Check for updates

Journal of KIIT. Vol. 20, No. 8, pp. 107-112, Aug. 31, 2022. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.8.107

W-대역 레이더 거리 측정기의 설계 및 성능 분석

김 원 호*

Design and Performance Analysis of W-band Radar Distance Meter

Won-Ho Kim*

"이 논문은 2021년 공주대학교 학술연구지원사업, 중기부 제조기술융합센터 테스트베드 구축사업의 연구지원에 의하여 연구되었음"

요 약

본 논문은 77~81GHz의 W-대역 주파수를 이용한 레이더 거리 측정 센서의 설계와 시작품 시험 평가에 관하여 기술한다. 소출력 전자파를 사용하는 레이더 거리 센싱 방식은 먼지, 수증기, 거품이 많거나 고압이나 극한 온도와 같은 특화된 환경에서 비접촉 고정밀 거리 측정에 적합하여 산업용 및 차량용 스마트 센서 제품에 다양하게 응용되고 있다. 1mm 이내의 거리 측정 정밀도 실현을 위한 FFT와 Zoom-FFT의 주파수 해상도와 최대 20m의 거리 측정을 위한 설계 파라미터를 이론적으로 분석하고 설계에 반영하였다. FMCW 레이더 센서와 마이크로컨트롤러 기반의 시작품을 제작하여 레이더 거리 측정 기능과 성능을 평가하였다. 시작품을 시험한 결과, 거리 측정 기능 요구 사양을 만족하였으며 실용성을 확인하였다.

Abstract

This paper describes the design and prototype test evaluation of a radar distance sensor operating at W-band frequency of 77~81GHz. The radar distance sensing method using low-power electromagnetic waves is suitable for non-contact, high-precision distance measurement in specialized environments such as dust, water vapor, bubbles, high pressure, or extreme temperature, and thus is being applied to various industrial and automotive smart sensor products. The frequency resolution of FFT and Zoom-FFT for realizing distance measurement precision within 1mm and design parameters for distance measurement up to 20m were theoretically analyzed and applied in the design. A prototype based on the FMCW radar sensor and micro-controller was implemented and the function and performance of the radar distance meter were evaluated. As a result of testing the prototype, our work satisfies the specifications for the distance measurement function and confirmed the practicality.

Keywords

radar sensor, radar distance meter, smart sensor, digital signal processing, FMCW, FFT

* 공주대학교 전기전자제어공학부, IT융합기술연구소 교수
- ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7383-299X

· Received: Jul. 25, 2022, Revised: Aug. 16, 2022, Accepted: Aug. 19, 2022
· Corresponding Author: Won-Ho Kim
Division of Electrical, Electronic & Control Engineering, Kongju National University, Republic of Korea
Tel.: +82-41-521-9177, Email: whkim@kongju.ac.kr

Ⅰ. 서 론

소출력 전자파를 이용한 레이더 센서 기술은 단거리 측정이나 레벨 센싱, 장애물 검출, 로보틱스, 트래픽 모니터링, 제스쳐 인식 등의 산업용 및 차량용 스마트 센서 제품에 다양하게 적용되고 있다. 대표적인 비접촉식 거리 측정 방식으로 적외선 방식, 레이저 방식, 초음파 방식, 초고주파를 이용한 레이더 방식이 있지만, 전자파를 사용하는 레이더 측정 방식은 초음파 방식에 비해 먼지, 수증기, 거품이 많거나 고압이나 극한 온도와 같은 특화된 환경에서 고정밀 측정에 많이 사용되고 있으며 적용 분야도 자동차, 보안, 로봇, 교통 분야로 점차 확대되고 있다[1]-[6].

전 세계적으로 소출력 레이더 센싱 기술에 사용되는 주파수도 점차 4-8GHz의 C-대역, 8-12GHz의 X-대역, 12-40GHz의 K-대역, 40-75GHz의 V-대역에서 최근에는 75-110GHz의 W-대역으로 높아지고 있으며 높은 대역의 주파수 적용은 좁은 빔폭, 안테나 소형화, 고지향성, 고정밀도 등의 기능과 성능에 이점이 있다. V-대역이나 W-대역 주파수를 가지는 전파는 밀리미터파로 알려져 있으며 파장 1-10mm, 주파수 30-300GHz의 신호로 파장이 짧아 고분해능의 레이더나 초광대역 통신 등의 분야에서 많이 사용되고 있다.

