2차원 격자 오차 데이터 기반의 선형 보정 함수들을 이용한 적외선 레인지 파인더 PBS-03JN의 보정

Calibration of Infra-red Range Finder PBS-03JN Using Piecewise Linear Function Based on 2-D Grid Error

김진백*, 김병국
(Jin-Baek Kim¹ and Byung-Kook Kim¹)

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: An efficient calibration algorithm for mobile robot localization using infrared range finder is proposed. A calibration is important to guarantee the performance of other algorithms which use sensor data because it is pre-process. We experimentally found that the infrared range finder PBS-03JN has error characteristics depending on both distance and scan angle. After obtaining 2-D grid error characteristic data on distance and scan angle, we proposed a simple and efficient calibration algorithm with a 2-D piecewise linear function set. The performance of our proposed calibration algorithm is verified by experiments and simulation.

Keywords: mobile robot localization, IR range finder, calibration

1. 서론

실내 서비스 이동 로봇은 그 특성상 로봇에게 맡겨진 여러 가지 임무를 한 장소가 아닌 다양한 장소에서 수행해야만 하며, 이를 위해 로봇의 위치 및 방향 판별, 즉 위치 추정(localization)이 모든 임무들 중 선행조건이 된다. 이 과정은 주변환경의 정보를 수집하는 센서를 통해 얻은 환경 데이터를 이용하여 로봇의 위치를 환경과 상대적인 관점(local coordinate)에서 얻은 후 이를 절대적인 관점(global coordinate)으로 전환하여 주변환경 전체와 로봇의 위치를 파악할 수 있게 된다. 위치 추정은 현실의 3차원 환경과 다르게 정보량, 계산의 복잡도 등의 한계로 인하여 높이 성분이 빠진 2차원 위치 추정이 주로 연구되고 있다[1,2].

이동 로봇에 장착될 센서는 이동 로봇의 성능 전반에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이므로 설계 시에 미리 고려되어야 한다[3]. 특히, 로봇의 위치 추정을 위해 필요한 데이터를 수집하는 센서인 경우 그 성능이 최종 위치 추정의 정확도에도 영향을 미치게 된다. 따라서, 가장 많이 사용되는 고성능의 센서는 단연 2차원 레이저 레인지 파인더이다. 2차원 레인지 파인더는 넓은 활용성을 가지고 있어 이를 이용하여 정확한 위치 추정이 가능하도록 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 SICK사의 LMS200같은 Laser range finder (LRF)는 높은 정확도를 제공하여 많은 연구에 활용되고 있다[5-8].

레이저 레인지 파인더의 성능은 우수하나, 가격이 고가라는 단점이 있으므로, 경제적이고 효율적인 해결책이 필요하다.

다. 무엇보다도 먼저 레인지 파인더가 저렴한 단가를 가지도록 해야 한다. 가격이 상대적으로 저렴한 PBS-03JN같은 적외선 레인지 파인더도 있으나, 정확도가 레이저 레인지 파인더에 비해 낮아서 위치 추정이 부정확해 지고 다른 물체들과의 충돌을 야기 할 수 있기 때문이다. 따라서 가격이 상대적으로 저렴한 센서를 사용하되, 정확한 결과를 얻을 수 있는 것이 현실적으로 최선의 방법이다.

센서의 오차보정은 저렴한 센서로 최대한의 정확한 데이터를 얻을 수 있는 방법이다. 센서의 오차 보정은 센서라는 물리적인 장치의 특성에 의존하는 것으로 기본적으로 오차를 감소시키는 목적은 같지만 센서의 특성에 따라 오차 보정 방법이 달라져야 한다. 이에 따라 다양한 센서들의 특성을 분석하고 가능하다면 오차를 줄이는 보정을 추가하여 그 성능을 향상시키고자 하는 연구들이 있다[8,10,11,12].

가장 간단한 오차 보정 방법으로써, SICK사의 LMS200이나 Hokuyo사의 URG-04LX의 오차 특성을 분석하여 1차 함수를 적용하여 오차를 보정하는 방법이 있다[12,16-18]. 그러나 오차가 1차 함수로만 간단히 표현되지 않기 때문에 오차 보정 성능은 높지 않는 단점이 있다. 보다 복잡한 오차 보상 방법으로, 다항식 함수를 이용한 방법이 있다. 3차원 레이저 레인지 시스템에 측정 거리와 측정 물체에 대한 빔의 입사각에 따른 오차 특성을 분석하여 오차 보정 함수로 2차원 2차 다항식을 적용한 방법이 있다[10]. 다만, 정밀 측정 기계인 4DI (4 Dimensional Imager)에 적용되는 것으로 측정 물체의 방향을 알고 있어서 빔의 입사각에 따른 오차 분석이 가능할 때만 적용 되는 방법이다. 적외선 레인지 파인더의 오차 특성을 2차원으로 분석하여 거리와 방향각을 일정 구간으로 나눈 후 각 구간마다 4차 다항식 함수를 부드럽게 연결 짓도록 설정한 보정법이 있다[11]. 이 방법은 보정 전과 후의 데이터를 이용한 위치 추정 결과의 비교는 되어 있으나 보정 전과 후의 데이터 정확도에 대한 비교가 없고 오차 보정법이 복잡

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 3. 11., 수정: 2011. 5. 20., 채택확정: 2011. 6. 27.

김진백, 김병국: KAIST 전기및전자공학부

(jbkim@rtcl.kaist.ac.kr/bk kim@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 (고려대학교 로봇자율주행기술 전문인력양성센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

하다는 단점을 가지고 있다. 또, 오차 보정에 6차 다항식 함수를 이용하여 오차를 줄이고 위치 추정에 적용한 결과 위치 추정 오차도 줄어들었다고 하지만 구체적인 분석이 부족한 방법이 있다[10].

이외에도 비선형 및 통계적 보상 방법을 이용한 보정법도 연구되었다. 적외선 레인지 파인더의 오차 특성을 분석하고 오차 보정에 신경망 구조를 활용하여 지도 작성(map building)에 적용하였다. 그러나, 신경망 구조의 설정값에 대한 논의와 오차 보정 성능에 대한 분석이 부족하다[9]. 또한 오차 모델을 적절히 만든 후 이에 대한 cost 함수를 설정하여 cost 함수를 최소화하는 시키는 변수를 찾는 방식이 있다[19]. 이 방법은 오차 모델의 정확도와 cost 함수의 적합성에 따라 오차 보정 성능이 바뀌게 되는 단점을 가지고 있고 다른 오차 보정법과 비교 평가가 없다. 또한, 센서의 시스템(systematic) 오차가 아닌 불규칙(random) 오차를 줄이는 방법도 연구가 되었는데 통계적 방법을 적용하여 불규칙 오차의 확률을 통해 이를 보정하는 방법이 있으나 불규칙 오차가 상당히 큰 값을 가질 때만 효과가 있고 시스템 오차는 처리할 수 없는 단점을 가지고 있다[7].

