

레이저 구조광 영상기반 3차원 스캐너 개발

Development of 3D Scanner Based on Laser Structured-light Image

고 영 준, 이 수 영*, 이 준 오
(Young-Jun Ko¹, Soo-Yeong Yi^{1,*}, and Jun-O Lee¹)

¹Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract: This paper addresses the development of 3D data acquisition system (3D scanner) based laser structured-light image. The 3D scanner consists of a stripe laser generator, a conventional camera, and a rotation table. The stripe laser onto an object has distortion according to 3D shape of an object. By analyzing the distortion of the laser stripe in a camera image, the scanner obtains a group of 3D point data of the object. A simple semiconductor stripe laser diode is adopted instead of an expensive LCD projector for complex structured-light pattern. The camera has an optical filter to remove illumination noise and improve the performance of the distance measurement. Experimental results show the 3D data acquisition performance of the scanner with less than 0.2mm measurement error in 2 minutes. It is possible to reconstruct a 3D shape of an object and to reproduce the object by a commercially available 3D printer.

Keywords: 3D scanner, laser structured-light, rotation table, optical filter, 3D printer

I. 서론

제품 급속 조형을 위해 개발된 3D 프린팅 기술이 근래 들어 문화재 복원, 건축, 의료 등으로 매우 활발히 그 응용 영역을 넓히고 있다. 3D 프린터를 이용하기 위해서는 기본적으로 제품의 3차원 데이터 파일이 필요하다. 이전에 없던 새로운 기구물을 제작하기 위해서는 CAD 도구를 이용하여 처음부터 3차원 데이터 도면을 작성해야 하나, 문화재 복원이나 기존 제품에 대한 역공학(Reverse engineering)을 위해서는 대상 물체의 3차원 데이터를 획득할 수 있는 데이터 수집장치가 필요하다. 대상물을 수작업을 통해 일일이 측정하여 3차원 모델을 얻는 것은 매우 시간이 걸리며, 세밀한 데이터를 얻기 어렵기 때문에 자동화된 방법으로 3차원 데이터를 획득하고 형상을 복원할 수 있는 기술이 필요하다.

일반적인 3차원 데이터 획득 및 형상 복원 기술에 관해서 참고문헌 [1,2]에 잘 정리되어 있다. 비접촉식 광학적인 방법으로 대상 물체의 3차원 데이터를 획득하는 방법에는 수동 방식과 능동 방식이 있다[1]. 수동 방식은 스테레오 카메라 영상처리와 같이 다시 점 영상으로부터 특이점을 추출하고 정합한 후 삼각법을 통해 거리 데이터를 얻는 방식이며, 능동 방식은 미리 정의된 구조화된 광 패턴을 대상 물체에 조사하고, 대상 물체의 형상에 따라 왜곡되는 광 패턴을 카메라 영상센서를 통해 감지, 분석하여 삼각법을 기반으로 3차원 데이터를 획득하는 것이다[3]. 과거에는 구조 광 패턴으로 단순 격자형 패턴이 많이 사용되었다[3]. 그러나 단순 격자형 광 패턴은 대상물에 의해 왜곡된 후에 영상처리 과정에서 각

각을 구분하기 어렵다는 문제가 있으므로, 근래에는 부호화된 광 패턴을 생성하는 기술이 사용된다. 부호화된 광 패턴으로서 Gray 코드에 의한 패턴이나 사인함수에 따른 밝기 정도를 갖는 광 패턴, 또는 컬러 광 패턴이 사용되었으며[4,5], 좀더 복잡하게 시공간 분할 부호 광 패턴들이 제안되기도 하였다[6].

