Touchless User Interface for Real-Time Mobile Devices

정 일 룡* · 니콜라이 아카티예프** · 장 원 동*** · 김 창 수[†]
(Il-Lyong Jung · Nikolay Akatyev · Won-Dong Jang · Chang-Su Kim)

Abstract - A touchless user interface system is proposed for real-time mobile devices in this work. The proposed system first recognizes the position of pattern to interact various applications based on the scene taken from mobile camera. Then, the proposed system traces the route of the pattern, which estimates the motion of pattern based on the mean-shift method. Based on this information, we control menu and keypad for the various applications. Differ from other user interface systems, the proposed system provides the new experience to even for the user of low-end mobile without additional hardware. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm provides better interaction performances than the conventional method, while achieving real-time user interacting for mobile devices.

Key Words : User Interface, User interaction, Touchless UI

1. 서 론

최근 통신 및 영상 기술의 급격한 발전에 따라, 기존의 유선 통신 시장 위주의 산업에서 휴대 단말 기반의 무선 통신 시장으로 전환되었다. 사용자의 요구에 따라 휴대 단말은 점차 기존의 단순 전화 기능에서 DMB (digital multimedia broadcasting), PMP (portable multimedia player) 등과 같은 각종 멀티미디어 기능을 지원해주는 장비로 발전하였다. 따라서 휴대 단말은 음악 감상, 게임, 사진 촬영 등 다양한 기능 제공을 통하여 점차 생활의 일부분으로 자리잡게 되었다. 따라서 다양한 기능을 제공하기 위해서 최근 대부분의 휴대 단말은 최소 VGA급 이상의 고해상도 디스플레이, 고성능의 CPU, DSP (digital signal processor)를 포함하고 있다. 하지만 다양한 기능을 제공하기 위해서는 보다 효과적인 유저 인터페이스 시스템이 필요하다.

일반적으로 휴대 단말에 사용되는 유저 인터페이스 시스템은 4×3 키패드를 기반으로 하는 문자 맵핑이 보편적이다 [1]. 4×3 키패드 방식의 유저 인터페이스는 간단한 숫자 입력이나 메시지 전송 등에서 사용되어지나, 다중 입력 등의 한계가 있다. 4×3 키패드와 달리 보다 효율적인 다중 입력을 위하여 컴퓨터 입력에 주로 쓰이는 QWERTY 키패드 방식의 유저 인터페이스가 휴대 단말에서 사용되었다. 하지만

이 한정된 입력만 가능한 제약이 있다. 최근 이러한 단점을 보완하기 위해서 휴대 단말에 터치 패널 기반의 하드웨어를 추가한 터치 유저 인터페이스가 널리 보급되었다 [2]. 터치 기반의 유저 인터페이스 기법은 종래의 단일 입력만 가능하던 한계에서 벗어나 멀티 터치 기능을 제공하는 등 기능적 발전과 함께 널리 사용 되고 있다 [3]. 그 이외에도 음성 명령 기능을 내장한 음성 입력 기반의 유저 인터페이스[4], 진동 및 틸트 등의 움직임을 예측할 수 있는 센서 기반의 유저 인터페이스 등이 개발되었다 [5]. 음성 입력 기반의 유저 인터페이스는 이동성이 증시되는 휴대 단말의 특성상 한정된 유저 인터페이스 크기에 따른 불편함을 최소화하기 위해서 검색어 등을 음성으로 간단히 입력할 수 있어, 최근 대부분의 휴대폰에서 사용되고 있다. 센서 기반의 유저 인터페이스 또한 단말 회전에 따른 화면 피벗 기능 등을 제공할 수 있어, 최근 널리 사용되고 있다. 하지만 이와 같은 음성 입력 기반의 유저 인터페이스나 센서 기반의 유저 인터페이스는 기존의 다른 유저 인터페이스를 보조하는 역할에 한정되어 그 효용성에 제약이 있다. 또한 터치 기반의 유저 인터페이스나 센서 기반의 유저 인터페이스는 터치 스크린이나 센서 등의 부가적인 하드웨어를 요구하기 때문에 기존의 휴대 단말에 적용하기 힘든 단점이 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 최근 휴대 단말에 내장되어 있는 카메라를 활용하여, 손동작을 검출하여 이를 유저 인터페이스 제어에 활용하는 휴먼 컴퓨터 인터랙션 (human-computer interaction, HCI) 기반의 비접촉 유저 인터페이스 시스템을 제안한다. 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 기법은 먼저 사용자에게 해 정의된 패턴을 등록하고, 기 등록된 패턴의 제어 정보를

