



## LRF 기반의 스캔매칭을 위한 회전오차에 강인한 대응점 탐색 기법

### Searching Methods of Corresponding Points Robust to Rotational Error for LRF-based Scan-matching

장은석\* · 조현학\*\* · 김은경\* · 김성신\*†

Eunseok Jang, Hyunhak Cho, Eun Kyeong Kim, and Sungshin Kim†

\*부산대학교 전기전자컴퓨터공학과, \*\*부산대학교 로봇관련협동과정

†Department of Electronic and Computer Engineering, Pusan National University

\*\*Department of Interdisciplinary Cooperative Course: Robot, Pusan National University

#### 요약

본 논문은 모바일 로봇의 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 구현 시 사용되는 스캔매칭을 위한 회전오차에 강인한 대응점 탐색 기법을 제시한다. 많은 모바일 로봇의 연구에 차동구동방식의 구동부가 사용되는데, 이는 곡선 주행이나 제자리 회전을 위해 두 모터의 속력을 다르게 하거나, 반대 방향으로 제어하게 된다. 이러한 경우 직선 주행에 비해 비교적 바퀴의 미끄러짐 현상(Wheel Slip)을 심화시켜 모바일 로봇의 누적 위치 오차를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 모바일 로봇의 회전 반경을 기반으로 최근접점을 추출하는 대응점 탐색 기법을 통해 스캔매칭 성능을 향상시키고자 한다. 제안된 방법의 검증에 대해 LRF(Laser Range Finder)를 이용해 실험을 진행하였으며, 기존 알고리즘에 주로 적용되는 유클리디안 최근접점 기반의 대응점 탐색 알고리즘과 비교한 결과, 제안된 대응점 탐색 기법이 보다 정확하게 대응점 집합을 추출하는 것을 확인했다.

키워드 : 모바일 로봇, SLAM, 스캔매칭, Wheel Slip, LRF.

#### Abstract

This paper presents a searching method of corresponding points robust to rotational error for scan-matching used for SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) in mobile robot. A differential driving mechanism is one of the most popular type for mobile robot. For driving curved path, this type controls the velocities of each two wheels independently. This case increases a wheel slip of the mobile robot more than the case of straight path driving. And this is the reason of a drifting problem. To handle this problem and improves the performance of scan-matching, this paper proposes a searching method of corresponding points using extraction of a closest point based on rotational radius of the mobile robot. To verify the proposed method, the experiment was conducted using LRF(Laser Range Finder). Then the proposed method is compared with an existing method, which is an existing method based on euclidian closest point. The result of our study reflects that the proposed method can improve the performance of searching corresponding points.

Key Words : Mobile Robot, SLAM, Scan-matching, Wheel Slip, LRF.

Received: Nov. 18, 2016

Revised : Dec. 14, 2016

Accepted: Dec. 15, 2016

†Corresponding authors

sskim@pusan.ac.kr

## 1. 서론

최근 로봇산업의 시장 확대와 수요 증가로 인해 모바일 로봇 산업 시장 또한 그 규모가 확대되고 있다. 그 중에서도 모바일 로봇의 자율주행 기술과 관련한 연구가 특히 활발히 이루어지고 있다 [1-4].

모바일 로봇의 자율주행에 관련한 연구로는, 최근 비전, 초음파, 레이저 기반의 센서를 통해 지도를 작성하는 SLAM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [5-8]. 이러한 연구에 사용되는 대부분의 모바일 로봇에는 주로 그림 1과 같은 차동구동방식의 구동부가 적용된다. 해당 방식은 양 바퀴의 속도를 다르게 제어하게 되는데, 특히 곡선 주행 시 바퀴의 미끄러짐 현상(Wheel Slip)이 심화되어 누적 위치오차를 발생 시킨다 [9-10]. 이에 따라 모바일 로봇의 주행 간 생성되는 각 지역좌표계의 데이터들의 대응점 쌍을 기반으로 두 좌표계를 보정 및 정합하는 스캔매칭에 관련한 다양한 연구들이 진행되어 왔다 [11].

