

동적선형모델을 적용한 인터넷 시각동기 모델

유 동 희[†] · 황 소 영^{††} · 김 용 호

요 약

인터넷상에 분산된 시스템들의 시각동기(time synchronization) 방법으로 널리 사용되고 있는 SNTP(Simple Network Time Protocol)의 시각 동기모델을 분석하고 안정된 시각오프셋을 제공할 수 있는 새로운 시각동기모델을 제안한다. SNTP가 사용면에서는 간단하나 다양한 오류 요소를 고려하지 않으므로 인해 발생하는 안정성 면에서의 단점을 보완하기 위해 SNTP 시각오프셋 추정식을 분석한다. 분석 결과로 추정된 시각 오프셋이 동적 오류 요소인 송신지연과 수신지연의 차이를 대표적인 오류 요소로 내포하고 있음을 확인하고 송수신 지연차를 적용한 새로운 시각동기 모델로 동적선형모델을 적용한 시각 오프셋 추정 모델을 제안한다. 그리고 실측을 통한 송수신 지연차의 특성을 분석 결과로 제시한다.

An Internet Time Synchronization Model using Dynamic Linear Model

Donghui Yu[†] · Soyoung Hwang^{††} · Yongho Kim^{†††}

ABSTRACT

We propose a new Internet time synchronization model using dynamic linear model and introduce the characteristics of internet transmission delays. SNTP (Simple Network Time Protocol) has been widely used as a time synchronization method on the Internet. While SNTP provides a very simple usage, SNTP may not provide the stable services, since SNTP does not consider the several essential error factors. In order to overcome the instability of SNTP, we analyze the process of time estimation of SNTP and find that the difference between forward transmission delay and backward transmission delay operates the main error on the estimation of a time offset.

키워드 : SNTP, NTP, 인터넷 시각동기(Internet Time Synchronization), 보안(Internet Security), 시각오프셋(Time Offset), 추정(Estimation), 동적선형모델(Dynamic Linear Model), 칼만필터(Kalman Filter), 전송지연(Transmission Delay)

1. 서 론

인터넷 전자상거래 및 다양한 응용들의 급속한 전개에 의해, 인터넷 보안 및 추적 기술 등의 기반 핵심 기술로 시스템들 간의 시각동기가 대두되었다. 인터넷 시각동기 분야는 국외의 경우 미국이 독보적으로 연구를 진행하고 있으며, 국내 연구는 인터넷, 전자상거래, 인터넷 경매 및 बैं킹 서비스, 게임 등을 통해 최근 수년 동안 그 중요성 및 필요성은 인식되어 왔으나, 상대적으로 시각동기에 대한 연구는 매우 저조한 편이다. 미국의 경우 symmetricom사와 델라웨어 주립대, NIST 등에서 연구가 진행되고 있으며, 주로 정확한 참조시각원 처리 방법, 운영체제의 정밀도 향상 및 처리 지연 조정 등 정밀시각을 제공하는 영역에 치중되어 있으며, 인터넷을 통한 전송지연 특성을 고려한 시각 보정 기법은 연구가 활발히 진행되고 있지 않으며, 단순히 SNTP

를 사용할 때 Stratum level이 낮은 서버에서 시각서비스를 받을 것을 권장하는 정도이다[1]. 그러나 SNTP는 패킷 손실에 의한 추정 불가 상황이나 급격한 샘플 값 변동 등이 발생할 수 있으므로 정확하고 안정적인 시각오프셋 제공이 어렵다. 또한, 망의 오류나 메시지 손실이 장기화될 경우, 정정해야할 시각 오프셋을 지속적으로 추정할 수 없는 단점이 있다.

