creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

碩士學位論文

확장 칼만 필터 기반 지능로봇의 옥외용 3차원 위치평가 방법에 관한 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學科

李 佑 碩

2019年 02月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

확장 칼만 필터 기반 지능로봇의 옥외용 3차원 위치평가 방법에 관한 연구

指導敎授　林　鍾　桓

李　佑　碩

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2018年　12月

李佑碩의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ㊞

委　　員 _____ ㊞

委　　員 _____ ㊞

濟州大學校 大學院

2018年 12月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A Study on the 3D Outdoor Localization of an Intelligent Robot based on Extended Kalman Filter

Woo-Seok Lee
(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Mechatronics Engineering

2018. 12.

This thesis has been examined and approved.

Thesis Director, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics Engineering

Thesis Director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics Engineering

Thesis Director, Chul-Ung Kang, Prof. of Mechatronics Engineering

December 2018

Department of Mechatronics Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

LIST OF TABLES ····· iii
LIST OF FIGURES ····· iv
SUMMARY ····· vi

I. 서 론 ····· 1
1. 연구 배경 ····· 1
2. 연구목적 및 범위 ····· 4
II. 확장 칼만 필터 기반 3차원 위치평가 ····· 6
1. 시스템 모델 ····· 6
2. 측정 모델 ····· 9
3. 3차원 위치평가 과정 ····· 10
3.1 위치 예측 단계 ····· 11
3.2 측정값 예측 단계 ····· 12
3.3 유효성 검사 및 업데이트 단계 ····· 16
III. 실험 및 고찰 ····· 18
1. 센서 특성 분석 실험 ····· 18
1.1 DGPS 특성 분석 ····· 19
1.2 경사센서 특성 분석 ····· 21
1.3 디지털 컴퍼스 특성 분석 ····· 23
2. 3차원 위치평가 성능 평가 실험 ····· 25
2.1 실험 방법 ····· 25
2.2 실험 결과 분석 ····· 28
2.3 오차 공분산 분석 ····· 32
2.4 초기 오차 크기에 대한 성능 분석 ····· 36
2.5 관측 주기에 대한 성능 분석 ····· 40
2.6 2차원 및 3차원 위치평가 비교 분석 ····· 44

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

V. 결론 ····· 48
VI. 참고문헌 ····· 50

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF TABLES

Table 1 Specifications of the DGPS ····· 20
Table 2 Specifications of the inclinometer ····· 22
Table 3 Error characteristics of the inclinometer ····· 22
Table 4 Specifications of the digital compass ····· 24
Table 5 Specifications of the high precision DGPS ····· 25
Table 6 Reference positions (unit : m) ····· 26
Table 7 Specifications of the robot ····· 27
Table 8 Characteristics of position error for 3D localization ····· 29
Table 9 Characteristics of the altitude error ····· 31
Table 10 Characteristics of the 2D and 3D localization error ····· 47

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Angular coordinate system ····· 6
Fig. 2 System modeling ····· 8
Fig. 3 Measurement modeling ····· 11
Fig. 4 Photo of the DGPS ····· 20
Fig. 5 Measurement results of the DGPS ····· 20
Fig. 6 Photo of the inclinometer ····· 21
Fig. 7 Measurement results of the inclinometer ····· 22
Fig. 8 Photo of the digital compass ····· 23
Fig. 9 Measurement results of the digital compass ····· 24
Fig. 10 Experimental environment ····· 26
Fig. 11 Photo of the robot and sensors(ⓐ:inclinometer, ⓑ:DGPS, ⓒ:digital compass) ····· 27
Fig. 12 Results of the 3D localization ····· 28
Fig. 13 Position errors of the 3D localization ····· 29
Fig. 14 Results of the altitude estimation ····· 30
Fig. 15 Errors for altitude estimation ····· 31
Fig. 16 Covariance of x direction ····· 33
Fig. 17 Covariance of y direction ····· 34
Fig. 18 Covariance of z direction ····· 34
Fig. 19 Covariance of θ direction ····· 35
Fig. 20 Covariance of ϕ direction ····· 35
Fig. 21 Covariance according to initial error(x direction) ····· 37
Fig. 22 Covariance according to initial error(y direction) ····· 37

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 23 Covariance according to initial error(z direction) ····· 38
Fig. 24 Covariance according to initial error(θ direction) ····· 38
Fig. 25 Covariance according to initial error(ϕ direction) ····· 39
Fig. 26 Covariance according to sampling time(x direction) ····· 41
Fig. 27 Covariance according to sampling time(y direction) ····· 42
Fig. 28 Covariance according to sampling time(z direction) ····· 42
Fig. 29 Covariance according to sampling time(θ direction) ····· 43
Fig. 30 Covariance according to sampling time(ϕ direction) ····· 43
Fig. 31 Experimental environment for 2D and 3D localization ····· 44
Fig. 32 Comparison of the 2D and 3D localization results ····· 46
Fig. 33 Comparison of the 2D and 3D localization error ····· 47
Fig. 34 Effect of slope on 2D and 3D localizations ····· 47

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

As the fourth industrial revolution has become an issue in recent years, there is a growing interest in intelligent robot technologies. The application fields of intelligent robots are diversified into various fields such as robots that work on behalf of human beings in disaster areas or accident sites, autonomous driving cars that do not require drivers. In these applications, the evaluation of robot's precise position is the most important part in order for the robot to accurately perform a given task. Such a position evaluation technique of a robot is called localization.

The localization of the robot varies greatly depending on whether it is an indoor environment or an outdoor environment. In the indoor environment, it is possible to perform precise position evaluation by using an environmental map or various localization sensors. On the other hand, the outdoor localization is very different from the indoor localization because the outdoor environment is difficult to use the environmental map or install the localization sensor. Therefore, it is general to use GPS to evaluate the position of the robot in an outdoor environment. In addition, the localization of the indoor environment is sufficient for evaluating the two-dimensional position because the floor is flat, while the localization in the outdoor environment requires the three-dimensional position evaluation because there is a slope.

Until now, a variety of localization techniques have been developed for 2 dimensional localization, but there has been little research on the 3 dimensional localization. 3D position estimation technology is essential for fields that require 3D position information such as caddy robots for golfers, military robots, and autonomous vehicles. Moreover, if only 2D localization is

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

performed in an environment with inclination, the position error can be further increased by the altitude difference. Thus, in such an inclined environment, 3D localization can be more effective than 2D localization.

This thesis proposes a 3D localization method for an outdoor mobile robot using only non-inertial sensors such as a DGPS, a digital compass and an inclination sensor. This method can evaluate the 3D position including the altitude information which is impossible in the existing 2D localization method. In this method, the 3D position of the robot is predicted using an encoder and an inclination sensor, and the predicted position is fused with the position information obtained from the DGPS and digital compass using extended Kalman filter to evaluate the 3D position of the robot.

Experimental results showed that the proposed method can effectively evaluate the 3D position of the robot in a sloping environment. In addition, this method was found to be more effective than the conventional 2D localization method even in the evaluation of the plane position where altitude information is unnecessary. Also, it was confirmed that the developed method is stable even if the size of initial error and observation period change. Therefore, it is expected that the proposed method can be applied more effectively not only in fields requiring 3D localization but also in fields requiring 2D localization.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

I. 서 론

1. 연구 배경

최근 제 4차 산업혁명이 이슈가 되면서 지능로봇 기술에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 지능로봇 기술은 이미 대중적으로 사용되고 있는 청소 로봇에서부터 최근 활발하게 연구되고 있는 자율주행 자동차까지 다양한 분야에서 응용되고 있는 차세대 첨단기술이다. 그 외에도 지능로봇 기술은 특정 장소에서 안내를 수행하는 안내 로봇이나, 재난지역이나 사고현장에서 인간을 대신하여 작업을 수행하는 로봇, 그리고 병사를 대신하여 군사임무를 수행하는 군사용 로봇 등 매우 다양한 분야에서 그 필요성이 커지고 있다.

이와 같이 다양한 분야에서 로봇이 주어진 임무를 정확하게 수행하기 위해서 로봇 자신의 위치를 정확하게 인식하는 것이 선행되어야 한다[1,2]. 이를 위해서 로봇은 다양한 위치 센서를 사용하여 그 측정값을 통해 자신의 위치를 인식하게 되는데, 아무리 정밀한 센서라도 오차가 개입되므로 위치 오차가 발생하게 된다. 따라서 로봇의 위치 추정을 위해 사용되는 여러 가지 센서들의 오차를 고려하여 가장 최적의 로봇의 위치를 추정할 필요가 있으며 이러한 일련의 과정이 위치평가이다.

위치평가 방식은 주행하는 환경이 실내인지 실외인지에 따라 달라진다. 실내 환경은 일반적으로 벽이나 사물 등으로 인해 구조화된 환경이므로 레이저나 초음파 등의 거리 측정 센서를 이용하여 로봇의 위치를 추정하는 방법이 주로 이용된다. 이러한 방법을 몇 가지 살펴보면 Leonard[3]는 초음파 센서를 이용한 이동로봇의 항법을 연구하였으며, Han[4]은 레이저 거리 센서를 이용한 위치 추정 방법을 연구하였다. 그리고 Buhmann[5]은 초음파 센서뿐만 아니라 카메라를 추가함으로써 박물관에서 안내 기능을 수행하는 로봇을 개발하였으며, Lim[6]은 초음파 센서를 이용한 이동로봇의 그리드 지도 기반 위치평가 방법을 연구하였다. 이와 같이 실내 환경에서는 거리 측정 센서 외에 추가로 카메라의 영상정보나

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

환경지도의 제공을 통해 위치 추정 정밀도를 크게 높일 수 있다. 또 다른 실내용 위치 추정 연구로 Chae[7]는 실내 환경에서 천정에 부착된 인공 랜드마크를 이용하는 이동로봇의 위치 추정 방법을 연구하였으며, Ji[8]는 실내 환경에 여러 개의 카메라를 설치하여 그 영상으로부터 이동로봇의 위치를 검출하는 위치 추정 방법을 연구하였다. 이와 같이 실내 환경은 실외 환경에 비해 공간이 제한적이기 때문에 주변 환경에 랜드마크나 카메라를 설치하여 로봇의 위치를 추정하는 것이 가능하다. 또한 실내 환경은 로봇이 주행하게 될 지면이 평탄하여 주행계의 정보를 이용한 추측항법(Dead-Reckoning)의 오차도 비교적 낮은 편이다.

반면에 실외 환경은 실내 환경과 달리 일반적으로 벽과 같은 거리 측정에 필요한 구조물이 없으므로 레이저나 초음파 등을 이용한 거리 측정 센서의 이용이 어렵다. 또한 실외 환경은 비교적 평탄하지 못한 지면과 도로의 요철, 그리고 돌이나 모래 등으로 인해 추측항법의 오차가 크게 발생한다. 카메라를 이용할 경우 도로의 중앙선이나 경계석 등의 특징 추출하면 이를 토대로 로봇의 위치를 추정하는 것이 가능하지만, 이를 위해서는 영상 내의 특징을 잡아내는 비교적 복잡한 과정이 필요하고 이러한 특징이 없는 환경에서는 위치 추정이 어려우며 주변 조도의 영향을 크게 받기 때문에 단독으로 사용되기는 어렵다. 따라서 이와 같은 요인들로 인해 실외 환경에서는 실내 환경에서와 같은 방법으로는 이동로봇의 위치를 추정하는 것이 어려우므로 실외 환경에서 이동로봇의 위치 추정을 위한 실용적인 연구가 필요하다.

실외 환경에서는 위치정보를 쉽게 획득할 수 있는 GPS(Global Positioning System)를 사용하는 것이 유리하다. 하지만 GPS는 인공위성의 궤도 이탈, 시계 오차, 위성 신호 수신 시 전리층이나 대류층에서의 굴절, 잡음의 간섭, 다중 경로(Multi-Path) 오차 등에 기인한 무작위적 오차가 발생하여 위치 정밀도가 낮은 편이기 때문에 단독으로 사용되지는 않는다. 따라서 다른 센서와의 융합을 통해 이러한 GPS의 낮은 위치 정밀도를 보정해줄 필요가 있으며 주로 이용되는 방식은 INS(Inertial Navigation System)나 엔코더와 같은 관성 센서를 이용한 추측항법의 이동 정보를 융합하는 방법이다[9-15]. 그 예로 Choi[12]는 다수의 GPS 수신기를 사용하여 얻은 위치 정보와 INS를 융합하는 위치 추정 방법을 제안하였으며, 더욱 정밀도를 높이기 위해 다른 센서들을 추가하는 방법들도 연구되었

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

는데, Kang[13]은 INS와 SPR(Single Photo Resection)을 GPS와 융합하였고, Kim[14]은 자이로 센서를 이용하여 얻은 자세 정보와 엔코더의 정보를 이용하여 GPS의 정보를 보정하였다. 그리고 Lim[15]은 저 정밀도 저가의 GPS와 디지털 컴퍼스 및 로봇 바퀴에 부착된 엔코더 정보를 이용한 위치평가 방법을 제안하였으며, 곡선 경로 및 GPS가 수신되지 못하는 곳에서도 위치평가 신뢰성이 보장됨을 보였다. 관성 센서는 지속적인 오차 누적 문제가 있으므로[16,17] 카메라의 영상 이미지나 레이저 스캐너를 GPS와 융합하여 위치를 추정하는 연구도 수행되었다[18-22]. 그 예로 Ji[22]는 카메라의 영상에서 추출된 차선 정보를 환경지도의 차선 정보와 정합하고 이를 이용하여 GPS의 정보를 보정하였다.

그러나 기존의 2차원 위치평가 방법들은 실외 환경에서 가장 쉽게 위치 정보를 획득할 수 있는 GPS를 다른 센서와의 융합을 통해 오차를 보정함으로써 로봇의 평면 위치를 추정할 수 있는 실용적인 방법들이지만, 고도 방향을 고려하지 않아 3차원 위치를 평가하지는 못한다. 실제 실외 환경은 경사지가 많으므로 평면 위치뿐만 아니라 고도 위치를 포함한 3차원 위치평가가 필요하다. 예를 들면 골프장에서 캐디의 역할을 수행하는 로봇의 경우 환경이 골프장인 만큼 언덕으로 인한 고도차를 고려하지 않는다면 위치 추정에 오차가 발생하고 나아가 현재 위치와 목표인 홀 사이의 거리와 방향을 계산하는 등의 서비스 품질도 저하된다. 요즘 주목 받고 있는 자율주행 자동차의 경우에도 일반적인 도로는 경사가 존재하므로 앞서 언급한 바와 같이 고도차에 의해 발생하는 오차를 방지하기 위해 3차원 위치 추정이 필요하다. 또한 재난지역이나 사고현장에서 인간을 대신하여 생존자 탐색과 같은 임무를 수행하는 재난지역 탐사 로봇의 경우 정확한 3차원 위치 추정은 신속한 인명 구조가 가능하게 하고 결과적으로 생존자의 생존율과 직결된다. 산악 지형에서 수색 위치 또는 포격 위치 설정 등의 군사임무를 수행하는 군사용 로봇의 경우에도 현재 위치와 목표의 고도차를 고려한 정밀한 3차원 위치 추정은 임무의 성공률과도 연관되므로 매우 중요하다. 또한 고층 건물의 외벽이나 시설에서 인간을 대신하는 유지보수용 로봇의 경우 현재 자신의 위치를 파악하기 위해서 3차원 위치 추정 기술이 필요하다.

3차원 위치평가는 2차원 위치 정보만이 필요한 응용분야에서도 유용하게 적용될 수 있다. 즉, 경사가 존재하는 환경에서 활동하는 로봇의 경우 그 경사에

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

의해 2차원 평면 위치에 오차가 더욱 가중될 수 있다. 이와 같은 경사에 의해 발생하는 2차원 오차는 경사가 클수록 주행거리가 길수록 커지는 경향이 있다. 따라서 경사지에서 더욱 신뢰성 있는 2차원 위치를 평가하기 위해서도 3차원 위치 평가가 필요하다.

그러나 현재까지 3차원 위치 추정에 관한 연구는 많지 않다. Nagatani[23]는 재난지역에서의 생존자 탐색 및 구조를 수행하는 로봇의 3차원 위치 추정 및 3차원 매핑을 위해 레이저 거리 측정기를 이용하였다. 그리고 Lai[24]는 이동로봇의 3차원 위치를 추정하기 위해 레이저 거리 측정기와 4개의 인공 반사경으로 구성된 시스템을 제안하였다. 이 연구들은 로봇의 3차원 위치를 추정하기 위해 공통적으로 레이저 거리 측정기를 이용하였는데, 위치 추정 정밀도를 높이기 위해서는 다수의 레이저 거리 측정기를 설치해야 하므로 비용이 늘어나고 이에 따라 구성도 복잡해지게 된다. 특히 앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 실외 환경은 거리를 측정할 만한 구조화된 환경이 아니므로 실외 환경에서 레이저 거리 측정기를 이용한 위치 추정은 어렵기 때문에 실외 환경에서 가장 효과적인 GPS를 이용한 3차원 위치 추정 방법에 대한 연구가 필요하다.

2. 연구목적 및 범위

전술한 바와 같이 3차원 위치평가 기술의 응용분야는 다양하다. 특히 옥외에서 활동하는 로봇의 경우 3차원 위치평가가 필수적이며 2차원 평면 위치정보만 필요로 하는 경우에도 3차원 위치평가는 평면 위치의 신뢰성을 향상시킬 수 있기 때문에 경위도 방향의 정보뿐만 아니라 고도 방향의 정보를 고려한 3차원 위치 추정 방법의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 이와 같은 실외 환경에서 로봇의 3차원 위치를 추정하기 위한 신뢰성 있고 실용적인 위치평가 방법을 제안하고자 한다.

이 방법은 로봇에 DGPS를 장착하여 로봇이 위치한 지점의 경위도 방향 위치 정보와 고도 정보를 획득하고, DGPS의 낮은 위치 정밀도를 극복하기 위해 엔코더를 기반으로 한 추측항법의 이동 정보와 경사센서의 경사각 정보로부터

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

계산된 로봇의 3차원 위치를 이용한다. 뿐만 아니라 주행 거리에 따른 오차 누적 문제가 있는 추측항법의 단점을 극복하기 위해 디지털 컴퍼스를 추가로 장착함으로써 로봇의 진행 방향에 대한 신뢰성을 높인다. 또한 경사 각도에 대한 신뢰성을 평가를 위해서 DGPS의 정보를 이용하여 계산된 경사각을 도입하였으며 이에 대한 내용은 측정 모델에 자세히 기술하였다. 이와 같이 구성된 다양한 센서들로부터 측정된 정보의 융합은 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)를 이용한다.

