

고속 3차원 형상 측정 장치의 효율성 향상에 관한 연구

박승규*, 이일근**, 이영훈**

A Study on the Efficiency Improvement of a 3D Shape Measuring Apparatus With High Speed

Seung-Kyu Park*, Ill-Keun Rhee**, Young-Hun Lee**

요 약

본 논문에서는 정현파 줄무늬 패턴을 이용하여 고속이면서도 정밀하게 측정체 표면의 3차원 형상을 측정하는 시스템을 구성하였다. 또한 획득영상의 위상정보 부족 영역에 대하여 효율적인 위상복원 방법을 사용하여 측정효율을 높이는 방법을 제안하였고 이를 실험적으로 확인하였다. 카메라의 측정각도와 측정체의 형상에 따라 카메라에 획득되는 영상에는 필연적으로 위상 정보가 부족한 영역이 존재하며 본 논문에서는 이 영역을 추출하고 가변 크기의 위상복원 창과 가변 비율을 갖는 정규화 방법을 사용하여 위상을 효과적으로 복원함으로써 시스템의 측정 효율을 높였다.

Abstract

In this paper, we designed a 3D shape measuring system with high speed and high measurement resolution using line-shaped sine stripes of a LCD projector. We proposed an effective method to improve measurement efficiency for a 3D shape measuring system by finding the deficient shape information areas and recovering the shape information efficiently. We experimentally confirmed the improvement of measurement efficiency. Deficient shape information areas can be inevitably existed in a acquired image caused by the camera view angle and surface shapes of an object. The measurement efficiency is turned out to be improved by extracting these shadow areas and recovering the shape information efficiently using both a variable rated normalization and a variable sized phase recovering windows.

* 한국원자력연구소 레이저기술개발팀

** 한남대학교 전자공학과 교수

I. 서론

물체의 표면 형상을 측정하는 기술은 생산라인에서 제품의 자동 결함 검사 시스템의 구성에서나 자동화를 통한 부품 분석 분야 등에서 가장 중요한 분야이다[1]. 측정체의 3차원 표면 형상을 측정하는 방법은 접촉식 센서를 이용하는 기계적인 방법과 비접촉식의 광학적인 방법이 있다. 최근 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 광학식 측정 방법이 빠르면서도 고정밀 측정이 가능하고 경제적이어서 널리 연구되고 응용되고 있는 추세이다. 줄무늬 광을 이용한 측정체의 표면 형상측정 방법은 크게 삼각법에 기초한 중심선 추출방법과 위상맵을 이용한 높이정보 추출방법이 있다[2~4]. 삼각법을 이용한 중심선 추출 방법은 외부유입 노이즈나 측정변수 변화등에 강한 장점이 있는 반면 중심선이 위치한 픽셀에서만 높이 정보를 포함하고 있는 단점이 있다. 위상맵을 이용한 높이정보 추출 방법은 영상내의 모든 픽셀에서 높이 정보를 얻을 수 있는 장점이 있으나 급격한 표면형상 변화와 주변 유입 노이즈 등에 민감한 단점이 있다[5, 6].

광학식 측정방법에서 광원과 카메라는 측정체에 대해서로 다른 각도에 위치하므로 카메라에 획득되는 측정체 영상은 카메라의 관측 각도와 표면형상에 따라 필연적으로 반사율이 낮은 부분이나 음영 부분이 발생된다. 측정체 표면의 반사율이 낮아서 위상정보가 부족한 부분은 정규화 신호처리를 수행하여 어느정도 보정할 수 있다[6]. 그러나 음영 부분에 의해 발생하는 위상 정보 부족하므로 부터 높이 정보를 강제로 추출하면 많은 에러가 포함된 위상 정보가 추출된다. 이러한 에러가 포함된 정보는 위상의 복원과정에서 에러로 나타난다. 에러를 유발하는 음영 부분은 다양한 크기로 나타날 수 있으며 특히 눈에 띄지 않는 미소한 부분에서도 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 이를 효과적으로 제거하여 측정시스템의 측정 효율성을 향상시켰다.