* 비 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 석박사통합과정
** 비 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 석사과정
*** 비 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 학사과정
[†] 교신저자, 정회원: 고려대 공대 전기전자전파공학부 부교수
E-mail : changsukim@korea.ac.kr
접수일자 : 2010년 12월 16일
최종완료 : 2011년 1월 24일

그림 1 제안하는 비접촉 제어 기법

Fig. 1 Proposed Touchless User Interface

추출하여, 이를 휴대 단말에 적용한다. 이 때, 휴대 단말의 이용 특성상 발생할 수 있는 환경 변화에 대응하기 위하여, 정규화 상관 계수 (normalized correlation coefficient) 기반의 패턴 검출을 실시한다. 또한 평균 이동 (mean-shift) 기법을 사용하여, 패턴을 추적하여 다양한 어플리케이션을 제어한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 HCI 관련 논문을 살펴보고, III장에서는 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 시스템에 대하여 도시하고, 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 시스템 및 다양한 어플리케이션 적용에 대하여 살펴보고, IV장에서는 논문의 실험을 통하여 제안하는 시스템의 성능을 검증한다. 최종적으로 V장에서는 논문을 결론짓는다.

2. 기존의 연구

기존 유저 인터 페이스의 단점을 보완하기 위하여, 피부색 검출 및 추적 기술 [6]-[8] 기반의 휴먼 컴퓨터 인터랙션 (HCI) 기반의 기법들이 제안되었다. 그중에서도 휴대 단말을 위한 카메라 기반의 유저 인터페이스 기법이 제안되었다 [9]-[13]. Roh [9]는 블록 기반의 움직임 예측을 기반으로 휴대 단말의 이동이나 회전 등을 예측하여 제어하는 알고리즘을 제어하였다. [10]에서는 칼만 필터를 기반으로 피부색을 추적하는 유저 인터페이스 기법이 제안되었다. 하지만 이와 같은 시스템은 높은 연산량을 요구하여, 다양한 어플리케이션에 적용하기가 힘들다. [11]에서는 촬영된 장면의 특성을 분석하여 저 복잡도 기반의 알고리즘을 제안하였다. 하지만 이 방식은 반복적인 패턴이 나오는 장면에서는 정확하지 않은 제어 정보를 추출하는 단점이 있다. [12]에서는 사람의 얼굴을 추출하여 이를 유저 인터페이스 정보로 활용하는 기법이 제안되었고, [13]에서는 손가락 추적 기반의 알고리즘이 제안되었다. 이 기법들은 휴대 단말 내에서 실시

그림 2 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 구조도

Fig. 2 The structure of proposed user interface

간 연산이 가능하나, 화면에 하나의 객체가 있다는 가정하에 개발되었기 때문에, 다중 객체가 장면 안에 존재할 경우, 정확하지 않은 제어 정보를 추출하게 된다.

3. 비접촉 유저 인터페이스

그림 2는 제안하는 비접촉 유저 인터페이스의 구조를 도시하고 있다. 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 기법은 3G 휴대 단말에 기본적으로 내장되어 있는 안쪽, 바깥쪽 카메라를 통하여 취득된 영상을 기본으로 한다. 취득된 영상과 기 등록된 패턴의 분석을 통하여 비접촉 유저 인터페이스 시스템을 수행한다.

