

工學碩士 學位論文

네트워크 지연 예측 모델을 이용한
인터넷 기반 이동 로봇의 원격 운용

指導教授 李 遠 昌



2005年 2月

釜慶大學校 大學院

電子工學科

申 直 洙

申直洙의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 12月 25日

主 審 工學博士 姜 根 澤



委 員 工學博士 林 昌 憲



委 員 工學博士 朱 雯 甲



목 차

Abstract	1
I. 서 론	2
II. 전송 지연의 예측	3
2.1 네트워크 전송 지연	3
2.2 인터넷 구조 에 따른 전송 지연	4
2.3 전송 지연의 특성	5
2.4 기존 전송 지연의 예측 시스템	6
2.5 적응 퍼지 시스템을 이용한 전송 지연 예측	11
III. 전송지연을 고려한 원격 운용	18
3.1 시스템 전체 구조	18
3.2 원격 운용	19
VI. 결 론	25
참고문헌	26

**A prediction Model of Network Delay for Teleoperation of
an Internet-Based Mobile Robot**

Jiksu Shin

*Department of Electronic Engineering, Graduate school,
Pukyong National University*

Abstract

The concept of teleoperation has been around for a while, Design and development of Internet-based robotic systems were further motivated with introduction of a new ubiquitous means of communication, that is, the Internet. Along with general problems caused by time delays, using the Internet as the means of communication can result in performance degradation or even system instability in teleoperation because of the random network delay. In this thesis a prediction model of network delay using TSK fuzzy model is presented and an adaptive control scheme is developed to update the prediction model according to the network status. The prediction model is applied to control of an Internet-based mobile robot. In the computer simulation the TSK prediction model of network delay is proven superior to the conventional algorithms.

I. 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 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 우주탐사 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 길, 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].

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.

II. 전송 지연의 예측

2.1 네트워크 전송 지연

인터넷의 구조는 응용 프로그램, 프로토콜, 라우터, 링커, 엔드 시스템(End system) 등으로 구성 된다. 이러한 형태의 네트워크 전송 패킷은 호스트에서 시작하여 여러 라우터를 걸쳐 종착지까지 가고 호스트 노드부터 서브 노드까지 각 노드에 따라 다른 타입의 전송지연을 만난다. 이렇게 발생하는 전송 지연은 크게 노드 처리 지연(Nodal Processing delay), 큐 지연(Queuing Delay), 전송 지연(Transmission delay), 전달 지연(Propagation delay)으로 나눌 수 있다. 그림 1은 시작점과 종착지의 라우터로써 전송 패킷은 라우터 A로부터 시작하여 라우터 B 까지 보낸다. 라우터 A는 라우터 B에 이르는 아웃바운드 링크(Outbound link)를 가지고 있고 링커와 라우터 사이에는 큐(Queue)가 있다. 패킷이 업스트림 노드(Upstream node)를 통하여 A에 도착하면 아웃바운드 링크를 결정하기 위한 패킷 헤더를 검토하고 링크로 보낸다. 이때 현재 링커가 일이 많다거나 큐에 이미 전송하기 위한 패킷이 들어 있다면 패킷은 큐에서 대기한다.

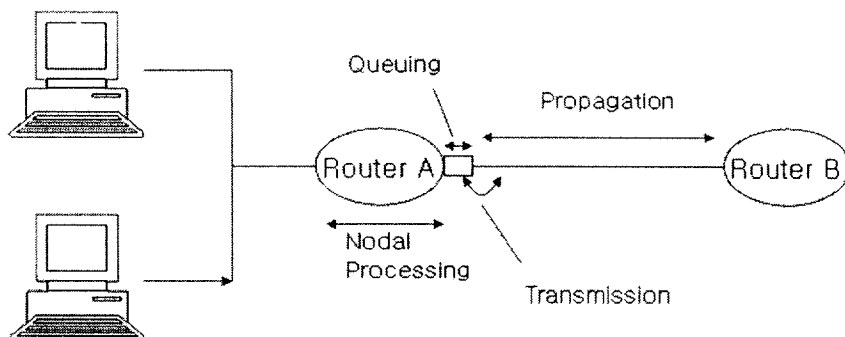


그림 1. 인터넷에서의 전송지연

2.2 인터넷 구조에 따른 전송 지연

2.2.1 노드 처리 지연(Processing Delay)

이 전송 지연은 라우터가 전송 패킷의 헤더를 검토하고 어디로 패킷을 보내야 될지 결정할 때 걸리는 시간이다. 또한 업스트림 라우터에서 라우터로 패킷 비트를 보낼 때 발생하는 비트 레벨 오차(Bit level error)를 측정하는 시간도 포함 되어 있다. 고속 라우터에서 이 전송 지연은 마이크로 초(Microseconds) 이하이다.

2.2.2 큐 지연(Queuing Delay)

큐 지연은 큐에서 링크로 전달하기 위해 기다리는 시간이다. 큐가 비어 있고 현재 다른 전송 패킷이 없다면 전송 지연은 발생하지 하지만 네트워크 트래픽이 많고 전달하기 위한 패킷이 많다면 전송 지연은 길어진다. 큐 지연은 전송 지연의 가장 많은 부분은 차지하는 지연으로 그림 2와 같이 트래픽이 증가 할수록 전송 지연은 급격하게 증가한다. 큐 지연은 일반적으로 밀리 초(Milliseconds) 또는 마이크로 초(Microseconds)가 걸린다.

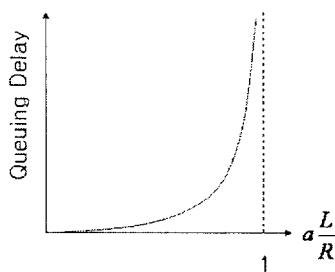


그림 2. 트래픽에 따른 큐 지연

2.2.3 전송 지연(Transmission Delay)

R bit/sec 갖는 전송선로에서 L bit의 길이를 갖는 패킷의 전송 지연(Transmission Delay)은 아래 식과 같다.

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

2.2.4 전달 지연(Propagation Delay)

전달 지연은 링커에서 발생하는 지연으로써 네트워크의 링크의 물리적 성질에 의해서 결정 된다. 일반적으로 많이 사용되는 멀티모드 광섬유(Multimode fiber), 트위스트 페어(twisted -pair) 그리고 구리선(copper wire) 등은 다음과 같은 범위의 전달 속도를 갖는다.

$$2 \times 10^8 \text{ meter/sec} \sim 3 \times 10^8 \text{ meter/sec}$$

2.3 전송 지연의 특성

본 논문에서는 서버에서 클라이언트로 패킷을 보내고 받는 즉시 클라이언트가 서버 쪽으로 응답을 보내는 RTT(Round-trip Time)를 이용하여 원거리에서 전송 지연을 측정하였다.

