

# 구조광 영상기반 전방향 거리측정 시스템 개발

## Development of Omnidirectional Ranging System Based on Structured Light Image

신진, 이수영\*

(Jin Shin<sup>1</sup> and Sooyeong Yi<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Seoul National University of Science and Technology

**Abstract:** In this paper, a ranging system is proposed that is able to measure 360 degree omnidirectional distances to environment objects. The ranging system is based on the structured light imaging system with catadioptric omnidirectional mirror. In order to make the ranging system robust against environmental illumination, efficient structured light image processing algorithms are developed; sequential integration of difference images with modulated structured light and radial search based on Bresenham line drawing algorithm. A dedicated FPGA image processor is developed to speed up the overall image processing. Also the distance equation is derived in the omnidirectional imaging system with a hyperbolic mirror. It is expected that the omnidirectional ranging system is useful for mapping and localization of mobile robot. Experiments are carried out to verify the performance of the proposed ranging system.

**Keywords:** omnidirectional image, ranging system, laser structured light

### I 서론

이동로봇이 자율주행하기 위해서는 주변환경 물체까지의 거리 데이터가 필요하다. 거리 데이터는 단순히 충돌회피 뿐만 아니라 전역공간상에서 이동로봇 자신의 위치를 추정 하거나, 혹은 미지 환경의 물체지도도를 작성하는데 사용될 수 있다. 거리측정방식의 대표적인 예로는 스테레오 영상 방식, 신호제공시간 측정방식, 레이저 스캐너, 구조광 영상 방식등이 있다[1].

(1) 스테레오 영상방식: 많은 정보량을 획득할 수 있다는 장점이 있으나, 대응점(correspondence) 문제 때문에 많은 연산량이 필요하며, 주변환경 조명잡음에 약하다[2].

(2) 신호 제공시간 측정방식: 신호의 제공시간을 측정하여 거리를 계산하는 방식으로 대표적으로 초음파 센서를 예로 들 수 있다. 간단하고 경제적이란 장점이 있지만 측정 정밀도가 낮은 문제가 있다[3,4].

(3) 레이저 스캐너: 높은 측정 정밀도를 가지며 측정주파수도 높다는 장점이 있으나, 스캔 구동부에 정밀한 기계장치가 필요하며, 고정밀도 처리회로의 고비용 문제가 있다.

(4) 구조광 영상방식: 대응점 문제가 없어 연산이 효율적이고 측정주파수가 높지만, 주변조명잡음에 약하며 별도의 구조광 발생장치가 필요하다[5,6].

과거에는 카메라 영상장치의 처리속도가 느리고, 레이저 구조광 발생장치가 크고 비쌌기 때문에 구조광 영상방식의 거리측정 시스템 구현이 어려웠다. 그러나 근래에는 반도체 기술의 발달로 레이저 발생장치와 카메라 영상센서가 소형

화되고 가격이 저렴해졌기 때문에 구현이 용이해졌다. 따라서 이동로봇, 보안시스템, 3차원 카메라등의 분야에서 구조광 영상방식에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

이동로봇의 자율주행을 위해 구조광 영상기반 거리센서를 적용하는 경우, 한 번에 가능한 넓은 영역의 거리정보를 획득하는 것이 유리하다. 구형, 원뿔형, 쌍곡면형, 2차곡면형 거울과 같은 곡면형 거울을 이용한 전방향성(omnidirectional) 카메라는 360도 모든 방향의 영상정보를 한 장의 영상으로 얻을 수 있기 때문에 구조광 영상기반 거리센서에 효과적으로 응용될 수 있다. [7]에서는 원뿔형 거울을 채택한 전방향 카메라와 전방향 구조광 조사장치를 조합하여 전방향 거리센서를 개발하였고, 이를 이동로봇에 적용하였다. 360도 전방향으로 구조광을 조사하기 위하여 [7]에서는 점(point)형 구조광을 모터에 의해 회전하는 거울에 반사시켜 스캔하는 방식을 이용하였다. 한편 [8]에서는 전방향 영상을 얻기 위한 2차곡면형 거울과 별도로 원형의 레이저 구조광을 원뿔형 거울에 반사시키는 전방향 구조광 조사장치를 개발하였으며, [6]에서는 실린더 렌즈를 통해 점형 구조광을 분산시켜 얻은 선형(stripe)의 구조광 3-4개를 수평면에 링형태로 배치한 구조광 조사장치를 사용하였다. 모터를 이용해 점형 구조광을 회전스캔하는 방식은 기계적인 진동과 내구성의 문제가 있으며, 원뿔형 거울에 반사시켜 전방향으로 구조광을 조사하는 방식과 실린더 렌즈를 이용한 점형 구조광 분산 방식은 광에너지 밀도가 낮아 지므로 주변 조명잡음에 약하다는 문제점이 있다. 그러므로 구조광 영상을 처리하는 과정에서 조명잡음에 강인하게 구조광 영상을 처리하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 360도 전방향 거리 데이터 측정을 위한 구조광 영상 기반의 전방향 거리측정 센서 시스템 개발에

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 24., 수정: 2012. 1. 30., 채택확정: 2012. 2. 7.

