

사물인터넷 시스템을 위한 센서 융합 FPGA 구현

Implementation of a Sensor Fusion FPGA for an IoT System

정 창 민*, 이 광 엽**, 박 태 룡***

Chang-Min Jung*, Kwang-Yeob Lee**, Tae-Ryong Park***

Abstract

In this paper, a Kalman filter-based sensor fusion filter that measures posture by calibrating and combining information obtained from acceleration and gyro sensors was proposed. Recent advancements in sensor network technology have required sensor fusion technology. In the proposed approach, the nonlinear system model of the filter is converted to a linear system model through a Jacobian matrix operation, and the measurement value predicted via Euler integration. The proposed filter was implemented at an operating frequency of 74 MHz using a Virtex-6 FPGA Board from Xilinx Inc. Further, the accuracy and reliability of the measured posture were validated by comparing the values obtained using the implemented filters with those from existing filters.

요 약

본 논문에서는 자이로 센서와 가속도 센서로부터 얻은 정보를 보정 및 융합하여 자세를 추정하는 칼만 필터 기반 센서 융합 필터의 설계를 제안한다. 최근 센서 네트워크 기술의 발전으로 인해 센서 데이터의 융합 기술이 요구되고 있다. 본 논문에서는 필터의 비선형 시스템 모델을 Jacobian Matrix 연산을 통해 선형 시스템 모델로 변환하며, 오일러 적분을 통해 추정 값을 예측한다. 제안한 필터는 Xilinx 사의 Virtex-6 FPGA Board 를 이용하여 구현하였다. 구현한 필터는 74MHz 동작 주파수로 동작하며, 기존 필터들과 구현한 필터를 비교하여 추정 자세의 정확도 및 신뢰도를 확인하였다.

Key words : Internet of Things, Sensor, Kalman Filter, Sensor Fusion, Sensor hub

1. 서론

최근 다양한 분야에서 디바이스, 네트워크, 플랫폼, 서비스를 융합하여 현실과 가상세계의 모든 정보와

상호작용하는 IoT(Internet of Things) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. IoT 기술은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 여러 개의 물리적 센서로부터 정보를 추출하여 융합하는 센싱 기술, 인간과 사물 그

* NEXTCHIP Co., Ltd

** Dept. of Computer Engineering, Seokyeong University

★ Corresponding author

Email: tpark@skuniv.ac.kr, Tel: +82-940-7742

※ Acknowledgment

This research was supported by Seokyeong University in 2012.

This work was supported by the Industrial Core Technology Development Program (10049192, Development of a smart automotive ADAS SW-SoC for a self-driving car) funded By the Ministry of Trade, industry & Energy

Manuscript received Apr. 1, 2015; revised May. 26, 2015 ; accepted May. 27, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리고 서비스를 연결시키는 유무선 통신 및 네트워크 기술, IoT 의 3대 구성 요소인 인간과 사물 그리고 서비스를 특정 어플리케이션과 연동하는 서비스 인터페이스 기술이 있다. 이러한 IoT 기술 분야 중에 특히, 스마트 디바이스(Smart Device) 의 확산 및 웨어러블 디바이스(Wearable Device) 의 보급으로 디바이스와 주변 센서의 인터페이스를 통하여 정보를 가공 및 처리하는 센서 네트워크 기술이 각광받고 있는데 이를 통해 사용자에게 유용한 서비스를 제공할 수 있다.[1] 주변 센서로부터 정보를 수집하거나 스마트 디바이스 환경에서 제한된 센서를 통해서 정확한 정보를 가공 및 처리하면서 저전력으로 동작하는 조건을 충족시키려면 센서 융합 필터의 하드웨어 설계가 필요하다.

II. 본론

1. 기존 필터 연구

가. Kalman Filter

칼만 필터는 시스템 모델을 설계하고 실제 측정 값을 이용하는 Recursive Filter 로써 모든 선형 시스템에 적용 가능하다. 칼만 필터는 평균 필터와 같이 n - 1 번째까지 진행한 추정 값을 기반으로 n 번째 추정 값을 도출하기 때문에 정밀한 계산이 가능하고 잡음의 제거에도 효과적이다.

