5] W. Lawrenz, *CAN System Engineering from Theory to Practical Applications*. Berlin: Springer, 1997.
- [6] Robert Bosch GmbH, *CAN Specification Version 2.0*. 1991.
- [7] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*. New York: Addison-Wesley, 1990.
- [8] J. S. Shamma and M. Athans, "Gain scheduling: potential hazards and possible remedies," *IEEE Control System Magazine*, pp. 101-107, June 1992.
- [9] W. J. Rugh and J. S. Shamma, "Research on gain scheduling," *Automatica*, vol. 36, pp. 1401-1425, 2000.
- [10] P. Apkarian, P. Gahinet, and G. Becker, "Self-scheduled  $H_{\infty}$  control of linear parameter-varying systems: a design example," *Automatica*, vol. 31, no. 9, pp. 1251-1261, 1995.
- [11] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
- [12] A. Forrai and K. Kamiyama, "Robust gain-scheduled control for vibration suppression," *Electrical Engineering*, vol. 87, pp. 151-162, 2005.
- [13] J. R. Cloutier, C. N. D'Souza, and C. P. Mracek, "Nonlinear regulation and nonlinear  $H_{\infty}$  control via the state-dependent Riccati equation technique-Part 1 theory," *Proc. 1st Int. Conf. Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace*, Daytona Beach, FL, pp. 117-130, 1996.
- [14] J. R. Cloutier, C. N. D'Souza, and C. P. Mracek, "Nonlinear regulation and nonlinear  $H_{\infty}$  control via the state-dependent Riccati equation technique-Part 2 example," *Proc. 1st Int. Conf. Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace*, Daytona Beach, FL, pp. 130-147, 1996.
- [15] Quanser Consulting Inc., *IP02 User's Manual*. Markham, Ontario, Canada, 2003.
- [16] Texas Instruments Inc., *TMS320F/C240 DSP Controllers Peripheral Library and Specific Devices Ref. Guide (Rev. D)*. Dallas, TX, Nov. 2002.



조성민

1977년 7월 13일생. 2000년 아주대학교 전자공학부(공학사). 2005년 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 현재 삼성전자 반도체총괄 스토리지 사업부 근무. 관심분야는 네트워크 기반 제어 시스템.



최현철

1972년 6월 9일생. 1995년 아주대학교 제어계측공학과(공학사). 1997년 아주대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사). 현재 아주대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 최적제어, 강인제어, 이동로봇, 실시간 제어시스템.

### 홍석교

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 11 권 제 10 호 참조.