3.1 비접촉 유저 인터페이스 제어 시스템

우선적으로 사용자가 원하는 패턴을 휴대 단말에 입력하는 패턴 초기화 단계를 수행한다. 사용하는 패턴은 사용자의 손가락이나 얼굴 등 다양한 패턴을 사용할 수 있으나, 패턴의 종류에 따라서 그 인식률의 차이가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 RGB 세 가지 색상과 흰색 색상을 조합한 패턴을 사용하였다. 제안하는 시스템에 기 등록된 패턴 정보를 이용하여, 입력된 영상에서 패턴의 초기 위치를 검출한다. 입력된 영상을 I , 초기 등록된 패턴을 K 라고 가정하였을 때, (x, y) 위치 위에 위치하여 있는 입력 영상 정보는 $I(x, y)$, $K(x, y)$ 가 된다. 이 때, 소벨 연산기를 이용하여, 영역만을 비교하여 예측과 추적을 수행한다. 패턴을 휴대 단말에 내장되어 있는 카메라는 밝기 변화에 민감할 뿐만 아니라, 이동 기기의 특성을 가지는 휴대 단말의 사용 환경의 변화가 민감함으로 다양한 밝기에서도 높은 정확도를 보이는 평균 상관 계수 기반의 패턴 검출 기법을 사용한다. 본 논문에서는 Lewis가 제안한 저 복잡도 기반의 평균 상관 계수 기법을 기반으로 패턴 검출을 수행하였다 [14]. 입력된

그림 3 평균 이동 기법 기반의 패턴 추적

Fig. 3 The mean-shift based pattern tracking

영상 I와 기 등록된 패턴 K일 때, 평균 상관 계수 C는 다음과 같이 정의된다.

$$C(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} [\tilde{k}(x', y') \tilde{I}(x+x', y+y')]}{\sqrt{\sum_{x', y'} [\tilde{k}(x', y')]^2 \sum_{x', y'} [\tilde{I}(x+x', y+y')]^2}}, \quad (1)$$

이 때, 상관 계수 $C(x, y)$ 는 -1부터 1까지 값을 나타내며, 1에 가까울수록 최적의 검출이라고 판단한다.

패턴 검출을 통하여, 기 등록된 패턴 K가 입력된 영상 I 위에서 위치하는 정보를 추출하고, 그림 3과 같이 추출된 패턴을 기반으로 계속적으로 입력받은 영상에서 해당 패턴을 추적한다. 이는 계속적인 패턴 예측은 복잡도가 높기 때문에, 계속적으로 패턴 예측을 수행할 경우 높은 복잡도로 인하여, 휴대 단말과 같이 제한된 하드웨어를 사용하는 기기에 적합하지 않다. 따라서 예측된 패턴의 위치를 기반으로 추후 프레임에서는 일정 추적 범위 내에서 해당 패턴의 위치를 찾는 패턴 추적을 실시한다. 연산량을 최소화하기 위하여, 복잡도가 높은 무차별 대입 방식의 검색 (brute-force search) 방식이 아닌 평균 이동 기법 (mean-shift) 기반의 추적 기법을 기반으로 하는 추적 기법을 제안한다 [15]. 일반적으로 평균 이동 기법의 추적 알고리즘은 반복적으로 칼라 히스토그램을 비교하여 객체를 추적하는 방식을 사용하였다. 비록 평균 이동 기법 최적의 추적 결과를 도출할 수는 없지만, 일정 블록을 기반으로 하는 객체의 검출에는 저 복잡도, 고 정확도의 검출이 가능하다. 이 때, 평균 이동 기법에서 반복 수행 시, 히스토그램의 유사도를 이용하여 다음과 같이 가중치 값 w 을 조정한다.

그림 4 어플리케이션: (가) 어플리케이션 목록, (나) 그림판, (다) 가상 키패드, (라) 카메라

Fig. 4 Applications: (가) Application list, (나) Painting, (다) Virtual Keypad, (라) Camera

$$w[k] = \frac{Hist(KI_I)[k]}{Hist(KI_K)[k]}, \quad (2)$$

이 때, $Hist(KI_I)$ 는 입력된 영상 I위의 커널 KI_I 의 히스토그램 정보를 나타내며, $Hist(KI_K)$ 는 업데이트 된 영상 I위의 커널 KI_K 의 히스토그램 정보를 나타낸다. 가중치 함수 $w[k]$ 를 기반으로, 이전 패턴 커널의 위치에서 평균 이동된 새로운 패턴의 위치 (X_{curr} , Y_{curr})을 추출한다.