1.1 연구 배경

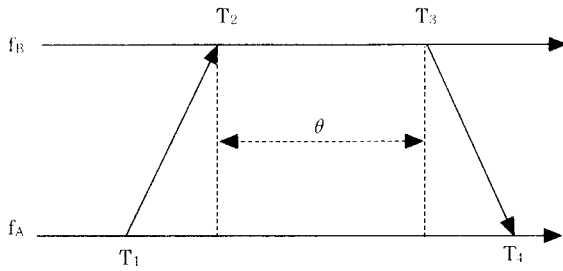
현재 인터넷 시각동기 모델로 가장 대표적으로 사용되고 있는 프로토콜은 SNTP로서 4개의 시각소인 메시지를 이용해 시각 오프셋을 추정한다. 인터넷에서 시각 소인 값을 이용한 시각동기는 시각생성오류, 시각소인오류, 측정오류, 네트워크 전송지연 등 기본적인 오류 요소들을 포함하고 있으며, NTP는 이러한 오류 요소들의 모델링 방법과 추정 방법을 정의하였다[3]. SNTP는 NTP에서 정의된 오류 요소들을 모두 고려하지 않고 간단히 식 (1)과 같이 한 대의 시각서버로부터 추정된 시각 오프셋 추정 값을 바로 적용하여 동기한다[1].

[†] 정 회 원 : 부산가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 교수

^{††} 정 회 원 : 부산대학교 대학원 전자계산학과

^{†††} 정 회 원 : 한국기계연구원 선임연구원

논문접수 : 2003년 7월 22일, 심사완료 : 2003년 9월 24일

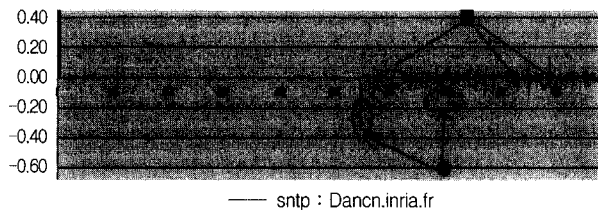


(그림 1) 네트워크상의 시각 소인 절차

f_A, f_B 는 A, B 두 클릭의 주파수를 나타내고 임의의 짧은 구간에서는 상수로 정의한다. θ 는 시각소인에 의해 추정되는 시각오프셋이다. A 클릭은 T_1 과 T_4 시점에서의 시각소인을, B 클릭은 T_2 과 T_3 시각소인을 결정한다. A에 대한 B의 추정 시각 오프셋 θ 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\theta = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} \quad (1)$$

그러나 θ 는 송·수신 전송 지연을 독립적인 동적 오류 요소로 내포하며, 이전 시간 흐름에 대한 고려 없이 순간적인 시각소인값을 사용하므로 (그림 2)에 네모박스로 표시된 구간과 같이 패킷 손실에 의해 시각오프셋을 추정할 수 없는 상황이나, 동그라미 표시 구간과 같이 추정된 시각오프셋이 급격한 변화를 보이는 상황 등이 발생하므로, 안정적인 시각오프셋 추정이 어렵다. 또한, 망의 오류나 메시지 손실이 장기화될 때 정정해야할 시각 오프셋을 추정할 수 없는 상황이 발생하므로 인터넷상의 거래나 보안, 감사, 추적 등과 같이 시각에 근거한 동작들에 큰 영향을 미친다.



(그림 2) 패킷 손실에 의한 시각동기 불가능 상태

본 논문은 안정적이고 보다 정확한 시각오프셋 추정 방법의 제안으로써, SNTP의 시각오프셋 추정식을 재분석하고 지금까지 고려되지 않았던 송수신 지연차를 동적 오류 요소로 정의하여 동적선형모델을 이용한 시각오프셋 추정 모델을 제안한다. 동적 선형 모델 적용을 위한 가장 중요한 전제 조건이 추정 모델의 오류항이 정규분포를 따라야 하므로, 제안한 추정 모델에 의한 성능 향상에 앞서, 오차항의 분포를 측정에 의해 검증하고 향후 최적 오프셋 추정에 적용한다.