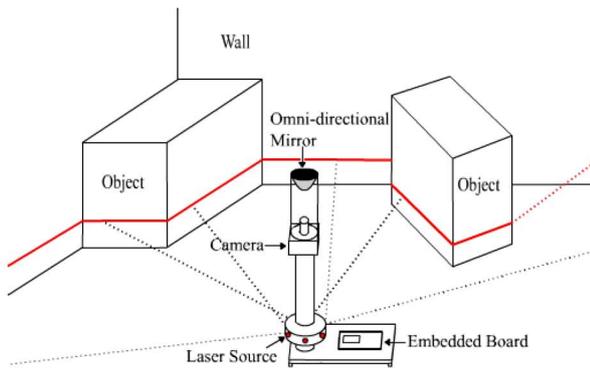
신진, 이수영: 서울과학기술대학교 전기공학과

(gomlands@naver.com/suylee@snut.ac.kr)

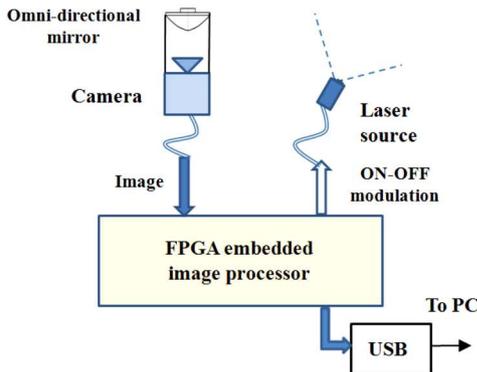
관해 서술한다. 별도의 수직광학계(telecentric optics)를 필요로 하는 2차곡면형 거울과는 달리 기존의 카메라만을 사용할 수 있는 쌍곡면형(hyperbolic) 거울을 채택하였으며, 2차곡면형 거울 광학계에 따른 거리계산식을 도출한다. 또한 전술한 바와 같이 실린더 렌즈에 의해 낮아진 광에너지 밀도를 갖는 구조광 영상에서 주변조명잡음에 강인한 영상처리 방법을 제안한다. 본 시스템은 단방향으로 거리를 측정하는 초음파 센서나 PSD센서에 비해 매우 효율적으로 주변 환경의 거리를 얻을 수 있으며, 따라서 이동로봇의 지도작성과 자율주행에 유용하게 적용 될 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다: 먼저 II 장에서 본 논문에서 개발한 구조광 영상기반 전방향 거리측정 센서 구성과 거리계산식, 그리고 구조광 영상처리 방법에 관해 서술하고, III 장에서 거리측정 오차 분석, 그리고 실험결과를 제시한다. 그리고 IV 장에서 결론을 맺는다.

II. 전방향 거리측정 시스템

그림 1은 본 논문에서 구현한 구조광 영상기반 전방향 거리측정 시스템의 개념도 및 시스템 구조도이다. 카메라를 기준으로 상부에는 360도 전방향 관측이 가능한 쌍곡면형 거울이 설치되고, 하부에는 360도 모든 방향으로 구조광을 조사할 수 있도록 폭 120도를 갖는 선형 구조광원 4개가 설치된다. 평면주행 이동로봇을 위해서 본 논문에서는 수평



(a) Overall omnidirectional ranging system.



(b) System configuration.

그림 1. 전체적인 구조광 영상기반 전방향 거리측정 시스템 및 시스템 구성.

Fig. 1. Overall omnidirectional ranging system based on structured light image and system configuration.

방향으로 구조광을 조사하였다. 쌍곡면형 거울은 별도의 수직광학계를 필요로 하지 않으므로 기존의 원근 카메라를 사용할 수 있다[9]. 그리고 각각의 선형 구조광은 점형의 구조광원을 실린더 렌즈를 통해 분산시킨 것이다[10].

1. 전방향 구조광 영상처리

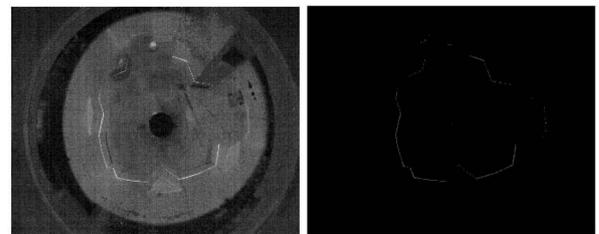
전술한 바와 같이 점광원을 실린더 렌즈를 통해 선형으로 만드는 과정에서 광에너지 밀도가 낮아지기 때문에 구조광 검출을 위한 영상처리 과정에서 주변 조명잡음에 약하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 구조광 온-오프 모듈레이션에 따라 얻은 구조광영상-배경영상간의 차영상(difference image)을 시간에 따라 누적하는 차영상 적분 알고리즘을 제안하였다. 차영상 적분 알고리즘은 구조광에 해당하는 화소만을 선택적으로 강화하는 효과가 있으므로 전체영상에서 구조광에 해당하는 화소를 탐색할 때, 주변 조명잡음에 강인한 특성을 보인다.

그림 2는 구조광 모듈레이션에 따라 얻은 영상을 순차적으로 누적하는 실험과정을 보여준다. 구조광에 해당하는 화소들이 누적횟수에 따라 점차 선택적으로 강화됨을 볼 수 있다. 본 논문에서는 최대 10회까지 차영상 적분을 실행하도록 하였다.

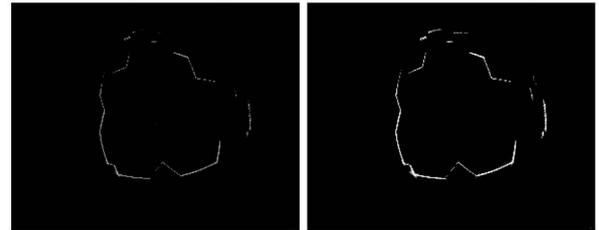
2. 전방향 구조광 영상 탐색

전방향 구조광 영상에서 거리정보를 얻기 위해서는 먼저 구조광 화소를 찾고, 카메라의 중심, 즉 광축(optical axis)에 해당하는 화소로부터 구조광 화소까지의 방향과 거리를 구해야 한다. 일반적인 영상의 경우에는 특징점 화소를 찾기 위해서  $x$  혹은  $y$  방향으로 탐색하는 것이 보통이지만, 전방향 영상의 경우에는 그림 3에서 보이는 바와 같이 광축을 중심으로 한 방사향(radial) 탐색이 적합하다.