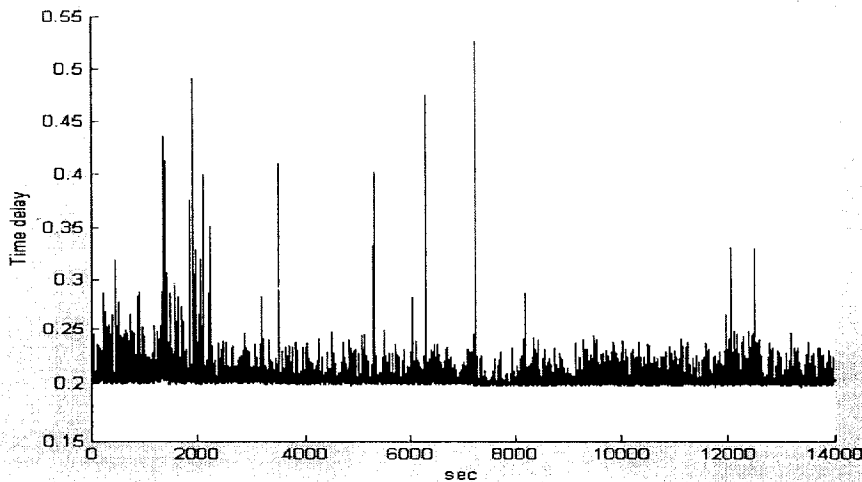


그림 3 시간에 따른 전송 지연

실험 결과 전송 지연은 시간 축에서 랜덤하게 발생하고 그림 4와 같은 형태의 확률 밀도를 가진다. 그림 3은 4시간 동안 측정한 전송 지연에 대한 데이터이다.

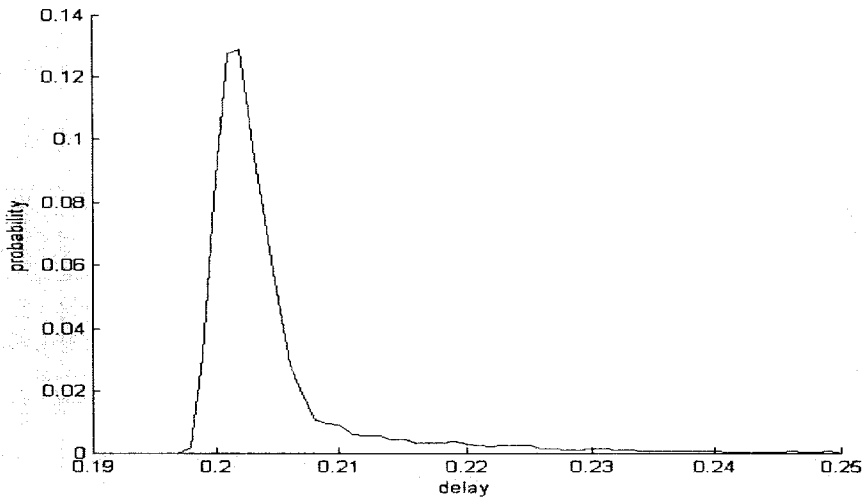


그림4 전송 지연의 확률 밀도 함수

2.4 기존 전송 지연의 예측 시스템

전송 지연은 분명 인터넷을 이용한 원격 제어 시스템의 안정성과 정확도에 영향을 주는 중요한 요소 중 하나이다. Fiorini[3]에 의해 소개된 인터넷을 통한 제어 시스템 설계에서는 이러한 파라메타를 어떻게 해결해야 되는지 간단히 설명하고 있는데 가장 중요시 다루는 부분이 정확한 전송 지연 예측을 통한 시스템 안정화이다. 그래서 본 논문에서는 칼만 필터(Kalman Filter)의 기초가 되는 회귀 평균(Recursive Average) 알고리즘, 인터넷에서 사용되는 칸(Karn) 알고리즘, EWMA(Exponential weight moving average) 그리고 TSK 퍼지 예측 시스템을 분석하여 네트워크 환경에 가장 적절한 예측 시스템 제시하려고 한다.

2.4.1 회귀 평균(Recursive Average)을 이용한 예측

회귀 원리(Recursive philosophy)는 노이즈가 섞인 신호에서 그에 포함된 알 수 없는 상수 값을 예측하기에 적절한 원리이다. 여러 가지 평균 알고리즘이 있지만 회귀 평균이 컴퓨터로 구현할 때 계산량과 메모리량이 적어서 실시간적으

로 처리하기 적합하다.

식 (2)는 회귀 평균으로 z_n 은 n 번째 표본 값이고 m_n 은 n 번째까지의 평균이다.

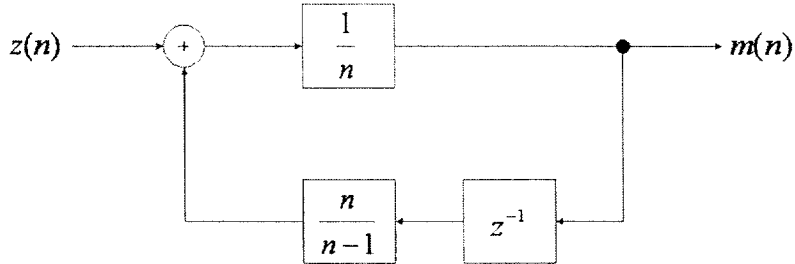


그림5 회귀 평균 예측 시스템

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

그림 6는 회귀 평균 알고리즘을 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.