본 논문에서는 오차 보정법을 적용하는 대상으로 적외선 레인지 파인더 PBS-03JN를 선정하였다. 제조사에서 제공하는 사양에 따르면 PBS-03JN의 주된 목적은 장애물 감지이다. 그래서, 기본적으로 보장하는 측정 가능 범위가 일반적인 레인지 파인더와 다르게 좁고 정확도 또한 낮다. 가격이 저렴한 만큼 오차가 상당히 크다는 문제인데, 레인지 파인더의 오차 보정이라는 관점에서 보면 레인지 파인더를 위한 효율적인 보정법을 제시하고 성능을 평가하는데 좋은 적용 예가 될 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문은 경제적인 적외선 레인지 파인더 PBS-03JN의 유효 적절한 실험 데이터에 근거한 오차 보정법을 제시하고, 제안한 보정법을 다른 보정법들과 비교 실험하여 전체적인 성능을 입증하고자 한다.

이를 위해 기존의 보정법들이 놓치고 있는 주요한 오차 원인을 찾아 내고 이를 반영하는 오차 함수를 제안할 것이다. 본 논문에서 제안하는 보정법은 적용 대상의 예로 PBS-03JN를 선정한 것 일뿐 거리와 측정 방향각을 데이터로 출력하는 모든 레인지 파인더에도 동일하게 적용이 가능하다. 이는 제안할 보정법은 거리와 측정 방향각이라는 두 가지 입력을 활용하는 방법이기 때문이다. 기존 연구들이나 Hokuyo사의 레인지 파인더 스펙에서 주로 상대오차를 통해 정확도를 제시하고 있어 오차 보정의 성능 평가를 위한 지표로 상대오차의 보정 전과 후를 비교해서 볼 것이다. 상대오차란 오차의 절대값을 실제거리에 대한 비율로 나타낸 것으로 오차가 실제 거리에 비해 어느 정도 발생하는 가를 나타내는 지표이다. 상대오차를 사용하는 이유는 일반적으로 측정거리가 커질수록 오차도 커지기 때문에 단순히 오차의 크기로 레인지 파인더의 성능을 평가하게 되면 특정 거리별로 정확도를 제시해야 하는 불편함을 없애기 위함이다.

본 논문은 총 V 장으로 구성되었다. II 장에서는 레인지 파인더 센서의 특성과 다양한 오차 발생원인 그리고 적외선 레인지 파인더 PBS-03JN의 특성과 오차에 대해 기술한다. III 장에서는 PBS-03JN의 오차 보정 함수를 설정하기 위한 데이

터 측정과 2-D 선형 보정 함수를 제안하였다. IV 장에서는 제안된 보정법과 기존의 보정법과의 상대오차의 변화를 통한 보정법의 성능을 비교평가한다. 마지막으로 V 장에서는 결론을 맺도록 한다.

II. 레인지 파인더의 특성과 오차 분석

1. 레인지 파인더의 다양한 오차 발생 원인

다른 모든 센서와 마찬가지로, 레인지 파인더 또한 측정 거리에 오차가 필연적으로 존재한다. 왜냐하면 센서는 측정하려는 물리량을 이에 상응하는 다른 물리량으로 검출하며, 센서 신호처리에서는 물리량의 신호 변환(signal conditioning), 증폭, 디지털 변환 등의 여러 과정을 통하여 측정 물리량에 비례하는 데이터를 얻기 때문에, 이 과정에서 오차가 추가되게 된다. 레인지 파인더는 구현한 기술에 의하여 여러가지로 나눌 수 있지만, 구조적으로 기존 1차원 레이저 거리 센서에 회전 성분을 첨가하여 특정 각도에서의 거리 정보를 얻을 수 있도록 만든 것이다[4]. 다만, 높은 회전 속도를 보장하기 위해서 빠른 속도로 거리를 측정해야 한다는 제한 조건이 있으며, 이것이 단가를 높게 된다.

LRF의 오차에 대한 보정 대책은 해당 레인지 파인더의 분석 및 실험을 통하여 가장 오차를 크게 유발하는 원인들을 주로 보정하는 방법으로 진행함이 타당하다. 레인지 파인더의 동작원리에 따라 오차 발생 원인을 분석하여 보면 레이저 빔에 의해 발생할 수 있는 빔 스폿의 크기 변화, 물체들에 의한 간섭, 물체 표면의 종류, 물체와 빔 스폿의 입사각 발생으로 인한 신호 강도 변화, 센서의 동작 온도, 날씨, 등과 같은 주변환경에 따른 오차 발생 가능성이 있다[4]. 앞서 말한 오차들 중 환경적 요인에 따른 오차는 보정 가능한 요인들이 아니다. 왜냐하면, 레인지 파인더가 어느 환경에 놓일지 센서가 스스로 알 수가 없고 어떠한 종류의 물체를 측정하는지도 알 수 없기 때문에 이러한 오차들은 보정할 수 없다. 따라서, 레인지 파인더의 오차 보정법은 레인지 파인더 자체만을 사용해서 가장 오차를 크게 유발하는 원인들을 보정하는 방법으로 진행해야 한다. 2-D 레인지 파인더는 거리 측정 센서이므로 물체와의 거리가 곧 입력이고 오차 변화 요인이 된다. 다만, 2-D 레인지 파인더인 경우 특정 방향각에 대한 물체와의 거리가 되므로 2차원 출력 정보가 되어 출력 정보인 거리가 방향각에 의해서도 변화될 수 있다는 점을 고려해야만 한다. 이상적인 레인지 파인더인 경우 동일한 거리에 있는 동일한 물체에 대해서 회전 성분과 상관없이 동일한 거리가 나와야 한다. 그러나 현실적으로 회전이 추가되므로 인해 여러 가지 방향각에 의한 오차가 추가되게 된다. 따라서, 레인지 파인더의 오차 특성은 방향각에 따른 변화도 고려한 분석을 해야만 한다.

2. 적외선 레인지 파인더 PBS-03JN의 특성

Hokuyo사의 적외선 레인지 파인더인 PBS-03JN은 SICK사의 LMS200과 달리 소형, 경량의 경제적인 센서로 이동 로봇에 적극적인 사용이 가능하다. PBS-03JN의 기본적인 사양은 LMS와 비교하면 표 1과 그림 2와 같다[20]. 그림 2는 두 센서의 측정 가능 영역을 나타내는데 PBS-03JN은 측정 보장영역이 측정 가능영역과 다르다는 것을 나타내고 있다.

그림 1. PBS-03JN와 LMS200.

Fig. 1. Hokuyo PBS-03JN & SICK LMS200.

표 1. PBS-03JN과 LMS200 비교.

Table 1. Comparison of PBS-03JN & LMS200.

Model	PBS-03JN	LMS 200
Power	24 V DC	24 V DC
Weight	500 g	4.5 kg
Size	75×70×60mm	155×156×185mm
Angle Resolution	1.8°	0.25°/0.5°/1°
Dist. Resolution	1 mm	1 mm
Angle	217.8°(178.2° usable)	180°(mm-mode)
Distance	0.2 m ~ 3 m	Max 8 m
Price	\$1100	\$6500

그림 2. PBS-03JN과 LMS200의 측정범위.

Fig. 2. Scan Range of PBS-03JN & LMS200.

그림 3. 역제곱법칙과 빔 확산

Fig. 3. Inverse square law & Spread of beam.