하나의 방향각  $\theta$ 에 대한 기본적인 방사향 탐색 알고리즘은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 모든 방향으로 탐색하기 위해서는  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 에 대해서 이를 반복하면 된다.



(a) Original image. (b) Difference image.



(c) 5th integration of difference images. (d) 10th integration of difference images.

그림 2. 구조광 영상 차적분 영상처리 결과.

Fig. 2. Result of integration of difference structured light image processing.

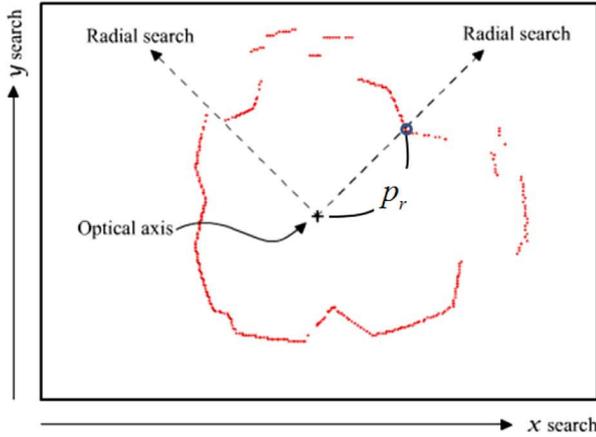


그림 3. 전방향 구조광 영상에 대한 방사향 탐색:  $p_r$ 은 광축으로부터 구조광 화소까지의 화소거리.

Fig. 3. Radial search for omnidirectional structured light image:  $p_r$  denotes pixel distance to the structured light pixel from the optical axis.

```

for (  $r = 0$ ;  $r < r_{max}$ ;  $r += \Delta r$  ) {
     $x = x_s + r \cos \theta$ ;
     $y = y_s + r \sin \theta$ ;
     $getpixel(round(x), round(y))$ ; }
    
```

그림 4. 기본적인 방사향 탐색 알고리즘.

Fig. 4. Basic radial search algorithm.

그림 4에서  $(x_s, y_s)$ 는 방사향 탐색의 시작점으로서 영상면에서 광축의 위치  $(x_c, y_c)$ 로 설정하며,  $r_{max}$ 는 영상의 경계까지의 반지름 길이를 나타낸다. 그리고  $round(\cdot)$ 은 정수변환 함수를 나타내며,  $getpixel(\cdot, \cdot)$ 는 위치  $(\cdot, \cdot)$ 에 해당하는 화소 값을 얻어내는 함수를 의미한다. 이 방식은  $\sin\theta$ 와  $\cos\theta$ 에 부동 소숫점이 포함되므로 많은 계산량이 필요하고,  $\Delta r$ 의 크기 설정에 따라 하나의 화소를 중복 탐색하거나, 혹은 탐색과정에서 빠트릴 수 있으므로 탐색이 제대로 이루어지지 않을 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 Bresenham 직선 그리기 알고리즘[11,12]에 기반한 방사향 구조광 탐색 알고리즘을 제안한다.

Bresenham 직선 알고리즘은 원래 이산화된 정수형 공간 상에서 주어진 임의의 두 점, 즉 시작점  $(x_s, y_s)$ 과 끝점  $(x_e, y_e)$ 을 잇는 직선을 그리기 위한 것이다[12]. 주어진 두 점의 기울기  $m = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}$ 이  $0 \leq m \leq 1$ 인 경우,  $x$ 축을 기준으로 주어진  $x_s$ 에서 시작하여 1씩 증가시키면서  $y$ 축 오차,  $\epsilon$ 를 누적하고, 누적오차를 최소화할 수 있는 화소를 선택한다(그림 5). 그림 6은 Bresenham 알고리즘 기반의 영상 탐색 방법을 의사코드(pseudo code)로 나타낸 것이다. 이 알고리즘은 정수 덧셈, 뺄셈 연산만으로 구현할 수 있기 때문에 계산면에서 매우 효율적인 알고리즘이다. 주어진 두 점의 기울기가  $m > 1$ 인 경우는 직선  $y = x$ 에 대한

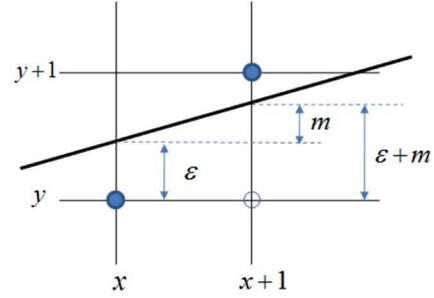


그림 5. Bresenham 직선 알고리즘 기반 탐색.

Fig. 5. Search based on Bresenham line algorithm.

```

 $\epsilon = 0, y = y_s$ ;
for (  $x = x_s$ ;  $x < x_e$ ;  $x++$  ) {
     $getpixel(x, y)$ ;
    if ( $\epsilon + m < 0.5$ )
         $\epsilon = \epsilon + m$ ;
    else
         $y = y + 1, \epsilon = \epsilon + m - 1$ ;
}
    
```

그림 6. Bresenham 알고리즘 기반 영상 탐색 방법의 의사코드.