II. 음영영역의 위상 복원을 이용한 형상측정 시스템

2.1 시스템의 구성

정현파 줄무늬 광을 이용한 위상 측정 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 기준면 R에 대하여 일정한 각도에 위치한 LCD프로젝터에서는 컴퓨터에서 생성된 정현파 줄무늬 패턴을 측정체에 조사하고 기준면에 대하여 수직 위치에 있는 카메라는 측정체 영상을 획득한다. 기준면으로부터 같은 거리 L에 위치하는 P와 C는 LCD프로젝터와 CCD 카메라 광학렌즈의 중앙에 위치한다. 거리 d는 LCD 프로젝터와 CCD 카메라 사이의 거리 즉 P와 C 사이의 거리이다.

기준면 위에 위치하는 측정체의 표면상에 약간 변형된 줄무늬 패턴을 조사시킬 때, 이를 위치 C에서 보면 더욱 변형이 된 패턴이 얻어진다. 측정체의 표면상 높이 h는 기준면상의 a에 위치하나 위치 C에서 관측을 하면 b와 같다. 광축상에서 보면 h와 b는 이미지 평면상에서 같은 점으로 인식되므로 a에서 b로 이동된것처럼 보인다. 즉 측정체 표면상의 높이 h에 대한 정보는 Fig. 1에서 a와 b사이의 거리로부터 구할 수 있다[5].

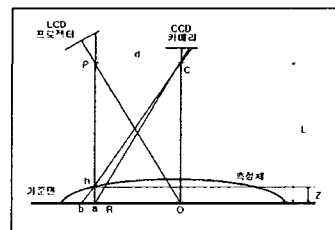


Fig. 1 Configuration of shape measuring system

2.2 3차원 표면 형상 측정을 위한 신호처리

본 논문에서는 정현파 줄무늬 패턴이 조사된 측정체 영상과 줄무늬 패턴이 없는 밝은 흰색 배경을 조사한 측정체 영상을 획득하여 측정체의 3차원 표면형상을 측정하는 알고리즘을 구성하였다. 밝은 배경을 조사한 측정체

영상을 획득한 것은 측정체의 반사도를 정규화하기 위한 것이다. 본 논문에서 구성한 신호처리 알고리즘은 Fig. 2 와 같다. 형상측정 프로그램은 초기단계에서 컴퓨터 환경 과 영상처리보드 및 카메라의 환경을 설정한다. 초기환경 이 설정되고 나면 컴퓨터는 CCD카메라를 사용하여 강도 값 255만으로 구성된 밝은 흰색 배경을 조사한 측정체 영상과 정현파 줄무늬 패턴이 조사된 측정체 영상을 획득 한다. 획득된 영상은 LCD프로젝터와 카메라가 서로다른 각도에 위치하므로 카메라의 관측각도와 측정체의 표면 형상에 따라 위상정보가 없거나 부족한 다양한 크기의 음 영 부분들이 발생할 수 있다. 이러한 음영 영역들은 측정 체 표면의 반사율이 낮아서도 발생할 수도 있고 카메라의 관측각도에서 볼 때 관측되지 않는 그림자 영역으로 인해 발생할 수도 있다. 전자의 경우에 의해 발생하는 경우는 정규화 과정으로 어느정도 극복이 가능하다(6). 그러나 반사율이 아주 낮거나 후자의 큰 그림자 영역으로 인해 발생하는 영역은 위상정보 자체가 부족하므로 이러한 영 역에 대하여 강제로 위상정보를 추출하면 많은 에러를 유 발한다. 그러므로 본 논문에서는 식 (1)과 같이 적응적 가변크기를 갖는 평균화 창과 가변 정규화 비율을 갖는 정규화 신호처리를 수행하였다.

$$I^n(i,j) = \frac{I_{avg(i,j)}^f}{I_{avg(i,j)}^s \pm ((T_h - I_{avg(i,j)}^s) * w)} \quad (1)$$

여기서 w는 가중치 값이며,

$$I_{avg(i,j)}^f = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I^f(i+x, j+y)}{4 * N * N}$$

$$I_{avg(i,j)}^s = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I^s(i+x, j+y)}{4 * N * N} \text{ 이다.}$$

$I^n(i,j)$ 는 (i,j)위치에서의 정규화된 픽셀 강도값이 고 $I^f(i,j)$ 는 정현파 줄무늬 패턴이 조사된 영상 (i,j)위 치에서의 평균 픽셀강도값이며 $I^s(i,j)$ 는 밝은 배경 조 명이 조사된 영상 (i,j)위치에서의 평균 픽셀강도값이다.