기본적으로 PBS-03JN은 적외선 빔을 물체로 방출하여 되돌아 오는(반사된) 빔을 감지하여 물체와의 거리를 측정하게 된다. 거리를 측정하는 방법에는 단순히 총 왕복 시간을 이용하거나 주파수 대역에서 간섭효과를 이용하는 등의 여러 가지가 존재한다. 방식이 무엇이 되던간에 되돌아 오는 빔의 강도에 따라 측정 거리 값이 달라지게 된다.

이러한 관점에서 측정해야 할 거리가 멀 수록 반사된 빔의 강도는 떨어지게 될 것이다. 이는 물리학에서 많이 알려진 역제곱 법칙(inverse square law)을 따르기 때문이다[21]. PBS-03JN은 이 현상을 그림 3을 이용하여 센서 스펙에서 정확히 언급해 놓고 있다[20]. 센서 제조사들은 이러한 현상을 알고 있어서 센서에 자체적인 증폭 장치를 가지고 있도록해서 이를 방지한다. 신호의 증폭 장치를 통해 역제곱 법칙에 따른 오차가 많이 줄어들긴 했지만, 문제는 증폭으로 인해 부가적으로 발생하는 오차가 있다. 즉, 수신된 신호를 어느 정도로

증폭해야 할 것인지를 결정해야 하는 과정에서 정확하지 못한 증폭도에 의한 오차[6]와 증폭 과정을 통해 원하지 않았던 노이즈도 같이 증폭 되므로 생기는 오차가 그것이다. 노이즈 증폭에 의한 오차는 당연히 불규칙(random) 오차로 그 값을 예측할 수 없고 보정 할 수 있는 요소가 아니다. 그러나, 정확하지 못한 증폭도에 의한 오차는 센서의 내부 회로에 의한 것으로 시스템(systematic) 오차를 발생시키기 때문에 특성만 파악하면 충분히 보정이 가능하다.

이러한 관점에서 PBS-03JN의 거리에 대한 시스템 오차는 보정을 통하여 축소시킬 수 있다. 거리 오차는 센서의 종류에 따라 차이를 보이는 것이고 제조 시 의도한 현상이 아니므로 오차의 성향을 파악하기 쉽지 않다. 하지만, 물체와의 실제(true) 거리를 알고 있는 상황에서 반복적인 측정을 통하여 수 많은 측정 값을 통해 그 값에 통계적으로 근접할 수가 있다. 즉, 반복 측정을 통한 측정 거리와 실제 거리의 차를 평균하게 되면 불규칙 오차는 사라지고 시스템 오차만 남게 된다. 이는 불규칙 오차는 평균을 취하면 결과값이 0이라는 사실(white noise) 때문이다. 따라서, 실제 거리를 적당히 변화시키며 반복 측정 실험으로 시스템 오차를 구하게 되면 거리에 따른 시스템 오차의 성향을 파악 할 수 있다.

일반적으로 레인지 파인더는 방향각에 따른 오차가 없을 것이라고 생각하지만 이상적인 센서가 아니므로 회전 성분을 발생시키는 구조에 의해 오차가 생길 수 있다. 회전 성분을 발생시키는 부분은 대부분 기계적으로 모터와 반사 거울 등을, 전기적으로는 모터, 모터 구동 회로 등이다[20,22,23]. 회전 성분은 이러한 기계적, 전기적인 요소로 발생하므로 각 요소의 다양한 오차가 결국에는 방향각에 의한 오차로 이어진다. 그림 2에서 PBS-03JN의 측정 보장영역을 보면 좌우 방향의 유효 검출 거리가 앞 방향에 비해 매우 짧은 것을 알 수 있다. 이는 좌우 방향에서의 오차가 상대적으로 크다는 것을 의미하고 PBS-03JN은 방향각에 따라 오차가 달라진다는 것을 의미한다. 실제 실험에서도 좌우 방향의 거리 오차는 전방에 비해 매우 큰 것을 확인하였다. 물체까지의 거리가 1m 이내 일때, 좌우 방향의 거리 오차는 10cm 이상, 2m 이상인 경우, 좌우 방향의 거리 오차는 10%이상 나타나고 거리가 멀 수록 더욱 증가하는 현상을 보였다.

이와 같은 이유로 PBS-03JN의 오차는 거리와 방향각 모두 고려하여야만 한다. 특정 방향각에서 실제 거리의 변화에 따른 오차를 구하고 다른 방향각에서도 같은 실험을 반복하면 방향각과 거리에 대한 오차의 특성을 동시에 구할 수 있다. 결국 레인지 파인더의 출력이 거리와 방향각의 데이터인 것처럼 거리와 방향각에 따라 변화는 오차 특성을 얻게 된다.

III. PBS-03JN의 오차 보정

1. PBS-03JN의 오차 보정을 위한 접근법

오차 보정은 그림 4와 같이 off-line, on-line의 두 과정으로 구분된다. 먼저 off-line으로 레인지 파인더의 거리와 방향각에 따른 오차 분포도를 구하고 이 오차 분포도를 적절히 반영할 수 있는 보정 함수를 정한다. 다음으로 on-line으로 레인지 파인더가 측정할 때마다 보정 함수를 통해 오차값을 예측하여 센서 출력값을 보정한다. 그림 4에서 $d(r, \theta)$ 는 스캔대

그림 4. 보정 과정.

Fig. 4. Process of calibration.

이터(r 은 거리, θ 는 방향각), $\tilde{e}$ 는 추정 오차, $d^c(r^c, \theta)$ 는 오차 보정된 스캔데이터, $f(r, \theta)$ 는 오차 보정 함수를 나타낸다.

Off-line 과정은 다음의 네 단계를 포함한다. 1단계로 측정 거리와 방향각의 범위를 정하여 적절한 2차원 격자를 선정한다. 2단계로 각 격자점에서 측정 실험을 진행한다. 3단계로 각 격자점에서 측정값의 평균 및 표준편차를 구한다. 마지막 4단계에서는 보정 함수를 결정하고 그 계수 설정을 한다.

On-line 과정은 다음의 네 단계를 포함한다. 1단계로 스캔 데이터를 방향각 성분을 포함해서 저장한다. 2단계로 스캔데이터가 **off-line**에서 선정한 2차원 격자중 어디에 속하는지 결정한다. 3단계로 **off-line**에서 결정된 격자의 보정 함수를 이용하여 오차를 추정한다. 4단계로 추정된 오차를 스캔데이터 측정 거리와 합산하여 최종 보정된 스캔데이터를 얻는다.

2. PBS-03JN의 오차 보정을 위한 Off-line 과정

측정 물체의 재질이나 표면 색깔에 따라 측정 오차가 표 2처럼 달라지기 때문에 오차 특성 분석을 위한 적절한 실험 환경 설정이 필요하다[14].

본 논문이 지향하는 목표는 향상된 위치 추정을 위한 보정 이므로 이동 로봇이 확률적으로 가장 많이 만나게 되는 물체

표 2. 측정물체의 표면에 따른 오차 변화.

Table 2. Error change by surface of object.

