

패킷 손실에 강인한 원격 실시간 무선제어 플랫폼

Robust Real-Time Wireless Control Platform Compensating for Packet Loss

최 락 현, 이 상 철, 유 준 혁*
(Rock-Hyun Choi¹, Sang-Cheol Lee¹, and Joonhyuk Yoo²)

¹Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

²Daegu University

Abstract: Packet loss compensation techniques are increasingly important to stable remote control over wireless communication in WNCS (Wireless Networked Control Systems). Its time varying channels, limited bandwidth, interference, and poor signal not only leads to packet loss or latency, but also can negatively affect performance and system stability. This paper presents a compensation technique exploiting an EWMA (Exponentially Weighed Moving Average)-based value estimator to clarify the influence of packet loss on the overall WNCS behavior. As an example of actuator to be remotely controlled, a rotary-type inverted pendulum has been considered, and modeled. Performance evaluation results through Matlab/Simulink and Truetime co-simulation confirm the superiority of the proposed value estimation method over previous approaches.

Keywords: WNCS, EWMA, packet loss

I. 서론

네트워크 컨트롤 시스템(NCS)은 센서, 컨트롤러, 액추에이터 등으로 구성되며 유선 네트워크를 통해 시스템의 정보를 주고받는다[1]. 기존 NCS에서는 회선 설치, 인건비, 그리고 회선으로 인한 추가적인 공간점유를 하게 되는 단점이 있다. 특히 사용자의 실수로 회선에 문제가 생기거나 그것을 다시 복구하고자 할 때 추가적인 관리 비용이 많이 발생한다[2].

무선 네트워크 컨트롤 시스템(WNCS)은 무선통신기술과 결합하여 상기한 NCS의 문제를 해결할 수 있다. 무선 센서 네트워크(WSN) 기술이 발전하면서 가정, 산업, 국방 등의 다양한 분야에 보다 지능적인 서비스를 제공할 수 있게 되었다[3]. 이런 무선 시스템의 이용으로 모듈화된 노드를 통해 기존 네트워크 시스템에 비해 유지, 관리 비용을 큰 폭으로 감소시켜 줄 수 있다.

WNCS는 상기한 장점이 있는 반면에 해결해야 할 과제들도 가지고 있다. 무선 요소가 추가 되어 근본적으로 회선이 불안정할 수 있는 단점이 생긴다[2]. 제어 시스템은 제어 대상에 대한 안정성이 가장 중요하다. 그러나 무선 센서 노드 상호간에 신호 간섭으로 발생하는 불안정한 무선 송수신은 데이터 손실을 일으키게 되고 이는 시스템의 안정

성을 크게 저하시킨다. 그러므로 데이터 손실을 보상할 수 있는 방법이 요구된다.

관련 연구들을 보면 네트워크 제어 시스템에서 데이터 손실에 의한 영향을 완화해 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 다양한 방식으로 접근하는데 크게 3가지 접근방법이 사용되고 있다. (1)관측자를 이용해 패킷 손실과 딜레이를 하나의 외란으로 보고 보상하는 방법[4]과 (2)네트워크 시스템을 모델화 하여 안정성을 향상 시키는 방법[2,5,6,7], 그리고 예측 알고리즘을 사용하여 보상하는 방법[8,9]으로 나누어 볼 수 있다.

첫째, 방법(1)은 시간지연 문제와 데이터 손실을 하나의 외란으로 간주하여 시스템의 성능이 떨어지는 문제가 발생했을 때 관측자를 설계하여 이를 보상하였다. [4]에서는 하나의 관측자로 보상하기 위해 제어 명령어와 센싱 데이터가 같은 비율로 패킷 손실과 데이터 지연현상이 발생 할 것이라고 가정하였다.

둘째, 방법(2)는 model-based 예측 기법을 사용하여 제어 대상의 안정성을 향상 시켰다. 특히 [5]는 시스템의 이전 상태를 이용해 플랜트의 동역학을 적절히 변형한 후에 AR (Auto-Regressive) 예측 모델을 사용하여 패킷 손실을 보상하였다. [2]는 전체 네트워크를 linear dynamical system으로 보고 수치적인 설계 절차를 통해서 네트워크 토폴로지를 모델링하여 시스템을 안정화시키는 방법을 제안했다. [7]은 제어 대상이 다수인 환경에서 동일한 동작을 하는 기계들을 제어할 때 패킷 손실을 해결하였다. 먼저 기계들을 모두 시간 동기화해서 한 쪽에서 패킷 손실이 일어나 제어 명령어를 받아들이지 못 했을 때 같은 명령어를 보내고 있는 다른 제어기로부터 전달되는 동일한 제어 명령어를 이용해서 패킷 손실 문제를 해결했다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 15., 수정: 2012. 6. 14., 채택확정: 2012. 6. 30.

