

Visual SLAM을 통해 획득한 공간 지도의 완성도 평가 시스템

김한솔[†], 감제원[†], 황성수^{††}

An Evaluation System to Determine the Completeness of a Space Map Obtained by Visual SLAM

Han Sol Kim[†], Jae Won Kam^{††}, Sung Soo Hwang^{†††}

ABSTRACT

This paper presents an evaluation system to determine the completeness of a space map obtained by a visual SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) algorithm. The proposed system consists of three parts. First, the proposed system detects the occurrence of loop closing to confirm that users acquired the information from all directions. Thereafter, the acquired map is divided with regular intervals and is verified whether each area has enough map points to successfully estimate users' position. Finally, to check the effectiveness of each map point, the system checks whether the map points are identifiable even at the location where there is a large distance difference from the acquisition position. Experimental results show that space maps whose completeness is proven by the proposed system has higher stability and accuracy in terms of position estimation than other maps that are not proven.

Key words: Visual SLAM, Completeness Determination, Loop Closing, Map Point, Key Frame

1. 서 론

오늘날 많은 분야에서 활용되는 증강현실(Augmented Reality) 기술은 영상센서를 통해 획득한 실제 환경 정보에 가상의 이미지나 정보를 합성하는 기술이다. 정교하고 실감 있는 증강현실 기술을 구현하기 위해서는 주변 환경 인식 및 사용자의 위치 추정 등 많은 세부적인 기술들이 필요하다[1]. 특히 사용자의 위치 추정을 위해서는 다양한 기법들이 제안 되어왔으며, SLAM(Simultaneous Localization And

Mapping)[2] 또한 이러한 기법들 중 하나로 주변 환경에 대하여 지도를 제작하고 이를 활용하여 자신의 위치를 추정하는 기법이다[3]. 지도 제작을 위해서는 거리센서, IMU센서, 영상센서 등 다양한 종류의 센서 들이 활용되며, 특히 영상센서를 활용하여 지도를 제작하는 기술을 Visual SLAM이라고 한다.

Visual SLAM을 통해 제작된 지도는 지도의 완성도에 따라 사용자 위치 추정의 성능이 달라진다[3]. 하지만 대부분의 Visual SLAM 알고리즘은 지도 제작 과정이 사용자의 경험에 의존하여 수행된다. 이로

* Corresponding Author : Sung Soo Hwang, Address: (37554) Handong-ro 558, Buk-gu, Pohang, Korea, TEL : +82-54-260-1864, FAX : +82-54-260-1976, E-mail : sshwang@handong.edu

Receipt date : Sep. 21, 2018, Revision date : Mar. 6, 2019
Approval date : Mar. 13, 2019

[†] School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University (E-mail : 21200193@handong.edu)

^{††} School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University (E-mail : 21400001@handong.edu)

^{†††} School of Computer Science and Electrical Engineering, Handong Global University

* This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2016R1D1A3B03934808).

인해 지도 제작 경험이 없는 일반 사용자들이 SLAM 지도를 제작하는 과정에서 다음과 같은 3가지 형태의 문제 상황이 발생할 수 있다. 첫째, 사용자가 한정된 영역에 대한 정보만을 수집할 경우, 그 외의 영역에 대해서는 정확한 위치 추정이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 둘째, 정보를 수집했지만 특정 영역에 있어 수집한 정보의 양이 부족한 경우, 해당 영역에서 위치추정이 부정확한 경우가 발생할 수 있다. 마지막으로 사용하는 영상 특징점의 한계로 인해 수집된 정보가 다른 위치에서 식별이 불가능한 경우, 위치추정이 부정확한 경우가 발생할 수 있다.

이러한 문제에 기반하여 본 논문에서는 Visual SLAM지도 제작 시 수집되는 데이터를 바탕으로 위 3가지 문제 상황을 해결 하는 지도 완성도 평가 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 크게 3가지단계로 구성된다. 먼저 동일한 공간에 대한 중복된 정보 수집으로 인해 발생하는 Loop closing을 포착하여 주변 공간 전체에 대한 정보를 획득한 것을 확인한다. 이후 획득된 지도를 일정 간격으로 분할하여 각각의 영역 내 맵포인트(map point)가 충분한지를 파악하여 지도 내에 정보 수집이 부족한 영역이 없게 이루어졌는지를 판단한다. 끝으로 각각의 정보들이 수집된 위치와 일정이상 거리 차가 있는 곳에서도 동일하게 식별 가능한지를 판단한다. 제안 시스템은 객관적인 판단 기준을 제시함으로써 Visual SLAM 시스템의 안정성을 높일 수 있을 것이며, 또한 사용자들은 지도 제작에 대한 사전 지식과 경험 없이 안정된 지도 제작이 가능할 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템을 구성하는데 사용된 관련 연구들에 대하여 설명하고 3장에서는 구현, 4장에서는 실험 결과에 대해서 논한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

Visual SLAM은 영상센서를 활용하여 영상 내의 특징점을 추적하고 매핑하는 과정을 기반으로 동작한다. 이러한 Visual SLAM은 사용되는 영상 정보와 센서의 종류 그리고 결과로 얻어지는 3차원 구조의 정보 처리 방법 등에 따라 여러 기법이 존재한다[4].

