

스테레오 기반의 장애물 회피 알고리즘

Obstacle Avoidance Algorithm using Stereo

김 세 선, 김 현 수, 하 종 은*
(Se-Sun Kim, Hyun-Soo Kim, and Jong-Eun Ha)

Abstract : This paper deals with obstacle avoidance for unmanned vehicle using stereo system. The “DARPA Grand Challenge 2005” shows that the robot can move autonomously under given waypoint. RADAR, IMS (Inertial Measurement System), GPS, camera are used for autonomous navigation. In this paper, we focus on stereo system for autonomous navigation. Our approach is based on Singh et. al. [5]’s approach that is successfully used in an unmanned vehicle and a planetary robot. We propose an improved algorithm for obstacle avoidance by modifying the cost function of Singh et. al. [5]. Proposed algorithm gives more sharp contrast in choosing local path for obstacle avoidance and it is verified in experimental results.

Keywords : obstacle avoidance, stereo vision, traversability, unmanned vehicle

I. 서론

지능형 로봇이나 지능형 자동차 등의 분야에서 무인 자율 주행에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 최근에는 DARPA Grand Challenge 2005 [1,2]를 통해 주어진 이동 경로하에서 무인으로 사막을 주행하는 것이 입증되었다. 상기 대회 성공적인 개최에 뒤이어 DARPA에서는 2007년도에 DARPA Urban Challenge[3]라는 대회를 주최하였다. 이 대회의 목적은 도심환경에서의 자율주행이며, 제시된 대회규약을 보면 실제 사람이 도심에서 운행하는 환경과 거의 유사함을 알 수 있다. 이 대회 주어진 맵하에서 자율주행을 수행하는 것이며 주어진 조건하에서 완주하여 최종적으로는 CMU의 Tartan Racing 팀[4]이 우승을 하였다.

대부분의 대회 참가 차량들은 자율 주행을 위해 다양한 센서들(SONAR, RADAR, LIDAR, Camera, GPS, 관성센서)을 사용하고 있으며 센서 융합을 통한 성능 향상에 초점을 두고 있다.

그러나, 화성 탐사 등의 응용 분야에서는 한정된 자원을 이용한 자율 주행이 요구되고 있다[5]. 이러한 분야에서는 다양한 센서들을 적용하기에는 여러 가지 어려움이 뒤따르며, 소요 전력, 안정성 등을 고려하여 스테레오 시스템을 주로 이용하고 있다. 스테레오 시스템을 이용하여 장애물 회피, 지도 작성 및 경로 생성 등의 작업을 수행하게 된다[13,14].

실내 또는 실외의 이동 로봇상에서의 대부분의 장애물 회피 알고리즘은 주어진 주행 공간이 장애물과 자유 공간 등의 2개의 대상으로 구성되어 있다고 가정하고 있다[6-8]. 이러한 접근방법은 실외의 울퉁불퉁한(rugged) 지형 등에서 어려움에 부딪히게 된다. 이러한 문제점을 극복하고자 연속적인 주행 가능성(traversability)을 보장하는 방법들이 제안되었다[5,9-11].

본 논문에서 기본적으로 Singh et. al.[5]의 알고리즘을 따르도록 하며, 실내 및 실외 주행 환경에서의 다양한 실험을 통해 얻어진 분석을 바탕으로 보다 강인한 성능을 보장하는 스테레오 시스템 기반의 장애물 회피 알고리즘을 제안한다.

II. Singh et. al. 의 접근 방법

Singh et. al.[5]은 스테레오 카메라를 이용한 이동 로봇의 자율 주행에 대해 다루고 있다. 먼저, 대상 주행 공간을 일정 격자 형태로 나눈 후 스테레오 시스템의 출력인 삼차원 정보를 이용하여 평면을 추정한다. 평면 정보를 이용하여 주행 공간의 적합성(goodness)과 확실성(certainty)의 추출 후 각 경로상에서 이들의 선형 조합을 통해 최종적으로 주행가능성(traversability)을 추출하게 된다.