일반적으로, 다양한 스캔매칭 알고리즘에 적용하기 위해서는 각 지역좌표계의 지도 데이터에서

본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었으며, 산업통상자원부가 지원하는 산업융합·연계형 로봇창의인재양성사업 연구 결과로 수행되었음. (N0001126)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

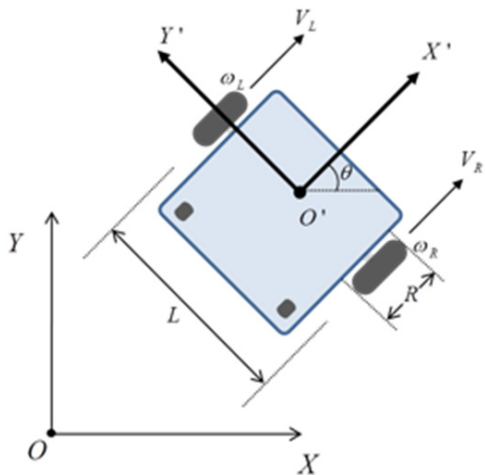


그림 1. 차동구동방식의 기구학 모델.  
Fig. 1. Kinematic model of differential driving mechanism.

대응점에 해당하는 쌍들을 정확히 추출해 내는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에는 차동구동방식의 모바일 로봇의 회전 주행 시 발생하는 누적오차에 강인한 대응점 탐색을 위해, 모바일 로봇의 회전 반경을 기반으로 하는 대응점 탐색 기법을 제안한다. 제안된 방법의 검증을 위해 LRF(LMS200)를 통해 측정한 2차원 지도 데이터를 사용해 실험을 진행하였으며, 기존 스캔매칭 알고리즘에 적용되는 유클리디안 최근접점 기반의 대응점 탐색 방법과 그 성능을 비교하였다 [12-13].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 대응점 탐색 기법에 대해 제안하며, 3장에서는 제안된 대응점 탐색 기법의 검증을 위해 적용한 스캔매칭 알고리즘에 대하여 기술한다. 4장에서는 제안된 방법의 검증을 위한 실험결과 그 결과를 다루며, 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구에 대해 제시한다.

## 2. 회전오차에 강인한 대응점 탐색 기법

모바일 로봇의 주행 시 LRF를 통해 획득한 이전까지의 전역 지도와 현재 지점에서 획득한 지역 지도에 해당하는 데이터들의 집합을 각각 식 (1), (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$X = [x_1, \dots, x_j] \quad (1)$$

$$P = [p_1, \dots, p_i] \quad (2)$$

이 때, Encoder와 모바일 로봇의 기구학을 토대로 예측한 누적 위치오차가 포함된 모바일 로봇의 현재 위치의 회전 축을 기준으로 하는 좌표계 \$OXY\$는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

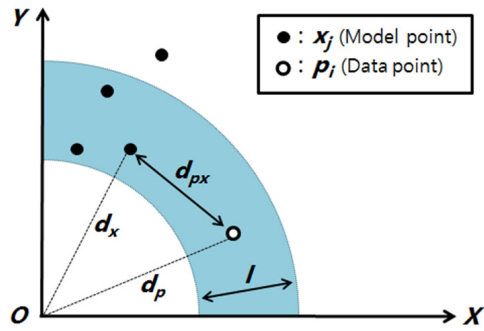


그림 2. 제안된 대응점 탐색 기법.  
Fig. 2. Proposed searching method of corresponding points.

주어진 두 지도 데이터로부터 획득하고자 하는 각각의 대응점 집합 \$X', P'\$는 식 (3), (4)와 같이 정의하며, 이를 구하는 방법은 그림 3의 의사코드와 같다.

$$X' = [x'_1, \dots, x'_n] \quad (3)$$

$$P' = [p'_1, \dots, p'_n] \quad (4)$$

```

01: for raw sensor data point $p_i$ from LRF do
02:   $D_i = \infty$ ; $idx = 0$;
03:   find the distance $d_p$ of point $p_i$ and
      center of robot;
04:   for previous map data point $x_j$ do
05:     find the distance $d_x$ of point $x_j$ and
      center of robot;
06:     if $abs(d_x - d_p) < l/2$ then
07:       find the distance $d_{px}$ of
      point $p_i$ and $x_j$;
08:       if $d_{px} < D_i$ then
09:         $idx = j$ ; $D_i = d_{px}$;
10:       end if
11:     end if
12:   end for
13:   if $idx > 0$ then
14:     $P'.add(p_i)$ ; $X'.add(x_{idx})$;
15:   end if
16: end for
    
```

