

데이터 전송 지연을 고려한 인터넷 기반 이동 로봇의 원격 운용

Teleoperation of an Internet-Based Mobile Robot with Network Latency

신직수*, 류은태*, 강근택*, 주문갑**, 이원창*

*부경대학교 전자공학과

**부경대학교 정보통신공학과

Jiksu Shin*, Euntae Rye*, Geuntaek Kang*, Moon G. Joo** and Wonchang Lee*

*Department of Electronic Engineering, Pukyong National University

**Department of Telecommunication Engineering, Pukyong National University

E-mail : strwater@mail1.pknu.ac.kr

요 약

오늘날 필드버스(fieldbus), 인터넷 그리고 무선통신 등을 이용한 원격 제어 기술이 급격히 발달하고 있다. 그러나 이러한 원격 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.

1. 서론

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 운용기술은 가장 많은 효율성과 기대성을 기대하는 기술이다[1]. 특히 유비쿼터스의 출현은 인터넷을 통한 제어 기술의 발달을 더욱 요구하고 있다. 그러나 네트워크 상태는 회선의 질, 거리 그리고 시간에 따른 트래픽 양에 따라 끊임없이 변한다

[2]. 이러한 특성으로 인해 발생한 데이터 전송 지연은 제어 시스템의 불안정 요소로 작용한다.

본 논문에서는 기존에 제시된 전송 지연 예측보다 향상된 예측 방법을 제시하고 이를 검증해보려한다.

2. 전송 지연의 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 패킷이 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 원거리에서의 전송 지연을 측정하여 도표 하였다. 그림 2 와 3은 전송 지연의 주파수 특성과 확률 밀도 함수이다.

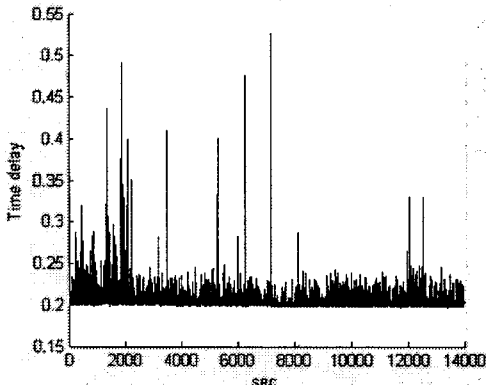


그림1 시간에 따른 전송 지연

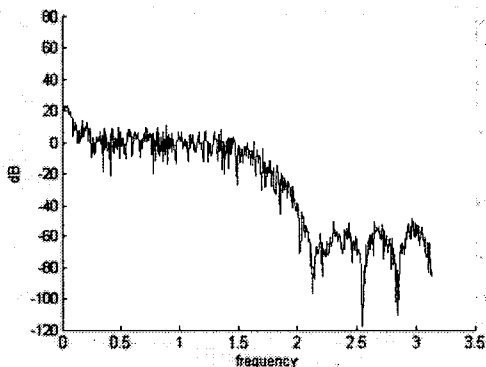


그림2 전송지연의 주파수 특성

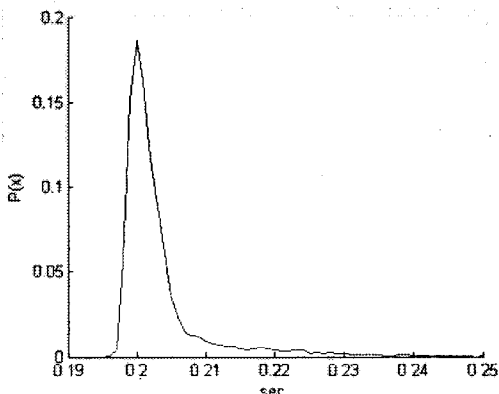
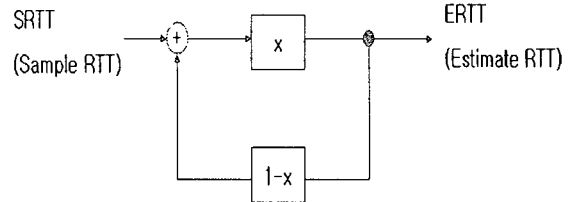


그림3 전송 지연의 확률 밀도 함수

2.1 EWMA(Exponential weight moving average)를 이용한 전송 지연 예측

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

들어오지 않는다면 호스트는 데이터 손실로 판단하여 세그먼트를 재전송하고 데이터를 기다리게 된다. TCP에서는 타이머 종료 시간의 최적화를 위해 EWMA 알고리즘[3]을 이용하여 다음 데이터의 전송 지연을 예측한다.



$$ERTT = (1-x) \cdot ERTT + x \cdot SRTT \quad (2)$$

식(2)에서 $x \in (0,1)$ 이고 SRTT는 실제 측정되는 전송지연이고 ERTT는 다음 SRTT의 예측 값이다. 네트워크의 상태는 최근의 표본 값에 가장 많은 영향을 주게 되므로 가중 평균은 과거의 표본 값보다 현재의 표본 값에 더 많은 가중치를 부여하여 갱신 속도를 빠르게 한다. 그림 4는 일반적인 EWMA(2)와 회귀 평균(Recursive Average) 알고리즘(3)을 비교하였다. 식 (3)에서 M_n 은 누적된 SRTT의 평균값이다.