1. 주행공간의 적합성(goodness) 추출

이미지 공간을 격자 단위로 나눈 후, 각 격자에 대해 스테레오 시스템의 삼차원 정보를 이용하여 평면을 추정한다. 격자는 듬성한(coarse) 레벨과 조밀한(fine) 레벨로 구성되며, 조밀한 레벨의 경우 듬성한 레벨의 격자를 다시 5x5 구간으로 나누어 구성한다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 격자의 크기를 보여주고 있다. 각 격자 구간에서 평면을 추정 후 평면의 방향 정보와 평면 추정시 오차를 이용하여 다음과 같이 주행 공간의 적합성(goodness)을 계산한다[5].

$$g_{cell} = \min(roll, pitch, roughness) \quad (1)$$

추정된 평면의 거칠기(roughness)는 평면 추정과정에서의 오차를 이용하며, 듬성한 레벨과 조밀한 레벨에서 구한 평면 추정 오차 중 큰 값을 사용한다. 식 (1)에서 각각의 값은 크기가 [0, 1]을 가지도록 정규화한다.

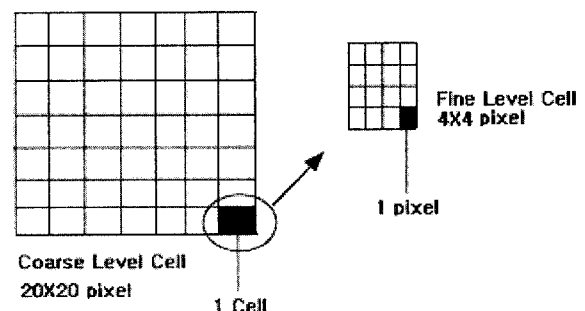


그림 1. 격자의 구성.

Fig. 1. The configuration of grid.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 4. 4., 채택확정 : 2008. 9. 8.

하종은, 김세선, 김현수: 서울산업대학교 자동차공학과
(jeha@snut.ac.kr/sesun.kim@ni.com/scwtbn@hanmail.net)

2. 주행공간의 확실성(certainty) 추출

각 셀에서의 주행공간의 확실성(certainty)은 식 (2)와 같이 계산한다[5]. 식 (2)에서는 각 셀에서의 유효한 점들의 비율을 반영하고 있다. 이는 스테레오 시스템에서 매칭 과정 수행 시 모든 지점에서의 대응점을 보장하지 못하기 때문이다. 텍스처가 부족한 균일한 영역의 경우 대응점을 찾기 어려우며, 일반적으로 이러한 지점에서의 삼차원 정보는 구할 수 없게 된다. 식 (2)의 항목은 각 격자에서 이러한 스테레오 시스템의 출력의 불균일성을 반영하기 위한 항목이다.

$$certainty = \frac{V_{fc}}{V_{ft}} \times \frac{V_c}{V_t} \quad (2)$$

V_{fc} : valid pixel in a coarse level
 V_{ft} : total pixel in a coarse level
 V_c : valid cell in a fine level
 V_t : total cell in a fine level

(2)

3. 주행공간의 주행가능성(traversability) 계산

최종적인 주행가능성(traversability)은 주행 적합성과 확실성의 선형 조합으로 구하게 된다.

$$t_{cell} = (1 - \alpha)g_{cell} + \alpha c_{cell} \quad (3)$$

경로 선택은 주어진 주행 공간에서의 경로를 발생 후 주어진 경로를 따른 주행가능성을 계산 후 최대의 주행가능성을 가지는 경로를 선택하게 된다[5].

각 경로를 따른 주행 적합성(goodness)과 확실성(certainty)은 다음과 같다.

$$G = \frac{\int w(s)c(s)g(s)ds}{\int w(s)c(s)ds} \quad (4)$$

$$C = \frac{\int w(s)c(s)ds}{\int w(s)ds} \quad (5)$$

$w(s)$ 는 경로를 따른 가중치로써, 일정 거리이상에서는 선형적으로 감소하는 값을 가진다. G 는 하나의 경로에 대한 적합성 값을 C 는 확실성 값을 나타낸다. 식 (4)와 (5)를 통해 적합성과 확실성 값은 단위 길이에 대해 정규화함을 알

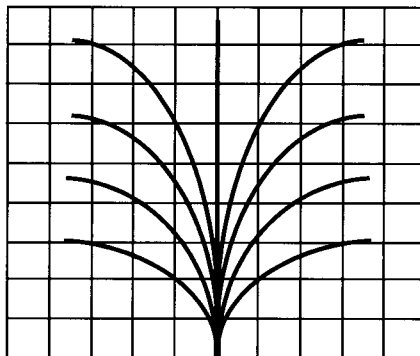


그림 2. 경로 생성.
Fig. 2. Path generation.