본 논문에서는 특징점을 기반으로 동작하는 Visual SLAM의 한 기법인 ORB SLAM[5]를 사용하였다. ORB SLAM에서 제작되는 지도는 크게 맵포인트와

키프레임이라는 데이터 구조로 구성되어 있다. 맵포인트는 영상의 특징점을 기반으로 획득되어 지도상의 3차원 좌표에 맵핑되는 점으로 위치 정보와 해당 특징점에 대한 기술자(descriptor)를 포함하고 있다. 키프레임(key frame)은 맵포인트를 획득한 카메라의 위치 정보와 해당 위치에서 식별 가능한 맵포인트의 정보를 포함하고 있다. 이러한 데이터 구조를 기반으로 ORB SLAM은 Tracking, Local Mapping 그리고 Loop Closing이라는 3가지의 모듈이 병렬적으로 수행된다. Tracking은 연속적인 영상 내에 특징점을 추출해 이동을 추적하여 지도 내의 사용자의 위치를 추정한다. Local Mapping은 새로 발견된 키프레임 내의 신규 특징점을 활용하여 삼각 측량법[7]을 수행함으로써 지도 내의 맵포인트를 생성한다. Loop Closing은 새로운 키프레임 발견 시 해당 키프레임 내 특징점과 유사한 맵포인트가 지도 내에 존재하는지를 판단한다. Fig. 1(a)는 동일한 지점에 대한 정보가 판단되기 이전의 지도로 동일한 지점으로 판단 시 중복된 점들을 융합하고 루프의 양쪽을 정렬시켜 Fig. 1(b)와 같은 오차가 최소화된 지도로 수정된다. 앞선 3가지 모듈을 통해 ORB SLAM에서는 위치 추정 및 지도 제작 그리고 전역 지도 최적화가 가능하다.

ORB SLAM뿐만 아니라 대부분의 Visual SLAM에서는 사용자의 위치 추정 방법을 개선하여 지도의 정확도를 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[8]. 하지만 위치 추정의 척도가 되는 지도[3]의 완성도 평가를 통해 정확도를 향상시키는 연구는 부채한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 공간지도 제작 시 발생하는 문제 상황을 통해 완성도 검증에 필요성을 보여주고 검증에 따른 해결방법을 제시하여 위치추정의 신뢰성이 보장된 지도 제작에 초점을 맞추었다.



Fig. 1. (a) Map before loop closing (b) Map after loop closing.

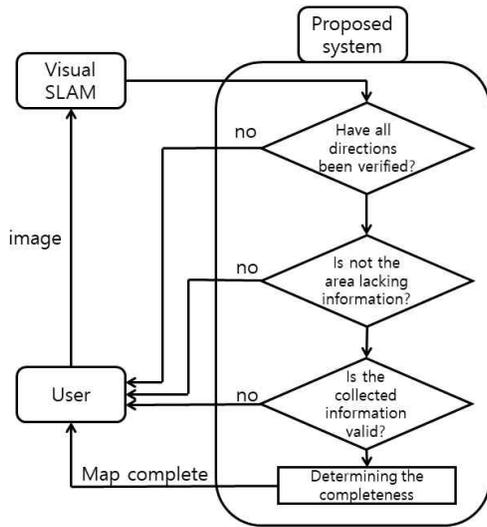


Fig. 2. System overview.

3. 본 론

Fig. 2는 제안된 시스템의 구성도이다. Visual SLAM에서는 처음 획득한 영상을 통해 지도 공간상의 카메라의 자세를 초기화한다. 이후 획득한 영상들에서 특징점을 추출하여 지도 공간상에 맵포인트로 매핑을 수행한다. 제안된 시스템은 이러한 과정을 통해 생성된 지도의 완성도를 평가하며, 평가된 정보들을 바탕으로 시스템은 사용자에게 피드백을 제공한다. 제공된 피드백에 따라 사용자는 위치 추정이 원활히 이루어질 수 있도록 추가적으로 영상을 획득한다. 제작중인 지도가 모든 단계를 충족할시, 지도 제작을 종료한다.

3.1 전체 공간에 대한 정보 수집 여부 판단

지도를 제작하는 상황에서 사용자가 한정된 영역에 대한 정보만을 수집할 경우, 그 외의 영역에 대해서는 정확한 위치 추정이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 사용자가 지면과 수평한 방향으로 영상 획득하였다고 가정한다. 이 경우 지도 제작 시 지면과 수평인 모든 방향에 대한 정보가 수집되면, 이후 수집되는 정보는 이미 지도에 수집된 정보와 중복된 정보이다. Loop Closing이란 지도 제작과정에서 이미 지도상에 존재하는 곳을 재방문 하여 정보를 수집할 경우, 수집된 정보와 지도상에 이미 존재하는 정보의 차이를 통해

제작과정에서 누적된 오차를 감소시켜 지도의 정확도를 향상시키는 과정을 의미한다[5]. 따라서 Visual SLAM 내부의 Loop Closing 과정이 필연적으로 발생한다. 제안하는 시스템은 이러한 Loop Closing 과정이 발생하는 것을 탐색하여 사용자가 지면과 수평한 모든 방향에 대해 정보를 획득한 것을 판단한다. 만약 Loop Closing이 발생하지 않았다면 지도 제작과정에서 정보가 누락되거나 부족한 것이기에 영상을 재획득하여 해당 정보를 보충하도록 사용자에게 피드백을 제공한다. 이를 통해 제작된 지도가 지면과 수평한 모든 방향에 대한 정보를 포함하고 있음을 판단할 수 있다.