$((T_h - I_{avg(i,j)}^s) * w)$ 항은 정규화 과정에서 평균화된 배경 반사값이 음영상한계값 이하이면서 동시에 음영상 한계값 이상의 값일 경우에는 + 값으로 더해져서 위상 정보 가 부족한 음영 영역에서 정상환경에서와 같은 강한 정규화를 수행하는것을 감소시키는 역할을 수행한다. 이 때 T_h 값은 사용자가 설정한 음영상한계값이다. 또한 이때에는 평균화 세부창의 크기 N값을 크게하여 미소한 크기의 음영 영역이라면 현재 픽셀값을 주위의 많은 정상

픽셀 평균값으로 대체함으로써 에러를 극복한다. 만약 정 규화 과정에서 평균화된 배경 반사값이 포화한한계값 이상의 값일 경우에는 $((T_h - I_{avg(i,j)}^s) * w)$ 항은 - 값으로 감해져서 지나치게 감해지는 정규화 비율을 증가 시킨다. 이때 T_h 값은 사용자가 설정한 포화한 한계값 이다. 만약 정규화과정에서 평균화된 배경 반사값이 음영 상한계값 이상이면서 포화한한계값 이하의 정상 환경 에 있으면 $w=0$ 로 $((T_h - I_{avg(i,j)}^s) * w)$ 항은 0이다. 만약 정규화 과정에서 평균화된 배경반사값이 음영하한경 계값 이하일 경우에는 정규화를 수행하지 않으며 선형보 간방법에 의하여 주위값으로부터 픽셀 값을 보간한다.

측정체 영상의 한 수직방향 프로파일을 보여주는 Fig. 3의 좌측 프로파일은 많은 노이즈 성분이 섞여있음을 알 수 있다. Fig. 3의 우측 프로파일은 측정체 영상에 대하 여 3x3창을 사용하여 평균화한 후의 수직 프로파일을 보여 준다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 하나의 측정체 영상으로 부터 3차원 형상정보를 추출하는 기술에서 평균화 과정은 필수적이다. 그러나 노이즈 성분을 줄이기 위해서 지나친 평균화를 수행하면 위상정보도 함께 감소되므로 본 논문 에서는 정상환경에서는 작은창을 사용하여 평균화를 수행 하였고 상대적으로 위상정보가 부족한 음영 영역에서는 큰 창을 사용하여 잡음에 의한 영향을 줄였으며 국소 음 영 지역을 주위 정상 위상정보로 대체하는 효과를 유도하 였다.

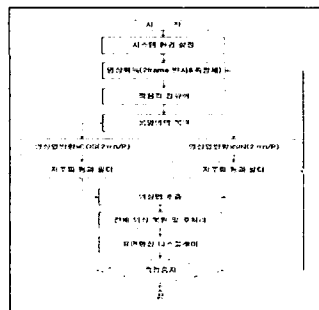


Fig. 2 Flowchart of signal processing

정규화 신호처리를 수행한 줄무늬 패턴 영상은 식 (2) 로 표현할 수 있다.

$$g(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x,y) \cos[\frac{2\pi nx}{p} + n\Phi(x,y)] \quad (2)$$

여기서 p는 줄무늬 패턴의 주기이고 위상 $\Phi(x,y)$ 는 $2\pi x/p$ 에 비하여 저주파 성분의 정보를 포함하고 있다. 그

러므로 본 논문에서는 저주파 특성을 갖고 있는 위상 정보만을 추출하기 위하여, 음영 부분에 대한 위상정보 복원을 수행한 영상을 들로 복사하여 $\cos(2\pi x/p)$ 와 $\sin(2\pi x/p)$ 를 곱하였다. 이때 주기 p 는 배경영상에서 줄무늬 패턴들의 주기 평균값을 사용하였다. 예를들어 $\cos(2\pi x/p)$ 를 곱하면 식 (3)에서 볼 수 있듯이 저주파 항 $\Phi(x,y)$ 만이 분리되어 더하기 성분에 포함되어있어 저주파 통과필터를 사용하여 분리할 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &g(x,y)\cos(2\pi x/p) = \\
 &\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x,y) \cos\left[\frac{2\pi nx}{p} + n\Phi(x,y)\right] \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} a_n(x,y) \cos\left[\left(-\frac{2\pi(nx+x)}{p} + n\Phi(x,y)\right) + \cos\left(\frac{2\pi(nx-x)}{p} + n\Phi(x,y)\right)\right] \\
 &= \\
 &a_0(x,y) \cos\left[\frac{2\pi x}{p}\right] + \frac{1}{2} a_1(x,y) \cos\left[\frac{4\pi x}{p} + \Phi(x,y)\right] \\
 &\quad + \frac{1}{2} a_1(x,y) \cos\Phi(x,y) \\
 &+ \frac{1}{2} a_2(x,y) \cos\left[\frac{6\pi x}{p} + 2\Phi(x,y)\right] \\
 &\quad + \frac{1}{2} a_2(x,y) \cos\left[\frac{2\pi x}{p} + 2\Phi(x,y)\right] + \dots \quad (3)
 \end{aligned}$$

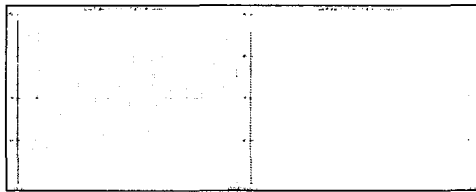


Fig. 3 Vertical line profile of a raw image and a smoothed image

논문에서는 저주파 항 $\Phi(x,y)$ 만을 추출하기 위하여 저주파통과 FIR 필터(LPF)를 사용하여 획득된 영상에 대해 시간영역에서 콘볼루션을 취하였다. 본 논문에서는 Hamming 창과 싱크함수의 급수 전개를 사용하여 시간영역에서 FIR필터를 구성하였다.

영상에 $\cos(2\pi x/p)$ 을 곱한 식 (3)에서 LPF필터를 적용시키면 $\frac{1}{2} a_1(x,y) \cos\Phi(x,y)$ 항이 분리됨을 알 수 있다. $-\frac{1}{2} a_1(x,y) \sin\Phi(x,y)$ 항을 영상에 대해 $\sin(2\pi x/p)$ 를 곱한 식에서 추출할 수 있다. 이로부터 식 (4)를 사용하여 $-\pi \sim \pi$ 사이값으로 구성된 측정체의 높이 정보인 위상값을 구할 수 있다.

$$\Phi(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{-\frac{1}{2} a_1(x,y) \sin\Phi(x,y)}{\frac{1}{2} a_1(x,y) \cos\Phi(x,y)}\right) \quad (4)$$

식 (4)에 의하여 계산된 위상은 $-\pi \sim \pi$ 사이 위상으로 구성된 불연속성을 갖고 있다. 그러므로 본 논문에서는 이 불연속성을 이어주기 위하여 단일 패스 의존적 방법을 사용하여 위상복원을 수행하였다.

III. 실험 및 결과

본 논문에서는 실험을 위하여 LCD 프로젝터를 기준면의 수직방향에 대하여 -20° 에 위치 시켰으며, CCD 카메라를 기준면의 수직방향에 대하여 $+25^\circ$ 에 위치시켰다. LCD프로젝터와 카메라와의 거리는 약 600mm이고 측정체와의 거리는 약 800mm이다. Visual C++ 컴파일러를 사용하여 신호처리 프로그램을 구성하였으며 영상 처리전용보드(Matrox, Meteor2/4)를 사용하여 측정체 영상을 획득하였다. 측정체로는 아세탈을 사용하여 지름 78mm, 높이 9mm인 반원구형을 제작하였다. 본 논문에서 제작한 샘플에 대하여 주기 22.5 픽셀의 정현파 줄무늬 패턴을 주사하였고 저주파 통과필터의 창의 크기는 32픽셀이었다. 본 논문에서는 음영상한계값을 80, 음영하한계값을 60, 포화하한계값을 240으로 설정하였다.

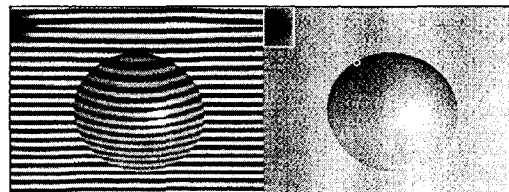


Fig. 4 Object image with projected sine stripes and projected white lights

Fig. 4의 좌측과 우측 영상은 측정체 영상과 배경조명 영상을 보여준다. Fig. 4의 우측 영상에서 원형안의 부분에는 국소 영역의 음영 영역이 존재하는 일부분을 보여주며 사각형안은 넓은 영역의 음영 영역을 보여준다. 이 부분은 후후 위상 정보 추출과정에서 에러를 상대적으로 많이 포함

하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 좌측영상은 평균화 과정 없이 정규화를 수행한 결과이며 노이즈 성분에 의하여 정규화 특성이 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 5의 우측 영상은 본 논문에서 제안한 적응적 정규화 방법을 사용한 결과이다.

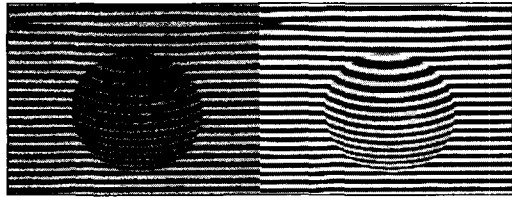


Fig. 5 Normalized image from a raw image and an adaptively normalized image

위상정보가 부족한 음영 부분들은 반사율이 낮거나 측정체의 높이변화가 심한 국부 영역에서 다양한 크기로 항상 존재할 수 있으며 이러한 노이즈 성분들은 정규화 효율을 떨어뜨리므로 정규화 과정에서 제거하여야 한다. Fig. 6은 정규화한 영상에 cos 및 sin 주기함수로 모델레이션을 취한 후 LPF를 적용하여 얻은 위상맵 결과이다. Fig. 6에 보이는바와 같이 tan을 사용하여 위상정보를 추출하였으므로 위상값은 $-\pi \sim +\pi$ 사이의 끊어진 위상정보로 구성되어 있음을 알 수 있다.

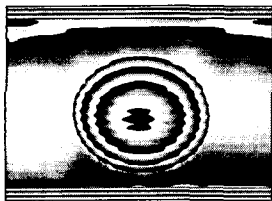


Fig. 6 Extracted phase map after adaptive normalization

본 논문에서는 단일 패스 의존적인 위상복원 방법을 사용하여 연속적인 높이정보인 위상을 복원하였다. Fig. 7은 평균화 과정없이 정규화한 영상에 대하여 3차원 높이정보를 픽셀 강도값으로 표현한 결과이고 Fig. 8은 3x3창을 사용하여 평균화한 영상에 대하여 위상정보를 추출한 결과이며 Fig. 9는 7x7창을 사용하여 평균화한 영상에 대하여 위상정보를 추출한 결과이다. Fig. 10은 본 논문에서 제안한 적응적 정규화 알고리즘을 적용한 영상에 대하여 위상을 추출한 결과이다.

Fig. 7에 보이는 바와 같이 노이즈가 많이 섞인 신호로부터 위상 정보를 추출하면 큰고 작은 많은 에러를 포함되어 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 노이즈 성분을 감소

시키기 위하여 작은 창(3x3창)을 이용한 평균화를 수행한 후 위상정보를 추출한 결과를 보여준다. 그 결과 국소 음영 영역에 의한 노이즈 효과는 많이 감소되었으나 넓은 음영 영역에 의한 노이즈 효과는 제거되지 않음을 알 수 있다.

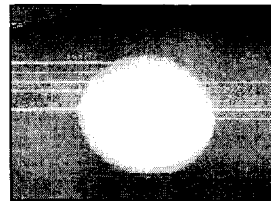


Fig. 7 Extracted 3D image with no smoothing normalization

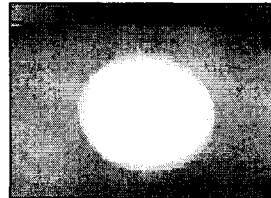


Fig. 8 Extracted 3D image with smoothing(3x3) normalization

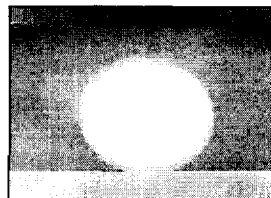


Fig. 9 Extracted 3D image with smoothing(7x7) normalization

Fig. 9는 노이즈 성분을 더욱 감소시키기 위하여 큰 창(7x7창)을 이용한 평균화를 수행한 후 위상정보를 추출한 결과를 보여준다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 노이즈 효과는 많이 감소되었으나 지나친 평균화로 인해 신호성분도 함께 감소되어 일부 구간에서 위상 정보를 잃어버리는 결과를 나타냈다. 그러므로 본 논문에서는 정상 환경인 경우에 작은 창을 사용하여 평균화를 수행하고 음영영역의 강도 값에 따라 적응적으로 창이 커지는 가변 평균화 창을 사용하였으며 또한 정규화 비율을 감소시켜 노이즈 성분이 많이 섞인 신호가 지나치게 강조되는 것을 없앴다. 또한 반사율이 지나치게 높아 포화상태에 있는 신호성분이 상대적으로 지나치게 감소되는 효과를 줄이기 위해 이 경우에는 정규화 비율을 증가시켰다. 그리고 배경조명 영상에서 평균

화한 값이 음영하한경계값 이하인 경우는 위상정보 추출이 불가능한 영역으로 설정하고 선형 보간법을 사용하여 주위 값으로 보간하였다. Fig. 10은 본 논문에서 제안한 적응적 정규화 방법에 의하여 측정된 3차원 표면형상 측정 결과로 Fig. 8, Fig. 9와 비교할 때 노이즈에 의한 위상오차를 효과적으로 감소시켰음을 알 수 있다.

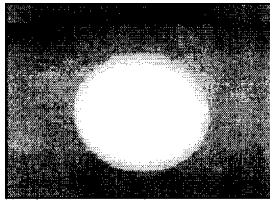


Fig. 10 Extracted 3D image with adaptive normalization

IV. 결론

본 논문에서는 정현파 줄무늬 패턴을 이용한 하나의 측정체 영상과 배경영상으로부터 3차원 표면형상 정보를 고속으로 정밀하게 추출하는 측정장치의 측정 효율성 향상에 대하여 연구하였다. 본 논문에서는 가변 평균화 창과 가변 정규화 비율을 이용한 적응적 정규화 알고리즘을 사용하여 노이즈 영향을 감소시켰으므로 시스템의 측정 효율을 높였고, 이를 실험적으로 확인하였다.

차후 연구과제로는, 음영영역의 크기변화와 강도값 변화에 따른 가변 정규화 비율을 자동으로 측정 분석할 수 있는 자동화 연구가 필요하며, 또한 줄무늬 패턴의 주기값과 저주파 통과 필터의 형상 및 차단주파수에 따라 측정결과에 많은 변화가 있으므로 이에 대한 실험 및 분석 연구가 필요하리라 생각된다.

참고문헌

[1] G. Q. Baxes, Digital image processing : Principles and Applications, J Wiley &

Sons Inc., 1994

[2] R. Ofner, P. Leary, "A collection of algorithms for the determination of construction points in the measurement of 3D geometries via light-sectioning," WESIC'99, 1999

[3] J. F .Lin, "Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes," Optical Engineering, Vol. 34, 1995

[4] T. C. Strand, "Optical three dimensional sensing for machine vision," Optical Engineering, Vol. 24, pp. 33-40, 1985

[5] S. Tang, Y. Y. Hung, "Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes," Applied Optics, Vol. 29, 1990

[6] G. Sansoni, L. Biancardi, "Comparative analysis of low-pass filters for the demodulation of projected grating in 3-D adaptive profilometry," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 1, 1994

저 자 소 개

박 승 규

한국원자력연구소 레이저기술개발팀 선임연구원, 주관심 분야는 컴퓨터비전, 머신비전 등임.



이 일 근

1990년 2월 오레곤주립대학교 공학박사 학위 취득, 현재 한남대학교 전자공학과 교수, 주관 심분야는 디지털통신 신호처리 및 안테나 설계



이 영 훈

한남대학교 전자공학과 교수