

데이터 전송 지연을 고려한 인터넷 기반 이동 로봇의 원격 운용

Teleoperation of an Internet-Based Mobile Robot with Network Latency

신직수*, 주문갑**, 강근택**, 이원창**

Jiksu Shin*, Moon Gab Joo**, Geuntaek Kang** and Won Chang Lee**

*부경대학교 대학원 전자공학과

**부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

요 약

오늘날 인터넷을 기반으로 하는 원격 제어 기술이 급속히 발달하고 있다. 그러나 이러한 원격제어 네트워크 기반 제어는 데이터를 전송함에 있어서 지연이 불가피하며, 또한 이 지연이 일정하지 않은 문제점을 지니고 있다. 이러한 네트워크 지연은 시스템의 안정성이나 정확도에 영향을 미친다. 본 논문에서는 네트워크상의 데이터 전송 지연을 고려한 이동 로봇의 원격 운용을 위해 TSK (Takagi-Sugeno-Kang) 퍼지 시스템을 이용하여 전송 지연의 확률 분포 함수와 네트워크 모델을 구하고 이를 전송 지연 예측 알고리즘에 적용하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 제안된 알고리즘의 실효성을 검증하고, 기존의 예측 알고리즘과의 비교분석을 통하여 그 성능을 평가하였다.

Abstract

The Internet has been widely applied to the remote control system. The network-based control system, however, has a random time delay and an inherent weak point of the network, when the data are transmitted. The network delay may result in performance degradation or even system instability in teleoperation. In this paper a prediction model of network delay using TSK (Takagi-Sugeno-Kang) fuzzy model is presented. An adaptive scheme is developed to update the prediction model according to the current network status. The prediction model is applied to the control of an Internet-based mobile robot to show its usefulness. In the computer simulation the TSK prediction model of network delay is proven superior to the conventional algorithms.

Key words : 원격 제어, 네트워크 지연, 퍼지 시스템, 지연 예측 알고리즘

1. 서 론

오늘날 과학적 혁명이라 할 수 있는 인터넷의 발달은 인간의 정보 수집 능력과 정보의 처리 가공, 분배, 활용 능력에 있어서 공간적 시간적 제약을 극복하는 수단으로 이용되고 있다. 또한 인터넷의 발전과 더불어 인터넷을 이용한 많은 응용 기술들이 함께 발전해 왔다. 원격 진료 및 영상 회의, 인간이 활동하기 힘든 지역에서의 정보 획득 및 우주 탐사, 수중 탐사 등과 같이 미지의 공간에서 자료 수집 및 정보 획득 등 여러 분야에서 활용 되는 원격 제어기술과 원격 운용 기술은 가장 많은 효율성과 기대성을 기대하는 기술이다[1]. 특히 유비쿼터스 개념의 출현은 인터넷을 통한 제어 기술의 발달을 더욱 요구하고 있다. 1994년 웨스턴 오스트리아 대학에서 시작한 초기의 원격 제어시스템인 머큐리 프로젝트는 제한된 환경에서 단순한 동작만을 수행하였지만, 현재의 원격 제어 시스템은 의료진단, NASA의 인터넷을 이용한 우주

탐사 차량제어, 자바 인터페이스를 이용한 인터넷상에서의 페인팅 로봇 제어 등 보다 정밀하고, 높은 효율성을 요구하는 분야로 범위를 넓혀가고 있으며, 그 실용성과 필요성이 증명되고 있다. 그러나 원격 제어의 통신 수단으로 사용되는 필드버스(fieldbus), 인터넷 그리고 무선통신 등은 회선의 질, 거리 그리고 시간에 따른 트래픽 양에 따라 끊임없이 상태가 변한다. 이러한 특성으로 인해 발생된 데이터 전송 지연은 제어 시스템의 불안정 요소로 작용한다. 이를 해결하기 위해서는 인터넷 전송 지연의 특성과 정확한 전송 지연 예측 그리고 그것을 제어 시스템 설계에 어떻게 적용할지를 알아야 한다[2-3].

본 논문에서는 전송지연의 몇 가지 특성을 조사하고 향상된 전송 지연 예측을 위해 TSK 퍼지 예측 시스템을 제안하여 기존에 제시된 전송 지연 예측 알고리즘과 비교해 검증해 보려한다.