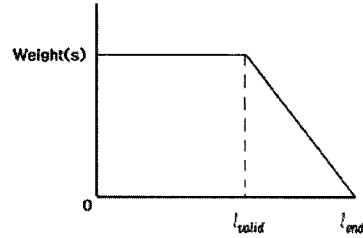


그림 3. 경로를 따른 가중치.
Fig. 3. Weight along path.

수 있다.

III. 제안 방법

식 (1)의 주행 공간의 적합성(goodness)의 계산시, 서로 다른 물리량인 평면의 두 각도 성분과 평면 추정 오차를 동시에 비교하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 실내 및 실내 환경에서의 다양한 실험을 통하여 이러한 방법이 항상 최적의 경로를 보장하지 못함을 알 수 있었다. 예를 들어 수직으로 존재하는 평탄한 장애물의 경우, 완전한 평면으로 인식하여 두 각도 성분 값은 높게 나타나지만 평면 추정 오차는 작으므로 최종적인 셀의 적합성은 잘못 평가되는 경우가 발생할 수 있다.

제안하는 방법은 주행 공간의 적합성의 계산시, 서로 다른 물리량의 분리를 통해 수행하는 것이다. 실내 및 실외의 다양한 실험을 통해 추정된 평면의 각도 정보와 평면 추정 오차를 구분하여 식 (6)가 같이 네 가지 경우로 나누어 주행 공간의 적합성을 계산하도록 한다.

$$\begin{aligned} & (roll \geq \theta_{th} \text{ or } pitch \geq \theta_{th}) \text{ and } roughness \geq r_{th} \\ & \Rightarrow goodness = \max(roll, pitch, roughness) \\ & (roll \geq \theta_{th} \text{ or } pitch \geq \theta_{th}) \text{ and } roughness < r_{th} \\ & \Rightarrow goodness = \max(roll, pitch) \\ & (roll < \theta_{th} \text{ or } pitch < \theta_{th}) \text{ and } roughness \geq r_{th} \\ & \Rightarrow goodness = \min(roll, pitch, roughness) \\ & (roll < \theta_{th} \text{ or } pitch < \theta_{th}) \text{ and } roughness < r_{th} \\ & \Rightarrow goodness = \min(roll, pitch, roughness) \end{aligned} \quad (6)$$

θ_{th} , r_{th} 는 역치값이며 사전 실험을 통해 구한 값을 사용한다. 그림 4는 스테레오 시스템의 출력인 삼차원 정보를 이용하여 영상을 격자로 나눈 후 Singh et. al.[5]의 접근 방법에 따라 각 격자에서의 평면 추정 후 롤, 피치, 거칠기 값을 표시한 것이다. 평면과 장애물의 표면 간에 틀어진 각도 차이를 나타내는 롤과 피치는 장애물의 형상과 유사하게 나타나지만 평면근사 오차값인 거칠기 값은 장애물이라도 고른 평면이라면 값이 작게 계산되는 것을 볼 수 있다.

IV. 실험 결과

그림 5는 실험에 사용한 로봇 및 시스템 구성을 보여주고 있다. Visual C++ 6.0으로 전체적인 알고리즘을 구축했으며, 카메라와 로봇플랫폼에서 제공하는 API를 이용하여 프로그램을 작성하였다. 영상처리는 OpenCV[12]를 이용하여 수행하였으며, Mobile Robot사에서 제공하는 Aria 2.5.1을 이용하여 로봇

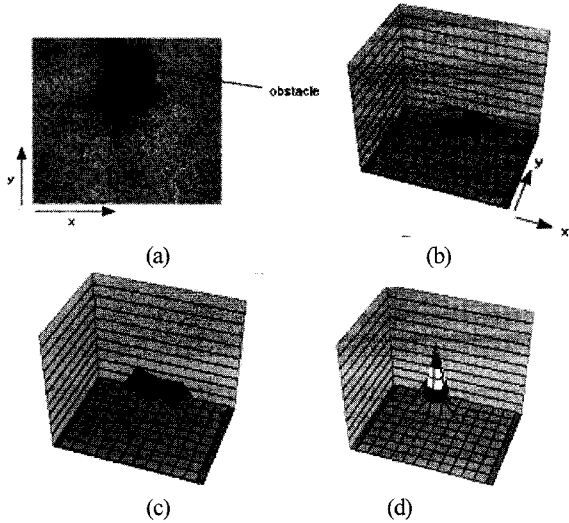


그림 4. 평면 추정을 통한 계산 (a) 원 이미지 (b) roll (c) pitch (d) roughness.