기존의 레이저 거리 측정 센서를 이용하는 방법은 위치 추정 정밀도를 높이기 위해서는 다수의 레이저 거리 측정 센서가 필요하여 구성과 비용이 복잡해지고, 거리를 측정할 만한 구조물이 없는 실외 환경에서는 위치 추정이 어려워 한계가 있지만, 제안된 방법은 DGPS를 이용하므로 손쉽게 3차원 위치 정보의 획득이 가능하고 DGPS의 위치 오차를 보정하기 위해 사용되는 센서들과의 융합이 비교적 간단하다. 본 논문에서는 제안된 3차원 위치평가 방법의 성능 및 실용 가능성을 평가하기 위해 실제 실험을 수행하고 그 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 확장 칼만 필터를 기반으로 한 3차원 위치평가 방법의 시스템 모델 및 측정 모델, 그리고 위치 추정 과정을 소개한다. III장에서는 먼저 3차원 위치평가에 사용된 센서들의 특성을 분석하기 위한 실험의 결과를 기술하였고, 이어서 제안된 방법의 성능을 평가하기 위한 실험 방법과 실험 결과를 나타냈고 그에 대해 고찰한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 요약한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

II. 확장 칼만 필터 기반 3차원 위치평가

1. 시스템 모델

본 연구에서는 실외 환경에서 로봇의 3차원 위치를 추정하기 위해 우선 로봇 바퀴에 부착된 엔코더로부터 추측항법을 수행하여 로봇의 이동거리와 이동방향에 대한 정보를 획득한다[25]. 여기서 이 정보는 단지 지면을 따라 이동한 거리로써 고도 방향에 대해서는 고려되어 있지 않은 정보이다. 따라서 본 연구에서는 이 정보와 경사센서의 경사 정보를 융합함으로써 로봇의 3차원 위치 정보를 획득한다.

로봇의 상태변수를 설명하기에 앞서 로봇의 회전을 나타내는 각도를 먼저 살펴보면 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 로봇의 yaw 방향을 방향각 θ, pitch 방향을

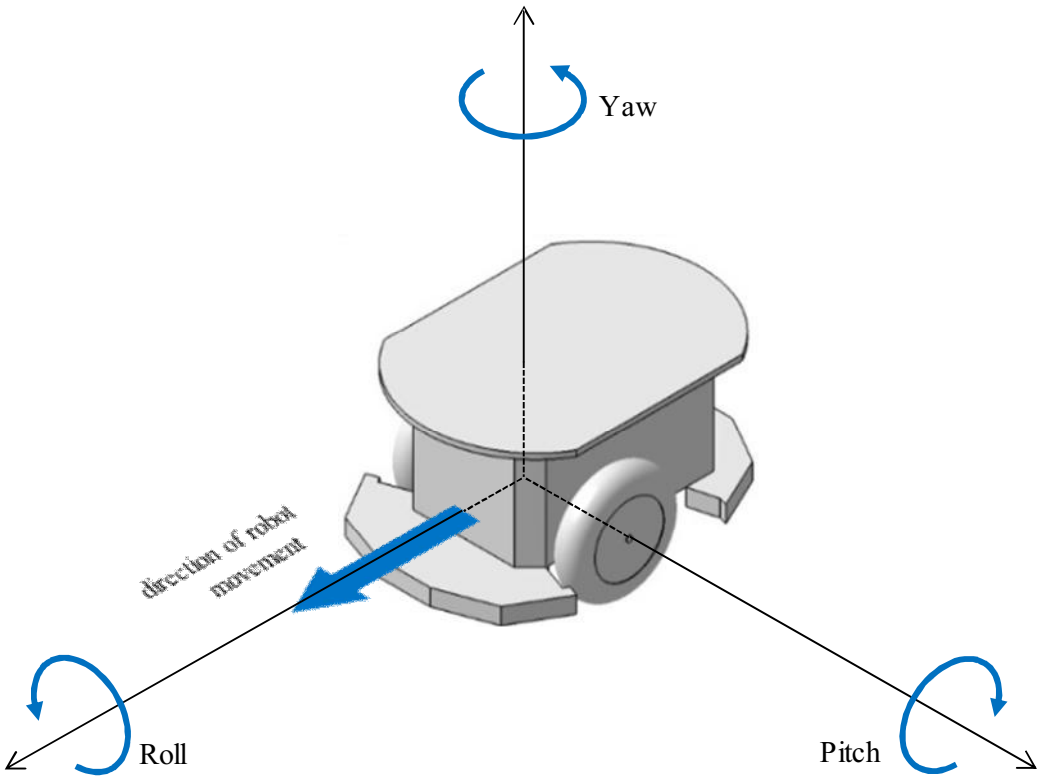

Fig. 1 Angular coordinate system

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

경사각 ϕ로 정의한다. 일반적인 도로는 roll 방향의 각도 변화가 크지 않아 로봇의 위치추정에 별다른 영향이 없으므로 로봇의 roll 방향에 대한 정의는 제외하였다. 따라서 본 연구에서 로봇의 상태변수는 로봇의 방향각 θ, 경사각 ϕ와 로봇의 3차원 위치를 나타내는 x, y, z를 포함하여 다음과 같이 5개의 변수로 정의한다[26-28].

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\cos\phi\cos\theta \\ r\cos\phi\sin\theta \\ r\sin\phi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서 r과 θ는 엔코더 기반의 추측항법으로부터 획득한 이동 정보와 방향각이고, ϕ는 경사센서로부터 획득한 경사각이다. 앞에서 설명하였듯이 각 상태변수들은 추측항법의 이동 정보인 r 및 θ와 경사센서의 경사각 ϕ를 이용하여 위의 식 (1)과 같이 계산하며, 이때 r은 다음과 같이 표현된다.

$$r = \sqrt{(\triangle x)^2 + (\triangle y)^2} \tag{2}$$

여기서 $\triangle x$은 추측항법으로 획득된 로봇의 x 방향 변화량, $\triangle y$은 y 방향으로의 변화량을 나타내며 로봇의 이동 거리는 이 두 정보를 이용하여 피타고라스의 공식을 통해 쉽게 계산된다. 이때 계산된 값은 로봇이 지면을 따라 이동한 거리로써 실제 경위도 방향의 이동 거리와는 차이가 있으므로 식 (1)과 같은 계산 과정이 필요하다.

시간 k로부터 $k+1$로 변화할 때 로봇의 위치를 나타내는 시스템 모델은 Fig. 2와 같은 관계에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + v(k) \tag{3}$$

여기서 $X(k+1)$는 시간 $k+1$에서 로봇의 위치, $X(k)$는 시간 k에서 로봇의 위치

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

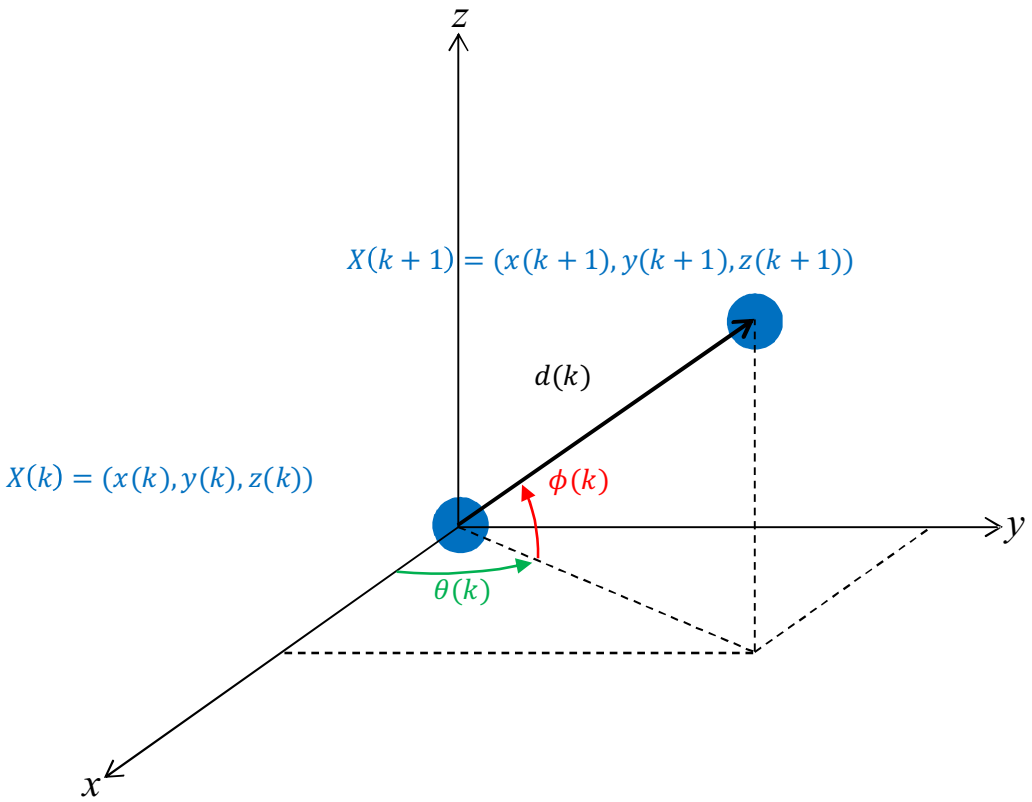

Fig. 2 System modeling

를 나타낸다. $F(X(k),u(k))$는 비선형 상태천이함수이며, $v(k)$는 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$인 로봇의 이동과 관련된 가우시안 잡음이다. $u(k)$는 로봇의 이동거리 $d(k)$와 방향각 변화량 $\triangle\theta(k)$ 및 경사각 변화량 $\triangle\phi(k)$로 이루어지는 제어입력으로써 다음과 같다.

$$u(k) = \begin{bmatrix} d(k) \\ \triangle\theta(k) \\ \triangle\phi(k) \end{bmatrix} \tag{4}$$

제안된 3차원 위치평가 방법의 시스템 모델인 식 (3)에 나타낸 비선형 상태천이함수 $F(X(k),u(k))$는 시간 k에서 로봇의 위치 $X(k)$와 제어입력 $u(k)$를 이용하여 식 (1)에 나타낸 상태변수 및 Fig. 2와 같은 관계에 의해 다음과 같이 표현된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$F(X(k),u(k)) = \begin{bmatrix} x(k)+d(k)\cos\phi(k)\cos\theta(k) \\ y(k)+d(k)\cos\phi(k)\sin\theta(k) \\ z(k)+d(k)\sin\phi(k) \\ \theta(k)+\triangle\theta \\ \phi(k)+\triangle\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $x(k)$, $y(k)$, $z(k)$, $\theta(k)$, 그리고 $\phi(k)$는 시간 k에서 평가된 위치인 $X(k)$의 요소들이고, $d(k)$는 추측항법으로 획득한 로봇이 경사면을 따라 이동한 거리이다. 그리고 $\theta(k)$는 마찬가지로 추측항법으로 획득한 방향각이고 $\phi(k)$는 경사센서로부터 획득한 경사각이다.

2. 측정 모델

앞에서 설명하였듯이 본 연구에서는 실외 환경에서 로봇의 3차원 위치 추정을 위해 엔코더를 기반으로 한 추측항법의 정보를 이용하는데, 추측항법은 바퀴의 미끌림이나 불균형, 평탄하지 못한 지면, 그리고 요철, 돌멩이나 모래 등으로 인해 이동 거리가 길어질수록 오차가 누적되어 위치 추정의 신뢰성이 떨어지는 문제가 있다. 반면에 DGPS는 기상 상태나 다중 경로 오차 등의 원인으로 위치 정밀도가 낮은 문제가 있으며, 본 연구에서는 이와 같은 두 정보를 확장 칼만 필터를 통해 융합함으로써 서로의 단점을 상호보완 해준다. 이때 보다 정밀도 있는 위치 추정을 위해서 로봇이 진행하는 방향의 각도 정보를 획득할 수 있는 디지털 컴퍼스를 추가하여 위치 추정 신뢰성을 높인다. 그리고 경사 각도에 대해서도 평가를 수행하기 위해 DGPS의 변화량을 이용하여 경사각을 계산하고 시스템 모델의 경사각과 비교해준다.

DGPS와 디지털 컴퍼스의 측정값을 로봇의 위치와 연관시키는 측정 모델은 다음과 같이 정의한다.

$$Z(k+1) = H(X(k+1)) + \omega(k+1) \quad (6)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 $\omega(k+1)$는 평균이 0, 공분산이 $R(k+1)$인 DGPS와 디지털 컴퍼스의 측정과 관련된 가우시안 잡음이다. 위치 측정에 사용된 센서인 DGPS와 디지털컴퍼스는 각각 고유한 측정 메커니즘을 갖고 있으며, 각 센서의 측정 과정은 로봇의 위치를 제외한 다른 특별한 관계가 존재하지 않는다. 따라서 측정 모델의 상태천이함수 $H(X(k+1))$는 다음과 같이 표현된다.

$$H(X(k+1)) = \begin{bmatrix} x_{DGPS}(k+1) \\ y_{DGPS}(k+1) \\ z_{DGPS}(k+1) \\ \theta_{DC}(k+1) \\ \phi_d(k+1) \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기서 $x_{DGPS}(k+1)$, $y_{DGPS}(k+1)$, $z_{DGPS}(k+1)$은 각각 DGPS로부터 측정된 경위도 방향의 위치 정보 및 고도 방향의 정보이고, $\theta_{DC}(k+1)$은 디지털 컴퍼스로부터 측정된 방향각이다. $\phi_d(k+1)$은 시간 k에서 $k+1$까지 DGPS 측정값의 변화량으로부터 계산된 로봇의 경사각을 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_d(k+1) = \sin^{-1}\left(\frac{\triangle z_{DGPS}}{\sqrt{(\triangle x_{DGPS})^2 + (\triangle y_{DGPS})^2 + (\triangle z_{DGPS})^2}} \right) \tag{8}$$

여기서 $\triangle x_{DGPS}$, $\triangle y_{DGPS}$, $\triangle z_{DGPS}$은 각각 DGPS로부터 측정된 시간 k에서 $k+1$까지의 x, y, z 방향 변화량을 나타내며 참고를 위해 이에 대한 관계를 Fig. 3에 나타냈다.

3. 3차원 위치평가 과정

본 연구에서는 이렇게 정의된 시스템 모델과 측정 모델을 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용함으로써 실외 환경에서 로봇의 3차원 위치를 평가한다. 확장 칼만

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

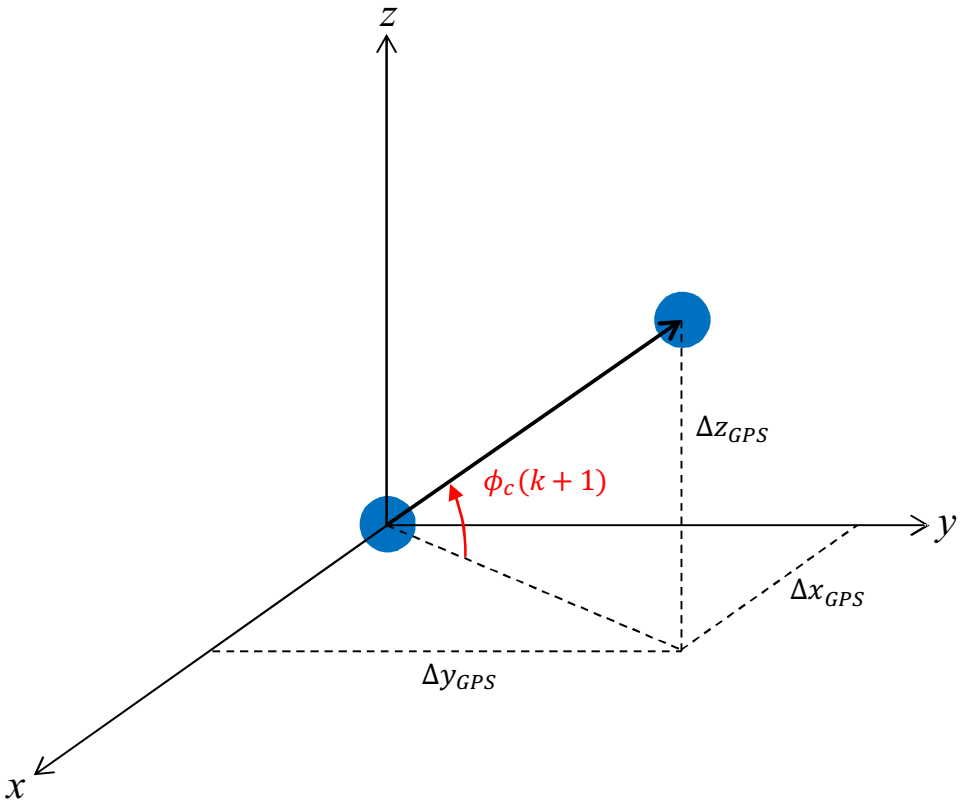

Fig. 3 Measurement modeling

필터 위치평가 알고리즘은 크게 나누어서 이전 상태에서 평가된 위치를 기반으로 현재 상태에서 로봇의 위치를 계산하는 위치 예측 단계, 현재 로봇의 위치에서 측정되는 센서들의 신뢰성을 평가하기 위해 측정값을 예측하는 측정값 예측 단계, 그리고 측정된 값의 신뢰성을 판단하기 위해 유효성을 평가하고 유효한 측정값에 대해서만 예측된 로봇의 위치를 갱신하는 유효성 검사 및 업데이트 단계로 구성된다.

3.1 위치 예측 단계

위치 예측 단계는 시간 k에서 평가된 로봇의 위치 $X(k|k)$와 제어입력 $u(k)$를 이용하여 시간 $k+1$에서 로봇의 위치를 예측하는 단계로써, 예측된 로봇의 위치 $\hat{X}(k+1|k)$는 식 (5)와 같은 비선형 상태천이함수를 이용하여 다음과 같이 계산한

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

다[29].

$$\hat{X}(k+1|k) = F(X(k|k), u(k)) = \begin{bmatrix} x(k|k) + d(k)\cos\phi(k)\cos\theta(k) \\ y(k|k) + d(k)\cos\phi(k)\sin\theta(k) \\ z(k|k) + d(k)\sin\phi(k) \\ \theta(k|k) + \triangle\theta \\ \phi(k|k) + \triangle\phi \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서 $x(k|k)$, $y(k|k)$, $z(k|k)$, $\theta(k|k)$, $\phi(k|k)$는 시간 k에서 평가된 로봇의 위치 $X(k|k)$의 구성 요소이며, 이 예측에 수반되는 공분산 행렬 $P(k+1|k)$은 다음과 같이 계산된다.

$$P(k+1|k) = \nabla F \bullet P(k|k) \bullet \nabla F^T + Q(k) \tag{10}$$

여기서 ∇F는 시스템 모델의 비선형 상태천이함수인 식 (5)의 자코비안으로써 다음과 같이 계산된다.

$$\nabla F = \begin{bmatrix} 1\,0\,0 & -d(k)\cos\phi(k)\sin\theta(k) & -d(k)\sin\phi(k)\cos\theta(k) \\ 0\,1\,0 & d(k)\cos\phi(k)\cos\theta(k) & -d(k)\sin\phi(k)\sin\theta(k) \\ 0\,0\,1 & 0 & d(k)\cos\phi(k) \\ 0\,0\,0 & 1 & 0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

3.2 측정값 예측 단계

측정값 예측 단계는 현재 로봇이 위치한 지점에서 센서들을 통해 측정되는 정보들의 신뢰성을 평가하기 위해 측정값을 예측하는 단계이다. 시간 $k+1$에서의 예측 측정값 $\hat{Z}(k+1)$은 앞의 위치 예측 단계에서 예측된 시간 $k+1$에서의 로봇의 위치 $\hat{X}(k+1|k)$를 이용하여 식 (7)과 같이 정의된 상태천이함수를 통해 다음과 같이 계산한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\hat{Z}(k+1) = H(\hat{X}(k+1|k)) = \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{z}(k+1|k) \\ \hat{\theta}(k+1|k) \\ \hat{\phi}(k+1|k) \end{bmatrix} \tag{12}$$

이때 앞에서 설명했듯이 DGPS 및 디지털 컴퍼스는 로봇의 위치와 아무런 기하학적 연관이 없으므로 예측 측정값은 (9)를 통해 예측된 정보를 그대로 사용한다.