부호화된 구조광 패턴을 생성하기 위해서는 일반적으로 가격이 비싼 LCD 프로젝터가 사용되며, 이후의 영상처리가 복잡해지므로 계산시간이 많이 든다는 문제가 있다. 또한 LCD 프로젝터의 밝기 한계 때문에 주변 조명 잡음에 의한 영향이 크다. 한편 레이저를 이용하여 구조광을 생성하는 방법은 복잡하게 부호화된 광 패턴을 만들기는 어렵지만, 주변 조명에 의한 영향이 적으므로 영상처리가 용이하며, 또한 근래 반도체 레이저 소자의 발전으로 비용이 매우 저렴하다는 장점이 있다. 레이저 구조광을 이용한 3차원 거리 측정 기술은 스테레오 카메라 영상기술에 있어서 특이점 탐색과정과 두 카메라의 내재 변수(intrinsic parameters) 차이에 의한 정합의 어려움에 따르는 연산시간 부담의 문제를 피할 수 있기 때문에 스테레오 영상 기술에 대한 대안으로 오랫동안 연구되어 왔다[3]. 그림 1은 구조광 영상을 이용한 거리 측정 기술의 개념도이다. 레이저 구조광 영상기반 거리 측정 기술은 주변환경 인식을 통해 로봇에게 자율성을 부여하기 위한 방법으로 사용되기도 하였다[7-9].

본 논문에서는 구조광 영상기반의 3차원 데이터 획득 장치로서 선형 레이저 구조광과 카메라, 그리고 회전 테이블로 구성되는 3D 스캐너를 개발하고자 한다. 선형 레이저는 수직 방향으로 조사되며, 대상물의 모든 면을 측정하기 위해서 회전 테이블을 이용한다. 레이저 구조광 영상은 영상처리 과정이 매우 간단하기 때문에 고가의 카메라를 사용할 필요 없이 간단한 임베디드 영상처리 프로세서만을 이용하여 모듈화할 수 있으며, 레이저 구조광원으로 반도체 레이저 다이오드를 사용함으로써 전체 시스템을 경제적으로 구축할 수 있다.

* Corresponding Author

Manuscript received December 11, 2015 / revised January 26, 2016 / accepted February 12, 2016

고영준, 이수영, 이준오: 서울과학기술대학교 전기정보공학과
(winter904@naver.com/suylee@seoultech.ac.kr/giantpurplebutterfly@gmail.com)

※ 본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었음.

$$\begin{aligned}
p_{sx} &= l + d \\
&= b \cot \left\{ \phi - \tan^{-1} \left(\frac{p_{ix}}{\lambda} \right) \right\} + d \\
p_{sy} &= 0 \\
p_{sz} &= \frac{1}{2} \cdot H + \frac{l}{\lambda} \cdot p_{iy}
\end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 l 은 카메라 핀홀점으로부터 물체점까지의 x 축 방향 거리, d 는 핀홀점으로부터 영상 카메라 모듈상의 한 기준점까지의 거리, b 는 카메라와 레이저 광원 사이의 간격, ϕ 는 카메라 설치각, λ 는 카메라 렌즈의 초점거리를 나타낸다. 그리고 H 는 일정 거리에서 카메라로 관측할 수 있는 최대 높이를 의미한다. 물체점의 좌표값을 계산하기 위한 식 (1)의 매개변수들의 값은 시스템 캘리브레이션 과정을 통해 얻는다.

앞에서 얻은 좌표 값은 구조광 카메라 모듈 좌표계를 기준으로 한 값이므로 이를 대상 물체 좌표계 기준 값으로 변환해야 한다. 대상 물체는 회전 테이블상에 놓이므로 구조광 카메라 모듈과 회전 테이블 중심까지의 거리, D 와 테이블의 회전각, θ 를 이용하여 좌표 변환하면 회전테이블 중심 좌표계 O 를 기준으로 대상 물체점의 좌표, $P_o = [p_{ox} \ p_{oy} \ p_{oz}]$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
p_{ox} &= (D - p_{sx}) \cos \theta \\
p_{oy} &= (D - p_{sx}) \sin \theta \\
p_{oz} &= p_{sz}
\end{aligned} \quad (2)$$

위 과정을 회전각, θ 를 변경하면서 반복 적용함으로써 대상 물체의 3차원 데이터를 획득한다.