	1231mm			1721mm			2231mm		
	Mean	StDev.	% Error	Mean	StDev.	% Error	Mean	StDev.	% Error
Blue	1347.7	11.70	9.49	1745.3	18.22	1.41	2255	34.35	1.08
Red	1354.2	10.85	10.01	1755.9	17.43	2.03	2236	34.19	0.23
Yellow	1346.8	10.14	9.41	1745.3	18.13	1.42	2244.3	33.22	0.60
White	1319.7	11.72	7.21	1756.5	18.42	2.06	2261.8	37.67	1.38
Black	1285.1	15.20	4.39	1739.9	26.72	1.10	2286.8	54.31	2.51
127 RGB	1324.2	11.52	7.57	1742.4	18.68	1.24	2232.1	35.59	0.05
Blue Velvet	1305.5	14.05	6.05	1744	21.50	1.34	2292	46.36	2.73
Red Velvet	1312	12.88	6.58	1744.6	20.93	1.38	2289.9	46.79	2.64
White Velvet	1322.6	13.40	7.44	1752.2	21.72	1.82	2281.4	46.11	2.26
Black Velvet	61608	18.27	4904.7	61610.8	17.48	3479.9	61618	14.86	2661.9
Gold	1446.3	79.70	17.49	1883.6	12.41	9.44	2544.1	1873.94	14.04
Silver	1996	4166.1	62.14	7923.3	12032.5	360.18	2663.6	108.22	19.39
Mirror	1350.3	16.2	-21.53	6424.8	14899.6	273.16	31623	29618.4	1317.4

가 무엇인지를 통해 실험 환경을 설정해야 한다. 본 논문에서는 실내 이동 로봇을 목표로 하는데 실내 사무실 환경은 흰색 페인트칠이 되어진 벽이 대다수이므로 이동 로봇의 주된 측정 물체로 흰색 페인트칠이 되어진 벽으로 설정하였다. 게다가 흰색은 센서의 스펙에 주로 사용되는 대표 색이므로 보정 전과 후의 성능을 비교하기에 적절하다. 거리와 방향각에 따른 오차를 측정해야 하므로 정확한 실제(true) 거리 값과 실제 방향각의 각도 측정이 필요하다. 이를 위해 2가지 장치를 도입하였는데, 실제 거리를 측정하기 위해 Bosch사의 DLE50 [24]과 함께 눈금자를 이용하였다. DLE50은 최대 50m의 거리까지 1.5 mm의 오차 이내로 측정 가능하다. 또한 정확한 방향각 측정을 위해 Newport사의 rotation stage TR80BL [25]를 사용하였다.

총 4단계로 이루어진 **off-line** 과정을 시작하는데 우선 1단계로써 거리와 방향각에 대한 2차원적인 측정 범위 및 구간을 설정해야 한다. 실제 거리와 방향각 각각에 대해 M개와 N개의 일정한 간격으로 나누고 이 $(M+1) \times (N+1)$ 개의 격자점들을 이용해 2차원 격자 오차데이터를 나타내면 그림 5과 같이 $M \times N$ 개의 균일한 구역(region)들이 생성된다. 각 구역은 거리 성분인 i 값과 방향각 성분인 j 값으로 구분한다. 편의상 실제거리를 x 축으로, 실제 방향각을 y 축으로 선정하였다. 그림 5에는 표시가 안 되어 있지만, z 축은 오차 값이 된다.

PBS-03JN의 오차 특성 분석을 위해 적절한 거리 구간의 갯수 M과 방향각 구간의 갯수 N을 결정하여야 한다. 일반적으로 실제 거리의 간격이나 방향각 간격 등의 크기 결정은 보정 설계자가 하는 것으로 오차의 변화 추이를 적절히 반영할 만한 정도로 선정해야 한다. 거리와 방향각의 구간 갯수를 증가시키면 오차 보정의 성능은 더욱 좋아질 것이지만 그에 따른 실험양도 증가하고 오차 보정 함수의 정보를 저장하는 메모리 양도 증가하게 된다. 이에 따라 적절한 타협점이 필요한데 거리와 방향각 구간의 갯수가 모두 정수가 되도록 하고 거리와 방향각 구간의 크기 또한 정수가 되어야 한다. 이에 따라, 실제 거리의 구간은 20 cm ~ 400 cm까지 20 cm씩 구분하여 $M=20$ 이 되도록 잡았다. 또, 전체 방향각의 범위는 이동 로봇에 가장 많이 쓰이는 SICK사의 LMS200과 되도록 비슷하게 되도록 $-1^\circ \sim 179^\circ$ 까지 설정하고 방향각의 구간은 9°

그림 5. 균등한 격자 데이터.

Fig. 5. Regular grid data set.

그림 6. 오차특성 분석을 위한 데이터 수집.
Fig. 6. Data collection for error characteristic.

씩 구분하여 $N=21$ 이 되도록 설정하였다.

2단계로 오차 특성을 측정하기 위한 실험을 각 격자점에서 여러 번씩 측정한다. 그림 6과 같이 PBS-03JN을 TR80BL 위에 고정시키고 벽과의 수직 평행이 이루도록 막대 프레임 위에 위치시켰다. 각 실제 거리를 DLE50으로 먼저 측정하여 설정한 측정 거리 범위 구간에 PBS03JN을 위치 시키고 TR80BL을 회전시켜 설정한 측정 방향각 구간에 대해 PBS-03JN으로 반복 측정 실험하였다. 각 구간 위치마다 약 총500 회의 측정을 수행하여 데이터를 수집하였다.

오차는 다음과 같이 기술될 수 있다. 오차 보정을 적용해야 하는 데이터는 이동 로봇의 스캔 데이터이고 이는 스캔 데이터 거리(r)와 스캔데이터 방향각(θ)으로 구성된다. 실제 거리는 거리 성분인 i 로만 구분되고 측정 거리는 측정 방향각에 따라서도 변화하므로 거리 성분 i 와 방향각 성분 j 로 구분한다. 그러므로 실제 거리(s_i)와 측정 거리의 평균값($r_{i,j}$)에 따라 측정 오차 $e_{i,j}$ 는 식 (1)처럼 된다.

$$e_{i,j} = s_i - r_{i,j} \quad (1)$$

3단계에서는 2단계의 실험을 통해 얻은 데이터의 오차를 평균한 값과 측정 거리의 표준편차를 구하는 단계로써, 그 결과는 그림 7, 그림 8과 같다.

그림 7은 실제 거리를 기준으로 측정 거리에 대한 오차 값의 변화를 방향각 별로 나타낸 것이고 그림 8은 실제 거리를 기준으로 측정 거리의 표준편차 값의 변화를 방향각 별로 나타낸 것이다.

표준편차는 실제 거리가 멀어질 수록 커지는 형태를 보이는데, 이는 실제 거리가 멀어질 수록 신호의 강도가 낮아지고 그로인해 증폭도가 높아져야 하는 일련의 과정으로 노이즈도 같이 증가되어 표준편차가 커지는 것으로 볼 수 있다. 그러나 그림 7의 평균 오차를 살펴보면 방향각에 따라 일정한 규칙을 찾기 어렵고 오히려 불규칙한 형태만 보이고 있다. 게다가 실제 거리에 따라 달라지는 증폭율로 인해 약간의 주기함수 형태가 나올 것이라 예상했으나 예상과 달리 불규칙한 형태를 보이고 있다. 그림 7을 통해서도 확인 할 수 있다 시피 PBS-03JN의 오차는 방향각에 대해서 일정하지 않고 변화한다는 것을 알 수 있다. 즉, 예상한 것과 같이 오차는 방향각에도 의존하여 그 추이가 변한다. 그러나 문제는 그 변화가 일정하지 않다는 것이다. 오차 특성이 거리와 방향각에 의존하여 변화하는 것은 확인했지만 그 값을 보정해야 하는데 변화가 일정하지 않아서 오차의 변화를 반영하는 하나의

그림 7. PBS-03JN의 오차.