2. 제안된 시각오프셋 추정모델

2.1 동적선형모델

동적 선형 모델은 칼만 필터 모델이라고도 불리며, 측정 방정식과 상태 방정식으로 구성된다[5]. 측정방정식은 식 (2)와 같이 상태(동적계수) a_k 값이 결정되면 설명변수인 t_k 값을 입력으로 하고 오차항이 더해져서 측정값이 결정하는 구조이며, 추정 시에는 오차항이 정규분포를 만족하여, 평균값이 0이므로 상태방정식에서 동적으로 추정된 a_k 값과 t_k 의 곱으로 y_k 값의 추정치 \hat{y}_k 을 구한다. k 시점에서의 동적계수 a_k 는 $(k-1)$ 시점의 동적계수값 a_{k-1} 의 근처값을 갖는다는 가정아래 내적 오차 ψ_k 를 추가하여 생성된다.

$$\begin{cases} y_k = a_k t_k + \Phi_k & (\text{측정 방정식}) \\ a_k = a_{k-1} + \psi_k & (\text{상태 방정식}) \end{cases} \quad (2)$$

즉, 동적 선형 모델은 상태방정식에 의하여 동적 계수를 추정하고 측정방정식에 의하여 측정값(종속 변수값)이 생성되는 구조이다. 동적선형모델은 (그림 2)와 같이 패킷이 손실되거나 급격한 샘플 값에 대해 이전 상태 값을 기준으로 안정적으로 시각오프셋을 추정할 수 있다.

2.2 동적선형모델을 적용한 시각동기모델

시각소인 메시지를 이용한 시각동기 방법에 동적선형모델을 적용하기 위해서는 측정 및 추정될 데이터들이 시계열 데이터로 선형적 관계를 만족하고 시각소인측정값과 추정된 시각오프셋의 관계가 결정적이지 않고 통계적인 관계를 만족해야 한다. 따라서 SNTP가 사용하는 시각소인값의 특성이 시계열 데이터이고 시각소인값과 시각오프셋 함수식이 선형적(linear equation)으로 표현할 수 있으며, 두 변수들 간의 관계가 결정적이지 않고 동적으로 변화하는 네트워크 전송 지연 등의 통계적인 오류항이 포함되므로 기본 전제 요건은 만족한다. 그러나 가장 중요한 조건인 오차항의 분포가 정규분포를 따라야 한다. 이에, 칼만 필터에 시각오프셋 추정 모델을 적용하기 위해 SNTP에서 사용하는 시각오프셋 추정식을 분석하고 오차항을 정의한 후 오차항의 분포를 분석한다.

SNTP에서 사용하는 시각오프셋 추정식은 다음과 같다. T_i 는 i 번째 시각소인값에서 참조클릭의 절대 시각에서의 지역 클릭의 시각으로 정의하고, \tilde{T}_i 는 i 번째 시각소인값에서 지역 클릭에서 읽혀진 측정시각으로 정의한다. η_n 는 n 번째 클릭의 절대 시각으로부터의 노화(aging)에 의한 오류 요소로 정의한다. 노화는 매우 장시간에 의해 발생하므로 시각소인값이 측정되는 시간동안은 일정 상수로 가정한다. δ_2 는

송신시의 전송지연, δ_b 는 수신시의 전송지연으로 정의한다. 두 클럭이 절대 시각 θ 만큼의 오차를 갖고 있고, 인터넷 전송에 의한 지연(δ)을 고려한다면, 각 시각 소인 측정값 \widetilde{T} 들로부터 식 (3)과 같은 관계를 유추할 수 있다. 이때, 클럭 B를 시각서버로 가정하면 $\widetilde{T}_2, \widetilde{T}_3$ 를 절대 시각으로 두고 η_B 값들은 0으로 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widetilde{T}_2 - \widetilde{T}_1 &= T_2 + \eta_B - (T_1 + \eta_A) \\ &= (\widetilde{T}_1 + \delta_a + \theta) + \eta_{B_s} - (T_1 + \eta_A) \quad (3) \\ \widetilde{T}_3 - \widetilde{T}_4 &= (\widetilde{T}_4 + \delta_b + \theta) - (T_4 + \eta_{A_s}) \end{aligned}$$

