

논문 2015-52-1-11

적외선 스테레오 카메라를 이용한 고속 이동객체의 위치에 대한 확률모델

(Statistical Model of 3D Positions in Tracking Fast Objects Using IR
Stereo Camera)

오 준 호*, 이 상 화**, 이 부 환***, 박 종 일****

(Jun Ho Oh, Sang Hwa Lee[Ⓞ], Boo Hwan Lee, and Jong-Il Park)

요 약

본 논문에서는 비냉각방식 적외선 스테레오 카메라 시스템을 이용하여 고속으로 이동하는 고온의 소형 물체의 3차원 위치를 추정함에 있어서 무작위로 추정되는 그 위치를 확률 모델로 표현하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 확률적 위치 모델은 디지털 영상으로 인한 픽셀위치의 오차(pixel position error)와 비냉각식 적외선 카메라에서 영상을 취득하는 순간의 차이에 의한 지터오차(jitter error)로부터 유도되는데, 두 가지 오차를 결합한 통합 오차확률모델을 수학적으로 제시하고 실험을 통하여 그 효용성을 보여준다. 우선 본 논문에서 고안한 적외선 카메라의 지터 측정기를 이용하여 적외선 카메라에서 발생하는 타이밍 지터를 통계적으로 관찰하여 확률모델을 설정한다. 또한 디지털 영상의 스테레오 정합 과정에서 발생하는 픽셀 오차에 의하여 정확도가 떨어지는 측정거리를 확률모델로 정의한다. 실험 측정 결과, 지터는 가우시안 확률분포로 모델링하는 것이 가능하며, 픽셀오차는 균일 확률분포로 모델링된다. 이 두 가지 확률분포를 갖는 오차는 상호 독립으로서 선형 결합되는데, 전체 오차에 대한 확률분포는 지터오차 변수의 확률분포와 픽셀위치오차 변수의 확률분포를 컨볼루션함으로써 유도된다. 실제 고속 이동체에 대하여 정밀한 3차원 궤적추정기와 자체 구현한 적외선 스테레오 카메라 시스템을 이용하여 제안한 확률모델을 3차원 위치추적 실험에 적용한 결과 95% 신뢰도 구간에서 물체의 위치를 추정하는 것을 확인하였다. 즉, 물체의 위치를 정확하게 측정하는 것은 이론적으로는 불가능하며, 확률모델을 통하여 물체의 위치를 표현하는 것이 타당함을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안한 확률모델은 적외선 스테레오 카메라를 이용한 거리측정에서 부정확함을 확률적으로 모델링하여 위치정보에 대한 불확실성을 보정해주며, 특히 적외선 스테레오 카메라를 이용한 고속 물체의 위치추적 및 거리측정에서 이론적, 실험적 토대를 제공할 것으로 기대된다.

Abstract

This paper proposes a statistical model of 3-D positions when tracking moving targets using the uncooled infrared (IR) stereo camera system. The proposed model is derived from two errors. One is the position error which is caused by the sampling pixels in the digital image. The other is the timing jitter which results from the irregular capture-timing in the infrared cameras. The capture-timing in the IR camera is measured using the jitter meter designed in this paper, and the observed jitters are statistically modeled as Gaussian distribution. This paper derives an integrated probability distribution by combining jitter error with pixel position error. The combined error is modeled as the convolution of two error distributions. To verify the proposed statistical position error model, this paper has some experiments in tracking moving objects with IR stereo camera. The 3-D positions of object are accurately measured by the trajectory scanner, and 3-D positions are also estimated by stereo matching from IR stereo camera system. According to the experiments, the positions of moving object are estimated within the statistically reliable range which is derived by convolution of two probability models of pixel position error and timing jitter respectively. It is expected that the proposed statistical model can be applied to estimate the uncertain 3-D positions of moving objects in the diverse fields.

Keywords : Uncooled Infrared camera, Stereo matching, 3D Position, Jitter, Pixel error

* 학생회원, **** 정회원, 한양대학교 컴퓨터·소프트웨어 공학과
(Dept. of Computer and Software, Hanyang University)

** 정회원, 서울대학교 전자컴퓨터공학부
(Dept. Electronics Engineering and Computer Science, Seoul National University)

*** 정회원, 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

Ⓞ Corresponding Author (E-mail: lsh529@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD090090GD)
접수일자: 2014년07월18일, 수정일자: 2014년12월04일, 게재확정: 2014년12월26일

I. 서 론

최근 적외선 카메라의 발달로 감시분야, 지능형 로봇 분야, 군사분야에서 표적을 감시하고 추적하는 기술이 연구되고 있다. 적외선 카메라는 물체 표면에서 직접 방사되는 눈에 보이지 않는 적외선 복사 에너지를 측정한다. 주변 환경보다 적외선 복사 에너지의 방출량이 많은 고온 표적은 일반적으로 쓰이는 컬러 영상보다 적외선 영상에서 표적을 찾기에 용이하기 때문에, 적외선 카메라를 이용한 다양한 표적 검출 및 추적 기술이 연구되어 왔다. 특히, 고속 영상취득이 가능한 비냉각방식의 적외선 카메라가 고속의 고온 표적체를 검출하고 추적하는 시스템에 많이 사용되고 있다.

기존의 방법들은 적외선 영상에서 소형 표적을 찾는 데 초점을 맞추고 있으며, 아주 작은 표적의 경우는 표적과 노이즈를 구분하는 알고리즘에 초점을 맞추고 있다. 평균 차(mean-subtraction) 필터를 사용한 방법은 주변 환경의 온도의 평균을 구하여 표적 온도와 차이를 구한다. 표적온도의 문턱치 값을 높일 수 있으나 오경보율(Constant false alarm rate detector)은 높게 나타나고 저대비(low contrast) 적외선 영상과 원거리에서 점으로 표현되는 표적 검출에는 효과적이지 못하다^[1-2]. 일반적으로 형태학적 필터(Morphological filter)를 사용한 방법은 top-hat 연산자를 이용하여 원 영상을 전처리한 후, 3차원 시공간적 탐지 기법을 2차원 공간 탐지 차원으로 축소시켜 표적을 검출한다. 이때 표적은 일정한 오경보율(constant false alarm rate detector)을 가지면서 찾게 된다. 이 방법은 다양한 속도를 갖는 소형 표적에 유용하지만, 표적 주변의 환경들로 인하여 높은 오경보율을 보여 준다^[3-5]. LOG(Laplacian of Gaussian) 필터는 blob모양을 찾는 데 유용하다. 소형표적이 원거리에서는 blob모양을 가지므로 이 방법을 적용하여 소형표적을 찾는다. 하지만 연산시간의 문제로 병렬처리 프로세서가 필요하다^[6]. 최근 웨이블릿 도메인에서 소형표적을 찾는 알고리즘은 GPU를 사용하여 소형표적을 찾는 시간을 단축시켰다^[7]. 위의 방법들은 노이즈와 구분하기 어려운 소형표적을 찾는 방법들이며, 표적이 어떠한 물체인지 구분하는 시스템에서는 Ai/ATR processor방법이 최신기술로서, Aided target system이 사람의 주관이 들어가므로 ATR 시스템보다는 판별이 용이하다^[8].

최근에는 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 고속으로 이동하는 고온의 물체를 검출하고 그 위치나 거리를 측정하는 시스템에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 그림 1처럼 스테레오 정합은 2대의 카메라를 이용하여 물체들 간의 시차정보를 추정하며 카메라의 내외부 파라미터들을 이용하여 물체의 거리를 추정한다. 최근에 적외선 스테레오 카메라를 이용한 소형 표적의 탐지와 추적하는 연구가 널리 진행중인데, Parshall^[9]은 sub-pixel 시차정보를 이용하여 표적의 거리를 추정하였으며, Jutzi는 baseline을 10m로 확장하여 수 km 이상의 거리를 측정할 뿐만 아니라, 거리측정 오차를 줄이는데 노력하였다^[10].