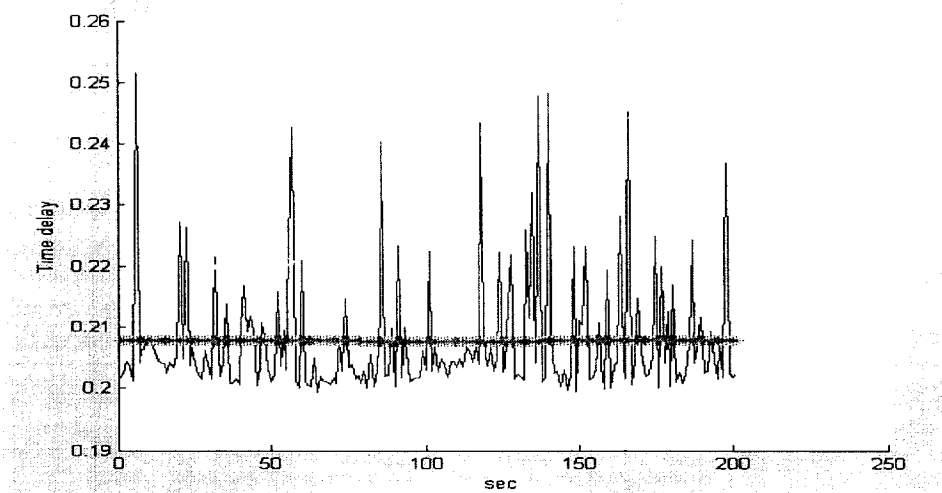


그림 6 회귀 평균의 적용

-- : 전송 지연

** : 회귀 평균을 이용한 예측

2.4.2 칸(Karn) 알고리즘을 이용한 전송 지연 예측

TCP프로토콜에서 클라이언트에서 연결요청이 오면 호스트는 세그먼트를 보내고 타이머를 동작시킨다. 타이머가 종료되기 전에 원하는 데이터가 들어오지 않는다면 호스트는 데이터 손실로 판단하여 세그먼트를 재전송하고 데이터를 기다리게 된다. TCP에서는 타이머 종료 시간의 최적화를 위해 칸(Karn) 알고리즘을 이용하여 다음 데이터의 전송 지연을 예측한다[4]. 아래 그림은 x 축 $Rtt(n)$, y 축 $Rtt(n+1)$ 로 했을 때 전송 지연의 위상을 도표로 나타내었다.

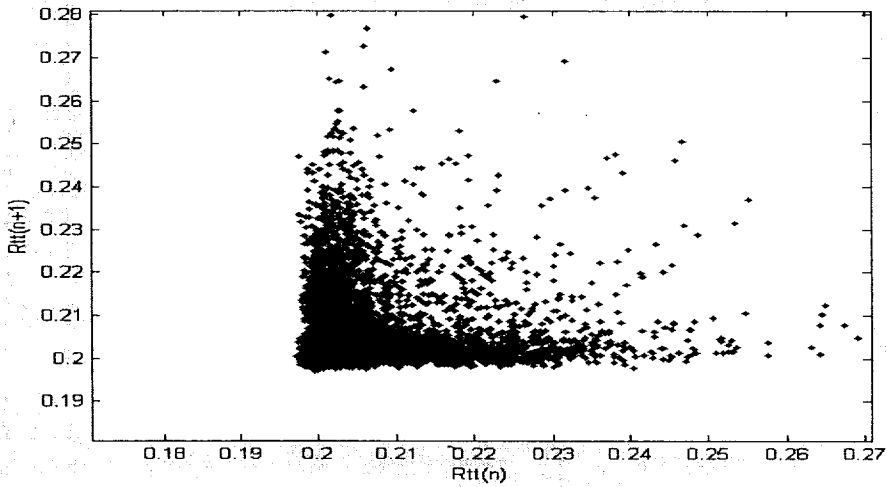


그림 7 전송 지연의 위상

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

여기서

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

$$\sigma_{n+1} = (1 - \beta) \times \sigma_n + \beta \times (|D| - \sigma_{n-1})$$

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

식(2)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 변화는 β 에 의해서 결정된다. 그리고 γ 는 Rtt_{n+1} 에 영향을 주는 σ_{n+1} 의 크기를 변화시킨다. 그림 8은 $\alpha = 0.012$, $\beta = 0.009$, $\lambda = 0.23$ 으로 하고 식 (3)을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

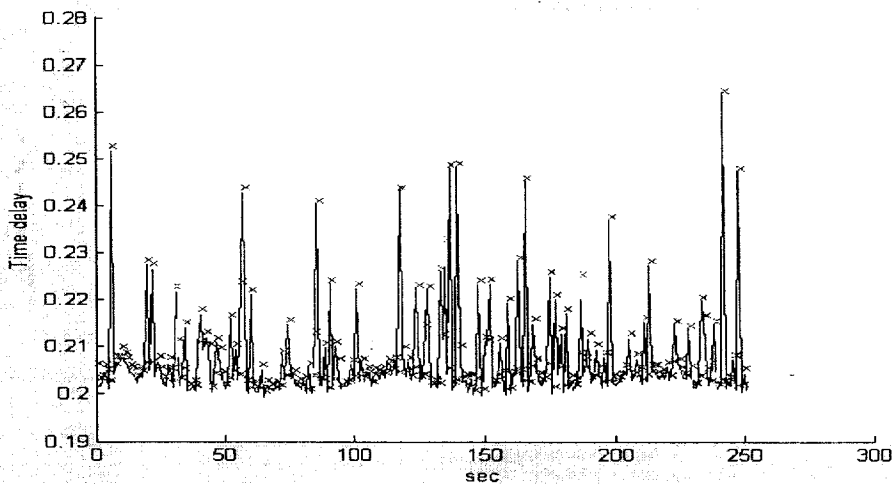


그림 8 칸 알고리즘의 예측 결과

-- : 전송 지연

xx : 칸 알고리즘을 이용한 예측

2.4.2 EWMA(Exponential weight moving average)를 이용한 전송 지연

예측

EWMA은 칸 알고리즘과 같이 최적의 타임아웃(Timeout) 시간을 예측하기 위

하여 쓰인다[5]. 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.

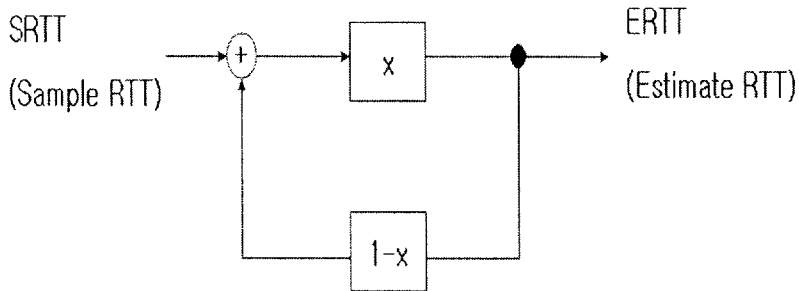


그림9 EWMA 예측 시스템

$$ERTT = (1 - x) \cdot ERTT + x \cdot SRTT \quad (4)$$

식 (2)에서 $x \in (0,1)$ 이고 SRTT는 표본 값이고 ERTT는 다음 표본 값의 예측치이다. 그림 10은 $x = 0.125$ 로 하고 시뮬레이션하였다.