IV. 실험결과

1. 3D 스캐너 제작

그림 5와 그림 6은 본 논문에서 개발한 구조광 영상 카메라 모듈과 3D 스캐너 시스템이다. 구조광원으로 660nm 파장을 갖는 선형 적색 반도체 레이저 다이오드를 사용하였다. 구조광 영상 획득을 위해 위드포봇(쥘)의 SMART_I 카메라와 660nm 파장을 중심으로 $\pm 20\text{nm}$ 의 대역폭을 갖는 광학 대역통과 필터를 조합하여 사용하였다[10]. SMART_I 카메라의 제원은 다음과 같다.

- Micron사의 CMOS MT9M111 영상센서, 최대 1280x960 해상도
- Samsung S3C6410X ARM 1176JZF-S CPU, 128MB RAM, 256MB Flash



그림 5. 구조광 영상 카메라 모듈.

Fig. 5. Structured light imaging camera module.

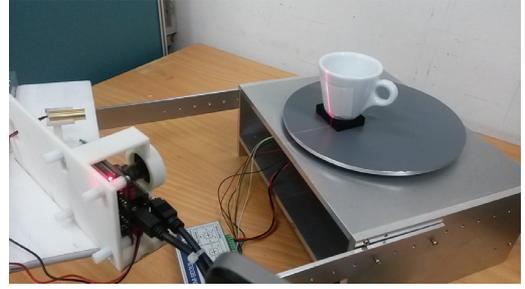


그림 6. 구조광 영상 기반 3D 스캐너.

Fig. 6. 3D scanner based on structured light image.

- 1280x960, 640x480 해상도일 때 각각 15fps, 30fps의 영상 획득 속도
- USB 2.0 및 UART 직렬통신채널

SMART_I 카메라는 임베디드 영상처리 프로세스를 가지고 있기 때문에 자체 프로세서로 영상처리가 가능하며, 처리결과를 UART 통신을 통해 외부 PC로 전달한다.

회전 테이블은 스텝모터를 이용하여 0.15° 단위로 회전 구동된다.

2. 거리 측정 캘리브레이션

식 (1)을 통해 거리를 계산하기 위해서는 매개변수 b , ϕ , λ , d 및 H 값들이 필요하다. 이들 매개변수의 근사값은 시스템 설계단계에서 주어지지만, 보다 정확한 거리 측정을 위해서 캘리브레이션 과정을 통해 이 값들을 다시 얻어야 한다. 카메라 매개변수들을 추정하는 방법들은 이미 많이 연구되어 왔으며 매트랩에도 이미 쉽게 이용할 수 있는 카메라 캘리브레이션 툴박스가 있다[11,12]. 이러한 방법들은 일반적으로 크기와 모양을 이미 알고 있는 패턴들을 카메라를 통해 획득하고 역으로 카메라의 매개변수들을 추정한다. 그러나 본 논문의 구조광 영상 카메라 모듈은 이미 광학필터가 장착되어 있어서 일반적인 패턴의 영상을 획득하기가 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 거리를 미리 알고 있는 대상물체와 레이저 구조광 관측 영상의 관계로부터 거리계산식의 매개변수들을 곡선보정(curve fitting) 과정을 통해 직접 역산하는 캘리브레이션 방법을 택하였다. 캘리브레이션 과정에는 화소거리 계산의 기준이 되는 영상면의 중심과 카메라 렌즈의 실제 광축 중심과의 오차를 반영하여 식 (3)과 같이 거리계산식을 설정하였다.

$$p_{sx} = b \cot \left\{ \phi - \tan^{-1} \left(\frac{p_{ix} + \Delta p}{\lambda} \right) \right\} + d \quad (3)$$

실제 거리를 알고 있는 위치, p_{sx} 에서 구조광 관측 영상의 화소거리를 p_{ix} 라고 하면 최소제곱법에 의한 곡선보정 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
E &= \sum_{n=1}^N e_n^2 \\
&= \sum_{n=1}^N \left[b \cot \left\{ \phi - \tan^{-1} \left(\frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) \right\} + d - p_{sxn} \right]^2
\end{aligned} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 n 은 데이터의 개수를 의미한다. 그림 7은