시간 $k+1$에서 센서로부터 실제로 측정되는 실측값 $Z(k+1)$은 식 (6)과 (7)을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$Z(k+1) = \begin{bmatrix} x_{DGPS}(k+1) \\ y_{DGPS}(k+1) \\ z_{DGPS}(k+1) \\ \theta_{DC}(k+1) \\ \phi_d(k+1) \end{bmatrix} \tag{13}$$

다음으로는 센서로부터 측정된 실측값의 신뢰성을 평가하는 유효성 평가와 신뢰성 있는 측정값에 대해서 예측된 로봇의 위치를 보상해주는 업데이트 단계이다. 이와 같은 과정을 수행하기 위해서는 innovation 행렬 및 그에 대한 공분산 행렬, 그리고 측정 모델의 상태천이함수의 편미분이 필요하다.

먼저 innovation 행렬 $\nu(k+1)$은 $k+1$ 시간에서 센서로부터 측정된 실측값 $Z(k+1)$과 앞에서 예측한 예측 측정값 $\hat{Z}(k+1)$의 차로 구성되며 다음과 같이 계산된다.

$$\nu(k+1) = [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1)] \tag{14}$$

이 innovation 행렬에 대한 공분산 행렬 $S(k+1)$은 다음과 같이 계산한다.

$$S(k+1) = \nabla H \bullet P(k+1|k) \bullet \nabla H^T + R(k+1) \tag{15}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 ∇H는 측정 모델의 상태천이함수인 식 (7)의 자코비안으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_H & Y_H & Z_H & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$X_H = \frac{\triangle x_{DGPS} \bullet \triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}^3 \sqrt{1 - \left(\frac{\triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}} \right)}} \tag{17}$$

$$Y_H = \frac{\triangle y_{DGPS} \bullet \triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}^3 \sqrt{1 - \left(\frac{\triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}} \right)}} \tag{18}$$

$$Z_H = \frac{(\triangle z_{DGPS})^2}{r_{DGPS}^3 \sqrt{1 - \left(\frac{\triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}} \right)}} \tag{19}$$

여기서 r_{DGPS}은 DGPS로 측정된 시간 k부터 $k+1$까지의 x, y, z 방향 변화량의 대각선 값으로서 다음과 같다.

$$r_{DGPS} = \sqrt{(\triangle x_{DGPS})^2 + (\triangle y_{DGPS})^2 + (\triangle z_{DGPS})^2} \tag{20}$$

식 (16)에서 식 (19)과 같은 비교적 복잡한 식이 사용된 이유는 측정 모델이 식 (7)과 (8)에 나타낸 것처럼 DGPS의 변화량을 이용하여 경사각을 계산하였기 때문이다. 그 과정을 간략히 설명하기 위해 먼저 식 (7)의 5번째 행 요소 $\phi_d(k+1)$를 다음과 같이 정의한다.

$$H_\phi = \sin^{-1}\left(\frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \right) \tag{21}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 $A=\frac{z-z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}$라고 할 때, 식 (21)의 x에 대한 편미분 $\frac{\partial H_\phi}{\partial x}$는 다음과 같다.

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial x}=\frac{\partial H_\phi}{\partial A}\frac{\partial A}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}(\sin^{-1}A)\frac{\partial A}{\partial x}=\left(\frac{1}{\sqrt{1-A^2}}\right)\frac{\partial A}{\partial x} \tag{22}$$

여기서 $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}$이라고 할 때, 식 (22)의 $\frac{\partial A}{\partial x}$는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial A}{\partial x}=\frac{\partial A}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{z-z_0}{r}\right)\frac{\partial r}{\partial x}=\left(\frac{z-z_0}{r^2}\right)\frac{\partial r}{\partial x} \tag{23}$$

여기서 $R=r^2=(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2$이라고 할 때, 식 (23)의 $\frac{\partial r}{\partial x}$은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial r}{\partial x}=\frac{\partial r}{\partial R}\frac{\partial R}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial R}(\sqrt{R})\frac{\partial R}{\partial x}=\left(\frac{1}{2\sqrt{R}}\right)\frac{\partial R}{\partial x} \tag{24}$$

여기서 $X=x-x_0$라고 할 때, 식 (24)의 $\frac{\partial R}{\partial x}$은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial R}{\partial x}=\frac{\partial R}{\partial X}\frac{\partial X}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial X}\left(X^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2\right)\frac{\partial X}{\partial x}=(2X)\frac{\partial X}{\partial x} \tag{25}$$

마지막으로 식 (22)에서 식 (25)를 정리하면 다음과 같이 계산되며, 측정 모델의 상태천이함수를 y 및 z에 대해 편미분한 결과인 식 (18)과 (19)도 동일한 방법으로 유도한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\frac{\partial H_{\phi}}{\partial x}=\left(\frac{1}{\sqrt{1-A^{2}}}\right)\left(\frac{z-z_{0}}{r^{2}}\right)\left(\frac{1}{2\sqrt{R}}\right)(2X)=\frac{(z-z_{0})(x-x_{0})}{r^{3}\sqrt{1-\frac{z-z_{0}}{r}}}=\frac{(\triangle z_{DGPS})(\triangle x_{DGPS})}{r_{DGPS}^{3}\sqrt{1-\frac{\triangle z_{DGPS}}{r_{DGPS}}}} \quad (26)$$

3.3 유효성 검사 및 업데이트 단계

DGPS로부터 측정된 위치 정보는 인공위성의 상태나 대기 상태, 다중 경로 오차 등의 다양한 오차 요인에 의해 매우 큰 위치 오차를 포함하거나 혹은 위치 정보를 수신하지 못하는 경우가 발생하여 그 신뢰성이 크게 떨어질 수 있다. 마찬가지로 디지털 컴퍼스는 지구의 자기력선과 센서의 자세를 비교하여 방위를 측정하는 방식으로써 주변의 전자기기 등에 의한 전자파의 간섭을 많이 받으므로 측정값의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 따라서 이와 같은 센서들로 측정된 위치 정보의 신뢰성을 평가할 필요가 있으며, 본 연구에서는 이를 위해 다음과 같은 validation gate $G(k+1)$을 통해 측정값의 유효성을 검사한다.

$$G(k+1)=\nu^{T}(k+1)\bullet S^{-1}(k+1)\bullet\nu(k+1)\leq\gamma^{2} \quad (27)$$

여기서 $\nu(k+1)$는 앞에서 식 (14)과 같은 방법으로 구한 센서의 실측값과 예측 측정값의 차로 구성되는 innovation 행렬이고, $S(k+1)$은 그에 대한 오차 공분산 행렬이다. 이들로 구성되는 $G(k+1)$는 실측값과 예측값의 차와 측정오차의 비를 나타내는데, $G(k+1)$가 γ^{2} 이하일 때만 측정된 위치정보가 위치보정에 사용될 정도로 신뢰성이 있다고 판단한다. γ는 설계파라메타이며 유효성 평가를 통과하지 못할 경우 최종적으로 평가되는 로봇의 위치와 오차 공분산은 아무런 업데이트 없이 앞의 위치 예측 단계에서 예측된 값이 된다.

유효성 검사를 통과하면 예측된 위치와 공분산에 가중치를 주기 위한 칼만 이득 $W(k+1)$이 필요하며 다음과 같이 계산한다.

$$W(k+1)=P(k+1|k)\bullet\nabla H^{T}\bullet S^{-1}(k+1) \quad (28)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

최종적으로 계산된 칼만 이득 $W(k+1)$을 이용하여 시간 $k+1$에서 로봇의 위치 및 그에 따른 오차 공분산을 다음과 같이 갱신한다.

$$X(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + W(k+1) \cdot \nu(k+1) \tag{29}$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1) \cdot \nabla H \cdot P(k+1|k) \tag{30}$$

결국 식 (27)을 만족하는 측정값에 대해서는 식 (29) 및 (30)를 이용하여 식 (9) 및 (10)으로 예측된 위치와 공분산을 수정하여 최적 위치와 공분산으로 갱신한다. 이 단계를 매 샘플링 주기마다 수행함으로써 위치평가가 이루어진다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

III. 실험 및 고찰

1. 센서 특성 분석 실험

로봇의 위치평가에 있어서 위치 추정 성능은 확장 칼만 필터 알고리즘 특성상 사용되는 센서들의 특성에 크게 영향을 받는다. 이것은 고성능 센서를 사용해야 한다는 의미라기보다는 사용되는 센서들의 특성에 맞는 수치의 파라메타를 위치평가에 반영해야 한다는 의미이다. 즉, 사용되는 센서의 성능과 위치추정 방법에 반영된 센서의 특성이 일치하지 않는다면, 아무리 고성능 센서를 사용하더라도 위치 추정 성능이 저하되거나 위치 추정이 불가능할 수 있다.

따라서 제안된 3차원 위치평가의 성능을 평가하기에 앞서 사용된 센서들의 특성을 분석하는 실험을 수행하였다. 사용된 센서들의 특성은 제조사에서 제공되고 있지만 그 특성이 실제로는 다를 수 있기 때문에 본 연구에 사용된 각 센서들의 실제 특성을 실험으로 분석하였다. 제안된 방법에 사용되는 센서는 로봇의 3차원 위치 좌표를 측정하기 위한 DGPS, 경사각 측정을 위한 경사센서, 그리고 방위각 측정을 위한 디지털 컴퍼스이며, 이 3가지 센서들의 특성을 실험을 통해 통계학적으로 분석하고 그 결과를 기반으로 3차원 위치평가 방법의 알고리즘에 필요한 초기 오차 및 오차 특성을 설정하였다.

센서 특성 분석을 위한 실험 방법은 동일한 지점에서 DGPS, 경사센서, 그리고 디지털 컴퍼스를 이용하여 10분씩 10일간 데이터를 수집하고 그 특성을 분석하는 방법으로 수행하였다. 여기서 각 센서의 매우 정밀도 있는 특성 분석을 위해서는 측정 지점의 위치 좌표, 경사도 등의 참 값에 대한 특성을 분석해야 하지만, 실험의 목적이 센서의 통계학적 특성을 분석하는 것이므로 특정 지점 또는 방향에 대해 동일하게 측정된 데이터의 특성을 분석하는 방법으로 수행하였다. 실험에 다양한 조건을 포함시키기 위해 각 센서의 측정은 다른 시간대, 다른 기상조건에서 수행하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.1 DGPS 특성 분석

제안된 3차원 위치평가 방법에서 로봇의 경위도 방향 위치 정보 및 고도 방향 정보를 측정하기 위해 사용된 DGPS는 AscenKorea 사의 RCV-3000이며 그 모습은 Fig. 4와 같다. 위치 추정 정밀도를 높이기 위해서는 고정밀도의 모델을 사용하는 것이 유리하지만 DGPS는 정밀도가 높은 모델일수록 고가이므로 본 연구에서는 제안된 위치평가 방법의 성능을 실용적인 측면에서 분석하기 위해 저정밀도의 모델을 사용하였다. 사용된 DGPS의 제조사에서 제공되는 센서의 사양은 Table 1에 나타낸 바와 같이 정밀도 2.5 m, 관측 주기 1 Hz인 DGPS 모드가 지원되는 모델이다. 전원은 내장된 배터리를 통해 공급되고 데이터 출력을 위해 블루투스 통신이 가능하여 사용이 용이하다.

제안된 3차원 위치평가 방법에 사용된 DGPS의 특성 분석 실험은 정확한 좌표를 알고 있는 지점에서 측정을 수행하는 것이 가장 정확한 결과를 얻을 수 있지만 본 실험의 목적이 단지 DGPS의 통계학적 특성을 분석하여 제안된 위치평가 방법에 적용하기 위한 것이므로, 동일한 지점에서 10일간 10분씩 측정한 데이터를 분석하는 방법으로 특성 분석 실험을 수행하였다. DGPS는 특성상 기상조건이나 시간대에 영향을 받으므로 이를 반영하기 위해 매일 다른 시간대에 다양한 기후 조건에서 측정 실험을 수행하였다.

DGPS 특성 분석을 위한 측정 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에서 원 모양의 점은 10일 동안 DGPS로 측정된 데이터이고, 사각형 점은 그 평균 지점을 나타낸다. 측정 결과 평균 지점과의 최대 편차는 1.23 m이고 표준편차는 0.39 m로 나타났다. 그러나 이것은 정지 상태에서 측정된 실험결과이므로 실제 실험은 로봇이 이동하며 DGPS의 데이터를 수신하게 되므로 더 큰 오차를 보일 것으로 판단된다. 아울러 정지상태에서 최대 편차가 1.23 m라는 것은 이동로봇의 작업 수행 측면에서 보면 비교적 큰 수치이므로 위치 추정을 위해 DGPS를 이용하기 위해서는 다른 센서와의 융합을 통한 위치평가 기법이 필수적이다. 제안된 3차원 위치평가에는 이와 같이 실제 실험을 통해 분석된 DGPS의 통계학적 특성을 반영하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4 Photo of the DGPS

Table 1 Specifications of the DGPS

Accuracy	DGPS mode	Data Rates
2.5 m	Enabled	1 Hz

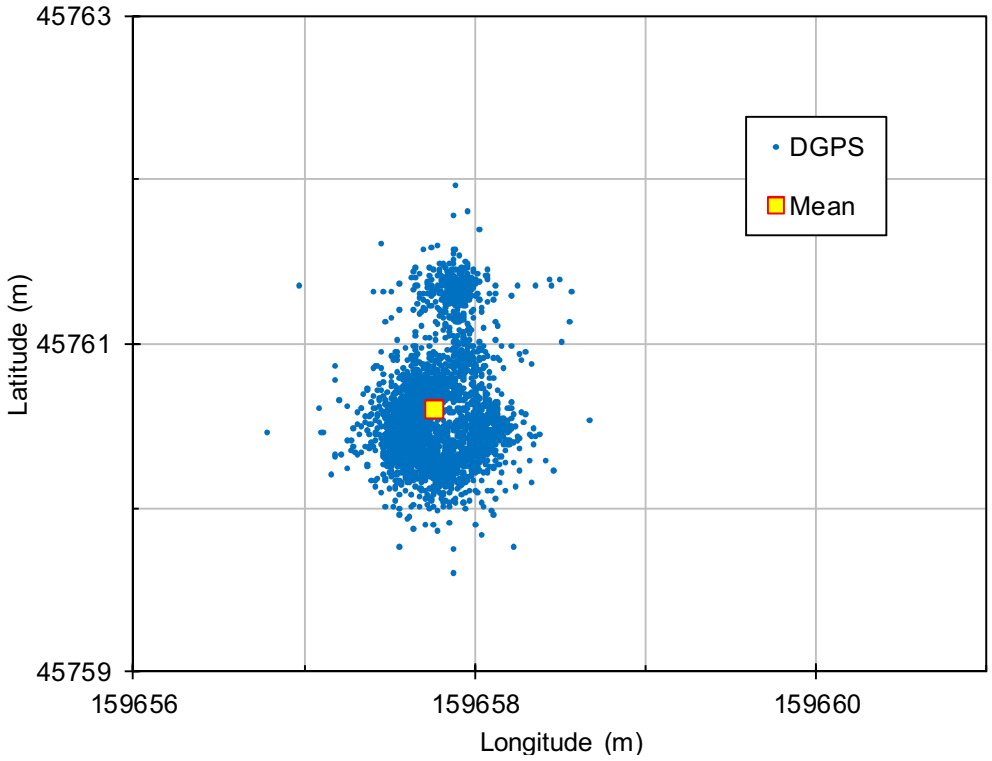

Fig. 5 Measurement results of the DGPS

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.2 경사센서 특성 분석

제안된 3차원 위치평가 방법에서 로봇의 pitch 방향 각도를 측정하기 위해 사용된 경사센서는 Fig. 6과 같은 Level Development 사의 LCH-360-USB이다. 제조사에서 제공되는 센서의 사양은 Table 2에 나타낸 바와 같이 정밀도 0.3°, 분해능 0.05°, 그리고 관측 주기는 1 Hz인 모델이다. 전원 입력 및 데이터 출력을 위해 USB 형태를 지원하는 모델로서 로봇의 제어를 위한 PC와 연결 및 사용이 용이하다.

사용된 경사센서의 정확한 특성을 분석하기 위해서는 경사도의 참값을 알고 있는 지점에서 동일한 방향에 대하여 10일간 10분씩 측정한 데이터를 분석하는 방법으로 특성 분석 실험을 수행하였다. 실험에 다양한 조건을 반영하기 위해 DGPS 특성 분석 실험과 마찬가지로 매일 다른 시간대에 다양한 기후 조건에서 측정을 수행하였다.

경사센서 특성 분석을 위한 실험의 측정 결과는 Fig. 7과 같고 이에 대한 특성을 Table 3에 정리하였다. 그림은 10분씩 10일간 측정된 6000개의 데이터의 평균값에 대한 편차를 나타낸다. 실험 결과 측정된 데이터의 최대 편차는 0.31°로써

Fig. 6 Photo of the inclinometer

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

경사센서 제조사에서 제공된 사양인 정밀도 0.3°와 유사한 수치를 보이고 있다. 하지만 이것은 정지 상태에서 측정된 실험 데이터로써 실외 환경은 특성상 지면 상태가 평탄하지 않아 로봇이 이동중일 때는 진동이 발생하므로 경사센서 측정값의 편차가 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 제안된 3차원 위치평가에는 이와 같이 실제 실험을 통해 분석된 경사센서의 통계학적 특성을 반영하였다.