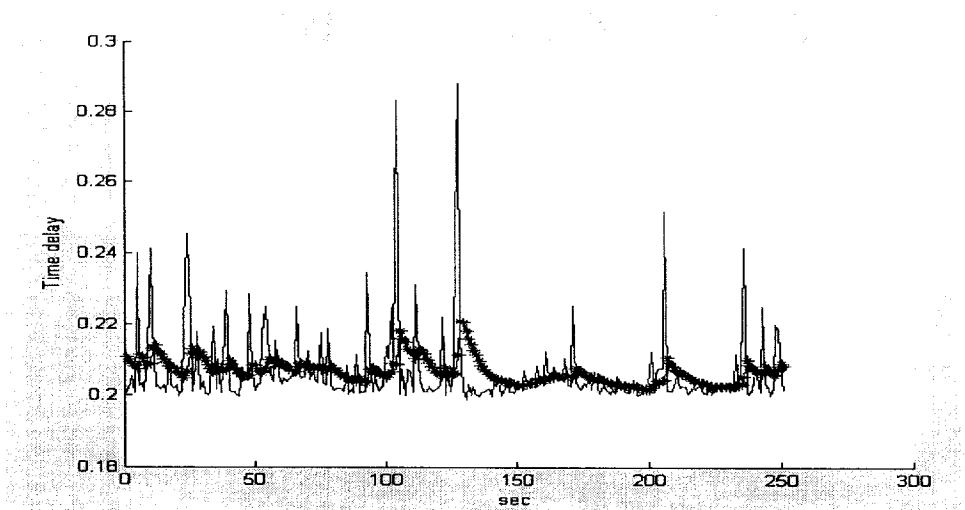


그림 10 EWMA 알고리즘의 예측 결과

-- : 전송 지연

** : EWMA 알고리즘을 이용한 예측

2.5 적응 퍼지 시스템을 이용한 전송 지연 예측

네트워크의 상태는 시간적으로 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 11과 같다.

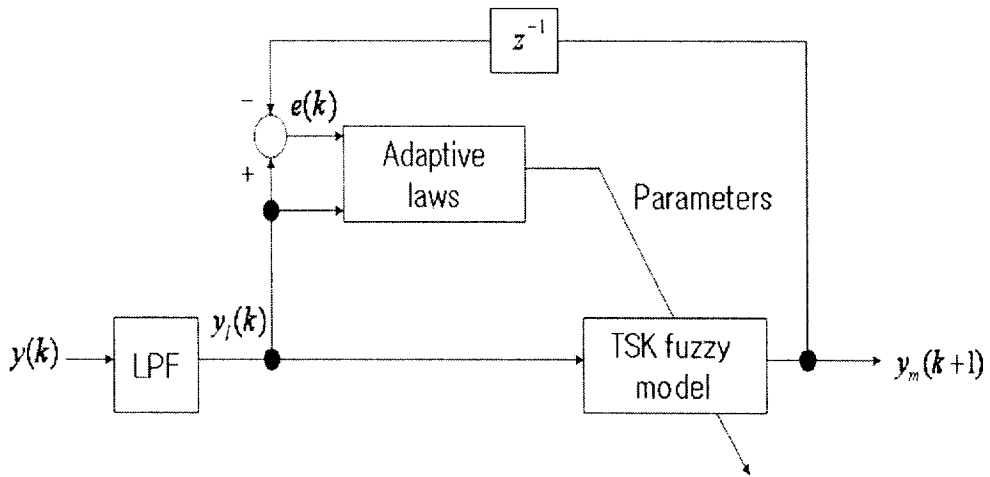


그림 11 적응 퍼지 예측 시스템의 구성도

2.5.1 TSK(Takagi-Sugeno-Kang) 퍼지 모델

일반적인 TSK 퍼지 입출력 모델의 i번째 규칙은 다음과 같다[6].

$$\begin{aligned} M^i: & \text{IF } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_l \text{ is } F_l^i \\ & \text{THEN } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + \dots + a_n^i x_n \end{aligned} \quad (5)$$

출력 y는 다음과 같이 추론할 수 있다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r w^i(z) y^i}{\sum_{i=1}^r w^i(z)} \quad (6)$$

$$w^i(z) = \prod_{j=1}^l F_j^i(z_j) \quad (7)$$

여기서 r 은 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[6-7], IF부분의 규칙은 일반적인 퍼지 IF-THEN 규칙과 같고 THEN부분은 입력 값의 선형 결합이다. 식 (5)의 물리적 의미는 z 를 IF 부분의 규칙으로 나누면 출력은 입력 값의 선형 함수가 된다는 것이다. 결국 TSK 퍼지 시스템은 구분적인 선형 함수(Piece-wise linear function)가 된다. 본 논문에서 사용될 TSK 퍼지 모델은 식 (8)과 같으며, 그림 12는 전제부 퍼지집합이다.

$$\begin{aligned} M^1 : & \text{If } y(k-1) \text{ is } F1 \\ & \text{then } y(k+1)^1 = a_1 + b_1 y(k) + c_1 y(k-1) \\ & \quad + d_1 y(k-2) + e_1 y(k-3) \\ \\ M^2 : & \text{If } y(k-1) \text{ is } F2 \\ & \text{then } y(k+1)^2 = a_2 + b_2 y(k) + c_2 y(k-1) \\ & \quad + d_2 y(k-2) + e_2 y(k-3) \end{aligned} \quad (8)$$

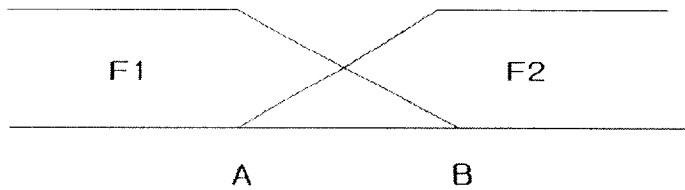


그림 12 전제부 퍼지집합

2.5.2 저역 여파기(Low Pass Filter)

본 논문에서 사용하고자 하는 TSK 퍼지시스템의 입력은 네트워크상에서 발생하

는 전송지연이다. 네트워크 전송지연은 랜덤하게 발생하기 때문에 TSK 퍼지 모델을 얻기 위해 직접 적용할 경우 고주파 성분으로 인하여 원하는 정확한 모델을 얻기가 쉽지 않았다. 그러나 전송 지연의 주파수 특성을 분석한 결과 그림 13과 같이 대부분의 표본 값이 0.1이하의 주파수에 존재한다는 것을 알 수 있었다. 그래서 차단 주파수 0.1인 LPF를 사용하여 고주파 성분을 제거하여 TSK 퍼지 모델을 구하였다. 본 논문에서는 FIR 필터 중 해밍(Hamming) 윈도우를 사용하여 고주파 성분을 제거 하였다.