Fig. 4. Computation through plane fitting (a) original image (b) roll (c) pitch (d) roughness.

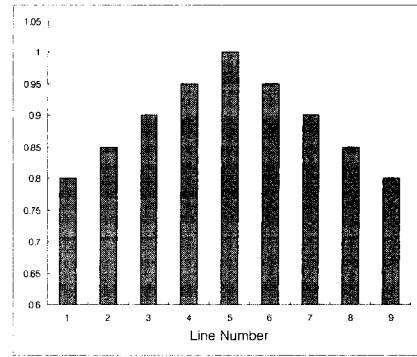


그림 6. 각 경로에 따른 출발 가중치.

Fig. 6. Start weight of a path.

표 1. 실험에 사용한 인자 값들.

Table 1. The value of parameters used in experiments.

인자	설정값
θ_{th} (각도 임계값)	20°
r_{th} (평면 근사치 임계값)	0.001

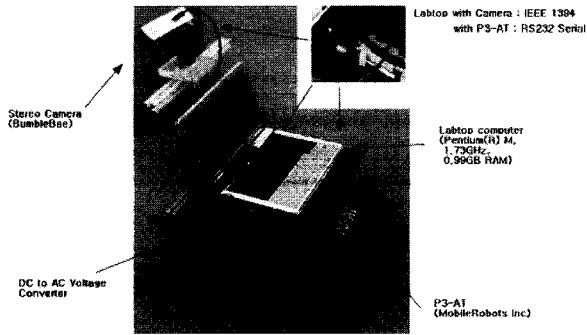


그림 5. 실험에 사용된 로봇 및 전제 시스템 구성.

Fig. 5. The configuration of experiment and robot.

과 플랫폼에 탑재된 노트북을 연결했다. 로봇 베이스 플랫폼은 MobileRobots사의 P3-AT를 사용하였으며, 스테레오 시스템은 Point Grey사의 BumbleBee를 사용하였고 IEEE 1394로 노트북과 연결되었다. 로봇의 방위각 정보를 알기 위해서 사용된 Rate Gyro 센서는 P3-AT로봇에 장착된 것을 사용하였다. 로봇에는 모터 제어 마이크로 컨트롤보드가 장착되어 있으며, 로봇에 노트북을 연결하여 RS-232 시리얼 통신을 통해 제어를 수행한다.

실험시 출발 가중치(start weight)를 고려하였다[9]. 출발 가중치는 직선 주행을 우선시 하고 그 외에는 로봇이 회전해야 하는 각도가 커질수록 작은 가중치를 주게 되며 이는 그림 6과 같다. 그러므로 미리 정해진 경로 중 가장 적합한 경로를 로봇이 선택한 후 그 중 전진 방향에 가까운 경로를 선택하도록 하지만, 너무 많은 차이를 가지는 가중치를 적용하게 되면 로봇의 주행가능성 값과 상관없이 로봇은 직선 주행만 하게 된다[9].

실험에 사용한 인자 값은 표 1에 나타나 있다. 이들 값은 사전 실험을 통해 구하였으며, 이후의 모든 실험 과정에서

동일한 값을 사용하였다.

그림 7은 한 쌍의 스테레오 이미지에 의한 결과를 보여주고 있다. 그림 7(a)와 7(b)는 왼쪽, 오른쪽 씬 영상이며 그림 7(c)는 디스패리티 영상을 보여주고 있다. 그림 7(d)는 9개의 주행 경로들 중에서 알고리즘에 의해 선택된 경로를 보여주고 있다. 그림에서 녹색 경로는 출발 가중치를 사용하지 않은 경우이며, 빨간색 경로는 출발 가중치를 사용한 경우이다. 본 연구에서는 계산상의 편의를 위해 곡선 주행 경로 대신 직선 주행 경로를 이용하였다.