2. 전송지연의 예측

인터넷에서 데이터 전송 지연은 노드 처리 지연, 큐 지연, 전송 지연, 전달 지연으로 나눌 수 있다. 노드 처리 지연은 패킷의 전송 방향을 결정할 때 발생하고, 큐 지연은 큐에 패

접수일자 : 2005년 3월 24일

완료일자 : 2005년 7월 14일

감사의 글 : 이 논문은 2003년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었습니다.

킷이 들어가는 동안 다른 패킷들이 대기하고 있을 때 발생한다. 그리고 전송 지연은 식 (1)과 같이 인터넷의 속도(R)와 패킷의 길이(L)에 의하여 결정되고 전달 지연은 전송 선로의 물리적 성질에 의해 결정된다.

$$d_{trans} = \frac{L}{R} \quad (1)$$

이러한 인터넷 전송 특성들은 제어 시스템의 안정성이나 정확도에 영향을 미친다. 그림 1은 RTT(Round trip time)를 이용하여 원격거리에서의 전송 지연을 측정하여 도표 하였다.

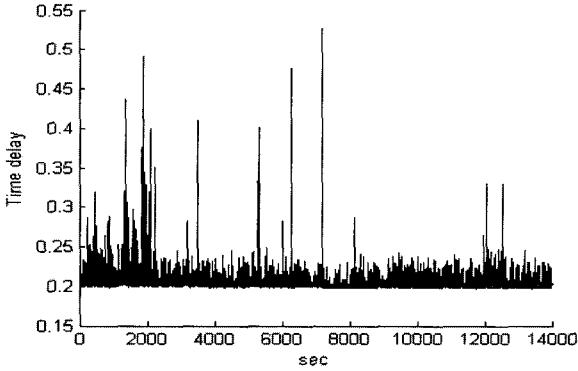


그림 1. 시간에 따른 전송 지연 변화
Fig. 1. Change of network delay in the time domain

2.1 회귀 평균을 이용한 전송지연 예측

회귀 원리는 노이즈가 섞인 신호에서 그에 포함된 알 수 없는 상수 값을 예측하기에 적절한 원리이다. 여러 가지 평균 알고리즘이 있지만 회귀 평균이 컴퓨터로 구현할 때 계산 양과 메모리양이 적어서 실시간적으로 처리하기 적합하다. 식 (2)는 회귀 평균으로 $z(n)$ 은 n 번째 표본 값이고 $m(n)$ 은 n 번째까지의 평균이다.

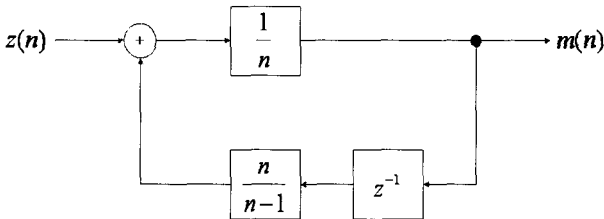


그림 2. 회귀 평균 예측 시스템
Fig. 2. Recursive average prediction system

$$m(n) = \frac{n-1}{n} m(n-1) + \frac{1}{n} z(n) \quad (2)$$

그림 3은 회귀 평균을 이용하여 전송 지연을 예측하였다. 장시간적으로 볼 때 시스템 예측 오차의 합은 크지 않지만 그림에서 보듯이 이 시스템은 전송 지연의 형태를 따라가는 것이 아니라 단지 일정한 값이 나오는 것에 불과하다.

2.2 칸(Karn) 알고리즘을 이용한 전송 지연 예측

TCP프로토콜에서 클라이언트에서 연결요청이 오면 호스트는 세그먼트를 보내고 타이머를 동작시킨다. 타이머가 종료되기 전에 원하는 데이터가 들어오지 않는다면 호스트는

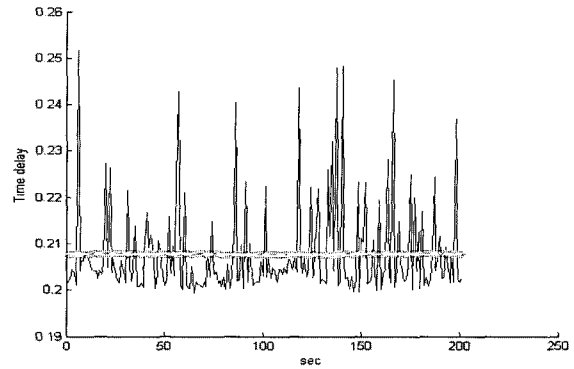


그림 3. 회귀 평균의 적용
(-- : 전송 지연, ** : 회귀 평균)
Fig. 3. Prediction results of recursive average
(-- : Network delay, ** : Recursive average)

데이터 손실로 판단하여 세그먼트를 재전송하고 데이터를 기다리게 된다. TCP에서는 타이머 종료 시간의 최적화를 위해 칸(Karn) 알고리즘을 이용하여 다음 데이터의 전송 지연을 예측한다. 아래 그림은 x 축 $Rtt(n)$, y 축 $Rtt(n+1)$ 로 했을 때 전송 지연의 위상을 도표로 나타내었다.

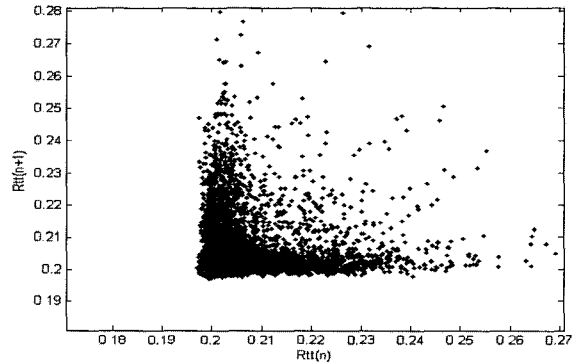


그림 4. 전송 지연의 위상
Fig. 4. The phase of network delay

$$Rtt_{n+1} = Rtt' + \gamma \times \sigma_{n+1} \quad (3)$$

여기서

$$Rtt' = \alpha \times Rtt_{n-1} + (1 - \alpha) \times Rtt_n$$

$$\alpha_{n+1} = (1 - \beta) \times \alpha_n + \beta \times (D - \alpha_{n-1})$$

$$D = Rtt_n - Rtt_{n-1}$$

식(3)에서 $\alpha, \beta, \gamma \in (0, 1)$ 이고 σ 는 평균 차(average difference)이다. 이 경우에 α, β, γ 는 가중 요소(weighted factor)이고 이 값들은 예측에 중요한 영향을 준다. α 가 커지면 예측할 때 새로운 패턴 Rtt_n 의 중요성이 낮아지는데 이러한 α 의 변화가 Rtt 의 가중 평균에 주요한 영향을 준다. 평균 차(average difference) σ 의 변화는 β 에 의해서 결정된다. 그리고 γ 는 Rtt_{n+1} 에 영향을 주는 σ_{n+1} 의 크기를 변화시킨다. 그림 5은 $\alpha=0.012, \beta=0.009, \lambda=0.23$ 으로 하고 식 (3)을 이용하여 시뮬레이션 하였다[4-5].

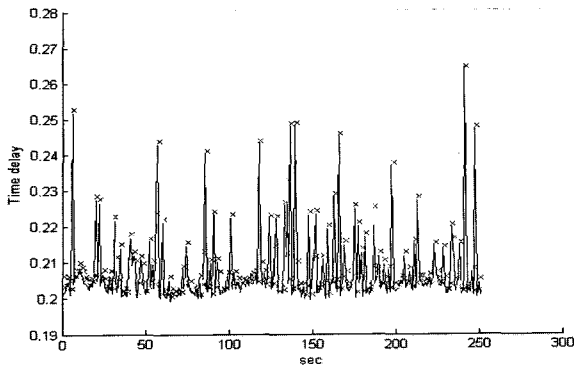


그림 5. 칸 알고리즘의 예측 결과
 (-- : 전송 지연, xx : 칸 알고리즘)
 Fig. 5. Prediction results of Karn algorithm
 (-- : Network delay, xx : Karn algorithm)

2.4 적응 퍼지 시스템을 이용한 전송 지연 예측

네트워크의 상태는 시간적으로 그림 1과 같이 일정하지 않은 형태로 끊임 없이 변한다. 수집된 출력 값으로 네트워크 상태를 모델링 하더라도 매번 달라지는 네트워크 상태를 만족하기는 힘들다. 그래서 본 논문에서는 예측 값과 실제 값의 오차가 일정 값을 넘어가면 퍼지모델 파라미터를 갱신하여 시스템의 적응력을 향상 시켰다. 적응 퍼지 예측 시스템의 구성은 그림 6과 같다.

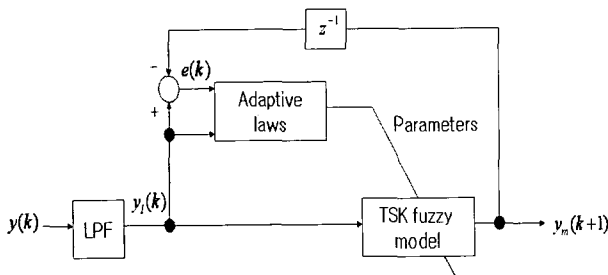


그림 6. 적응 퍼지 예측 시스템의 구성도
 Fig. 6. The adaptive fuzzy prediction system

2.4.1 TSK 퍼지 모델

일반적인 TSK 퍼지 입출력 모델의 i 번째 규칙은 다음과 같으며,

$$M^i: \text{If } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_l \text{ is } F_l^i \quad (4)$$

$$\text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + a_2^i x_2 \dots + a_n^i x_n$$

출력 y는 다음과 같이 추론 할 수 있다[6-7].

$$y = \sum_{i=1}^r w^i(z) y^i / \sum_{i=1}^r w^i(z) \quad (5)$$

$$w^i(z) = \prod_{j=1}^l F_j^i(z_j) \quad (6)$$

여기서 r은 규칙의 수이고, $F_j^i(z_j)$ 는 퍼지 집합 F_j^i 에서 z_j 의 멤버십 값이다. 본 논문에서 사용될 TSK 퍼지 모델은 식 (7)과 같으며, 그 출력은 네트워크 전송지연 값이다. 그림 7은 본 퍼지 모델에 사용되는 전제부 퍼지집합의 구조이다.

다양한 형태의 전제부 퍼지집합을 이용하여 퍼지 모델을 구현해본 결과 그림 7의 퍼지집합은 비록 간결하지만 이를 이용하여 정확한 퍼지 모델을 생성할 수 있었다.

$$M^1: \text{If } y(k-1) \text{ is } F1, \text{ then} \\ y(k+1)^1 = a_1 + b_1 y(k) + c_1 y(k-1) + d_1 y(k-2) + e_1 y(k-3)$$

$$M^2: \text{If } y(k-1) \text{ is } F2, \text{ then} \\ y(k+1)^2 = a_2 + b_2 y(k) + c_2 y(k-1) + d_2 y(k-2) + e_2 y(k-3) \quad (7)$$

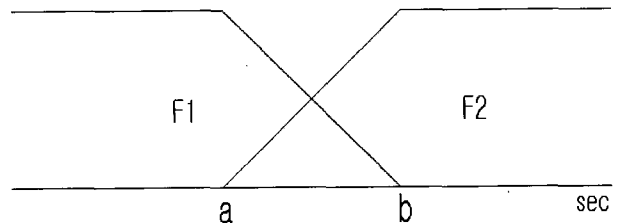


그림 7. 전제부 퍼지집합
 Fig. 7. The fuzzy set in the fuzzy model

2.4.2 LPF(Low Pass Filter)

본 논문에서 사용하고자 하는 TSK 퍼지시스템의 입력은 네트워크 상에서 발생하는 전송지연이다. 네트워크 전송지연은 랜덤하게 발생하기 때문에 TSK 퍼지 모델을 얻기 위해 직접 적용할 경우 고주파 성분으로 인하여 원하는 정확한 모델을 얻기가 쉽지 않았으므로, 차단 주파수 0.5Hz인 LPF를 사용하여 고주파 성분을 제거하여 TSK 퍼지 모델을 구하였다.