그런데 이러한 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 초고속으로 이동하는 물체의 거리나 위치를 측정함에 있어서 발생하는 일반적인 현상은 측정되는 거리나 위치가 일정하고 규칙적으로 추정되지 않고 오차가 다소 불규칙적이고 랜덤하게 나온다는 것이다. 즉, 아무리 정확하고 정교하게 시차를 추정하고 카메라 파라미터를 정확하게 설정하더라도, 실제 측정되는 거리는 기준치와 비교하여 오차가 발생하는데, 문제는 그러한 오차가 랜덤하고 예측 불가능한 형태로 나타난다는 점이다. 이는 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 고속으로 이동하는 객체의 위치를 추정함에 있어서 발생하는 오차가 어떤 랜덤한 현상에 기인한다는 것을 내포한다. 본 논문에서는 이러한 랜덤하게 발생하는 거리측정 오차를 두 가지 원인으로 나누어 분석하고, 통합 확률 모델로 오차를 표현함으로써, 거리 측정시 발생하는 오차의 랜덤한 현상을 이해하고 그 오차의 범위를 예측할 수 있

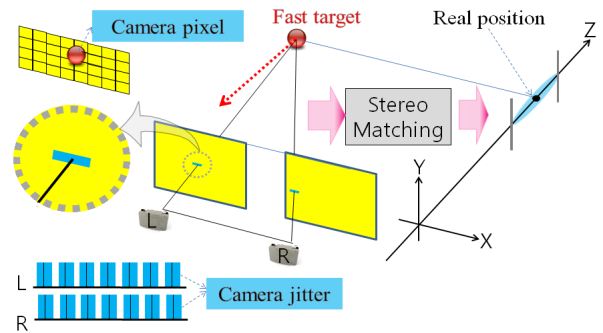


그림 1. 제안된 적외선 스테레오 카메라를 이용한 표적 거리측정 시스템.

Fig. 1. The target distance measurement system using the proposed IR stereo camera.

도록 하는 모델을 제시하고자 한다. 이를 통하여 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 거리를 측정하는 경우에 발생하는 랜덤한 값을 적절한 신뢰구간에서 표현할 수 있으므로, 확률공간에서 측정 거리의 정확도를 정의할 수 있으며, 물리적인 위치 범위를 예측할 수 있다.

그림 1은 적외선 스테레오 카메라를 이용한 거리측정에서 랜덤하게 발생하는 오차의 원인을 보여주고 있다. 하나는 적외선 카메라의 지터(jitter)이고, 다른 하나는 스테레오 정합시 픽셀 공간에서 계산되는 시차값에 대한 픽셀 오차이다. 비냉각식 적외선 카메라의 검출기는 비양자식이기 때문에 영상 시퀀스가 서로 동기화되어 정확한 타이밍에 출력되지 않고 일정한 범위의 지터(jitter)를 가지고 출력된다. 또한 스테레오 정합시 픽셀 값으로 시차를 표현하는 과정에서 필연적으로 발생하는 정합오류는 거리 측정시 랜덤한 오차를 발생시킨다. 본 논문에서는 초속 수백 미터 수준으로 이동하는 초고속 이동체를 검출하고 위치를 추정하는 시스템을 목표로 하는데, 고속으로 촬영하는 비냉각식 적외선 카메라에서 발생하는 지터는 고속 물체일수록 큰 영향을 준다^[11]. 원거리이거나 저속인 경우에는 짧은 지터시간 동안에 이동체의 거리변화가 크지 않아서 시차추정 과정에서의 픽셀오차만 고려하면 되지만, 고속의 근거리 이동체는 짧은 지터 시간에도 상대적으로 이동거리가 크기 때문에, 지터에 의한 거리 오차는 중요하다. 본 논문에서는 고속 이동체의 3차원 위치를 확률공간에서 표현하는 수학적 모델을 제안하고 이를 수치해석으로 확인하는데 초점을 맞추고 있으며, 실제 이동체의 위치를 추정하는 과정에서 발생하는 오차를 반영할 수 있는 확률 모델을 제시하였다. 그림 1에서는 시차추정에서 발생하는 픽셀오차와 적외선 카메라에 의한 지터오차를 표시하고 있다.

본 논문에서는 비냉각방식의 적외선 스테레오 시스템을 구축하고 지터 측정을 위한 실험장치를 고안하였다. 적외선 스테레오 영상간에 동기화가 이루어지지 않는 지터에 대하여 실험분석을 통해 확률적 모델을 설정하였다. 이를 검증하기 위하여 고속으로 이동하는 표적에 대하여 스테레오 정합을 수행하여 표적의 위치를 확률적으로 모델링하고 3차원 궤적(x, y, z) 측정기를 통하여 구해진 ground truth와 적외선 스테레오 카메라로 추정된 표적의 위치와 비교함으로써 모델의 정확성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서 적외선 스테레오 시스템을 이용한 거리측정 및 픽셀오차 모델을 서술하며, 제 III장에서는 적외선 카메라의 지터를 소개하고 측정방법 및 모델 결과에 대해 설명한다. 제 IV장에서는 적외선 스테레오 카메라를 사용하여 표적위치의 통합 확률모델인 불확실한 공간에 대해 언급한다. 제 V장에서는 확률모델 범위 안에서 표적의 실제 위치가 포함된 실험결과를 제시한다. 그리고 제 VI장에서는 본 논문에 대한 결론과 향후 개선할 점을 언급한다.

II. 적외선 스테레오 카메라 시스템

스테레오 영상은 사람의 눈을 모방하였으며, 스테레오 정합은 두 대의 카메라에서 촬영된 영상에서 대응점들을 찾고, 이 대응점 정보와 두 카메라 사이의 간격으로부터 실제 객체의 거리 정보를 계산할 수 있다. 두 대의 적외선 카메라를 이용한 스테레오 카메라 시스템은 카메라 왜곡보정(camera calibration), 스테레오 조정(stereo rectification), 스테레오 정합(stereo matching) 이렇게 3단계를 거쳐서 구축되었다.

스테레오 조정은 사전에 카메라 왜곡보정 과정을 통하여 얻은 카메라 파라미터를 이용하여 각 영상들을 평행식 배열 구조가 되도록 조정(rectification)한다^[12]. 조정된 스테레오 영상은 대응점 추정 시 x축 위에 맞추어 있기 때문에, 동일한 y축을 가지는 주사선(scan-line)만을 검색하면 된다. 그림 2는 적외선 스테레오 카메라를 사용하여 조정된 영상을 보여주고 있다.

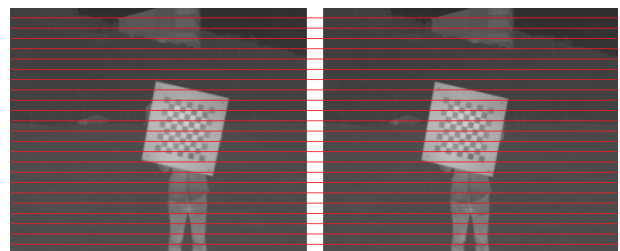


그림 2. 적외선 스테레오 조정된 영상
Fig. 2. IR stereo rectification images.

1. 스테레오 정합

스테레오 정합은 에피폴라 기하구조를 바탕으로 좌우 스테레오 영상의 대응점을 찾는 과정을 의미한다. 평행식 스테레오 카메라의 기하학적 해석은 렌즈의 초

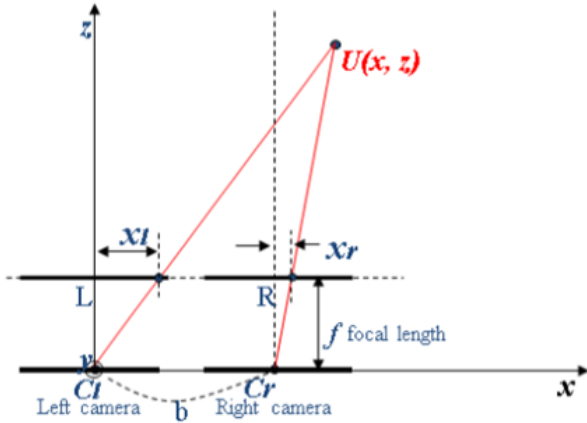


그림 3. 스테레오 영상의 시차에 의한 깊이 추정.
Fig. 3. Depth estimation by disparity in the stereoscopic images.