Fig. 6. Pseudo code for image search method based on Bresenham algorithm.

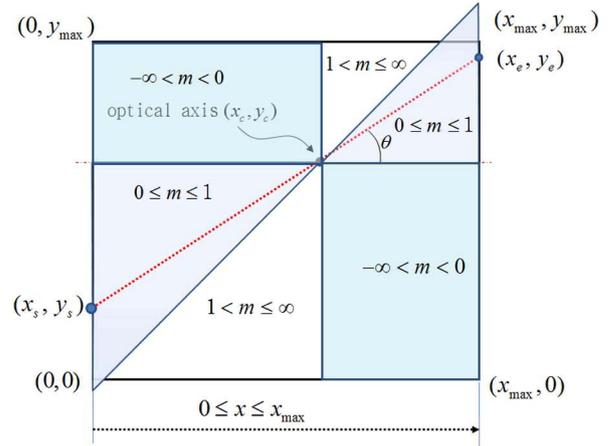


그림 7. Bresenham 알고리즘을 이용한 방사향 탐색.

Fig. 7. Radial search based on Bresenham algorithm.

$0 \leq m \leq 1$ 인 경우의 대칭이므로 위 그림 6의 알고리즘에서  $x$ 와  $y$ 를 바꿔서 같은 과정을 적용할 수 있다. 또한 기울기  $m$ 이 음수인 경우에 대해서도 위 알고리즘을 간단히 수정하여 적용할 수 있다.

Bresenham 알고리즘을 전방향 구조광 방사향 탐색에 적용하기 위해서는 하나의 방향각  $\theta$ 에 대해서 탐색의 시작점과 끝점을 구해야 한다. 즉, 영상면에서 광축  $(x_c, y_c)$ 을 지나면서 방향각  $\theta$ 를 갖는 직선의 시작점과 끝점은 각각 다음 식 (1)을 만족한다:

$$\tan \theta = \frac{y_e - y_c}{x_e - x_c} = \frac{y_c - y_s}{x_c - x_s} \quad (1)$$

그림 7에서  $x_s = 0$ ,  $x_e = x_{max}$ 이므로  $y_s$ 와  $y_e$ 는 다음 식 (2)로 주어진다.

$$\begin{aligned} y_s &= y_c - x_c \cdot \tan \theta \\ y_e &= y_c - (x_{max} - x_c) \cdot \tan \theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $x_{max}$ 는 영상의  $x$ 축 경계값을 의미한다. 방향각이  $\theta \geq 45^\circ$ 이거나  $\theta < 0^\circ$ 인 경우도 유사한 방법으로 구할 수 있다.

그림 4의 기본적인 방사향 탐색 방법에 비해 본 논문에서 제시한 Bresenham 알고리즘 기반 방사향 탐색 방법은 부동 소숫점 연산이 없고, 또한 반복 탐색횟수가 적으므로 효율적인 연산이 가능하며, 하드웨어 구현이 용이하다는 장점이 있다. 예로서  $640 \times 480$  크기의 영상에 대한 기본적인 방사향 탐색 방법은 탐색 방향각을  $\Delta\theta = 1^\circ$  간격으로 샘플링하는 경우에  $360^\circ$  전체로 144,000번( $r_{max} = \sqrt{320^2 + 240^2} = 400$ )이므로  $360 \times 400 = 144,000$ 번의 for-loop 반복이 필요하다. 반면에 본 논문에서 제안한 Bresenham 직선 알고리즘 기반의 방사향 탐색은 100,800번( $|\theta| \leq 45^\circ$ 인 경우에는  $0 \leq x \leq 639$  범위에서 탐색하므로  $90^\circ \times 640 = 57,600$ 번, 그리고  $45^\circ \leq |\theta| \leq 90^\circ$ 인 경우는  $0 \leq y \leq 479$  범위에서 탐색하므로  $90^\circ \times 480 = 43,200$ 번으로 총 100,800번)의 for-loop 반복이 필요하다.