Fig. 7. Error of PBS-03JN.

그림 8. PBS-03JN의 표준편차.

Fig. 8. Standard Deviation of PBS-03JN.

보정 함수를 선정하기가 쉽지 않다.

이제 off-line과정 중 마지막인 4단계이다. 보정 함수는 방향각도 입력으로 사용해야 하므로 2차원 고차 다항 함수를 적용해 볼 수도 있으나, 레인지 파인더의 오차 특성은 이상적이지 않으니 방향각에 따라 오차 변화 추이가 변한다는 것이 아니라, 즉, 2차원 보정 함수가 필요하지만 오차 특성이 방향각에 서로 독립적(independent)인 특성을 반영할 수 있어야 한다. 이러한 점에서 2차원 격자 오차데이터를 반영하도록 여러 개의 함수를 사용하는 것이 더 효율적일 것이다. 사용하는 함수의 형태에 따라 성능이 차이가 있으나 최소한의 계산량과 최대한의 보정 성능을 확보해야 적절한 보정법이라고 할 수 있다. 결국 1차 함수, 즉 선형함수를 2차로 확장하는 것이 가장 간단하면서도 성능이 좋은 보정 함수가 될 것이다. 다만, 불규칙적으로 변하는 특성을 반영하기 위해 2차원 구분적(piecewise) 선형 함수를 적용할 것이다. 구분적이 된 이유는 1단계에서 설정된 구간에 따라 나뉘어진 구역별로 독립적으로 2차원 선형 함수를 적용하기 때문이다.

그림 9. 오차추정을 위한 4개의 선형함수.

Fig. 9. 4 Piecewise linear functions for error estimation.

그림 10. 경계오차와 후보오차.

Fig. 10. Boundary and candidate error.

2차원 구분적 선형 함수의 예로 그림 9처럼 각 구역에는 4개의 격자점이 존재하고 사용하는 선형함수들은 굵은 검은색 실선과 점선, 얇은 검은색 실선과 점선으로 표시되었다. 최종 추정 오차는 사각점으로 표시되어 있다. 최종 오차를 구하기 위한 접근 방법은 우선 입력 성분이 무엇이나에 따라 거리 입력 우선과 방향각 입력 우선 각각 2개씩으로 나뉘게 된다. 그러나, 각 입력 방법에 따라 최종결과와는 달라지지 않고 계산량도 차이가 없기 때문에 어떤 방식을 사용해도 상관없는데 본 논문에서는 방향각 입력 우선으로 선정하였다. 그 이유는 구역 판별에 관련이 있는데 on-line 과정 2단계인 스캔데이터가 속한 구역을 판별할 때 측정 방향각에 대한 판별을 먼저하고 측정 거리에 대한 판별을 나중에 하기 때문에 구역의 측정 거리 경계 값을 계산하게 된다. 이 값을 최종 오차 계산시 활용하면 계산량이 줄기 때문에 방향각 입력 우선으로 선정하였다.

보정 함수가 결정되었으므로 on-line 과정의 계산량을 줄이기 위해 미리 계산이 가능한 변수들을 선정하여 off-line에서 미리 구해 놓아야 한다. 이는 보정 함수를 계산할 때 스캔데이터 각각에 적용해야 하므로 on-line 과정의 계산량이 많기 때문이다. 먼저, 구역 판별시 사용된 구역의 측정 거리 경계 값은 식 (5)를 통해 on-line 과정에서 반복적으로 사용하므로 이를 미리 계산해 놓으면 계산 부하를 줄일 수 있다. 식 (5)의 입력 변수인 θ 는 on-line 과정에서만 알 수 있는 값이지만, PBS-03JN 방향각의 해상도(resolution, $\Delta\phi$)은 연속(continuous)이 아니라 불연속(discrete)이다. 또, 설정한 방향각 구간 크기($\Delta\theta$)는 일정하기 때문에 하나의 방향각 구간에는 동일한

$L(=\Delta\theta/\Delta\phi)$ 개의 스캔데이터 방향각이 존재하므로 모든 스캔데이터 방향각의 값은 미리 알 수 있다. 따라서, 모든 구역의 측정 거리 경계값($\hat{r}_{i,j}$)은 off-line으로 미리 구해 놓을 수 있다. 동일한 방법으로, 구역의 측정 거리 경계 후보 오차($\hat{e}_{i,j}$)도 미리 계산해 놓을 수 있다. 이를 나타낸 것이 그림 10이다. 이렇게 구한 모든 구역에서, 모든 방향각의 측정 거리 경계값과 측정 거리 경계 후보 오차를 통해 식 (7) 선형함수의 기울기 변수($\alpha_{i,j}$)도 또한 미리 계산할 수 있다. 이렇게 off-line에서 미리 계산해 놓을 파라미터들이 많아지지만 이를 위한 저장공간은 수 킬로바이트면 해결된다.

3. PBS-03JN의 오차 보정을 위한 On-line 과정

오차 보정의 on-line 과정의 1단계는 PBS-03JN로 스캔데이터를 얻는 과정이다. 다만, 모든 스캔데이터에 대해 거리와 방향각 성분을 같이 저장한다. 2단계로 각 거리 및 방향각으로 보정 구역을 판별해야 한다. 그러나 보정 구역을 판별하는 과정이 단순하지가 않는데 그 이유는 2차원 보정 함수의 입력 데이터 때문이다. 2차원 보정 함수의 입력 데이터는 실제거리(s_j)가 아닌 측정거리와 측정 방향각이 되어야 한다. 왜냐하면 거리 입력값은 실제 거리가 될 수 없는 것이 센서의 입장에서 실제 거리를 모르기 때문이다. PBS-03JN의 2차원 격자 오차데이터를 측정 거리와 방향각의 두 축으로 설정하면, 그림 5처럼 되지 않고 불규칙한 형태를 띄게 된다.

불규칙한 형태가 되는 이유는 일정한 간격의 실제 거리는 정비례 형태로 일정하게 증가하지만 측정 거리는 불규칙하게 증가하므로 구역의 모양이 틀어지게 되는 것이다. 또 실제 방향각과 측정 방향각의 오차는 거의 없어서 동일하다. 따라서, 그림 5가 아니라 그림 11처럼 j성분은 등간격이고 i성분은 불규칙한 간격 형태가 된다.

따라서 보정 구역 판별은 먼저 방향각 구간 판별 후 거리 구간 판별하는 단계로 진행한다. 규칙적인 방향각 구간 덕분에 방향각 구간의 판별 결과인 j값은 식 (2)로 얻는다.

$$j = \left\lceil \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right\rceil \quad (2)$$

여기서, θ : 측정 방향각, θ_0 : 실제 방향각 시작값, $\Delta\theta = \theta_j - \theta_{j-1}$, $j = 1, \dots, N$

그림 11. 비균등 격자 데이터.