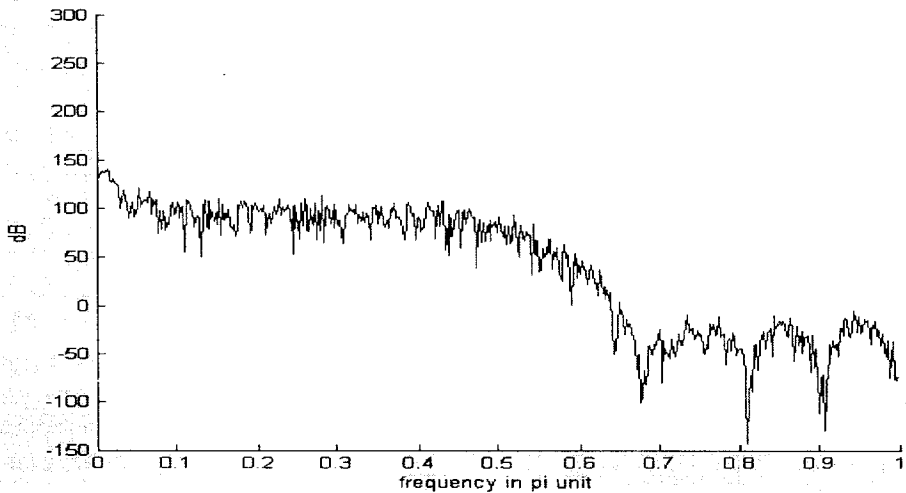


그림 13 전송지연의 주파수 특성

$$w(n) = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{M-1} \right) \right], \quad 0 \leq n \leq M-1 \quad (9)$$

$$w(n) = 0, \quad \text{otherwise}$$

식 (9)에서 $M = 45$ 이고 그림 14는 차단 주파수가 0.1인 FIR 필터의 특성이다.

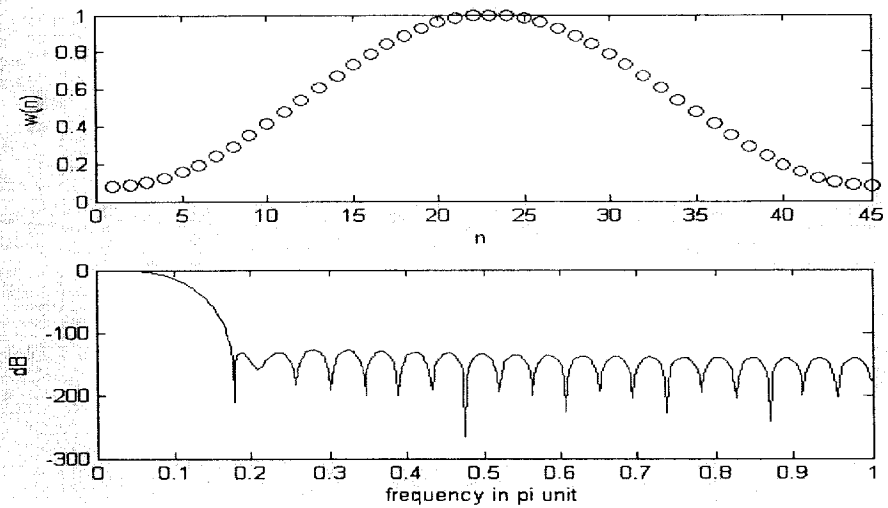


그림 14 LPF의 특성

그림 15는 측정한 전송 지연의 LPF 전, 후의 값을 비교하여 도표로 나타내었다.

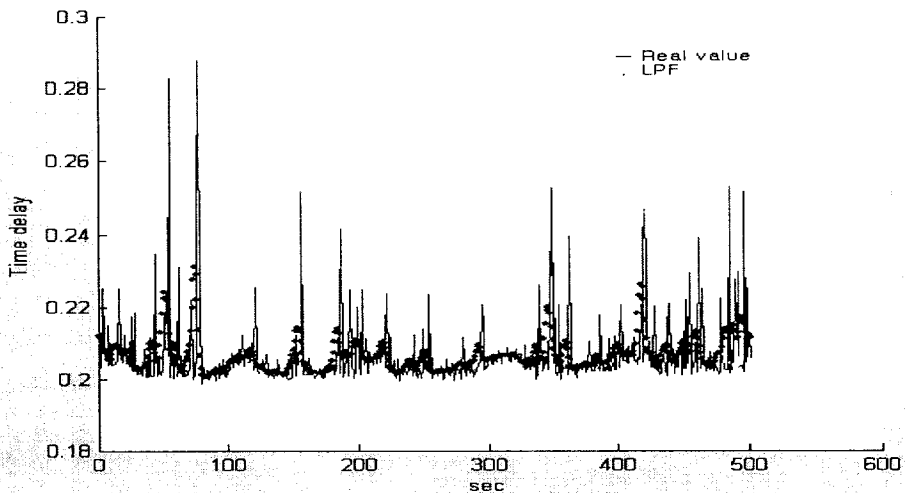


그림 15 전송지연 특성

----- : LPF 전

.... : LFP 후

2.5.3 적응 법칙

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 파라메타를 유동적으로 변화시켜야 된다[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 (10)은 퍼지 모델을 갱신하기 위한 규칙이고 a 는 경계값으로 상수이다.

$$\text{If } Er > a \text{ then update current fuzzy model} \quad (10)$$

여기서

$$Er = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k) - y_m(k))^2 \quad (11)$$

그림 16은 앞의 TSK 퍼지 모델, LPF와 적응 법칙을 적용한 전체 시스템의 순서도이다.

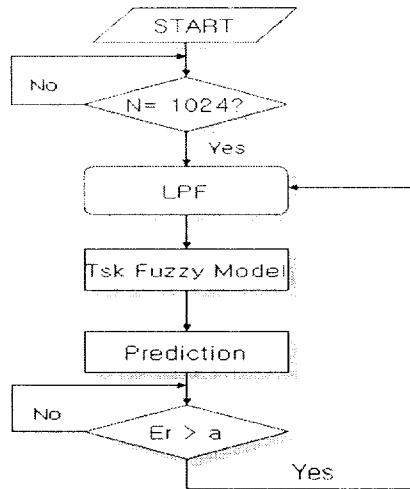


그림 16 적응 퍼지 시스템의 순서도

적응 퍼지 시스템은 초기에 1024개의 표본을 이용하여 저주파 필터링을 하고 그

값을 이용하여 TSK 퍼지 모델을 만들게 된다. 만들어진 모델을 통하여 다음에 발생할 전송 지연의 시간을 예측한다. 예측된 값과 실제 측정 된 값의 오차(Er)를 식 (11)을 이용하여 구하고 이 오차가 원하는 값(a)보다 크면 TSK 퍼지 모델을 갱신한다.