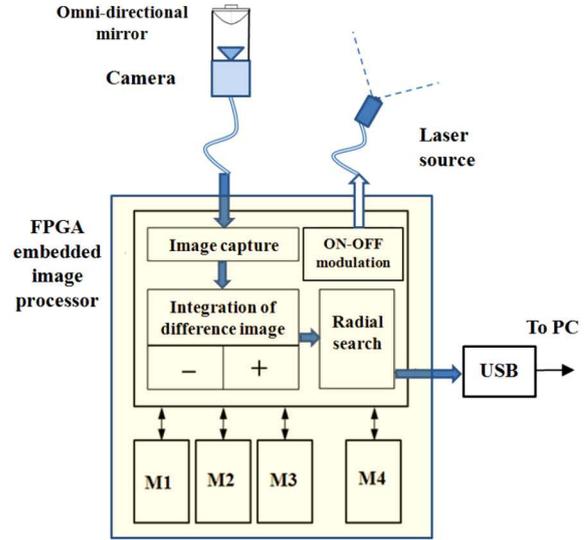
3. 영상처리 하드웨어 구현

전술한 차영상 적분 알고리즘과 Bresenham 기반 방사향 영상탐색 알고리즘은 정수 합, 차, 그리고 시프트와 같은 간단한 연산들로 이루어져 있으므로 하드웨어 구현에 적합하다. 그림 8은 본 논문을 통해 개발한 전용 영상처리 하드웨어의 블록다이어그램 및 알고리즘 흐름도이다. 그림에서 M1, M2, M3, M4는 한 장의 영상 크기를 갖는 영상 메모리 블록이며,  $I(0), I(2), \dots, I(18)$ 은 구조광을 켜 상태에서 얻은 영상, 그리고  $I(1), \dots, I(19)$ 는 구조광을 끈 상태에서 얻은 영상을 의미한다. 또한  $D(2,3) = I(2) - I(3)$  등은 차영상을 의미하며,  $S(0,5) = D(0,1) + D(2,3) + D(4,5)$  등은 차분영상들을 적분한 영상을 나타낸다. 그림에서 보듯이 알고리즘의 마지막 단계에서 영상 메모리 M4에는 10회 적분된 차영상, 즉  $D(18,19) + S(0,17) = S(0,19)$ 가 저장된다. 차적분된 영상은 그림 2(d)와 같은 형태가 되며, 방사향 탐색(radial search) 블록에서 이 영상에 대해 전술한 알고리즘을 통해 영상면위의 구조광 화소를 찾는다.

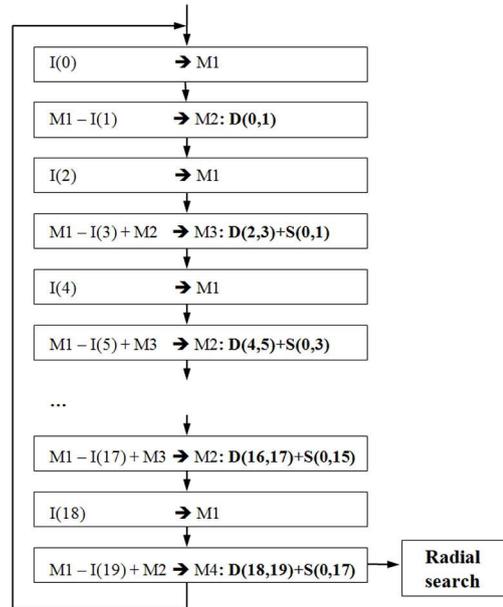
4. 거리 계산식

그림 9는 구조광 영상기반 전방향 거리측정 모델로서 쌍곡면형 거울의 수직단면을 나타낸다. 시스템의 하부에서 조사된 구조광이 물체에서 반사되어 쌍곡면 거울을 거쳐서 카메라 영상에 맺히게 된다. 영상면에서 광축 화소로부터 구조광 화소까지의 거리가  $p_r$ 인 경우에(그림 3) 물체까지의 거리  $l$ 은 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 거리 계산식을 얻기 위한 각 매개변수들을 다음과 같이 정의한다(그림 9):

- 영상면의 광축에서 구조광 화소까지의 화소거리:  $p_r$
- 기준점(구조광)에서 거울까지의 높이:  $h$
- 기준점에서 카메라 핀홀까지의 높이:  $p$



(a) Block diagram of FPGA embedded image processor.



(b) Algorithm flow of integration of difference images.

그림 8. 하드웨어 구현.

Fig. 8. Hardware implementation.

- 카메라의 초점거리:  $\lambda$
- 직선 I과 II가 쌍곡면 거울과 만나는 교점:  $(r_c, z_c)$
- 교점에서 내린 수선이 직선 I과 이루는 각:  $\phi$
- 교점에서 거울면에 대한 접선의 수평각:  $\alpha$
- 입사광선 I이 접선과 이루는 각:  $\theta$
- 직선 II가  $z$ 축과 만나는 점의 높이:  $d$

그림 9에서 물체까지의 거리  $l$ 은 다음 식 (3)과 같이 얻을 수 있다:

$$l = z_c \cdot \tan \phi + r_c \quad (3)$$

이제 식 (3)의 계산을 위한 거울면 반사점  $(r_c, z_c)$ 와 각  $\phi$ 는 다음의 과정으로 구할 수 있다. 먼저 쌍곡면형 거울의 수직단면인 쌍곡선은 다음 식으로 표현된다.

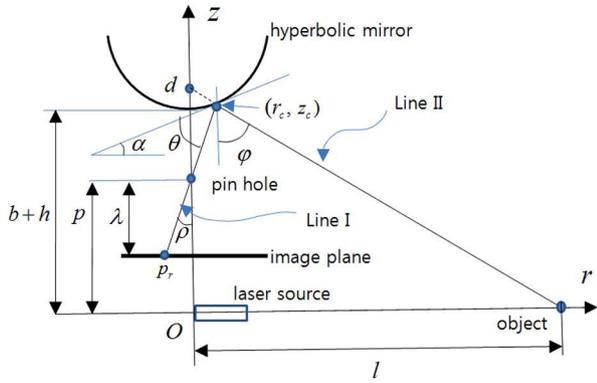


그림 9. 구조광 영상기반 전방향 거리측정 모델.  
Fig. 9. Omnidirectional distance measurement based on structured light image.

$$\frac{r^2}{a^2} - \frac{(z-h)^2}{b^2} = -1 \quad (4)$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 거울 제작자로부터 주어지는 값이며,  $h$ 는 설치높이가 된다. 카메라의 핀홀을 통과하는 빛의 직선 II는 다음 식으로 표현된다:

$$z = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) \cdot r + p = \cot\rho \cdot r + p \quad (5)$$