Fig. 11. Irregular grid data set.

그림 12. 구역들의 비균등 거리.

Fig. 12. Irregular distance of regions.

거리 구간을 판별은 그림 11의 인접한 구역을 확대한 그림 12를 참고로 진행한다. 스캔데이터의 거리를 실제 거리 간격 크기로 나누는 식 (3)을 사용하면 i' 을 얻게 되는데, 이 값은 스캔데이터가 속한 구역에 인접한 구역의 i 성분을 나타내게 된다.

$$i' = \left\lceil \frac{r - s_0}{\Delta s} \right\rceil \quad (3)$$

여기서, r : 스캔데이터 거리, s_0 : 실제 거리 시작값, $\Delta s = s_i - s_{i-1}$, $i = 1 \sim M, j = 1 \sim N$

정확히 원하는 구역의 i 성분이 아니므로 경계값과의 비교를 통해 i 값을 보정해야 한다. 여기에, 경계값은 구역의 측정 거리 경계(boundary)값인 $\hat{r}_{i-1,j}$ 과 $\hat{r}_{i,j}$ 을 지칭한다. 이 후 식 (4)를 통해 최종 i 성분을 보정하여 얻는다.

$$\begin{aligned} & \text{if}(r > \hat{r}_{i,j}) \\ & \quad \text{Find the minimum } i' \text{ s.t. } r > \hat{r}_{i',j} \\ & \text{elseif}(r < \hat{r}_{i-1,j}) \\ & \quad \text{Find the maximum } i' \text{ s.t. } r < \hat{r}_{i'-1,j} \\ & \text{end} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\hat{r}_{i-1,j}, \hat{r}_{i,j}$ 는 (i', j) 번째 구역의 측정 거리 경계값이고 식 (5)를 이용해 구할 수 있다.

$$\hat{r}_{i,j} = \lambda_{i,j}(\theta - \theta_{j-1}) + r_{i,j-1} \quad (5)$$

$\lambda_{i,j}$ 는 측정 방향각과 측정 거리에서 각 구역의 경계선을 나타내는 1차함수의 기울기 계수이다.

대부분의 오차는 실제 거리 구간 간격 크기에 비해 작아 i' 값은 정확한 구역의 i 값의 이웃한 값이므로 식 (4)의 i' 의 계산을 위해 while 구문을 한 번만 수행하게 된다. 간혹 오차가 너무 큰 부분에서는 while 구문이 반복수행 되는데, PBS-03JN인 경우 그림 7에서 방향각 179°의 오차 추이처럼 오차가 너무 큰 부분이 존재하는 상황이 그 때이다. 하지만, 최악의 경우 4번의 반복 수행이 일어나므로 계산 부하는 높지 않다. 게다가 off-line에서 모든 측정 거리 경계값을 구해 놓았으므로 식 (5)는 계산 부하에 포함되지 않는다. 이와 같은 불규칙한 2차원 격자 오차데이터에서 구역을 선정하는 일련의 과정을 나타내면 알고리즘 1과 같다. 구역이 선정되었으므로 3단계인 최종 오차를 찾아내는 과정이 필요하다. 방향각 입력 우선으로 오차 추정 과정은 다음과 같다. 먼저 판별된 구역에서 방향각 입력 선형함수로 측정 거리 경계 후보 오차를 구한 후, 거리 입력 선형함수로 최종 오차를 식 (6)으로 구한다.

$$\tilde{e} = \alpha_{i,j}(r - \hat{r}_{i-1}) + \hat{e}_{i-1} \quad (6)$$

여기서 $\alpha_{i,j}$ 는 최종 오차 선형함수의 기울기 계수, $\hat{r}_i$ 는 구역의 측정 거리 경계 값, $\hat{e}_{i,j}$ 는 후보 오차.

알고리즘 1. 구역판별법.

Algorithm 1. Region selection method.

1. 측정 방향각 구역 j 값 선정(식 (2) 사용)
2. 구역의 임시 i' 값 선정(식 (3) 사용)
3. 구역의 i 성분 값 보정(식 (4) 사용)

모든 후보 오차는 off-line에서 구해 놓았으므로 on-line에서는 측정 거리와 방향각에 맞는 후보 오차를 선택하면 된다. 거리 입력 선형함수를 구하기 위해선 구역의 측정 거리 경계 값이 필요한데 구역 판별에서 선택해 놓은 값을 그대로 사용할 수 있어서 추가적인 계산과정이 없다. 3단계까지의 과정을 통해 구해진 오차 추정값을 스캔데이터에 합산하게 되면 최종 보정된 스캔데이터를 얻게 된다. 이를 나타내면 식 (7)과 같고 이 식이 2차원 선형 오차 보정 함수를 사용한 오차 보정 최종 식이 된다.

$$d^C(r^C, \theta) = d(r, \theta) + \tilde{e}(r, \theta) \quad (7)$$

여기서 $d^C(r^C, \theta)$ 는 보정된 스캔데이터, $d(r, \theta)$ 는 스캔데이터, $\tilde{e}(r, \theta)$ 는 스캔 데이터의 예측 오차

따라서 모든 on-line 과정을 하나의 알고리즘으로 정리하면 아래 알고리즘 2와 같다.

알고리즘 2. 오차 보정 온라인 알고리즘.

Algorithm 2. On-line algorithm for error calibration.

- 입력: r (스캔데이터 거리), θ (스캔데이터 방향각)
 Off-line에서 파라미터: $\hat{r}_{i,j}$ (구역의 측정 거리 경계값), $\hat{e}_{i,j}$ (구역의 측정 거리 경계에서 후보 오차), $\alpha_{i,j}$ (구역의 거리 입력 함수의 기울기 계수), s_0 (실제 거리 시작값), Δs (실제 거리 간격), θ_0 (방향각 시작값), $\Delta \theta$ (방향각 간격)
1. 구역 판별
 - 1-1. 방향각 구간 판별(식 (2))
 - 1-2. 거리 구간 판별(식 (3)-(4))
 2. 구역의 측정 거리 경계 오차($\hat{e}_{i,j}$) 선택
 3. 최종 오차값 $\tilde{e}$ 계산(식 (6))
 4. 오차 보정 (식 (7))

그림 13. 선형 보정함수.

Fig. 13. Piecewise linear calibration function.

PBS-03JN의 2차원 오차 격자데이터와 보정 함수 계수 설정 알고리즘을 적용하여 구한 2차원 선형 오차 보정 함수와 오차 값을 등고선과 함께 나타내면 그림 13의 왼쪽과 같고 평면도(top view)로 살펴보면 그림 13의 오른쪽과 같이 불규칙한 구역이 생김을 확인할 수 있다. 그림 13 왼쪽에서 x축과 y축은 각각 측정 거리와 측정 방향각을 나타내고 z축은 오차를 나타낸다.