국내 현황은 무선설비의 기술기준 고시에 따라 거리나 레벨 측정을 위한 산업용 레이더 센서용 주파수는 W-대역의 76~81GHz 주파수가 할당되어 있다. 이외 특정 소출력 레이더 용도의 주파수로 K-대역의 24.25~26.65GHz 주파수가 차량 충돌 방지 레이다용으로 34.275~34.875GHz 주파수가 도로 정보 감지 레이다용으로 배정되어 있고, W-대역의 76~81GHz 주파수는 차량 충돌 방지 레이다용으로도 사용할 수 있다. 현재 산업용 거리 측정용 장비는 K-대역 레이더 응용 제품들이 주를 이루고 있으나, 점차 W-대역을 이용한 비접촉식 레이더 방식의 거리 센싱 기술이나 차량 충돌 방지 레이더 기술에 대한 국내외 수요가 지속해서 증대하고 있다. 이러한 추세에 따라 본 논문에서는 산업용 단거리 측정이나 장애물 검출 등에 응용가능한 W-대역 레이더 센서 기반의 거리 측정 센서를 설계하고 시작품의 기능과 성능 시험 평가에 관해 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 W-대역 77~81GHz 밀리미터파 주파수를 적용한 주파수 변조 연속파(FMCW, Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더 센서 기반의 거리 측정기의 하드웨어 설계와 거리 측정을 위한 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)및 Zoom-FFT 알고리즘의 측정 정밀도(Accuracy)에 대한 이론적 분석에 관해 기술하였으며, Ⅲ장에서는 시작품의 구현과 이를 이용한 거리 측정 기능 시험 및 결과 분석에 관하여 기술하고, 마지막으로 Ⅳ장에서 결론을 기술한다.

Ⅱ. 레이더 거리 측정기의 설계

W-대역 밀리미터파 레이더 거리 측정기의 주요 설계 요구 사양은 표 1과 같다. 거리 측정기의 측정 정밀도 요구 성능은 1mm 이내이며 측정 거리는 최대 20m이다. 동작 주파수는 W-대역 77~81GHz이고 변조 방식은 FMCW 방식을 적용한다. 이러한 규격은 단거리 측정이나 장애물 검출, 로보틱스, 트래픽 모니터링, 제스쳐 인식 등의 산업용 또는 차량용 스마트 거리 센서 응용 제품이나 국내 주파수 법규에 적합한 사양이다.

표 1. 레이더 거리 측정기의 설계 사양
Table 1. Design specifications of radar distance meter

Design parameters	Specification
Operation frequency	77~81 GHz
Modulation bandwidth	4GHz
Modulation method	FMCW
Distance measurement accuracy	< 1mm
Max. measurement distance	< 20m

레이더 거리 측정기의 하드웨어 구성도는 그림 1과 같으며 단일칩 W-대역 레이더 센서, 모니터링 및 제어(M&C) 프로세서, LCD 디스플레이로 구성된다. 단일칩 레이더 센서는 FMCW RF 송수신기, 안테나, ADC, 디지털 신호 처리기를 내장하고 있다. 거리 측정기의 전체 기능과 동작 설명은 다음과 같다.