점 앞에 영상 평면이 위치하고 이것을 중심투영(central projection)이라 하고 두 렌즈 중심을 연결하는 직선을 기준선(baseline)이라 하며, 이 좌측에 위치한 카메라영상의 중심에 기준 좌표계(X, Y, Z)의 원점이 위치한다.

그림 3에서 초점거리 f와 두 렌즈의 중심 사이의 거리 즉, 기준선 거리 b가 주어지면, 닳은 삼각형 성질에 의해 기준 좌표계와 물체의 3차원 위치와 대응하는 영상좌표 (x, y) 사이의 상관 관계식을 구할 수 있다. 그림 3은 스테레오 영상에서의 시차와 물체까지의 거리를 표시하고 있으며, A는 픽셀간의 물리적 크기(pixel pitch) 또는 간격 (mm), b는 두 카메라간의 거리 (baseline, mm), d는 스테레오 정합에 의하여 추정된 물체 대응점에 대한 시차(disparity)이며 이를 이용하면, 간단한 비례식을 이용하여 카메라로부터 물체까지의 거리를 측정할 수 있음을 보여준다. 그림 3에서 닳음꼴을 이용한 비례식을 서술하면, 물체의 위치인 U(x,y,z)로 표현된다. xl-xr은 시차 d를 의미한다.

$$U(x,y,z) = \left(\frac{b(xl+xr)}{2d} + \frac{b}{2}, \frac{b(yl+yr)}{2d}, \frac{bf}{dA} \right) \tag{1}$$

식 (1)에서 시차 d는 픽셀단위로 보통 표시하므로, 거리 z를 표시하기 위해서는 시차정보를 물리적 거리 (mm) 단위로 환산하도록 A를 곱한다.

2. 스테레오 정합시 픽셀 위치오차 모델

스테레오 정합은 영상 평면(image plane)에서 측정되

기 때문에 격자 구조인 영상 평면의 픽셀에 의해 필연적으로 오차가 발생하게 된다. 이를 픽셀 위치오차(pixel position error)라고 한다. 픽셀 위치오차는 정확하게 시차를 추정하였다 하더라도 그 오차가 하나의 카메라 영상에서 ±0.5 픽셀의 범위를 가진다고 볼 수 있다^[13]. 이를 평행식 스테레오 영상에 의한 거리측정 방식에 적용하면, 카메라에서 물체까지의 거리인 z에 대하여 픽셀 위치오차 모델을 고려한 거리의 범위가 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{bf}{(d+0.5)A} \leq z \leq \frac{bf}{(d-0.5)A} \tag{2}$$

본 논문에서는 스테레오 정합을 통하여 시차가 정확하게 추정되더라도 픽셀 구조로 인하여 -0.5 ~ +0.5의 오차 범위를 가진다고 가정하였다^[14]. 아울러, 픽셀 위치오차를 확률변수로 정의하되, 일종의 양자화 에러로 볼 수 있으므로, -0.5 ~ +0.5 범위에서의 연속적인 값을 갖는 균일 확률분포로 설정하였다.

III. 카메라 지터

움직이는 표적의 위치를 측정하기 위해 스테레오 정합에서는 카메라의 정확한 시퀀스 타이밍이 필요하다. 고속촬영이 가능하면서 고비용이 아닌 비냉각방식 적외선 카메라에서는 영상 시퀀스가 균일하고 정확한 타이밍에 출력되지 않고 일정한 범위내에서 랜덤하게 영상을 취득한다. 이러한 랜덤한 capture-timing 범위를 시퀀스 지터라고 하며, 단위는 시간이다. 일반적인 속도의 물체인 경우에는 지터가 크게 중요하지 않으나, 초속 수 백미터 이상의 고속으로 이동하는 물체에서는 지터에 따라서 이동물체를 취득하는 실제 위치가 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 논문에서와 같이 고속 이동물체의 위치추적을 보다 정확하게 하기 위해서는 적외선 카메라에서 발생하는 지터를 고려하는 것이 필요하다. 아울러, 적외선 지터도 예측 불가능한 랜덤한 현상이므로, 일종의 확률분포로 모델링하는 것이 필요하다.

그림 4에서는 시퀀스 지터의 개념을 표시하고 있는데, 적외선 영상이 취득되는 시점이 각 카메라에서 일정하지 않고 랜덤하게 변한다. 자체 제작한 지터 측정기를 통하여 얻은 실험적 결론에 의하면, 각 카메라의 시퀀스 지터는 그림 4의 상단처럼 가우시안 분포로 모

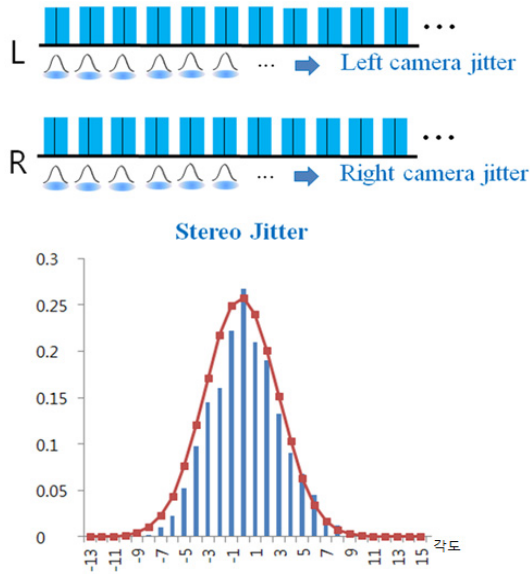


그림 4. 비냉각식 적외선 카메라의 지터 개념도
 Fig. 4. Jitter model of uncooled IR camera.

델링이 가능하다는 것을 확인하였으며, 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라의 지터에 의한 스테레오 지터 분포도 그림 4의 하단처럼 가우시안 분포로 표현할 수 있다.

1. 적외선 카메라에서의 지터

열화상 이미지는 대상 물체 또는 장면의 온도 변화를 적외선 카메라로 측정하고 이를 실화상 이미지로 변화하여 만들어진다. 적외선 카메라의 주요 구성 부분은 렌즈, 초점면 배열(FPA) 디텍터, 모델에 따라서 디텍터 냉각장치, 그리고 이미지를 처리하고 디스플레이 해주는 전자장치 및 소프트웨어 등이다. 대부분의 적외선 카메라는 가격 문제를 고려하여 마이크로 볼로미터 방식의 디텍터를 사용하고 있다. 마이크로 볼로미터 FPA는 금속 또는 반도체 소재를 사용하여 제조되며 비양자 원리를 바탕으로 동작된다. 따라서 이 종류의 디텍터는 입사되는 복사 에너지에 대하여 재료의 전체적인 상태 변화(볼로미터 효과)로 반응하게 된다. 일반적으로 마이크로 볼로미터는 냉각이 불필요하므로 카메라를 소형으로 제작할 수 있고 가격대도 낮아지게 된다. 하지만 검출능이 양자식 보다는 낮으며 응답속도도 느리게 나타난다. 이러한 물리적인 한계 때문에 고속으로 동작하는 비냉각방식의 적외선 카메라에서는 지터가 크게 드러나게 된다^[11].