IV. 성능평가

제안한 2차원 오차 보정법의 성능을 다른 오차 보정법과 비교하기 위한 데이터가 필요하다. 2차원 격자 오차데이터에 사용한 실험데이터는 오차 보정 함수를 결정한 데이터이기 때문에 보정 성능 평가에 사용하면 안된다. 또, 레인지 파인더를 위한 오차 보정법의 목적은 이동 로봇의 위치 추정에 정확도를 높이기 위한 일종의 선행 과정(pre-process)이다. 따라서, 실제 이동 로봇에 장착된 PBS-03JN으로부터 취득한 데이터가 필요한 것이다. 실험을 다음과 같은 환경에서 수행하였다. Mobile Robots사의 Pioneer 3-DX를 사용하였다. 그림 14 처럼 SICK사의 LMS200을 위한 고정 프레임을 이용하여 LMS200을 고정한 뒤 그 위에 PBS-03JN을 고정하였다. P3-DX의 이동 자취는 그림 14에 나온 것처럼 복도를 포함한 한 개의 방을 한바퀴 회전하는 것으로 선정하였다. 다만, 이동 로봇이 주행함으로써 생기는 부수적인 오차 요인으로 인해 순수한 보정에 대한 성능 비교가 불가능하기 때문에 각 특정 위치에서 이동 로봇을 정지시키고 약 1000회의 데이터 수집을 수행하였다. 각 위치에서의 로봇의 정확한 실제 위치는 DLE50을 이용하여 각 벽과의 거리를 측정하여 획득하였다. 그러나, 모든 데이터를 사용하지 않고 벽과의 입사각이 0이 되는 측정 방향각의 스캔 데이터만을 골라 보정법을 적용하였다. 이는 이동 로봇이 주행하면서 벽을 스캔하게 되면 이동 로봇의 방향각으로 인해 벽과의 입사각이 발생하게 되어 오차 증가 요인이 되고 또, 2차원 격자 오차데이터를 분석할 때도 입사각을 0으로 설정하였기 때문이다. 총 12개의 위치에서 입사각이 0이 되는 방향각 중 유효한 측정이 나온 지점은 총 19개이다.

제안한 2차원 구분적 선형 오차 함수와 성능을 비교하기 위해서 비교 대상을 선정하면 다음과 같다.

1. 보정 전(raw) 데이터
2. 측정 거리만을 오차 보정의 입력으로 사용하고 1차 함수를 적용[12,17]

그림 14. P3-DX와 실험 경로.

Fig. 14. P3-DX and path of P3-DX.

3. 측정 거리만을 오차 보정의 입력으로 사용하고 6차 함수를 적용[10]
4. 측정 거리와 측정 방향각 각각에 2차원 6차 연속(continuous) 함수를 적용
5. 8개의 측정 방향각에서 측정 거리 cubic spline 함수를 적용하여 가중치를 활용한 오차 보정법[11]
6. 제안된 측정 거리와 측정 방향각에 대한 2차원 구분적 선형 함수를 적용

두 번째 보정법은 Borges의 논문[10]에 있는 방법으로 성능에 대한 자세한 언급이 없지만, 레인지 파인더를 활용한 위치 추정 알고리즘에 적용한 방법이므로 비교 대상으로 선정하였다. 또한, 2차원 보정법이 적용된 논문이 없어서 본 논문에서 제안한 2차원 선형 함수와 비교해 함수의 복잡도가 높은 2차원 6차 연속 함수를 비교 대상으로 선정하였다. Cost 함수를 설정하거나 신경망 구조를 사용하는 방법은 파라미터값에 따라 보정 성능이 달라지므로 객관적인 비교가 어려워 제외시켰다. 보정 전과 6개의 보정법을 사용한 보정 후의 측정 횟수에 대한 평균 상대오차와 최대 상대오차를 그림 15, 16와 같이 나타낼 수 있다. 상대오차는 식 (8)과 같고 각 위치에서 측정 횟수에 대한 평균 상대오차는 식 (9)와 같다.

$$\eta = \frac{|d_c - d_l|}{d_l} \times 100\% \quad (8)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (9)$$

여기서, d_c :보정 전/후 거리, d_l :실제거리, N :측정횟수

그림 15에서 보다시피 대부분의 위치에서 보정 전 데이터의 측정 횟수에 대한 평균 상대오차는 보정 후에 비해 상대적으로 크다는 것을 통해 모든 보정법이 오차를 감소시킴을 알 수 있다. 하지만, 제안한 방법이 다른 보정법에 비해 거의 모든 위치에서 가장 좋은 보정 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 16은 각 보정법이 적용된 모든 측정 중에서 최대 상대오차를 나타내는 것으로 제안된 방법은 다른 보정법과 비

그림 15. 평균 상대 오차.

Fig. 15. Average relative error.

그림 16. 최대 상대 오차.

Fig. 16. Maximum relative error.

표 3. 모든 위치에서 상대오차의 평균.

Table 3. Average of relative error at all positions.

Method	Raw	1 st poly	6 th poly	2d poly	2 cubic	proposed
	5.07%	3.7%	3.5%	4.54%	2.79%	2.17%

표 4. 보정 함수 식.

Table 4. Function equations of calibration.

보정법	보정함수 수식
1st poly	$f(r) = ar + b$
6th poly	$f(r) = a_0 r^6 + a_1 r^5 + \dots + a_5 r + a_6$
2d poly	$f(r, \theta) = a_0 r^6 \theta^6 + a_1 r^6 \theta^5 + \dots + a_7 r^5 \theta^6 + \dots + a_{47} \theta + a_{48}$
2 cubic	$f(r) = w_1 g_i(r) + w_2 g_{i+1}(r)$ g_i : cubic spline, $w_1 + w_2 = 1$, $i = 1 \sim 7$
proposed	$f(r, \theta) = \frac{h_{i+1,j}(\theta) - h_{i,j}(\theta)}{\bar{r}_{i+1,j} - \bar{r}_{i,j}} (r - \bar{r}_{i,j}) + h_{i,j}(\theta)$ $h_{i,j}(\theta) = a_{i,j} \theta + b_{i,j}$, $i = 1 \sim 20$, $j = 1 \sim 21$

숫하거나 가장 작은 최대 상대오차를 가짐을 나타낸다. 이는 제안된 방법이 다른 보정법들 보다 안정한(robust) 방법임을 나타낸다. 그림 15의 3번째 위치에서 평균 상대오차는 2%에 머무르는데 비해 최대 상대오차는 40%에 가깝게 나오는데 이는 측정 중에 알 수 없는 외란(disturbance)으로 오차가 급격히 상승한 하나의 데이터로 인한 것으로 더 이상은 나타나지 않았다.

각 보정 방법의 오차 성능을 하나의 표로 나타내 비교하기 위해 각 위치에서 측정 횟수에 대한 평균 상대오차를 모두 평균해 비교하면 표 3과 같다. 또한, 각 보정법에서 사용하는 보정 함수의 수식을 정리하면 표 4와 같다.

표 3과 표 4를 바탕으로 각 보정법의 성능에 대해 살펴보면, 측정 거리만을 보정법 입력으로 사용한 경우인 1차 함수와 6차 함수는 측정 방향각에 의한 부분이 빠져 있어서 보정 성능이 낮을 수 밖에 없다. 이는 측정 방향각에 따라 달라지는 오차 특성이 반영이 되지 않기 때문이다. 일반적으로 보정 함수의 복잡도가 높아지면 보정 성능도 같이 좋아진다. 하지만, 2차원 6차 함수가 가장 높은 복잡도를 가지지만 보정

그림 17. 측정 범위의 확장.