Table 2 Specifications of the inclinometer

Accuracy	Resolution	Data Rates
0.3°	0.05°	1 Hz

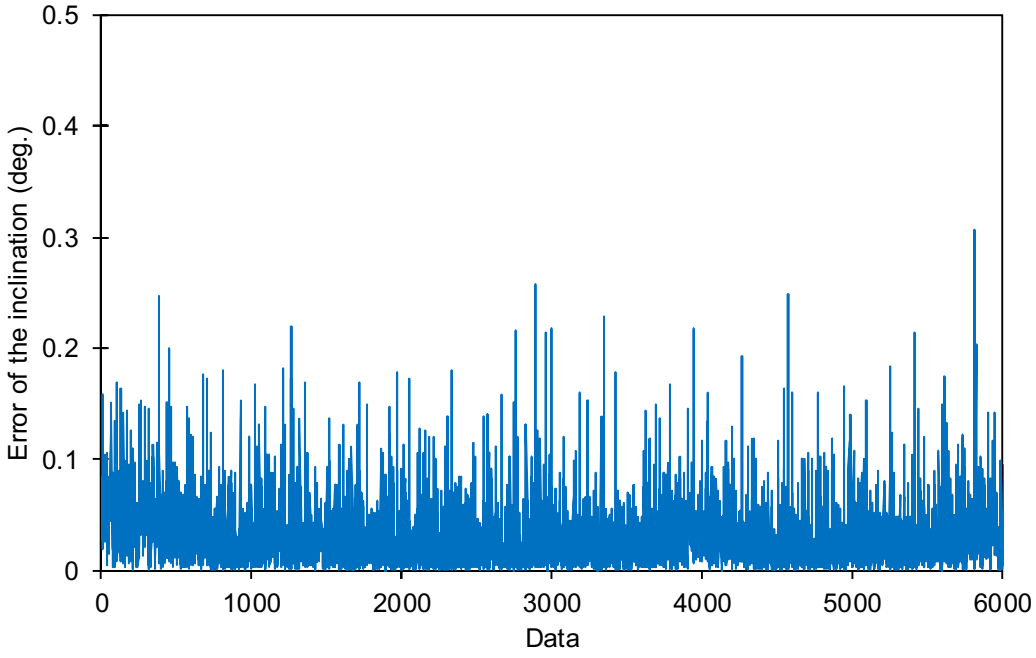

Fig. 7 Measurement results of the inclinometer

Table 3 Error characteristics of the inclinometer

Maximum error	Mean error	Standard deviation
0.31°	0.03°	0.03°

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.3 디지털 컴퍼스 특성 분석

제안된 3차원 위치평가 방법에 사용된 로봇의 yaw 방향 각도를 측정하기 위해 사용된 디지털 컴퍼스는 Fig. 8과 같은 WithRobot 사의 myAHRS+이다. 센서의 제조사에서 제공되는 사양은 Table 4에 나타낸 바와 같이 정확도는 0.3°, 분해능은 0.01°, 그리고 관측 주기는 1 Hz인 모델이다. 경사센서와 마찬가지로 센서의 전원 입력 및 측정된 데이터의 출력을 위해 USB 형태를 지원하는 모델로서 로봇의 제어를 위한 PC와 연결이 용이하다.

사용된 디지털 컴퍼스의 정확한 특성을 분석하기 위해서는 정확한 참값에 대하여 분석하여야 하지만 방위의 실제 값을 측정하는 것은 대단히 어렵기 때문에 DGPS 특성 실험과 유사한 방법으로 특성을 분석하였다. 즉, 동일한 지점에서 동일한 방향에 대하여 10일간 10분씩 측정한 데이터를 분석하는 방법으로 실험을 수행하였으며, 실험에 다양한 조건을 반영하기 위해 앞의 두 특성 분석 실험과 마찬가지로 매일 다른 시간대에 다양한 기후 조건에서 측정을 수행하였다.

디지털 컴퍼스의 특성 분석을 위한 측정 결과는 Fig. 9와 같다. 실험 결과는 측정된 데이터의 평균값에 대한 편차를 나타내며, 최대편차는 3.07°, 표준편차는 0.78°로 나타났다. 그러나 디지털 컴퍼스와 같은 지자기 센서는 그림에서도 알 수 있듯

Fig. 8 Photo of the digital compass

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 정지상태에서 측정하였음에도 불구하고 바이어스에 의한 오차가 지속적으로 발생하고 있다. 아울러 경사센서의 경우와 마찬가지로 실외용 이동로봇 특성상 지면 상태가 평탄하지 않아 진동이 발생하므로 디지털 컴퍼스 측정값의 편차는 더욱 커질 수 있다. 아울러 디지털 컴퍼스는 지구의 자기력선과 현재 센서의 자세를 비교하여 방위를 측정하므로 주변의 전자기기나 전자파에 대단히 민감하다는 점을 고려하면 측정값의 편차는 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 제안된 3차원 위치평가에는 이와 같이 실제 실험을 통해 분석된 디지털 컴퍼스의 통계학적 특성을 반영하였다.

Table 4 Specifications of the digital compass

Accuracy	Resolution	Data Rates
3°	0.01°	100 Hz

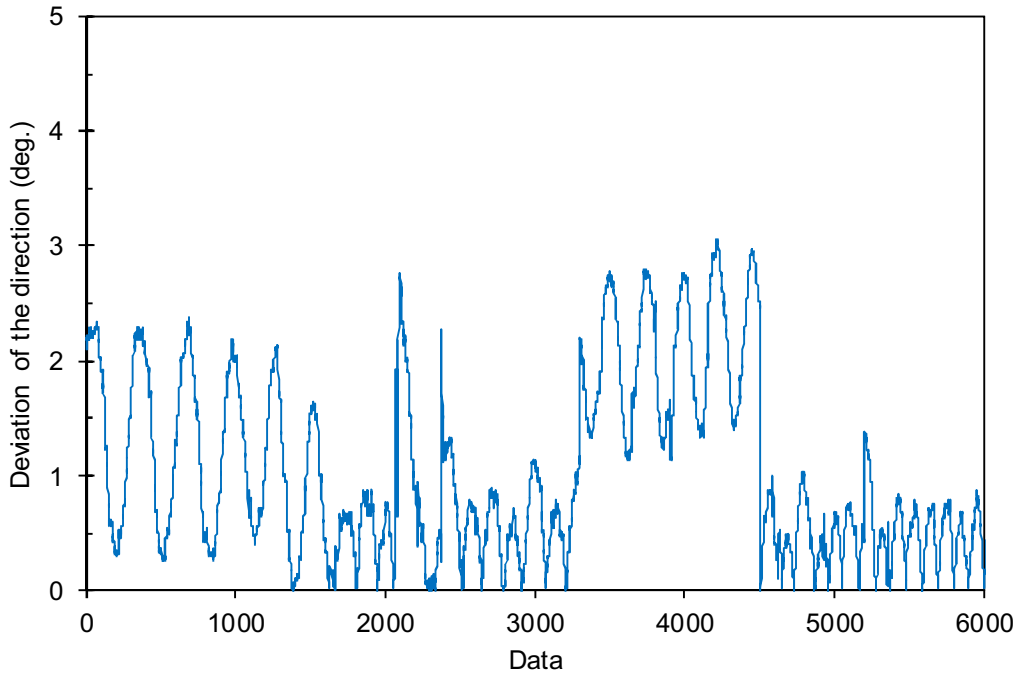

Fig. 9 Measurement results of the digital compass

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 3차원 위치평가 성능 평가 실험

2.1 실험 방법

Fig. 10은 3차원 위치평가 방법의 성능을 평가하기 위한 실험 장소로서 주행 거리는 약 400 m이고 고도차가 약 25 m인 내리막길과 오르막길이 존재하는 환경이다. 그림의 × 표시는 기준경로를 생성하기 위한 기준위치로서 로봇이 주행한 이동경로 내의 모든 위치에서의 실제 좌표는 측정은 어렵기 때문에 고정밀도의 DGPS를 이용하여 경위도 및 고도 좌표를 측정한 다음 각 기준위치를 연결하여 기준경로로 설정하였다.

기준위치 측정을 위해 사용된 DGPS는 제안된 3차원 위치평가를 위해 로봇에 사용된 저정밀도의 DGPS와는 달리 Table 5와 같이 매우 높은 위치 정밀도를 갖는 고가의 모델이다. 이처럼 기준위치 측정을 위해 별도로 고정밀도의 DGPS를 사용한 이유는 제안된 위치평가 방법의 정량적인 성능을 평가하기 위해서는 참값에 근접한 기준경로가 필수이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 성능 평가를 위한 기준경로를 생성하기 위해 사전에 고정밀도의 DGPS를 이용하여 주행 코스 내 15개 지점에서 고도값을 포함한 좌표를 10일간 10분씩 측정하였고, 그 평균값을 기준위치로 설정하였다. 측정된 전체 기준위치의 좌표는 Table 6과 같고, 이 위치들을 연결하여 제안된 방법의 정량적 성능 평가를 위한 기준 경로를 생성하였다.

Fig. 11는 실험에 사용된 로봇과 장착된 센서들의 사진으로서 ⓐ는 경사 센서, ⓑ는 DGPS, 그리고 ⓒ는 디지털 컴퍼스를 나타낸다. 로봇 플랫폼은 Adept Technology 사의 Pioneer-3DX이며 그 사양은 Table 7과 같다. 주행 실험은 리모컨을 이용하여 로봇을 기준경로를 따라 평균 0.6 m/s의 일정한 속력으로 주행

Table 5 Specifications of the high precision DGPS

Accuracy	Data rates	Size(mm)	Weight
0.7 m	1 Hz	66.5×140×28	200 g

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

시킨 후 기준경로에 대한 DGPS 및 위치평가 결과의 위치오차를 비교 분석하는 방법으로 수행되었다.

Fig. 10 Experimental environment

Table 6 Reference positions (unit : m)

Position No.	x_{ref}	y_{ref}	z_{ref}
1	159657.77	45760.54	331.77
2	159619.43	45760.62	328.91
3	159580.18	45760.56	325.71
4	159541.01	45760.65	322.21
5	159508.86	45760.63	319.67
6	159500.86	45756.89	319.51
7	159496.87	45748.89	320.17
8	159496.85	45719.79	324.19
9	159497.08	45687.41	328.71
10	159497.14	45658.68	332.17
11	159501.48	45650.63	332.94
12	159509.49	45646.45	333.173
13	159543.87	45646.47	334.24
14	159589.57	45646.82	340.95
15	159634.41	45646.37	343.3

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

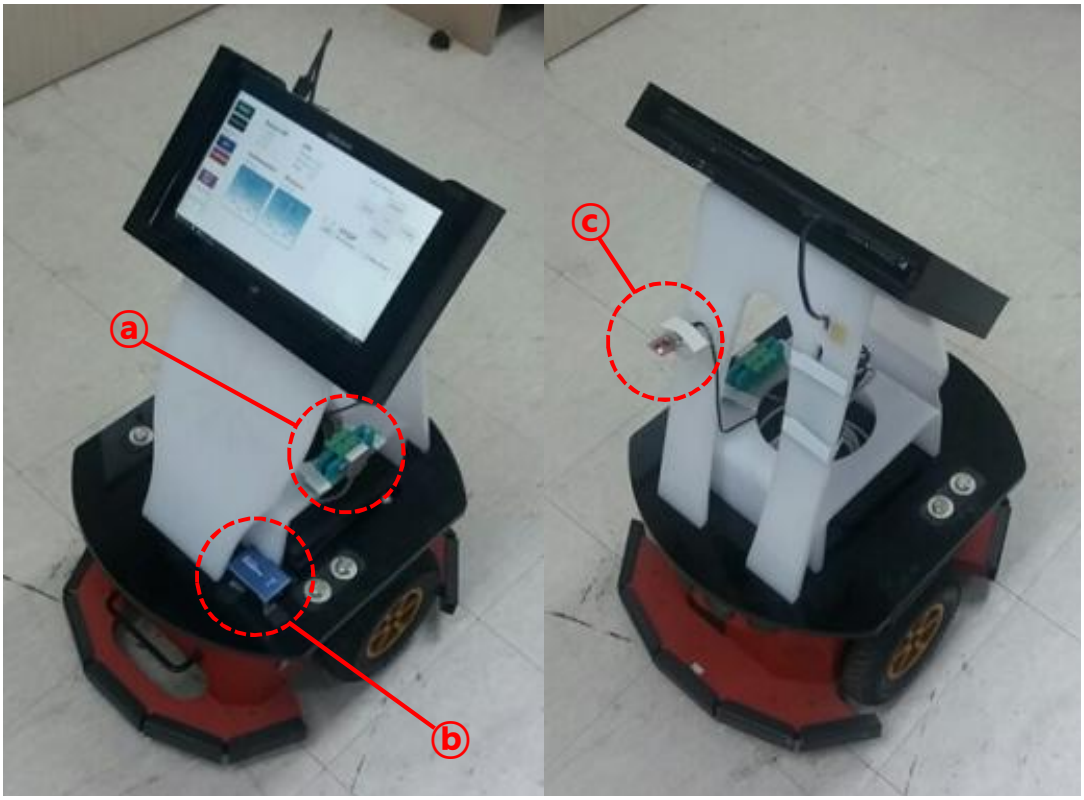

Fig. 11 Photo of the robot and sensors(ⓐ:inclinometer, ⓑ:DGPS, ⓒ:digital compass)

Table 7 Specifications of the robot

Size (m)	Weight	Payload	Battery
0.445×0.393×0.237	9 kg	25 kg	12 VDC

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2 실험 결과 분석

3차원 위치평가 방법의 성능을 평가하기 위한 주행 실험의 결과를 Fig. 12와 같이 경위도 방향 및 고도 방향으로 이루어진 3차원으로 나타냈다. 그림에서 각각 점선 궤적은 DGPS로 측정된 로봇의 이동 경로이고, 실선 궤적은 DGPS를 비롯한 각종 센서들의 측정값을 이용한 3차원 위치평가의 결과, 그리고 × 표시가 포함된 가는 점선은 성능 평가를 위한 기준경로를 나타낸다.

실험 결과를 우선 정성적으로 평가해보자면 DGPS의 경우는 그림에서 알 수 있듯이 기준경로와 비교적 큰 차이를 보이며, 로봇이 기준경로를 따라 직선적으로 이동했음에도 불구하고 평탄하지 못한 결과를 보여주고 있다. 반면에 제안된 3차원 위치평가는 이와 같은 DGPS의 오차를 경사센서, 디지털 컴퍼스 등의 정보를 이용하여 보정함으로써 비교적 기준경로에 가까운 결과를 보여주고 있다. 아울러 제안된 3차원 위치평가는 로봇이 기준경로를 따라 직선적으로 이동했음에도 불구하고 평탄하지 못한 결과를 보여주고 있는 DGPS의 이동경로를 부드럽고 평탄하게 해주고 있다

제안된 3차원 위치평가의 정량적인 성능을 확인하기 위해 DGPS 및 3차원

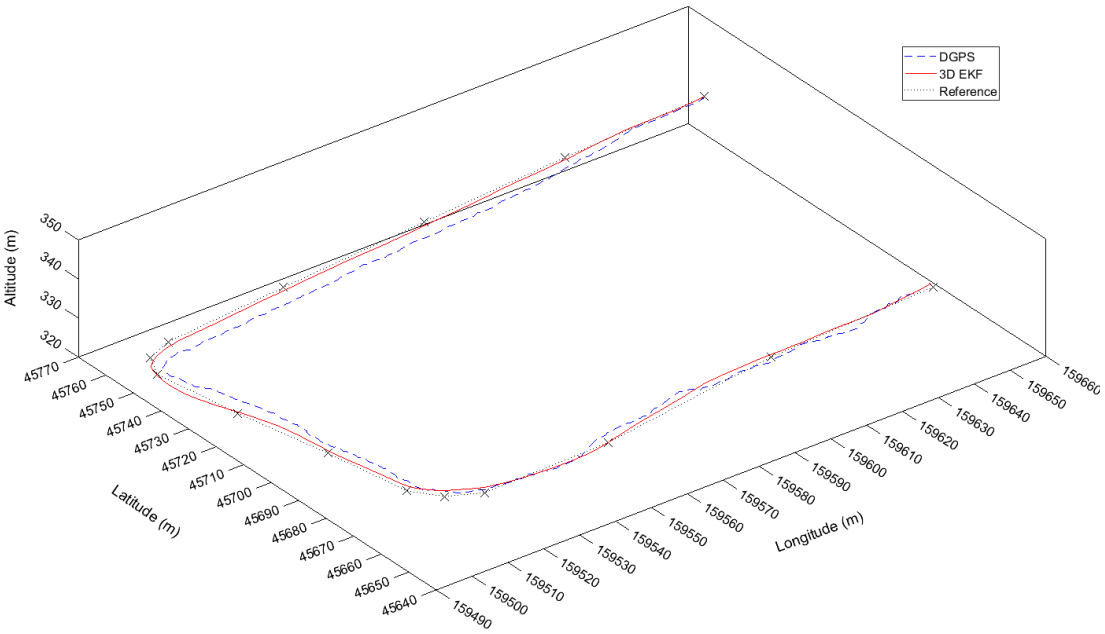

Fig. 12 Results of the 3D localization

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

위치평가의 위치오차를 Fig. 13에 나타냈으며, 점선은 DGPS의 위치오차, 실선은 3차원 위치평가의 위치오차이고 이에 대한 위치오차 특성은 Table 8에 나타냈다. 오차특성을 분석해보면 DGPS는 최대 6.76 m, 평균 3.24 m의 전체적으로 큰 위치오차를 보이고 있는 반면에 3차원 위치평가는 최대 2.35 m, 평균 1.04 m의 비교적 양호한 위치오차를 보여주고 있다. 따라서 제안된 3차원 위치평가의 성능평가 실험 결과는 DGPS의 위치오차를 크게 개선해주고 이동경로를 평탄하게 하여 로봇의 실제 이동경로에 가까운 위치평가 결과를 보여주고 있으므로, 실외 환경에서 개발된 3차원 위치평가 방법이 실제 응용이 가능할 것으로 판단된다.

앞서 살펴본 결과는 3차원 위치에 대한 오차로서 고도 방향에 대한 위치오차도 이미 포함되어 있지만 제안된 방법의 고도정보에 대한 위치평가 성능을 확실

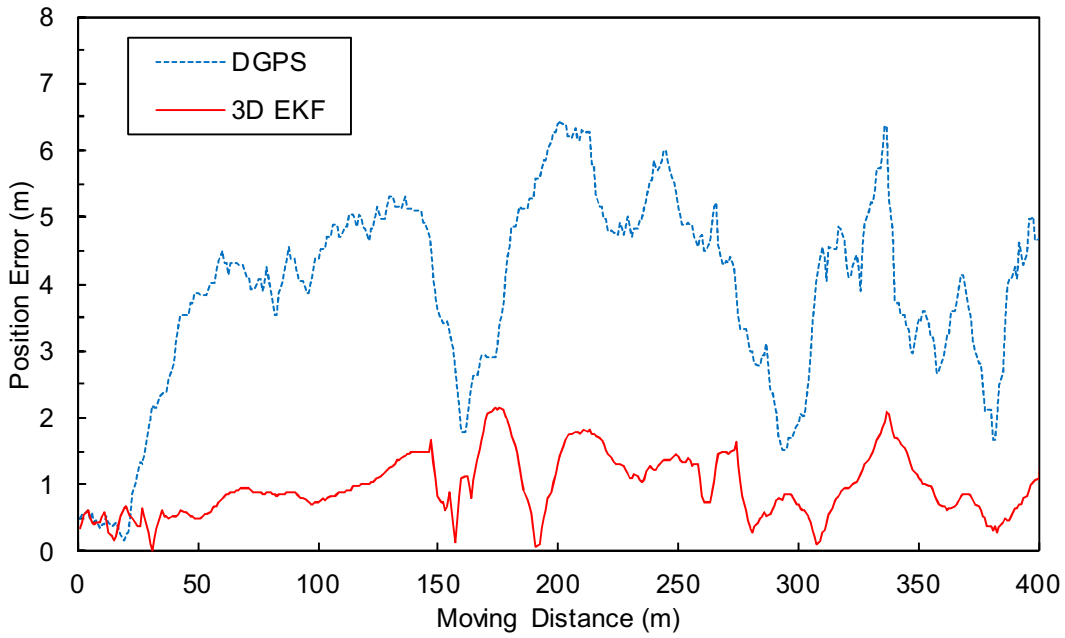

Fig. 13 Position errors of the 3D localization

Table 8 Characteristics of position error for 3D localization

	Maximum error	RMS error	Standard deviation
DGPS	6.76 m	4.24 m	1.36 m
3D EKF	2.35 m	1.04 m	0.48 m

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

하게 확인하기 위해 주행거리에 따른 고도에 대한 결과만을 따로 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 점선은 DGPS를 이용하여 측정된 고도 정보이며, 굵은 실선은 제안된 3차원 위치평가로 평가된 고도 방향의 결과, 그리고 × 표시가 포함된 가는 실선은 제안된 방법의 정량적인 성능 평가를 위한 기준 고도를 나타낸다.