2. 지터의 측정방법 및 모델 결과

적외선 카메라의 지터를 측정하기 위해 지터측정기를 제작하였다. 그림 5는 제작된 지터 측정기로서 가열된 철판위에 일정한 각속도를 갖는 막대를 회전시킨다. 이때 적외선 스테레오 카메라로 촬영하여 막대의 회전 각도에 따라 각 시퀀스들의 위치분포를 측정한다. 허프 변환(Hough transform) 알고리즘을 사용하여 회전하는 막대기의 직선을 검출하고 각도를 측정하였다.

그림 6에서 바탕의 철판의 온도가 높으므로 흰색으로 나타나며 상대적으로 낮은 온도인 막대는 검은색으로 측정된다. 두 대의 적외선 카메라들은 기본적으로

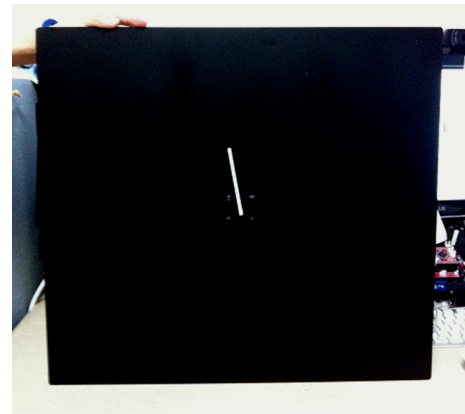


그림 5. 지터 측정기
 Fig. 5. Jitter measuring instrument.



그림 6. 적외선 스테레오 카메라에서의 막대 회전각도 측정
 Fig. 6. Rotation angle measurement of a stick in the IR stereo camera.

각각 50Hz로 동작하여 평균 20ms 간격으로 영상을 찍는다. 800쌍의 스테레오 영상을 이용하여 지터를 측정할 결과, 하나의 카메라에 대하여 20ms 간격의 평균각도는 26.65°로 나타나며, 지터에 의한 표준편차는 1.725ms (2.255°)로 측정되었다. 결론적으로 그림 4의 하단부에서 보는 바와 같이, 스테레오 지터는 두 카메라에 의한 통합지터로서, 두 스테레오 카메라의 지터가 동일한 점을 이용하면, 스테레오 지터는 표준편차 2.3ms (3.065°)를 갖고, 평균이 0인 가우시안 분포로 모델링할 수 있다.

IV. 표적 위치의 확률 모델

고온 및 고속 표적에 대하여 스테레오 정합을 수행하면, 3차원 공간에서 표적의 추적과 함께, 표적까지의 위치(거리)를 측정할 수 있다^[9]. 고속으로 움직이는 표적의 정확한 거리(z)를 측정하기 위해서는 두 카메라의 시퀀스가 동시에 촬영되어야 하며 각 카메라의 시퀀스 시간 간격도 동일하여야 한다. 하지만 비냉각방식의 적외선 카메라에서는 이상적인 기준 순간으로부터의 시간 변위, 즉 기준점보다 얼마나 빨리 혹은 늦게 나타나는가를 표현한 지터(jitter)가 발생한다. 더욱이 픽셀구조로 인하여 시차를 추정하는 과정에서 픽셀 위치오차도 발생하게 된다. 본 논문에서는 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 표적의 거리를 측정함에 있어서, 지터에 의한 오류와 픽셀 위치오차에 의한 오류를 동시에 고려하여 측정된 거리의 불확실한 범위를 확률적으로 모델링하고자 한다.

우선, 지터에 의한 거리 오차와 픽셀 위치오차에 의한 거리측정 오차는 서로 독립적인 확률변수로 표현할 수 있다. 그리고 실제 측정되는 거리의 오차는 두 오차가 동시에 산술적으로 합해진 결과이므로, 식 (3)과 같이 총거리측정 오차(Z)를 두 거리측정 오차의 합으로 표현할 수 있다.

$$Z = E + J \quad (3)$$

식 (3)에서 확률변수 Z는 정확한 표적의 거리에 대한 통합 오차를 나타내며, 픽셀 위치 오차에 의한 거리오차 E와 스테레오 지터 오차에 의한 거리오차인 J의 합으로 표현되었다.

1. 픽셀위치 오차에 의한 거리오차 확률 모델

앞에서 언급한 것처럼 픽셀에 의한 위치오차는 일종의 픽셀구조에 대한 양자화 에러로서, 보통 연속균일분포(continuous uniform distribution)로 표현하는 것이 가능하다. 물리적인 단위에서 픽셀 오차 p는 식 (4)로 표현되는데, 여기서 A는 픽셀 피치(픽셀간의 물리적인 거리)이다.

$$f_P(p) = \frac{1}{A}, \quad -\frac{1}{2}A < p < \frac{1}{2}A \quad (4)$$

픽셀 위치오차를 스테레오 정합에 의한 거리에 적용하면, z축에 대한 거리오차 e는 식 (5)와 같이 변환되고, 한 픽셀 오차 범위에 의한 실제 물리적인 거리의 오차 범위도 구해진다.

$$e = \frac{bf}{dA + p} = g(p), \quad (5)$$

$$\frac{bf}{dA + \frac{1}{2}A} \leq e \leq \frac{bf}{dA - \frac{1}{2}A}$$

이제 균일분포를 갖는 픽셀 위치오차 확률변수(p)가 식 (5)에 의하여 거리함수 $e=g(p)$ 로 변환되었으므로, 거리 오차에 대한 새로운 확률변수 e에 대한 확률분포밀도함수를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_E(e) = \frac{f_P(p)}{|g'(p)|} = \frac{\frac{1}{A}}{bf / \left(\frac{bf}{e}\right)^2} = \frac{1}{e^2} \left(\frac{bf}{A}\right) \quad (6)$$

식 (5)에서 d의 값에 따라 e의 범위가 정의되고 식 (6)에 따라 픽셀 위치오차 모델에 의해 실제 거리측정 오차에 대한 확률밀도함수가 구해진다. 즉, 식 (5)에 의하면, 스테레오 정합 과정에서 필연적으로 발생하는 픽셀 위치오차에 의하여 실제 측정되는 거리도 어떤 오차 범위를 갖게 된다는 것을 의미하며, 그 오차범위는 식 (6)과 같은 확률분포로 유도된다.

2. 지터 오차에 의한 거리오차 확률모델

지터오차모델은 시간단위이므로 이를 거리 단위로 변환하기 위해서는 이동체의 속도가 필요하다. 식 (3)에서 J는 지터 모델에 의한 시간단위를 거리단위로 변환한 것으로서, 본 논문에서는 거리 방향으로 표적의 속도는 등속도(v) 운동을 한다고 가정하여 z축 거리에 대

한 지터의 거리오차 확률밀도함수를 식 (7)과 같이 정의하였다.

$$f_J(j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_J} e^{-\frac{j^2}{2\sigma_J^2}} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\sigma_J = (v \cos\theta)\sigma_{jitter}$ 로 표현되는데, θ 는 스테레오 카메라의 z축과 움직이는 표적과의 사이각이다. σ_{jitter} 는 스테레오 지터의 표준편차이므로 단위는 시간이며 속도와 곱해져서 식 (7)도 거리에 따른 확률밀도함수로 표현된다. 식 (7)에서 같이 물체의 속도는 일종의 상수이므로, 시간단위의 지터 오차모델과 이를 거리로 환산한 지터에 의한 거리오차는 동일한 가우시안 분포로 표현되었다.