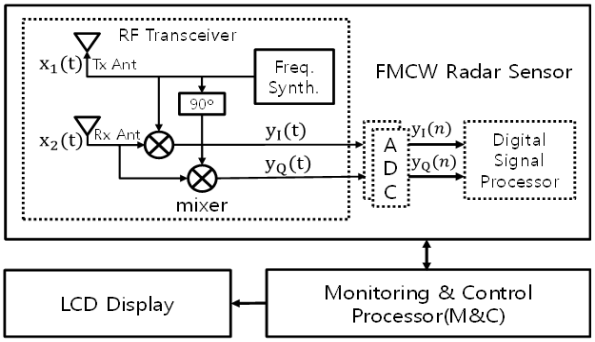

그림 1. 레이더 거리 측정기의 하드웨어 구성도
Fig. 1. Block diagram of radar distance meter

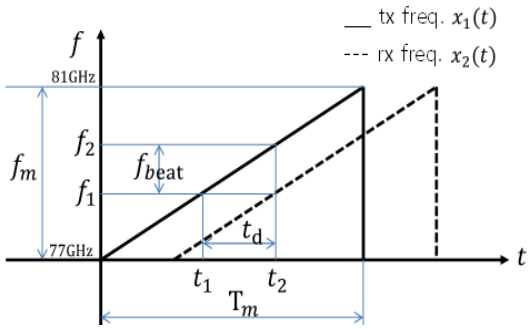

그림 2. FMCW 첩 신호
Fig. 2. FMCW chirp signal

레이더 센서의 주파수 합성기는 그림 2와 같은 77~81GHz 대역의 첩(Chirp) 신호 $x_1(t)$를 주기적으로 발생하여 송신 안테나로 송출하며, 측정 대상인 물체에 반사된 첩 신호 $x_2(t)$를 수신 안테나를 통해 수신한다.

레이더 센서의 수신 신호는 복소 기저대역(Complex-baseband) 방식의 RF 수신단 믹서(Mixer)에 의해 송신 신호와 혼합되어 I-채널과 Q-채널 비트(Beat) 신호를 출력한다. 비트 신호 f_{beat}는 송신 주파수 f_1과 수신 주파수 f_2의 차이 성분(f_1-f_2) 신호를 의미한다. I-채널 및 Q-채널 비트 신호는 ADC에 의해 디지털 신호로 변환되어 디지털 신호 처리기(DSP, Digital Signal Processor)로 입력된다. 물체와의 거리 계산을 위하여 FFT 알고리즘을 이용하며, 주파수 분석을 통해 거리에 비례하는 비트 주파수 f_{beat}를 산출한다. 식 (1)은 비트 주파수 신호의 정의식이며 f_m은 주파수 변조 대역폭, T_m은 첩 주기이며, t_d는 전파 지연시간이며 물체와의 거리가 D이고 광속이 c일 때 $t_d = 2D/c$로 표현된다. c는 광속도이며 $3\times10^8 m/s$이다.

$$f_{beat} = \frac{f_m t_d}{T_m} \tag{1}$$

식 (1)에 전파 지연 신호 $t_d = 2D/c$를 대입하고 물체와의 거리 D에 대해서 정리하면 식 (2)와 같은 거리 산출식이 유도되며 산출된 비트 주파수를 이용하여 거리 D를 최종적으로 계산한다.

$$D = \frac{c T_m f_{beat}}{2 f_m} \tag{2}$$

정확한 거리 측정을 위해서는 거리 측정 정밀도가 중요한 파라미터이며 이를 산출하는 데 있어 비트 주파수의 해상도가 매우 중요한 변수임을 알 수 있다. 요구 사양인 1mm 이내의 측정 정밀도를 만족하기 위한 주파수 해상도와 이와 연계된 거리 정밀도를 이론적으로 분석하여 거리 측정기의 설계 파라미터로 반영한다. 분석을 위한 주요 파라미터로 FFT 샘플 수는 512, FMCW 변조 대역폭은 4GHz, ADC 샘플링 주파수는 4MHz, 첩 주기는 170us로 설정한다. 이를 적용한 FFT에 의한 주파수 해상도 f_{r1}는 식 (3)에 의해 정의되며 7,813Hz로 계산된다. 거리 측정 정밀도 D_{r1}은 식 (4)와 같이 정의되며 산출된 주파수 해상도를 적용하면 49.80mm로 계산된다. 이러한 결과는 설계 요구 성능인 1mm와는 차이가 크다.

$$f_{r1} = \frac{f_s}{N} \tag{3}$$

$$D_{r1} = \frac{c T_m f_{r1}}{2 f_m} \tag{4}$$

1mm 이내로 요구되는 거리 측정 정밀도를 확보하기 위해서는 이론적으로 FFT 샘플 수 N을 증가시켜 주파수 해상도를 개선하려면 적어도 샘플 수가 25,600개가 되어야 거리 정밀도가 0.996mm가 되어 요구 측정 정밀도 구현이 가능하다. 그러나 FFT 샘플 수의 증가는 계산량 증가로 인해 DSP의 실시간 처리나 메모리 용량 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 FFT 수행 후에 피크 주파수 부근의 좁은 관심 대역에 대한 고해상도 스펙

트럼을 구할 수 있는 Zoom-FFT 기법을 적용하면 주파수 해상도를 높일 수 있어 거리 측정 정밀도를 크게 개선할 수 있다[7].