3.2 어플리케이션

제안하는 제어 시스템을 통하여 추출된 제어 정보를 이용하여, 사용자의 목적에 따라 어플리케이션의 제어가 가능하다. 본 논문에서는 제안하는 시스템의 적합한 ‘그림판’, ‘가상 키패드’, ‘카메라’ 어플리케이션을 구현하였다.

3.2.1 그림판 어플리케이션

터치 기반의 유저 인터페이스 기법을 제외한 많은 유저 인터페이스 기법은 드로잉 기능을 구현하기가 어렵다. 일례로 키패드 기반의 유저 인터페이스 기법의 경우 곡선 이동이 어렵다. 또한 센서나 음성 기반의 유저 인터페이스 기법 또한 드로잉이 어려운 한계가 있다. 이와는 반대로 터치 기반의 유저 인터페이스는 자유로운 드로잉이 가능하다. 하지만 현재 널리 보급되어 있는 저 사양 휴대 단말의 경우에는 소프트웨어 업데이트를 통해서 터치 기능을 제공할 수 없는 단점이 있다. 하지만 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 기법은 소프트웨어의 업데이트를 통해서 현재 키패드 기반의 저 사양 유저 인터페이스 기법에도 적용 가능하다.

본 논문에서는 그림 4의 (나)과 같이 비접촉 유저 인터페이스를 기반으로 다양한 색상 선택, 드로잉, 지우기 기능을 제공하는 그림판 어플리케이션을 구현하였다.

3.2.2 카메라 어플리케이션

3G 기반의 휴대 단말은 화상 통화를 위하여 기본적으로 카메라가 내장되어있다. 그러므로 대부분의 휴대 단말은 카메라를 통하여 사진 촬영, 편집 등의 카메라 어플리케이션을 내장하고 있다. 따라서 본 논문에서는 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 시스템을 기반으로 하는 카메라 어플리케이션을 구현하였다. 그림 4의 (ㄷ)와 같이 사진 촬영 및 포토 섬네일 기반의 사진 저장 및 불러오기 기능을 구현하였다. 또한 포토 섬네일을 통하여 작은 영상을 미리보기로 제공함으로써 사용자가 제어 시스템을 통하여 선택하였을 때 편집이 가능하도록 구현하였다.

3.2.3 가상 키패드 어플리케이션

휴대 단말의 기본 기능은 다이얼링을 기반으로 하는 영상 통화 기능이다. 따라서 본 논문에서는 가상 키패드를 기반으로 하는 3G 기반의 휴대 단말의 화상 통화를 위하여 기본 입력 기능을 구현하였다. 본 제어 시스템은 키패드 기반의 하드웨어를 가지고 있지 않은 휴대 단말에 적용 가능하도록 화면에 가상 키패드를 구현함으로써 화상 통화와 같은 여러 특정 상황에서도 효과적으로 입력을 할 수 있도록 구현하였다. 그림 4의 (ㄹ)과 같이 3차원 효과와 색상 변화를 통하여 사용자에게 효과적으로 가상 키패드 어플리케이션을 사용할 수 있도록 구현하였다.

4. 실험결과

4.1 실험 조건

본 논문에서는 효과적인 성능 비교를 위하여 PC와 휴대 단말을 이용하여 제안하는 유저 인터페이스 기법의 성능을 확인하였다. PC와는 달리 휴대 단말은 소형기기 때문에, PC와는 달리 다양한 하드웨어적인 제약이 존재한다. 또한 이동 기기으로써 주변 배경이 고정되어 있지 않고, 촬영하는 카메라 기기 또한 고정되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 PC 기반의 시스템과 휴대 단말 기반의 시스템 비교를 통하여 휴대 단말의 제약이 미치는 영향에 대해서 또한 살펴본다.

