

출품번호

3049

제45회 전국학생과학발명품경진대회

지형 변화 윤곽선을
지면에 직접 빛으로 표시해 주는
보행 보조 장치



2024. 7. 4.

출품학생	
지도교원	
출품분야	

[제 목 차 례]

1. 제작 동기	1
가. 제작 동기	1
2. 선행연구 및 이론적 배경	2
가. 선행연구	2
나. 이론적 배경	3
3. 작품 제작 과정	8
가. 지형 변화 감지 알고리즘 구상	8
나. 감지 알고리즘 실행 환경 구축	11
다. 빔프로젝터 사용 실험	11
라. 착용형 장치 설계	12
마. 1차 작품	13
바. 2차 작품	15
사. 3차 작품	17
아. 4차 작품	19
4. 결론 및 추후 발전 방향성	20
가. 결론	20
나. 추후 발전 방향성	20
5. 참고 문헌	21

[그림 차례]

[그림 1] 실제 계단 구분 선 사례	1
[그림 2] 스테레오 비전의 간단한 원리	4
[그림 3] Canny 에지 검출 과정	5
[그림 4] 편향 카메라 모델	6
[그림 5] RANSAC을 이용한 직선 추정 예	7
[그림 6] RANSAC를 이용한 평면 추정 예	7
[그림 7] Morphology gradient를 적용한 이미지	8
[그림 8] Depth Color Map에서 표현 거리를 0~3m로 제한한 경우	8
[그림 9] Depth Color Map에서 표현 거리를 0.3~1.7m로 제한한 경우	9
[그림 10] 지형 변화 감지 알고리즘을 적용한 결과	9
[그림 11] 하향식 계단, 하한 가중치 0, 상한 가중치 30	10
[그림 12] 하향식 계단, 하한 가중치 40, 상한 가중치 80	10
[그림 13] 하향식 계단, 하한 가중치 60, 상한 가중치 100	10
[그림 14] 상향식 계단, 하한 가중치 0, 상한 가중치 30	10
[그림 15] 상향식 계단, 하한 가중치 20, 상한 가중치 40	10
[그림 16] 상향식 계단, 하한 가중치 40, 상한 가중치 60	10
[그림 17] 상향식 계단	10
[그림 18] 하향식 계단	10
[그림 19] 책상 다리	11
[그림 20] 벽 모서리	11
[그림 21] Jetson Nano	11
[그림 22] 빔프로젝터 사용 실험	12
[그림 23] 초기 스테레오 카메라 케이스	12
[그림 24] 초기 빔프로젝터 케이스	12
[그림 25] 변경된 일체형 설계	13
[그림 26] 1차 작품	13
[그림 27] 투영 보정 과정	13
[그림 28] 착용 예시	14
[그림 29] 착용 예시	14
[그림 30] 서랍 표시	14
[그림 31] 의자 다리 표시	14
[그림 32] 벽 모서리 표시	14
[그림 33] 정확한 위치 예	15
[그림 34] 어긋난 위치 예	15

[그림 35] 투사한 패턴 이미지	15
[그림 36] 투사된 모습	15
[그림 37] 캘리브레이션 프로그램	16
[그림 38] 입체적인 환경에서의 캘리브레이션	16
[그림 39] 캘리브레이션 결과	16
[그림 40] 캘리브레이션 결과	16
[그림 41] 캘리브레이션 결과	16
[그림 42] 보정된 Depth map	16
[그림 43] 투영된 영상	16
[그림 44] 보정된 Depth map	16
[그림 45] 투영된 영상	16
[그림 46] 보정되어 투사된 윤곽선	17
[그림 47] 보정 방법을 보완한 윤곽선	17
[그림 48] 3차 작품	18
[그림 49] IMU 센서를 기울이지 않은 상황	18
[그림 50] IMU 센서를 수직으로 기울인 상황	18
[그림 51] 쓰레기통이 잘 검출된 사례	19
[그림 52] 먼 거리에서 검출이 실패한 사례	19
[그림 53] 바닥 평면을 제거한 Depth Map	19
[그림 54] 4차 작품 시험	20

1. 제작 동기

가. 제작 동기

일상생활을 하면서 지면에 주의를 기울이지 않으며 계단을 오르내리다 계단의 수를 착각하고 발을 헛디뎌서 넘어질 뻔한 경험이 잦았다. 그 외에도 문틀이나 의자 다리 등에 발을 부딪치는 경우가 종종 있었다. 이런 경험은 누구나 한 번쯤 있을 법하지만, 시력이 나쁜 사람일수록 이런 경우가 잦지 않을까 하는 생각이 들었다.

정말 시력이 나쁜 사람일수록 발을 헛디뎌거나 부딪히는 일이 잦은지 알아보기 위해 인터넷을 검색하다 저시력 시각장애에 관해 알게 되었다. 시각장애인이란 앞을 전혀 보지 못하는 사람을 떠올리지만, 시각장애도 증상에 따라 다양하게 분류된다는 것을 알게 되었다. 저시력 시각장애는 일상생활에 지장이 가도록 시력이 나빠진 상태로, 전체 시각장애인 중 약 88%를 차지할 정도로 높은 비율을 차지하고 있다. 장애 사실을 모르는 사람이 겉으로 보아서는 큰 불편함이 느껴지지 않을 수 있지만, 계단 모서리에 테이프나 페인트칠 등으로 끝처리를 해 두지 않으면 계단이 잘 보이지 않아 발을 헛디뎌 넘어지는 등 보행 중 여러 안전사고가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하고자 하는 시각장애인의 보행을 보조하는 장치들을 찾아보았지만, 대부분 전맹 시각장애인이 사용할 수 있도록 음성이나 경고음으로 장애물을 안내하는 방식으로, 저시력자들이 시각적 안내를 받을 수 없어 장애물의 위치나 형태를 명확하게 파악하기 힘들다. 저시력자를 위한 장치는 대부분 확대경이나 보정된 디지털 영상을 제공하는 방식이었다. 그러나 확대경은 특정 상황에서 특정 물체밖에 확인할 수 없으며, 디지털 영상을 받는 방식은 휴대전화를 든 상태로 눈앞까지 가져와야 하거나 무겁고 시야가 제한되는 HMD(Head Mounted Display)기기를 착용하고 있어야 한다. 이러한 방식은 보행자의 움직임과 시야를 제한하고, 피로도를 줄 수 있다. 따라서 현재는 보행 보조 장치보다는 눈에 띄는 색의 보도블럭을 사용하거나 길 또는 계단 칸 경계에 구분 선을 그려놓는 방식으로 시각적 안내가 이루어지고 있었다.

저시력자가 더욱 편하게 시각적 보행 안내를 받을 수 있을지 고민하던 중 SF 영화에서 본 안내 홀로그램이 떠올랐다. 만약 보행자가 물체에 가까이 다가갔을 때 그 물체 근처에서 홀로그램과 같은 빛이 나타나게 한다면 저시력자도 시각적으로 정확하게 물체의 크기나 위치를 파악할 수 있을 것이고, 기존 길 또는 계단의 구분 선과 같은 역할을 할 수 있을 것이다. SF 영화와 같이 실제 홀로그램을 구현하는 것에는 현재 기술로 한계가 있지만, 3D카메라를 사용하여 공간을 정확하게 파악한 뒤 이에 맞춰 빔프로젝터로 영상을 투사한다면 이를 비슷하게 구현할 수 있을 것으로 기대하여 본 발명품을 제작하게 되었다.



[그림 1] 실제 계단 구분 선 사례

2. 선행연구 및 이론적 배경

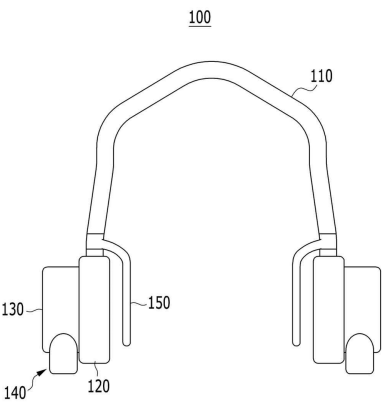
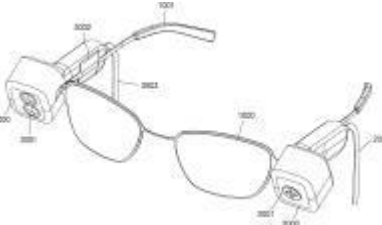
가. 선행연구

현재 작품을 제작하기 전에 국립중앙과학관, KIPRIS 특허정보검색서비스, 그리고 DBpia, KISS 논문 검색을 이용하여 유사 제품을 조사하였다.

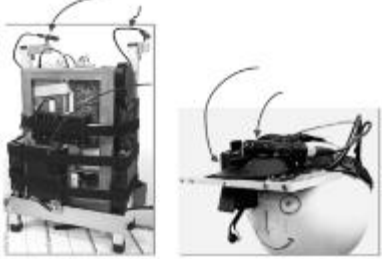
1) 국립중앙과학관 검색

작품명	설명	차이점
시각 장애인용 보행 보조기	초음파 센서를 사용하여 물체와의 거리를 측정하고, 이를 소리로 환산하는 벨트형 장치	초음파 센서를 사용하여 물체의 형태를 구별하지 못한다. 따라서 시각적 안내 또한 제공할 수 없다.
파킨슨 환자 보행 보조 가이던스	보행을 쉽게 할 수 있도록 지면에 레이저 패턴으로 보행을 보조	레이저가 고정되어 항상 같은 곳만 패턴을 표시하여 장애물을 감지하지 않는다.

2) KIPRIS 검색

특허명	설명	차이점
라이다를 이용하는 무선 헤드셋, 보행 보조 시스템 및 보행 보조 제어 방법 출원번호 : 1020160146728	 라이다를 사용하여 지면을 조사하고, 장애물이 탐지되었을 때 소리로 안내한다.	3차원 정보를 활용하여 장애물을 감지하지만, 장애물의 안내를 소리로만 안내하고, 시각적 정보를 제공하지 않는다.
시각장애인 및 저시력자를 위한 보행보조정보를 제공하는 보행보조장치 출원번호: 1020210167154	 라이다 및 카메라를 사용하여 객체를 식별하고, 객체와의 충돌 위험성을 판단하여 도로의 형태, 방향 등을 소리로 안내한다.	

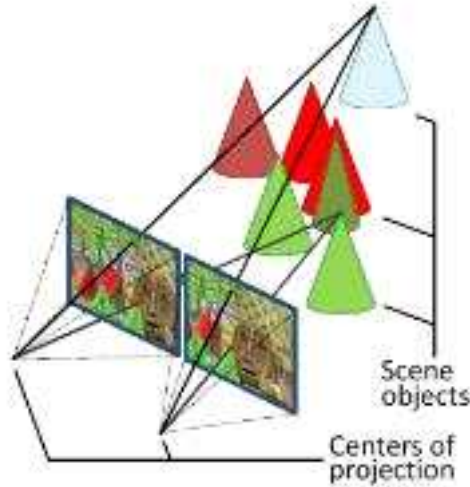
3) 연구 논문 검색

논문명	설명	차이점
강성훈, and 이성환. “시각 장애인을 위한 착용형 컴퓨터 시각 기술.” 한국뇌학회지 1.1 (2001): 127-137.	 이미지를 인식하고 윤곽선을 검출한 후, 윤곽선으로 보행자의 진행 방향을 예측하여 진행 방향 위를 스테레오 카메라를 통해 조사하여 장애물의 위치를 파악한다. 장애물의 위치와 부딪히지 않는 경로를 안내한다.	일부 특징점에서만 3차원 공간 정보를 추출한다. 시각적 정보를 제공하지 않는다.
양호준, 장석우, 박준수, 김종구, and 권장우, “시각장애인을 위한 딥러닝 기반의 실시간 임베디드 보조 시스템 개발에 관한 연구,” 재활복지공학회논문지, vol. 16, no. 1, pp. 27-36, 2022, doi: 10.21288/resko.2022.16.1.27	 이미지에서 객체 인식 알고리즘을 사용하여 물체를 감지하고, 물체와의 거리와 방향을 스테레오 카메라를 통해 추정하고 이를 음성으로 안내한다.	객체 인식은 사물을 정확하게 파악할 수 있으나 학습되지 않은 형태를 감지하지 못해 복잡한 지형은 감지하기 힘들 수 있다. 시각적 정보를 제공하지 않는다.

나. 이론적 배경

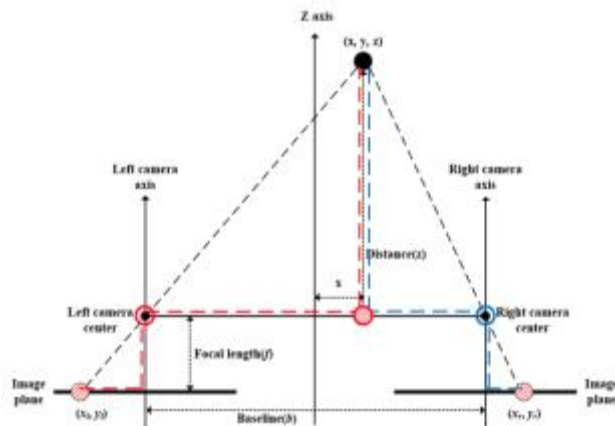
1) 스테레오 Depth 카메라

스테레오 비전이란 카메라로 인간의 시각 시스템을 모방하여 거리 정보가 포함된 이미지를 생성하는 기술이다. 인간이 두 눈으로 각각 이미지를 읽어드리고, 두 이미지에서 발생한 시차(disparity)의 크기를 바탕으로 거리를 파악한다. 스테레오 비전 시스템 또한 두 대 이상의 카메라를 사용하여 이미지를 촬영하고, 이미지들 사이의 시차 정보를 바탕으로 깊이를 추정하는 시스템이다.



[그림 2] 스테레오 비전의 간단한 원리

거리를 추정하는 과정에는 시차(Disparity), 초점거리(focal length), 베이스라인(Baseline) 정보가 필요하다. 여기서 베이스라인이란 이미지를 촬영하는 두 카메라 사이의 간격을 의미한다. 동일한 초점거리를 가진 두 카메라가 한 직선 위에 놓여 같은 방향을 바라본다고 가정했을 때 다음과 같이 깊이 정보가 시차, 초점거리, 베이스라인에 대한 식으로 나타난다.



$$x_l \cdot z = f \left(x + \frac{b}{2} \right) \quad x_r \cdot z = f \left(x - \frac{b}{2} \right)$$

$$z = \frac{b \cdot f}{(x_l - x_r)} = \frac{b \cdot f}{d}$$

[수식 1] 깊이 추정 식

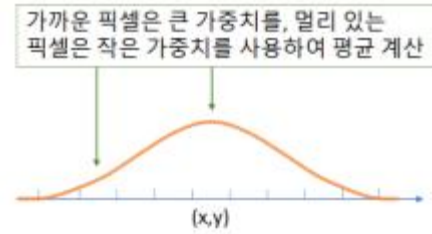
이때 카메라의 초점거리와 베이스라인은 카메라에 대해 변하지 않는 값이므로 시차를 사용하여 3차원 거리를 구하게 된다.

2) Canny Edge Detection

윤곽선 검출(edge detection)은 디지털 이미지에서 밝기가 급변하는 경계선을 찾는 기법이다. Canny Edge Detection은 윤곽선을 정확하게 검출하고 표현하며, 두껍지 않고 선명한 단일 에지를 생성하기 위한 다단계 알고리즘이다. Canny Edge Detection은 4단계를 거쳐 진행된다. 가장 먼저 노이즈를 제거하기 위해 가우시안 필터링 과정을 거친다. 가우시안 필터링은 일반 블러(blur)와 비슷하게 이미지를 흐릿하게 만들지만, 주변 픽셀과의 거리에 따라서 가중치를 조절하기 때문에 가장자리의 형태를 유지하면서 노이즈를 제거하는 비선형 필터이다.

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

[수식 2] 가우시안 필터



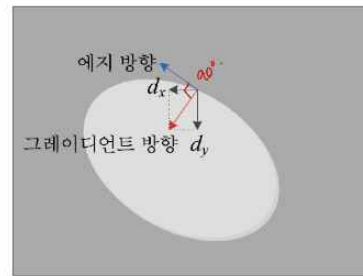
가우시안 필터를 적용한 이미지는 그래디언트 계산 과정을 거치게 된다. 그래디언트는 2차원에서 모든 방향으로의 순간 변화율을 계산한 것이다. 그래디언트의 크기가 큰 것은 픽셀과 밝기 변화가 크다는 것을 의미하므로 큰 그래디언트 값을 가지는 픽셀을 외곽선을 구성하는 픽셀로 선정한다.

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

$$G[f(x, y)] = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

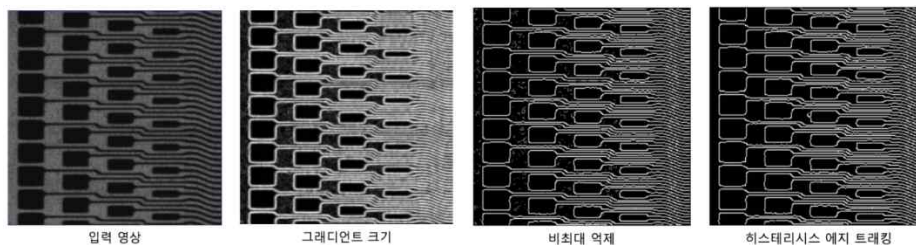
[수식 3] 그래디언트의 크기와 각도



(a) 에지 방향과 그래디언트 방향

이후 외곽선이 두껍고 지저분하게 그려지는 것을 방지하기 위해 인접한 픽셀 중 그래디언트 방향의 픽셀 중 가장 그래디언트의 크기가 큰 픽셀만 외곽선의 픽셀로 선정한다. 비최대 억제 (Non maximum suppression)로 부르는 이 과정을 거치면 에지 방향을 따라 얇은 외곽선이 형성되게 된다.

마지막으로, 조명과 같은 변인으로 인해 영상의 그래디언트 값이 달라져 연속성이 끊어지거나 원하지 않는 장소에 에지가 그려지는 경우를 고려하는데, 이는 상한 임계값과 하한 임계값을 지정하여 해결한다. 상한 임계값 이상의 그래디언트 값을 가지는 픽셀은 강한 에지로 분류하고, 하한 임계값 이하의 그래디언트 값을 가지는 픽셀은 에지로 분류하지 않아 외곽선을 형성하는 과정에 포함하지 않는다. 상한 임계값과 하한 임계값 사이의 그래디언트 값을 가진 픽셀은 다른 변인의 영향을 받아 그래디언트 값이 낮아졌을 때를 대비하여, 만약 주변에 강한 에지가 있다면 변인의 영향을 받았다고 판단하여 에지로 분류한다. 이 과정을 히스테리시스 에지 트래킹(Hysteresis edge tracking)이라 한다.



[그림 3] Canny 에지 검출 과정

3) 양방향 필터

양방향 필터는 이미지의 가장자리를 더욱 보전하면서 노이즈를 줄이기 위해 두 개의 가우시안 함수 곱으로 구성된 필터이다. 기존 가우시안 필터가 전체 이미지 내에서 픽셀 사이의 거리에 따라서 가중치를 지정했다면, 양방향 필터는 픽셀 사이의 거리를 고려하면서 인접한 픽셀 사이의 픽셀값을 고려하여 가중치를 지정하는 필터이다.

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} \overset{\text{not new}}{G_{\sigma_s}(\|p - q\|)} \overset{\text{new}}{G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|)} I_q$$

normalization factor
space weight
range weight

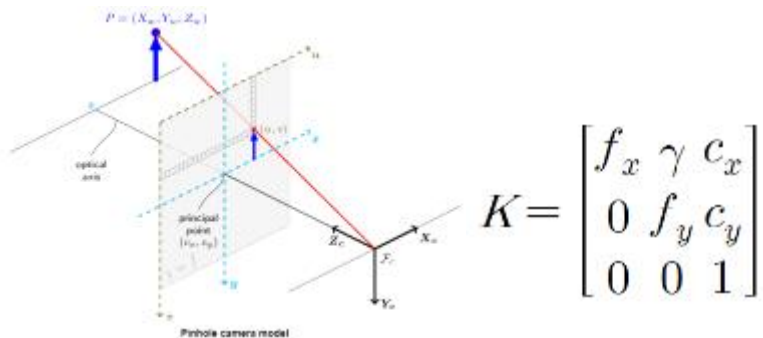
[수식 4] 양방향 필터

4) 핀홀 카메라 모델

카메라 영상은 3차원 공간상의 점들을 2차원 영상에 투영하여 얻는다. 핀홀 모델에서 투영 평면은 광학 중심에서의 거리 f (초점거리)에 배치된다. 따라서 빛이 굴절되지 않고, 투영 평면의 반전을 생각하지 않는다고 가정했을 때, 투영 평면 내의 점은 간단한 삼각비를 사용하면 구할 수 있다. 핀홀 모델에서의 3차원 공간과 2차원 영상의 변환 관계는 $x = f \frac{X_c}{Z_c}$ $y = f \frac{Y_c}{Z_c}$ 으로 나

타낼 수 있다. 이 변환 관계를 행렬로 정리하였을 때 $\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$ 의 꼴을 띄게 된다. 이

상태에서 카메라 센서의 기울기와 광학 중심을 고려하면 카메라 내부행렬을 구할 수 있다.



[그림 4] 핀홀 카메라 모델

[수식 5] 카메라 내부행렬

카메라에서 측정한 3차원 좌표계의 점과 실세계 좌표계의 변환 관계는 회전과 이동으로 나타내는 카메라 외부 행렬로 나타내게 되며, 카메라 내부 행렬과 외부 행렬을 하나의 변환 행렬로

나타내어 사용할 수 있다.

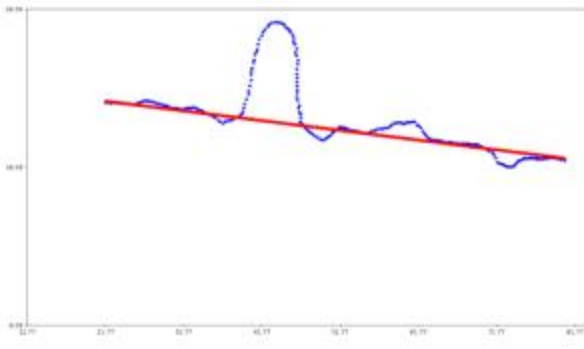
$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \text{skew_cf}_x & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= A[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

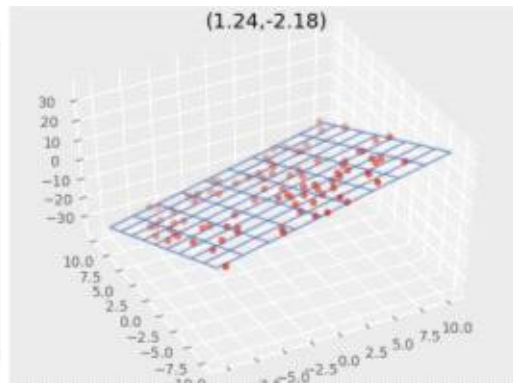
[수식 6] 투영 변환 행렬

5) RANSAC(Random Sample Consensus)

RANSAC(Random Sample Consensus)은 데이터셋에서 노이즈를 제거하고 모델을 예측하는 알고리즘이다. RANSAC은 일정 임계값 이상의 노이즈를 완전히 무시하는 특성을 가지고 있어, outlier에 강건한 알고리즘이다. RANSAC은 데이터셋에서 랜덤으로 일부 데이터를 추출하여 모델을 형성한다. 형성된 모델을 전체 데이터와 비교하여 일정 오차 이내에 있는 inlier의 비율을 계산하는 과정을 반복하면서, inlier의 비율을 일정 수준 이상 만족시키거나 N번 반복한 후 가장 높은 inlier의 비율을 가진 모델을 결과물로 가지게 된다. RANSAC 모델을 평면 추정에 사용할 때에는 3차원 점의 데이터셋에서 세 점을 랜덤으로 추출하여 임의의 평면 방정식을 도출한다. 이후 평면 방정식을 기준으로 inlier의 비율을 계산하여 평면을 추정할 수 있다.



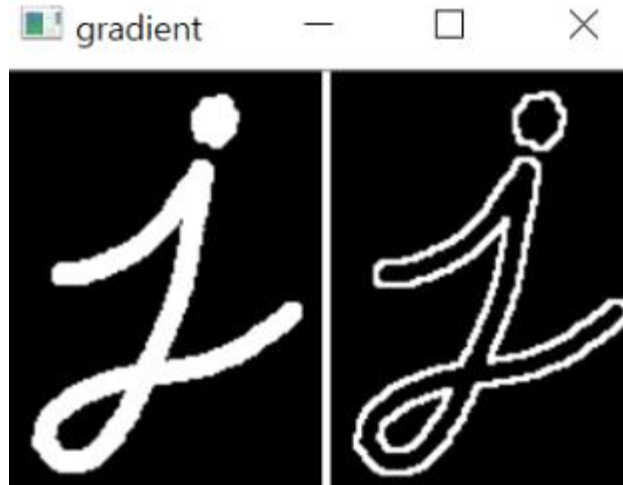
[그림 5] RANSAC을 이용한 직선 추정 예



[그림 6] RANSAC를 이용한 평면 추정 예

2) Morphology gradient

Morphology 연산은 이진화된 영상에서 노이즈 제거, 구멍 채우기, 끊어진 선 이어 붙이기 등에 쓰이는 형태학적 연산을 말한다. Morphology 기본 연산인 팽창 연산을 적용한 이미지에서 침식 연산을 적용한 이미지를 제거하면 원래 이미지의 경계를 검출할 수 있는데, 이를 Morphology gradient 연산이라고 한다.



[그림 7] Morphology gradient를 적용한 이미지

3. 작품 제작 과정

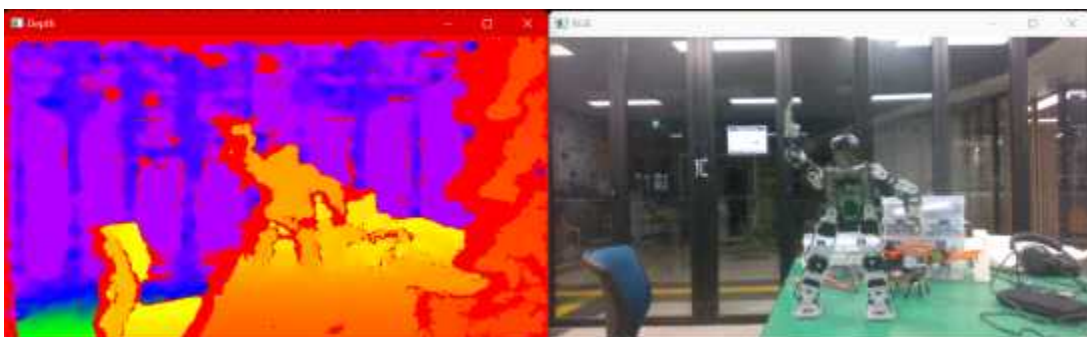
가. 지형 변화 감지 알고리즘 구상

1) 초기 아이디어 구상

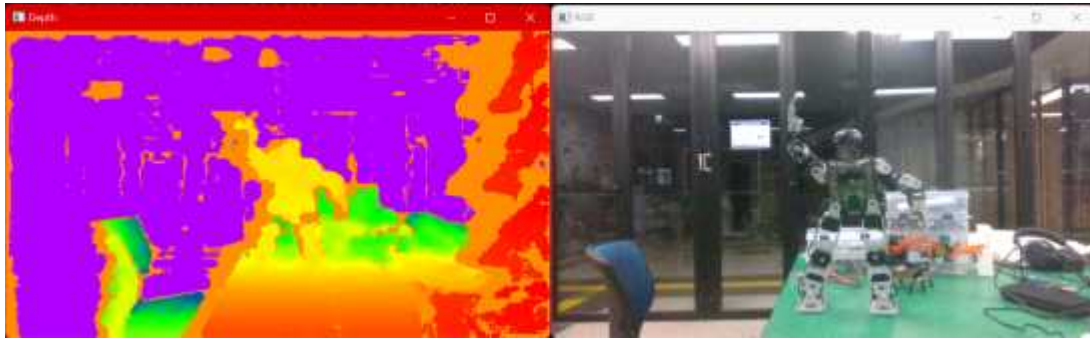
일반 영상으로는 형태를 명확하게 파악하기 힘든 지형을 표시하기 위해서, 스테레오 카메라를 통해 거리 정보가 표현된 Depth Map을 분석하고자 하였다. Depth Map은 이미지 내에 존재하는 픽셀의 깊이 정보를 픽셀의 밝기, 또는 색으로 나타낸 이미지를 말한다. 따라서 Depth Map에서 색의 변화는 거리의 변화를 뜻하기 때문에, 색의 변화를 토대로 외곽선을 형성하는 Canny Edge Detection을 Depth Map에 적용하면 깊이의 변화를 외곽선으로 표현할 수 있다.

본 탐구에서 Depth Map을 생성하기 위한 스테레오 카메라는 Intel RealSense의 D435i를 사용하고, OpenCV 플랫폼을 이용하여 Python 언어로 영상을 처리한다.

지형의 변화가 일어나는 지점을 외곽선으로 표현하더라도, 그 외곽선과 카메라 사이의 거리를 알지 못한다면 사용자가 지형을 제대로 인지하지 못해 상향식 계단과 하향식 계단을 쉽게 구분하지 못할 수도 있다. 따라서 검출한 외곽선 위에 Depth Map의 색상을 입혀서 외곽선의 깊이 정보를 색으로 표현하고자 하였다. 사용자가 색상을 통해 보다 정밀하게 거리를 파악할 수 있도록, Depth Map에서 거리를 색으로 표현하는 범위는 30cm에서 170cm로 제한하였다.



[그림 8] Depth Color Map에서 표현 거리를 0~3m로 제한한 경우



[그림 9] Depth Color Map에서 표현 거리를 0.3~1.7m로 제한한 경우

스테레오 Depth 카메라로 얻은 Depth Map에서는 양쪽 카메라에 모두 대응되는 점이 없어 거리를 계산하지 못해 나타나는 구멍이 나타난다. [사진 3]과 [사진 4]에서 각각 붉은색과 주황색으로 나타나는 그림자와 같은 영역이 구멍에 해당하는데, 이는 Intel RealSense에서 제공하는 hole filling filter 기능을 사용하면 구멍에 주변 픽셀의 값을 채워 넣어 구멍을 제거할 수 있다.

Depth Map에서 발생하는 노이즈를 줄이기 위해 양방향 필터를 적용한 후, 이미지에서 Canny Edge Detection으로 윤곽선을 검출한다. 마지막으로 검출한 윤곽선 이미지와 Depth Map을 비트 AND 연산으로 윤곽선에 Depth Map의 색을 입혀 이를 출력한다.



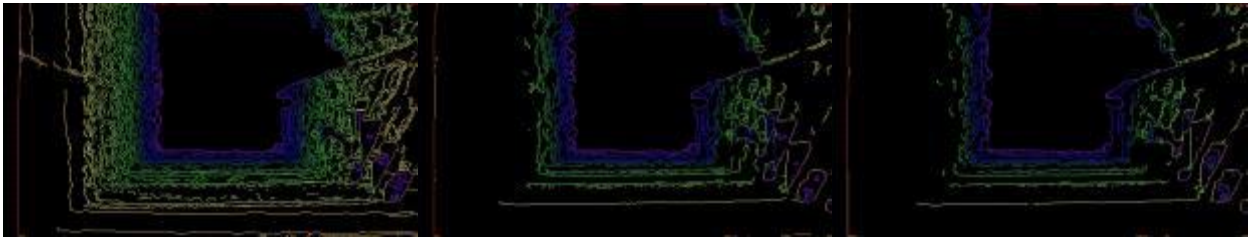
[그림 10] 지형 변화 감지 알고리즘을 적용한 결과

2) 검출 임계값 설정

Canny Edge Detection을 사용하여 윤곽선을 검출하려면 검출 대상에 맞는 하한 임계값과 상한 임계값을 지정해야 한다. 임계값은 이론적으로 도출하기 어려워 실험을 통해서 찾아낸다. 따라서 최적의 임계값을 찾아내기 위해 계단을 스테레오 카메라를 사용하여 촬영한 뒤, 임계값의 범위 0~255(하한 임계값 ≤ 상한 임계값) 내에서 임계값을 0부터 10씩 증가시키며 계단의 Depth Map에서 윤곽선을 검출하여 결과를 확인하였다(1회 촬영당 351회 검출). 계단은 상향식 계단과 하향식 계단으로 나누어 촬영을 진행했으며, 자연스럽게 계단을 내려보는 각도를 약 45°로 가정하여 카메라가 수평면으로부터 45° 아래를 보도록 촬영하였다.

하향식 계단의 경우 지면과 평행한 계단 면만 나타나기 때문에 계단 면과 계단 면 사이의 깊

이 차이가 크게 나타나 가중치에 큰 관계없이 쉽게 윤곽선을 검출할 수 있었다.



[그림 11] 하향식 계단, 하한
가중치 0, 상한 가중치 30

[그림 12] 하향식 계단, 하한
가중치 40, 상한 가중치 80

[그림 13] 하향식 계단, 하한
가중치 60, 상한 가중치 100

그러나 상향식 계단의 경우 지면에 평행한 계단 면과 지면에 수직인 계단 면이 교차하여 나타나기 때문에, 계단 면과 계단 면 사이의 깊이 차이가 작아 윤곽선이 쉽게 검출되지 않았다.



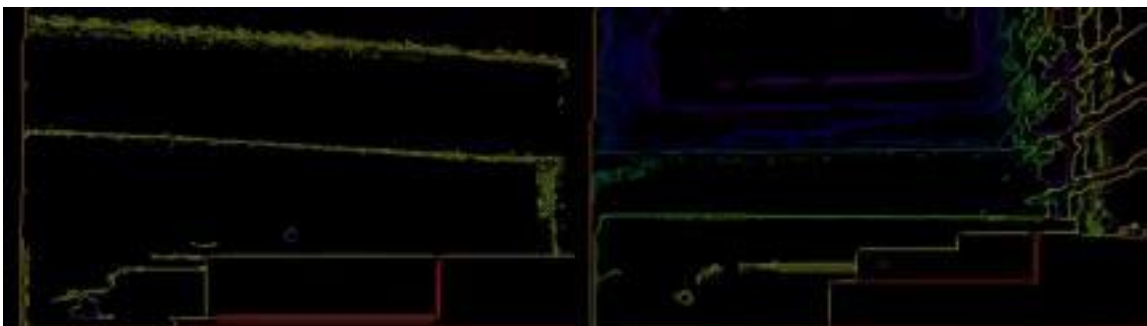
[그림 14] 상향식 계단, 하한
가중치 0, 상한 가중치 30

[그림 15] 상향식 계단, 하한
가중치 20, 상한 가중치 40

[그림 16] 상향식 계단, 하한
가중치 40, 상한 가중치 60

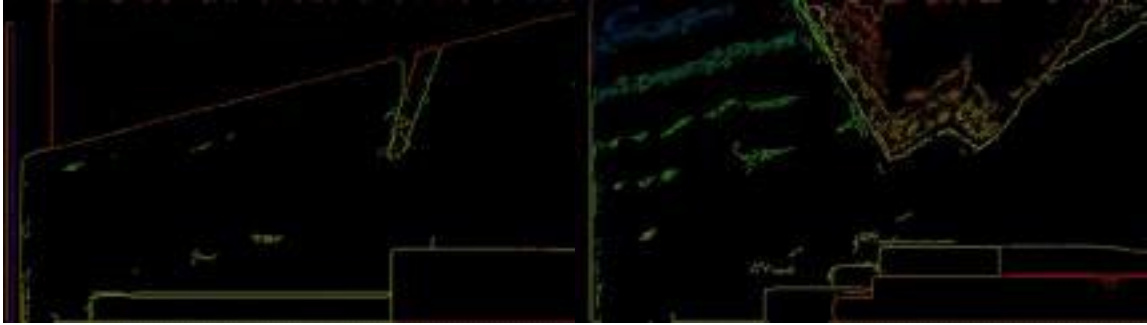
상향식 계단에서 윤곽선을 검출하기 위해 카메라 각도를 변경하고자 하였다. 상향식 계단 촬영 실험을 반복한 결과, 카메라가 45° 아래를 본 상태에서는 깊이의 변화만으로 지면에 수평인 계단 면과 수직인 계단 면을 구분하기 어렵다는 결론을 내렸다. 그 이유는 카메라가 45° 아래를 본 상태에서 지면에 수평인 계단 면과 수직인 계단 면의 기울기가 비슷하여, 깊이 차이가 급격하게 나타나는 지점이 없기 때문이다.

따라서 수평인 계단 면과 수직인 계단 면에서 각각 나타나는 깊이 차이를 크게 만들기 위해서 카메라 각도를 지면에 수직에 가깝게 설정하였다. 이 상태에서 윤곽선 검출의 임계값을 낮게 설정하면 깊이의 변화가 거의 없는 수평면에서는 검출이 일어나지 않고, 깊이의 변화가 급격하게 나타나는 수직면에서는 검출이 일어나 결과적으로 수평면과 수직면을 구분할 수 있게 된다. 다만 카메라를 수직으로 내릴수록 몸체와 옷으로 시야에 방해받기 때문에 수평에서 약 75° 정도 아래로 기울인 상태로 실험을 진행하였다.



[그림 17] 상향식 계단

[그림 18] 하향식 계단



[그림 19] 책상다리

[그림 20] 벽 모서리

나. 감지 알고리즘 실행 환경 구축

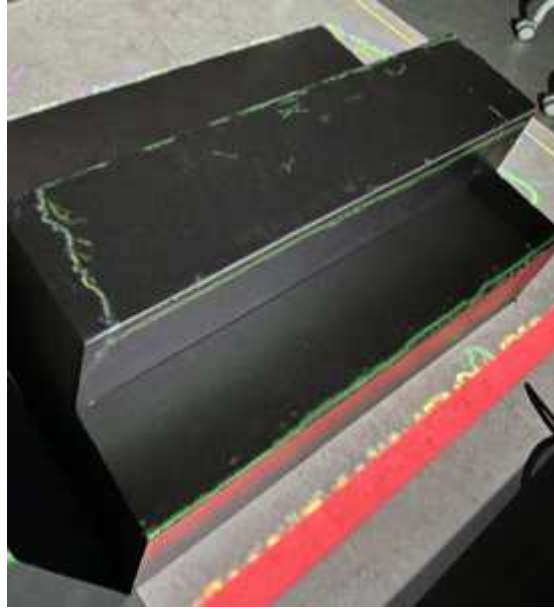


[그림 21] Jetson Nano

영상처리를 휴대하기 위해서 Ubuntu 운영 체제에서 작동하는 Nvidia의 Jetson Nano B01 임베디드 보드를 사용하고자 하였다. 구체적인 실행 환경은 Jetpack 4.5.1, python 3.6.9, OpenCV 4.6.0 with CUDA, RealSense SDK 2.54.2에서 실행되었다. 감지 알고리즘은 가. 단계에서 제작한 Python 코드를 사용하되, 임베디드 보드 환경에서 끊임 없이 실시간으로 영상처리를 할 수 있도록 GPU를 사용하여 이미지를 처리하는 과정을 추가하여 실행하였다.

다. 빔프로젝터 사용 실험

감지 알고리즘이 임베디드 보드 실행 환경에서 정상 작동할 때, 빔프로젝터를 사용하여 사물의 올바른 위치에 윤곽선을 표시할 수 있는지 실험하고자 하였다. 본래 목적에 따르면 소형 빔프로젝터를 사용해야 하지만, 소형 빔프로젝터를 구매하지 못하였기 때문에 일반 강의용 빔프로젝터를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험의 대상이 되는 물체는 알루미늄 프로파일과 우드록 보드를 사용하여 제작한 계단 모형을 사용하였다.



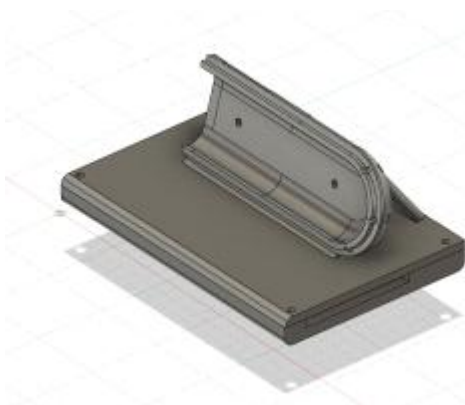
[그림 22] 빔프로젝터 사용 실험

실험 결과 실제 사물과 표시된 윤곽선 사이의 조금의 오차는 존재했지만, 계단의 면을 구분할 수 있을 정도로 윤곽선이 뚜렷하게 검출되었으며, 사물과 윤곽선의 위치 오차가 크지 않아 사물의 형태를 파악하기에 충분하다고 판단되었다,

라. 착용형 장치 설계

1) 초기 장치 설계

하나의 벨트에 스테레오 카메라, 소형 빔프로젝터를 부착하고자 하였다. 따라서 스테레오 카메라와 소형 빔프로젝터를 벨트에 고정하기 위한 케이스를 제작하였다. 알고리즘 구성 단계에서 진행한 실험을 바탕으로, 카메라와 소형 빔프로젝터가 수평에서 75° 아래를 향하도록 케이스를 설계하였다.



[그림 23] 초기 스테레오 카메라 케이스



[그림 24] 초기 빔프로젝터 케이스

초기 구상 단계에서는 스테레오 카메라와 소형 빔프로젝터의 위치를 다르게 배치하여 착용감을 향상시키려 했으나, 장치를 착용하고 움직였을 때 벨트가 움직이면서 스테레오 카메라와 빔프로젝터의 방향이 어긋나는 문제가 빈번하게 발생하여 스테레오 카메라와 소형 빔프로젝터를

일체형으로 고정하는 형태의 케이스로 변경하였다.



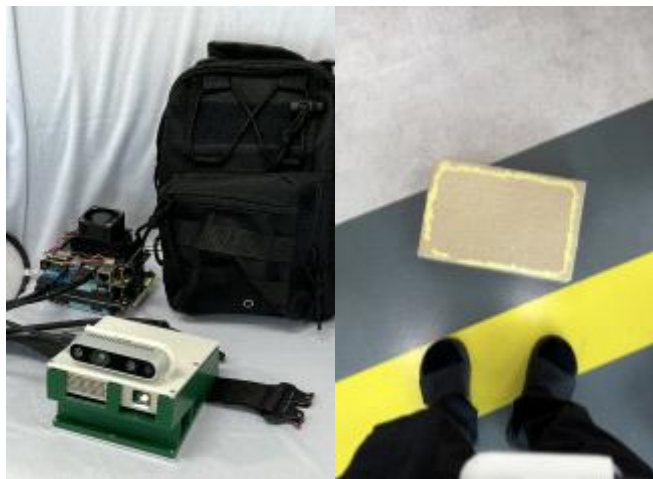
[그림 25] 변경된 일체형 설계

임베디드 보드와 배터리는 벨트형 장치로 착용하였을 때 부피가 크고 무거워 착용에 불편함이 있을 것으로 예상하여 별도로 작은 가방을 통해서 휴대할 수 있도록 하였다.

마. 1차 작품

1) 1차 작품 완성

설계한 장치를 3D프린터로 출력하여 조립하고, 소형 빔프로젝터와 스테레오 카메라를 부착하였다. 조립을 마친 후에는 지형 변화 감지 알고리즘을 적용하여 빔프로젝터로 윤곽선 영상을 투사하였다. 윤곽선 검출이 끝난 이미지를 그대로 빔프로젝터로 투사할 경우, 카메라와 빔프로젝터의 렌즈 위치 차이, 화각과 투사각 차이, 빔프로젝터의 오프셋 비율 등의 요소 때문에 투영된 윤곽선과 실제 물체의 크기와 위치가 어긋나게 된다. 따라서 윤곽선 이미지를 확대, 영상의 중심을 맞춰서 알맞은 위치에 윤곽선이 생기도록 하는 보정 작업이 필요했다. 보정 작업은 장치를 착용한 뒤, [그림 27]의 상자를 빔프로젝터의 투영 범위 내에 위치시킨 뒤 영상의 배율과 중심의 위치를 수동으로 조금씩 변화시키면서 진행할 수 있었다.



[그림 26] 1차 작품

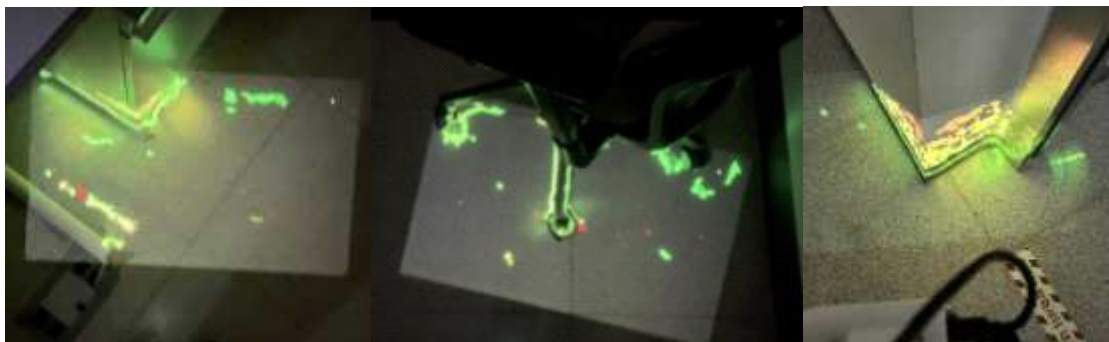
[그림 27] 투영 보정 과정



[그림 28] 착용 예시 [그림 29] 착용 예시

2) 1차 작품 시험

보정 작업까지 마친 후, 학교 내부를 돌아다니며 시험을 진행하였다. 부딪히기 쉬운 서랍의 모서리, 책상다리까지 윤곽선을 검출하고 정확한 위치에 투사할 수 있었다. 빛의 반사가 지나치게 많이 일어나는 면이나 유리와 같이 스테레오 카메라가 정확하게 형태를 파악할 수 없는 사물에서는 일부 검출이 이루어지지 않는 경우가 있었으나 대체로 정확하게 검출할 수 있었고, 전등이 켜지지 않은 어두운 방 안에서도 문제없이 윤곽선을 검출할 수 있었다.

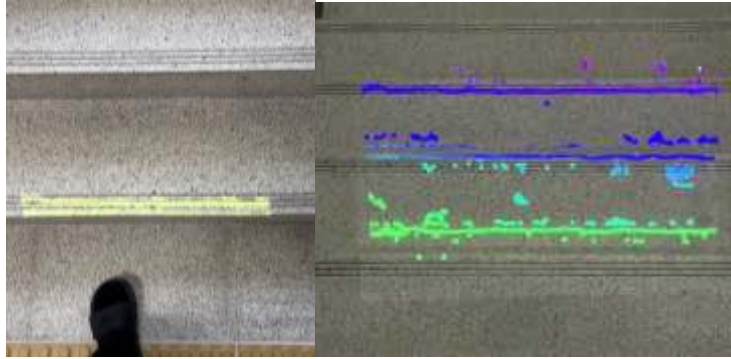


[그림 30] 서랍 표시

[그림 31] 의자 다리 표시

[그림 32] 벽 모서리 표시

계단의 경우 발 바로 앞에 있는 칸의 모서리를 비교적 정확하게 투사할 수 있었다. 그러나 빔프로젝터와 지면의 거리가 특히나 멀어지는 하향식 계단 위에서는, 거리가 멀어질수록 투사되는 위치가 크게 어긋나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 투사하는 영상의 크기와 위치를 일반적인 지면을 기준으로 조정하였고, 앞서 설명한 카메라와 빔프로젝터의 렌즈 위치 차이, 화각과 투사각 차이, 빔프로젝터의 오프셋 비율 등의 요소로 인해 다시 어긋나게 되는 것으로 추정하였다. 이를 해결하고 정확한 위치에 투사하기 위해서는 빔프로젝터의 이미지가 실세계 3차원 좌표계에서 어떤 형태로 투영되는지 알아내는 투영행렬을 알아낼 필요가 있었다.



[그림 33] 정확한 위치 예 [그림 34] 어긋난 위치 예

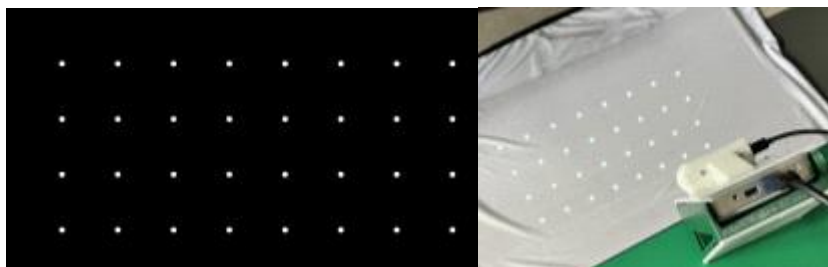
바. 2차 작품

1) 투영행렬 계산

투영행렬을 계산하기 위해서는 2차원 픽셀 좌표계의 점과 이에 대응되는 3차원 실세계 좌표계의 점을 통해 카메라 캘리브레이션을 진행하여야 한다. 일반적인 카메라 캘리브레이션 상황에서는 실세계 3차원 좌표계의 점은 측정하기 어렵고, 2차원 픽셀 좌표계의 점은 이미지 내에서 검출할 수 있으므로 일정한 패턴으로 실세계 3차원 좌표계의 점들을 미리 준비한 뒤 영상 처리를 통해 2차원 픽셀 좌표를 검출하여 대응시킨다.

그러나 본 탐구에서는 실세계-카메라 사이의 투영 변환을 계산하고 싶은 것이 아닌, 빔프로젝터-실세계 사이의 투영 변환을 계산하는 것이 목적이다. 따라서 실세계-카메라 사이의 투영 변환을 계산하는 과정과 반대로, 일정한 패턴으로 2차원 픽셀 좌표계의 점들을 준비한 뒤, 해당 좌표에 해당하는 3차원 실세계 좌표를 측정해 대응하는 것이 편리하다. 이 과정에서 3차원 실세계 좌표계의 원점을 장치에 부착된 스테레오 카메라의 위치라고 가정하면, 스테레오 카메라에서 쉽게 투영된 점의 위치를 확인하고, 해당 3차원 실세계 좌표를 계산할 수 있다.

이 캘리브레이션 과정을 간편하게 수행하기 위해서 빔프로젝터 캘리브레이션 프로그램을 제작하였다. 캘리브레이션은 1차 장치를 지면에 영상을 투사하고 측정할 수 있는 위치에 고정한 뒤, 특정 패턴의 점을 빔프로젝터를 통해 투사한다. 이후 캘리브레이션 프로그램에서 1차 작품에 장착된 스테레오 카메라를 연결한 뒤, 투영된 점의 위치를 카메라 화면을 통해 수동으로 지정한다. 지정한 점은 스테레오 카메라의 깊이 정보를 사용하여 스테레오 카메라 내부에 이미 존재하는 투영 변환을 통해 3차원 좌표로 역투영할 수 있다. 따라서 빔프로젝터의 2차원 픽셀 좌표계 위의 점과 3차원 실세계 좌표계 위의 점을 대응시킬 수 있고, 투영행렬을 구할 수 있다.

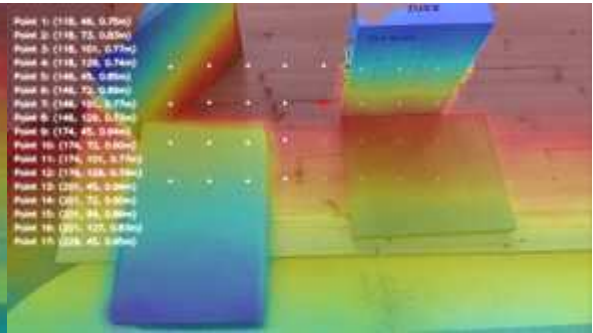


[그림 35] 투사한 패턴 이미지

[그림 36] 투사된 모습



[그림 37] 캘리브레이션 프로그램



[그림 38] 입체적인 환경에서의 캘리브레이션

카메라 행렬:

$$\begin{bmatrix} 907.82844083 & 0. & 441.31195096 \\ 0. & 966.06981574 & 440.73528829 \\ 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

[그림 39] 캘리브레이션 결과

회전 벡터:

$$\begin{bmatrix} -0.07871551 \\ 0.0083352 \\ 0.01393692 \end{bmatrix}$$

 이동 벡터:

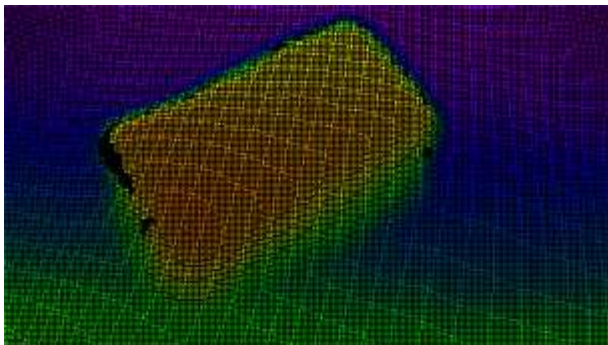
$$\begin{bmatrix} -0.01322172 \\ -0.07932735 \\ 0.09943991 \end{bmatrix}$$

[그림 40] 캘리브레이션 결과

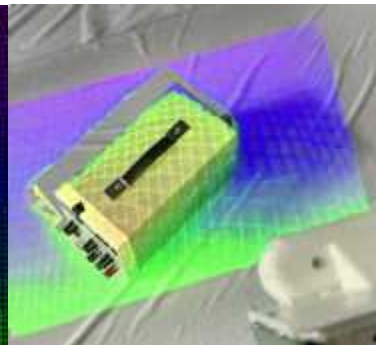
왜곡 계수:

$$\begin{bmatrix} 2.35163506e-01 & -1.76016129e+00 & 4.66664629e-03 & 1.42640917e-04 \\ 3.60290749e+00 & & & \end{bmatrix}$$

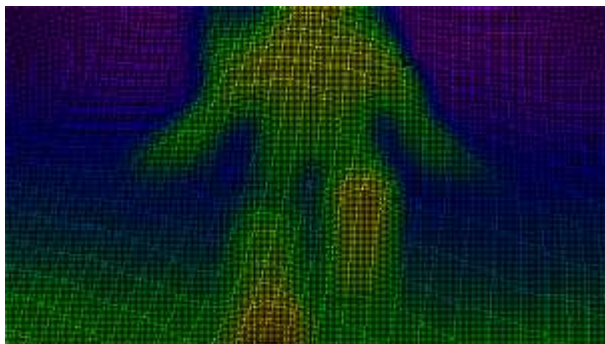
[그림 41] 캘리브레이션 결과



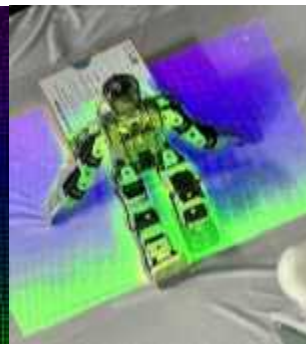
[그림 42] 보정된 Depth map



[그림 43] 투영된 영상



[그림 44] 보정된 Depth map



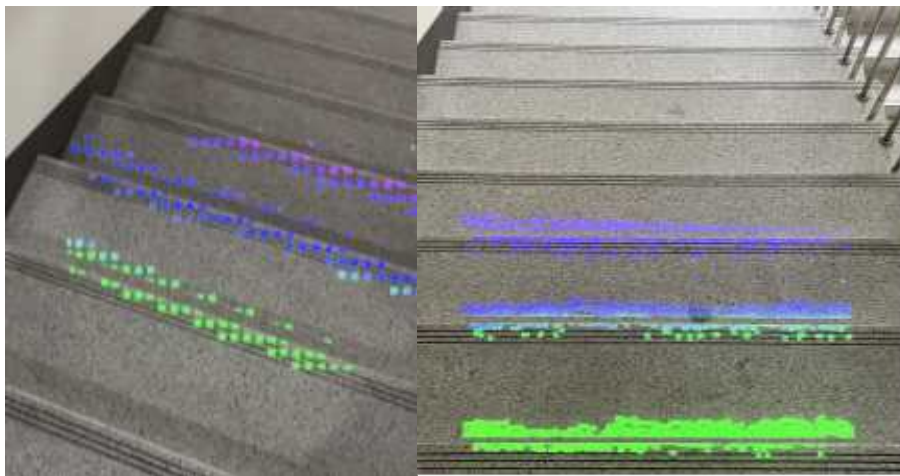
[그림 45] 투영된 영상

투영행렬을 구한 뒤에는 스테레오 카메라에서 깊이 정보가 포함된 2차원 좌표를 받은 후, 이를 3차원 좌표로 변환한 뒤 이전 캘리브레이션 과정에서 계산한 투영행렬을 사용하여 빔프로

벡터의 2차원 좌표계로 변환할 수 있다. 다만 이 과정에서는 깊이 정보가 포함된 2차원을 3차원으로 변환하는 역투영 연산, 다시 3차원을 2차원으로 변환하는 투영 연산이 필요하므로 Jetson Nano와 같은 임베디드 보드 환경에서 구동하였을 때 1 frame을 연산하는 데 소요되는 시간이 평균 0.5초에 달하기도 하였다. 따라서 검출된 윤곽선 픽셀들 사이에 일정한 간격을 두고 일부 픽셀만 계산에 포함하여 연산량을 줄이는 과정을 추가하고 기존 연산을 행렬 연산으로 최적화하여 1 frame을 연산하는 데 소요되는 시간을 평균 0.06초까지 단축할 수 있었다.

2) 2차 작품 시험

2차 작품은 계단을 위주로 작품을 시험하였다. 투영행렬을 적용하는 과정에서 생성된 윤곽선의 형태가 조금 달라졌는데, 연산량을 줄이는 과정에서 점과 점 사이의 연속성이 끊겨 보여 가시성이 떨어지고, 떨어진 가시성을 보충하기 위해 계산한 점을 팽창시키면서 윤곽선이 두껍게 나타나는 문제가 있었다. 그러나 계단에서도 장치 사용자와의 거리와 상관없이 모두 정확한 위치에 윤곽선을 투사할 수 있었다.



[그림 46] 보정되어 투사된 윤곽선 [그림 47] 보정 방법을 보완한 윤곽선

사. 3차 작품

1) 탐지 영역을 변화할 수 있는 장치 설계

1차 작품과 2차 작품에서 가장 큰 문제는 탐지 영역이 좁다는 것이었다. 이는 보행자가 계단을 오르내리는 과정에서 발 바로 아래의 계단 면에 윤곽선이 투영되도록 카메라와 빔프로젝터의 각도를 수직에 가깝게 조정하면서 시야 범위가 발 앞에 한정되어 생긴 문제였다. 따라서 사용자의 움직임에 따라서 동적으로 탐지 영역이 변화되어야 하였다. 따라서 기존 작품에서 회전할 수 있는 축을 만들고, 두 대의 서보 모터를 사용하여 장치의 각도를 변화할 수 있도록 새 장치를 설계한 뒤 제작하였다. 서보 모터를 안정적으로 제어할 수 있는 아두이노 보드를 사용하였고, 이를 Jetson Nano와 시리얼 통신으로 연결하여 윤곽선 검출 알고리즘이 작동하는 파이썬에서 서보모터의 제어 각도를 확인할 수 있도록 하였다.



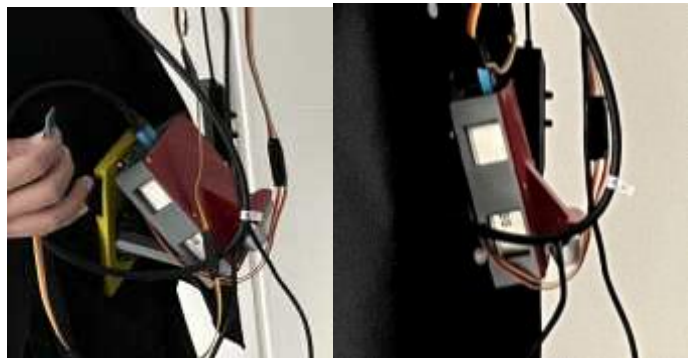
[그림 48] 3차 작품

2) 탐지 영역 조정

탐지 영역을 동적으로 조정하는 방법으로는 일정한 주기로 탐지 영역이 변화하는 방법, 사용자의 시선에 따라서 사용자가 바라보는 영역을 탐지 영역으로 지정하는 방법으로 고안하였다.

일정한 주기로 탐지 영역이 변화하는 방법은 서보 모터가 움직일 수 있는 범위를 지정한 후, 센서 피드백 없이 지속적으로 최소 각도와 최대 각도 사이에서 움직이도록 구현하였다.

사용자가 바라보는 영역을 탐지 영역으로 지정하는 방법은, IMU 센서를 추가로 사용하여 사용자의 머리 기울기를 감지하고, 그 기울기에 따라서 서보 모터가 움직이는 방법으로 구현하였다.



[그림 49] IMU 센서를
기울이지 않은 상황

[그림 50] IMU 센서를
수직으로 기울인 상황

3) 탐지 영역에 따른 윤곽선 검출 조정

기존 지형 변화 감지 알고리즘에서는 색으로 표현하는 거리의 범위를 30cm~170cm로 지정하였으므로 탐지 영역이 멀어짐에 따라서 표현할 수 있는 범위를 넘어서게 된다. 따라서 Jetson Nano가 아두이노 우노에서 현재 장치의 각도를 시리얼 통신으로 받아오고, 현재 각도에 따라서 colormap 범위와 윤곽선 검출 임계값을 동적으로 변화하도록 설치하였다. 장치가 최대로 측정할 수 있는 거리를 4m로 가정하여 장치의 기울기가 최대일 때 감지 범위를 30cm~4m로 설정하여 colormap 범위를 지정하고, 1차 작품을 제작할 때와 같은 방법으로 윤곽선 검출 임계값을 설정하였다. 장치의 기울기가 최소일 때 감지 범위를 30cm~170cm로 설정한 뒤 장치의 기울기에 비례하게 colormap 범위와 윤곽선 검출의 임계값을 증가하도록 설정하였다.

4) 3차 작품 시험

장치의 각도가 변화하게 되면서 먼 거리의 물체를 구별하지 못한다는 문제가 발생하였다. 이는 기존의 알고리즘이 물체의 순간 변화율을 계산하는 방식으로, 지면과의 각도가 검출의 큰 영향을 미치기 때문이다. 해당 문제는 초기 아이디어 구상 단계에서 해결할 수 없는 문제로 판단하였기 때문에 먼 거리에서도 탐지를 진행하기 위해서 기존 지형 변화 감지 알고리즘과 다른 새로운 윤곽선 검출 알고리즘의 필요성을 느끼게 되었다.



[그림 51] 쓰레기통이 잘 검출된 사례

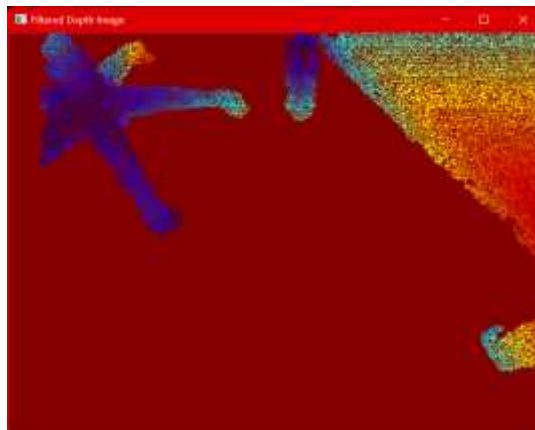


[그림 52] 먼 거리에서 검출이 실패한 사례

아. 4차 작품

1) RANSAC Plane Fitting

카메라의 기울기에 상관없이 지면을 분석하기 위해서 RANSAC 알고리즘을 도입하였다. 스테레오 카메라에서 모든 점을 3D 좌표로 변환한 뒤, RANSAC Plane Fitting을 통해서 가장 큰 평면을 추정하고, 추정된 평면 위의 점들을 3D 좌표 데이터에서 제거하는 방식을 사용하여 장애물만을 나타내는 colormap 이미지를 얻을 수 있었다. 얻어낸 colormap 이미지에서 morphology gradient 연산을 통해서 장애물의 외곽선을 검출할 수 있다.



[그림 53] 바닥 평면을 제거한 Depth Map

2) 4차 작품 시험

4차 작품에서는 장치를 기울여 4m까지의 거리에 있는 물체를 바라보게 하였을 때도 물체의 윤곽선을 검출하고 표시할 수 있었다. 현재 알고리즘에서는 단일 평면을 추정하기 때문에 계단 위에서 다른 계단 칸을 구분하기에는 어려움이 있었다. 따라서 계단 칸 구분에 적합한 윤곽선

검출 알고리즘과, 장치를 기울여 사용할 때 적합한 RANSAC 알고리즘을 함께 사용하면 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되었다.



[그림 54] 4차 작품 시험

4. 결론 및 추후 발전 방향성

가. 결론

스테레오 Depth 카메라를 사용하여 지면을 조사하고, 지면의 변화가 나타나는 곳을 빔프로젝터로 강조하여 표시하고자 하였다. 스테레오 Depth 카메라를 통해 Depth Map을 생성한 뒤, 노이즈 제거를 위해 양방향 필터를 적용하였다. 양방향 필터를 적용한 이미지에는 Canny Edge Detection을 사용하여 윤곽선을 검출하였으며, 검출한 윤곽선에 Depth Map의 색상을 입혀 거리 정보를 포함하였다. 이와 같은 과정을 거친 알고리즘을 사용할 시 벽, 모서리, 계단 면 등에서 윤곽선을 검출할 수 있었다. 구성한 알고리즘을 보행 중에도 실행할 수 있도록 Jetson Nano 임베디드 보드의 실행 환경을 구축하였으며, 정확한 위치에 윤곽선을 투사할 수 있도록 빔프로젝터 캘리브레이션을 진행하였다.

탐지 영역이 좁은 문제를 해결하기 위해 서보 모터를 사용하여 장치의 각도를 조절할 수 있는 새 형태를 제작하였으며, 탐지 범위에 따라서 윤곽선 검출의 임계값을 동적으로 조정되도록 하였다. 늘어난 탐지 영역에서 일부 검출이 일어나지 않는 문제를 해결하기 위해 RANSAC 알고리즘을 활용하여 바닥을 추정하고 물체의 외곽선을 검출하는 방법을 도입하였다.

본 탐구에서 제작한 보행 보조 장치는 저시력자의 잔존 시력을 활용하여 보행을 보조할 수 있을 것이며, 비장애인들 또한 어두운 환경과 같이 시야 확보에 어려움이 존재하는 상황에서 장애물과의 충돌을 예방할 수 있을 것이다.

나. 추후 발전 방향성

현재 작품은 두 가지의 검출 방법을 독립적으로 사용하고 있다. 각 검출 방법에서 선명하게 검출할 수 있는 물체의 형태와 장치의 각도가 다르게 나타나므로, 두 가지 검출 방법을 융합하여 더욱 효율적으로 보행을 보조할 수 있을 것이다. 이 과정에서는 두 검출 방법을 동시에 사

용하는 방법, 검출 범위에 따른 검출 방법 선정, 보행 상황 인식을 통한 검출 방법 선정 등 다양한 융합 방법을 도입할 수 있을 것이다.

추가로 단순히 장애물의 윤곽선을 표시하는 것뿐만이 아니라, 사용자의 움직임 감지하여 낙상과 같은 사고를 감지하는 기능이나, 사용자의 보행 패턴에 따라 자동으로 탐지 영역을 조정하는 기능 등을 추가할 수 있을 것이다.

현재는 장치를 허리에 착용하는 방식으로 인해 사용자의 전방 부분 좁은 영역에서만 검출이 이루어진다는 한계가 있다. 만약 장치를 더 높은 위치에 착용하게 된다면 더욱 탐지 범위를 넓힐 수 있을 것이다. 따라서 가슴 또는 어깨와 같은 위치에 착용하는 형태, 또는 머리에 헬멧 형태로 착용하여 시야 방향에 따라 검출하는 형태와 같이 여러 착용 형태를 고안할 수 있다.

신체에 착용하는 방식 외에도 지팡이나 휠체어와 같은 도구에 부착하여 사용하는 방식 또한 신체의 움직임 제한과 부담감을 해소하는 방법으로 활용될 수 있다.

마지막으로, 현재 물체를 감지하고 이를 투사할 때 발생하는 시간 지연은 추후 소형 컴퓨터와 빔프로젝터 기술의 발전으로 해결될 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

- [1] 김응수, “국내 시각장애와 저시력 현황,” 대한의사협회지, vol. 65, no. 11, pp. 727-732, 2022, doi: <https://doi.org/10.5124/jkma.2022.65.11.727>
- [2] 오익표 and 김현, “저시력 장애인의 실외 보행 보조를 위한 시각 지원 방안,” in 한국HCI학회 학술대회, 2017, pp. 220-223.
- [3] 서자원 and 김창익, “스테레오 카메라 영상처리 기술 및 동향,” 전자공학회지, vol. 38, no. 2, pp. 31-36, 2011
- [4] 김서정, 김병준, 김동훈, 현상미, and 정성환, “로봇자율주행을 위한 스테레오 카메라 기반 전방 장애물 감지 기술,” in 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 2023, pp. 2066-2066.
- [5] 이해수, 권구남, and 권남규, “Depth 카메라 기반 계단 인식 및 구분 알고리즘,” in 대한전자공학회 학술대회, 2023, pp. 1658-1661..