여기서 영상각  $\rho$ 는  $\rho = \tan^{-1} \frac{p_r}{\lambda}$ 로 주어진다. 위 식 (4)에 식 (5)를 대입하면 다음과 같이 거울면 반사점  $(r_c, z_c)$ 을 얻을 수 있다:

$$r_c = \frac{a^2(p-h) \cdot \cot\rho \pm ab\sqrt{(p-h)^2 - b^2 + a^2\cot^2\rho}}{b^2 - a^2\cot^2\rho} \quad (6)$$

$$z_c = \cot\rho \cdot r_c + p$$

이제 물체점으로부터 반사점까지의 직선 I은 다음 식과 같다.

$$z = -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cdot r + d = -\cot\phi \cdot r + d \quad (7)$$

그림 9에서 거울면 광 반사법칙으로부터  $\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \rho$ 이고, 따라서  $\phi$ 는 다음과 같다.

$$\phi = \pi - \rho - 2\theta = 2\alpha + \rho \quad (8)$$

한편 거울면 반사점  $(r_c, z_c)$ 에서 접선의 기울기는 식 (9)와 같다.

$$\frac{dz}{dr}\bigg|_{(r_c, z_c)} = \frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{r_c}{z_c - h} \quad (9)$$

따라서 접선의 수평각은  $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{r_c}{z_c - h}\right)$ 가 되고, 이를 식 (8)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다:

$$\phi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{r_c}{z_c - h}\right) + \rho \quad (10)$$

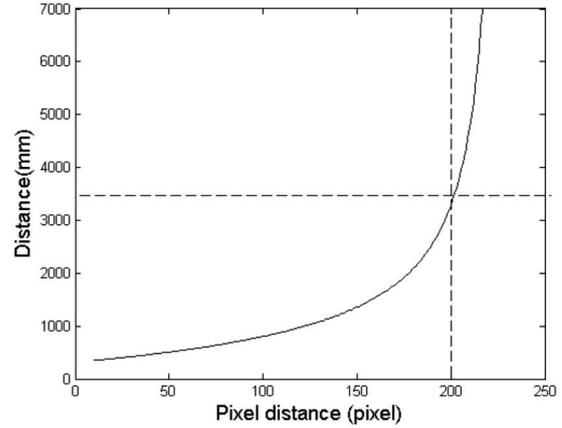


그림 10. 구조광 화소거리-실제거리 그래프.  
Fig. 10. Structured light pixel distance-Actual distance graph.

그러므로 식 (6)과 식 (10)을 식 (3)에 대입하면 물체까지의 거리를 계산할 수 있다. 그림 10은  $l$ 을 구하는 식 (3), 식 (6), 식 (10)을 이용하여 영상면에서의 구조광 화소거리  $p_r$ 에 따른 실제거리를 그래프로 표현한 것이다. 구조광 화소거리  $p_r$ 은 그림 3에서 설명한 것과 같으며, 본 논문에서는  $640 \times 480$  크기의 카메라 영상을 대상으로 하므로 화소거리 영역은  $0 \leq p_r \leq 240$ 이다.

### III. 실험결과

#### 1. 구조광 영상기반 전방향 거리측정 센서 구현

그림 11은 본 논문을 통해 개발한 구조광 영상기반 전방향 거리측정 센서이다. 주변조명잡음에 강인한 구조광 영상처리를 위한 차영상 적분 알고리즘은 구조광 온오프 모듈레이션에 따라 여러장의 영상을 필요로 한다. 따라서 전방향 거리측정의 실시간성을 확보하기 위해 영상획득속도가 매우 빠른 고속의 카메라를 채택하고, 전용의 FPGA 영상처리 임베디드 보드를 개발하였다. 본 전방향 거리측정 센서는 다음과 같은 사양을 가진다:

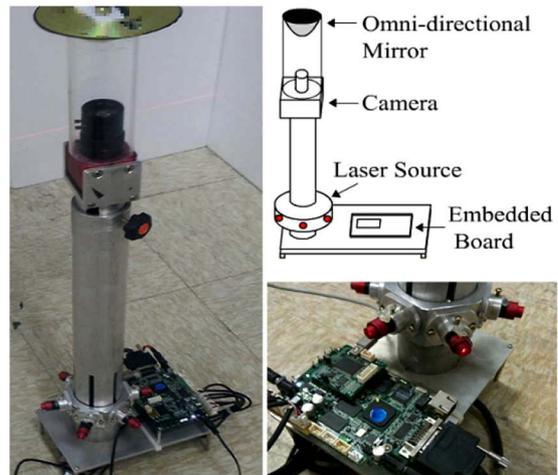


그림 11. 구조광 영상기반 전방향 거리측정 센서.  
Fig. 11. Omni-directional distance measurement sensor based on structured light image.

- 영상센서: Photon focus사의 DV-D640C, 8bit 640x480 해상도, 200FPS (Frames Per Second) 속도

- FPGA 임베디드 프로세서: 구조광 모듈레이션, 차영상 적분영상처리, 방사향 영상탐색, 영상처리결과 영상 출력 주파수 9~10Hz

- 구조광: 660 nm 파장, 5 mW급 적색광 반도체 레이저 모듈, 실린더렌즈를 통해 90° 빔폭 조사

카메라의 영상획득 속도는 200FPS이고 차영상열을 최대 10회 적분하는 경우 총 20장의 영상을 필요로 하므로 거리 측정 주파수는 영상처리 시간을 포함하여 약 9~10 Hz가 된다.