Zoom-FFT의 기능 구성도는 그림 3과 같다. 첫 단계에서 A/D 샘플링된 I-채널과 Q-채널 신호는 믹서를 통해 각각 베이스밴드 신호로 주파수 이동시킨다. 곱해지는 정현파 신호의 f_c는 좁은 관심 영역의 중심 주파수이다. 베이스밴드로 주파수 이동된 스펙트럼은 저역통과필터에 의해 관심 대역 외의 잡음 성분을 제거한다. 이후 다운샘플러를 통하여 M-샘플 데시메이션을 수행하고 이를 FFT 처리한다.

이렇게 하여 얻어진 최종적인 주파수 해상도 f_{r2}는 식 (5)와 같이 정의되며 측정 정밀도는 식 (6)과 같다. FFT와 Zoom-FFT를 순차 적용한 이론적인 주파수 해상도와 측정 정밀도 분석 결과는 표 2에 정리하였다.

$$f_{r2} = \frac{f_s}{N \times M} \tag{5}$$

$$D_{r2} = \frac{cT_m f_{r2}}{2f_m} \tag{6}$$

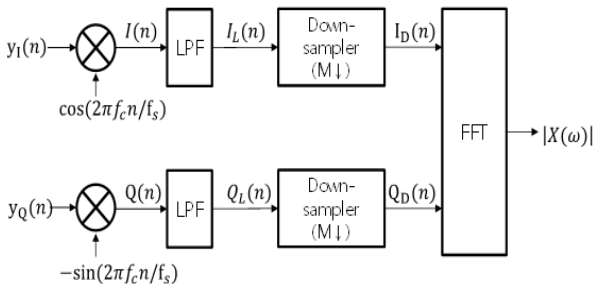

그림 3. Zoom-FFT 알고리즘 구성도
Fig. 3. Block diagram of Zoom-FFT algorithm

표 2. 거리 측정 정밀도 분석 결과
Table 2. Analysis result of distance measurement accuracy

Design parameters	FFT	Zoom-FFT
FFT sample number (N)	512	
FMCW bandwidth (f_m)	4GHz	
Chirp period (T_m)	170us	
Chirp slope (S)	23.53 MHz/us	
Sampling frequency (f_s)	4MHz	
Down-sampling rate (M)	64	
Frequency resolution (f_r)	7,813Hz	122Hz
Distance measurement accuracy (D_r)	49.80mm	0.78mm

표 2에서 Zoom-FFT 알고리즘을 적용한 주파수 해상도는 122Hz이며 거리 측정 정밀도 D_{r2}는 0.78mm로 계산된다. 이는 주어진 설계 요구 조건인 1mm 이내의 측정 정밀도를 만족하는 사양으로 분석된다.

다음은 레이더 센서의 최대 측정 거리에 대한 분석이다. 레이더 센서의 최대 측정 거리는 레이더 수신 신호의 신호 대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio) 또는 비트 주파수 대역폭에 의해 결정된다. 수신 신호의 SNR은 일정하다는 조건하에 최대 측정 거리 $D_{\max}$와 비트 주파수 대역폭과의 관계식은 식 (7)과 같이 정의된다[8]. 복소 샘플링 구조에서 비트 주파수 대역폭 BW_{beat}는 ADC 샘플링 주파수의 0.9배로 제한되며, c는 광속, S는 첩 신호의 기울기(Slope)이다. 이를 적용한 레이더 센서의 최대 측정 거리는 22.95m로 계산되며 설계 요구 사양인 20m를 만족한다.

$$D_{\max} = \frac{BW_{beat} \times c}{2 \times S} \tag{7}$$

마지막으로 모니터링 및 제어(Monitoring&control) 프로세서와 LCD 디스플레이는 레이더 센서의 파라미터 모니터링과 제어, 거리 측정 결과를 실시간으로 LCD에 표시하는 기능을 가진다.