우선 고도 방향에 대한 3차원 위치평가의 성능을 정성적으로 평가해보자면 DGPS로 측정된 고도는 기준 고도와는 다소 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 일반적으로 GPS가 경위도 방향의 오차보다 고도 방향의 오차가 더 크기 때문이다. 제안된 3차원 위치평가는 이와 같은 DGPS의 고도 방향 오차를 경사센서를 비롯한 각종 센서들의 정보를 이용하여 보정해줌으로써 기준 고도에 매우 근접한 결과를 보여주고 있다. 아울러 앞의 3차원으로 표현된 3차원 위치평가 결과와 마찬가지로 평탄하지 못한 DGPS의 고도 궤적을 부드럽게 평탄화 해주고 있다.

제안된 3차원 위치평가의 고도 방향에 대한 성능을 정량적으로 분석하기 위해 주행거리에 따른 고도의 오차를 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 점선은 DGPS로 측정된 고도의 오차, 실선은 제안된 3차원 위치평가로 평가된 고도 방향 결과의 오차이고, 이에 대한 오차 특성은 Table 9에 정리하였다. 결과는 DGPS로 측정된 고도는 최대 오차 5.01 m, 평균 오차 2.53 m의 큰 오차를 보이

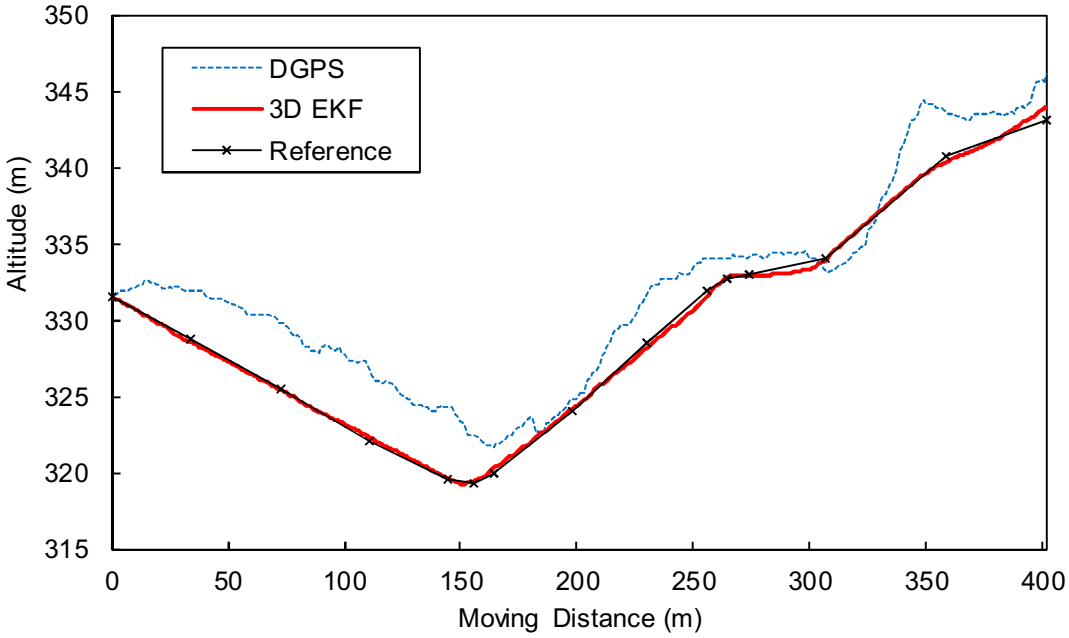

Fig. 14 Results of the altitude estimation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

는 반면, 제안된 3차원 위치평가의 고도 방향 오차는 최대 0.95 m, 평균 0.18 m 로써 고도 방향에 대한 오차를 크게 개선해주고 있다.

고도 방향에 대한 성능이 경위도 방향에 비해 더 양호하게 나타나고 있는데, 이것은 선수행된 센서 특성 분석 실험의 경사센서와 디지털 컴퍼스의 특성 비교를 통해 그 이유를 유추할 수 있다. 즉, 고도 방향과 관련된 경사센서의 특성은 최대 편차가 0.31°인데 반해 디지털 컴퍼스는 최대 편차가 3.07°로써 경사센서의 측정 정밀도가 디지털 컴퍼스에 비해 더 양호하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다.

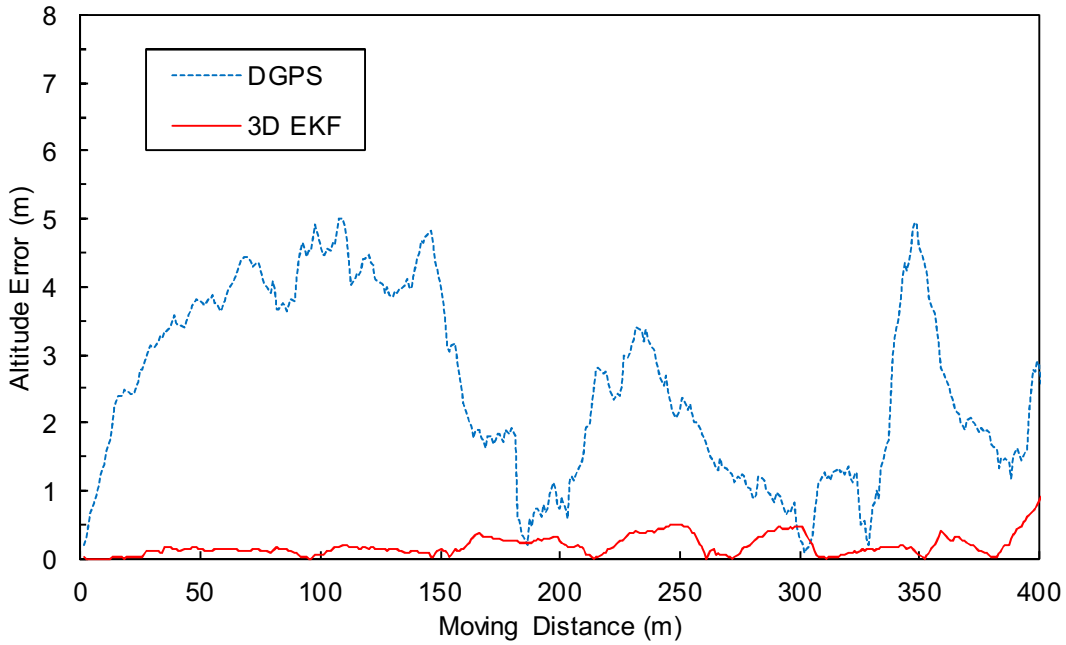

Fig. 15 Errors for altitude estimation

Table 9 Characteristics of the altitude error

	Maximum error	RMS error	Standard deviation
DGPS	5.01 m	2.53 m	1.34 m
3D EKF	0.95 m	0.18 m	0.15 m

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.3 오차 공분산 분석

3차원 위치평가에서 각 상태변수들로 연관되어 구성되는 오차 공분산은 각 방향으로의 불확실성 범위를 나타낸다. 따라서 오차 공분산의 분석을 통해 제안된 방법의 오차 수렴성 및 안정성을 확인할 수 있으며, 로봇의 주행 초기부터 도착까지 주행거리에 따른 오차 공분산의 변화를 Fig. 16에서 20에 나타냈다. Fig. 16는 x 방향, Fig. 17은 y 방향, Fig. 18은 z 방향, Fig. 19는 θ 방향, 그리고 Fig. 20은 ϕ 방향의 오차 공분산을 나타내며 각 방향의 초기 오차 공분산은 로봇의 이동 특성 및 앞에서 특성 분석 실험에 나타낸 바와 같은 센서들의 특성을 기준으로 설정하였다.

결과를 분석해보면 먼저 x 방향의 오차 공분산은 초기에 빠르게 수렴하여 일정한 값을 유지하다가 260 m 부근에서 잠깐 불확실성이 증가하는데, 이것은 그 위치에서 주변 장애물의 영향으로 인해 DGPS의 x 방향 위치오차가 다른 부분에 비해 크게 발생한 것으로 사료된다. y 방향의 오차 공분산은 x 방향과 마찬가지로 초기에 빠르게 일정한 값으로 수렴하고 있다. 다음으로 z 방향의 오차 공분산은 x, y 방향과 마찬가지로 초기에 빠르게 수렴할 뿐만 아니라 x, y 방향에 비해 더 낮은 값으로 수렴하며 특별히 불확실성이 변하는 구간이 존재하지 않는다. 이것은 Fig. 14의 고도 방향에 대한 결과에 나타난 것처럼 경사센서의 특성이 다른 센서보다 양호하므로 고도 방향에 대한 위치 추정 성능이 경위도 방향에 비해 양호하기 때문이다. θ 방향의 오차 공분산도 초기에는 빠르게 수렴하지만 다른 방향에 비해 평탄하지 못한 결과를 보이고 있는데, 이것은 Fig. 9에 나타낸 디지털 컴퍼스의 특성에서 보듯이 편차가 큰 것이 반영된 것으로 보인다.

이와 같이 x, y, z, θ 방향의 오차 공분산은 초기에 설정된 오차로부터 이동거리 10 m 내에서 빠르게 감소하여 점차 일정한 값으로 수렴하고 있지만, ϕ 방향 오차 공분산은 오차의 수렴 속도 측면에서는 다른 방향에 비해 느리게 수렴하고 있다. 이것은 다른 상태벡터와는 달리 ϕ는 식 (7)과 (8)에 나타낸 바와 같이 여러 상태 벡터에 연관이 되어 있어 이들 상태벡터의 수렴성에 영향을 받기 때문이다. 그러나 수렴하는 값의 크기 측면에서 보면 오히려 ϕ 방향의 오차 공

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

분산이 다른 방향에 비해 가장 낮은 값을 보이고 있는데, 이것은 ϕ 방향의 경사각 측정에 사용되는 경사센서가 앞의 센서 특성 분석 실험에 나타난 바와 같이 다른 방향에 비해 정밀도가 양호하기 때문으로 사료된다. 따라서 ϕ 방향에 대해서도 안정성 측면에서는 문제가 없으므로 제안된 방법은 오차 범위의 수렴 측면에서 보았을 때 안정적인 것으로 사료된다.