최락현, 이상철: DGIST 로봇시스템연구부

(choimosi@dgist.ac.kr/sclee@dgist.ac.kr)

유준혁: 대구대학교 정보통신공학부(joonhyuk@daegu.ac.kr)

※ 본 연구는 2012년도(교육과학기술부)의 재원으로 대구경북과학기술원 일반사업(12-BD-0101)과 한국연구재단 기초연구사업(2012-0005584)에 의해 수행되었음.

마지막으로, 방법(3)에서는 패킷 손실을 보상하기 위해서 과거 값의 프로파일을 사용하는 예측 알고리즘을 이용한다. 최근의 값을 이용하거나 산술 평균값, 또는 이전 2개의 값에 가중치를 주는 방법으로 시스템의 안정성을 향상시켰다. [9]에서는 PID 알고리즘을 제안하여 패킷 손실이 명령어 전달 부분에서 발생했을 때 과거의 값을 이용해 손실된 명령어의 값을 예측하였다.

실시간 제어성능을 향상시키기 위해서는 손실된 값을 예측하는데 overhead가 적은 기법을 사용하는 것이 유리하다. 왜냐하면 네트워크 시스템을 모델링하여 보상하는 방법은 시스템의 상태를 표현하는 매트릭스 연산으로 인해 실시간 성능이 떨어질 수밖에 없기 때문이다.

본 논문에서는 패킷 손실이 발생했을 때 EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)-based value estimator를 사용하여 제어 성능과 실시간 제어 시에 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안한다. 제시된 방법은 원거리에 있는 액추에이터에서 무작위로 패킷 손실이 발생하는 환경일 때 온라인으로 업데이트 할 수 있는 가벼운 알고리즘으로 보상하는 방법이다. 실시간 시스템에 유리한 EWMA-based estimator는 Matlab/Simulink와 Truetime [10]을 이용해 시스템의 안정성을 증명하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서 제어 대상인 로터리 역진자 시스템의 동역학 방정식을 유도한다. III 장에서는 유도된 동역학 방정식을 이용해 PID 제어를 설계하였다. IV 장에서는 패킷 손실을 보상하는 EWMA-based estimator를 제안하고 V 장에서는 제시된 알고리즘을 통해 나온 시뮬레이션 결과에 대해 설명하고 VI 장에서 결론을 제시한다.

II. 플랜트 모델

일반적인 로터리 타입의 역진자 시스템을 도식화 하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 로터리 역진자 시스템은 모터에 연결된 암의 원운동에 의해서 폴의 각도가 제어된다. 로터리 역진자를 위해 정의된 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

로터리 타입의 역진자 시스템은 뉴턴의 운동 법칙을 이용하여 동역학 방정식을 유도할 수 있다. 암의 각속도와

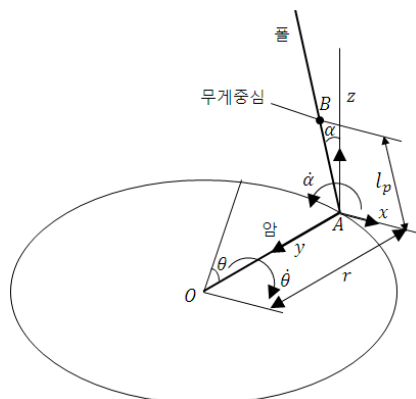


그림 1. 로터리 역진자의 시스템 모델.
Fig. 1. System model of rotary-type inverted pendulum.

표 1. 파라미터 정의.

Table 1. Definition of parameters.

α	폴의 각도	θ	암의 회전각도
N	폴과 암의 조인트에 가해지는 수평 방향의 합력	P	폴과 암의 조인트에 가해지는 수직 방향의 힘
m	폴 질량	g	중력 가속도
r	암 길이	l_p	폴 무게중심 길이
J_a	암의 관성모멘트	J_p	폴의 관성모멘트
f_a	암의 마찰계수	f_p	폴의 마찰계수
T_m	모터의 토크	K_b	역기전압 상수
K_t	토크 상수	K_g	기어비
V	모터 인가전압	R_a	전기자 저항
f_m	모터의 마찰계수		

폴의 각속도에 대한 힘과 암에 작용한 수평 힘과 폴에 작용되는 수직의 힘을 각각 유도하면 다음과 같다[11,12].

$$(J_a + mr^2)\ddot{\theta} = ml_p r \ddot{\alpha} - f_a \dot{\theta} + T_m \quad (1)$$

$$(J_p + ml_p^2)\ddot{\alpha} = ml_p r \ddot{\theta} + ml_p g \alpha - f_p \dot{\alpha} \quad (2)$$

$$T_m = K_g K_t \frac{V - K_b \dot{\theta}}{R_a} - f_m \dot{\theta} \quad (3)$$

비선형 방정식을 선형화하기 위해서 동작점 부근에서 $(\dot{\alpha})^2 \approx 0$, $\cos \alpha \approx 1$, $\sin \alpha \approx \alpha$ 라고 가정한다. 로터리 역진자 시스템의 비선형 방정식을 선형화하여 나타낸 상태 방정식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

$$x = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}]^T \quad (6)$$

식 (1)-(3)을 이용하여 상태공간방정식을 구하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{cd}{e} & \frac{-b(\gamma + f_b)}{e} & \frac{-cf_p}{e} \\ 0 & \frac{ad}{e} & \frac{-c(\gamma + f_b)}{e} & \frac{-af_p}{e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{b\zeta}{e} \\ \frac{c\zeta}{e} \end{bmatrix} V \quad (7)$$

$$a = J_a + mr^2, \quad b = J_p + ml_p^2, \quad c = ml_p r, \quad d = mgl_p,$$

$$e = ab - c^2, \quad f_b = f_a + f_m, \quad \zeta = \frac{K_g K_t}{R_a}, \quad \gamma = \frac{K_g K_t K_b}{R_a}$$

아래에 제시된 파라미터 값을 식 (7)에 대입하여 식을 다시 정리하면 매트릭스 A, B, 그리고 C를 유도할 수 있다. 논문에서 사용된 파라미터 값은 다음과 같이 설정하였다. $m = 0.17 \text{ kg}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $r = 0.4 \text{ m}$, $l_p = 0.45 \text{ m}$, $J_a = 0.045$, $J_p = 0.011$, $f_a = 0.036 \text{ Ns/m}$, $f_p = 0.002 \text{ Ns/m}$, $K_b = 0.0032 \text{ rpm/V}$, $K_t = 0.017 \text{ Nm/A}$, $K_g = 12$, $R_a = 0.32 \text{ ohm}$, $f_m = 0.001 \text{ Ns/m}$.

로터리 역진자 시스템을 선형 시불변 시스템으로 가정하여 라플라스 변환된 식을 Open-loop 전달함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_o(s) = \frac{A(s)}{U(s)} = \frac{8.32s}{s^3 + 0.82s^2 - 23.09s - 12.5} \quad (8)$$

III. PID 제어기 구현

PID (Proportional+Integral+Derivative) 제어기는 현장에서 가장 인기 있는 제어 기법 중 하나이며 PID 제어를 사용할 때 적절한 게인 값을 부여하면 제어 대상을 보다 안정적으로 동작시킬 수 있다.

본 연구에 사용되는 PID 제어기는 식 (9)와 같다. e(n)는 실제 측정값과 기대값의 차이이고 T는 시스템 주기를 나타낸다[12].

$$u(n) = K_p e(n) + K_i T \sum_{k=0}^n e(n) + K_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \quad (9)$$

무선제어네트워크 시스템은 그림 2와 같이 나타낸다. 각 블록이 의미하는 바는 A는 액추에이터, P는 플랜트, S는 센서, C는 컨트롤러를 의미한다. 액추에이터와 컨트롤러 그리고 센서와 컨트롤러는 IEEE 802.15.4를 이용해 통신한다. u_k 는 컨트롤러로부터 전달되는 제어명령 패킷이고, y_k 는 센서로부터 오는 센싱데이터 값이 컨트롤러로 전달된다.

PID 제어를 무선제어네트워크 시스템의 closed-loop에 맞춰 전달함수를 변화 시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 근궤적법을 통하여 식 (10)에 사용된 gain 값은 $K_p = 80$, $K_i = 47.05$, $K_d = 6$ 이다.

$$G_c(s) = \frac{C(s)G_o(s)}{1 + C(s)G_o(s)} = \frac{49.92s^2 + 665.6s + 391.5}{s^3 + 50.74s^2 + 642.51s + 379} \quad (10)$$

IV. EWMA-BASED ESTIMATOR 설계

일반적으로 EWMA 알고리즘은 가볍고 구현이 간단하고 재귀적으로 동작하기 때문에 사전정보가 많이 필요하지 않아 본 논문에서 활용된 패킷손실 보상이 뿐만 아니라 타

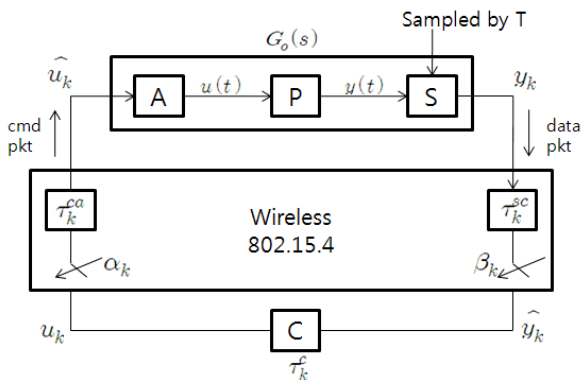


그림 2. 일반적인 WNCs 구조.
Fig. 2. General WNCs architecture.

표 2. EWMA-based estimator 파라미터 정의.

Table 2. Parameter definition of EWMA-based estimator.

Type	parameter values
EWMA-P	p=1, m=1
EWMA-A	p=1, m=3
EWMA-MA	p=0.7, m=3
EWMA-WP	p=0.7, m=1

응용분야에서도 널리 사용되는 알고리즘이다[13]. 본 논문에서 제안된 EWMA-based estimator는 수식 (11)과 같다[14]. 센서 데이터에 패킷 손실이 발생되면 컨트롤러에서는 EWMA-based estimator를 사용하여 과거의 데이터 정보를 이용해 지수적으로 부드러운 곡선을 그리며 값을 업데이트 해준다. 제안된 estimation은 패킷 손실이 일어나지 않더라도 과거의 프로파일러 값을 이용해 보상 값을 주기적으로 업데이트하게 된다. p는 가중치 요소로서 주어진 값에 따라 시스템의 안정성과 반응속도가 결정된다. 시스템의 상황에 따라 적절한 값으로 설정할 수 있는 p는 $0 \leq p \leq 1$ 의 값을 가진다. 좌측의 y_{k-i} 을 통해서 과거 패킷 로스가 발생하지 않았을 때 히스토리 값의 평균을 통한 측정값으로 손실된 값을 보상하고, 우측 \hat{y}_{k-1} 은 직전의 estimation된 추정 값을 통해 보상하게 된다. Estimation 알고리즘을 적용할 때 사용되는 계수들은 시스템 환경에 따라 적응적으로 적용할 수 있는 장점을 가진다.

$$\hat{y}_k = p \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{k-i} \right) + (1-p) \hat{y}_{k-1} \quad (11)$$

본 논문에서는 m값은 3, p값은 0.7을 default 값으로 사용했다. 사용된 알고리즘은 파라미터 값에 따라 표 2와 같이 4가지의 특성을 가진다. EWMA-P 타입은 최근에 사용된 값을 사용하고, EWMA-A 타입은 전형적인 산술평균필터다. EWMA-MA 타입은 EWMA estimator의 과거에 사용된 평균 값이 측정값에 사용된다. EWMA-WP 타입은 전형적인 원래 EWMA식 이다.

V. 실험결과

제안된 estimator의 성능평가를 위한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 윈도우 XP SP3를 사용했고 Matlab/Simulink와 컴파일러로 Microsoft Visual Studio 2005 SP2와 무선 환경 시뮬레이션을 위해 Tructime-1.5를 사용하였다. 시뮬레이션 초기 설정으로 샘플링 주기는 10 ms로 5초간 발생한 500개의 데이터를 확인했다. 싱글 홉 통신에서 시스템 내부 연산으로 인한 지연시간의 총합을 5 ms, 통신 프로토콜에서는 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 통신방법을 이용해 데이터를 주고받는다. 추가적으로 데이터 전송 출력은 0 dBm이다.

시뮬레이션에 사용된 제어기와 액추에이터 사이의 패킷 손실률은 25 %로 설정했다. 이는 무선네트워크 기반 제어 시스템을 일반 wifi 환경에서 이용한다고 가정할 때, IEEE 802.15.4의 2.4 GHz 대역 무선 환경 실험을 통해 최소 25 % 정도의 패킷 손실률이 발생한다는 관측 결과를 반영한 것이다. 패킷 손실에 사용된 랜덤 테이블은 다음 제어루프

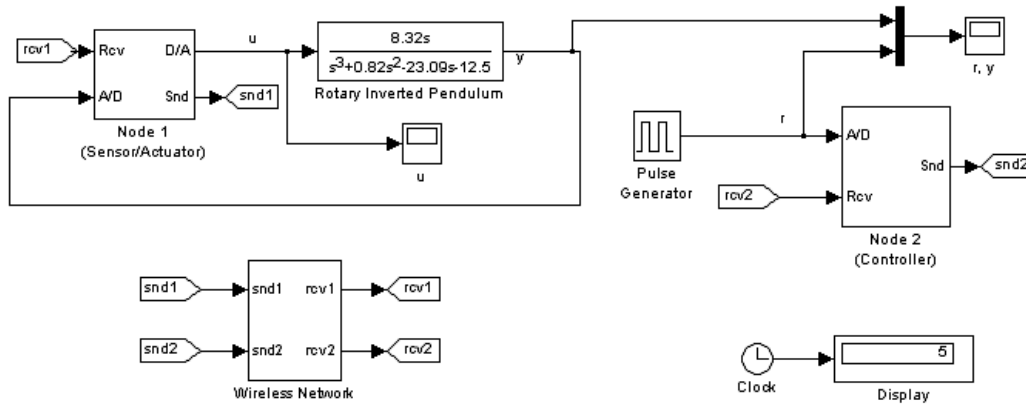
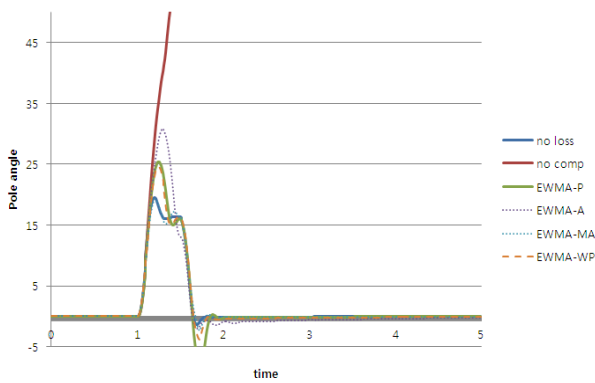
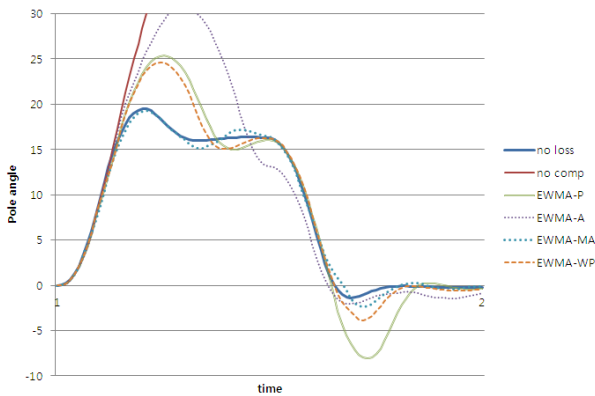


그림 3. Simulink/Truetime 시뮬레이션 화면.
Fig. 3. Simulation display of Simulink/Truetime.



(a) Performance degradation due to sensing data loss.



(b) Expanded graph of time span of 1~2 seconds.

그림 4. Sensing data loss로 인한 제어 성능.
Fig. 4. Control performance induced by sensing data loss.

에서 항상 변화하고, 패킷 손실은 랜덤하게 25 % 정도 발생하도록 구현하였다. 또한 실제 센서 노드들의 데이터는 데이터 하나가 누락되거나 다른 이상한 값이 들어오지만, CRC나 check-sum을 이용해 에러가 확인되면 실제 데이터는 없는 것과 같으므로, 손실된 데이터 y_k 값은 0으로 처리하였다. 손실 데이터에 대한 패킷 재전송은 ACK 교환으로 인한 추가적인 오버헤드 및 패킷 지연 현상을 발생시키기 때문에 재전송하지 않았다. 한편 성능 결과를 도식화한 그

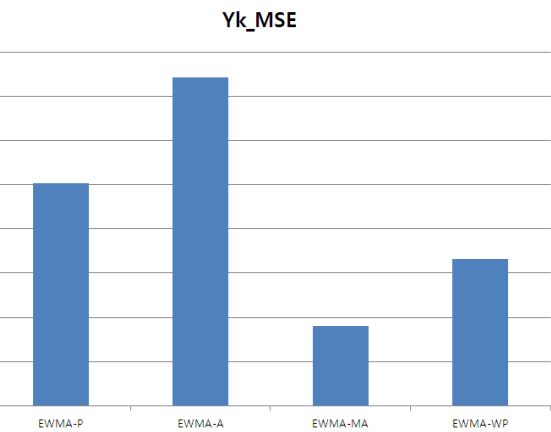
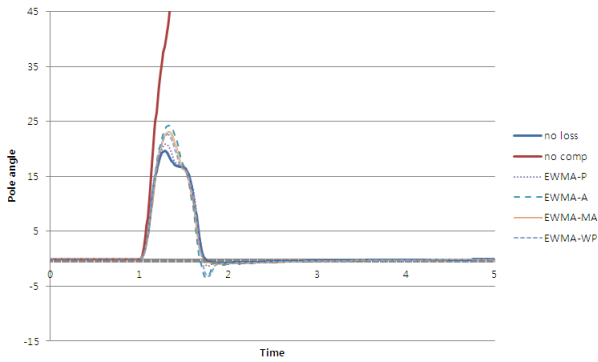


그림 5. Sensing data loss에 의한 MSE 비교.
Fig. 5. MSE comparison induced by sensing data loss.

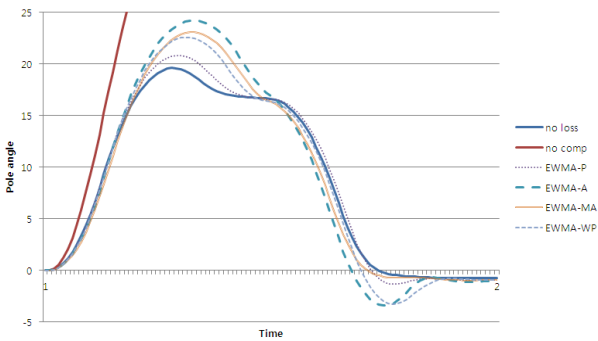
래프들은 각각의 시뮬레이션을 10번 반복한 후 동일 시간의 값을 평균하여 나타내었다.

그림 3은 Simulink와 Truetime이 사용된 무선 제어네트워크 시스템의 구성도이다. Node1에는 센서와 액추에이터가 연결된다. Node2는 제어기이며 Node1과 IEEE 802.15.4 통신을 위해 Wireless Network 블록을 이용한다.

그림 4는 y_k 부분, 즉 센싱 데이터가 손실됐을 때 EWMA-based estimator를 사용해서 보상한 결과이다. 그림 4(a)를 보면 x축은 시간, y축은 로터리 역진자의 폴 각도를 나타낸다. 데이터의 25 %가 무선통신 하는 도중 손실이 발생했을 때, no comp는 패킷 손실이 전혀 보상되지 않은 결과이다. 그림 4(a)에서 확인할 수 있듯이 패킷 손실의 보상이 이루어지지 않으면 폴 각도의 값이 발산하여 로터리 역진자의 제어에 실패하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)를 보면 보상 시 EWMA 타입 중 EWMA-MA 타입의 오버슈트가 가장 낮고 다음으로 EWMA-WP, EWMA-P, 그리고 EWMA-A 순이다. EWMA-A와 같은 일반적인 산술평균 필터는 에러가 발생하는 경향에 잘 대처하지 못함을 볼 수 있다. 이러한 결과를 그림 5의 MSE (Mean Squared Error)를 통해 확인한 결과 오버슈트 결과와 유사함을 확인할 수 있다.



(a) Performance degradation due to command data loss.



(b) Expanded graph of time span of 1~2 seconds.

그림 6. Command data loss로 인한 제어 성능.

Fig. 6. Control performance induced by command data loss.

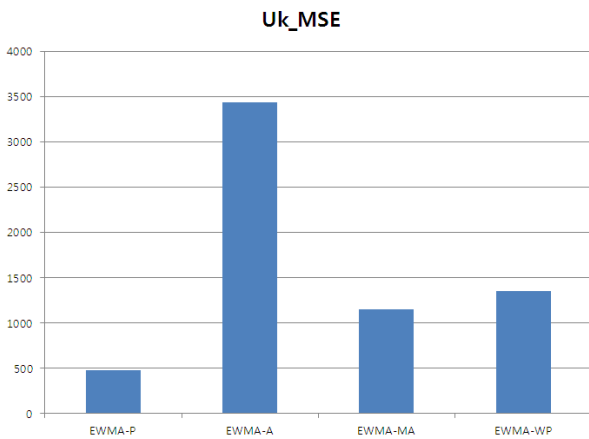


그림 7. Command data loss로 인한 MSE 비교.

Fig. 7. MSE comparison induced by command data loss.

그림 6은 컨트롤러에서 액추에이터로 전달되는 제어명령어 패키지가 손실 되었을 때 이를 보상한 결과를 나타낸다. 그림 6(a)를 보면 역시 25 %의 에러가 발생했을 때 보상이 이루어지지 않으면 시스템이 불안정해져 발산하게 된다. 그림 6(b)를 통해 오버슈트로 봤을 때 EWMA-P가 가장 성능이 우수하고 다음으로 EWMA-WP, EWMA-MA, 그리고 EWMA-A 순으로 보상이 이루어 졌다. 그림 7의 MSE를 봤을 때는 1~5초 구간 동안 EWMA-MA가 oscillation 현상이 적어 EWMA-P 다음으로 EWMA-MA, EWMA-WP, EWMA-A 순으로 estimator의 정확도에 차이가 났다.

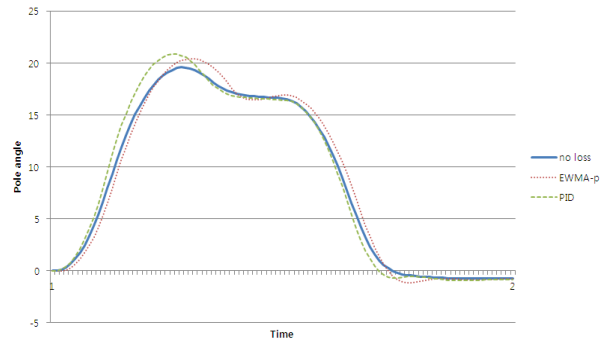


그림 8. EWMA-P와 PID 보상기의 제어 성능 비교.

Fig. 8. Control performance comparison between EWMA-P and PID compensator.

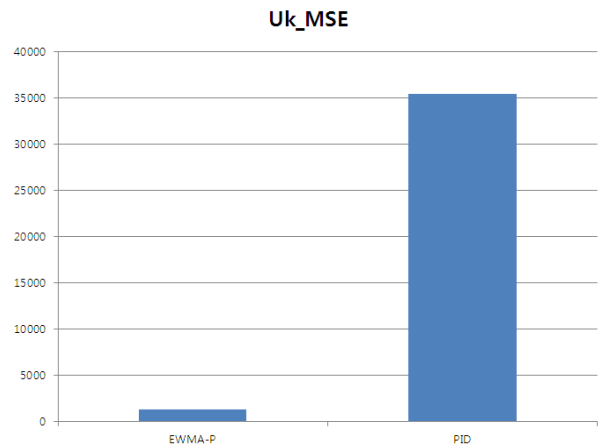


그림 9. EWMA-P와 PID 보상기의 MSE 비교.

Fig. 9. MSE comparison between EWMA-P and PID compensator.

그림 8은 명령어 패키지 손실이 일어났을 때 제시된 방법 중 EWMA-P와 기존의 PID 알고리즘을 이용한 보상기[9] 비교하는 그래프이다. 언뜻 제안된 estimator와 PID 알고리즘의 성능이 비슷해 보이지만 그러나 그림 9처럼 MSE를 통한 결과는 EWMA-P가 월등히 우수하다. 실제 제어 명령어는 변화되는 값의 편차가 크기 때문에 PID 알고리즘으로 손실을 보상할 경우에는 안정적인 제어에 실패해서 패키지 손실비율을 15 %로 해서 시뮬레이션한 결과이다.

이와 같이 로터리 역진자 시스템의 폴 각을 0도로 만들기 위해서 제어기의 명령어 값이 아주 크게 변화하는 경우에는 EWMA-P가 기존에 제안된 PID 알고리즘 보다 성능이 월등히 우수함을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

무선 네트워크 제어 시스템에서 제어 명령어 및 피드백되는 센서 값을 주고받을 때 무선통신을 이용하기 때문에 패키지 손실 문제는 더욱 심각해지고 시스템의 안정성 향상을 위해서는 패키지 손실 보상 기술이 중요하다.

본 논문에서는 기존의 모델링 기반의 보상 기법을 사용한 방법 보다 실시간 성능을 더욱 향상시킨 EWMA-based value estimator를 제안했다. 제안된 알고리즘을 파라미터 값

에 따라 시스템 상태에 따라 보다 적절히 대응할 수 있는 방법을 제시하고 이를 통해 간단한 솔루션으로도 시스템의 제어성능 및 안정성을 향상시킬 수 있음을 보여 주었다. Matlab/Simulink와 Truetime을 이용한 성능 평가를 통해 제시된 EWMA-based estimator가 기존에 제안된 기법들 보다 우수함을 입증하였다.

향후 계속된 연구를 통해 무선 네트워크 제어 시스템의 안정성에 크게 영향을 끼치는 또 다른 요소인 시간 지연문제를 해결하여 무선 환경에서 더욱 외란에 강건하고 실시간 성능이 우수한 시스템을 설계할 계획이다.

참고문헌

- [1] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, "Stability of networked control systems," *IEEE Control System Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 84-99, Feb. 2001.
- [2] M. Pajic, S. Sundaram, G. Pappas, and R. Mangharam, "The wireless control network: a new approach for control over networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no. 10, pp. 2305-2318, 2011.
- [3] J. Stankovic, "When sensor and actuator networks cover the world," *ETRI Journal*, vol. 30, no. 5, pp. 627-633, Oct. 2008.
- [4] Y. Ma, W. Chen, and G. Luo, "Compensation of networked control systems with time-delay and data packet losses," *Chinese Control and Decision Conference (CCDC'09)*. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, pp. 5609-5612, 2009.
- [5] Y. Wang and G. Yang, "Time delay and packet dropout compensation for networked control systems: a linear estimation method," *International Journal of Control*, vol. 83, no. 1, pp. 115-124, 2010.
- [6] A. Ulusoy, O. Gurbuz, and A. Onat, "Wireless model-based predictive networked control system over cooperative wireless network," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 41-51, Feb. 2011.
- [7] T. Kondo, K. Kobayashi, and M. Katayama, "A wireless cooperative motion control system with mutual use of control signals," *Industrial Technology (ICIT), 2011 IEEE International Conference*, pp. 33-38, Mar. 2011.
- [8] F. Xia, X. Kong, and Z. Xu, "Cyber-physical control over wireless sensor and actuator networks with packet loss," *Wireless Networking Based Control*, pp. 83-102, 2010.
- [9] F. Xia, Y. Tian, Y. Li, and Y. Sung, "Wireless sensor

actuator network design for mobile control application," *Sensors*, vol. 7, no. 10, pp. 2157-2173, 2007.

- [10] M. Andersson, D. Henriksson, and A. Cervin, "Truetime 1.5 - reference manual," Department of Automatic Control, Lund University, Sweden, June 2005.
- [11] M. Min, "Design of complementary filter using MEMS-type Gyroscope and accelerometer," Chung-Gang University, 2011.
- [12] Y. Zhou, R. Choi, H. Lee, S. Lee, D. Lee, and J. Yoo, "Implementing controller for rotary inverted pendulum based on wireless network," *Korea Computer Congress (in Korean)*, pp. 13-15, Nov. 2011.
- [13] N. Patel and S. Jenkins, "Adaptive optimization of run-to-run controllers: the EWMA example," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 97-107, Feb. 2000.
- [14] R. Choi, Y. Zhou, H. Lee, S. Lee, D. Lee, and J. Yoo, "A packet loss compensation technique for wireless networked control systems," *Fall Conference of the Institute of Embedded Engineering of Korea (in Korean)*, pp. 89-91, Nov. 2011.



최 락 현

2012년 대구대학교 정보통신공학과(공학석사). 현재 대구경북과학기술원 로봇시스템연구부 연구원. 관심분야는 WSN, WNCS, 임베디드시스템, 사이버-물리 시스템.



이 상 철

2002년 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사). 현재 대구경북과학기술원 로봇시스템연구부 선임연구원. 관심분야는 u-Healthcare, RTLS, Ubiquitous Sensor Networks.



유 준 혁

2007년 미국 매릴랜드대학교 컴퓨터공학과(공학박사). 현재 대구대학교 정보통신공학부 임베디드시스템공학전공 조교수. 관심분야는 무선센서네트워크 기반 제어시스템, 임베디드시스템, Cyber-Physical Systems.