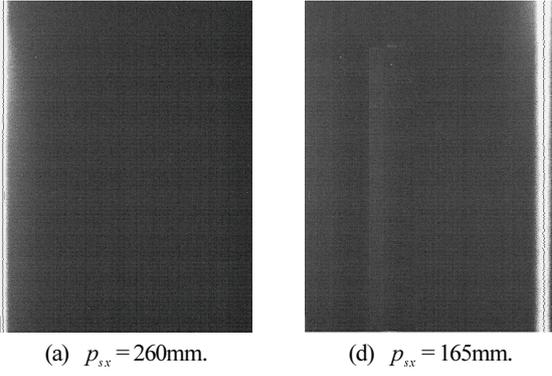


그림 7. 매개변수 캘리브레이션을 위한 실험 구조광 영상.
Fig. 7. Experimental structured light image for parameter calibration.

표 1. 캘리브레이션 실험 데이터: 구조광 영상의 첫번째 행.
Table 1. Experimental data for calibration: First row of structured light image.

	$n = 1$...	$n = 20$
p_{sxn}	260 mm		165 mm
p_{ixn}	-233 화소		218 화소

실제거리 165 ~ 260mm 사이에서 5mm 간격으로 구조광 카메라 모듈을 이동하면서 획득한 총 20장 실험영상들 중 일부다. 영상의 가로축은 480 화소이며 중심축(240번째 화소)을 기준으로 실제거리에 따른 화소거리를 표 1에 정리하였다. 표 1은 영상의 첫번째 행에 관한 데이터이며, 렌즈 왜곡에 의해 640개의 각 행에서 화소거리가 다를 수 있기 때문에 이들 모든 행에 대해서 최소제곱법 기반 매개변수 추정 방법을 적용하였다.

식 (4)에 대해서 그래디언트(gradient) 탐색법에 의한 매개변수 추정은 다음 식으로 나타낼 수 있다:

$$E_{k+1} = E_k - \Delta_E \cdot \left(\frac{\partial E}{\partial b} + \frac{\partial E}{\partial \lambda} + \frac{\partial E}{\partial \phi} + \frac{\partial E}{\partial d} + \frac{\partial E}{\partial \Delta p} \right) \quad (5)$$

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

여기서 a 는 각 매개변수, $b, \lambda, \phi, d, \Delta p$ 를 나타내며, k 는 반복횟수를 의미한다. 그리고 Δ_E 와 Δ_a 는 그래디언트 탐색의 스텝크기를 나타낸다. 식 (5)에 필요한 매개변수 별 그래디언트는 식 (6)과 같다:

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) + d - p_{xn} \right\} \cdot \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right)$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) + d - p_{xn} \right\}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \phi} = -2 \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) + d - p_{xn} \right\}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \lambda} = -2 \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) + d - p_{xn} \right\} \cdot \frac{b}{\sin^2 \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right)} \cdot \frac{p_{ixn} + \Delta p}{(p_{ixn} + \Delta p)^2 + \lambda^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta p} = 2 \sum_{n=1}^N \left\{ b \cot \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right) + d - p_{xn} \right\} \cdot \frac{b}{\sin^2 \left(\phi - \tan^{-1} \frac{p_{ixn} + \Delta p}{\lambda} \right)} \cdot \frac{\lambda}{(p_{ixn} + \Delta p)^2 + \lambda^2} \quad (6)$$

표 2는 그래디언트 탐색과정에서 얻은 각 매개변수들의 수렴값이다.

표 2에서 카메라 렌즈의 초점거리를 나타내는 λ 의 값은 영상의 1 화소를 1mm로 나타냈을 때의 상대적인 크기를 의미한다. 그림 8은 표 1의 실험데이터에 대해서 최소제곱법에 의해 얻은 매개변수 수렴값(표 2)을 적용한 곡선보정 결과 그래프이다. 그래프의 수평축은 화소거리 p_{ixn} , 그리고 수직 축은 실제거리 p_{sxn} 을 나타낸다. 실험 데이터들에 대한 거리 계산의 RMS (Root Mean Square) 오차 크기는 0.17mm이다.

식 (1)의 세번째 식 계산에 필요한 매개변수 H 는 $D = 300\text{mm}$ 의 위치에서 카메라 영상으로 관측 가능한 최대 높이로서 $H = 85.0\text{mm}$ 이 관측되었다. 그러므로 렌즈의 수직 화각은 약 $2 \tan^{-1} \left(\frac{85.0/2}{300.0} \right) \approx 16.1^\circ$ 에 해당한다(그림 4 (b)). 렌즈의 사양에 의한 수직 화각은 16° 이다.

표 2. 매개변수 수렴 값: 구조광 영상의 첫번째 행.
Table 2. Convergent values of parameters: First row of structured light image.

	b	d	ϕ	λ	Δp
값	86.84mm	31.18mm	27.7o	2181mm	30.06mm

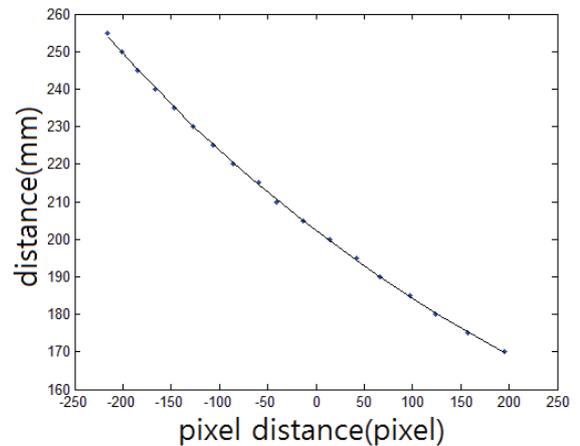
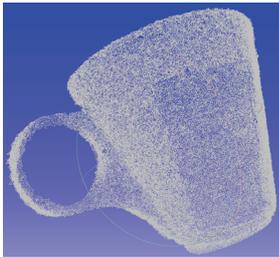


그림 8. 거리계산식 (1) 곡선보정 그래프.
Fig. 8. Curve fitting graph for distance computation equation (1).



(a) 3D point cloud data.



(b) Rendering result.

그림 9. 3D 스캔 결과: 컵.

Fig. 9. 3D scanning result: cup.



(a) 3D point cloud data.



(b) Rendering result.

그림 10. 3D 스캔 결과: 인형.

Fig. 10. 3D scanning result: doll.

3. 3차원 데이터 획득

그림 9와 그림 10은 실제 대상물체인 컵과 인형에 대해서 본 3D 스캐너를 통해 3차원 데이터를 획득한 결과들이다. 대상물 전면 180° 부분은 0.15° 단위로 스캔하였다. 스캔 시간은 2분 이내였다. 그림 왼쪽의 점 데이터 집합은 3D 스캐너를 통해 얻은 원 데이터이며, 오른쪽은 2절에서 기술한 바와 같이 메시랩 CAD 도구를 이용하여 표면을 렌더링한 결과이다. 메시랩은 점 데이터 집합의 각 점에서 주변점들과의 상관관계에 따라 법선 벡터를 생성하고, Poisson 표면복원 알고리즘 [13]을 사용하여 면을 형성함으로써 표면을 복원한다. 컵과 같이 형상에 굴곡이 많지 않은 대상물의 경우에는 표면 복원이 잘 이루어지므로 3D 프린터로 직접 복제가 가능하다. 그러나 인형의 경우에는 몇 군데에 복원되지 않은 구멍(hole)들이 있어 3D 프린터로 직접 복제하기에는 다소 부족하다. 구멍이 생기는 원인은 구조광과 카메라 사이의 간격에 따른 음영지역 때문이다. 음영지역 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법은 렌더링 과정에서 표면보간(interpolation)을 하는 것이다. 그러나 좀더 근본적으로 해결하기 위해서는 두 쌍, 혹은 그 이상의 카메라를 이용하여 좀더 세밀하게 3D 데이터를 획득할 수 있도록 개선해야 한다.

V. 결론

근래들어 3D 프린터에 대한 학문적, 산업적 관심이 증가하고 있으며 그 활용분야도 점점 넓어지고 있다. 3D 프린터를 이용하여 제품을 제작하기 위해서는 CAD 도면이 필요한데, 수작업 측정을 통해 일일이 3차원 데이터를 얻는 것은 매우

힘들며 시간이 많이 걸린다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 대상물의 3차원 데이터를 구조광 영상을 통해 자동화된 방법으로 획득할 수 있는 3D 스캐너를 개발하였고, 실험을 통해 성능을 확인하였다. 실험결과로서 300mm의 거리에서 100mm의 형상굴곡을 갖는 대상물체에 대해 0.17mm의 측정 오차를 확인하였다. 이는 기존의 3D 스캐너 제품과 비교할 때 매우 빠르고, 정확한 성능이다. MakerBot 사의 3D 스캐너의 스캔 시간은 약 12분이며, 오차는 0.5mm이고, CES 2015에서 신기술상(Innovation award)을 수상한 Matter & Form 사에서 개발한 제품인 Photon은 0.25mm의 측정 오차를 갖는다 [14,15]. 본 3D 스캐너는 LCD 프로젝터가 필요한 복잡한 구조광 대신 간단한 선형 레이저 구조광을 이용하고, 간단한 임베디드 카메라를 사용하므로 경제적이고 영상처리가 빠르며, 또한 전체적인 3차원 데이터 획득 시간이 짧기 때문에 기존의 3D 스캐너에 비교하여 우수하다고 볼 수 있다. 그러나 표면 굴곡이 큰 형상을 갖는 대상 물체에 대해서 3D 프린터로 직접 복제할 수 있는 3차원 데이터를 획득하기 위해서는 여러 방향에서 좀더 세밀하게 관측할 수 있도록 본 3D 스캐너를 개선해야 할 필요가 있고, 이는 연구 중에 있다.

REFERENCES

- [1] C. Chu, J. Park, H. Kim, J. Park, and S. Lim, Recent Trends of 3D Reconstruction Technology, Electronics and Telecommunications Trends, vol. 22, no. 4, 2007.
- [2] J. Beraldin, F. Blais, L. Courmoyer, G. Godin, and M. Rioux, "Active 3D sensing," *NRC Technical Report 44159, Ottawa*, 2000.
- [3] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, *Machine vision*, McGraw-Hill, 1995.
- [4] J. Posdamer and M. Altschuler, "Surface measurement by space-encoded projected beam system," *Computer Graphics Image Processing*, vol. 18, pp. 1-17, 1982.
- [5] D. Scharstein and R. Szeliski, "High accuracy stereo depth maps using structured light," *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 195-202, 2003.
- [6] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern Recognition*, vol. 37, pp. 827-849, 2004.
- [7] J. Moigne and A. Waxman, "Structured light patterns for robot mobility," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 5, pp. 541-548, 1988.
- [8] D. Noh, G. Kim, and B. Lee, "A study on the relative localization algorithm for mobile robots using a structured light technique," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 11, no. 8, pp. 678-687, 2005.
- [9] S. Yi, Y. Hong, and J. Suh, "Distance measurement based on structured light image for mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 1, pp. 18-24, 2010.
- [10] <http://www.withrobot.com/>.
- [11] S. Zhang and P. Huang, "Novel method for structured light system calibration," *Optical Engineering*, vol. 45, no. 8, pp. 083601-083608, 2006.
- [12] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [13] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, "Poisson surface

reconstruction,” *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 2006.

[14] <http://store.makerbot.com/digitizer.html>

[15] <https://matterandform.net/scanner>



고 영 준

2016년 2월 서울과학기술대학교 전기정보공학과(공학사). 2016년 3월~현재 서울과학기술대학교(공학석사). 관심분야는 이동로봇, 로봇비전.



이 수 영

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



이 준 오

2016년 2월 전기정보공학과(공학사). 관심분야는 로봇비전, 이동로봇.