Fig. 17. Expansion of detection range.

성능은 좋지 못하다. 이는 측정 방향각에 의한 오차 요인들이 서로 연관(dependent)되도록 해서 불필요한 보정이 첨가되어 오히려 낮은 보정 성능을 보인 것이다. 가중치를 이용한 이중 cubic spline의 경우 보정 성능이 앞선 방법들에 비해 좋지만 적은 숫자의 cubic spline을 이용하여 방향각에 대한 정보가 부족하여 본 논문에서 제안한 방법보다는 낮은 성능을 보이고 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 수식은 단순히 1차 함수의 2차원 확장이지만 방향각에 대한 고려가 추가되어 있어서 다른 보정법이 놓치는 방향각에 의한 영향을 반영하고 있다. 따라서, 다른 보정법에 비해 계산량은 크지 않고 보정 전에 비하면 PBS-03JN의 정확도 성능을 두 배에 가까운 정확도 향상을 이루었다는 것을 알 수 있다.

V. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 기존의 오차 보정법과 다른 오차 보정법을 제안하여 약 2배의 성능 향상을 얻었다. 기존오차 보정법이 간과한 측정 방향각에 따른 오차를 추가하면서 동시에 낮은 계산 부하를 가지도록 2차원 구분적(piecewise) 선형 함수를 적용하였다. 보정된 데이터들의 상대오차를 비교 검토하여 제안된 방법이 가장 우수한 성능을 가짐을 보였다. 아울러 그림 17처럼 측정 영역이 스펙트럼에서 제시하는 사각형 영역에서 더욱 증가한 반원 영역으로 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 PBS-03JN의 스펙에서 제시하는 1m 이상에서 10% 이내 오차보다 2배 이상의 성능을 보증하게 되어 얻어진 결과이다. 또한, 제안한 2차원 오차 보정법은 PBS-03JN뿐만 아니라 모든 레인지 파인더에 적용 할 수 있는 방법이기 때문에 보정하고자 하는 레인지 파인더의 오차데이터 수집만 수행한다면 본 논문의 알고리즘을 수정없이 적용하여 보다 높은 정확도를 갖도록 하는 것이 가능할 것이다.

향후 레인지 파인더의 보정 가능성이 있는 요인들 중 추가적으로 입사각에 의한 오차를 보정할 필요가 있다. 본 논문에서는 입사각을 0°로 설정하였지만 실제 이동로봇에 적용하기 위해선 다양한 입사각에서도 적용이 되는 보정법에 대해 연구해야 한다. 또한 최종 목표인 이동 로봇의 위치 추정 시 2차원 격자 오차데이터를 활용하여 위치 추정 정확도를 효과적으로 증가시키는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] B. K. Kim and Y. G. Song, "Development of a DGPS-based localization and semi-autonomous path following system for electric scooters," *Journal of Control, Robotics and Systems* (in

- Korean*), vol. 17, no. 7, pp. 674-684, July 2011.
- [2] B. K. Kim, Y. H. Kim, and Y. G. Song, "Development of Precise Localization System for Autonomous Mobile Robots using Mobile Ultrasonic Transmitters and Receivers in Indoor Environments," *Journal of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 353-361, Apr. 2011.
 - [3] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe, "Mobile robot positioning sensors and techniques," *Journal of Intelligent Robotics Systems*, vol. 14, pp. 231-249, 1997.
 - [4] M. Hebert and E. Krotkov, "3D measurements from imaging laser radars: how good are they?," *Journal of Image and Vision Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 170-178, 1992.
 - [5] H. J. Sohn and B. K. Kim, "Robust localization algorithm for mobile robots using laser range finder," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 6, pp. 530-542, June 2005.
 - [6] A. Diosi and L. Kleeman, "Uncertainty of line segments extracted from static SICK PLS laser scans," *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2003.
 - [7] K. K. Tan and S. Huang, "Geometrical error compensation of machines with significant random errors," *Transaction of Instrumentation, Systems, and Automation*, pp. 43-53, 2005.
 - [8] X. Li and W. GWee, "Sensor error modeling and compensation for range images captured by a 3D ranging system," *Journal of Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 12, 2008.
 - [9] H. H. Kim, Y. S. Ha, and G. G. Jin, "A study on the environmental map building for a mobile robot using infrared range-finder sensors," *Proc. of Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. 1, pp. 711-716, 2003.
 - [10] G. A. Borges and M. J. Aldon, "Line extraction in 2D range images for mobile robotics," *Journal of Intelligent Robotics Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 267-297, 2004.
 - [11] J. B. Kim and B. K. Kim, "The calibration for error of sensing using SLSFRS (Smooth Least Square Fit with Regional Split)," *Korea Automatic Control Conference*, pp. 735-739, 2009.
 - [12] Y. Cang and J. Borenstein, "Characterization of a 2D laser scanner for mobile robot obstacle negotiation," *Proc. of Robotics and Automation (ICRA)*, vol. 3, pp. 2512-2518, 2002.
 - [13] A. Reina and J. Gonzales, "Characterization of a radial laser scanner for mobile robot navigation," *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. 2, pp. 579-585, 1997.
 - [14] M. Alwan, M. B. Wagner, G. S. Wasson, and P. Sheth, "Characterization of infrared range-finder PBS-03JN for 2-D mapping," *Proc. of Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3936-3941, 2005.
 - [15] K. H. Lee and R. Ehsani, "Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns," *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 60, no. 2, pp. 250-262, 2008.
 - [16] L. Kneip, F. Tache, G. Caprari, and R. Siegwart, "Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range scanner," *Proc. of Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1447-1454, 2009.
 - [17] Yoichi Okubo, Cang Ye and J. Borenstein, "Characterization of the Hokuyo URG-04LX laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation," *Proceedings of SPIE, Unmanned Systems Technology XI*, vol. 7332, no. 1, pp. 733212, 2009.
 - [18] C. S. Park, D. I. Kim, B. J. You, and S. R. Oh, "Characterization of the Hokuyo URG-04LX-F01 2D laser rangefinder," *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 385-390, Italy 2010.
 - [19] N. Muhammad and S. Lacroix, "Calibration of a rotating multi-beam lidar," *Proc. of Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5648-5653, 2010.
 - [20] Measuring Distance Type Obstacle Detection Sensor PBS-03JN Instruction Manual
 - [21] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse-square_law
 - [22] H. Kawata, A. Ohya, S. Yuta, W. Santosh, and T. Mori, "Development of ultra-small lightweight optical range sensor system," *Proc. of Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1078-1083, 2005.
 - [23] LMS200 Technical Description
 - [24] Bosch corp. DLE50 Specification
 - [25] Newport corp. Precision Rotation Stage Description

김진백

2005년 한양대학교 전기·전자공학과 졸업. 2005년 한국과학기술원 전기전자 전공 석사. 2007년~현재 동대학원 전기 전자전공 박사과정 재학중. 관심분야는 이동 로봇, 제어 소프트웨어 구조, 임베디드 제어.

김병국

1975년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1975년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1986년 우진계기(주) 연구실장. 1982년~1984년 University of Michigan 방문연구. 1986년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 관심분야는 실시간 시스템, 로봇틱스, 임베디드 제어.