전체적인 프로세스는 아래 그림 1과 같다. 제일 처음 초기값을 선정하고 예측 부분과 업데이트 부분으로 분류된 Step 2 ~ Step 5 과정을 반복함으로써 추정 값을 도출한다. 즉, 예측 부분에서는 현재 상태 값의 예측을 하며, 업데이트 부분에서는 실제 측정 값을 포함한 예측을 통해서 더욱 정밀한 현재 상태의 추정 값을 계산한다.[2]

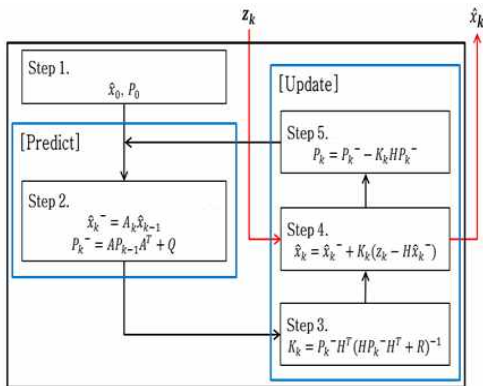


Fig. 1. Kalman filter process
그림 1. 칼만 필터 프로세스

칼만 필터는 기본적으로 시스템 모델의 선형성을 가정하여 구현된 알고리즘이다. 하지만 실제 시스템 모델은 대부분 비선형성을 가지고 있는데, 비선형성을 띤 성분의 선형성을 가정하여 구현된 칼만 필터에서 필터링을 하게 되면 정확하지 않은 결과가 나오게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 선형성을 가정하여 구현된 칼만 필터를 비선형성 모델에서도 사용할 수 있게끔 확장하여야 한다.[3] 좀 더 일반적인 시스템 모델에서 사용 가능하도록 선형성을 완화시킨 칼만 필터로는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter), 무향 칼만 필터(Unscented kalman Filter) 등이 있다. 확장 칼만 필터는 선형적인 모델뿐만 아니라 비선형적인 모델도 적용시킬 수 있는 비선형 칼만 필터이다. 확장 칼만 필터에서는 선형성 대신 상태 변화 함수의 미분가능성을 가정한다. 칼만 필터의 수식에 해당 시간에서 이전 상태에 기반한 상태 전이 행렬과 해당 시간에서 측정되는 관계되는 행렬이 추가된다.

2. 센서 융합 필터 설계

본 논문에서는 Kalman 필터를 기반으로 하는 센서 융합 필터를 설계하였다. 필터의 성능 향상을 위해 다중 센서 융합을 위한 시스템 모델을 설계하였고 IEEE754 Convert Block, Jacobian Function Block, Euler Integral Block, Trigonometric Function Block 을 각각 구현하여 병렬 연산이 가능하도록 하였다. 그리고 비선형 시스템 모델을 고려하여 비선형 함수를 Jacobian Matrix 와 Euler Integral 연산을 통해서 선형 시스템 모델로 변환된다. 이러한 프로세스를 토대로 설계한 가속도 센서와 자이로 센서의 융합 필터 구조는 그림 2와 같다.

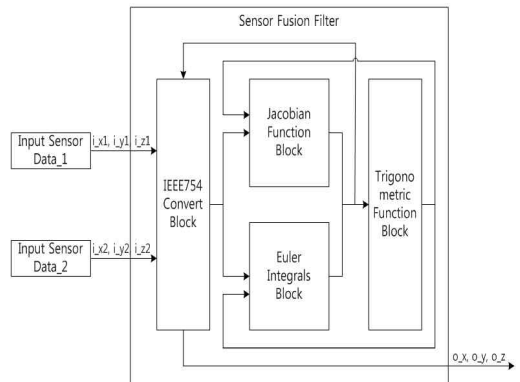


Fig. 2. Block diagram of the sensor fusion filter
그림 2. 센서 융합 필터 블록도

각각의 센서로부터 데이터를 읽어 오고, 이 데이터를 IEEE754 Format 으로 변환하는 과정을 거친 후, Trigonometric Function Block 에서 입력 데이터에 상응하는 삼각함수 값으로 변환한다. 삼각 함수의 값이 반환되면, Jacobian Function Block 과 Euler Integral Block 을 통해 좌표 변환을 거쳐 각각 비선형 모델을 선형 모델로 변환하고, 추정 값을 연산한다. 마지막으로 이렇게 연산된 결과 데이터를 실제 센서 데이터와 비교하여 데이터 보정 및 누적 오차의 제거를 확인한다.