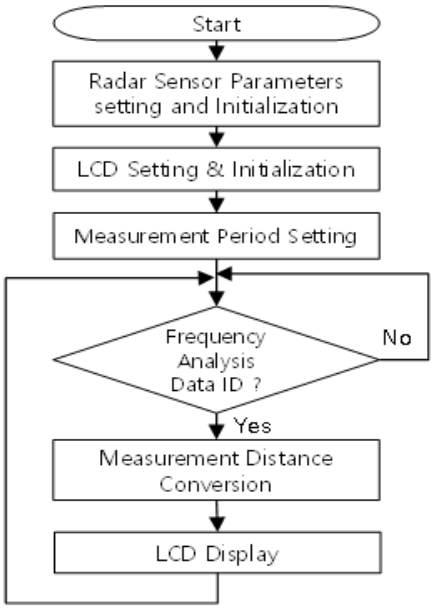

그림 4. 모니터링 및 제어 프로세서의 동작 순서도
Fig. 4. Flowchart of monitoring&control processor

레이더 센서의 주파수 분석 주기는 M&C 프로세서에 의해 0.5초로 설정되며, 이 주기 단위로 주파수 분석 데이터를 M&C 프로세서로 전달한다. M&C 기능 처리를 위한 프로세서의 동작 순서도는 그림 4와 같다.

III. 시험 및 결과 분석

레이더 거리 측정기의 시작품을 제작하여 기능과 성능을 시험하고 결과를 분석하였다. 하드웨어 제작은 레이더 센서 모듈과 제어 프로세서 모듈, LCD 디스플레이 모듈로 3개의 모듈 형태로 구현하였다. 레이다 센서 모듈은 FMCW RF 송수신 기능, 비트 신호 분석을 위한 DSP, AoP(Antenna on Package) 패치 안테나가 단일칩에 내장된 TI사의 레이더 센서를 이용하여 구현하였으며, 고정밀 비트 신호 분석을 위한 FFT와 Zoom-FFT 기능은 내장된 DSP의 펌웨어로 구현하였다. 온칩 패치 안테나 이득을 포함한 레이더 센서의 출력 전력(EIRP, Effective Isotropic Radiated Power)는 16dBm이며 안테나의 6dB 빔폭은 ±60°이다[9].

모니터링 및 제어(M&C) 프로세서 모듈은 범용 8비트 마이크로컨트롤러를 이용하여 M&C 기능을 펌웨어로 구현하였다.

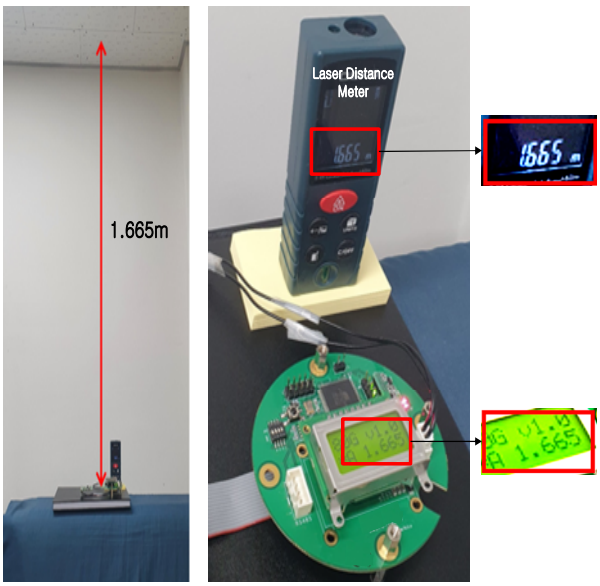

그림 5. 시험 환경 및 시작품 측정 결과
Fig. 5. Photo of test environment and measurement result prototype

M&C 프로세서는 레이더 센서 모듈의 초기화 및 파라미터 설정, 주기적인 주파수 분석 데이터의 수신 처리, 측정 거리 환산, LCD 표시 기능을 가진다. LCD 디스플레이 모듈은 8x2 문자를 표시하는 기능을 가지며 거리 측정 결과를 미터 단위로 표시한다. 구현된 시작품의 기능과 성능을 확인하기 위해 거리 측정 시험을 시행하였다. 그림 5는 레이더 거리 측정기 시작품의 시험 환경과 측정 결과를 보여 준다.

시작품의 거리 측정 기능 시험은 실험실 탁자와 천장 사이의 거리를 상용 레이저 측정기로 실측하고 시작품 측정 결과와 비교하는 시험을 시행하였다.