두 시각 소인 측정치들을 합해서 SNTP의 시각오프셋 추정식을 유도하면, 식 (4)의 측정방정식과 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= \widetilde{T}_2 - \widetilde{T}_1 + \widetilde{T}_3 - \widetilde{T}_4 \\ &= (\widetilde{T}_1 + \delta_a + \theta) + \eta_{2_s} - (T_1 + \eta_1) \\ &\quad + (\widetilde{T}_4 + \delta_b + \theta) + \eta_{2_s} - (T_4 + \eta_1) \quad (4) \\ &= 2\theta + \delta_a - \delta_b + \epsilon \\ &= 2\theta + v(T) \end{aligned}$$

절대시각 θ 는 클럭 특성상 자체적인 클럭 휩, 노화 등의 오류 요소들을 적용시켜야 하므로, 전이행렬 Φ 에 노화율 (aging rate)을 적용시켰고, 기타 오류 요소는 $\omega(t)$ 으로 조절할 수 있다.

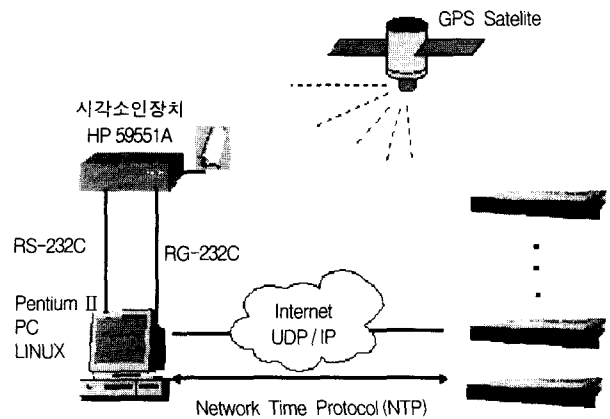
3. 인터넷 전송지연 특성 분석

측정식 분석 결과는 송수신 지연차가 시각오프셋 추정에 잡음으로 작용하므로 이 요소의 분포를 확인해야 함을 보여준다. 동적선형모델을 사용한 추정은 오차항 분포를 정확히 알 수 없는 경우가 대부분이므로, 일반적으로 임의의 값

을 사용하여 추정하는 경우가 대다수이다[9]. 본 연구에서는 임의의 서버들을 대상으로 사후 측정값(post facto)에 근거하여 송수신 지연차 특성이 정규분포를 나타내는지 확인한다[5].

측정은 서버와의 송신 지연과 수신지연을 각각 측정하고, 이 두 지연의 차이 값을 측정한다. 송신 지연과 수신지연을 측정하는 방법은 시각오프셋을 적용할 실험용 PC, 인터넷상의 NTP 시각서버, GPS를 참조시각원으로 하고 100ns의 해상도를 가진 시각소인장치를 사용한다. 송신 지연과 수신지연을 각각 $T_2 - T_1, T_4 - T_3$ 로 계산하여 이 두 전송지연의 차($T_2 - T_1 - T_4 + T_3$)를 송수신 지연차로 정의할 수 없다. 이 값들은 두 시스템간의 시각오프셋을 포함하고 있기 때문이다. 인터넷상의 시각 서버들이 정확한 참조시각원으로 동작하면, 서버들과 실험용 PC의 시각오프셋은 시각소인장치와 실험용 PC의 시각오프셋과 동일해야 하다. 따라서 $T_2 - T_1, T_4 - T_3$ 값에서 시각소인장치와 실험용 PC의 시각오프셋을 제거하면, 송신지연과 수신지연을 각각 구할 수 있다.

측정에 사용한 구성 요소들은 (그림 3)과 같다.



