Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2014) 20(10):1057-1062
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.14.0079 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

지지내접원을 이용한 이동 로봇의 전복 지형 검출 기법

Tip-over Terrain Detection Method based on the Support Inscribed Circle of a Mobile Robot

이 성 민, 박 정 길, 박 재 병*
(Sungmin Lee[1], Jungkil Park[1], and Jaebyung Park[2,*])
[1]Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University
[2]Division of Electronics Engineering and Advanced Electronics and Information Research Center, Chonbuk National University

Abstract: This paper proposes a tip-over detection method for a mobile robot using a support inscribed circle defined as an inscribed circle of a support polygon. A support polygon defined by the contact points between the robot and the terrain is often used to analyze the tip-over. For a robot moving on uneven terrain, if the intersection between the extended line of gravity from the robot's COG and the terrain is inside the support polygon, tip-over will not occur. On the contrary, if the intersection is outside, tip-over will occur. The terrain is detected by using an RGB-D sensor. The terrain is locally modeled as a plane, and thus the normal vector can be obtained at each point on the terrain. The support polygon and the terrain's normal vector are used to detect tip-over. However, tip-over cannot be detected in advance since the support polygon is determined depending on the orientation of the robot. Thus, the support polygon is approximated as its inscribed circle to detect the tip-over regardless of the robot's orientation. To verify the effectiveness of the proposed method, the experiments are carried out using a 4-wheeled robot, ERP-42, with the Xtion RGB-D sensor.

Keywords: tip-over prediction, support inscribed circle, RGB-D sensor, principal component analysis, outdoor environments

I. 서론

최근 우리나라는 농촌 인구 감소와 고령화에 의한 농촌 인력감소에 따라 농업의 공업화가 매우 시급한 상황이다. 따라서 농업용 로봇이 농업을 공업화 할 수 있는 기술로 오래 전부터 주목 받아 왔다. 하지만 농업용 로봇이 오랜 기간 연구 되어 왔음에도 불구하고 국 · 내외 적으로 기술 수준이 높지 않아 실제 실용화 된 사례가 매우 적은 것이 현실이다[1]. 농업용 로봇 연구의 대부분은 시설 농업용이거나 방제 작업 로봇[2], 이양기와 같은 기구적으로 전복이 발생하기 어려운 구조의 로봇에 대한 연구이며, 노지 농업 로봇에 대한 연구는 미흡하다[1]. 따라서 노지 농업로봇을 위한 농업용 로봇 기술 개발의 필요성이 대두 되었다.

노지 농업로봇의 경우 매우 험하고 정형화되지 않은 지형에서 작업하기 때문에 기본적인 임무 수행을 위해서는 로봇이 주변 지형을 인식할 수 있으며[3,4], 주행도중 전복이 발생하는 것을 막을 수 있어야한다. 로봇이 전복될 경우 임무의 실패 및 위험한 상황 그리고 재산적 피해를 발생시킨다[5]. 이는 로봇이 제 기능을 못하는 아주 치명적인 문제이다. 따라서 로봇의 전복을 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 로봇의 전복 예측을 위해서 로봇의 형태를 고려한 지지다각형을 정의하며, 센서로부터 측정된 지형 정보를 이용하여 전복 지형을 검출하는 방법을 제안한다.

지지다각형은 대부분 이동 로봇의 안정적 주행 및 보행 밸런스 그리고 전복 예측을 위해서 이용되어 왔다[6-8]. 본 논문에서도 로봇의 전복 예측을 통한 안정적 주행을 위해서 지지다각형을 이용한다. 이 때 로봇의 방향에 상관없이 전복을 예측할 수 있도록 지지다각형을 등방향성을 갖는 내접원으로 근사화 한다. 근사화된 내접원은 주어진 지형에서 미리 로봇의 전복을 예측할 수 있는 기준이 된다. 이 때 주변 지형을 센서로 측정하여 경사를 구한다. 경사를 구하기 위해 지형의 법선벡터를 사용한다. 여기서 법선벡터를 추정하기 위해 사용한 방법은 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)이다. 이 방법은 이전에 Bellone가 경사(inclination)와 조도(roughness)를 고려한 UPD (Unevenness Point Descriptor)를 이용하여 이동 로봇의 주행 가능 여부를 분석하는데 사용하기도 하였다[9,10].

본 논문에서는 로봇의 지지내접원과 주성분분석을 통해 획득한 지형의 법선벡터를 이용해 전복 지형을 검출한다. 제안한 방법의 효용성을 검증하기 위해 4륜 형태의 이동 로봇 ERP-42를 이용하여 전복 지형 검출 실험을 수행한다.

II. 이동 로봇의 지지다각형

1. 지지다각형의 근사화

본 논문에서 지지다각형은 로봇의 전복을 예측하기 위해 사용된다. 이동 로봇의 무게 중심으로부터 중력방향으로 연

* Corresponding Author
Manuscript received July 9, 2014 / revised July 26, 2014 / accepted July 28, 2014
이성민, 박정길: 전북대학교 전자정보공학부
(leesungmin@jbnu.ac.kr/jungkilpark@jbnu.ac.kr)
박재병: 전북대학교 전자공학부(jbpark@jbnu.ac.kr)
※ 본 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2013R1A1A2012578)과 BK21 플러스 사업에서 지원하여 연구하였음.

Copyright© ICROS 2014

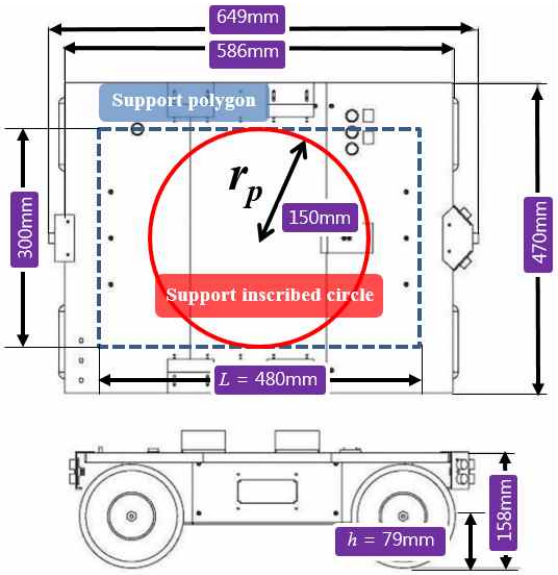


그림 1. 이동 로봇 ERP-42의 지지다각형 및 지지내접원 정의.

Fig. 1. Support polygon and support inscribed circle on the mobile robot ERP-42.

장한 선과 지형의 교차점이 지지다각형 내부에 있을 경우 전복이 발생하지 않는다.

지지다각형은 로봇과 지면 사이에 접촉점들로 형성된다. 따라서 본 논문에서 이용하는 4륜 이동 로봇 ERP-42의 지지다각형은 지면과 4 바퀴의 접촉점을 꼭짓점으로 한 직사각형이 된다. 그림 1에 ERP-42의 지지다각형을 점선으로 표시하였다.

직사각형 형태의 외형을 가진 ERP-42의 경우 앞, 뒤 또는 좌, 우 방향으로 전복이 발생할 수 있기 때문에 방향에 따른 전복 가능성을 고려해야 한다. 이 경우 전복을 예측하기 위해서는 로봇의 위치뿐만 아니라 방향도 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 주행 지형에서 이동 로봇 방향에 영향을 받지 않고 전복을 예측할 수 있도록 그림 1과 같이 직사각형의 지지다각형을 내접원으로 근사화 한다. 내접원으로 근사화 함으로써 지지다각형은 등방향성의 특징을 가지게 된다. 물론 이 경우 지지다각형을 사용할 때보다 전복 예측의 정확성은 감소되지만 전복 방지를 위한 보상 값(offset) 측면에서 보면 적합하다고 볼 수 있다.

여기부터 지지다각형의 근사화 된 내접원을 지지내접원이라 정의한다. 이 때 지지내접원의 반지름 r_p는 150mm이며, ERP-42의 무게중심 높이 h는 79mm이다.

2. 지지내접원과 전복 판별

지지내접원에 기반을 둔 이동 로봇의 전복 판별 방법은 그림 2와 같다. 이동 로봇의 무게중심 높이는 h, 지지내접원의 반지름은 r_p이고 이동 로봇은 정지 상태 또는 등속도로 이동하고 있다. 이동 로봇의 무게 중심으로부터 중력방향으로 그은 연장선이 지지내접원의 반지름 r_p에 위치할 경우를 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} 라 정의한다. 지면에 수직인 방향과 무게 중심의 중력 방향의 연장선 사이의 각을 Θ라 정의 하면 $\Theta>\Theta_{ref}$ 인 경우 전복이 발생하고 $\Theta\leq\Theta_{ref}$ 인 경우 전복이 발생하지 않는다. 이동 로봇의 전복 임계 기준

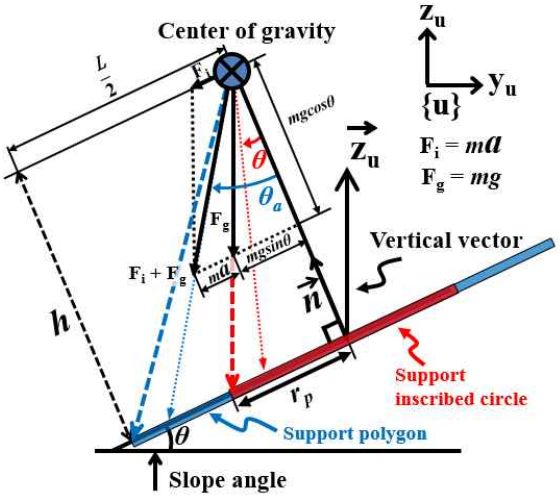


그림 2. 지지내접원과 가속도를 이용한 전복 지형 분석.

Fig. 2. Tip-over terrain analysis using the support inscribed circle and acceleration.

각 Θ_{ref} 는 이동 로봇의 지지내접원의 반지름인 r_p와 무게 중심의 높이 h를 알고 있을 때, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\theta_{ref} = \tan^{-1}\left(\frac{r_p}{h}\right) \tag{1}$$

식 (1)에 지지내접원의 반지름 r_p=150mm와 무게 중심의 높이 h=79mm를 적용하면 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} 가 약 62.3°가 된다. 즉, 가속이 없는 경우 ERP-42는 지형의 경사가 62.3°를 넘으면 전복이 발생함을 알 수 있다.

3. 가속도를 고려한 전복 판별

이동 로봇이 가속도 운동을 할 경우 전복 판별을 위해 보상 영역(offset area)을 고려한다. 보상 영역은 지지다각형에서 지지내접원을 제외한 영역으로 정의하며 그림 3에 격자모양으로 표시되어 있다. 이 때 이동 로봇은 전진하는 경우로 보상 영역은 로봇의 뒤쪽 영역이 된다. 반대로 이동 로봇이 후진하는 경우는 앞쪽 보상 영역을 고려해야 한다.

앞서 II 장 2절에서는 지지내접원으로부터 이동 로봇의 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} 를 정의 했다. 이 경우는 이동 로봇이 정지 상태 또는 등속도일 경우로 가속도는 고려하지

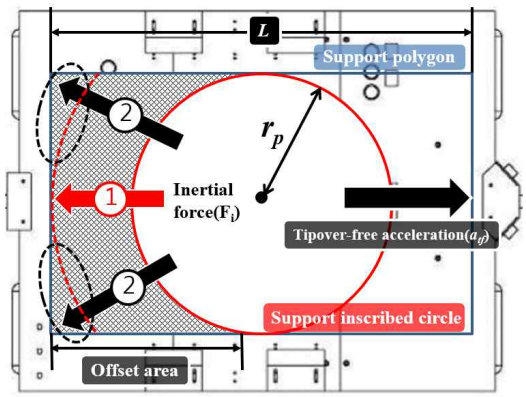


그림 3. 전복이 발생하지 않는 가속도와 보상 영역.

Fig. 3. Tipover-free acceleration and offset area.

않았다. 하지만 이동 로봇이 가속을 하는 경우 관성의 법칙에 의해서 가속 방향과 반대 방향으로 관성력이 작용한다. 즉, 이동 로봇이 가속도 a로 주행을 하면 가속 방향과 반대 방향으로 관성력 $F_i(=ma)$가 작용하게 된다. 따라서 관성력 F_i와 중력 $F_g(=mg)$의 합력으로 작용 힘이 발생한다. 이 때 작용 힘을 고려한 각은 가속도에 영향을 받았으므로 Θ_a라 정의한다. 가속도를 고려한 각 Θ_a는 관성력 F_i과 중력 F_g에 의해서 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$\theta_a = \tan^{-1}\left(\frac{m(a+gsin\theta)}{mgcos\theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{a+gsin\theta}{gcos\theta}\right) \quad (2)$$

이 때 m은 질량이고 g는 중력가속도(9.8m/s^2)이다. 여기서 보상 영역을 고려한 전복 판별 조건은 작용 힘의 연장선이 지지다각형의 길이의 반인 $L/2$ 이내에 있어야 한다. 즉, 로봇이 그림 3의 1번 방향으로 직선운동을 할 경우 Θ_a의 전복 방지 조건은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\tan^{-1}\left(\frac{a+gsin\theta}{gcos\theta}\right) \le \tan^{-1}\left(\frac{L}{2h}\right) \Rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{a+gsin\theta}{gcos\theta}\right) \le \frac{L}{2h} \quad (3)$$

식 (3)을 만족하는 a는 전복이 발생하지 않는 가속도 a_{tf}(tipover-free accleration)이며 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$a_{tf} \le \frac{L}{2h}gcos\theta - gsin\theta \quad (4)$$

식 (4)에서 지지내접원을 고려한 Θ의 조건은 $0 \le \Theta \le \Theta_{ref}$이다. 이 때 h는 79mm이고 L은 480mm이다. 따라서 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} (62.3°)에서 a_{tf}는 $a_{tf} \le 5.18$m/s^{2}가 된다. 즉 경사가 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} (62.3°)인 지형에서 가속도가 5.18m/s^2 보다 크게 되면 전복이 발생한다. 이 결과를 기반으로 전복이 발생하지 않는 가속도와 경사의 관계를 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4로부터 경사가 낮을수록 이동 로봇은 큰 가속도가 허용되고 경사가 높을수록 가속도가 작아짐을 볼 수 있다. ERP-42의 경우 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} 가 62.3°인 지형에서 가속도는 5.18m/s^2 이하까지 가능하며 경사에 따라서 가속도의 크기는 변하게 된다. 이 때 이동 로봇의 방향을 전

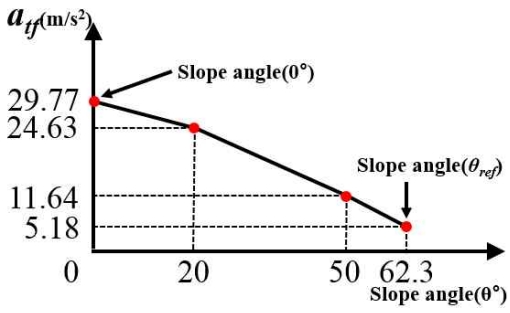


그림 4. 전복이 발생하지 않는 가속도와 경사의 관계.

Fig. 4. The relationship between tipover-free acceleration and slope angle.

환하게 될 경우, 관성력은 그림 3의 방향 2와 같이 확장된다. 방향 1에 비해서 방향 2는 보상 영역이 넓다. 이 경우, 식 (4)의 L이 증가하기 때문에 방향 2는 방향 1에 비해서 전복에 강인하다.

결과적으로 ERP-42는 Θ_{ref} 의 경사 보다 큰 지형에서 주행하거나, 또는 이 지형에서 전복이 발생하지 않는 가속도 a_{tf}보다 빠르게 주행하게 되면 무게 중심의 중력방향 연장선 또는 작용 힘의 연장선이 지지다각형 밖에 위치된다. 이 경우 전복이 발생한다. 따라서 전복방지를 위해서는 가속도를 고려한 작용 힘의 연장선이 지지다각형 내부에 존재해야 한다.

III. 지형 인식

본 장에서는 실제 주행 지형의 정보에 해당하는 경사 Θ를 추정하는 과정을 다룬다. 본 논문에서는 RGB-D 센서인 Xtion Pro Live를 이용하여 경사 Θ를 추정하였다.

1. RGB-D 센서를 이용한 지형 인식

주행 지형을 인식하기 위해 ASUS에서 만든 RGB-D 센서 Xtion Pro Live [11]를 이용했다. 이동 로봇에 사용하기 적합한 Xtion센서는 Microsoft의 Kinect 센서[12]와 기능면으로는 거의 비슷하지만 크기와 전원공급 면에서 강점을 보인다. 전원공급 면에서 보면 Kinect가 기본 12V에서 동작하지만 Xtion은 5V에서 동작되기 때문에 USB로 공급되는 전압으로도 동작이 가능하다.

Xtion의 측정범위는 0.8m~3.5m이며 주변 환경에 따라서 더 먼 거리도 측정가능하다. 시야각은 수평방향으로 58°, 수직방향으로 45°이다. 센서로 측정되는 depth image 크기는 640x480이며, 한 이미지에 30만 7200개의 거리를 측정할 수 있다. 측정된 거리는 점으로 변환이 되어 3차원공간상의 위치를 나타내게 되며, 이렇게 모인 점들은 하나의 점군데이터인 point cloud가 된다. 이렇게 구성된 point cloud를 이용하여 이동 로봇의 주변 지형을 인식한다. 하지만 Xtion은 거리를 측정할 때 적외선을 사용하기 때문에 직사광선의 영향을 많이 받게 되는 단점이 있다. 따라서 야간에 비해서 주간에 지형 인식이 어렵다. Xtion의 기본 사양은 표 1을 통해서 확인할 수 있다.

2. 주성분분석을 이용한 법선벡터 추정

측정된 지형 정보인 point cloud로부터 주성분분석을 이용하여 법선벡터(normal vector)를 추정하였다. 본 논문에서는 법선벡터를 $\vec{n}$로 정의하며 $\vec{n}$은 그림 2에 표시된 것과 같다.

Point cloud는 점들의 집합으로서 실제 주변사물의 표면

표 1. RGB-D 센서 Xtion Pro Live 사양.

Table 1. Specification of RGB-D sensor, Xtion Pro Live.

항목	값
소비전력	2.5W 이하
사용 거리	0.8m ~ 3.5m
가시 범위	58° H, 45° V, 70° D (Horizontal, Vertical, Diagonal)
센서	RGB& Depth& Microphone*2
Depth Image Size	VGA (640x480) : 30 fps QVGA (320x240): 60 fps

점을 의미하기 때문에 표면의 법선벡터를 추정 할 수 있다. 이 방법을 적용하기 위해서 프로그램 Visual studio 2010을 사용하였고 법선벡터를 추정하기 위해서 PCL (Point Cloud Library) [13]를 사용하였다. PCL은 2D/3D이미지와 point cloud 처리를 위한 대규모의 오픈 프로젝트로 필터링, 특징 추정, 표면 재구성 및 분할 등 최신 알고리즘을 포함하고 있다[14].

법선벡터를 추정하기 위한 많은 방법이 있지만 본 논문에서는 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)을 사용한다. 주성분분석은 관련이 있는 데이터의 분산을 줄이기 위해서 관련이 없는 데이터로 기준 축을 변환하여 특징벡터를 재배치하는 방법을 말한다. 이 분석을 3차원에 적용하면 각 축에 대하여 서로 수직인 세 축을 구할 수 있다. 즉, 평면을 나타내는 두 벡터와 평면에 수직인 법선벡터를 구할 수 있다.

주성분분석을 적용하기 위해서는 적용하고자 하는 데이터의 공분산행렬(covariance matrix)과 공분산행렬의 고유벡터(eigenvector)를 구하면 된다. 법선벡터를 구하기 위한 $\boldsymbol{R}^p$의 p차원 데이터 n개가 식 (5)처럼 행렬 X로 주어질 때, 평균벡터는 식 (6)과 같다. 평균벡터로부터 공분산은 식 (7)와 같이 나타낼 수 있고, 공분산행렬은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}\, x_{12} \cdots x_{1p} \\ x_{21}\, x_{22} \cdots x_{2p} \\ \cdots \cdots \\ x_{n1}\, x_{n2} \cdots x_{np} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\overline{X_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ji} \quad (\text{이때, } 1 \le \mathrm{i} \le \mathrm{p}) \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{jk} &= cov(X_j,\, X_k) \\ &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{ij} - \overline{X_j})(X_{ik} - \overline{X_k}) \end{aligned} \tag{7}$$

$$C_x = \begin{bmatrix} \sigma_{11}\, \sigma_{12} \cdots \sigma_{1p} \\ \sigma_{21}\, \sigma_{22} \cdots \sigma_{2p} \\ \cdots \cdots \\ \sigma_{p1}\, \sigma_{p2} \cdots \sigma_{pp} \end{bmatrix} \tag{8}$$

정사각행렬인 C_x에 대하여 스칼라 λ와 열벡터 V가 식 (9)과 같다면, 스칼라인 λ는 고유값(eigenvalue)이 되고 영벡터가 아닌 벡터 V는 고유벡터(eigenvector)가 된다.

$$C_x V = \lambda V \tag{9}$$

고유벡터가 위와 같을 때 구하려하는 법선벡터를 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 3차원 데이터는 고유벡터가 3개가 되며 고유값이 $0 \le \lambda_0 \le \lambda_1 \le \lambda_2$일 경우, 고유값이 가장 작은 λ_0이 법선벡터가 된다[10].

본 논문에서 PCL을 사용해서 법선벡터를 추정한 방식은 COVARIANCE_MATRIX란 방법으로 9개의 이미지를 누적해서 주성분분석으로 법선벡터를 구하는 방식이다[15].

IV. 전복 예측 실험

본 장에서는 지지내접원과 법선벡터를 활용하여 실제 환경에서 전복 예측을 한 실험결과를 제시한다. 적외선을 사용하는 Xtion 센서가 직사광선에 영향을 많이 받기 때문에 본 실험은 직사광선의 영향이 적은 환경을 대상으로 하였다.

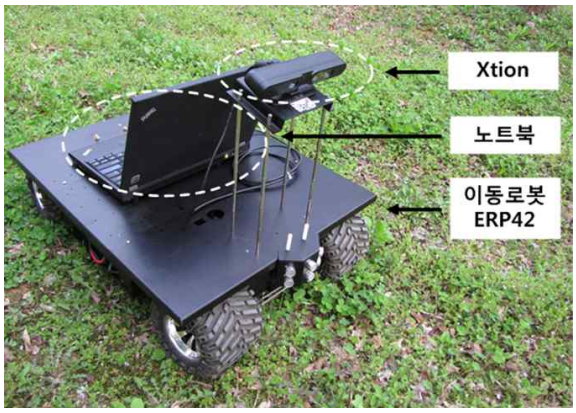


그림 5. 전복 예측을 위한 이동 로봇 구성.

Fig. 5. The mobile robot components for tip-over prediction.

1. 이동 로봇 구성

실험에 사용된 이동 로봇의 구성은 그림 5와 같다. 주변 지형 인식을 위한 Xtion 센서, 센서로부터 받아들인 정보를 처리하기 위한 노트북 그리고 주행을 담당하는 4륜 이동 로봇 ERP-42로 구성된다. 본 실험에서는 전복 예측 부분만을 다루고 있기 때문에 이동 로봇의 주행 부분은 다루지 않는다.

2. 이동 로봇의 전복 예측

이동 로봇의 정적요소인 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} (62.3°)와 법선벡터 $\vec{n}$을 이용하여 이동 로봇의 전복을 예측한다. 먼저 중력과 반대방향인 벡터 $\overrightarrow{Z_u}$와 벡터 $\vec{n}$의 사이각인 Θ를 구한다. Θ는 지형의 경사와 같으며 식 (10)과 같다.

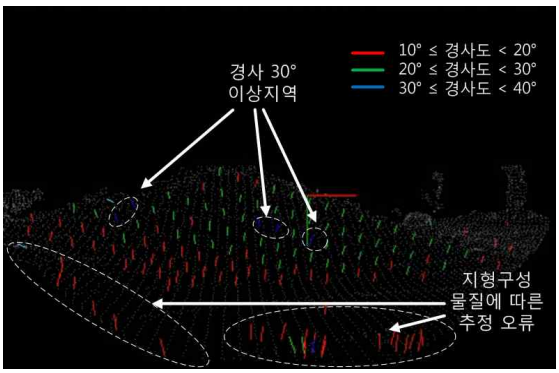
$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{Z_u} \bullet \vec{n}}{|\overrightarrow{Z_u}|\,|\vec{n}|}\right) \tag{10}$$

식 (10)을 통해서 구해진 Θ와 전복 기준 각 Θ_{ref} 를 비교하여 전복을 예측한다. 먼저 Xtion 센서의 지형 인식 신뢰성 확보를 위해 10°에서 50°의 기울기를 갖는 평면을 측정한 결과 2.54° 이하의 오차를 보였다. 따라서 전복 지형 예측에 적합하다고 판단된다.

전복 예측 실험을 위해서 그림 6과 같이 야간에 나무 주변의 경사를 측정했다. 그림 6(b)는 주성분분석으로 지형의 경사부분을 법선벡터로 추정한 결과이다. 실험을 위해 측정하고 있는 지형이 야외이기 때문에 지형을 구성하고 있는 물질의 영향으로, 측정된 데이터로부터 벡터를 추정 할 때 그림 6(b)와 같이 오류가 발생하였다. 그림 6(a)와 같은 지형에서 제안된 방법을 적용하면 이 지형에서는 ERP-42의 전복이 발생하지 않는다. 지형의 최대 경사가 40° 미만이기 때문이다. 즉, 지형이 전복 기준 각 Θ_{ref} (62.3°) 미만인 경사로 되어있기 때문에 전복이 발생하지 않는다.

그림 7은 실내 지형에 대한 전복 예측을 보여준다. 이 실험은 야외에서 없던 경사에 대하여 전복 예측이 가능한지 확인하기 위한 것이다. 실험을 위한 경사지형은 그림

(a)

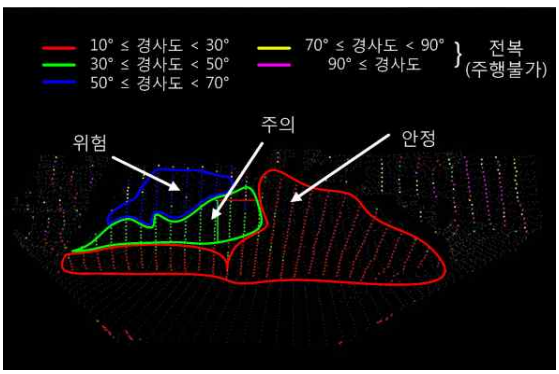


(b)

그림 6. 야외 지형(a)과 전복 예측(b).

Fig. 6. Outdoor terrain(a) and tip-over prediction(b).

(a)



(b)

그림 7. 실내 지형(a)과 전복 예측(b).

Fig. 7. Indoor terrain(a) and tip-over prediction(b).

7(a)와 같이 90° 이내의 경사를 가지도록 구성되었다. 지형의 왼편은 급경사 지역이고 오른편은 비교적 완만한 경사를 가지는 지형이다. 이 지형의 전복 예측결과는 그림 7(b)와 같이 점으로 나타내었다. 이 그림은 그림 6(b)에서와 동일한 방법으로 추정된 법선벡터를 경사도에 따라 색으로 구분하였다. 구분된 점들은 경사에 따라서 안정, 주의, 위험 등 전복의 위험도에 따라 등급으로 분류할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 노지 지형에서 이동 로봇의 지지내접원과 추정된 지형의 법선벡터로부터 전복 지형을 검출하는 방법에 대해 제안하였다. 이동 로봇의 지지다각형은 이동 로봇의 형태를 고려해서 등방향성의 내접원으로 근사화 하였다. 지형을 인식하기 위해서 RGB-D 센서인 Xtion을 이용하였다. 이 때 센서로부터 측정된 데이터처리를 위해서 PCL (Point Cloud Library)을 사용하였다. PCL을 사용하여 point cloud 데이터로부터 법선벡터를 추정할 수 있었다. 법선벡터 추정을 위해 사용한 방법은 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)이고 이를 위해서 공분산행렬(covariance matrix)을 구했다. 공분산행렬의 고유값(eigenvalue)과 고유벡터(eigenvector)로부터 법선벡터를 구할 수 있는데, 가장 작은 고유값에 대한 고유벡터가 법선벡터가 된다. 이렇게 획득된 법선벡터와 중력과 반대방향인 벡터가 이루는 각이 추정된 지형의 경사 Θ가 된다. 이 때 경사 Θ가 이동 로봇의 전복 임계 기준 각 Θ_{ref} 보다 작거나, 이 지형에서 이동 로봇의 가속도가 a_{tf} 보다 작으면 전복이 발생하지 않는다. 실험 결과로부터 지형의 특성을 벡터로 구분 할 수 있었으며, 경사에 따라 지역을 구분하는 것이 가능했다. 그리고 이동 로봇의 가속에 따른 경사와의 관계를 확인할 수 있었다. 제안된 방법을 통해 노지 지형에서 이동 로봇이 방향에 영향을 받지 않고 전복을 예측하여 주행의 안정성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