그림 8은 Singh et. al.[1]의 알고리즘과 제안된 알고리즘의 성능 검증을 위해 사용된 실내 영상들이다. 모두 20가지 경

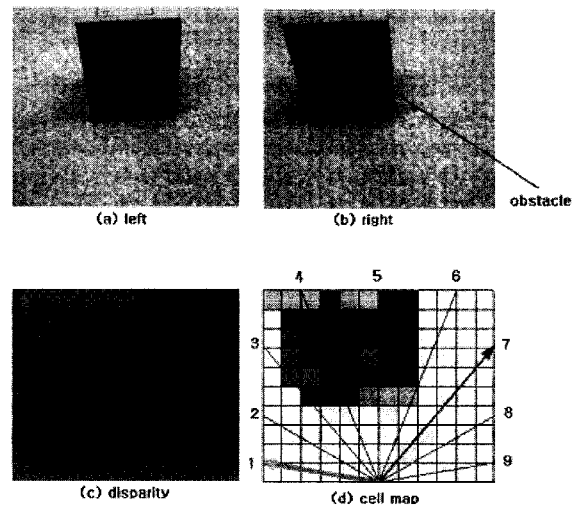


그림 7. 실험 결과 (a) 왼쪽 이미지 (b) 오른쪽 이미지 (c) 디스패리티 이미지 (d) 경로 선택.

Fig. 7. Experimental results (a) left image (b) right image (c) disparity image (d) path selection.

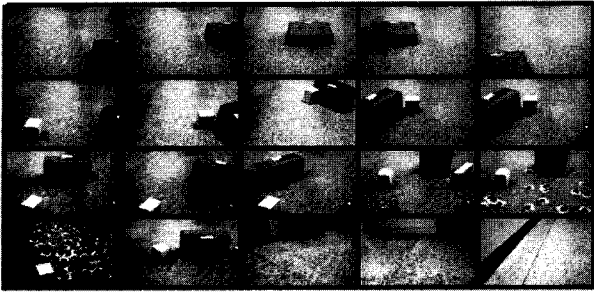


그림 8. 실험에 사용된 실내 영상들.
Fig. 8. Indoor images used in experiments.

표 2. 그림 7을 이용한 실험 결과(A: 최적의 경로 선택 횟수, B: 장애물 회피 가능 경로 선택 횟수, F: 장애물 회피 불가능 경로 선택 횟수).

Table 2. Experimental results using images of Fig. 7 (A: selection of optimal path B: selection of possible path of obstacle avoidance F: failure case).

출발 가중치	Singh et. al.[1]						제안 방법					
	미적용			적용			미적용			적용		
	A	B	F	A	B	F	A	B	F	A	B	F
1	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
2	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
3	0	100	0	36	0	64	0	100	0	99	0	1
4	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
5	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
6	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
7	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
8	45	55	0	100	0	0	41	59	0	100	0	0
9	1	99	0	0	0	100	2	98	0	100	0	0
10	1	99	0	0	0	100	1	99	0	100	0	0
11	90	10	0	100	0	0	95	5	0	100	0	0
12	22	78	0	0	0	100	21	79	0	100	0	0
13	0	100	0	0	0	100	0	100	0	100	0	0
14	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
15	9	91	0	99	0	1	0	100	0	100	0	0
16	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
17	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
18	0	100	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0
19	50	50	0	100	0	0	51	49	0	100	0	0
20	0	100	0	100	0	0	7	93	0	100	0	0
Total	307	1693	0	1535	0	465	418	1582	0	1999	0	1

표 3. 실험 결과 요약 [%].

Table 3. The analysis of experimental results[%].

	Singh et. al. [1]		제안 방법	
	미적용	적용	미적용	적용
출발 가중치 적용				
최적 경로 선택	15.4	76.8	21.0	100.0
장애물 회피 가능 경로 선택	100.0	76.8	100.0	100.0
잘못된 경로 선택	0.0	23.3	0.0	0.0