2.5.4 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 14000개의 입출력 데이터를 구하고 $y_l(k)$ 와 $y_m(k)$ 을 비교 분석하였다. 그림 6에서와 같이 퍼지 규칙을 두 개로 하고 전제부와 결론부 파라메타는 네트워크 상태에 따른 적응 법칙($a = 1.2 \times 10^{-5}$)에 의해 결정된다. 초기 퍼지 모델을 인식하면 식 (12)와 같고 그림 17은 초기 퍼지 집합이다.

$$\begin{aligned}
 M^1 : & \text{If } y(k-1) \text{ is } F1 \\
 \text{then } & y(k+1)^1 = 0.298 + 0.192y(k) - 0.287y(k-1) \\
 & \quad - 0.367y(k-2) + 0.051y(k-3) \\
 \\
 M^2 : & \text{If } y(k-1) \text{ is } F2 \\
 \text{then } & y(k+1)^2 = 0.420 + 0.037y(k) + 0.024y(k-1) \\
 & \quad + 0.031y(k-2) + 0.050y(k-3)
 \end{aligned} \tag{12}$$

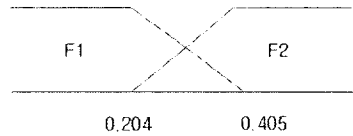


그림 17 초기 퍼지 집합

그림 18에서 퍼지 모델을 적응 시킬 경우 시스템이 변화하여도 퍼지 모델이 잘 적응되어 시스템 출력이 규범 모델을 잘 따라간다. 식 (11)을 이용하여 LPF된 전송지연과 적응 퍼지 시스템을 이용한 전송지연 예측값의 오차는 다음과 같다.

$$Er = 1.0742 \times 10^{-5}$$

표1은 식 (11)을 이용하여 6시간 동안 회귀 평균, 칸(Karn), EWMA 그리고 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 실제 측정값과 비교하여 오차를 구하였다. 비교 결

과 기존에 사용되는 예측 시스템에 비하여 본 논문에서 제안한 적응 퍼지 예측 시스템의 결과가 성능이 상당히 향상된 것을 알 수 있었다.

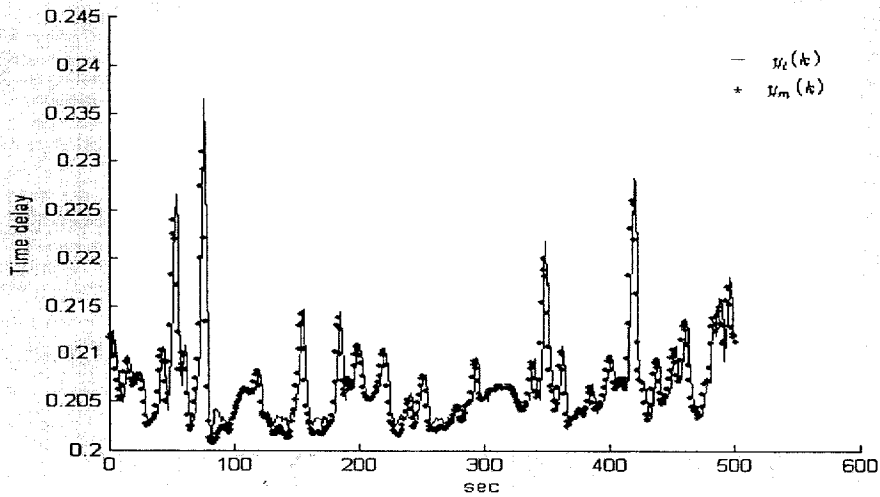


그림 18 예측 시스템의 모의실험

--: LPF 후 전송지연

** : 적응 퍼지 시스템을 이용한 전송지연의 예측값

표 1 각 시스템의 성능 평가

predictor	Er
Recursive Average	10.722×10^{-5}
Karn*	18.480×10^{-5}
EWMA**	10.275×10^{-5}
Adaptive TSK Fuzzy	7.5171×10^{-5}

* : $\alpha = 0.012, \beta = 0.009, \gamma = 0.23$

** : $x = 0.125$

III. 전송 지연을 고려한 원격 운용

3.1 시스템 전체 구조

원격 운용 시스템은 그림과 같이 로봇 시스템, 서버 시스템 그리고 클라이언트 시스템으로 나뉘어진다. 서버 시스템과 클라이언트 시스템은 윈도우즈 환경에서 GUI(Graphic User Interface), 객체지향, 멀티스레드 기능이 뛰어난 언어인 MFC(Microsoft Foundation Class)로 구현된다.

클라이언트는 서버에게 로봇이 어떤 행동을 할지 인터넷을 통하여 될지 명령을 내리고 서버는 로봇의 이동 경로를 결정하고 전송 지연을 고려하여 원격에서 로봇을 제어 한다.

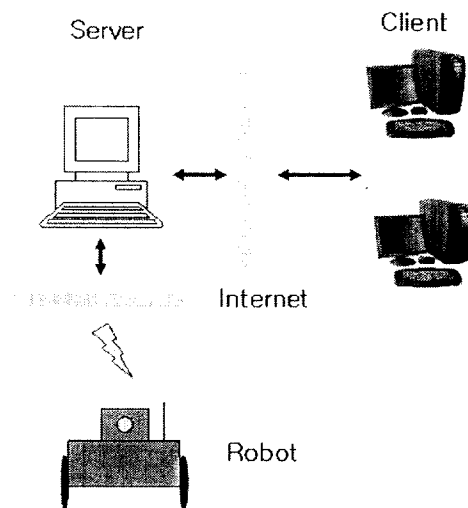


그림 19. 시스템의 전체 구조

3.2 원격 운용

서버에서 로봇으로 인터넷을 이용하여 데이터를 전송 할 때 피할 수 없는 전송 지연이 발생한다. 이러한 전송 지연으로 인해 로봇은 서버가 원하는 궤적을 따라 가지 못한다. 본 논문에서는 UDP 프로토콜과 적응 퍼지 예측 시스템을 이용하여 주행 알고리즘을 실험하였다.

그림 20과 같이 로봇은 서버로 현재 좌표를 보내고 로봇은 서버로 부터 진행 속도와 방향을 받는다. 그러나 데이터 교환 시 발생하는 전송지연으로 인하여 로봇은 전송지연만큼 이동하게 되고 다른 좌표에서 명령을 받게 된다. 식 (13)에서 (x_r, y_r) 은 로봇이 명령을 받는 좌표이고 (x, y) 는 로봇이 서버로 보낸 현재 좌표이다. 그리고 (x_d, y_d) 는 전송지연에 만큼 이동된 로봇의 좌표이다.