그림 3. 제안된 방법의 의사코드  
Fig. 3. Pseudo code of proposed method

모바일 로봇의 회전 반경을 기준으로 한 오차 범위 내의 영역에 위치한 데이터만을 대응점 후보군으로 사용함으로써, 제자리 회전과 같이 급격한 각도변화가 발생하는 상황에서도 비교적 정확한 대응점 쌍을 추출하게 된다. 대응점 후보군을 결정짓는 모바일 로봇의 회전 반경을 기반으로 하는 오차 범위에 해당하는 \$l\$ 값은 실험에 사용한 LRF(LMS200)의 최대 측정 거리오차를 감안하여

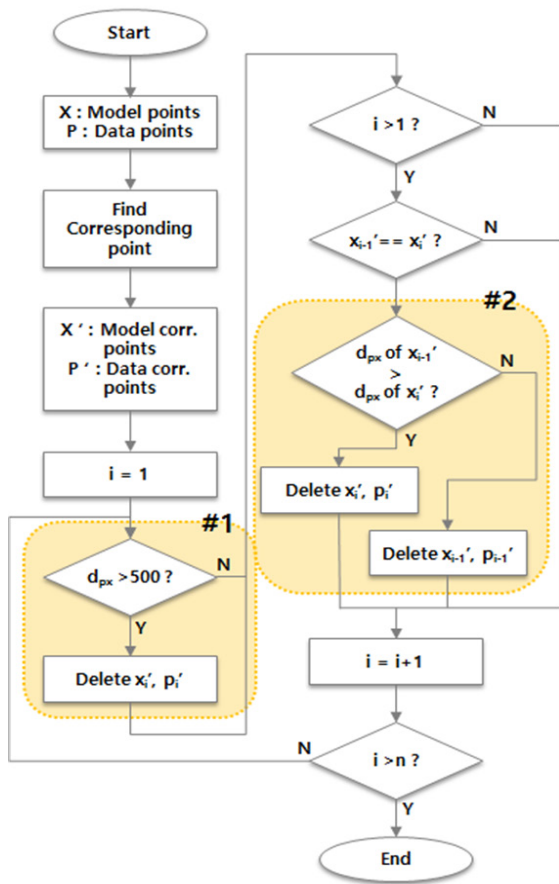


그림 4. 제안된 대응점 생성 방법의 전체 순서도.

Fig. 4. Flowchart of proposed method for searching corresponding points.

100mm로 설정하였다[14].

그림 3에서 제안된 대응점 탐색 방법을 적용하여 초기 대응점을 추출하는 전체 과정은 그림 4의 순서도와 같다.

#1의 영역을 통해 대응점 후보군들 중 각 대응점 쌍에 해당하는 두 점 사이의 거리가 500mm 미만인 점들로 대응점 후보군을 축소하는 과정을 거친다. 이를 통해 오차가 매우 큰 대응점 쌍들을 추출하는 현상을 방지한다. 이때 기준값으로 사용한 500mm는 실험에 사용한 모바일 로봇의 주행 시 LRF(LMS200)가 갖는 측정 최대 거리오차를 고려하여 설정하였다.

그림 4의 #2로 표시된 영역은 전체 추출된 대응점 집합에 대해 중복하여 선택된 대응점 쌍들에 대한 처리 과정이다. 해당 중복 대응점 쌍들 중 대응점 간의 거리가 가장 짧은 대응점 쌍을 제외한 나머지를 제거하는 방법을 사용하였다.

### 3. 스캔매칭 알고리즘

2장에서 제안된 대응점 탐색 기법을 SLAM에 적용하기 위해

그 성능을 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 기존의 스캔매칭 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 실험을 진행하였으며, 사용한 방법은 그림 5와 같다 [15].