가. IEEE754 Convert Block

IEEE753 Convert Block 에서는 센서로부터 입력 받은 데이터를 필터 내 연산에서 사용하기 위해 부동소수점으로 변환하는 과정을 수행한다. 필터 내 모든 연산은 IEEE754 Single-precision Format 으로 변환된 데이터의 연산을 수행하기 위해 IEEE754 Single-precision Format Input / Output 을 가지는 부동소수점 연산기(Floating Point Unit) 를 통해서 수행된다. 본 논문에서 사용하는 IEEE754 Format 은 Single-precision Format 으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.[4][5]

$$Real\ value = (-1)^{sign} (1 + \sum_{i=1}^{23} b_{23-i} 2^{-i}) * 2^{(e-127)} \quad (1)$$

식 (1)에서 sign 은 31번 bit 의 데이터를, b 는 Mantissa 부분의 bit 의 데이터를, e 는 Exponent 부분의 8-bit 형식의 데이터를 나타낸다. 아래 그림 3은 IEEE754 Convert Block 의 구조이다.

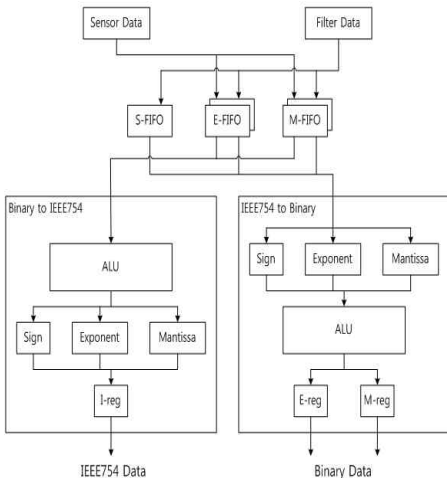


Fig. 3. IEEE754 Convert block diagram
그림 3. IEEE754 Convert 블록도

나. Jacobian Function Block

Jacobian Matrix 는 좌표 변환을 목적으로 사용되는 행렬이다. 설계한 필터의 시스템 모델은 비선형 모델이다. 이러한 비선형 모델을 필터에서 사용하기 위해서는 선형 모델로 변환 시켜줘야 하는데, 이 때 변환에 사용되는 행렬이 Jacobian Matrix 이다. Jacobian Matrix의 시스템 모델의 미분을 통해 식 (2)와 같은 선형화된 시스템 모델 행렬식을 얻을 수 있는데 이 행렬식을 사용하여 Jacobian Function을 수행한다.[6]

$$\begin{pmatrix} q\cos\phi\tan\theta - r\sin\phi\tan\theta & q\sin\phi(\sec\theta)^2 + r\cos\phi(\sec\theta)^2 & 0 \\ -q\sin\phi - r\cos\phi & 0 & 0 \\ q\cos\phi\sec\theta - r\sin\phi\sec\theta & q\sin\phi\sec\theta\tan\theta + \cos\phi\sec\theta\tan\theta & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

아래 그림 4는 Jacobian Function Block 의 구조이다.

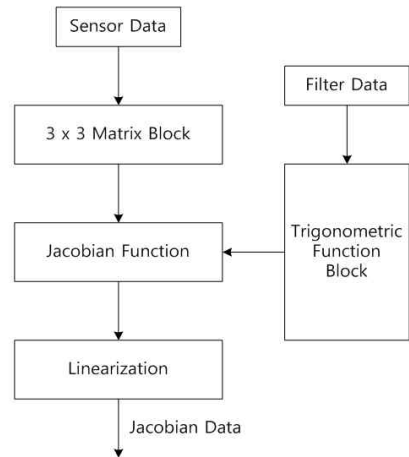


Fig. 4. Jacobian Function block diagram
그림 4. Jacobian Function 블록도

다. Euler Integral Block

Euler Integral Block 은 센서로부터 입력 받은 신호 데이터를 오일러 각의 변화율로 나타내고, 적분을 통해 추정 값을 계산한다. 가속도 센서나 자이로 센서의 경우 가속도와 각속도가 출력되는 센서이다. 이런 데이터를 설계한 필터의 시스템 모델인 비선형 모델을 통해 연산되는데, 이 때 선형성 모델로 변환 및 추정 값 예측을 하기 위해서는 오일러 각으로 변환이 필요하다.[7] 이동 속도와 회전 각속도가 모두 0이라고 가정했을 때의 g값과 수식 (3)을 이용하여 오일러 각으로의 변환이 가능하다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{-y}{g\cos\theta}\right), \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{x}{g}\right) \quad (3)$$

아래 그림 5는 설계한 Euler Integral Block의 구조이다.