(그림 3) 시각동기 측정환경

<표 1> 송수신 지연차 측정 서버 리스트

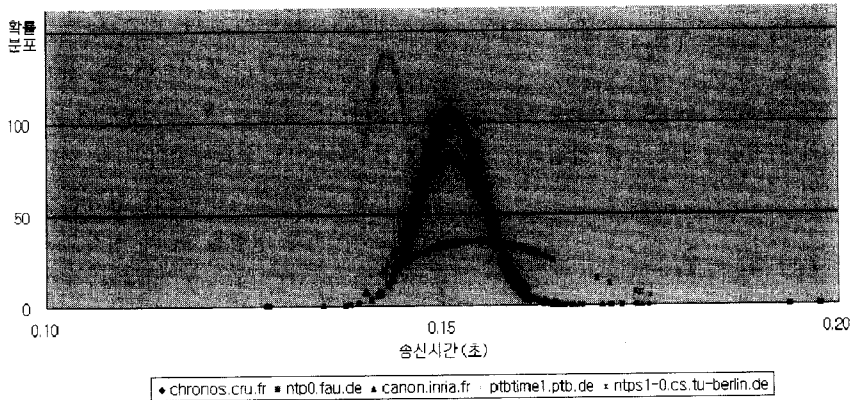
Site 주소	홉 수	일주 지연(ms)	Site 주소	홉 수	일주 지연(ms)
ntp.cs.mu.OZ.AU	22	4696	ntp-pl.obspm.fr	26	11597
ntp.mel.nml.CSIRO.AU	21	4206	ntp-sop.inria.fr	20	4658
ntp1.mp.br	18	5378	time.iem.it	21	3995
clock.uregina.ca	16	2144	cronos.cenam.mx	24	4466
swisstime.ethz.ch	20	3445	ntp0.nl.net	24	5677
ntp0.fau.de	24	4568	time.service.uit.no	26	10013
ntp1-0.cs.tu-berlin.de	27	8484	vega.cbk.poznan.pl	24	6021
ptbtime1.ptb.de	25	6619	time1.stupi.se	21	6449
canon.inria.fr	21	3556	goodtime.ijs.si	22	4085
chronos.cru.fr	21	4476	chronos.csr.net	23	13638

3.1 측정 서버 선택

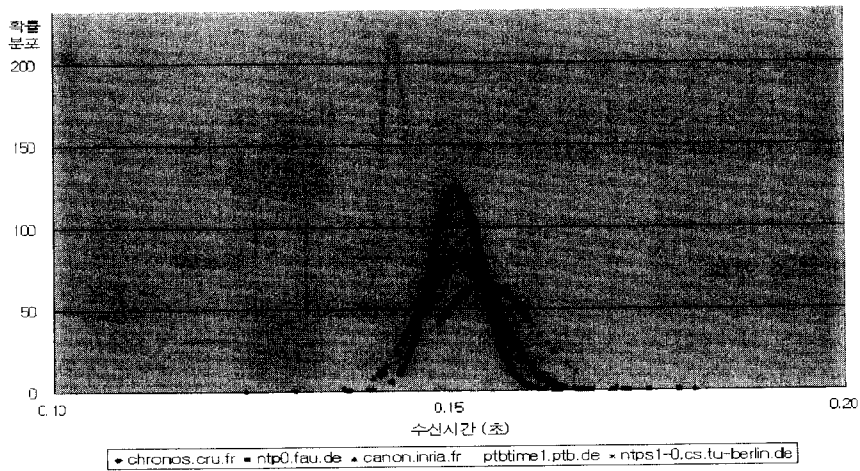
측정에 의한 분포 측정의 한계를 가급적 배제하기 위해 대상 서버의 선택을 고려하였다. 예를 들면, 각 대륙별 인터넷 연결 특징들이 다를 수도 있으므로 서버 선택을 위해 간단한 전송지연 측정을 해 보았다. <표 1>은 20개의 서버를 임의로 선택하여 측정한 결과를 나타내고 있고, 홉 수에 관계없이 일주지연이 유동적임을 알 수 있다. 따라서 지연 오류 측정 대상 서버는 그 물리적 위치에 상관없이 임의로 선정해도 그 분포 결과를 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