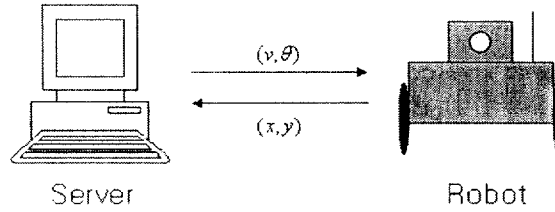


그림 20. 서버와 로봇의 통신 데이터

$$\begin{aligned}
 x_r &= x + x_d \\
 y_r &= y + y_d
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

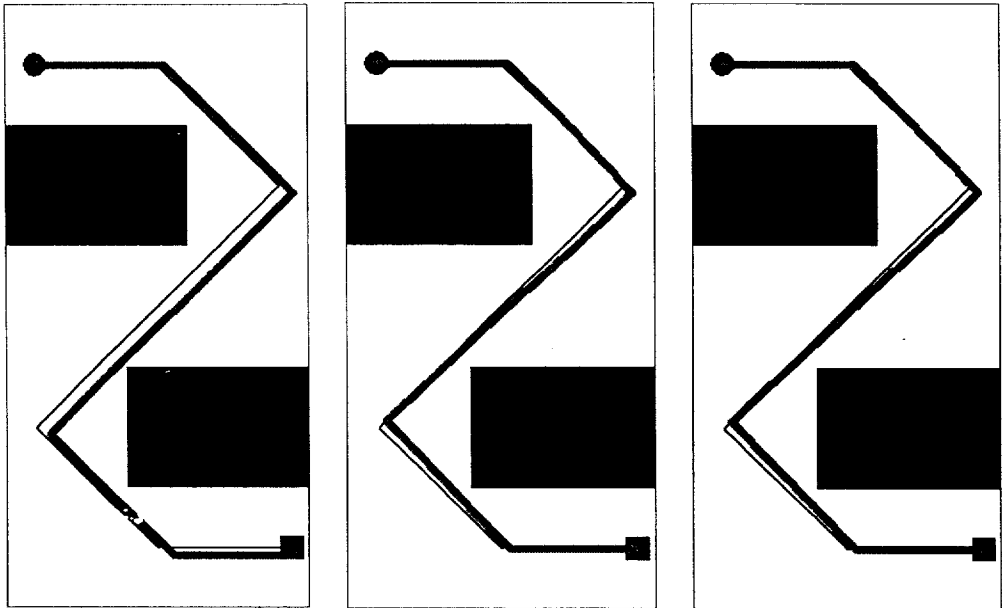
즉 주행 알고리즘은 (x_r, y_r) 을 사용하여야 로봇은 원하는 궤적을 따라 가게 된다. 그러나 (x_d, y_d) 는 전송지연에 의하여 랜덤한 값을 가지기 때문에 (x_r, y_r) 을 알기는 쉽지 않다. 그래서 앞에서 소개된 적응 퍼지 예측 시스템을 이용하여 (x_d, y_d) 를 예측하여 전송 지연으로 인해 생기는 오차를 줄였다. 식 (14)은 (x_f, y_f) 는 (x_d, y_d) 의 예측 값이고 (x_E, y_E) 는 로봇이 명령을 수신하는 예측 좌표

이다.

$$x_E = x + x_f$$

$$y_E = y + y_f \quad (14)$$

아래의 그림 21는 TCP 예측 시스템, TSK 예측 시스템을 이용한 시스템과 사용하지 않은 시스템을 비교하였다. 그림에서 ●는 출발점이고 ■는 도착점이다. 예측 시스템을 사용하지 않은 시스템은 장애물과 충돌하고 원하는 목표치에도 도달할 수 없었다. 그러나 예측 시스템을 사용한 실험에서는 오차가 적고 원하는 목표점에 도달하는 것을 알 수 있었다.



(a)

(b)

(c)

그림 21 네트워크 트래픽이 적을 경우의 실험

(a) 예측 시스템을 적용하지 않은 시뮬레이션

(b) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(c) 적용 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

위 그림과 같이 네트워크 상태가 안정적일 때는 다른 예측 시스템과 적응 TSK 퍼지 예측 시스템의 실험은 차이가 나지 않았다. 그러나 네트워크에 부하가 많아지면 아래 그림과 같이 두 예측 시스템은 차이를 보이고 적응 TSK 퍼지 예측 시스템이 네트워크 예측 모델로 더 적합함을 알 수 있다. 그림 22는 네트워크 트래픽이 많은 경우의 실험 결과로 TCP에서 사용되는 예측 시스템은 그림과 같이 장애물과 충돌하고 목표 지점에도 많이 벗어났지만 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 실험은 장애물을 피할 수 있었고 목표지점에도 근접함을 알 수 있었다.

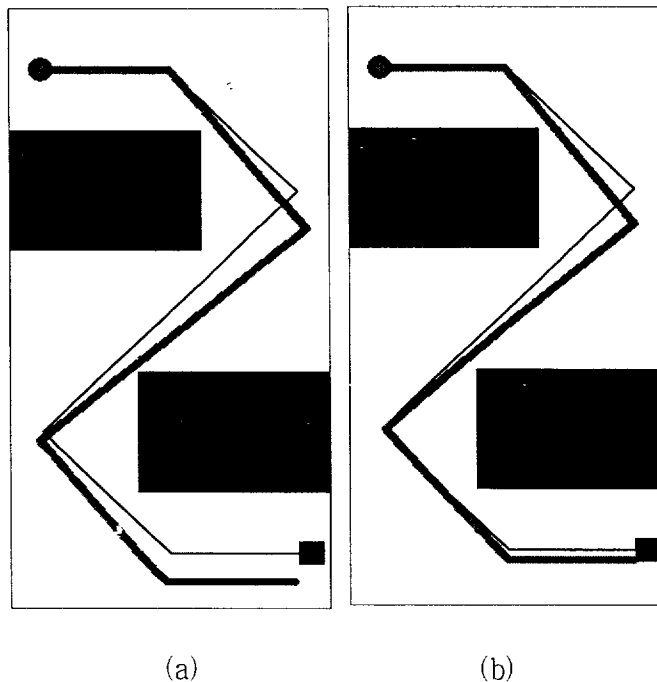


그림 22 네트워크 트래픽이 많은 경우의 실험

(a) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(b) 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

그림 23은 이동로봇의 이상적인 경로이고 그림 24-27은 네트워크 부하에 따른

두 예측 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 실험 결과 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 이동 로봇의 주행은 네트워크 부하에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

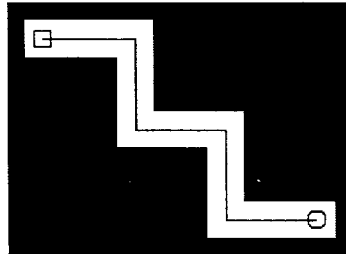
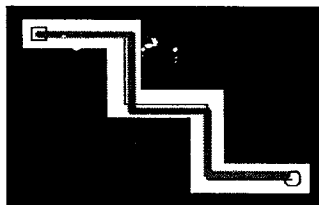
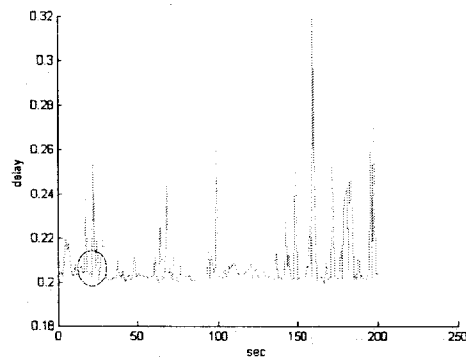
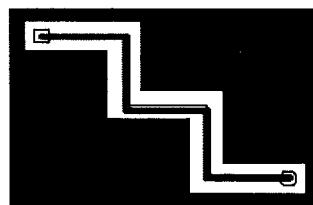


그림 23 이동로봇의 이상적인 경로



(a)

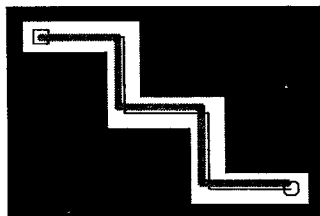
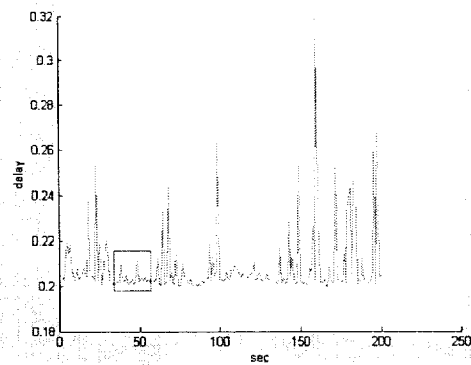


(b)

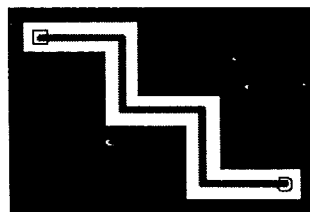
그림 24 ○에서의 실험

(a) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(b) 적용 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션



(a)

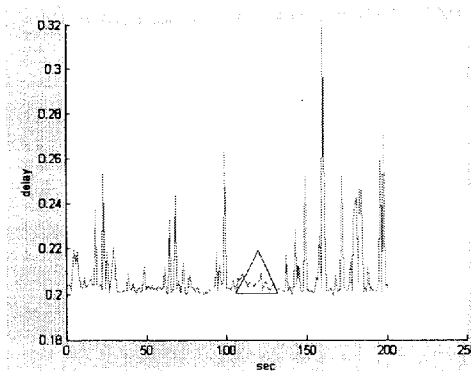


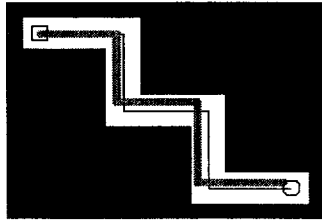
(b)

그림 25 □ 에서의 실험

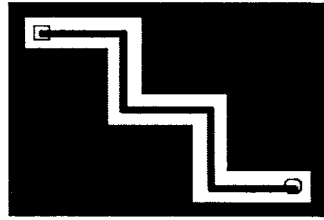
(a) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(b) 적용 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션





(a)

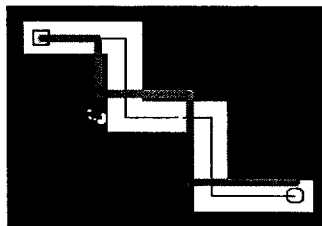
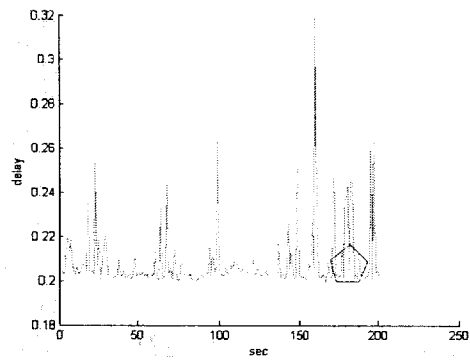


(b)

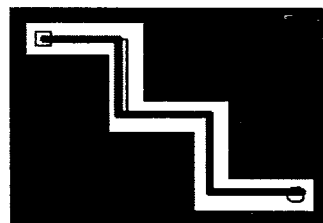
그림 26 △에서의 실험

(a) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(b) 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션



(a)



(b)

그림 27 ◇에서의 실험

(a) TCP 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

(b) 적응 TSK 퍼지 예측 시스템을 적용한 시뮬레이션

VI. 결론

본 논문에서는 인터넷을 이용한 원격 운용 시스템의 실시간 제어를 위한 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 뛰어 넘어 인터넷이 연결된 곳이면 어디서든 안정적으로 운용할 수 있었다.

다가 올 유비쿼터스 세계에서는 본 논문에서 제시된 시스템과 같이 언제 어디서든 원하는 곳에서 로봇 운용이 가능할 것이다. 이를 위한 향후 과제로는 이동 로봇의 장애물 회피 등 실시간 네트워크 전송지연의 예측이 요구되는 시스템에 본 예측 모델을 적용하는 것이다.

참 고 문 헌

- [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] I. Elhajj, N. Xi, W.K. Fung, Y.H.Liu, Y. Hasegawa, T.Fukuda "Modeling and Control of Internet Based Cooperative Teleoperation" Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation, vol. 1, pp662-667, 2001
- [3]R. Oboe and P. Fiorini , "A design and control environment for Internet-based teleoperation" The international Journal of Robotics Research, vol.17, No4, pp433-499 1998
- [4] Q.P. Wang, D.L. Tan, "The Control Oriented QoS: Analysis and Prediction", Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1897-1902, 2001
- [5] James F. Kurose, Keith W. Ross, "Computer Networking" Addison Wesley, pp.224-226, 2001
- [6] 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
- [7] M.Sugeno, and G.Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", Fuzzy Sets and System, vol. 1, pp.53:19-303, 1993

[8] Geuntaek Kang, Wonchang Lee, "Stability Analysis of TSK Fuzzy System", IEEE

International Conference on Fuzzy System, vol. 1, pp.555-560, 1998

[9] 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