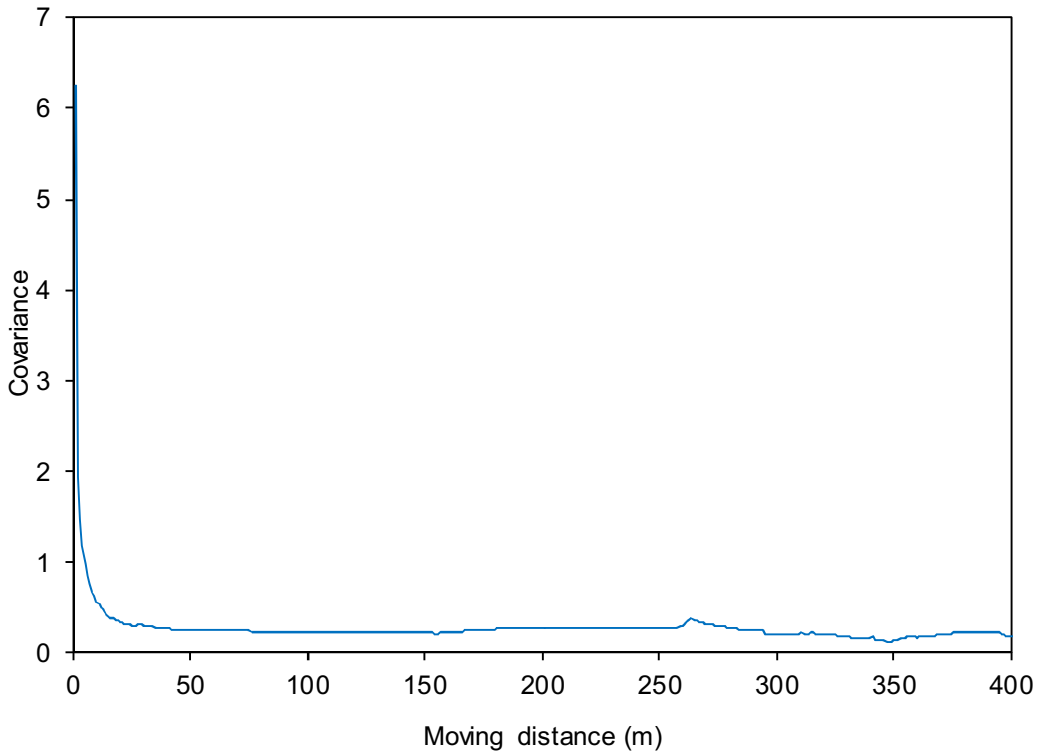

Fig. 16 Covariance of x direction

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

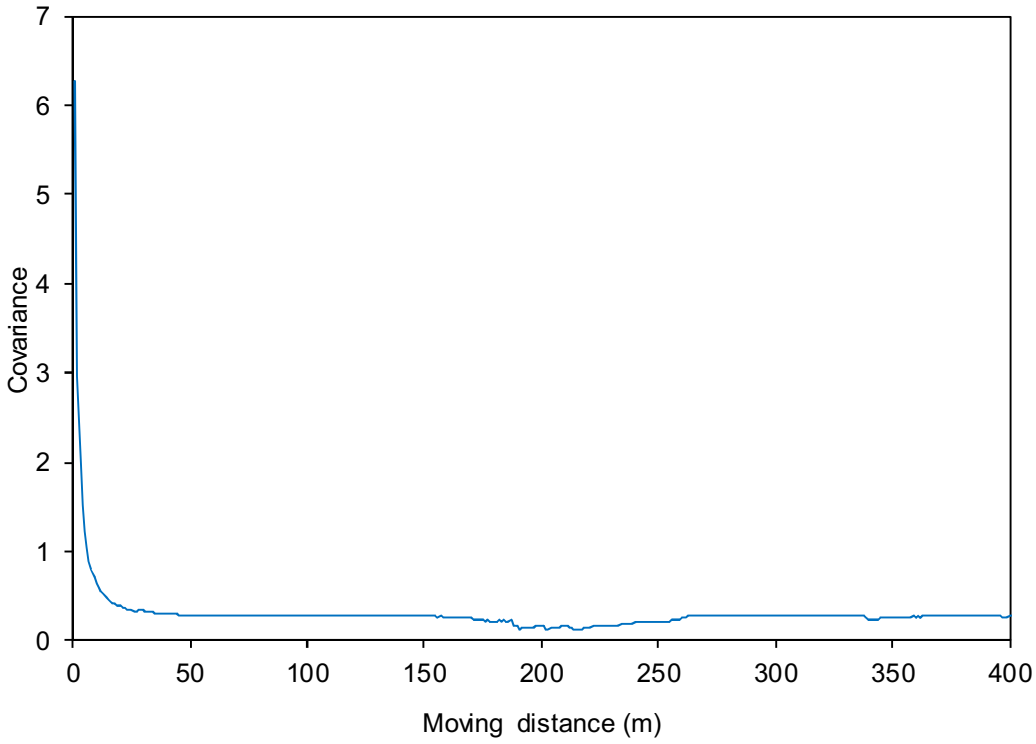

Fig. 17 Covariance of y direction

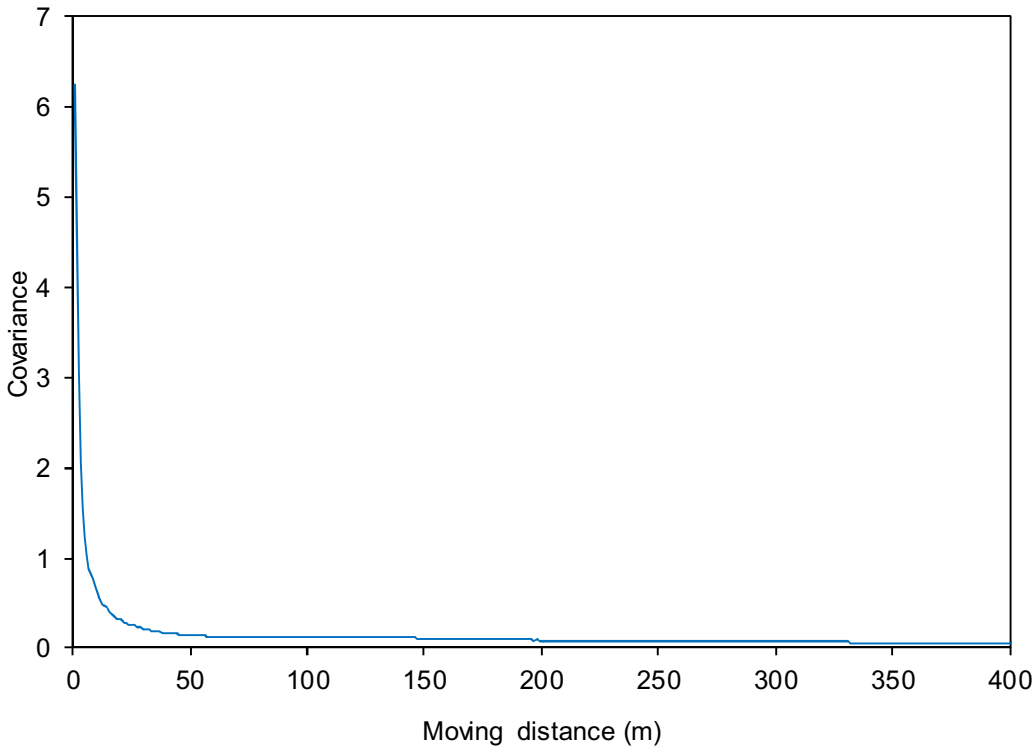

Fig. 18 Covariance of z direction

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

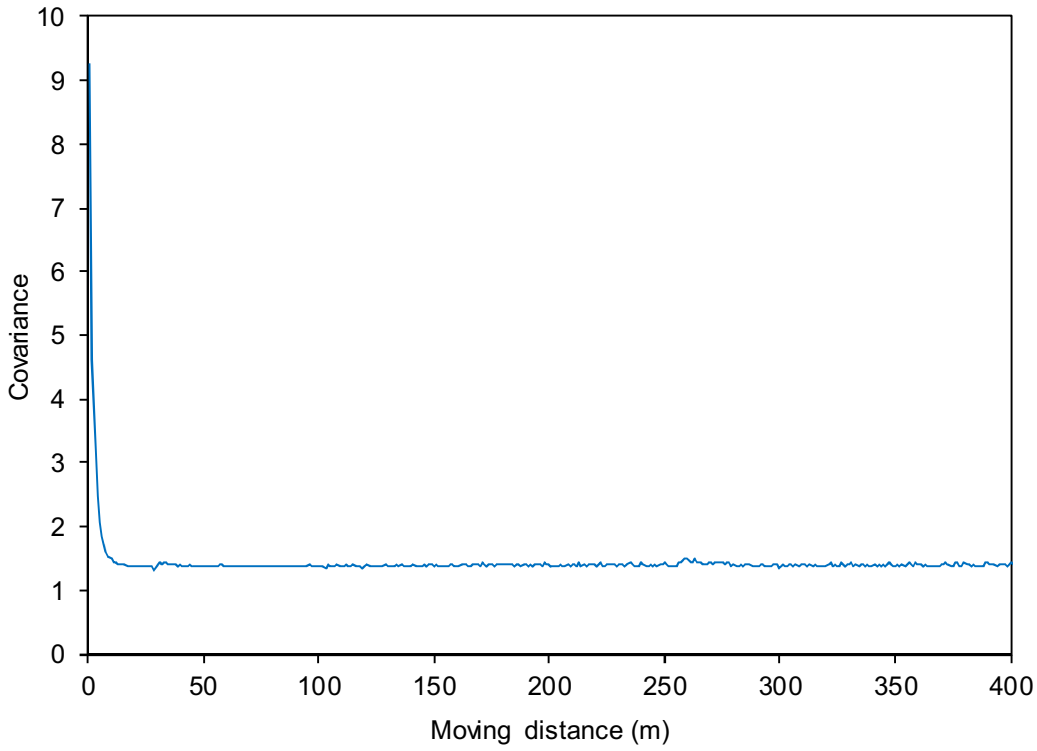

Fig. 19 Covariance of θ direction

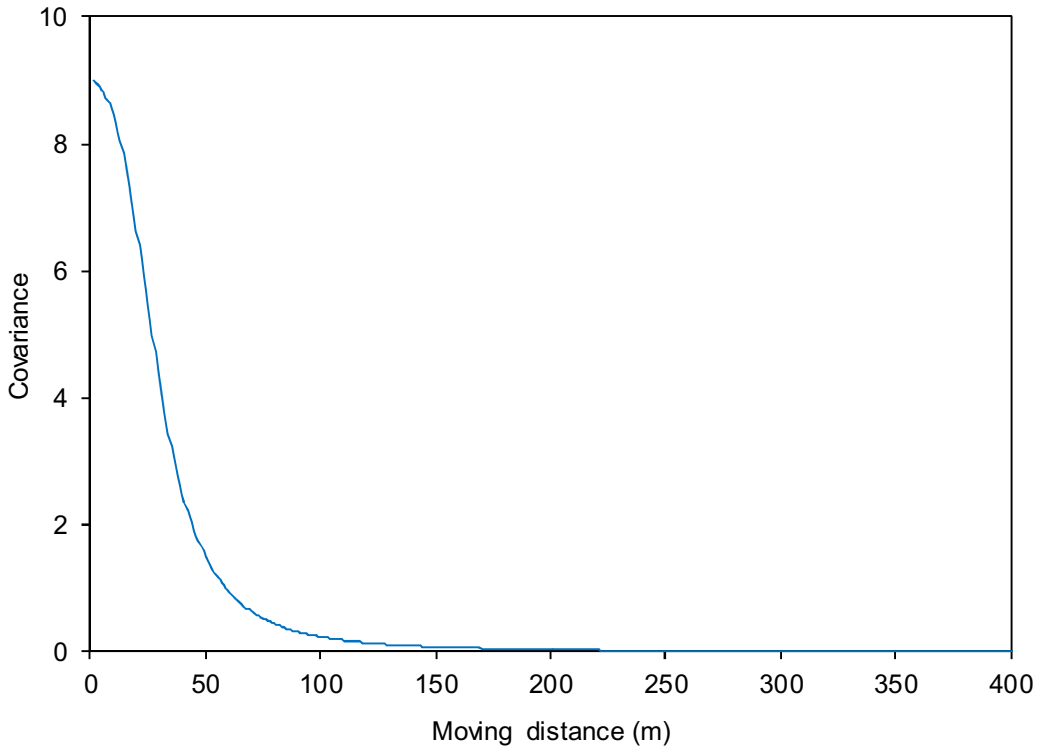

Fig. 20 Covariance of ϕ direction

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.4 초기 오차 크기에 대한 성능 분석

칼만 필터를 이용한 위치평가는 초기 오차에 대한 민감도가 크기 때문에 초기 오차의 크기에 따른 안정성을 확인할 필요가 있다[30]. 이를 위해 각 상태변수 방향의 초기 오차 크기만을 각각 다르게 설정하고 그에 따른 오차 공분산의 변화를 통해 제안된 3차원 위치평가 방법의 초기 오차 크기에 대한 수렴성 및 안정성을 확인하였다. Fig. 21에서 25는 그림에 나타낸 3가지 크기의 초기 오차에 대한 각 방향의 공분산을 나타낸다. 입력된 초기 오차공분산의 성분은 각각 σ_x는 x 방향, σ_y는 y 방향, σ_z는 z 방향, σ_θ는 θ 방향, 그리고 σ_ϕ는 ϕ 방향의 오차 표준편차를 나타낸다. 수렴성을 확실히 나타내기 위해 세로축의 스케일을 0 ~ 10까지로 제한하였으며, 각 결과의 초기값은 입력된 초기 오차의 제곱(오차분산)과 유사한 값이다.

실험 결과 각 오차 공분산은 초기 오차의 크기에 상관없이 주행 초기에 설정된 값으로부터 일정한 값으로 빠르게 수렴하였고 그 이후에는 초기 오차의 크기가 달라짐에도 별다른 변화가 없는 것을 확인하였다. 다만 z 방향은 초기에 수렴하는 과정에서 다른 방향에 비해 부자연스러운 모습을 보이고 있는데, 이것은 앞의 경사센서 특성 분석 실험에서 보여주었던 특성에 비해 과도한 불확실성 범위를 초기 오차로 제공하여 나타난 결과로 판단된다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 센서의 성능에 부합하지 않는 특성을 위치평가 알고리즘에 적용하였을 때 나타나는 성능 저하 문제의 예시라고 볼 수 있다. 그러나 그 현상이 위치 추정에 영향을 미칠 정도로 큰 수준이 아니고 곧바로 빠르게 안정을 되찾고 수렴하고 있다. 전체적으로 z 방향과 ϕ 방향의 공분산이 더욱 안정적으로 나타난 것은 이 두 방향은 정밀도가 높은 경사센서에 연관되어 있기 때문으로 사료된다. 결과적으로 제안된 3차원 위치평가 방법은 초기 오차의 크기에 대해서 안정성을 갖는 것으로 사료된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

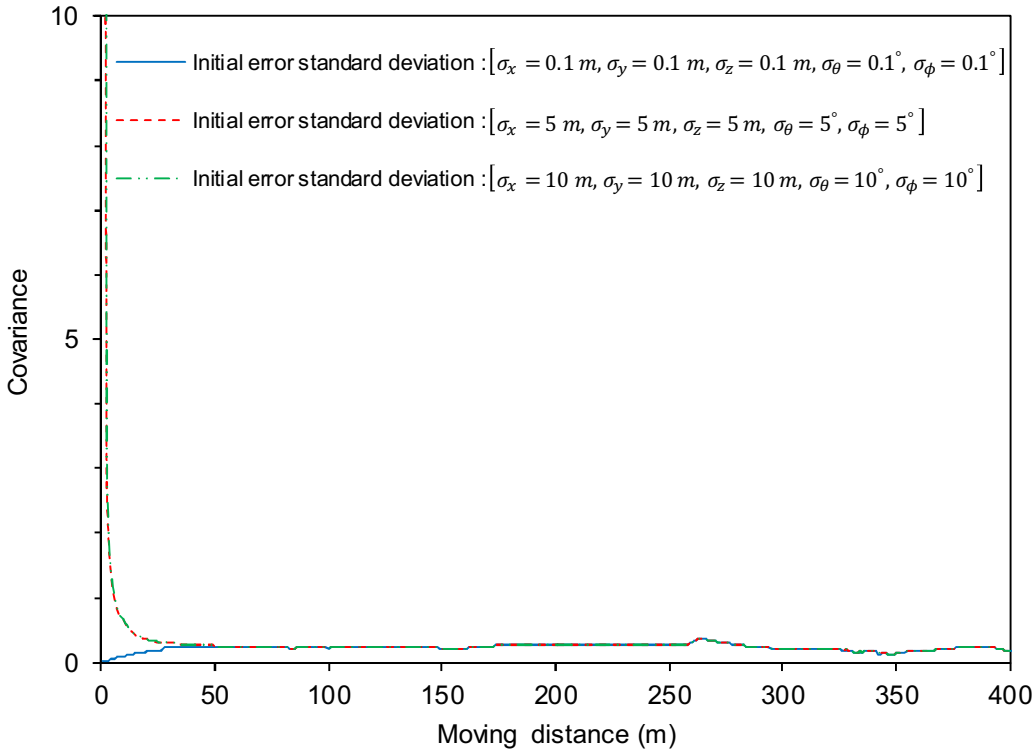

Fig. 21 Covariance according to initial error(x direction)

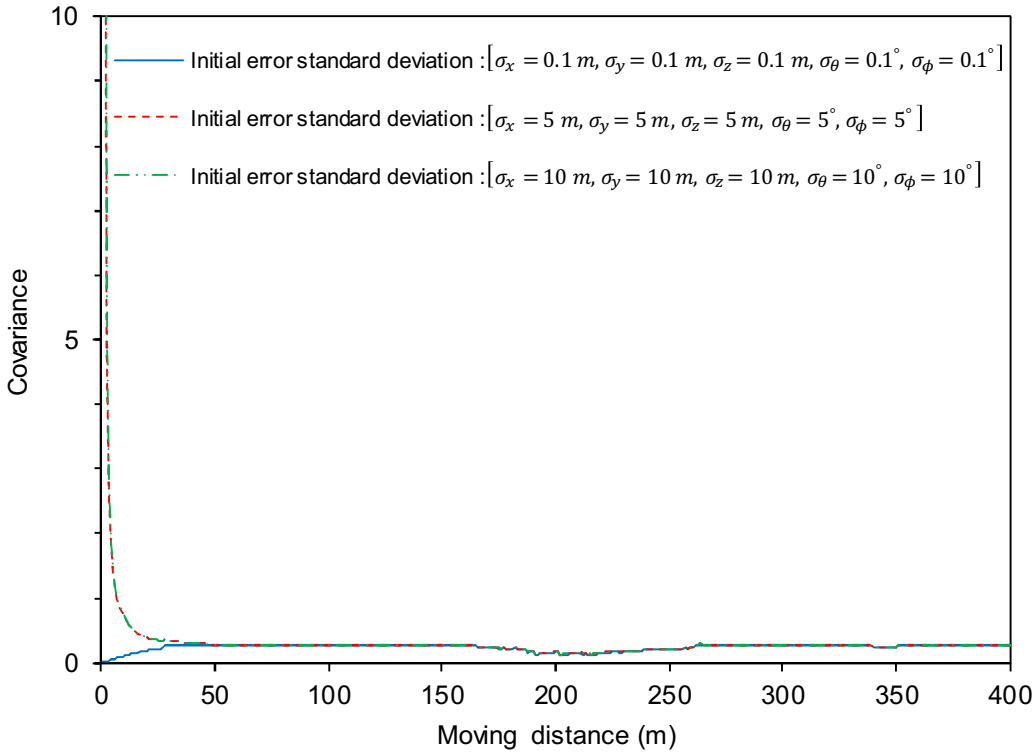

Fig. 22 Covariance according to initial error(y direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

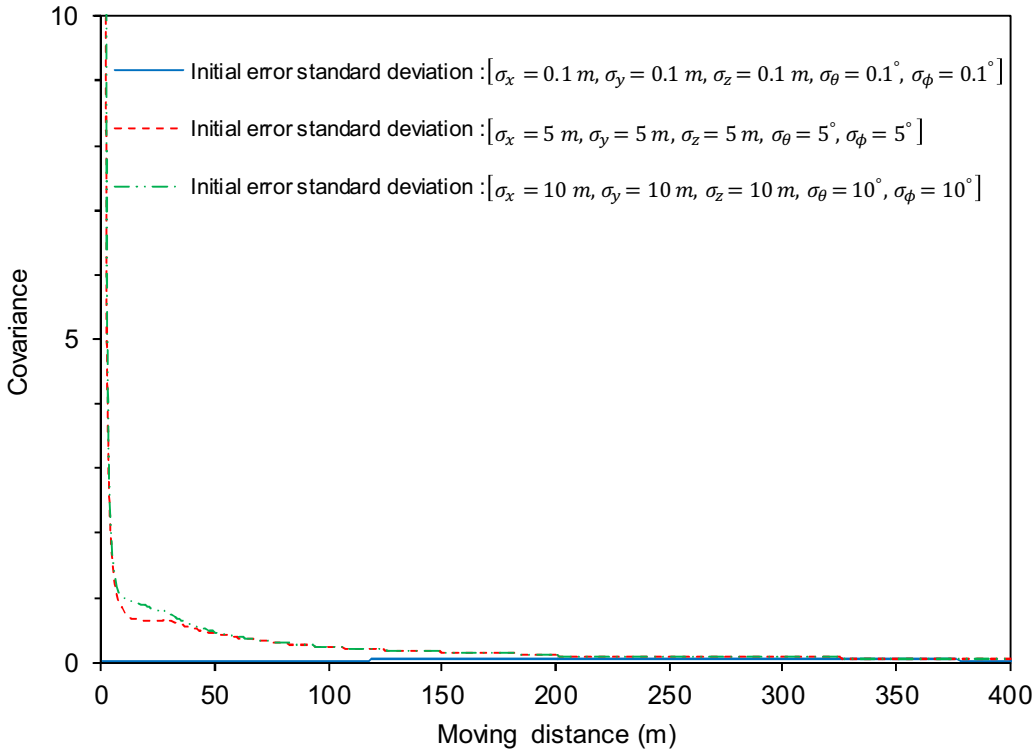

Fig. 23 Covariance according to initial error(z direction)

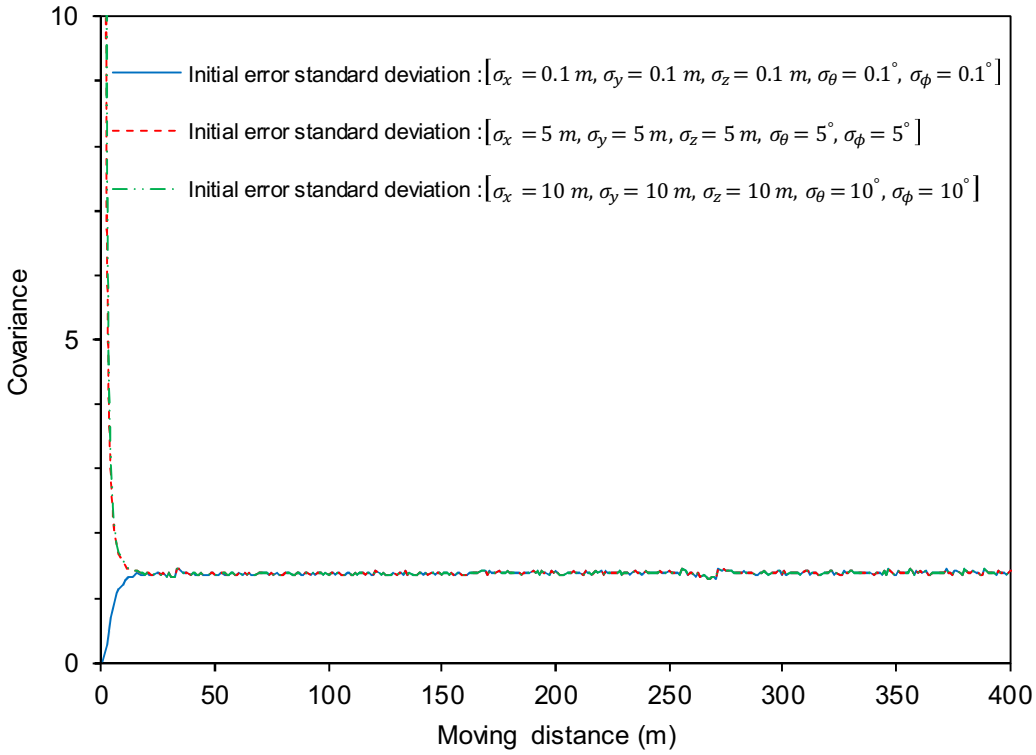

Fig. 24 Covariance according to initial error(θ direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

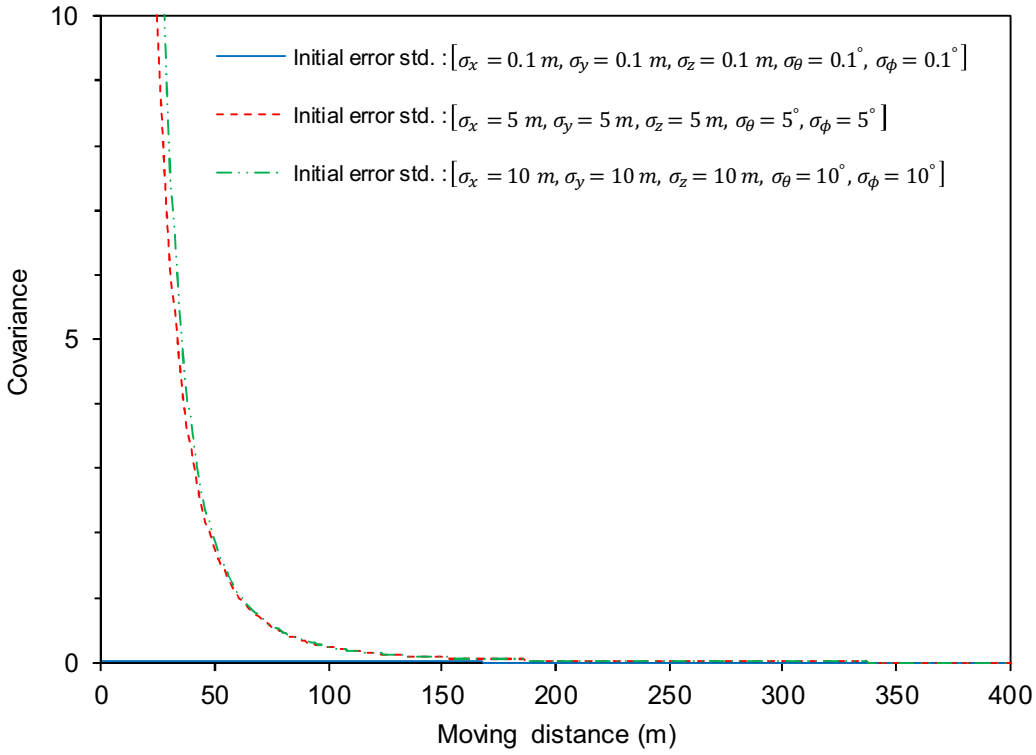

Fig. 25 Covariance according to initial error(ϕ direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.5 관측 주기에 대한 성능 분석

위치평가는 일정한 시간 주기로 측정되는 위치 정보로부터 수행되므로 관측 주기에도 영향을 크게 받는다. 따라서 관측 주기에 따른 성능 및 안정성을 확인하기 위하여 동일한 데이터에 대하여 데이터가 입력되는 관측 주기를 1 초, 5 초, 10 초로 변경하여 그에 따른 오차 공분산의 변화를 확인하였다. 실험 결과는 Fig. 26에서 Fig. 30과 같고, 각각 x 방향, y 방향, z 방향, θ 방향, 그리고 ϕ 방향의 오차 공분산을 나타낸다. 공분산이 수렴하는 값의 확실한 확인을 위해 세로축의 스케일을 0 ~ 10까지로 제한하였다. 입력된 초기 오차는 Fig. 12의 실험과 동일하게 설정하였다.

