

# 볼록거울을 장착한 야간 사격훈련용 예광탄 탄도 모니터링 단일 카메라 시스템

이 인 정\*

## A Single Camera System Equipped Convex Mirror for Monitoring Tracer Bullet to Teach Night Firing Exercises

In Jeong Lee\*

요 약

일반적으로 보통의 카메라는 초당 24 프레임을 갖는다. 이런 카메라를 가지고는 초당 1000m에 가까운 스피드를 가지는 총알을 촬영하기 어렵다. 하지만 볼록거울을 사용하면 스테레오그래픽 투영방법에 의해 긴 길이를 짧은 화면에 담을 수 있다. 대부분 고속 물체를 촬영하기 위해서는 초당 프레임이 보통 카메라의 몇 배에 달하는 카메라를 사용하거나 전자장비를 사용하여 여러 개의 카메라를 매우 작은 시간차를 두고 촬영하는 방법을 사용한다. 본 논문에서는 보통의 카메라와 볼록거울을 사용하여 야간 사격훈련용 예광탄 탄도 모니터링 시스템을 제안하며 250m 사격장에서 표적에 명중한지 아니한지 발견 가능성을 보였다.

**Key Words** : Convex mirror equipped camera, Stereographical projection, Monitoring tracer bullet, Deformation, Inverse diffusion equation. 볼록거울 장착 카메라, 스테레오그래픽 투영, 예광탄 추적, 디포메이션, 역 확산 방정식

### ABSTRACT

In general, an ordinary CCTV camera has equipped with 24 frames per second. This camera is not capable of capturing an image of bullet trace which has speed about 1km per second. In spite of these difficulties, by means of the stereographical projection, a long distance trace is able to be contained in one image. Currently, to capture a series of image of an object with high speed, it is usual to use one of the complicated camera with high shutter speed or computerized devices with capability of controlling shutter timing with slightly different capture time. This paper proposed a monitoring tracer bullet single camera system equipped convex mirror trying to see whether or not a normal set of camera and convex mirror is capable of shooting on target located in as far as 250m.

### I. 서 론

고속인 물체를 촬영하고 추적하는 시스템은 주로 시간당 프레임 수를 높이는 방향으로 연구되어 왔다. 다른 한편으로는 여러 개의 카메라를 나열하고 개발된 전자장치로 시간차를 주어 촬영하는 기법이

있으며 카메라와 이미지 센서를 함께 작동시키는 방법이 있다<sup>[2]</sup>. 이 방법들은 스포츠 중 구기운동 즉, 탁구공이나 골프 공을 추적하여 선수들을 훈련하는 프로그램에 활용되고 있다. 영상처리를 기반으로 팬틸트 제어 카메라를 사용한 방법도 소개된 바 있으나<sup>[3]</sup> 속도가 매우 큰 물체에는 적용하기 힘들

\* 주저자 : 호서대학교 교양교직학부, leej@hoseo.edu, 정회원  
 논문번호 : KICS2011-11-566, 접수일자 : 2012년 11월 30일, 최종논문접수일자 : 2012년 8월 22일

다. 초당 100프레임 이상의 속도에서 구조화된 회귀 프레임워크를 사용한 방법이 소개된바 있으나<sup>[1]</sup> GPU가 장착되어야 한다. 이처럼 많은 기술들이 고가의 장치를 사용하고 또한 센서의 도움을 받아야 하는 경우가 대부분이다. 그런데 최근에 거울을 사용하여 초고속 물체를 추적하는 장치들이 개발되고 있으며 천체 망원경의 경우에는 빛의 속도로 움직이는 물체까지 추적하는 카메라를 제안하고 있다. 또한 카메라의 방향 조작 없이 여러 방향의 영상을 동시에 얻는 기술로 볼록거울과 비슷한 효과를 갖는 어안렌즈를 사용하여 다방향 영상을 얻는 기술들도 소개되고 있다(그림 1.)<sup>[7,8]</sup>.



그림 1. 헬기에서 촬영한 어안렌즈 영상과 어안렌즈를 사용한 스마트폰 장착 카메라 기기  
Fig. 1. An image from a helicopter by fish-eye lens and a device equipped smart phone with fish-eye lens

그런데 스테레오그래픽 투영에 의하면 극점 가까이에서는 미세 변화가 아주 커다란 변화로 투영됨을 보인다. 이러한 변화를 실제 카메라로 포착할 수 있는 거울이 볼록 거울이다. 본 논문에서는 보통의 카메라와 볼록거울을 사용하여 야간 사격훈련용 예광탄 탄도 모니터링 시스템을 제안한다.

## II. 볼록거울과 스테레오그래픽 투영

스테레오그래픽 투영은 1차원에서 보면 원과 직선이 일대일 대응이 되는 관계이다(그림 2.). 이는 북극점인 N에 가까울수록 원에서의 조그만 변화는 직선에서의 큰 변화를 유발한다. 즉 곡선 S'A'의 길이는 짧지만 직선 SA는 매우 긴 거리임을 보인다.

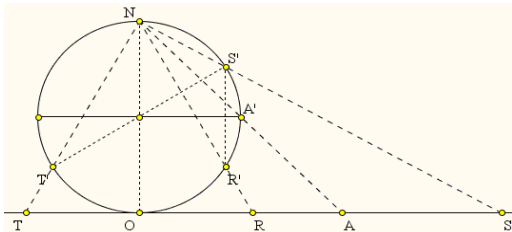


그림 2. 스테레오그래픽 투영  
Fig. 2. Stereographical projection

하지만 볼록 거울의 곡률이 반드시 구의 형태는 아닐 수 있기 때문에 수식적 접근이 필요하다. 곡면 영상과 평면 영상의 관계를 단면도로 도시하면 다음 그림 3과 같다. 여기서 r은 볼록거울의 곡률 반경이고,  $\theta_1$  은 카메라의 연직 상방 패닝각이고, dist가 변환된 평면 영상의 길이일 때, Ystart는 영상 변환에 있어 평면 영상에서의 시작점이고, Ylast는 영상 변환에 있어 평면 영상에서의 끝점이다.

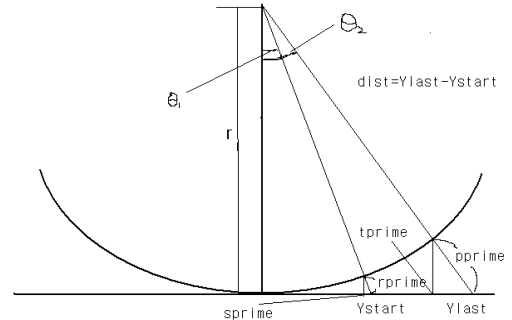


그림 3. 곡면 영상과 평면 영상과의 관계 단면도  
Fig. 3. A projection from curve to line

Ystart 및 Ylast는 다음 식(1), (2)으로부터 계산된다.

$$Ystart = r * \tan \theta_1 \tag{1}$$

$$Ylast = Ystart + dist \tag{2}$$

$\theta_2$ 는 평면영상의 끝점에 대한 카메라의 연직상방패닝 각으로 다음식(3)로부터 계산된다.

$$\theta_2 = \arctan (Ylast / r) \tag{3}$$

sprime은 영상 변환되는 곡면영상에서의 시작점이고, tprime은 곡면영상에서의 끝점으로 다음 식(4), (5), (6), (7)로부터 계산된다.

$$rprime = r / \cos \theta_1 - r \tag{4}$$

$$pprime = r / \cos \theta_2 - r \tag{5}$$

$$sprime = Ystart - rprime * \sin \theta_1 \tag{6}$$

$$tprime = Ylast - pprime * \sin \theta_2 \tag{7}$$

ratio는 평면영상과 곡면영상의 비율로서 다음 식(8)로부터 계산된다.

$$ratio = (tprime - sprime) / (Ylast - Ystart) \tag{8}$$

이어서  $\Theta_1$ ,  $dist$  및  $r$ 을 이용하여 상기 식에 따라  $Y_{start}$ ,  $Y_{last}$ ,  $\Theta_2$ ,  $s_{prime}$ ,  $t_{prime}$  및  $ratio$ 를 계산한다.

변환된 평면 영상의 좌표 ( $xx$ ,  $yy$ )와 대응되는 블록거울 영상의 좌표값 ( $x$ ,  $y$ )는 다음식(9)-(14)와 같이 계산된다. 먼저  $x_{fix}$  및  $y_{fix}$ 를 설정한다.  $x_{fix}$  및  $y_{fix}$ 는 원칙적으로 블록거울의 곡률반경의 두 배값으로 설정하며 신축( $zooming$ )이 일어나는 경우 신축의 비율에 맞추어 설정하는데 카메라에 따라 조금씩 수정이 필요하다.

$$y_{ratio} = yy * ratio \quad (9)$$

$$y_{chuk} = | s_{prime} - y_{ratio} | \quad (10)$$

$$x_{ratio} = xx * ratio \quad (11)$$

$$x_{chuk} = s_{prime} + x_{ratio} \quad (12)$$

$$y_{val} = ((x_{fix} * x_{fix}) * (y_{chuk} * y_{chuk}) * (y_{fix} * y_{fix}) - (x_{chuk} * x_{chuk}) * (y_{fix} * y_{fix}) * (y_{chuk} * y_{chuk})) / ((y_{fix} * y_{fix}) * (x_{fix} * x_{fix}) - (y_{chuk} * y_{chuk}) * (x_{chuk} * x_{chuk})) \quad (13)$$

$$x_{val} = ((x_{fix} * x_{fix}) * (y_{chuk} * y_{chuk}) * (x_{chuk} * x_{chuk}) - (x_{chuk} * x_{chuk}) * (y_{fix} * y_{fix}) * (x_{fix} * x_{fix})) / ((y_{chuk} * y_{chuk}) * (x_{chuk} * x_{chuk}) - (y_{fix} * y_{fix}) * (x_{fix} * x_{fix})) \quad (14)$$

( $origin_x$ ,  $origin_y$ )가 촬영된 곡면 영상에서의 중심좌표일 때, 다음 식(15), (16)에 따라  $x$  및  $y$ 를 계산한다.

$$y = \sqrt{y_{val}} + origin_y \quad (15)$$

$$x = \sqrt{x_{val}} + origin_x \quad (16)$$

윗 식을 적용하여 평면화 시킨 영상을 그림 4에 보였다.

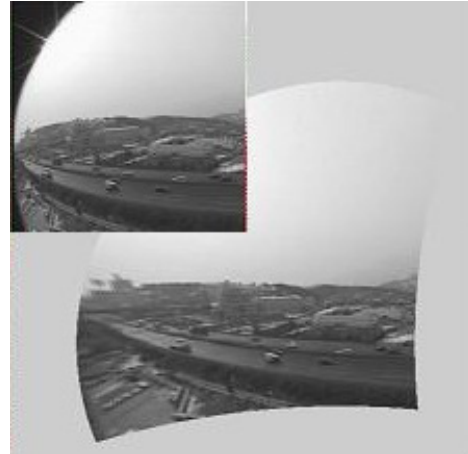


그림 4. 평면화 한 영상  
Fig. 4. Flat image from convex image

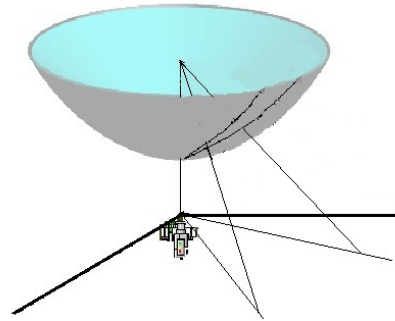


그림 5. 거울과 평면과의 거리 관계  
Fig. 5. A difference of distance from convex to flat

그런데 카메라가 거울 밑에 위치하고 카메라로부터 연직 상방이 아닌 거울의 변에서의 거리변화는 투영되었을 때 매우 큰 거리 변화가 일어남을 알 수 있다 (그림 5.). 이것은 보통의 카메라로 빠른 속도로 움직이는 물체의 영상을 얻는 것을 가능하게 한다. 일반적으로 보통의 동영상 카메라는 초당 24에서 30프레임의 영상을 촬영한다. 그리고 탄환의 속도는 초속 900m가 넘는 것으로 알려져 있다. 천 인치 사격장에서 촬영한다면 한 프레임의 영상도 얻기 전에 탄환은 사라질 것이다. 그러므로 250m 사격장을 가정할 수 밖에 없다. 또한 탄환의 크기가 매우 작아서 촬영되었다고 해도 영상을 판독할 수가 없으므로 야간에 예광탄을 가지고 사격훈련을 하는 것으로 가정해야 한다. 예광탄은 빛을 내므로 탄환의 크기가 실제보다 수십 배 크게 보이는 까닭에 촬영된 영상에서 그 위치를 찾을 수 있다.

### III. 역확산방정식과 디폼을 통한 물체 위치화

일반적으로는 구조화된 회귀를 통한 국소화를 수행해야 하지만<sup>6)</sup> 여기서는 야간 영상이고 예광탄 외에 다른 불빛이 거의 없다는 가정하고 역 확산 방정식<sup>4)</sup>을 사용하여 이미지 분할을 한 다음 디포메이션<sup>5)</sup>을 수행하여 물체 위치화를 수행하기로 한다. 먼저 이산적 force function을 식(17)과 같이 만든다.

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = \frac{1}{m_n} (F(u_{n+1} - u_n) - F(u_n - u_{n-1}))$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (17)$$

Where  $u_n$  is a discrete signal and  $F$  is a force function.

이식을 통해 이미지 분할 알고리즘을 만들면 다음과 같다.

1) It starts with the trivial initial segmentation, that is, each sample is a distinct region.

2) It evolves equation 18, until the values in two or more neighboring regions become equal.

$$\frac{\partial u_{n_i}}{\partial t} = \frac{1}{m_{n_i}} (F(u_{n_{i+1}} - u_{n_i}) - F(u_{n_i} - u_{n_{i-1}}))$$

$$u_{n_i} = u_{n_{i+1}} = \dots = u_{n_i + m_{n_i} - 1} \quad (18)$$

Where  $i = 1, 2, 3, \dots, p$

$$1 = n_1 < n_2 < \dots < n_{p-1} < n_p \leq N$$

$$n_{i+1} = n_i + m_{n_i}$$

3) It merges the neighboring regions whose values are equal.

4) Go to step 2.

이 분할된 영역에 다음 식(19)과 같은 디포메이션을 수행한다.

$\Omega$ 를 수행할 영역이라 하자.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \alpha(s, t) + \beta(s, t)N$$

$$\Omega(s, 0) = \Omega_0(s) \quad (19)$$

여기서 T는 접선 벡터이고 N은 법선 벡터이며  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 함수이다. 이 식(19)로부터 디포메이션 식

(20)이 정해진다.

$$z = \varphi(x, y, t),$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\kappa N$$

$$\Omega(s, 0) = \Omega_0(s) \quad (20)$$

Where

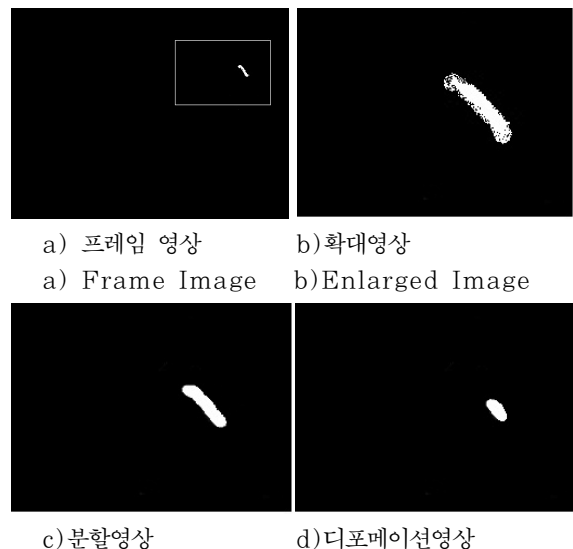
$$\kappa = \frac{(\varphi_{xx}\varphi_y^2 - 2\varphi_{xy}\varphi_x\varphi_y + \varphi_{yy}\varphi_x^2)}{(\varphi_x^2 + \varphi_y^2)^{\frac{2}{3}}}$$

이상을 순서적으로 정리하면 다음과 같다.

While(read image sequence)

```
{
get_image();
// Frame by frame
enlarge_image();
//After finding a big trace
segmentation_image();
//Apply equation (18) and it's
//algorithm
deformation_image();
// Apply equation (20)
}
```

이와 같이 분할한 후 디폼 시킨 영상의 실험 결과는 그림 6에 잘 나타나있다.



c)분할영상 d)디포메이션영상

c)Segmeted image d)Deformation image

그림 6. 획득한 프레임영상, 확대영상, 분할영상 및 디포메이션 영상  
Fig. 6. A frame image, enlarged image, segmented image, deformation image

### IV. 사격훈련 시스템

야간 사격 훈련 시스템이므로 주간에 설치하고 사격 시 탄환은 예광탄을 사용한다. 사격장 사진에서 그림 7과 같이 조금 떨어진 곳에 곡면경과 카메라를 일정 높이에 설치한다. 이때 카메라에 탄흔이 잘 촬영되도록 하기 위해서는 카메라 높이와 탄환이 사진에서 표적으로 가는 길로부터 떨어진 거리를 조정해야 한다. 야전에서 카메라를 높이 다는 것은 어렵다고 보고 카메라 높이를 지상5m라 가정하자. 거울의 곡률이 구에 가깝다고 가정하면 탄흔 길로부터 떨어진 거리는  $5 * \tan(0.444444 \pi) m = 28m$  정도이다.

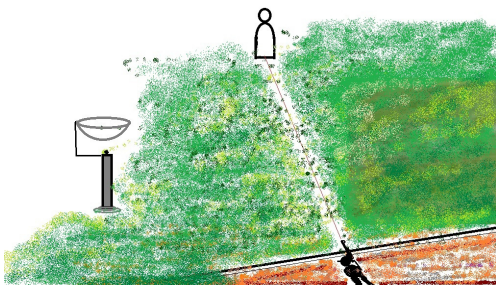


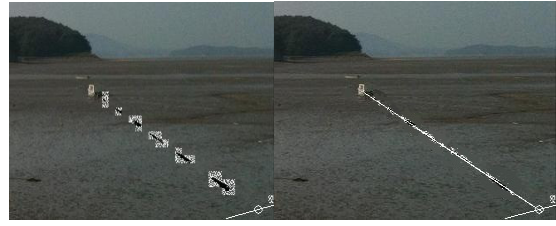
그림 7. 카메라 위치  
Fig. 7. A position of camera

낮에 사진과 표적 사이의 영상을 획득한 후 저장한 다음에 밤에 예광탄을 촬영한 것은 합성한다.

실제로 250m 사격장에서 24프레임 카메라로 촬영하면 6프레임 정도에서 탄흔이 포착된다. 탄흔은 거의 가는 실선 형태를 이루는데 영상을 위치화시키고 모포로지 기법으로 노이즈를 제거한 다음 평면화 시키고 6개의 이미지를 합성하면 탄환의 진로가 완성된다. 이것을 주간영상과 다시 합성하면 표적을 맞추었는지 알 수 있다. 야간영상은 탄흔을 제외하고 밝기가 거의 0에 가까우므로 합성영상에서 표적으로 가는 직선을 그어 표적을 빗나가는 정도를 확인 할 수 있다(그림 8.)



a) 낮에 촬영한 사격장      b) 예광탄흔적  
a) Daytime image      b) Trace of Bullet



c) 합성한 사진      d) 표적으로 향하는 여부  
c) Sum image      d) Hit or no hit

그림 8. 낮에 촬영한 사격장과 밤에 사격한 예광탄 흔적, 합성한 사진 그리고 합성한 사진으로부터 표적으로 가는 여부를 선을 찾아 확인한 것.

Fig. 8. A sum of two image in where one is daytime and the other is trace of tracer bullet at night and calculated bullet trace line.

이 경우 탄흔의 데이터로부터 탄환의 방향을 컴퓨터 시스템이 찾은 것과, 표적과 사수위치 사이의 두 점을 지나는 직선이 만나는 위치와 표적위치의 차이로 결정한다. 실제 실험에서 예광탄환 흔적 자료를 가지고 선형회귀 방정식을 계산하여 직선을 찾아보니 육안으로 보는 것과 상당한 차이를 보였다(그림 9.).



그림 9. 탄흔으로부터 찾은 선형회귀선(좌)과 재귀적 방법으로 찾은 추적선.

Fig. 9. A linear regression and recursive regression when target is hit.

이것은 잡음요소가 함께 계산된 결과일 뿐만 아니라 탄환이 직선운동을 하는 것은 아니므로 칼만 필터 개념을 도입하여 재귀적 방법으로 계산해 보았다. 각 프레임 별 탄흔으로부터 만들어진 픽셀들의 위치 집합  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  로부터

$$\text{Set } \text{Reg}(U_l), \text{Std}(U_l)$$

$$\text{Reg}(\sum_{l=1}^n U_l) = \{(\text{Reg}(\sum_{l=1}^{l-1} U_l) * \text{Std}(U_l) + \text{Reg}(U_l) * \text{Std}(\sum_{l=1}^{l-1} U_l)) / (\text{Std}(\sum_{l=1}^{l-1} U_l) + \text{Std}(U_l))\}$$

$$l = 2, 3, 4, \dots, n \quad (21)$$

여기서 Reg와 Std은 각각 선형회귀계수와 공분산의 제공근이다. 초당 100프레임 이상의 카메라로 실험한 결과 사진과 탄착점을 잇는 직선과 탄흔이 만드는 직선의 기울기변화가 그림 9에 나타나 있다. 벡터의 방향은 작은 차이이라도 250m 떨어진

곳에서는 상당한 거리차이를 보이게 된다. 실제로 사진에 거취 대를 두고 30회 실험 중 20회가 명중이고 10회가 빗나가는 상황에서 명중할 때의 방향 탄젠트 값은 0.002 이하의 오차를 가지며 빗나간 경우의 방향 탄젠트 값은 0.002보다 큰 것으로 나타났다. 다음 그림 10은 빗나간 경우의 실험 결과이다. 이것을 토대로 제안된 시스템은 0.5m오차 범위 내에서는 탄환의 명중 여부를 정확하게 확인할 수 있음을 알 수 있다.



그림 10. 탄환이 목표를 맞추지 못한 경우의 선형회귀선(좌)과 재귀적 방법으로 찾은 추적선.  
Fig. 10. A linear regression and recursive regression when target is no hit.

## V. 결 론

특별하고 제한적인 상황이지만, 특수한 카메라가 아닌 시중의 보통 카메라로 매우 빠른 물체의 흔적을 찾아볼 수 있는 방법을 제안해 보았다. 문제는 사격시간이 야간이어야 하며 발광체인 예광탄을 사용해야 하는 불편함이 있으며 사선도 한 개로 제한해야 한다. 사격장을 선택할 때도 주변에 불빛이 없는 지역을 선정해야 한다. 뿐만 아니라 거울을 사용한 영상이라 영상손실이 많으며 거기가 다시 평면으로 변환하는 과정에서 선명도가 더 떨어지게 된다. 다행인 것은 예광탄의 빛이 밝아서 추적이 가능하게 했으며 빛이 번짐을 극복하기 위해서는 콘트라스트를 조금 조정하였다.

## References

- [1] C. H. Lampert and J. Peters, "Active structured learning for high-speed object detection," in *Proc. DAGM*, 2009.
- [2] N. Kondoh, R. Okada, J. Oaki, D. Yamamoto, H. Miyazaki, K. Uesugi, J. Amemiya, K. Shirakawa, and A. Kunimatsu, "High-speed object tracking based on temporally evaluated optical flow," in *Proc. ICRA*, 2003.
- [3] H. Ukida, "A high speed and wide range moving object tracking using pan-tilt cameras and arm robot," in *Proc. IMTC*, 2005.
- [4] I. Pollak and A. S. Willsky, "Image segmentation and edge enhancement with stabilized inverse diffusion equations," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 2, pp. 256-266, 2000.
- [5] B. B. Kimia and K. Siddiqi, "Geometric heat equation and nonlinear diffusion of shapes and images," *Comput. Vision and Image Understanding*, vol. 64, no. 3, pp. 305-322, 1996.
- [6] M. B. Blaschko and C. H. Lampert, "Learning to localize objects with structured output regression," in *Proc. ECCV*, vol. 5302, 2008, pp. 2-15.
- [7] S. Hrabar and G. S. Sukhatme, "Omnidirectional vision for an autonomous helicopter," in *Proc. ICRA*, Apr. 2004, pp. 3602-3609.
- [8] I. J. Lee, S. J. Namkoong, and J. Y. Min, "Expanding degree of view of cctv camera video image and de-blurring with nonlinear equation," in *Proc. ITS World Congress*, Oct. 9-12, 2007, pp. 485-489.

## 이 인 정 (In Jeong Lee)



1981년 2월 전남대학교 사범  
대학 수학과 졸업  
1984년 2월 중앙대학교 대학  
원 수학과 석사  
1990년 8월 중앙대학교 대학  
원 수학과 박사  
2002년 2월 아주대학교 대학

원 전자공학 박사

1992년 3월~현재 호서대학교

<관심분야> 신호처리, 인공지능, 자동화시스템