본 논문에서는 PC 기기 기반의 유저 인터페이스의 성능을 확인하기 위하여 펜티엄 2.4GHz 프로세서와 4GB 메모리를 가지는 PC 기기를 사용하여 실험을 진행하였다. 휴대 단말의 경우 LG GM750 휴대 단말을 활용하여 실험을 진행하였다. LG GM750 단말의 경우 ARM 프로세서 기반의 쿼크 MSM7201A 528MHz 프로세서 및 240x400 해상도의 디스플레이, 256MB 메모리, 500만 화소의 카메라를 내장하고 있다. LG GM750의 경우 윈도우 모바일 6.5을 통하여 구동된다. 제안하는 시스템의 구현을 위하여 PC 버전에서는 C++를 통하여 구현되었고, 휴대 단말에서는 C#을 통하여 구현되었다. PC 버전과 휴대 단말 버전의 정확한 성능 비교를 위하여, 두 시스템에서 동일한 QVGA (320x240) 해상도를 통하여 구동하였으며, 프레임률은 초당 30프레임으로 고정하였다.

4.2 제어 성능 비교

본 논문에서 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 시스템의 제어 성능을 비교하기 위하여, 피부색 인식 기반의 유저 인터페이스 기법과 비교하였다 [16]. 제어 성능 비교를 위하여, 앞에서 구현한 가상 키패드 어플리케이션과 그림판 어플리케이션을 통하여, 제어 성능을 비교하였다. 가상 키패드 어플리케이션은 임의의 숫자를 15번 시도하여 그 성공률을 통하여 에러율을 측정하였다. 그림판 어플리케이션의 경우 제공된 임의의 문양의 루트에 선을 그렸을 경우, 발생하는 오류를 RMSE를 통하여 측정하였다.

가상 키패드 입력 실험 결과는 표 1과 같다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이, 휴대 단말의 경우 제한된 하드웨어 성능에 따라서 PC버전에 비하여 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 또한 제안하는 시스템의 기존 기법에 비하여, 20% 이상의 성능 향상이 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존 기법에서 하나의 객체 이상이 촬영되는 장면 위에 존재할 경우 제어 성공률이 떨어지기 때문이다.

표 1 가상 키패드 어플리케이션 기반의 정확도 비교

Table 1 Accuracy rate of virtual keypad application

환경 \ 기법	기존 기법[16]	제안하는 기법
PC	73.33%	93.33%
휴대 단말	60.00%	86.67%

표 2 그림판 어플리케이션 기반의 정확도 비교

Table 2 RMSE of painting application

환경	기법	에러율
PC	기존 기법[16]	4.302
	제안하는 기법	3.247
휴대 단말	기존 기법[16]	5.120
	제안하는 기법	3.792

그림판 어플리케이션을 통한 RMSE 오류 측정 결과는 표 2와 같다. 앞선 가상 키패드 입력 실험 결과와 유사하게, 휴대 단말과 PC 버전의 성능 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 제안하는 기법의 RMSE 성능이 기존의 기법에 비하여 높은 정확도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 복잡도 성능 비교