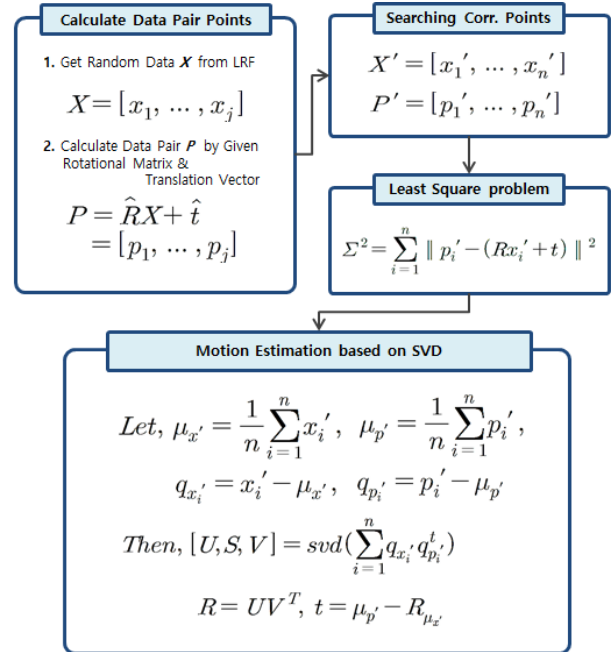


그림 5. 사용한 스캔매칭 알고리즘.

Fig. 5. Used scan-matching algorithm.

사용한 스캔매칭 알고리즘은 기존의 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘의 Motion parameter 추정 과정에 사용되는 SVD(Singular Value Decomposition) 기반의 LSE(Least-square Estimation)과정이다. 이는 비 반복적 기법을 사용함으로써 SLAM의 실시간성 효율을 증진시키지만, 초기 1회에 추출된 대응점 집합만을 사용하므로, 정확한 대응점 집합의 추출이 매우 중요하게 된다. 하지만 기존의 ICP 알고리즘에 주로 사용되는 유클리디안 최근점점 기반의 대응점 탐색 기법은 반복적인 기법에 대응하기 위한 알고리즘으로, 추출된 대응점의 정확도가 다소 떨어진다는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 제안된 대응점 생성 기법을 통해 위 단점을 극복하고, 그 성능을 검증하기 위하여 해당 스캔매칭 알고리즘을 사용하고자 한다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 대응점 탐색 정확도 비교

SLAM 구현을 위한 실험에서, 모바일 로봇의 주행 시 LRF(LMS200)의 측정 거리오차는 평균적으로 약 300mm까지 발생하는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 제안된 대응점 탐색

기법의 시뮬레이션을 다음과 같이 진행하였다.

먼저, 주행 실험 간 획득한 15개의 임의의 실내 환경 데이터 각각에 대하여  $\pm 10^\circ$  ( $-10^\circ, -9^\circ, \dots, 9^\circ, 10^\circ$ ) 범위의 회전행렬과 0, 100, 200, 300mm의 전이벡터를 다양하게 적용한 525개의 데이터 쌍을 만든다. 다음으로, 제안된 대응점 탐색 기법 및 기존의 방법을 각각 적용하여 각각 대응점 쌍들을 추출하여 그 결과를 비교하였다. 그림 5는 대응점 추출 실험의 오차를 계산하는 방법에 대해 나타내고 있으며, 그림 2와 동일한 모바일 로봇의 회전 중심을 기준으로 하는 좌표계를 사용한다.

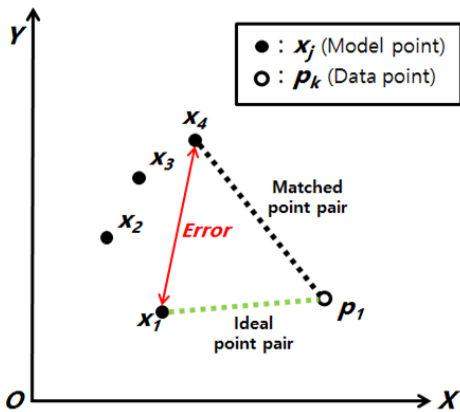


그림 6. 오차 계산 예시.  
Fig. 6. Example of error calculation.