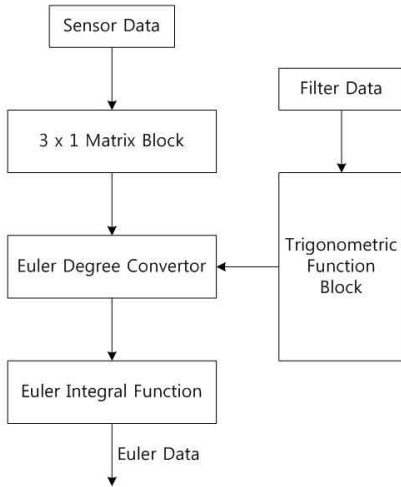


Fig. 5. Euler Integral block diagram
 그림 5. Euler Integral 블록도

라. Trigonometric Function Block

Trigonometric Function Block 은 Filter 전반에 걸쳐 사용되는 삼각함수 연산을 담당하는 Block 이다. 아래 그림 6은 삼각함수 연산의 수행 과정이다.

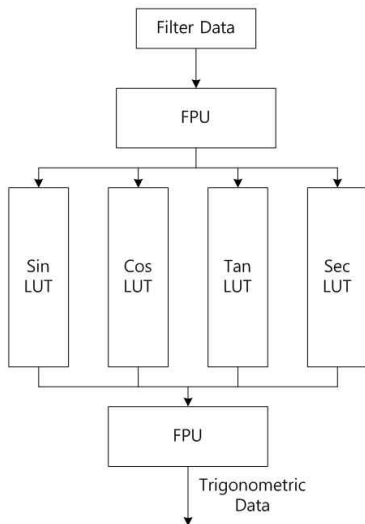


Fig. 6. Trigonometric Function block diagram
 그림 6. Trigonometric Function 블록도

본 논문에서 설계한 Filter 의 시스템 모델 및 연산식은 Sin, Cos, Tan, Sec 총 4종류의 삼각함수를 사용한다.[8] 각각의 삼각함수들은 $0^\circ \sim [180]^\circ$ 의 범위를 가지는 LUT 로 구성되어 있는데, 연산의 정밀도를 높이기 위해서 $[0.01]^\circ$ 단위로 각도를 계산한다. 삼각함수의 많은 연산으로 인하여 본 논문에서는 $[0.01]^\circ$ 단위로 계산된 삼각함수 값들을 LUT로 만들어 사용하였다. Trigonometric Function Block 의 입력 값은 Jacobian Function Block 과 Euler Integral Block 을 거쳐서 나온 추정 값을 사용한다. 추정 값을 삼각함수의 범위에 맞추기 위해 먼저 FPU 를 통해 샘플링을 하고 소수점 둘째 자리까지만 사용하여 해당되는 LUT 에서 필요한 데이터를 얻어 온다. 그리고 데이터를 필터 내 연산과 각각의 Block 에서 사용할 수 있도록 FPU 를 통하여 다시 데이터를 샘플링 하는 과정으로 구성되어 있다.

III 실험 및 검증

본 논문에서 설계한 센서 융합 필터의 구현 및 실험 환경은 Xilinx 사의 Virtex-6를 사용하는 ML605 Board를 사용하였으며 사용 툴은 Xilinx ISE 14.4이며, Matlab R2014b와 ModelSim 10.0b SE를 사용하여 Simulation 을 진행하였다. 본 논문에서 구현한 센서 융합 필터는 Maximum Frequency 74MHz로 동작한다. 센서와 필터 간의 Frequency를 맞추기 위해서 센서로부터 출력되는 입력 신호 데이터를 FIFO Memory를 통해서 입력 받는다. 그 후, 입력 데이터는 필터 내에서 융합 과정을 통해 결과 값을 출력한다. 이 때, 검증 및 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 결과 값을 메모리에 따로 저장한다.