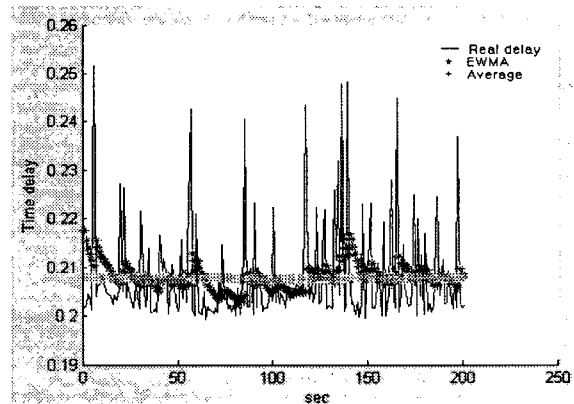


그림4 EWMA를 이용한 예측

$$M_n = \frac{n-1}{n} \cdot M_{n-1} + \frac{1}{n} \cdot SRTT \quad (3)$$

2.2. 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 5와 같다.

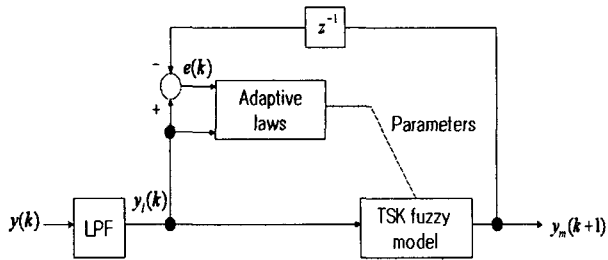


그림 5 적응 퍼지 예측 시스템의 구성도

2.2.1 TSK 퍼지 모델

일반적인 TSK 퍼지 입출력 모델의 i번째 규칙 [4]은 다음과 같다.

$$M^i: \text{If } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_l \text{ is } F_l^i \\ \text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + a_2^i x_2 \dots + a_n^i x_n \quad (4)$$

출력 y는 다음과 같이 추론 할 수 있다.

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

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

여기서 r은 규칙의 수이고, $F_j^i(z_j)$ 는 퍼지 집합 F_j^i 에서 z_j 의 멤버십 값이다. TSK 퍼지는 입출력 값에 의해 결정되고[5-6], 본 논문에서 사용될 TSK 퍼지 모델은 식 (7)과 같으며, 그림 6은 전제부 퍼지집합이다.

$$M^1: \text{If } y(k-1) \text{ is } F1 \\ \text{then } y(k+1)^1 = a_1 + b_1 y(k) + c_1 y(k-1) \\ + d_1 y(k-2) + e_1 y(k-3) \\ M^2: \text{If } y(k-1) \text{ is } F2 \\ \text{then } y(k+1)^2 = a_2 + b_2 y(k) + c_2 y(k-1) \\ + d_2 y(k-2) + e_2 y(k-3) \quad (7)$$

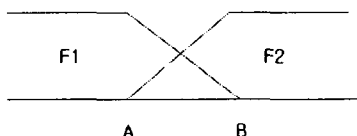


그림 6 전제부 퍼지집합

2.2.2 LPF(Low Pass Filter)

본 논문에서 사용하고자 하는 TSK 퍼지시스템의 입력은 네트워크상에서 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.

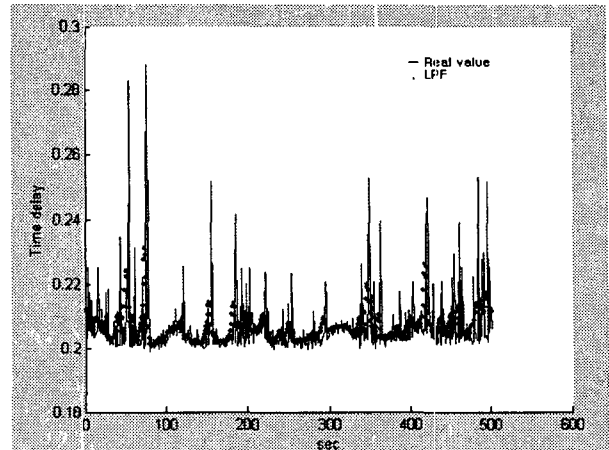


그림 7 전송지연 특성
(a) ---- : LPF 전 (b) : LPF 후

2.2.3 Adaptive Laws

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[7]. 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 규칙이고 a는 경계값으로 상수이다.