2. 거리 계산식 캘리브레이션

식 (3)과 식 (6) 및 식 (10)으로 주어지는 거리계산식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$l = f(p_r, p, h, \lambda) \tag{11}$$

여기서 거울식 (4)의 매개변수  $a$ 와  $b$ 는 거울제작자에 의해 주어지는 것으로 하였으며,  $p_r$ 은 영상면에서 구조광 화소 탐색으로 측정되는 값이다. 식 (11)에 의해 거리를 계산하기 위해서는 매개변수  $p$ ,  $h$ 와  $\lambda$ 의 값을 알아야 한다. 이러한 매개변수들의 값은 직접 측정하기는 어려우며, 미리 알고 있는 실제 거리 데이터들로부터 영상측정 캘리브레이션을 통해 그 값들을 추정해야 한다. 본 논문에서는 실제거리 데이터로부터 최소제곱오차법을 사용하여 매개변수들의 값을 추정하였다. 최소제곱오차는 다음과 같이 정의된다:

$$E = \sum_{n=1}^N \{l_n - f_n(p_r, p, h, \lambda)\}^2 \tag{12}$$

식 (12)에서 아래첨자  $n$ 은 데이터의 인덱스를 나타내며,  $l_n$ 은 실제거리, 그리고  $f_n$ 은 측정 화소거리  $p_r$ 로부터 계산된 거리값이다.

이제 거리계산식 (11)을 위한 매개변수들의 값을 다음과 같은 그래디언트 탐색과정에 의해 구할 수 있다.

$$E_{k+1} = E_k - \Delta \cdot \left( \frac{\partial E}{\partial h} + \frac{\partial E}{\partial p} + \frac{\partial E}{\partial \lambda} \right) \tag{13}$$

$$a_{k+1} = a_k - \Delta \cdot \frac{\partial E}{\partial a}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

여기서  $a$ 는 각 매개변수  $h$ ,  $p$ ,  $\lambda$ 를 나타내고,  $k$ 는 그래디언트 탐색과정의 반복횟수를 의미한다. 또한  $\Delta$ 는 매개변수 갱신 간격을 나타낸다. 표 1은 그래디언트 탐색의 수렴상태에서 얻은 매개변수 값들이다.

3. 거리측정 오차 분석

카메라 영상센서는 이산화된 단위 화소센서들의 2차원 배열이다. 영상처리과정에서 탐색을 통해 얻은 구조광 화소의 위치오차(화소탐색 오차)에 따른 측정거리 오차, 즉 화

표 1. 매개변수 수렴값

Table 1. Parameter values at convergent state.

매개변수	$h(mm)$	$p(mm)$	$\lambda(mm)$
수렴값	810.6	326.2	761.1

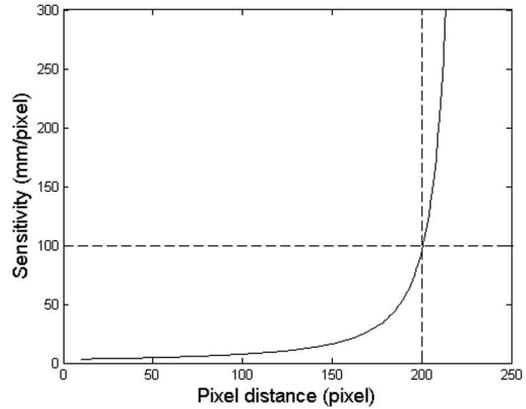


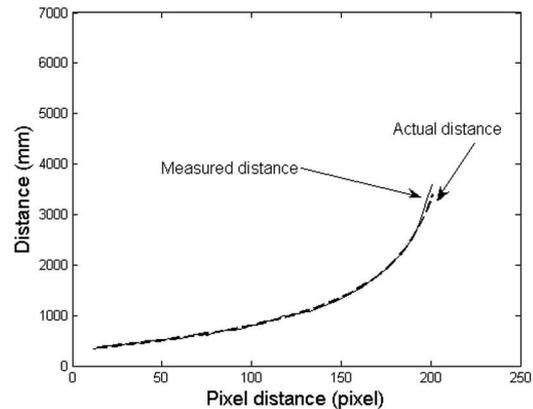
그림 12. 화소탐색 오차 민감도

Fig. 12. Sensitivity.

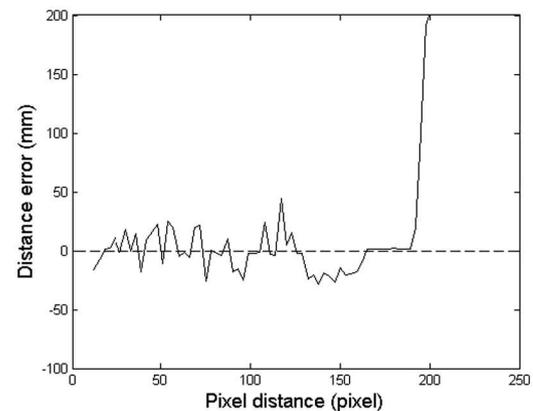
소탐색 오차 민감도는 다음과 같이 정의된다:

$$\frac{\Delta l}{\Delta p_r} \approx \frac{\partial f(p_r, p, h, \lambda)}{\partial p_r} \tag{14}$$

그림 12는 식 (14)를 그래프로 나타낸 것이다. 그림으로부터  $p_r = 200 \text{ pixel}$  부근에서 화소오차당 거리오차의 크기가 약 100 mm임을 알 수 있다. 그림 10에서 보던  $p_r = 200 \text{ pixel}$  부근이 측정거리 3,600 mm 부근에 해당한



(a) Structured light pixel distance-Actual distance graph.



(b) Structured light pixel distance-Distance error graph.

그림 13. 거리측정 실험결과

Fig. 13. Experiment result of distance measurement.