실험 결과 x, y, 그리고 z 방향의 오차 공분산은 관측 주기가 길어짐에 따라 거의 일정한 비율로 비례하여 수렴하는 값의 크기가 커지고 있다. 특히 z 방향의 오차 공분산은 수렴하는 값이 거의 수평적인 x, y 방향과는 다르게 주행거리에 따라 점차 감소하고 있다. 이것은 Fig. 14의 고도 방향에 대한 위치평가 결과가 경위도 방향에 대한 결과보다 양호한 것과 같이 제안된 방법이 고도 방향에 대한 오차 수렴 안정성이 다른 방향에 비해 높다는 것을 나타내는 결과로 판단된다.

θ 방향의 오차 공분산은 관측 주기가 길어짐에 따라 전체적으로 다른 방향에 비해 높은 오차 범위를 보이고 있다. 이것은 진행 방향에 대한 평가에 있어서 관측 주기가 큰 영향을 미친다는 결과이다. 또한 관측 주기가 1 초에서 5초로 길어질 때보다 5초에서 10초로 길어질 때 증가하는 불확실성의 폭이 작아지고 있는데, 이것은 초기에 설정된 초기 오차의 크기에 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 갑작스럽게 센서로부터 측정값이 제공되지 않는 경우가 발생하는 문제를 대비하기 위해서도 초기 오차의 크기를 적절한 수준으로 설정할 필요가 있을 것으로 사료된다. 반면에 ϕ 방향의 오차 공분산은 관측 주기가 길어짐에 따라 수렴하는 속도에 차이가 있을 뿐이고 수렴하는 값의 크기는 별다른 변화가 없으므로 관측 주기에 대한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 이것은 경사센서의 정확도 및 정밀도가 다른 센서보다 우수하기 때문에 관측 주기가 길어져도 고도 방향은 안정적인 평가가 가능함을 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

결과적으로 제안된 3차원 위치평가는 관측 주기가 길어짐에 따라 전체적으로 오차 범위가 커지고 있지만, 수렴하는 값은 초기 오차의 크기를 적당히 설정한다면 위치 추정 안정성에 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 따라서 제안된 방법은 관측 주기의 크기에 대해서도 어느 정도 안정성을 보인다고 사료된다.

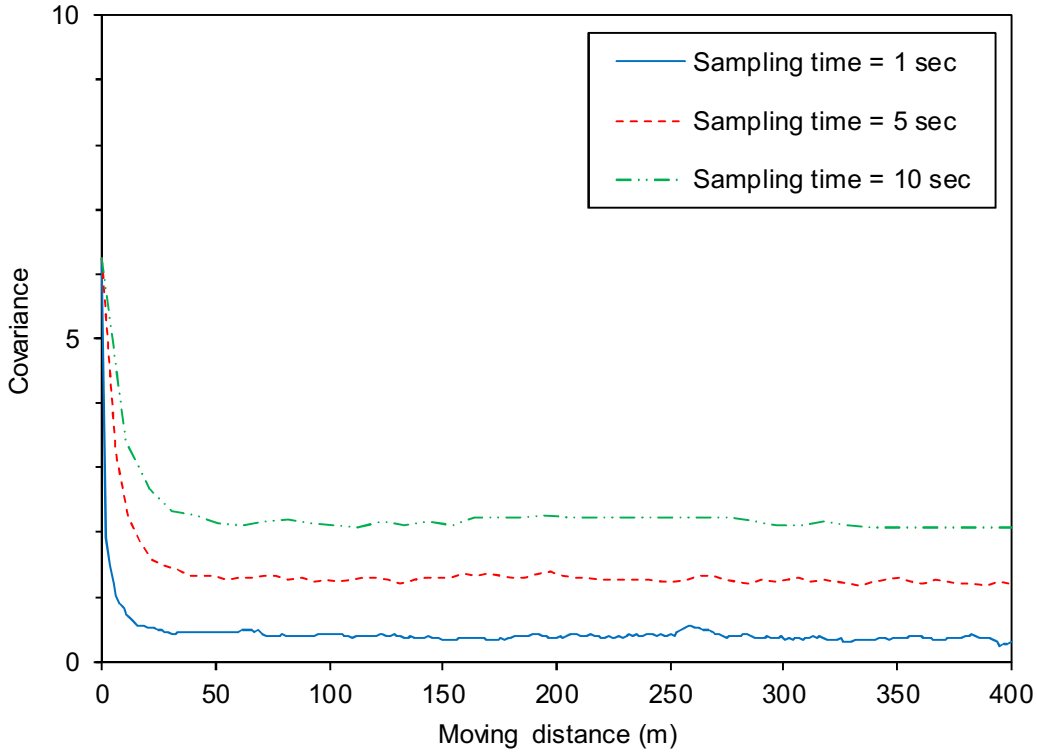

Fig. 26 Covariance according to sampling time(x direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

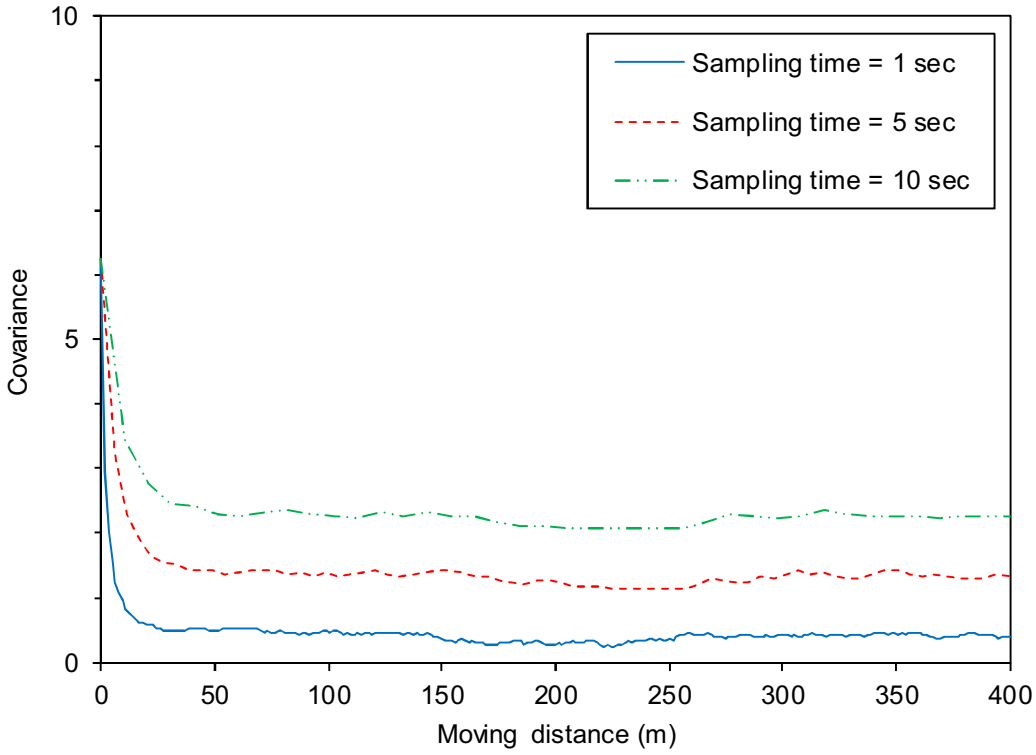

Fig. 27 Covariance according to sampling time(y direction)

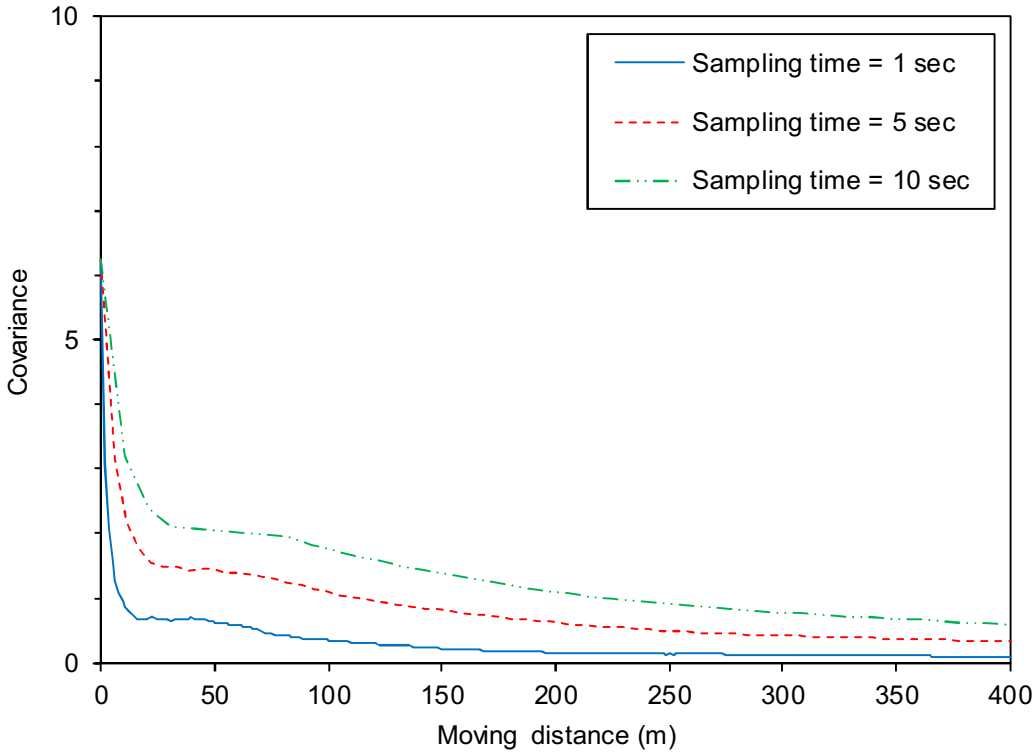

Fig. 28 Covariance according to sampling time(z direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

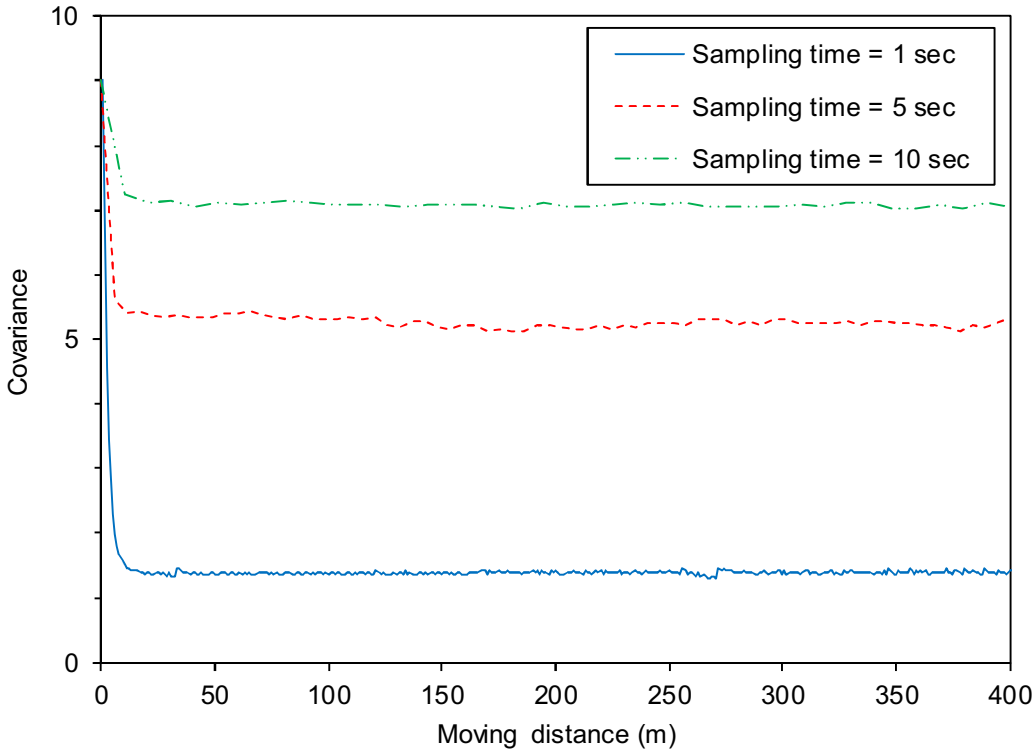

Fig. 29 Covariance according to sampling time(θ direction)

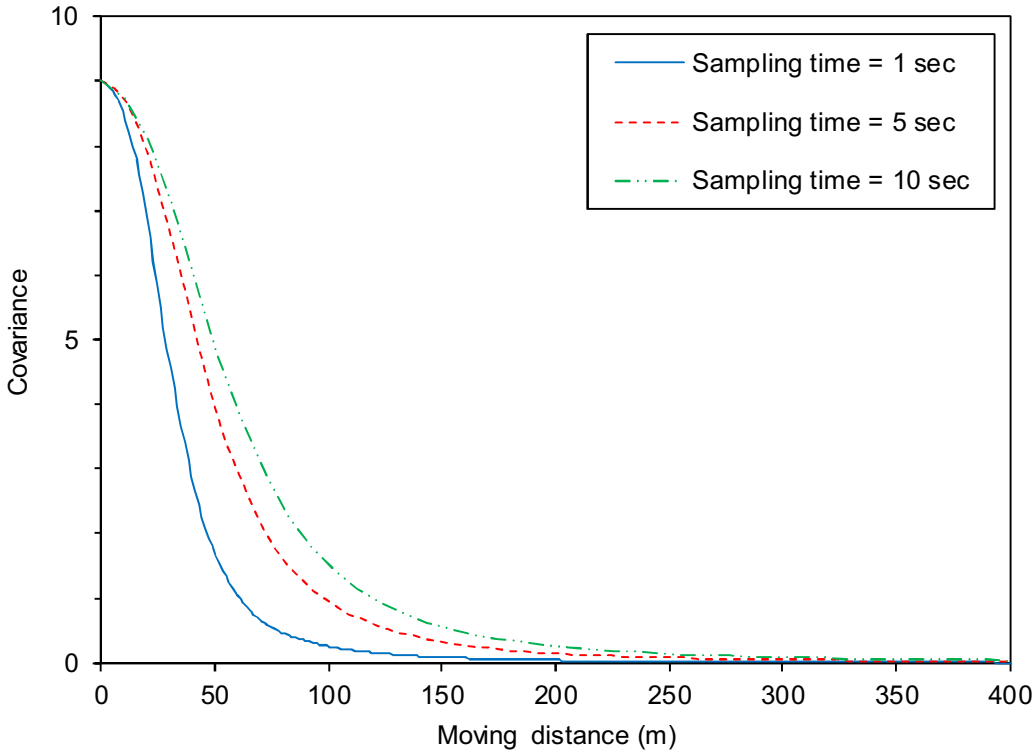

Fig. 30 Covariance according to sampling time(ϕ direction)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.6 2차원 및 3차원 위치평가 비교 분석

제안된 3차원 위치평가 방법의 성능을 기존의 2차원 위치평가와 비교하는 실험을 수행하였다. 비교 실험을 위한 환경은 Fig. 31과 같이 총 주행 거리는 약 1040 m이고 최대 고도차는 약 66 m인 환경이다. 기준경로는 앞에서 3차원 위치평가의 성능평가를 위해 기준경로를 생성한 방법과 동일한 방법으로 14곳의 기준위치를 이용하여 생성하였다. 실험 방법은 리모컨을 이용하여 로봇을 기준경로를 따라 0.6 m/s의 일정한 속도로 주행시켜 로봇 및 센서의 주행 데이터를 획득하고, 동일한 데이터에 대하여 2차원 및 3차원으로 위치평가를 수행하고 그 결과를 비교분석하는 방법으로 수행되었다. 2차원 위치평가는 고도정보가 없으므로 경위도 평면 위치평가 결과만을 비교하였으며, 2차원 위치평가 방법은 참고문헌

Fig. 31 Experimental environment for 2D and 3D localization

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

[31]과 동일한 방법을 사용하였다.

비교실험 결과는 Fig. 32와 같고, 그림에서 굵은 점선 궤적은 2차원 위치평가의 결과, 실선은 제안된 3차원 위치평가의 결과, 그리고 × 표시가 포함된 가는 점선은 정량적 비교를 위한 기준경로를 나타낸다. 실험 결과는 두 방법이 거의 차이가 없게 보이고 있으므로 확실한 비교를 위해 2차원 및 3차원 위치평가의 기준경로에 대한 위치오차를 Fig. 33에 나타내었고, 그에 따른 각각의 위치오차의 오차 특성을 Table 10에 나타냈다. 두 방법의 위치 오차의 차이는 주행 초기부터 100 m 부근까지는 거의 차이가 없지만, 이후부터는 3차원 위치평가가 2차원에 비해 더 양호한 성능을 보이고 있다. 전체적인 오차 특성은 2차원 위치평가의 경우 최대 6.41 m, 평균 1.98 m의 오차를 보이는 반면, 3차원은 최대 4.43 m, 평균 1.77 m의 오차를 보이고 있다. 오차 특성이 Fig.13의 결과보다 떨어지는 것은 실험 경로 상에 여러 가지 장애물로 인해 DGPS와 디지털 컴퍼스에 오차가 비교적 크게 발생했기 때문이다.