3. 표적의 거리오차에 대한 통합 확률모델

적외선 스테레오 카메라에 의한 거리측정 과정에서 발생하는 거리오차는 식 (3)에서 언급한 바와 같이 픽셀 위치오차와 지터에 의한 오차의 합으로 표현된다. 그리고 두 오차에 의한 거리오차의 확률변수는 서로 독립이므로, 실제 측정된 거리에 대한 측정오차는 두 거리오차의 확률밀도함수에 대한 컨볼루션으로 정할 수 있다.

$$f_Z(z) = f_E(e) * f_J(j) \quad (8)$$

즉, 식 (6)과 식(7)을 컨볼루션하면, 두 오차에 의한 거리측정 오차에 대한 통합 확률분포를 구할 수 있다. 이 때, 식 (5)와 (6)에서 추정된 시차 d에 따라서 픽셀 오차에 의한 오차거리의 범위가 달라지므로, d 값에 따른 $f_Z(z)$ 는 달라진다. 그림 7은 다양한 시차값에 대하여 식(8)의 컨볼루션 연산을 수치연산으로 처리하여 얻은 그래프를 보여준다. 각 그림에서 위쪽에 나란히 표시된 파란색의 두 그래프가 각각 지터오차 모델과 픽셀 위치오차 모델을 나타내며, 바로 아래 붉은색 그래프가 컨볼루션 결과를 보여준다. 3ms 수준의 지터오차에 의한 거리오차는 일정하지만, 시차값에 따라서 픽셀위치 오차는 그 오차범위가 커짐을 확인할 수 있다.

그림 7은 시차(d)가 3, 5, 11일 때, 두 오차모델에 의한 거리오차에 대한 확률밀도함수를 컨볼루션으로 얻은 결과를 보여준다. 그림 7에서 보면, 지터에 의한 거리 오차는 픽셀 위치오차에 의한 거리오차 훨씬 작다는 것

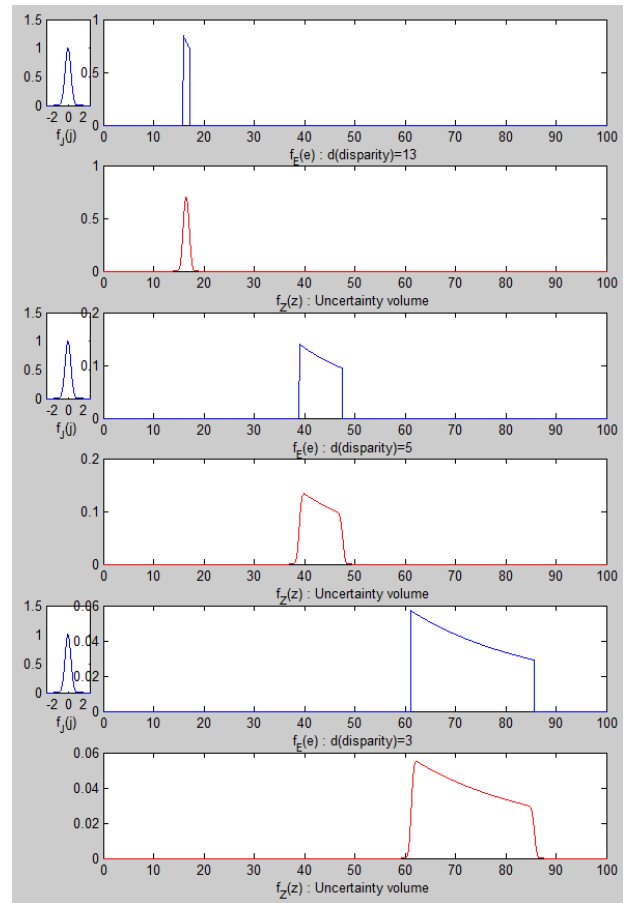


그림 7. 시차 d=3, 5, 11일 때 측정된 거리의 오차에 대한 확률밀도함수 $f_Z(z) = f_E(e) * f_J(j)$.
Fig. 7. For the disparity values d=3, 5, 11, the probability density function $f_Z(z) = f_E(e) * f_J(j)$.

을 볼 수 있다. 그림 7에 의하면, 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 거리를 측정할 경우, 실제 정확한 거리를 중심으로 일정한 범위 안에서 물체의 거리가 분포함을 확률적으로 보여준다. 측정거리는 일종의 확률변수로서, 확률적인 신뢰구간이나 확률분포를 적용하여야 측정된 거리의 정확도를 확률적인 입장에서 분석할 수 있다.

본 논문에서 모델링한 측정 거리의 확률모델은 이러한 랜덤한 오류 현상을 분석한 것으로서, 측정된 거리에 대한 신뢰도를 검증하거나 실제로 물체가 존재하는 공간을 표현하는데 유용하다. 시차추정 결과가 아무리 정확하더라도 거리측정 결과는 픽셀오차와 지터에 의하여 랜덤하게 나타나게 되며, 이로 인하여 측정된 거리는 확률적으로 표현하는 것이 적절하다는 것을 보여준다. 특히 거리가 가깝고 고속일수록 추정거리의 오차에

대한 확률모델은 불확실한 측정위치를 보정하는데 효과적이며, 신뢰구간을 설정하는데 적용할 수 있다.

V. 실험 결과

본 논문에서는 실제 고속의 표적에 대하여 정밀한 거리측정기와 연동하여 거리측정 실험을 수행하고 오차모델을 검증하였다. 랜덤하게 측정되는 측정 거리 현상을 확인하고, 이를 확률적인 모델과 신뢰구간으로 표현함으로써, 제안하는 확률모델이 타당함을 보여주고자 한다. 정확한 오차를 측정하기 위하여 3차원 궤적 측정기에 의하여 ground truth를 구하고, 적외선 스테레오 카메라 시스템으로부터 얻은 시차정보를 이용하여 물체의 거리의 구하였다. 적외선 카메라에 의한 오류를 분석하는 것이 본 논문의 주요 목적이기 때문에, 수동으로 스테레오 영상을 확인하면서 정확하게 시차정보를 추출하였다.

적외선 스테레오 카메라의 규격은 다음과 같다. 해상도는 384x288, spectral range는 7.5~14um, 초점거리는 25mm, 화각은 가로 30도, 세로 23도, pixel pitch는 35um, 그리고 영상취득 속도는 평균 50fps이다. 카메라 간의 거리인 baseline은 300mm로 설정하였다.

적외선 스테레오 카메라의 좌측 카메라를 기준으로 83m 거리에서 속도 172m/s로 출발하여 좌측 카메라의 왼쪽으로 5m가량 비껴나가는 고속 고온 물체를 4차례 촬영하였다. 실제 물체까지의 거리에 대한 ground truth 데이터는 3차원 궤적(x,y,z) 측정기로 동시에 측정하였다. 그림 8은 적외선 스테레오 카메라로 표적을 촬영한 영상을 보여주고 있다. 표적이 점으로 보일 정도로 매우 작고, 그 형태도 일정하지 않기 때문에, 정확한 시차추정을 위해서 수동으로 해당 물체 영역을 확대하여 물체 영역의 중심좌표를 구하여 시차정보를 구하였다.

적외선 스테레오 카메라를 이용한 시차정보로부터 물체의 거리를 추정하면, 이를 ground truth 거리와 비교하였다. 지터와 픽셀 위치 오차에 의하여 필연적으로 오차가 발생하므로, 이 오차를 확률분포에서 확인하였다. 그림 9와 10은 4번의 실험으로부터 추정된 거리와 ground truth, 그리고 수학적으로 유도한 확률분포 측면에서 신뢰도 구간을 그래프로 표시하였다. 각 그림에서 세로축은 거리이고 가로축은 시차이다. 가운데 곡선은 ground truth, 위아래 두 곡선들은 $f_z(z)$ 의 신뢰도

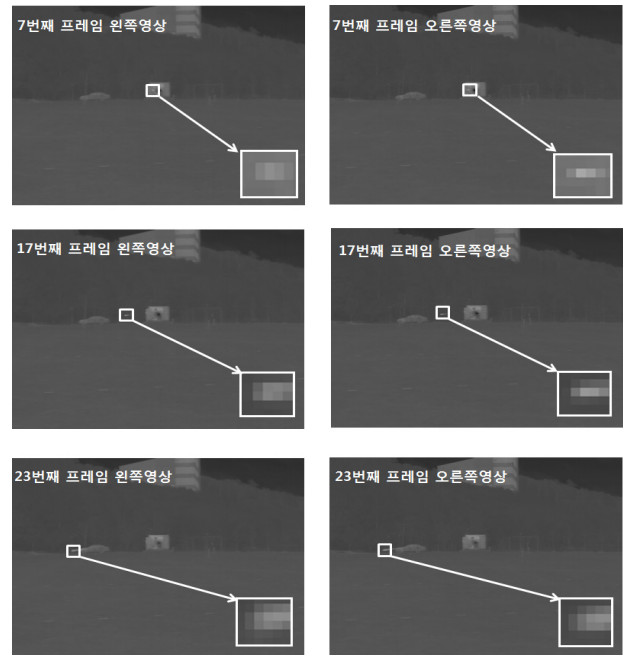


그림 8. 적외선 스테레오 카메라 영상에서 표적 검출
Fig. 8. Target object detection in IR stereo images.