다. 따라서 본 거리측정 시스템은 3,600 mm의 측정거리에서 약 100 mm 정도의 측정오차를 갖게 됨을 의미한다. 물론 거리측정 한계와 측정오차는 매개변수  $h$ ,  $p$ , 및  $\lambda$ 의 값에 따라 달라질 수 있다.

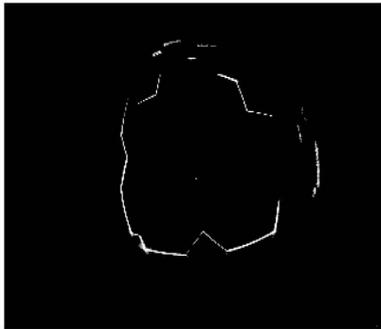
#### 4. 거리측정 실험결과

그림 13은 거리계산식의 매개변수 추정 실험결과이다. 먼저 실제거리-측정화소거리 참조데이터 집합을 얻고, 3.2절에서 서술한 캘리브레이션 과정을 통해 매개변수를 추정하였다. 그림 13(a)의 측정거리는 추정된 매개변수들을 적용하여 다시 실제거리를 계산한 것이다. 그림 13(b)는 화소 거리에 따른 실제거리와 측정거리 간의 오차이다. 3.3절에



그림 14. 전방향 거리측정 실험.

Fig. 14. Experiment of omnidirectional distance measurement.



(a) Omnidirectional structured light image at A.



(b) Omnidirectional distance map at A.

그림 15. 전방향 거리 측정 결과.

Fig. 15. Result of omnidirectional distance measurement.

서 분석한 바와 같이 측정 화소거리  $p_r < 200 \text{ pixels}$ 에서 는 거리측정 오차가 약 100 mm 이하임을 볼 수 있다.

본 시스템의 유용성을 확인하기 위해 전방향 거리측정과 거리맵 작성 실험을 수행하였다. 그림 14는 전방향 거리측정 실험을 위한 실험환경을 보여준다. 그리고 그림 15는 실험환경내 임의의 A 위치에서 얻은 전방향 구조광 영상(그림 15(a))과 이로부터 얻은 전방향 거리 맵을 물체지도에 덧붙여서 그린 것이다(그림 15(b)). 그림 15(b)의 검은 점들이 A 위치에서 측정된 각 방향의 거리이며, 이는 그림 15(a)에서 방사향 탐색을 통해 얻은 각 구조광 화소거리  $p_r$ 로부터 식 (11)을 통해 계산한 값이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 전방향성 거울을 갖는 영상 시스템과 구조광을 이용한 전방향 거리측정 센서를 개발하였다. 개발된 거리측정 센서의 특징과 개발내용을 요약하면 다음과 같다:

- 기계적인 스캔없이 한번에 360° 모든 방향에 대한 거리측정
  - 차영상 적분 알고리즘에 의한 주변조명잡음에 대한 강인성
  - Bresenham 직선 알고리즘 기반의 효율적인 방사향 영상탐색
  - 빠른 영상처리를 위한 FPGA 임베디드 프로세서 개발
  - 쌍곡면형 거울을 이용한 영상계의 거리계산식
  - 화소탐색 오차에 따른 거리계산 오차의 민감도 분석
  - 약 10 Hz의 전방향 거리획득 주파수 및 3,500 mm의 거리측정 범위에서 100 mm 이내의 거리측정 오차
- 개발된 거리측정 시스템의 성능을 검증하기 위하여 임의로 물체가 놓여있는 환경에서 전방향 구조광 획득 및 전방향 거리 맵 작성 실험을 수행하였다. 전방향 거리측정 센서는 보안감시 분야 및 이동로봇 자율주행에 유용하게 활용될 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Oike, "Smart image sensors and associative engines for three dimensional image capture," Ph.D. Thesis, Univ. of Tokyo, 2004.
- [2] R. Jain et. al, *Machine vision*, McGraw-Hill, 1995.
- [3] J. Leonard and H. Durrant-Whyte, *Directed sonar sensing for mobile robot navigation*, Kluwer academic publisher, 1992.
- [4] S. Cameron and P. Probert, *Advanced Guided Vehicles-Aspects of the Oxford AGV project*, World Scientific, 1994.
- [5] D. Noh et. al, "A study on the relative localization algorithm for mobile robots using a structured light technique," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 8, pp. 678-687, 2005.
- [6] S. Yi et. al, "Real-time omni-directional distance measurement with active panoramic vision," *Int'l Journal*

of Control, Automation and Systems, vol. 5, no. 2, pp. 184-191, 2007.

- [7] I. Joung and H. Cho, "An active omnidirectional range sensor for mobile robot navigation," *Control Engineering Practice*, vol. 6, no. 3, pp. 385-393, 1988.
- [8] R. Orghidan, E. Mouaddib, and J. Salvi, "Omnidirectional depth computation from a single image," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1234-1239, Barceloan, Spain, Apr. 2005.
- [9] A. Bruckstein and T. Richardson, "Omniview cameras with curved surface mirrors," *Proc. of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp. 79-84, 2000.
- [10] J. Moigne and A. Waxman, "Structured light patterns for robot mobility," *IEEE Jour. of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 5, pp. 541-548, 1988
- [11] J. Bresenham, "Algorithm for computer control of a digital plotter," *IBM Systems Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 25-30, 1965.
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Bresenham's\\_line\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Bresenham's_line_algorithm)



### 신진

2010년 2월 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2010년 3월~현재 서울과학기술대학교 산업대학원 석사과정 재학중.



### 이수영

1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007. 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇 센서.