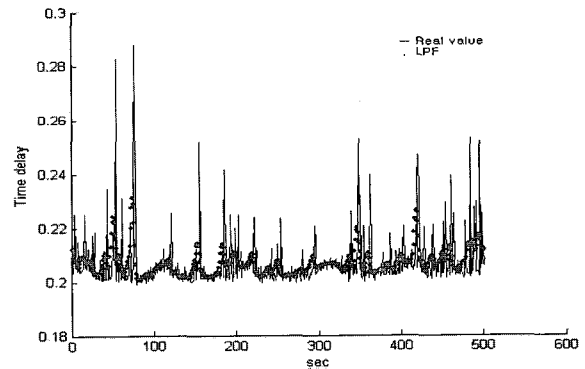


그림 8. 전송지연 특성
 (-- : LPF 전, ... : LPF 후)
 Fig. 8. The characteristics of network delay
 (-- : Before LPF, ... : After LPF)

2.4.3 적응 규칙

퍼지 시스템을 이용하여 비선형 시스템을 표현하고 제어 시스템을 구축할지라도 파라미터 적응이 없다면 환경 변화에 대응하기 어렵다. 그러므로 네트워크 상태의 동적 변화에 대처하기 위해서는 TSK 퍼지 모델의 파라미터를 유동적으로 변화시켜야 된다[8-9]. 본 논문에서는 실제 값 $y(k)$ 과 예측 값 $y_m(k)$ 의 오차 Er 이 일정 값 이상이 되면 현재로부터 이전 200개의 데이터 이용하여 실시간적으로 TSK 퍼지 모델을 변화시킨다. 식 (8)은 퍼지 모델을 갱신하기 위한 규칙이

고 a 는 경계값으로 상수이다.

$$\text{If } Er > a, \text{ then update current fuzzy model} \quad (8)$$

여기서

$$Er = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k) - y_m(k))^2$$

그림 9는 앞의 TSK 퍼지 모델, LPF와 적응 법칙을 적용한 전체 시스템의 순서도이다.

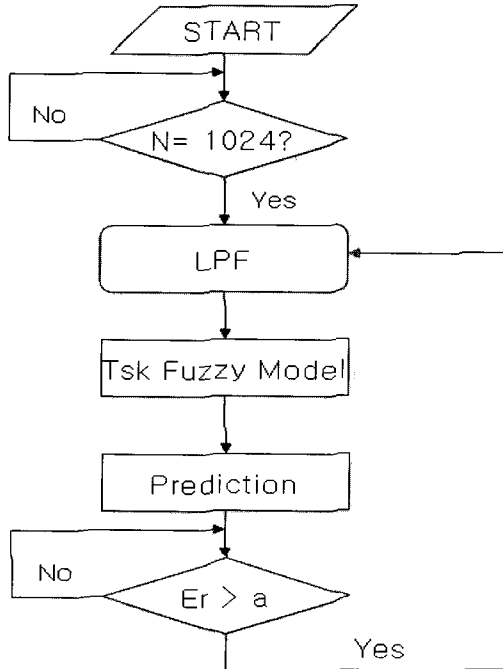


그림 9. 적응 퍼지 전송 지연 예측 시스템의 순서도
Fig. 9. Flow chart of the adaptive fuzzy prediction system

2.5 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 14000개의 입출력 데이터를 구하고 $y(k)$ 와 $y_m(k)$ 을 비교 분석하였다. 입출력 데이터는 미국 캘리포니아주에 위치한 알바인시와 부산시와의 원거리 왕복 전송지연을 측정하여 수집하였다. 네트워크 지연에 관한 퍼지모델의 전제부와 결론부 파라메타는 네트워크 상태에 따른 적응 법칙에 의해 결정되며, 지연 모델 경신을 위한 경계값은 $a = 1.2 \times 10^{-5}$ 로 설정하였다. 측정을 통해 구한 원거리 전송지연 입출력 데이터로부터 그림 10의 전제부 퍼지 집합을 갖는 식 (9)의 초기 퍼지 모델을 인식할 수 있었다.

$$M^1 : \text{If } y(k-1) \text{ is } F1, \text{ then} \\ y(k+1) = 0.298 + 0.192y(k) - 0.287y(k-1) \\ - 0.367y(k-2) + 0.051y(k-3)$$

$$M^2 : \text{If } y(k-1) \text{ is } F2, \text{ then} \\ y(k+1) = 0.420 + 0.037y(k) + 0.024y(k-1) \\ + 0.031y(k-2) + 0.050y(k-3) \quad (9)$$