가 95%와 99% 수준인 범위를 각각 나타내는 그래프이다. 붉은색 좌표로 표시한 점들이 적외선 스테레오 카메라로 추정된 표적의 측정 거리를 나타낸다.

그림 9, 10에서 보는 바와 같이 실제로 추정된 거리 정보는 ground truth와 99% 신뢰구간에 대부분 포함된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 분석하면, 스테레오 정합과정에서 픽셀 구조로 인하여 최소한의 시차추정 오류가 발생하는 점을 확인할 수 있으며, 적외선 카메라의 지터에 의해서도 오류가 발생한다는 점을 확인할 수 있다. 즉, 아무리 정확하게 시차추정을 하더라도 픽셀 구조에 의해 필연적으로 랜덤하게 발생하는 오류를 고려하여야 하며, 고속 물체인 경우에는 지터에 의한 오류모델도 고려하여야만 추정된 거리정보를 활용할 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 의미에서 추정된 거리를 하나의 값으로 규정하기 보다는 고속 물체가 존재하는 확률적인 3차원 거리공간을 설정하는 것이 적절하다고 판단한다. 정확한 거리값을 제시하기 보다는 일정한 신뢰도 구간에서 물체가 존재할 가능성을 제시함으로써, 고속 물체의 거리정보를 활용하는 시스템이 오류를 포함하여 안정적으로 대처할 수 있는 방법을 준비할 수 있다.

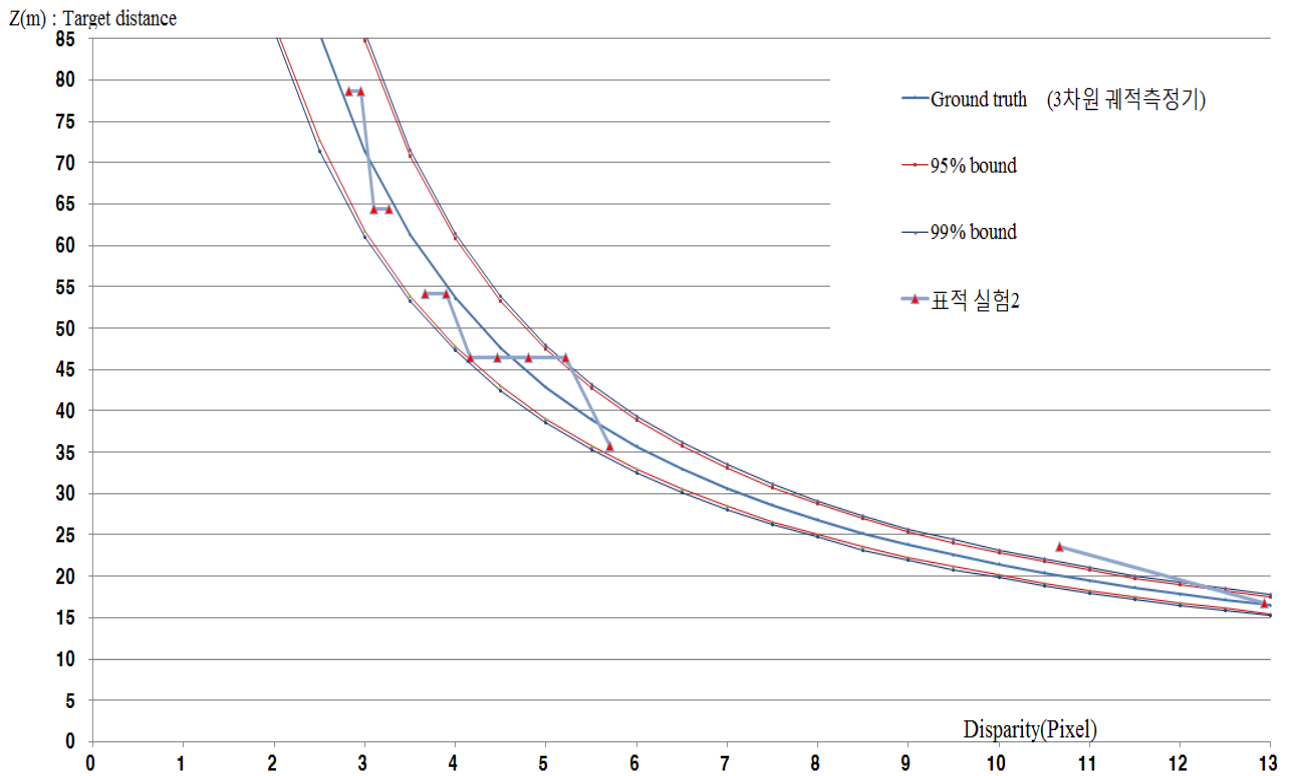
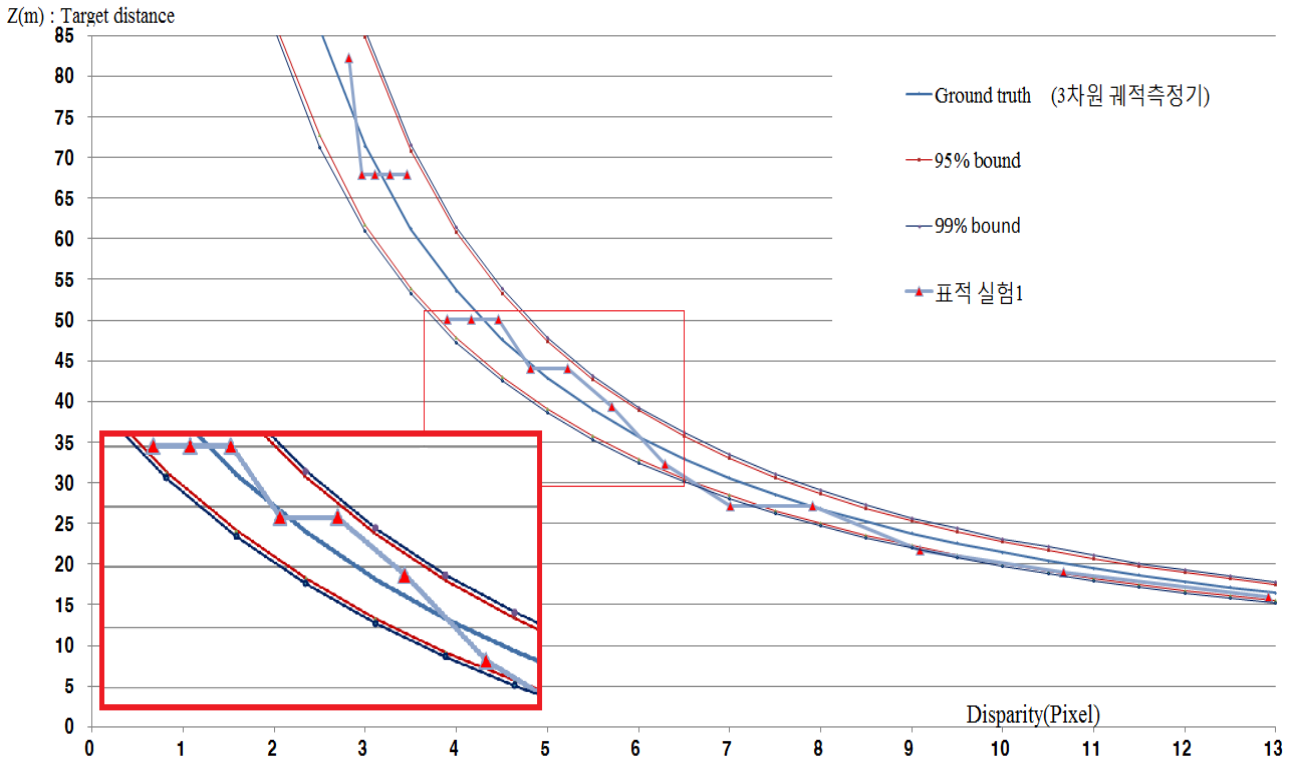


그림 9. 표적의 거리 추정 실험 결과 (#1, 2)
 Fig. 9. Result of estimating the target distances (#1, 2).