휴대 단말을 위한 유저 인터페이스 기법은 제한적인 하드웨어에서 동작을 수행함으로써, 최소한의 복잡도로 동작하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 제안하는 유저 인터페이스 기법의 복잡도 성능 비교를 통하여, 제안하는 알고리즘의 성능을 확인한다. 제안하는 유저 인터페이스 기법은 초당 30 프레임의 복잡도를 나타낸다. 반면 기존 기법의 경우, 초당 17프레임의 성능을 보이고 있어서 복잡도가 제안하는 시스템에 비해서 높은 복잡도를 보이고 있다. 따라서 제안하는 시스템이 휴대 단말과 같이 제한적인 하드웨어 동작에 보다 적합함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 카메라 기반의 비접촉 유저 인터페이스 기법을 제안하였다. 제안하는 비접촉 유저 인터페이스 기법은 기 등록된 패턴을 통하여 영상에서의 사용자의 제어 정보를 예측 및 추적한다. 이 때, 특징점을 추출하여, 최소한의 복잡도와 높은 성능을 나타낸다. 다양한 어플리케이션을 통하여, 제안하는 알고리즘이 휴대 단말에 적합함을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(No. ST090818)과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2010-0027541)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] ITU-T, E.161 : Arrangement of digits, letters and symbols on telephones and other devices that can be used for gaining access to a telephone network, Feb., 2001.
- [2] F. Golshani, "TUI or GUI—It's a Matter of Somatics," IEEE Multimedia, vol.14, no.1, pp.104-104, Jan. 2007.
- [3] Jefferson Y. Han, "Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection," in Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology, Oct. 2005.
- [4] J. I.-Siplia, M. Moberg, and O. Viiki, "Multi-Lingual Speaker-Independent Voice User Interface For Mobile Devices," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 2006.
- [5] J. Rekimoto, "Tilting operations for small screen interfaces," in Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 167-168, Nov. 1996.
- [6] E. Hjelmas and B. K. Low, "Face detection: A survey," Computer Vision and Image Understanding, vol. 83, no.3, pp. 236-274, Sep. 2001.
- [7] J. Brand and J. S. Mason, "A comparative assessment of three approaches to pixel-level human skin-detection," in Proc. International Conference on Pattern Recognition, pp. 1056-1059, Sep. 2000.
- [8] P. Kakumanu, S. Makrogiannis, and N. Bourbakis, "A survey of skin-color modeling and detection methods," Pattern Recognition, vol. 40, no. 3, pp. 1106-1122, Mar. 2007.
- [9] M. Rohs, "Real-World Interaction with Camera Phones," in Proc. International Symposium on Ubiquitous Computing Systems, Nov. 2004.
- [10] J. Hannuksela, P. Sangi, and J. Heikkila, "A Vision-Based Approach for Controlling User Interfaces of Mobile Devices," in Proc. IEEE CVPR, Jun. 2005.
- [11] S. A. Drab and N. M. Artner, "Motion detection as interaction technique for games & applications on mobile devices," in Proc. Pervasive Mobile Interaction Devices Workshop, May 2005.
- [12] A. Bulbul, Z. Cipiloglu, and T. Capin, "A Face Tracking Algorithm for User Interaction in Mobile Devices," in Proc. International Conference on CyberWorlds, Sep. 2009.
- [13] O. Gallo, S. M. Arteaga, and J. E. Davis, "A camera-based pointing interface for mobile devices," in Proc. International Conference on Image Processing, Oct. 2008.
- [14] J. P. Lewis, "Fast normalized cross-correlation," Vision Interface, pp. 120-123, 1995.
- [15] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer, "Kernel-based object tracking," IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 25, no. 5, pp. 564-577, May 2003.
- [16] O. Gallo, S. M. Arteaga, and J. E. Davis, "A camera-based pointing interface for mobile devices," in Proc. International Conference on Image Processing, Oct. 2008.

저 자 소 개

정 일 룡 (鄭一龍)

2006년 : 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사), 2006년 3월~현재 : 고려대학교 전자전기공학과 석박사통합과정
<주관심분야> 3D 영상처리, 멀티미디어 통신

니콜라이 아카티예프

2007년 : Nizhny Novgorod State Technical University (공학사)
2009년 3월~현재 : 고려대학교 전기전자 전파공학부 석사과정
<주관심분야> 영상 처리, UI

장 원 동 (張 源 東)

2011년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 학사과정 (졸업예정), 2010년 9월~현재: 고려대학교 미디어통신 연구실 연구원
<주관심분야> 영상 처리, UI

김 창 수 (金 昌 洙)

1994년 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사), 1996년 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 (공학석사), 2000년 : 서울대학교 대학원 전기공학부 (공학박사), 2000년~2001년 : Visiting Researcher, USC, 2001년~2003년 : 서울대학교 전기공학부 박사후연구원, 2003년~2005년 : Assistant Professor, Chinese University of Hong Kong, 2005년 9월~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
<주관심분야> 비디오 및 3D 영상처리, 멀티미디어통신