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

여기서

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

2.3 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 14000개의 입출력 데이터를 구하고 $y(k)$ 와 $y_m(k)$ 을 비교 분석하였다. 그림 6에서와 같이 퍼지 규칙을 두 개로 하고 전제부와 결론부 파라미터는 네트워크 상태에 따른 적응 법칙 ($a = 1.2 \times 10^{-5}$)에 의해 결정 된다. 초기 퍼지 모델을 인식하면 식 (9)와 같고 그림 8은 초기 퍼지 집합이다.

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

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

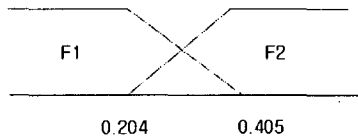


그림 8 초기 퍼지 집합

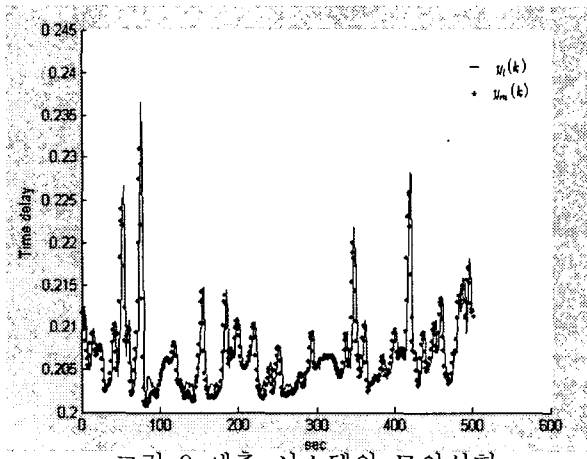


그림 9 예측 시스템의 모의실험

그림 9에서 퍼지 모델을 적용 시킬 경우 시스템이 변하여도 퍼지 모델이 잘 적응 되어 시스템 출력이 규범 모델을 잘 따라간다.

표1은 식 3을 이용하여 6시간 동안 회귀 평균, EWMA 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

	Error
Recursive Average	1.0722×10^{-4}
EWMA	1.0275×10^{-4}
Adaptive TSK Fuzzy	7.5171×10^{-5}

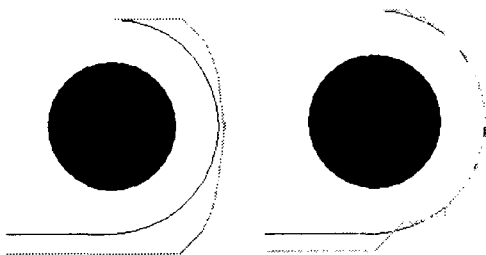


그림 10 적응 퍼지 예측 시스템의 시뮬레이션

- (a) 예측 시스템을 적용하지 않은 시뮬레이션
- (b) 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

그림 10은 실제 원거리에서 UDP 프로토콜과 적응 퍼지 예측 시스템을 이용하여 주행 알고리즘을 실험 하였다. 그림 10.(a)는 원하는 궤적을 따라가지 않지만 적응 퍼지 예측 시스템을 사용한 10.(b) 시뮬레이션에서는 원하는 궤적을 얻을 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 인터넷을 이용한 원격 운용 시스템의 실시간 제어를 위한 전송 지연 예측 시스템을 검증 하였다. 네트워크의 특성상 완벽한 전송 지연 예측은 쉽지 않으나, 본 논문에서 제시한 모델을 이용하면 기존의 방법에 비해 오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 기초적인 장애물 회피 알고리즘에 적용을 하였다. 향후 과제로는 이동로봇의 장애물 회피 등 실시간 네트워크 전송지연의 예측이 요구되는 시스템에 본 예측 모델을 적용하는 것이다.

4. 참고 문헌

- [1] Tissaphern Mirfakhrai and Shahram Payandeh "A Delay Prediction Approach for Teleoperation over Internet" IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2173-2183, 2002
- [2] Q.P. Wang, D.L. Tan, "The Control Oriented QoS: Analysis and Prediction", Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1897-1902, 2001
- [3] James F. Kurose, Keith W. Ross, "Computer Networking" Addison Wesley, pp.224-226, 2001
- [4] T.Takagi, and M.Sugeno, "Fuzzy Identification of systems and Its Applications to Modeling and Control" IEEE Trans. on SMC, 15 (1): 116-132, 1985
- [5] M.Sugeno, and G.Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", Fuzzy Sets and System, vol. 1, pp.53:19-303, 1993
- [6] Geuntaek Kang, Wonchang Lee, "Stability Analysis of TSK Fuzzy System", IEEE International Conference on Fuzzy System, vol. 1, pp.555-560, 1998
- [7] Zonghua Jin, Wonghang Lee, Geuntaek Kang, "Adaptive PID Controller for Nonlinear System using Fuzzy Model" Fuzzy Logic and Intelligent Systems, vol. 13, pp. 148-153, 2003