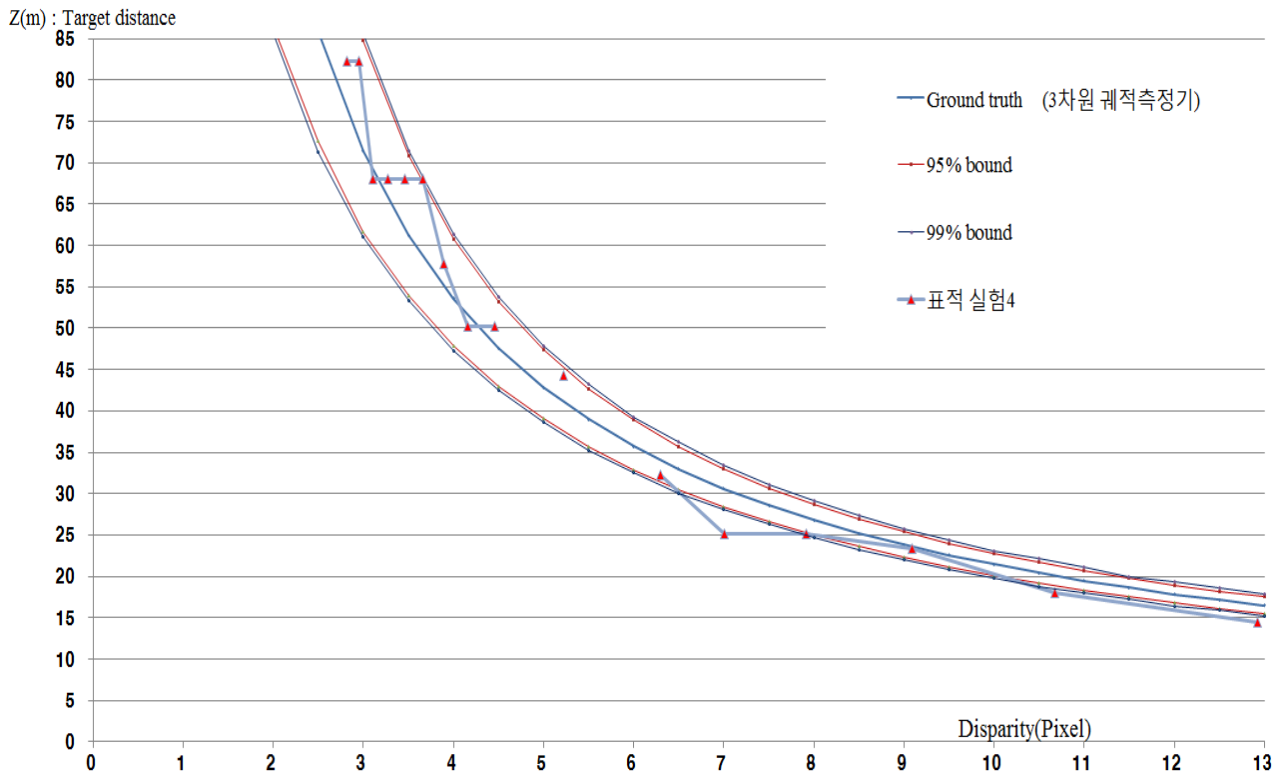
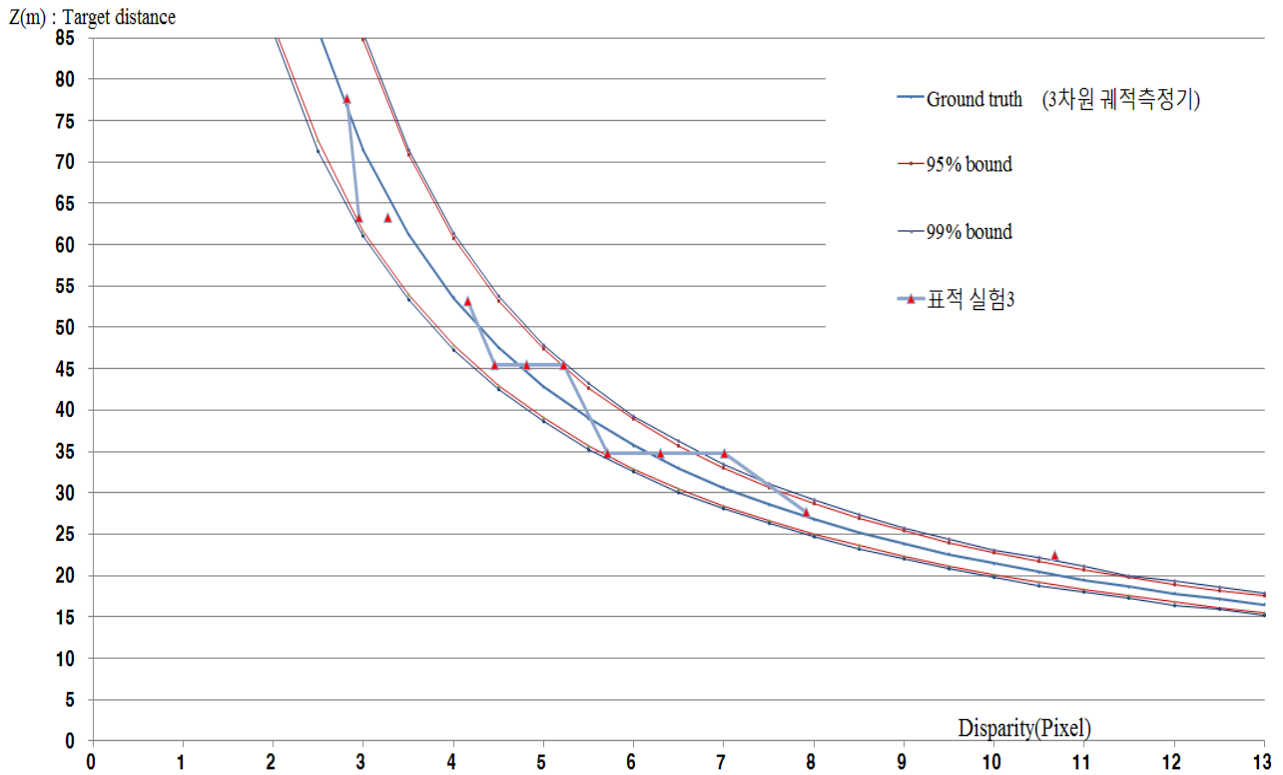


그림 10. 표적의 거리 추정 실험 결과 (#3, 4)
 Fig. 10. Result of estimating the target distances (#3, 4).