3.2 송·수신 지연 측정

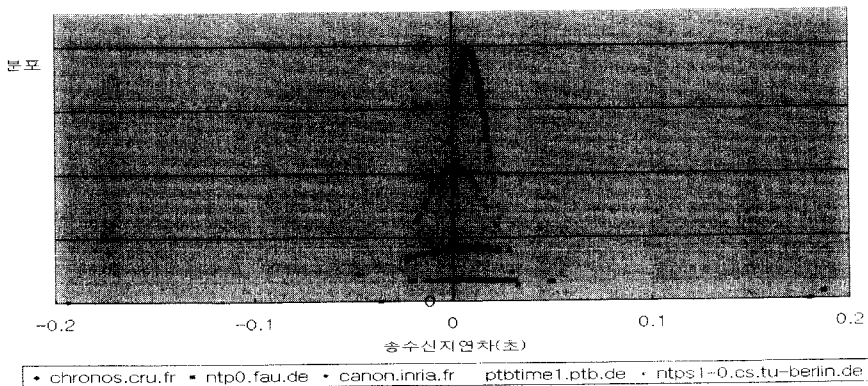
송신 지연 분포와 수신 지연 분포는 비교를 위해 임의로 5대의 서버를 선택하였다. 절대 시각오프셋 비교를 위해 매번 시각소인 메시지를 송수신할 때마다 실험용 PC의 시각 오프셋을 측정하였다. 인터넷에서 단대단 통신 특성에 대한 연구 결과에 따르면, 인터넷 망 구조나 운용 방법에 따라 송신 시와 수신 시는 비대칭 경로 (asymmetric route)를 가질 수 있으나, 그 경로는 임의의 순간에 가변적이지 않고 경로



(그림 4) 송신 지연 분포



(그림 5) 수신 지연 분포



(그림 6) 송수신 지연차 분포 예

〈표 2〉 지연 분포 특성

서버명	송신지연분포		수신지연분포		송수신 지연차 분포	
	평균	분산	평균	분산	평균	분산
chronos.cru.fr	0.1513724694	0.0000150692	0.1513344793	0.0000236243	0.0077866508	0.0023429959
ntp0.fau.de	0.1508938796	0.0000138740	0.1508259301	0.0000104169	0.0086263848	0.0154605404
canon.inria.fr	0.1507660736	0.0000233071	0.1507729393	0.0000239036	0.0016356659	0.0003645403
ptbtime1.ptb.de	0.1430267178	0.0000083533	0.1429571721	0.0000033381	0.0074598236	0.0020296391
ntp1-0.cs.tu-berlin.de	0.1544448837	0.0001291609	0.1543855444	0.0000372055	0.0083984741	0.0001037077

변경과 관련된 구조가 변경되지 않는 한 지정된 경로를 따른다[6]. 그러므로 인터넷의 갑작스런 트래픽 변화를 제외하고는 정규분포 형태의 평균적인 전송 지연을 나타낼 것으로 판단된다. 측정결과, 송신 및 수신 각각의 지연 분포는 정규 분포의 형태를 나타내고 있으며, 송수신 지연차의 분포 역시 정규분포를 나타내고 있음을 확인하였다. <표 2>는 송신지연, 수신지연, 송수신 지연차의 분포를 평균과 분산값이다.