[1] M. H. Ko, G. C. Kim, B. S. Yoo, and C. H. Kim, "Present and future of agricultural robots," *The Magazine of the Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 9, no. 3, pp. 10-16, Jul. 2012.

[2] G. C. Kim, M. H. Ko, B. S. Yoo, and C. H. Kim "Research and development case of agricultural robots," *The Magazine of the Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 9, no. 3, pp. 17-25, Jul. 2012.

[3] G. C. Kim, J. T. Kim, B. S. Yoo, and S. H. Lee, "Core technology of agricultural robots," *The Magazine of the Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 9, no. 3, pp. 3-9, Jul. 2012.

[4] J. Kim and J. Lee, "Prediction of maneuverability and efficiency for a mobile robot on rough terrain through the development of a testbed for analysis of robot-terrain interaction," *Journal of Korea Robotics Society (in Korean)*, vol. 8, no. 2, pp. 116-128, 2013.

[5] P. R. Roan, A. Burmeister, A. Rahimi, K. Holz, and D. Hooper, "Real-world validation of three tipover algorithms for mobile robots," 2*010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4431-4436, May 2010.

[6] B. H. Kim, "Analysis on effective walking pattern for multi-legged robots," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 1, pp. 622-628, 2009.

[7] M. J. A. Safar, K. Watanabe, S, Maeyama, and I. Nagai, "Tip-over prediction for an omnidirectional mobile robot with dynamic supporting polygon," *SICE Annual Conference*, pp. 149-154, Aug. 2012.

[8] J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow, J. Seron, and A. J. Garcia-Cerezo, "Static tip-over stability analysis for a robotic vehicle with a single-axle trailer on slopes based on altered supporting polygons," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 2, pp. 697-705, Apr. 2013.

[9] M. Bellone, A. Messina, and G. Reina, "A new approach for terrain analysis in mobile robot applications," *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, pp. 225-230, Feb.-Mar. 2013.

[10] M. Bellone, G. Reina, N. I. Giannoccaro, and L Spedicato, "Unevenness point descriptor for terrain analysis in mobile robot applications," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, 2013.

[11] www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/specifications/

[12] http://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx

[13] http://pointclouds.org/

[14] R. B. Rusu and S. Cousins, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1-4, May 2011.

[15] S. Holzer, R. B. Rusu, M. Dixon, S. Gedikli, and N. Navab, "3Adaptive neighborhood selection for real-time surface normal estimation from organized point cloud data using integral images," *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2684-2689, Oct. 2012.

이 성 민

2011년 전북대학교 전자 · 정보공학부 전자공학 학사. 2014년 동 대학원 석사. 2014년~현재 전북대학교 전자 · 정보공학부 전자공학 박사 재학. 관심분야는 로봇 제어, 센서 계측.

박 정 길

2014년 전북대학교 전자 · 정보공학부 전자공학 학사. 2014년~현재 전북대학교 전자 · 정보공학부 전자공학 석사 재학. 관심분야는 SLAM, 로봇 제어.

박 재 병

2000년 성균관대학교 전기 · 전자 및 컴퓨터공학부 학사 졸업. 2002년 서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 석사 졸업. 2006년 서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 박사 졸업. 2006년~2007년 서울대학교 전기 · 컴퓨터공학부 BK21 박사후연구원. 2007년~현재 전북대학교 전자공학부 부교수. 관심분야는 원격이동로봇제어, 다중이동로봇제어, 이동로봇전복회피제어.