시험 결과, 그림 5의 우측 위쪽 확대 사진과 같이 레이저 측정기로 측정한 탁자와 천장 간의 거리는 1.665m로 실측되었으며, 그림 5의 우측 아래쪽 확대 사진과 같이 레이더 거리 측정기 시작품을 이용한 측정 거리는 LCD에 1.665m로 표시되어 측정값이 같음을 확인하였다. 결론적으로, 설계 제작한 W-대역 레이더 거리 측정기는 1mm 단위의 정밀도로 거리 측정이 가능하였으며 실용성을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서 77~80GHz W-대역 주파수를 이용한 레이더 거리 측정기를 설계하고, 레이더 센서 기반의 시작품을 제작하여 기능과 성능을 평가하였다. FFT와 Zoom-FFT의 이론적인 주파수 분해능을 분석하고 1mm 이내의 거리 측정 정밀도와 20m의 최대 측정 거리를 만족하기 위한 설계 파라미터를 이론적으로 분석하고 구현에 반영하였다. 기능과 성능을 시험하기 위한 시작품은 패치 안테나가 내장된 W-대역 FMCW 레이더 센서와 8비트 마이크로컨트롤러를 기반으로 구현하였다.

시작품을 이용해 실제 거리 측정을 수행한 결과, 상용 레이저 거리 측정기와 동일한 1mm 단위의 측정 기능과 성능을 보여 주었으며 단거리 측정이나 장애물 검출, 로보틱스, 트래픽 모니터링, 제스쳐 인식 등의 산업용 또는 차량용 스마트 거리 센서 응용 제품에 적용이 가능한 실용성을 확인하였다.

References

[1] M. Vogt, "Radar Sensors(24 and 80 GHz Range)

for Level Measurement in Industrial Processes", IEEE-ICMIM, 2018. https://doi.org/10.1109/icmim.2018.8443505.

[2] Ahmet Serdar Turk, Ahmet Kenan Keskin, Husamettin Uysal, Ahmet Kizilay, and Salih Demirel, "Millimeter Wave Short Range Radar System Design", IEEE Radar Methods and Systems Workshop, 2016. https://doi.org/10.1109/rmsw.2016.7778554.

[3] Peter Gulden, Martin Vossiek, and Markus Stelzer, "Application of state-space frequency estimation to a 24-GHz FMCW tank level gauging system", European Microwave conference, Vol. 3, 2003. https://doi.org/10.1109/euma.2003.341131.

[4] Eugin Hyun, Sang-Dong Kim, Yeong-Hwan Ju, and Jong-Hun Lee, "FPGA based signal processing module design and implementation for FMCW vehicle radar systems", IEEE International Conference on Radar, Vol. 1, pp 273-275, 2011. https://doi.org/10.1109/cie-radar.2011.6159531.

[5] Hai Chen, Yan Li, and Xin-Min Wang, "Digital Signal Processing for A Level Measurement System Based on FMCW Radar", IEEE International Conference on Control and Automation, pp 2843-2847, 2007. https://doi.org/10.1109/icca.2007.4376881.

[6] Stuchly, Hamid, and Andres, "Microwave Surface Level Monitor", IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. 18, pp. 85-92, 2006. https://doi.org/10.1109/tieci.1971.231107.

[7] Suk-Jun Ji, Woo-Jin Choi, Kyung-Yup Kim, and John-Tark Lee, "A study on the precise distance measurement for radar level transmitter of FMCW type using correlation analysis method", 13th SCIS-ISIS, pp 2009-2014, 2012. https://doi.org/10.1109/scis-isis.2012.6505065.

[8] Application report for Programming Chirp Parameters in TI Radar Devices: https://www.ti.com. [accessed: Jun. 30, 2022]

[9] Datasheet of Single-chip 77- and 79-GHz FMCW radar sensor: https://www.ti.com. [accessed: Jun. 30, 2022]

저자소개

김 원 호 (Won-Ho Kim)

1985년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
1987년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
1999년 2월 : 충남대학교 전자공학과(공학박사)
1989년 12월 ~ 1999년 8월 : 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
1999년 8월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수
관심분야 : 영상/통신 신호처리, 위성멀티미디어통신, 지능형 영상감시 및 비전센서