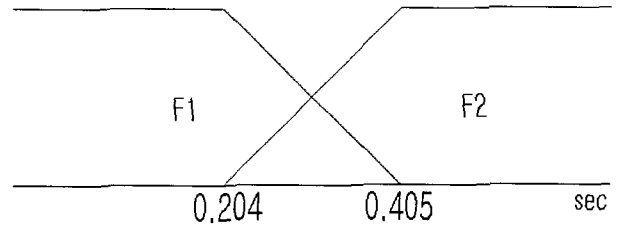


그림 10. 퍼지 집합

Fig. 10. The initial fuzzy set in the fuzzy model

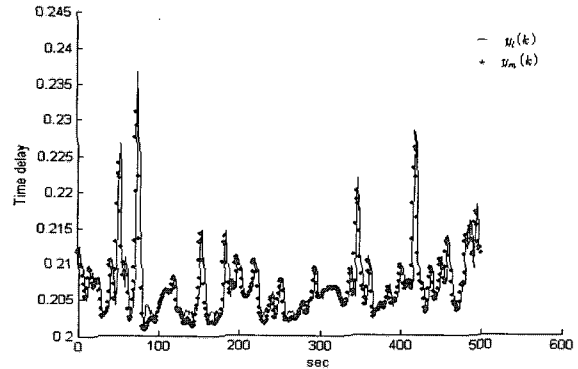


그림 11. 예측 시스템의 모의실험

Fig. 11. The simulation of prediction system

그림 11에서 퍼지 모델에 적응 알고리즘을 적용할 경우 시스템이 변하여도 퍼지 모델이 잘 적응되어 시스템 출력이 원래의 전송지연 패턴을 잘 따라감을 알 수 있다. 표 1은 식 (8)의 Er 을 이용하여 6시간 동안 회귀 평균, Karn 그리고 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 실제 측정값과 비교하여 오차를 구하였다. 비교 결과 기존에 네트워크 프로토콜에서 사용되는 예측 시스템에 비하여 본 논문에서 제안한 적응 퍼지 예측 시스템의 결과가 약 27% 성능이 향상 되었다.

표 1. 각 시스템의 성능 평가

Table 1. The performance of each system

Prediction system	Er (sec)
Recursive average	1.0722×10^{-4}
Karn	1.8480×10^{-4}
Adaptive TSK fuzzy	7.5171×10^{-5}

그림 12-14는 실제 원거리에서 UDP 프로토콜과 적응 퍼지 예측 시스템을 이용하여 주행 알고리즘을 실험한 결과를 나타내었다. 실험 결과로부터 기존의 네트워크 프로토콜에 사용되는 알고리즘을 사용한 경우 전송지연이 현격한 2구간에서는 제어에 제대로 될 수 없음을 보여주는 반면 TSK 퍼지 전송 지연 예측 시스템을 적용한 이동 로봇의 주행은 네트워크 전송지연의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.

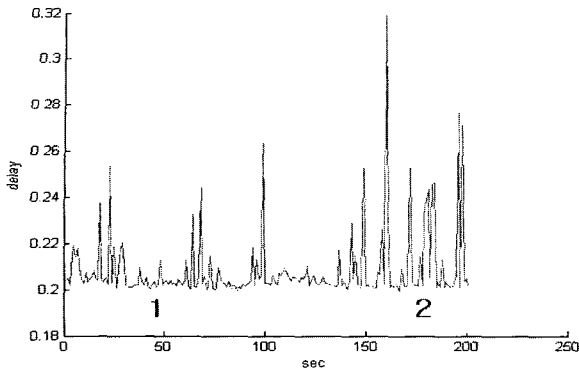
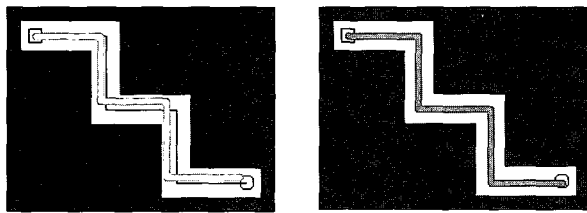
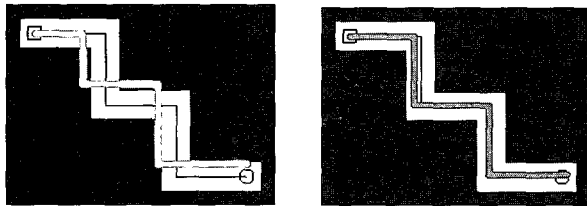