그림 6을 기준으로 대응점 쌍 추출 성공 비율은 전체 추출된 대응점 쌍의 개수 중 이상적인 대응점 쌍을 추출한 비율로 계산하며, 그 방법은 식 (5)와 같다. 이를 통해 나타낸 제안된 방법과 기존 방법 각각의 실험 결과는 그림 7과 같다.

$$\text{Success ratio} = \frac{\text{Number of ideal point pairs}}{\text{Number of extracted point pairs}} \quad (5)$$

그림 6의 각 그래프의 가로축은 실험에서 초기에 생성한 임의의 데이터 쌍에 적용한  $\pm 10^\circ$  범위의 각도 오차를 의미하며, 세로축은 식 (5)를 통해 구한 이상적인 대응점 쌍의 추출 비율의 각도별 평균을 나타낸다. 실험 결과 모바일 로봇의 회전오차가 함에 따라 제안된 방법이 전반적으로 많은 수의 이상적인 대응점을 추출하는 것을 알 수 있다.

그림 6의 Error에 해당하는 오차거리의 RMSE 값을 비교한 실험 결과는 그림 8과 같다.

실험 결과, 기존 방법에 비해 제안된 방법을 사용할 경우, 생성된 대응점의 정확도가 높은 것을 알 수 있으며, 모바일 로봇의 회전오차에 보다 강인하게 대응하는 것을 확인했다.

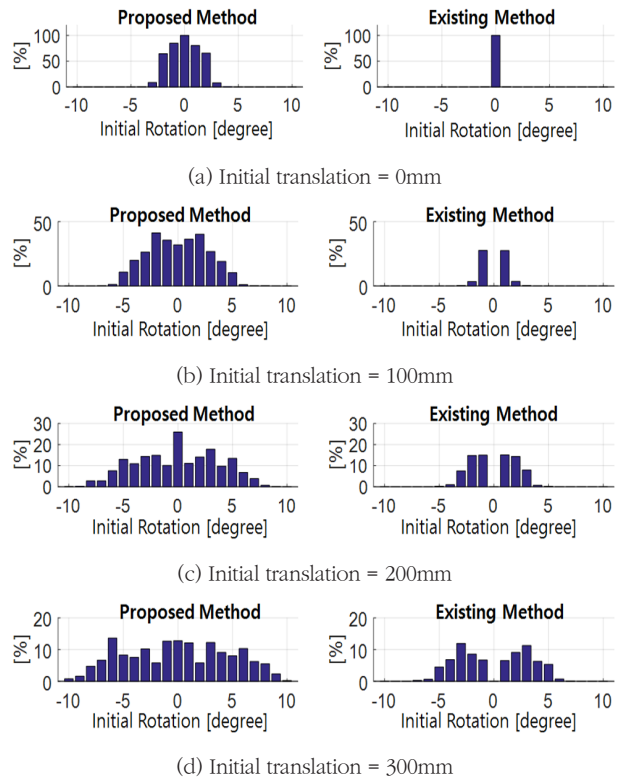


그림 7. 대응점 생성 성공 비율: a, b, c, d는 각각 초기 전이벡터의 거리가 0mm, 100mm, 200mm, 300mm인 경우.  
Fig. 7. Success ratio of ideal point pairs: An a, b, c, and d represent an initial translation which are equal to 0mm, 100mm, 200mm and 300mm, respectively.

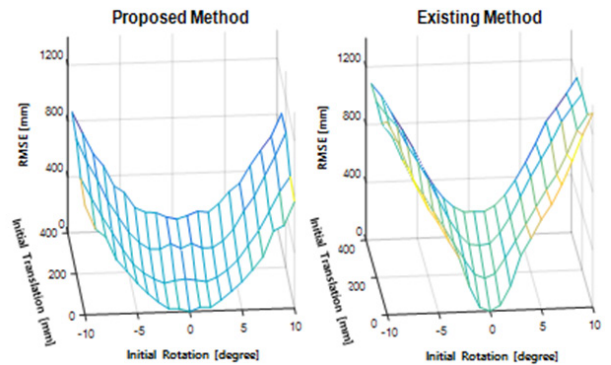


그림 8. 대응점 쌍의 거리오차.  
Fig. 8. Distance error of corresponding point pairs.

#### 4.2 스캔매칭 알고리즘 적용 실험

4.1장의 실험을 통해 생성된 제안된 방법 및 기존 방법의 대응점 쌍 각각에 대해, 3장에서 제시한 스캔매칭 알고리즘을 적용하였다. 각각의 실험 결과는 그림 9와 같다.