두 방법의 위치오차가 주행거리가 길어짐에 따라 차이가 발생하고 있는 것은 고도정보를 고려하였는지에 따른 것이다. 예를 들어 Fig. 34와 같이 로봇이 경사면을 따라 이동한 거리를 d, 경사면의 경사각도를 ϕ라고 하였을 때, 3차원 위치평가에서는 로봇의 수평 이동거리는 $d\cos\phi$가 된다. 그러나 2차원 위치평가에서는 수평 이동거리가 d이고 따라서 2차원과 3차원 위치평가의 오차는 $d(1-\cos\phi)$가 되므로 경사가 심한 환경일수록 그리고 주행거리가 길어질수록 오차가 더 커진다. 따라서 로봇이 급격한 경사가 존재하는 환경에서 장시간 임무를 수행하는 경우에 고도차에 기인한 위치오차는 더욱 커지게 되고 정확한 임무 수행에 치명적이다. 결론적으로 고도정보가 필요한 경우에는 2차원 위치평가는 고도정보를 주지 못하므로 3차원 방법이 필연적이며, 고도정보가 중요하지 아니한 경우에도 급경사가 존재하는 환경이나 장거리 주행이 필요한 경우에는 2차원 위치평가는 오차가 크게 발생할 수 있으므로 3차원 위치평가가 더욱 효과적일 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

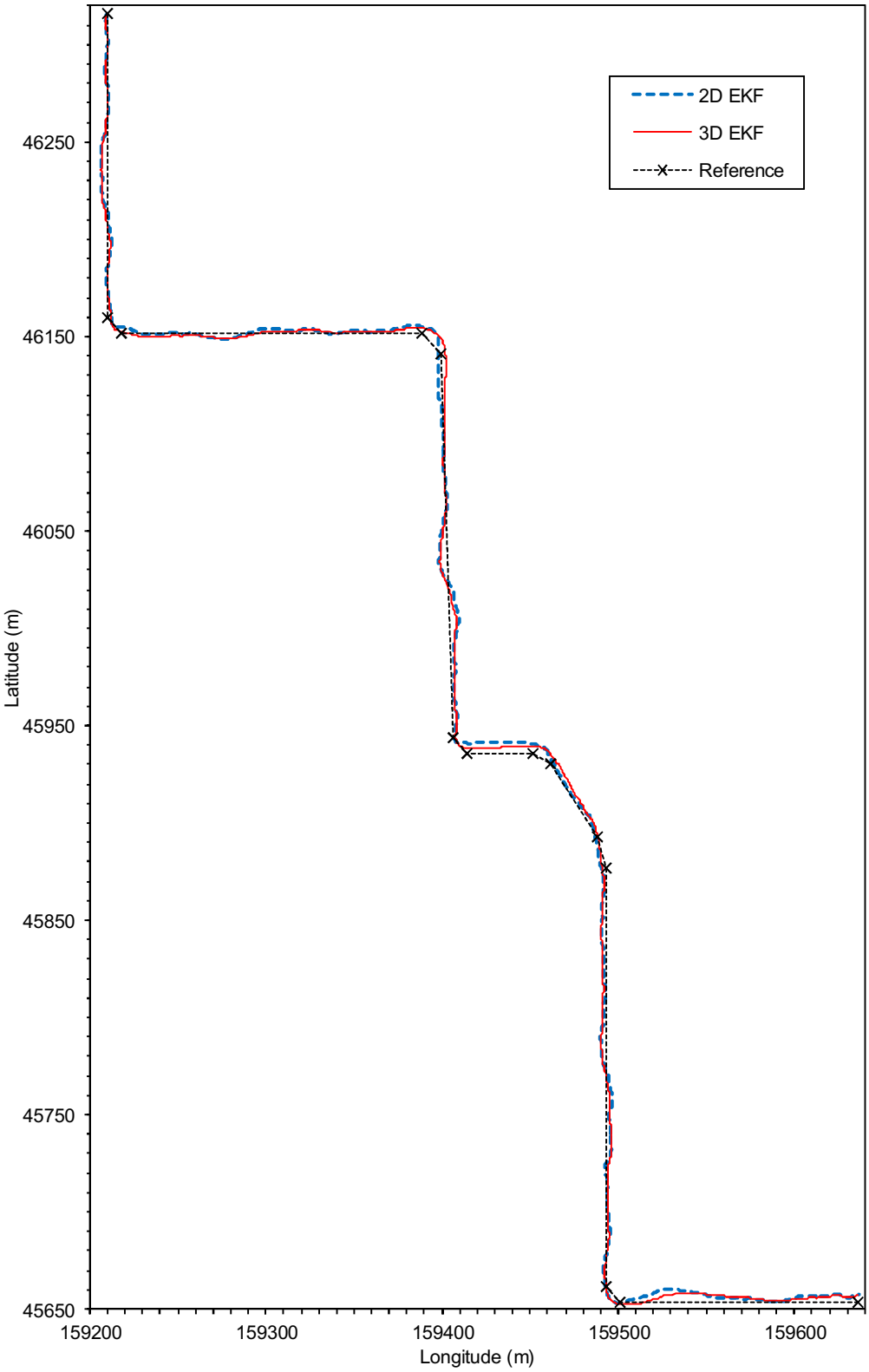

Fig. 32 Comparison of the 2D and 3D localization results

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

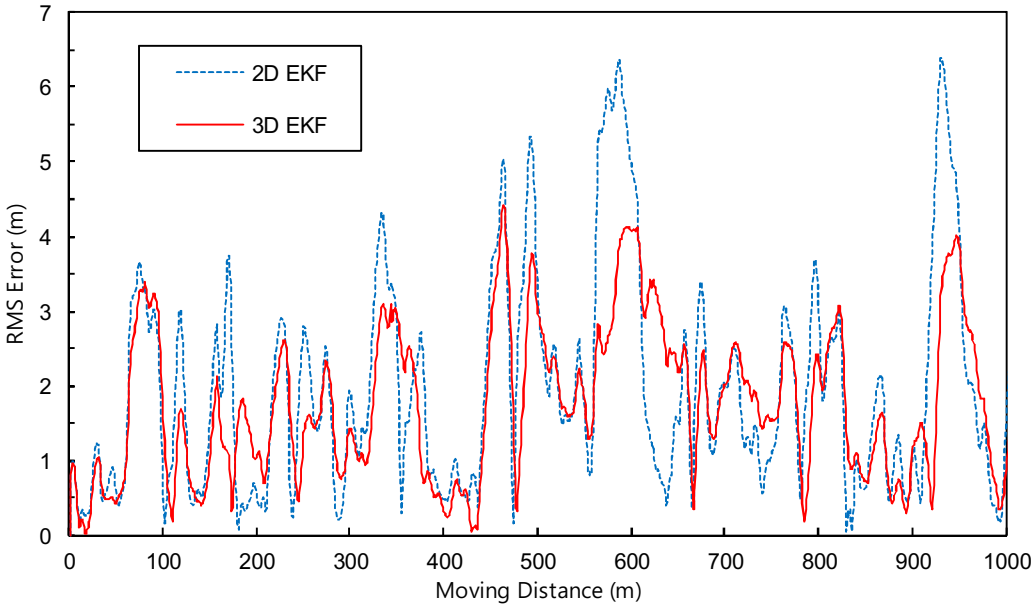

Fig. 33 Comparison of the 2D and 3D localization error

Table 10 Characteristics of the 2D and 3D localization error

Method	Maximum error	Mean error	Standard deviation
2D EKF	6.41 m	1.98 m	1.42 m
3D EKF	4.43 m	1.77 m	1.01 m

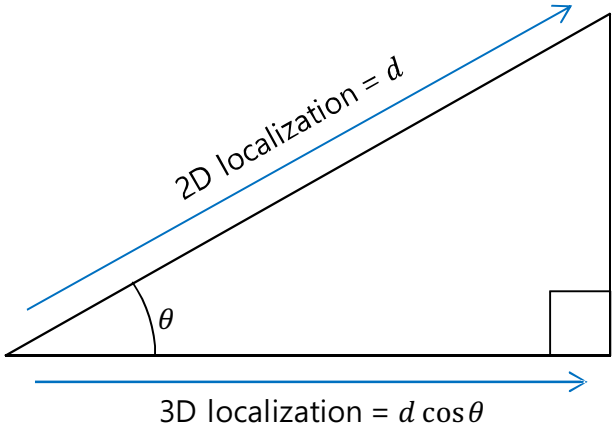

Fig. 34 Effect of slope on 2D and 3D localizations

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

IV. 결론

본 연구에서는 고도차가 존재하는 실외 환경에서 이동로봇의 3차원 위치평가 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 실제 실외 환경에서 그 성능을 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 로봇 바퀴에 장착된 엔코더 및 경사센서의 정보로부터 예측된 로봇의 위치정보, DGPS로 측정된 로봇의 경위도 방향 및 고도 방향으로 이루어진 3차원 위치정보, 그리고 디지털 컴퍼스로 측정된 로봇의 방향정보를 확장 칼만 필터로 융합하는 실외용 이동로봇을 위한 3차원 위치평가 방법을 개발하였다.

2. 제안된 3차원 위치평가 방법을 고도차가 존재하는 실제 환경에서 주행 실험을 통한 성능 평가 결과, 실제 옥외 주행에 충분히 적용 가능할 것으로 확인되었다.

3. 제안된 방법의 오차 공분산을 분석한 결과, ϕ 방향 오차 공분산이 여러 상태 벡터에 연관되어 있어 수렴 속도 측면에서는 다른 방향에 비해 느리게 수렴하지만 모든 방향의 공분산이 주행거리 10 m 이내에서 빠르게 수렴하고 있음을 확인하였다. 따라서 제안된 방법은 안정성 측면에서도 문제가 없는 것으로 확인되었다.

4. 제안된 방법의 초기 오차 크기에 대한 안정성을 확인하기 위해 각 상태변수의 초기 오차 크기에 따른 오차 공분산을 확인해본 결과, 각 오차 공분산은 초기 오차의 크기에 상관없이 주행 초기에 빠르게 수렴하는 것을 확인하였다.

5. 제안된 방법을 관측 주기에 따른 안정성을 확인하기 위해 데이터 관측 주기를 조절하여 위치평가를 수행한 결과 관측 주기가 길어짐에 따라 불확실성 범위가 커지기는 하지만 수렴성에는 문제가 없으므로 관측 주기에 대해서도 안정적임을 확인하였다.

6. 제안된 방법을 기존의 2차원 방법과 비교해본 결과, 주행 초기에는 비슷한 위치평가 결과를 보이지만 주행거리가 길어질수록 두 방법의 성능은 최대 30% 까지 차이가 나게 됨을 확인하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

7. 개발된 방법은 3차원 위치정보가 필요한 다양한 분야에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 기존의 2차원 위치정보가 필요한 분야에서도 더욱 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

V. 참고문헌

[1] Lim, J. H., and Kim, H. J., "Development of an Autonomous Guide Robot for Campus Tour," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 41, No. 6, pp. 543-551, 2017.

[2] Lim, J. H., and Leonard, J. J., "Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 9, pp. 1035-1041, 2000.

[3] Leonard, J. J., and Durrant-White, H. F., "Directed Sonar Sensing For Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publisher, 1992.

[4] Han, J. H., and Ko, N. Y., "UKF Localization of a Mobile Robot in an Indoor Environment and Performance Evaluation," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 25, No. 4, pp. 361-368, 2015.

[5] Buhmann, J., Burgard, W., Cremers, A. B., Fox, D., Hofmann, T., Schneider. F. E., Strikos, J., and Thrun., S., "The Mobile Robot RHINO," AI Magazine, Vol. 16, No. 2, pp. 31-38, 1995.

[6] Lim, J. H., and Kang, C. U., "Grid Based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors," KSME Int. J., Vol. 6, No. 3, pp. 302-309, 2002.

[7] Chae, M. S., and Yang, T. K., "A Study on Precise Localization for Mobile Robot Based on Artificial Landmarks in the Ceiling," The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 9, No. 8, pp. 85-92, 2011.

[8] Ji, Y. H., Yamashita, A., and Asama, H., "Indoor Positioning System Based on Camera Sensor Network for Mobile Localization in Indoor Environment," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 22, No. 11, pp. 952-959, 2016.

[9] Almagbile, A., Wang, J., and Dig, W., "Evaluating the Performances of

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Adaptive Kalman Filter Methods in GPS/INS Integration," Journal of Global Positioning Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 33-40, 2010.

[10] Bikonis, K., and Demkowicz, J., "Data Integration from GPS and Inertial Navigation Systems for Pedestrians in Urban Area," TransNav : International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 7, pp. 401-406, 2013.

[11] Toledo-Moreo, R., Zamora-Izquierdo, M. A., Ubeda-Miarro, B., and Gomez-Skarmeta, A. F., "High-integrity IMM-EKF-based road vehicle navigation with low-cost GPS/SBAS/INS," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 491-551, 2007.

[12] Choi, S. H., Kim, Y. K., Hwang, Y. S., Kim, H. W., and Lee, J. M., "EKF Based Outdoor Positioning System using Multiple GPS Receivers," Journal of Korea Robotics Society, Vol. 8, No. 2, pp. 129-135, 2013.

[13] Kang, B. Y., Han, J. H., and Kwon, J. H., "Analysis of Factors Affecting Performance of Integrated INS/SPR," Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 32, No. 6, pp. 599-606, 2014.

[14] Kim, J. Y., Lee, J. H., Byun, J. M., and Kim, S. H., "Localization Performance Improvement for Mobile Robot using Multiple Sensors in Slope Road," The Institute of Electronics Engineers of Korea - System and Control, Vol. 47, No. 1, pp. 67-75, 2010.

[15] Lim, J. H., and Kang, S. K., "Non-Inertial Sensor-Based Outdoor Localization for Practical Application of Guide Robots," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 315-321, 2017.

[16] Chiang, K. W., and Huang, Y. W., "An intelligent navigator for seamless INS/GPS integrated land vehicle navigation applications," Applied Soft Computing, Vol. 8, pp. 722-733, 2008.

[17] Ohno, K., Tsubouchi, T., Shigematsu, B., Maeyama, S., and Yuta, S.,

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

"Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based on DGPS and Odometry Data Fusion," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1978-1984, 2003.

[18] Agrawal, M., and Konolige, K., "Real-time Localization in Outdoor Environments using Stereo Vision and Inexpensive GPS," Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, pp. 1063-1068, 2006.

[19] Deelertpiboon, C., and Manukid, P., "Fusion of GPS, Compass, and Camera for Localization of an Intelligent Vehicle," International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008.

[20] Kummerlem, R., Triebel, R., Pfaff, P., and Burgard, W., "Monte Carlo Localization in Outdoor Terrains using Multilevel Surface Maps", Journal of Field Robotics, Vol. 25, No. 6, pp. 346-359, 2008.

[21] Limsoonthrkul, S., Dailey, M. N., and Parnichkun, M., "Intelligent Vehicle Localization Using GPS, Compass, and Machine Vision," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.

[22] Ji, Y. H., Bae, J. H., Song, J. B., Ryu, J. K., and Baek, J. H., "Outdoor Localization through GPS Data and Matching of Lane Markers for a Mobile Robot," Journal of Institute of Control, Robotics Systems, Vol. 18, No. 6, pp. 594-600, 2012.

[23] Nagatani, K., Ishida, H., Yamanaka, S. and Tanaka, Y. "Three-dimensional Localization and Mapping for Mobile Robot in Disaster Environments," Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 3112-3117. 2003.

[24] Lai, L. C., Lee, T. L., Fan, H. T. and Wu, C. J, "A Nonlinear Programming Method for 3D Localization of Mobile Robots," Advanced Robotics, 2005. ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on, pp. 250-255, 2005.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

[25] Lim, J. H., "A Study on a Localization System for Tour Guide Robot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 7, pp. 762-769, 2012.

[26] Bouvet, D., and Garcia, G., "Guaranteed 3-D mobile robot localization using an odometer, an automatic theodolite and indistinguishable landmarks," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3612-3617, 2001.

[27] Lim, J. H., Kang, C. W., and Kim, S. K., "A Study on a 3-D Localization of a AUV Based on a Mother Ship," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 74-81, 2005.

[28] Wang, M., Liu, Y., Su, D., Liao, Y., Shi, L., Xu, J., and Miro, V., "Accurate and Real-time 3D Tracking for the Following Robots by Fusing Vision and Ultra-Sonar Information," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 23, No. 3, pp. 997-1006, 2018.

[29] Lim, J. H., and Kang, C. U., "3-D localization of an Autonomous Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 130-135, 2004.

[30] Baek, J. H., Park, S. Y., Park, E. S., Choi, K. H., Lim, H. C., and Park, J. U., "Real-Time Trajectory Estimation of Space Launch Vehicle using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," Journal of Atronomy and Space Science, Vol. 22, No. 4, pp. 501-512, 2005.

[31] Lee, W. S., Cho, I. H. and Lim, J. H., "GPS-Based Human Tracking Methods for Outdoor Robots," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 35, No. 4, pp.413-420, 2018.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

어느덧 대학원에서의 2년이 지나가고 그동안의 노력을 한 편의 논문으로 마무리하고자 합니다. 여기까지 올 수 있었던 것은 저 혼자만의 힘이 아니기에 도와주신 모든 분들께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

가장 먼저 임종환 교수님께 진심으로 감사드립니다. 부족한 제가 연구를 하고 논문을 쓰는 것이 가능했던 것은 전부 교수님께서 지도해주신 덕분입니다. 그리고 제게 있었던 여러 가지 상황 속에서도 무사히 여기까지 도달할 수 있었던 것은 그때마다 교수님께서 신경써주신 덕분입니다. 정말 감사합니다.

부족한 제 논문을 심사해주시고 부족한 부분을 지적해주신 최경현 교수님과 강철웅 교수님께도 감사드립니다. 그리고 연구실 생활이 처음인 저에게 항상 잘 해주고 도움이 필요할 때마다 기꺼이 도와준 연구실의 학생들, 그리고 선배님들에게도 고마운 마음을 전합니다.

아무리 말해도 부족하지만 다시 한 번 저에게 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Curriculum Vitae

NAME : Woo Seok Lee

Education

2017. 3. - 2019. 2. : M.S. in Mechatronics Engineering, Jeju National University.
Thesis Topic : *A Study on the 3D Outdoor Localization of an Intelligent Robot based on Extended Kalman Filter*

2010. 3. - 2016. 2. : B.S. in Mechatronics Engineering, Jeju National University.

PUBLICATIONS

1. Woo Seok Lee, In Ho Cho, and Jong Hwan Lim, "GPS-Based Human Tracking Methods for Outdoor Robots," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 413-420, 2018.
2. Woo Seok Lee, and Jong Hwan Lim, "Unscented Kalman Filter based Outdoor Localization of a Mobile Robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* (accepted and in press).

CONFERENCES

1. Woo Seok Lee, In Ho Cho, and Jong Hwan Lim, "Obstacle Avoidance for Human Following Robot in Outdoor Environment," *한국정밀공학회 춘계학술발표대회 논문집*, pp. 310-311, 2017.
2. Yong Ju Lee, Woo Seok Lee, and Jong Hwan Lim, "Comparison of Robot's Human Tracking Performance according to the Tracking Methods," *대한기계학회 춘추학술대회*, pp. 1231-1234, 2017.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. Woo Seok Lee, and Jong Hwan Lim, "Trajectory Smoothing for Improving the Performance of Human Tracking Robot," *한국정밀공학회 추계학술발표대회 논문집*, pp. 44-45, 2017.
4. Ji Hyun Kim, Woo Seok Lee, and Jong Hwan Lim, "A Study on the Localization Method of Outdoor Mobile Robot Using Unscented Kalman Filter," *한국정밀공학회 춘계학술발표대회 논문집*, pp.56-57, 2018.
6. Woo Seok Lee, and Jong Hwan Lim, "A Study on the 3-D Localization Method for Outdoor Mobile Robot," *대한기계학회 춘추학술대회*, pp. 19-21, 2018.
7. Woo Seok Lee, Su Hee Sea, and Jong Hwan Lim, "Comparison of 2D and 3D Localization for Mobile Robot," *한국정밀공학회 추계학술발표대회*, 2018.

연구실적

1. Unscented Kalman Filter 기반 옥외용 3D Localization 및 인간 추종 기술 개발(한국연구재단 수탁과제, 2017-2019).
2. 풍력발전기 블레이드 상태진단을 위한 3D 프린팅 기반 측정 센서 시스템 개발(한국연구재단 수탁과제, 2017-2018).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY