

능동 구조광 영상기반 전방향 거리측정

Omnidirectional Distance Measurement based on Active Structured Light Image

신진, 이수영*, 홍영진, 서진호
(Jin Shin¹, Sooyeong Yi¹, Youngjin Hong², and Jinho Suh²)

¹Seoul National University of Technology

²Pohang Institute of Intelligent Robotics

Abstract: In this paper, we proposed an omnidirectional ranging system that is able to obtain 360° all directional distances effectively based on structured light image. The omnidirectional ranging system consists of laser structured light source and a catadioptric omnidirectional camera with a curved mirror. The proposed integro-differential structured light image processing algorithm makes the ranging system robust against environmental illumination condition. The omnidirectional ranging system is useful for map-building and self-localization of a mobile robot.

Keywords: omnidirectional image, ranging system, laser structured light

I. 서론

이동로봇의 자율주행을 위한 위치추정과 지도작성을 위해서는 주변 물체까지의 거리를 측정할 수 있는 센서가 필요하다. 거리측정 방식으로는 초음파 센서, 스테레오 카메라, 레이저 스캐너 등 다양한 종류의 센서들이 널리 사용되고 있다[1-3]. 구조광 영상기반 센서는 레이저와 같이 주변 조명과 확연히 구별되는 구조광을 조사해주고, 물체거리에 따른 구조광 영상의 왜곡을 측정함으로써 거리를 측정하는 방식으로서 거리 계산이 효율적이고, 한 장의 영상으로 폭넓은 거리정보를 얻을 수 있으며, 주변조명 잡음에 상대적으로 강인하다는 장점이 있다[1,4-6]. 특히 근래에는 반도체 레이저 발생장치와 저렴한 영상센서의 등장으로 매우 경제적인 구현이 가능해졌다.

본 논문에서는 360도 전방향으로 수평 구조광을 조사하고, 전방향 거울(omnidirectional mirror)과 일반 카메라로 구성되는 전방향 영상 카메라를 통해 구조광 영상을 획득함으로써 360도 모든 방향의 거리를 기계적인 스캔을 통하지 않고 한 번에 측정할 수 있는 전 방향 거리센서에 대해 기술한다. 이동로봇은 이동공간상에서 전후좌우 어떤 방향으로든 운동할 수 있으므로 모든 방향의 거리정보는 이동로봇의 자율주행에 큰 도움이 될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 구조광 영상기반 전 방향 거리센서는 한 번에 모든 방향의 거리를 동시 측정할 수 있으므로 매우 효율적이고,

또한 구조광을 사용하므로 주변조명 잡음에 강인하며, 스테레오 카메라와 같은 대응점 문제를 피할 수 있으므로 계산 효율이 매우 높다는 장점이 있다.

II. 전 방향 구조광 영상 방식

그림 1은 구조광 영상기반 전 방향 거리측정시스템의 개념도이다. 카메라의 하부에 구조광을 조사하는 레이저 소스가 있으며, 카메라는 수직방향으로 설치되어 있다. 카메라는 상부에 설치되어 있는 전방향 거울을 통해 360도 모든 방향의 영상을 한 장의 화면에 획득할 수 있다.

구조광을 조사하기 위해서는 기존의 점(point) 형태의 소스를 수평의 선(line) 형태로 바꿔줄 필요성이 있다. 점 형태의 구조광을 선형으로 조사하기 위해 실린더형 분산렌즈를 사용한다. 본 논문에서는 90도 범위를 조사할 수 있는 선형 레이저 4개를 사용하여 전방향 구조광을 구현하였다.

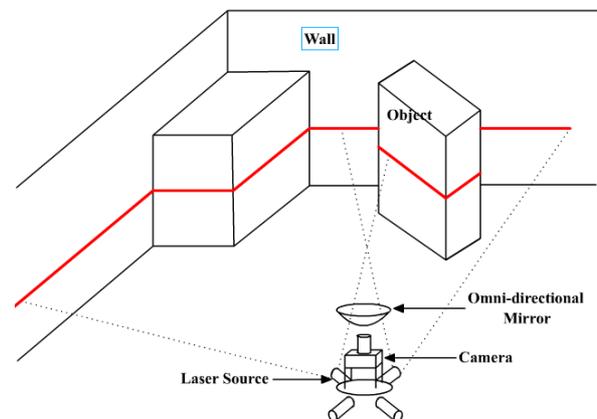


그림 1. 구조광 영상기반 전방향 거리측정 시스템.

Fig. 1. Omnidirectional ranging system based on structured light image.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 4. 16., 수정: 2010. 6. 4., 채택확정: 2010. 6. 10.

신진, 이수영: 서울산업대학교 전기공학과

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

홍영진, 서진호: 포항지능로봇연구소

(bhong@postech.ac.kr/suhgang@postech.ac.kr)

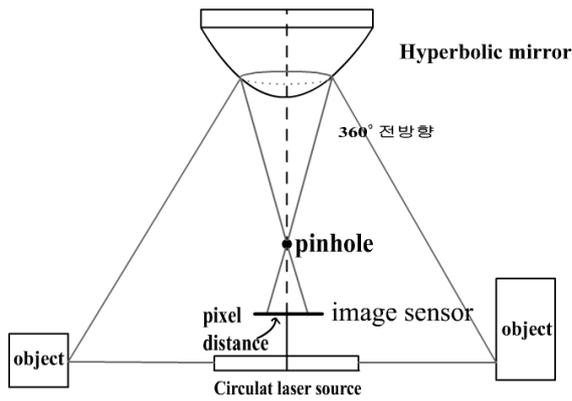
※ 본 논문은 지식경제부의 기술혁신사업(과제번호: 10032301)에 의해 지원되었음.

※ 본 논문은 2010년도 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

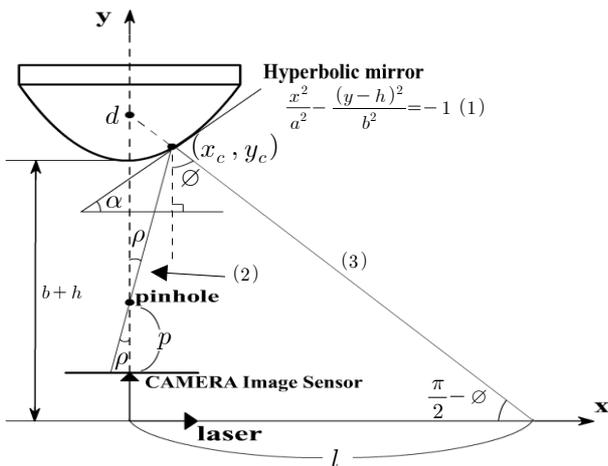
하지만 점 형태의 구조광이 선 형태로 변환됨으로 인해 빛의 강도가 상대적으로 낮아지게 되고, 주변 조명 잡음에 약해지는 현상이 생길 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 카메라 영상에서 구조광 부분의 화소(pixel)가 주변의 다른 화소들에 비해 두드러지도록 하는 영상처리 방법이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 구조광 모듈레이션에 따라 얻은 차영상(difference image)을 시간에 따라 적분하는 차영상 적분 알고리즘을 사용하였다[7]. 차영상 적분은 구조광에 해당하는 화소만 강화시킬 수 있고, 구조광 이외의 화소들은 상대적으로 약화시키는 효과가 있으므로 이후 영상처리에서 주변 조명 잡음에 강한 처리 결과를 얻을 수 있다. 적분 횟수는 주변 환경에 따른 잡음을 고려하여 조절한다.

III. 거리계산

그림 2에서 구조광 영상기반 거리측정 방법을 설명한다. 카메라 센서와 구조광 발생장치는 수직방향으로 편차를 가지도록 설치되었고, 카메라와 수직으로 쌍곡면형(hyperbolic) 거울이 위치하고 있으며, 구조광은 360도 수평으로 조사된다. 그림 2(b)에서 각 매개변수들은 다음과 같이 정의된다.



(a) Omnidirectional structured light imaging system



(b) Camera model

그림 2. 구조광 영상기반 전방향 거리측정.

Fig. 2. Omnidirectional distance measurement based on structured light image.

- 구조광으로부터 거울까지의 높이: h
- 영상센서에서 핀홀까지의 높이: p
- 카메라의 초점거리: λ
- 영상면에서 구조광 화소까지의 거리: p_r
- 영상 측정각: $\rho = \tan^{-1}\left(\frac{p_r}{\lambda}\right)$
- 물체까지의 측정거리: l

물체까지의 측정거리, l 은 다음과 같은 과정으로 얻을 수 있다. 먼저 쌍곡면형 거울의 곡선은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{(y-h)^2}{b^2} = -1 \tag{1}$$

여기서 a 와 b 는 거울 제작자로부터 주어지는 값이며, h 는 설치높이가 된다.

카메라의 핀홀을 통과하는 빛의 직선식은 다음으로 표현된다:

$$y = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) x + p = \cot \rho x + p \tag{2}$$

또한 거울의 반사점으로부터 물체의 반사점까지의 직선식은 다음과 같다.

$$y = -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) x + d = -\cot \phi x + d \tag{3}$$

거울의 광 반사법칙으로부터 θ 와 ϕ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\pi}{2} - \alpha - \rho, \\ \phi &= \pi - \rho - 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \rho\right) \\ &= 2\alpha + \rho \end{aligned} \tag{4}$$

따라서 위 (1) 식에 (2) 식을 대입하면 다음과 같이 거울면에서의 교점을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{a^2(p-h) \cot \rho \pm ab\sqrt{(p-h)^2 - b^2 + a^2 \cot^2 \rho}}{b^2 - a^2 \cot^2 \rho} \\ y_c &= \cot \rho x_c + p \end{aligned} \tag{5}$$

이제 거울면 반사점 (x_c, y_c) 에서의 식 (1)의 기울기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b^2}{a^2} \frac{x}{y-h} \tag{6}$$

여기서 $\tan \alpha = \left.\frac{dy}{dx}\right|_{(x_c, y_c)} = m_c \equiv \alpha = \tan^{-1} m_c$ 라 정의하면 식 (4)에서 다음을 얻을 수 있다.

$$\phi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{b^2}{a^2} \frac{x_c}{y_c - h}\right) + \rho \tag{7}$$

식 (3)으로부터 $d = y_c + \cot(2 \tan^{-1} m_c + \rho) x_c$ 가 된다.

물체 거리는 $l = \frac{d}{\cot \phi} = d \tan \phi$ 이므로, 식 (3)과 (7)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = \frac{y_c + \cot(2\tan^{-1}m_c + \rho) x_c}{\cot(2\tan^{-1}m_c + \rho)} = y_c \tan(2\tan^{-1}m_c + \rho) + x_c \quad (8)$$

위 식에서 x_c 와 y_c 는 식 (5)를 통해 구할 수 있으며, m_c 는 식 (6)으로 구할 수 있다.

IV. 실험

1. 카메라 캘리브레이션

카메라 모델은 기본적으로 렌즈의 특성에 따라 영상면에 왜곡이 생긴다. 영상을 보정하기 위해 카메라의 왜곡 정도를 산출해 적용해야 하는 캘리브레이션 과정이 필요하다 [9]. 그림 3과 같이 사각형의 패턴을 가지고 카메라의 왜곡 파라미터를 구할 수 있고, 실제영상에 적용하면 그림 3(c)와 (d)에서 비교하듯이 왜곡이 보정된 것을 볼 수 있다.

2. 구조광 영상 실험 및 물체지도

그림 4는 본 연구를 통해 개발한 전 방향 구조광 영상기반 거리측정 센서 시스템이다. 전 방향 거울로 쌍곡면형 거울을 사용하였으며, 실험에 사용된 영상센서의 사양은 다

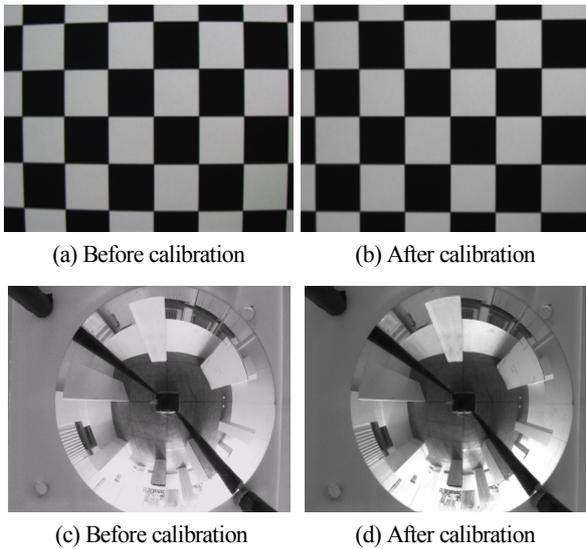


그림 3. 카메라 캘리브레이션을 통한 영상 왜곡보정.
Fig. 3. Image rectification through camera calibration.

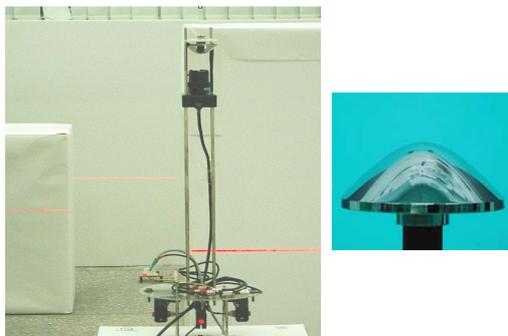


그림 4. 전 방향 구조광 기반 거리측정 센서.
Fig. 4. Distance measurement sensor based on structured light image.

음과 같다:

- 최대해상도: 640x480
- 프레임 속도: 30 FPS(Frame Per Sec.)

구조광 발생장치로는 660nm 파장의 5mw급 적색 반도체 레이저와 이를 90° 폭으로 선형변환하기 위한 실린더 렌즈, 그리고 차영상 획득 과정에 맞춰 구조광 발생을 주기적으로 온-오프하기 위한 모듈레이션 회로를 사용하였다. 구조광 발생과 영상획득과정의 동기화 및 영상 차적분 알고리즘은 PC 기반 프로그램에서 소프트웨어적으로 처리한다.

본 구조광 영상기반 전방향 거리센서 모듈을 통해 물체 거리를 측정하기 위한 실험을 행하였다. 그림 5는 실험상황과 물체지도를 보여준다.

3. 주변조명 잡음에 강인한 차영상 적분 알고리즘

그림 6은 전방향 영상에서 구조광 부분을 추출하기 위한 차영상 알고리즘 결과를 보여준다. 구조광을 온-오프로 모듈레이션하고 이와 동기를 맞추어 획득한 영상들의 대응화소간 차이를 구하면 배경은 모두 없어지고, 구조광 화소만 남은 차영상을 얻을 수 있다. 주변 조명 잡음이 강할 경우 이렇게 구한 차영상의 구조광 화소값이 크지 않기 때문에 이후의 탐색과정에서 감지되지 못할 수 있다. 영상면에서 구조광 화소값을 상대적으로 강화함으로써 조명잡음에 대한 강인성을 높이기 위한 방법으로 차영상열의 시간에 따른 적분 방법을 적용할 수 있다. 그림 7은 차영상열을 시간

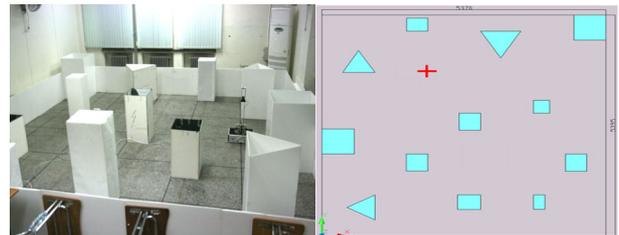


그림 5. 구조광 영상 실험 및 물체 배치.
Fig. 5. Structured light imaging experiment and object placement.

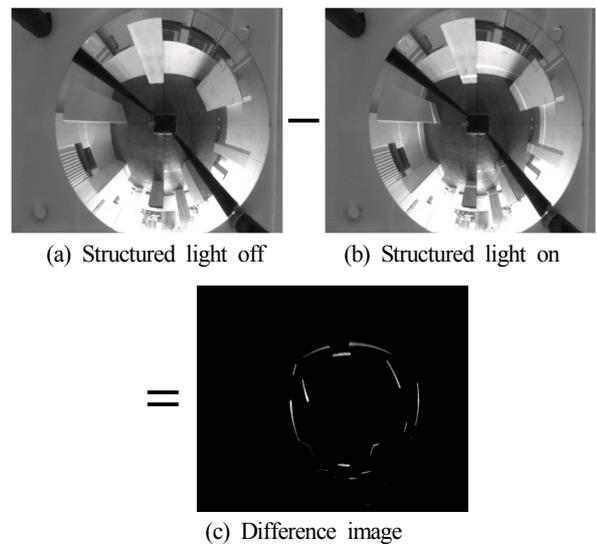


그림 6. 구조광 영상 추출을 위한 차 영상법.
Fig. 6. Image difference for structured light image extraction.



(a) Second integration (b) Seventh integration

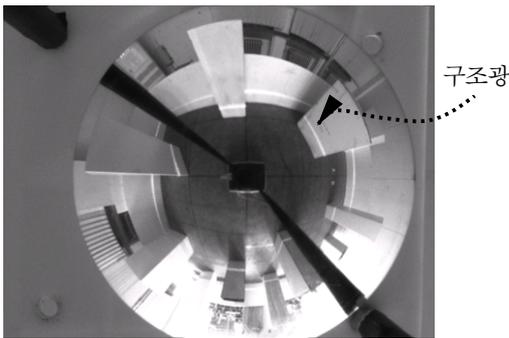
그림 7. 차영상의 7회 적분 결과.

Fig. 7. 7th integration of difference images.

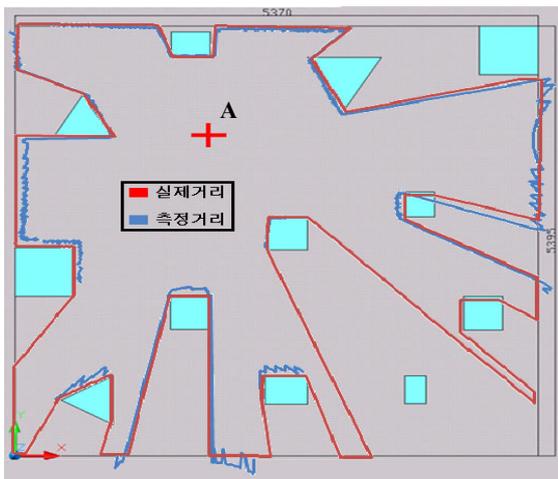
에 따라 적절한 결과를 보여준다. 차적분 횟수가 늘어남에 따라 비교적 약한 구조광이 점차 두드러지게 나타남을 볼 수 있다.

4. 구조광 탐색

차적분 결과로 얻어진 구조광 영상에서 거리데이터를 연산하기 위해서는 영상면에서 구조광 화소의 위치를 찾아내야 한다. 본 연구에서는 카메라의 광축을 중심으로 방사방향으로 가장 강도가 높은 화소를 찾아 영상면에서 거리 p_r 을 구하는 방식을 택하였다. 이산화된 영상센서면에서 정수 연산만으로 빠른 탐색과정을 구현하기 위해 Bresenham 래스터 알고리즘[8]을 활용한 탐색알고리즘을 개발하였다. 이



(a) Omnidirectional image at A



(b) Omnidirectional distance map at A

그림 9. A점 영상 및 전방향 거리맵.

Fig. 9. Image at A and corresponding omnidirectional distance map.

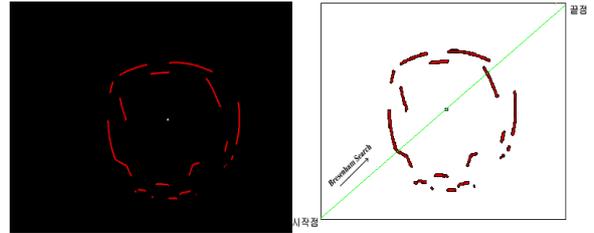


그림 8. 구조광 탐색.

Fig. 8. Structured light image search.

를 통해 탐색에 필요한 연산량을 대폭 줄임으로써 거리값 산출과정에 소요되는 계산 시간을 개선하였다.

5. 거리계산 결과

그림 9는 위와 같은 과정으로 산출된 픽셀 값을 이용한 거리데이터와 물체지도의 실제 거리데이터를 비교한 그림이다. 근거리에서의 오차는 비교적 적은 편이지만 거리가 멀어질수록 오차가 심해지는 것을 알 수 있다. 측정오차의 크기는 평균 7.23 cm이었다.

V. 결론

본 논문에서는 이동로봇을 위한 구조광 영상기반 전방향 거리 측정 시스템을 개발하였다. 전방향 거리측정 시스템은 이동로봇의 자율 주행을 위한 주변 환경 물체지도 작성과 미리 주어진 물체지도와의 정합을 통한 위치추정에 쓰일 수 있다. 본 논문에서 기술한 전방향 거리측정 센서 모듈은 다음과 같은 면에서 개선이 필요하다. 즉, 제안한 영상 차적분 알고리즘은 움직임이 없는 정지 영상에서는 구조광 영상을 쉽게 얻을 수 있으나, 시간에 따라 영상이 변한다면 적분 과정에서 많은 잡음이 포함 될 수 있고, 이에 따라 거리측정의 신뢰도가 떨어질 수 있다. 이와 같은 문제는 영상 획득 속도가 높은 카메라를 사용함으로써 극복될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] R. Jain et al., *Machine Vision*, McGraw-Hill, 1995.
- [2] S. Cameron and P. Probert, *Advanced guided vehicles-Aspects of the oxford AGV project*, World Scientific, 1994.
- [3] <http://www.sick.com>
- [4] D. Noh, G. Kim, and B. Lee, "A study on the relative localization algorithm for mobile robots using a structured light technique," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 678-687, 2005.
- [5] J. Ryu, J. Kim, and S. Yi, "Localization of mobile robot using active omni-directional ranging system," *Journ. of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 483-488, 2008.
- [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] S. Yi, Y. Hong, and J. Suh, "Distance measurement based on structured light image for mobile robots," *Journ. of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 18-24, 2010

[8] L. Ammeraal and K. Zhang, *Computer Graphics for Java Programmers*, John Wiley, 2007

[9] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

[10] S. Yi, J. Shin, Y. Hong, and J. Suh, "Omnidirectional Ranging System based on Structured Light Image," *Proc. of ICROS Annual Conference 2010*, Chuncheon, Korea, pp. 3-4, May 2010.



신진

2010년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업(공학사). 2010년 3월~현재 서울산업대학교 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 서울산업대학교 전기공학과 부교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇 센서.



홍영진

1993년 2월 고려대학교 정보공학과 졸업(공학사). 1995년 2월 고려대학교 전산학과 졸업(이학석사). 1994년 11월~1999년 9월 PSINet Korea 기술연구소 연구원. 1999년 9월~2006년 9월 삼성종합기술원 HCI Lab 전문연구원. 2006년 9월~2007년 8월 일본 동경대학교 생산기술연구소 객원연구원. 2007년 8월~현재 (재)포항지능로봇연구소 책임연구원. 관심분야는 의료로봇, 수중로봇.



서진호

1993년 2월 한양대학교 수학과 졸업(이학사). 1998년 2월 부경대학교 대학원 졸업(공학석사). 2002년 3월 일본 동경공업대학교(Tokyo Institute of Technology) 제어시스템공학과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 부경대학교 해양산업개발연구소 선임연구원. 2003년~2006년 동아대학교 전기공학과 국가지정연구실(NRL) Post-Doctor. 2006년 4월~현재 (재)포항지능로봇연구소 연구개발부 팀장. 관심분야는 의료재활로봇, 해양로봇, 첨단철강로봇 분야 등.