실험을 통해 예측한 모바일 로봇의 각도 및 위치를 실험 4.1에서 초기에 적용시켰던 회전행렬 및 전이벡터와 비교해 오차 값을 계산한 결과, 제안된 방법이 비교적 정확하게 모바일 로봇의 움직임을 예측하는 것을 확인했다.



## 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 스캔매칭의 성능 향상을 위한 대응점 생성 기법에 대해 제안하였다. 제안된 방법은 기존 유클리디안 최근접점을 기반으로 하는 방법에서 모바일 로봇의 회전반경을 기반으로 하는 오차범위 내의 영역으로 대응점 후보군을 축소한다. 실험 결과, 제안된 대응점 탐색 기법은 기존의 기법에 비해 모바일 로봇의 회전오차에 비교적 강인하게 적용되는 것을 확인하였다.

제안한 방법의 회전반경의 오차범위 / 값과 그림 4의 #1 영역에서 제시한  $d_{px}$ 의 최댓값의 적절한 설정이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 이를 LRF의 측정 최대 거리오차범위를 고려하여 설정하였다. 향후 보다 정확한 대응점 추출을 위해 해당 값의 설정에 대하여 모바일 로봇의 동적 특성, 주변 환경에 따른 LRF의 계측 특성 등을 고려하는 방법에 대해 연구하고자 한다.

## References

- [1] J. H. Joseph Yun, et al., "The relationship between technology, business model, and market in autonomous car and intelligent robot industries," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 103, pp. 142-155, 2016.
- [2] P. Pavlinek, "The internationalization of corporate R&D and the automotive industry R&D of East-Central Europe," *Economic Geography*, vol. 88, no. 3, pp. 279-310, 2012.
- [3] T. G. Kim, N. Y. Ko, and S. W. Noh, "Simultaneous estimation of landmark localization and robot pose using particle filter method," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 22, no. 3, pp. 353-360, 2012.
- [4] C. H. Choi, and B. J. Lee, "A study on fisheye lens based features on the ceiling for self-localization," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 21, no. 4, pp. 442-448, 2011.
- [5] H. Durant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part 1," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.
- [6] O. S. Kwon, B. Y. Hyeon, and K. S. Seo, "An improved FastSLAM algorithm using fitness sharing technique," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 22, no. 4, pp. 487-493, 2012.
- [7] H. D. Kim, et al., "Simultaneous localization and mapping of mobile robot using digital magnetic compass and ultrasonic sensors," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol.

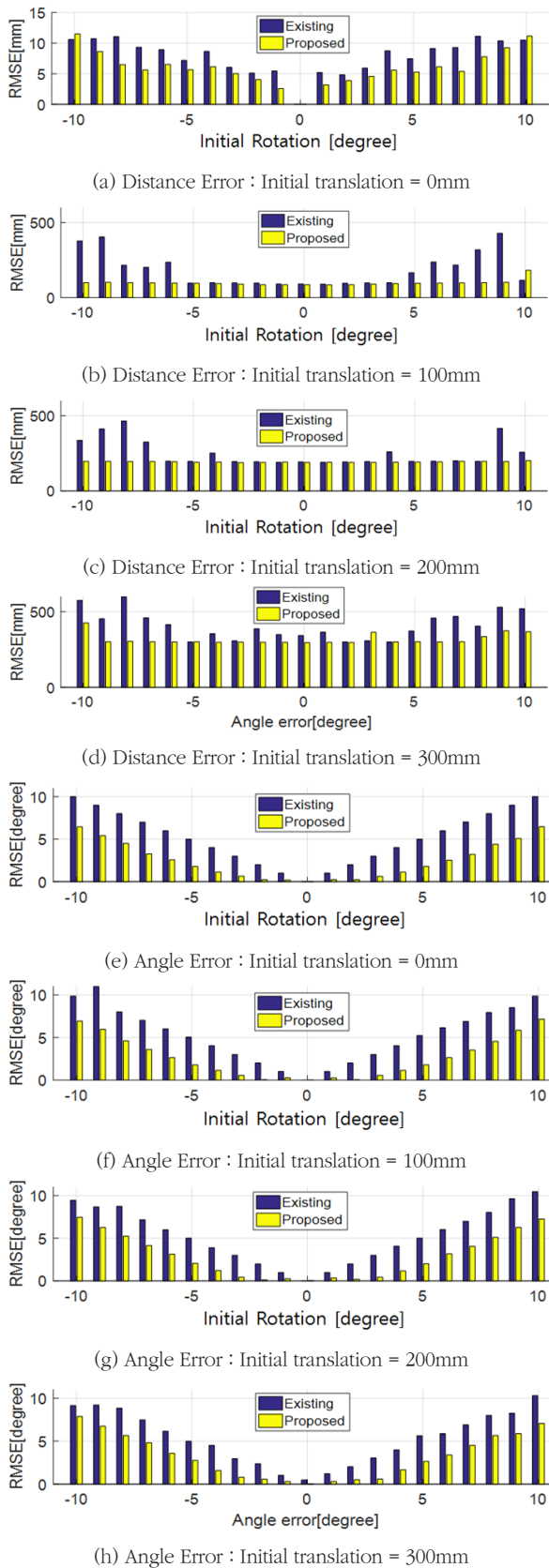


그림 9. 스캔매칭 실험의 오차.  
Fig. 9. Error of scan-matching experiment.

17, no. 4, pp. 506-510, 2007.

[8] C. H. Han, and K. B. Sim, "Real-time mapping of mobile robot on stereo vision," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 20, no. 1, pp. 60-65, 2010.

[9] H. H. S. Liu and G. K. H. Pang, "Acclerometer for mobile robot positioning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 3, pp. 812-819, 2001.

[10] F. Gustafsson, "Slip-based tire-road friction estimation," *Automatica*, vol. 33, no. 6, pp. 1087-1099, 1997.

[11] J. A. Willians and M. Bennamoun, "Evaluation of a novel multiple point set registration algorithm," *Proc. 15<sup>th</sup> International Conference on Patterns Recognition, IEEE*, vol. 1, pp. 1007-1010, 2000.

[12] P. J. Besl and N. D. McKay, "A Method for registration of 3-D shapes," *Robotics-DL tentative, International Society for Optics and Photonics*, pp. 586-606, 1992.

[13] P. Bergström and O. Eklund, "Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares," *Computational Optimization and Applications*, vol. 58, no. 3, pp. 543-561, 2014.

[14] R. Sanz-Cortella, et al., "Characterisation of the LMS200 laser beam under the influence of blockage surface. Influence on 3D scanning of tree orchards," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2751-2772, 2011.

[15] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein, "Least-squares fitting of two 3-D point sets," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, no. 5, pp. 698-700, 1987.

**저 자 소 개**



**장은석(Eunseok Jang)**

2015년 : 인제대학교 전자지능로봇공학과  
공학사  
2015년~현재 : 부산대학교  
전기전자컴퓨터공학과  
석사과정

관심분야 : Intelligent Robot, Soft Computing

Phone : +82-51-510-2367

E-mail : esjang@pusan.ac.kr



**조현학(Hyunhak Cho)**

2011년 : 신라대학교 컴퓨터정보공학부 공학사  
2013년 : 부산대학교 로봇관련협동과정  
공학석사  
2013년~현재 : 부산대학교  
로봇관련협동과정박사과정

관심분야 : Image Processing, Intelligent Robot

Phone : +82-51-510-2367

E-mail : darkruby1004@pusan.ac.kr



**김은경(Eun Kyeong Kim)**

2014년 : 부산대학교 전기전자공학부 공학사  
2015년 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과  
공학석사  
2015년~현재 : 부산대학교  
전기전자컴퓨터공학과  
박사과정

관심분야 : Intelligent System, Computer Vision

Phone : +82-51-510-2367

E-mail : kimeunbyeong@pusan.ac.kr



**김성신(Sungshin Kim)**

1986년 : 연세대학교 전기공학과 공학석사  
1996년 : Georgia Inst. of Technology,  
전기및컴퓨터공학부 공학박사  
1998년~현재 : 부산대학교 전기컴퓨터공학부  
교수

관심분야 : Intelligent system, Intelligent robot, Fault diagnosis and prediction

Phone : +82-51-510-2374

E-mail : sskim@pusan.ac.kr