본 논문에서 설계한 센서 융합 필터의 검증을 진행하기 위해 자이로 센서와 가속도 센서의 데이터를 이용하였다. 각각의 데이터는 총 5000개의 표본을 가진다. 검증에 사용되는 기존 필터로는 칼만 필터(Kalman Filter), 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)를 사용했으며, Matlab R2014b 툴에서 소프트웨어로 구현하였다.

아래 그림 7은 칼만 필터와 설계한 필터와의 추정 자세 값을 비교한 파형이며 아래 그림 8은 확장 칼만 필터와 설계한 필터와의 추정 자세 값을 비교한 파형이다. 파란색 실선(①)이 기존 필터, 빨간색 실선(②)이 설계한 센서 융합 필터의 데이터를 나타낸다. 칼만 필터를 적용한 데이터의 경우 pitch 각에 대해서는 비교적 안정적인 데이터 파형이 출력되었지만 roll 각과 yaw 각에 대해서는 추정 자세 값이 발산하는 모습을 확인할 수 있다. 또한 확장 칼만 필터를 적용한

데이터 역시 roll 각과 pitch 각에 대해서는 비교적 센서 데이터를 잘 반영한 모습을 보이지만 yaw 각에 대해서는 발산하는 모습을 볼 수 있다.

본 논문에서 설계한 센서 융합 필터는 칼만 필터와 확장 칼만 필터와 다르게 yaw 각에 대한 데이터 파형은 발산하지 않는다. 이는 하드웨어 설계 시 Trigonometric Function Block 에서 삼각함수의 각 범위를 소수점 이하 두 번째 자리까지 고정된 부분과 Single-precision Format 에 맞추기 위해 추정 값 계산 시 영향이 크지 않은 소수점 이하 특정 부분을 제거하여 연산 하는 등 세부 연산 부분에서 차이가 나기 때문이다.

실험 결과, 본 논문에서 설계한 센서 융합 필터가 비선형 모델 적용 시 칼만 필터와 확장 칼만 필터가 갖는 결과 값이 발산하는 문제가 해결되었음을 확인할 수 있으며, 가속도 센서와 자이로 센서의 융합이 비교적 안정적으로 융합되는 것을 확인할 수 있다.

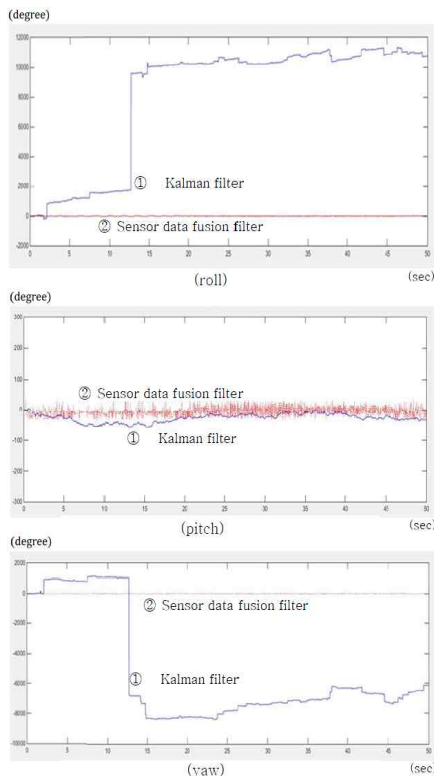


Fig. 7. Comparison of Kalman filter and sensor data fusion filter
 그림 7. 칼만 필터와 센서 융합 필터의 데이터 비교

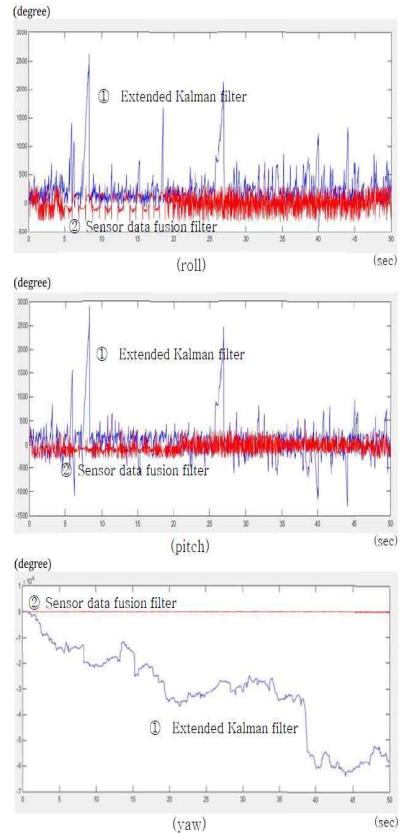


Fig. 8. Comparison of the extended Kalman filter and sensor data fusion filter
 그림 8. 확장 칼만 필터와 센서 융합 필터의 데이터 비교

아래 표 1은 설계한 센서 융합 필터의 FPGA 자원 사용량이다.