그림 12. 실험 중 전송지연의 변화
Fig. 12. Change of network delay in the time domain



(a) (b)
그림 13. 구간 1에서의 실험
(a) TCP 예측 시스템을 적용한 결과
(b) 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 결과
Fig. 13. Simulation in the interval 1
(a) Result of TCP prediction system
(b) Result of TSK fuzzy prediction system



(a) (b)
그림 14. 구간 2에서의 실험
(a) TCP 예측 시스템을 적용한 결과
(b) 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 결과
Fig. 14. Simulation in the interval 2
(a) Result of TCP prediction system
(b) Result of TSK fuzzy prediction system

3. 결 론

본 논문에서는 인터넷을 이용한 원격 운용 시스템의 실시간 제어를 위한 네트워크 전송 지연 예측 시스템을 검증하였다. 네트워크의 특성상 완벽한 전송지연 예측은 쉽지 않으나, 본 논문에서 제시한 모델을 이용하면 기존의 방법에 비해 오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 기초적인 장애물 회피 알고리즘에 적용을 하였다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 인터넷을 이용한 로봇 제어는 시간과 장소를 뛰어넘어 인터넷이 연결된 곳이면 어디서든 안정적으로 운용할 수

있었다.

다가 올 유비쿼터스 세계에서는 본 논문에서 제시된 시스템과 같이 언제 어디서든 원하는 곳에서 로봇 운용이 가능할 것이며, 이동로봇의 장애물 회피 등 실시간 네트워크 전송지연의 예측이 요구되는 시스템에 본 예측 모델의 적용이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] T. Mirfakhrai and S. Payandeh "A Delay Prediction Approach for Teleoperation over Internet," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2173-2183, 2002
- [2] I. Elhajj, N. Xi, W.K. Fung, Y. H. Liu, Y. Hasegawa, and T. Fukuda "Modeling and Control of Internet Based Cooperative Teleoperation," Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation, vol. 1, pp. 662-667, 2001.
- [3] R. Oboe and P. Fiorini, "A design and control environment for Internet-based teleoperation" The international Journal of Robotics Research, vol. 17, No. 4, pp. 433-499, 1998.
- [4] Q. P. Wang, D. L. Tan, Ning Xi, and Y. C. Wang, "The Control Oriented QoS: Analysis and Prediction," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1897-1902, 2001.
- [5] J. F. Kurose and K. W. Ross, Computer Networking, Addison Wesley, 2001.
- [6] T. Takagi, and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and Its Applications to Modeling and Control." IEEE Trans. on SMC, vol. 15, pp. 116-132, 1985
- [7] M. Sugeno and G. Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", Fuzzy Sets and System, vol. 28, pp. 15-33, 1988.
- [8] L. X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 1, no. 2, pp. 146-155, 1993.
- [9] 김종화, 이원창, 강근택, "퍼지 모델을 이용한 비선형 시스템의 적응 PID 제어기," 한국퍼지 및 지능시스템학회 논문지, 제13권, 제1호, pp. 85-90, 2003.

저 자 소개

신직수(Jiksu Shin)

2002년 : 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부((공학사)

2005년 : 부경대학교 대학원 전자공학과(공학석사)



관심분야 : 로봇시스템, 지능제어



주문갑 (Moon Gab Joo)

1992년 : 포항공과대학교 (공학사)
1994년 : 포항공과대학교 정보통신공학과
(공학석사)
2001년 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부
(공학박사)
2003년~현재 : 부경대학교 전자컴퓨터정
보통신공학부 전임강사

관심분야 : 지능제어, 산업자동화, 홈오토메이션



이원창(Won Chang Lee)

1983년 : 서울대학교 제어계측공학과
(공학사)
1985년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학
과(공학석사)
1992년 : 포항공과대학교 전자전기공학과
(공학박사)
1993년~현재 : 부경대학교 전자컴퓨터정
보통신공학부 교수

관심분야 : 지능제어, 임베디드 시스템, 로봇제어



강근택(Geuntaek Kang)

1976년 : 서울대학교 응용물리학과(공학사)
1984년 : 일본 동경공업대학 시스템과학(공
학석사)
1987년 : 일본 동경공업대학 시스템과학(공
학박사)
1987년~현재 : 부경대학교 전자컴퓨터정
보통신공학부 교수

관심분야 : 퍼지시스템