우이며, 각 경우에 대해 100번씩 영상을 취득하여 성능을 평가하였다. 성능 평가시 각 알고리즘에 의한 최종 선택된 경로를 육안으로 확인 후 최적의 경로 선택인지, 장애물 회피 가능 경로 선택인지 또는 잘못된 경로 선택 인지를 판정하였다. Singh et. al.[5]의 접근 방법 및 제안 방법 각각에 대해 출발 가중치를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 실험을 진행하였다. 상세한 실험 결과는 표 2에 나타나있다. 표 3은 표 2의 결과를 정리한 것으로서, Singh et. al.[5]의 방법의 경우, 출발 가중치를 적용하지 않은 경우 모든 실험 상황에서 장애물 회피 가능 경로를 선택하였으나 최적의 경로 선택 비율은 15.4%이다. 출발 가중치를 적용하는 경우 최적 경로 선택 비율은 76.8%로 향상되었으나 장애물 회피 불가능 경로를 선택하는 비중이 반대로 증가하였다. 제안한 알고리즘의 경우, 출발 가중치를 적용하는 경우 모든 경우에서 최적의 경로를 선택하였으며 가장 우수한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

V. 결론

이동 로봇의 실내 환경이나 실외 환경의 자율 주행을 하기 위해서는 다양한 센서의 사용과 이들 센서간의 융합이 필요하다. 본 연구에서는 스테레오 시스템을 이용한 향상된 장애물 회피 알고리즘을 제안하였다. 이는 기존 접근 방법의 실내 및 실외 환경에서의 다양한 적용 과정을 통해 실험적으로 구해진 것으로서, 기본적으로는 주행 적합성의 판정시 서로 다른 물리량의 분리를 통해 보다 강인한 장애물 회피 알고리즘을 제안하였다. 실내 환경에서의 다양한 환경에서의 실험을 통해 제안한 알고리즘의 강인성을 보였다.

참고문헌

- [1] <http://www.darpagrandchallenge.com/>
- [2] S. Thrun et. al., "Stanley : The Robot That Won The DARPA Grand Challenge," *Journal of Field Robotics*, 2006.
- [3] <http://www.cybernet.com/urbanchallenge/>
- [4] <http://www.tartanracing.org/>
- [5] S. Singh et. al., "Recent Progress in Local and Global Traversability for Planetary Rovers," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1194-1200, 2000.
- [6] R. C. Arkin, "Motor Schema Based Navigation for a Mobile Robot: An Approach to Programming by Behavior," *International Conference on Robotics and Automation*, 1987.
- [7] M. H. Herbert, "SMARTY: Point-Based Range Processing for Autonomous Driving," *Intelligent Unmanned Ground Vehicle*, Kluwer Academic Publishers, 1997.

[8] L. Matthies, E. Gat, R. Harrison, B. Wilcox, R. Volpe, and T. Litwin, "Mars Microver Navigation: Performance Evaluation and Enhancement," *Autonomous Robots*, vol. 2, pp. 291-311, 1995.

[9] A. Kelly, "An Intelligent Predictive Control Approach to the High Speed Cross Country Autonomous Navigation Problem," Ph.D Thesis, Carnegie Mellon University, 1995.

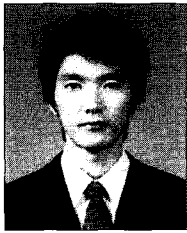
[10] H. Sraji, "Traversability Index: A new concept for planetary rovers," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999.

[11] D. Gennery, "Traversability Analysis and Path Planning for a Planetary Rover," *Autonomous Robots*, 1999.

[12] <http://opencvlibrary.sourceforge.net/>

[13] L. Matthies et. al., "Computer Vision on Mars," *International Journal of Computer Vision*, vol. 75, no. 1, pp. 67-92, 2007.

[14] M. Maimone, Y. Cheng, and L. Matthies, "Two Years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers," *Journal of Field Robotics*, 2007.



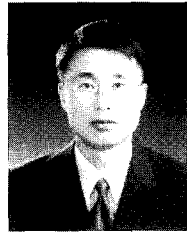
김 세 선

2006년 서울산업대 자동차공학과 졸업.
 2008년 서울산업대 산업대학원 자동차공학과 석사. 2008년~현재 한국 NI. 관심분야는 무인 자율주행.



김 현 수

2007년 서울산업대 자동차공학과 졸업.
 2007년~현재 서울산업대 에너지환경대학원 나노아이티공학과 석사과정. 관심분야는 무인 자율주행.



하 종 은

1992년 서울대학교 기계공학과 졸업.
 1994년 서울대학교 기계공학과 석사.
 2000년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 2000.02~2002.08 삼성코닝 2002년~2005년 동명대학교 멀티미디어공학과. 2005.10~현재 서울산업대학교 자동차공학과. 관심분야는 지능형 자동차/로봇, 인공 지능.