이번에는 기존에 논문에서 알려진 바와 같이, 픽셀에러만을 고려하여 측정 거리의 오차를 분석 비교하였다. 픽셀에러만을 적용할 경우, 실제 물체의 위치는 식 (5)에서 제시하는 범위에 존재하여야 한다. 즉, 본 논문의 실험처럼 시차추정 결과가 정확하다는 가정하에서는 랜덤한 측정 오차는 식 (5)의 범위에 들어와야 한다. 그러나 실제로는 많은 측정값들이 식 (5)의 범위를 벗어남을 확인할 수 있다. 제안하는 확률모델에 따르면, 95% 신뢰구간에 대하여 총 11개의 측정거리가 구간을 벗어났고, 99% 신뢰도에서는 8개의 측정거리가 신뢰구간을 벗어났다. 반면에, 픽셀에러만을 고려한 경우에는 식 (5)의 범위를 벗어난 경우가 13개로서 더 많은 오류가 발생하였다. 이러한 결과는 픽셀에러만으로는 랜덤하게 발생하는 측정거리를 확률분포로 표현하는 데에는 한계가 있음을 의미한다. 제안하는 확률모델에 의하면, 더 큰 측정오차도 확률적으로 설명하는 것이 가능하다. 따라서 제안하는 확률모델이 적외선 스테레오 카메라를 이용한 거리 측정의 현상을 표현하는데 더 적절하다는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제시한 확률모델은 적외선 스테레오 카메라를 이용한 거리추정 시스템에서 실제 물체의 거리를 측정하는데 발생하는 오류를 확률적으로 분석한 것으로서, 특히 고속의 물체를 추적하는 시스템에 적합하다. 아울러 적외선 스테레오 카메라에서 발생하는 시간 지터와 픽셀 위치 오차를 하나의 통합 확률모델로 처음으로 제안하였다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

VI. 결 론

본 논문에서는 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 고속으로 다가오는 표적의 위치를 측정함에 있어서, 그 거리정보를 확률적으로 모델링하는 방법을 제안하였다. 시차추정 과정에서 발생하는 픽셀 위치오차와 적외선 카메라의 지터오차를 확률변수로 설정하고, 이 두 가지 확률변수를 하나로 통합한 확률모델을 제안하였다. 이동하는 물체의 거리는 불확실한 3차원 거리공간으로 정의되는데, 고속으로 이동하는 표적에 대하여 적외선 카메라의 지터 오차분포와 ± 0.5 픽셀범위의 픽셀 위치 오차분포함수를 컨볼루션하여 하나로 통합한 확률모델에 의하여 표현된다.

본 논문에서 제안하는 적외선 스테레오 카메라 시스템

을 검증하기 위하여 3차원 궤적 측정기를 함께 가동하여 ground truth 데이터를 구하고, 적외선 스테레오 카메라를 이용하여 시차추정 과정을 통하여 구한 거리정보와 비교하였다. 실제 고속 고온 물체를 이용하여 4차례의 실험을 수행한 결과, 적외선 스테레오 카메라를 이용한 고속 표적의 위치는 제안된 확률모델 범위 안에서 적외선으로 촬영된 표적의 위치를 구할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 거리오차 확률모델은 향후 컬러 카메라를 이용하지 못하는 다양한 환경에서 적외선 카메라를 이용하여 고속으로 이동하는 물체의 거리 및 위치를 측정하고 그 정확도를 분석하는 확률적 모델로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 본 논문을 통하여 랜덤 오차가 발생하는 측정값을 이해하고, 확률공간에서 신뢰구간을 설정할 수 있으므로, 적외선 스테레오 카메라를 이용한 고속 이동체의 위치 측정결과와 오차를 분석하는데 있어서 본 논문에서 제시한 수학적 확률모델과 실험 결과는 이론적 배경만이 아니라, 실험적 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] R. C. Warren, "Detection of distant airborne targets in cluttered backgrounds in infrared image sequences," PhD thesis, University of South Australia, 2002.
- [2] D. Maltese, "New generation of naval IRST," *Proc. of SPIE*, volume 7660, pp. 766004-1-766004-12, 2010
- [3] F. Zhang, C. Li, and L. Shi, "Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence," *Infrared Physics & Technology*, volume 46, issue 4, pp. 323-328, April 2005
- [4] Y. Gu, C. Wang, B. Liu and Y. Zhan, "A kernel-Based nonparametric regression method for clutter removal in infrared small-target detection applications," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, volume 7, no.3, pp.469-473, July 2010.
- [5] R. Saran, A. K. Sarje, "Robust long range target detection algorithm using adaptive selective top-hat transform," *Proc. of International Conference on Image Information Processing*, pp. 1-5, November 2012.
- [6] S. H. Kim, Y. K. Yang, J. H. Lee and Y. C. Park, "Small target detection utilizing robust

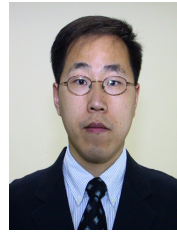
- methods of the human visual system for IRST,” *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, volume 30 (9), pp. 994-1011, 2009.
- [7] M. A. Javed, G. Xu, J. Yao, L. Ning, S.Y. Shah, “GPU based small target detection using IR images,” *Proc. of International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*, pp 92-94, January 2012.
- [8] J. A. Ratches, “Review of current aided/automatic target acquisition technology for military target acquisition tasks,” *Optical Engineering*, volume 50, issue 7, pp. 072001-1-072001-8, July 2011.
- [9] E. R. Parshall, J. M. Mooney, and A. Anselmo, “Infrared stereo imaging for 3D tracking of point targets,” *Proc. of SPIE*, volume 2847, pp. 139-148, 1996.
- [10] B. Jutzi, R. Gabler, and K. Jaeger, “Stereo vision for small targets in IR image sequences,” *Proc. of SPIE*, volume 4473, pp. 361-370, 2001.
- [11] “The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals,” FLIR [Online]. Available: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_EN.pdf
- [12] Z. Zhang, “A flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations,” *Proc. of International Conference on Computer Vision*, pp. 666-673, Corfu, 1999.
- [13] S. D. Blostein, and T. S. Huang, “Error analysis in stereo determination of 3-D point positions,” *IEEE Trans. PAMI*, vol. 9, no. 6, pp. 752-765, 1987.
- [14] J. H. Oh, J. S. Park, S. H. Lee, B. H. Lee, and J. I. Park, “Error Modeling of Depth Measurement Using FIR Stereo Camera Systems,” *Proc. of International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC'13)*, pp. 470-475, UAE, January 2013.

저 자 소 개



오 준 호(학생회원)
2006년 한양대학교 전자전기
공학과 학사 졸업.
2009년 한양대학교 메카트로닉스
공학과 석사 졸업.
2010년~현재 한양대학교 컴퓨터
소프트웨어공학과
박사 과정.

<주관심분야 : 적외선 영상처리, 컴퓨터 비전, 물
체인식>



이 상 화(정회원)-교신저자
1994년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1996년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
2000년 서울대학교 전기컴퓨터
공학부 박사 졸업.

2005년~2011년 서울대학교 BK21정보기술사업단
BK조교수

2011년~현재 서울대학교 연구조교수

<주관심분야 : 스테레오 및 3D 시스템, 비디오/영
상 신호처리, 패턴인식 및 자동화, 컴퓨터비전>



이 부 환(정회원)
1991년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업.
1993년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업.
2006년 경북대학교 전자공학과
박사 졸업

1993년 3월~현재 국방과학연구소 책임연구원.
<주관심분야 : 표적 탐지/인식/추적, 컴퓨터 비전,
디지털 영상처리>



박 종 일(정회원)
1987년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1989년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
1995년 서울대학교 전자공학과
박사 졸업.

1992년~1994년 일본 NHK방송기술연구소
객원연구원

1995년~1996년 한국방송개발원 선임연구원

1996년~1999년 일본 ATR지능영상통신연구소
연구원

1999년~현재 한양대학교 공과대학
컴퓨터·소프트웨어공학과 교수

<주관심분야 : 가상현실, 컴퓨터그래픽스/비전, 3
차원 영상처리, 인간컴퓨터 상호작용>