Table 1. Resource usage of sensor data fusion filter
 표 1. 센서 융합 필터의 FPGA 자원 사용량

	Used	Available	Utilization
Slice Registers	47,127	301,440	15%
Slice LUTs	94,327	150,720	62%
LUT-FF pairs	16,456	121,998	15%
Bonded IOBs	258	600	43%
Number of DSP48E1s	1	32	3%
BUFG / BUFGCTRLs	272	768	35%

IV 결론

본 논문은 휴대용 디바이스에서 센서 융합을 위한 칼만 필터 기반의 센서 융합 필터를 설계하였다. 설계 플랫폼은 Xilinx 사의 Virtex-6 FPGA Board 인 ML605 Board이며, 74MHz의 동작 주파수를 가진다. 또한, 한 번의 데이터를 받아와 융합하는데 걸리는 시간은 70 clock cycle 이 소요되었다. 설계한 필터의 성능 검증을 위해서 가속도 센서와 자이로 센서의 출력 데이터를 이용하여 Matlab R2014b 환경에서 소프트웨어로 설계한 Kalman Filter, Extended Kalman Filter 와 같은 기존의 센서 데이터 보정 및 융합 필터와의 비교를 진행하였다. 실험 결과, 본 논문에서 설계한 센서 융합 필터 하드웨어 가속기를 스마트 디바이스 및 웨어러블 디바이스와 같은 휴대용 디바이스에서 활용 가능할 것으로 예상되며, 추후 연구를 통해 행동 추론, 자율 주행, 추적 및 관리 등과 같은 여러 분야에 적용 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] C. Perera, "Context Aware Computing for The Internet of Things : A Survey", IEEE Communication Surveys & Tutorials Journal, 2013. 5
- [2] G Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", SIGGRAPH2001, Course 8, 2001.
- [3] Dheeraj Kumar, "Automatic Sensor drift detection and correction using Spatial Kriging and Kalman filtering", DCOSS2013, pp183~190, 2013.
- [4] "IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic", ANSI/IEEE Std 754-1985, p. 0_1, 1985.
- [5] "IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic", IEEE Std 754-2008, pp. 1-58, 2008.
- [6] Jiang Qian, "Online estimation of image Jacobian matrix by Kalman-Bucy filter for uncalibrated stereo vision feedback", IRCA02, Vol.1, pp562~567, 2002.
- [7] B. Chen, "On the Euler measure of finite unions of convex sets," Discrete and Computational Geometry, pp79 - 93, 1993. 10.
- [8] Volder, Jack E. "The CORDIC Trigonometric Computing Technique", IRE Transactions on Electronic Computers, Vol.EC-8, No.3, pp330~334, 1959.9

BIOGRAPHY

Chang-Min Jung (Member)



2013 : BS degree in Computer Engineering, Seokyeong University.
2015 : MS degree in Electronics Computer Engineering, Seokyeong University.
2015~Present : Engineer, NEXTCHIP co., Ltd.

<Research interests> Microprocessor, Embedded System, Image Processing

Kwang-Yeob Lee (Life member)



1985 : Seogang University, Dept. of Electronics Engineering(BS)
1987 : Yonsei University, Dept. of Electronics Engineering(MS)
1994 : Yonsei University, Dept. of Electronics Engineering(Ph.D)
1989~1995.2 : Hyundai Electronics

Inc., Senior Researcher
1995.3~ : Seokyeong Univeristy, Dept. of Computer Engineering, Professor
<Research interests> Microprocessor, Embedded System, 3D Graphics System

Tae-Ryong Park (Member)



1985 : Hanyang University, Dept. of Mathematics(BS)
1987 : Hanyang University, Dept. of Mathematics(MS)
1995 : Hanyang University, Dept. of Mathematics(Ph.D)
1994~ : Seokyeong University, Dept.

of Computer Engineering, Professor
<Research interests> Crypto Algorithm, Computer Security, Computer Arithmetic, Recognition Algorithm