(그림 4), (그림 5), (그림 6)은 각각 송신, 수신, 송수신 지연차에 대한 분포도이다. 분포특성은 차이가 있으나, 임의로 선택된 서버들이 모두 정규 분포의 형태를 나타낸다. 분석 결과 및 실측 결과에 의해 동적 선형 모델을 적용하여 시각오프셋을 추정하기 위한 전제조건이 만족하므로, 본 논문에서 제안한 칼만 필터를 사용한 시각오프셋 추정 모델이 적용될 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 SNTP에서 사용하고 있는 일주지연 오류 요소를 포함한 시각오프셋 추정식을 재분석하여, 시각오프셋 추정 모델을 제안하고, 시각오프셋 추정의 가장 큰 오류 요소로 송수신 지연차가 작용함을 도출하였다. 이에, 송수신 지연차를 시각오프셋 추정에 적용할 수 있고, 보다 안정적인 시각오프셋 샘플을 추정하기 위해 동적선형모델의 대표적 알고리즘인 칼만 필터를 적용하였다. 칼만 필터를 적용하기 위해서는 시계열 데이터 특성뿐만 아니라, 오차항의 분포가 정규분포를 따라야 하므로 대표적 오차항인 송수신 지연차의 분포를 측정을 통해 확인하고 시각오프셋 추정에 칼만 필터 적용이 타당함을 보였다. 인터넷의 특성이나 전송 지연 등은 정확히 모델링 할 수 없기 때문에 인터넷에서의 전송지연과 관련된 연구들은 실험적인 측정 데이터에 근거해서 진행되고 있고, 본 논문에서도 송수신 지연차는 여러 측정 데이터를 기반으로 하였다. 향후 칼만 필터를 통한 시각오프셋 추정 모델 결과를 SNTP와 같은 유사 프로토콜 기반 시각오프셋 추정 결과와 비교하여 제시하고, 보다 안정적이고 정확한 시각오프셋 추정을 위해 NTP의 클러스터링, 결합 단계에 적용할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 계속되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] D. Mills, "Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI," DARPA Network Working Group Report RFC-2030, October, 1996.
- [2] R. L. Filler, J.R. Vig, "Long term aging of oscillators," Proc. 1992 IEEE Frequency Control Symposium, May, 1992.
- [3] D. Mills, "Network Time Protocol (v3)," DARPA Network Working Group Report RFC-1305, April, 1992.
- [4] Greg Welch, Gary Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," Dec., 1995.
- [5] Vern Paxson, "Measurements and Analysis of End-to-End Internet Dynamics," PhD. thesis, University of California, Berkeley, 1997.
- [6] Sue B. Moon, Paul Skely, Don Towsley, "Estimation and Removal of clock skew from network delay measurements," INFOCOM '99, pp.227-234, 1999.
- [7] www.ntp.org.
- [8] www.symmetricom.com.
- [9] 손건태, 김성덕, "전지구수치모델 결과와 동적선형모형을 이용한 서울지역 일 최고/최저기온 중기 예측," 기상학회, 2000.
- [10] HP, "HP59551A and HP58503A GPS Receivers Operating and Programming Guide," HP, May, 1996.
- [11] David. L. Mills, "Unix Kernel Modification for Precision Time Synchronization," Electrical Engineering Department University of Delaware Technical Report 94-10-1, Oct., 1994.



유 동 희

e-mail : dhyu@cup.ac.kr

1992년 부산대학교 전자계산학과(학사)

1994년 부산대학교 대학원 전자계산학과 (이학석사)

2001년 부산대학교 대학원 전자계산학과 (이학박사)

1994년~1997년 한국전자통신연구원 연구원

2000년~2002년 (주)이김전자부설연구소장

2002년~현재 부산가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 선임강사

관심분야 : 인터넷 시각동기, 멀티미디어통신시스템, 위치기반 서비스, GPS, 홈네트워크 등



황 소 영

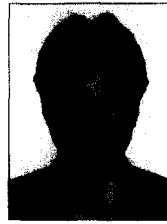
e-mail : youngox@pusan.ac.kr

1999년 부산대학교 전자계산학과(학사)

2001년 부산대학교 대학원 전자계산학과
(이학석사)

2003년 부산대학교 대학원 전자계산학과
박사수료

관심분야 : 컴퓨터 통신 및 네트워크, 임베디드 시스템, GPS
응용 등



김 용 호

e-mail : yhkim@icomm.re.kr

1993년 부산대학교 전자계산학과(학사)

1995년 부산대학교 대학원 전자계산학과
(이학석사)

2003년 부산대학교 대학원 전자계산학과
박사수료

1995년~현재 한국기계연구원 선임연구원

관심분야 : 인터넷 응용, 스마트 홈 서비스, 홈 네트워크 제어,
데이터베이스