3.2 지도상의 정보가 부족한 영역 여부 판단

지도를 제작하는 상황에서 정보를 수집했지만 특정 영역에 있어 수집한 정보의 양이 부족한 경우, 해당 영역에서 위치추정이 부정확한 경우가 발생할 수 있다. 사용자가 Visual SLAM을 통해 카메라 위치 추적을 원활하게하기 위해서는 맵포인트가 지도 내에 전반적으로 일정량 이상 분포해야 한다. 이를 위해 제안된 시스템은 지도를 지면과 수직할 축의 값을 0으로 가지는 이미지로 투영하고 영상처리 기법을 활용하여 수집한 정보의 양이 부족한 경우를 판단한다.

지도를 이미지로 투영하기 위해 지도 내의 임의의 맵포인트의 좌표를 $P_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ 라 하고 해당 맵포인트가 투영된 이미지상의 픽셀의 좌표는 $P_c = (X_c, Z_c)$ 로 하면 P_w 와 P_c 의 관계는 식(1)과 같이 표현된다.

$$X_w = X_c, Z_w = Z_c \quad (1)$$

만약 임의의 맵포인트 $P_{w2} = (X_{w2}, Y_{w2}, Z_{w2})$ 와 같이 P_w 와 X_w, Z_w 좌표가 일치되는 점이 존재할 경우, 이미지상의 동일한 점인 P_c 로 투영되기 때문에 해당 점의 밝기 값을 식(2)를 통해 중복된 점을 표현한다. 식(2)는 P_c 에 해당하는 점의 중복이 발생했을 때 상수 c 를 통해 밝기 값 I_n 이 I_{n+1} 으로 변경되는 것을 표현한 식이다.

$$I_{n+1} = I_n + c \quad (2)$$

위 두 식을 통해 지도가 Fig. 3(a) 이미지로 투영된다. 투영된 Fig. 3(a) 이미지의 Outlier들을 제거하여 Fig. 3(b)를 획득한다. 이후 지도에서 수집한 정보의 양이 부족한 영역을 판단하기 위하여 Fig. 3(b)를 이

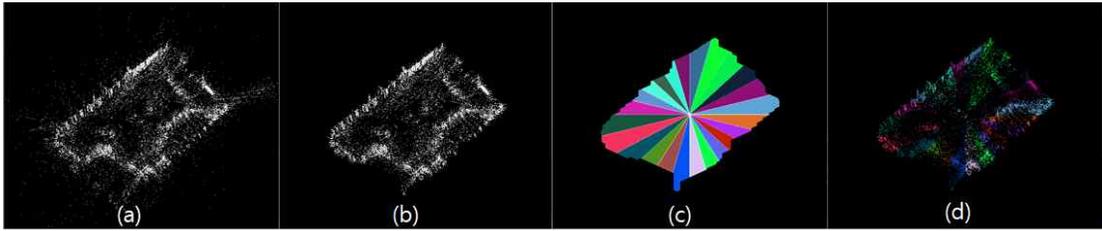


Fig. 3. (a) Image of map (b) Image with outlier eliminated (c) Divided area (d) Image with divided area.

이미지 중점을 기준으로 일정 각도 θ 로 분할되어 각각의 영역이 구분된 Fig. 3(c) 이미지를 획득한다. Fig. 3(c)의 서로 다른 색은 구분된 각각의 영역을 의미한다. Fig. 3(b)에서 Fig. 3(c)에 각각의 구분된 영역에 해당하는 픽셀을 추출하여 Fig. 3(d) 이미지를 획득한다. Fig. 3(d)의 같은 색의 픽셀은 Fig. 3(c)의 구분된 영역에서 동일한 영역에 존재하는 픽셀을 의미한다.

제작된 Fig. 3(d) 내 $i(i = 1, \dots, n)$ 번째 영역의 픽셀을 N_i , 픽셀의 개수를 $s(N_i)$ 이라 하고 해당 영역 내 $j(j = 1, \dots, m)$ 번째 점의 밝기 값을 I_j 으로 하면 식(3)을 통해 $s(N_i)$ 가 획득 가능하다.

$$s(N_i) = \sum I_j \quad (3)$$

$s(N_i)$ 가 일정 기준 \mathcal{M}_1 을 초과 할 경우 해당 영역 내 맵포인트가 충분히 존재한다고 판단한다. 일정 기준 \mathcal{M}_1 이하의 $s(N_i)$ 가 발생하는 경우는 해당 영역에서 영상을 획득할 때 맵포인트가 생성될 충분한 정보를 제공받지 못한 경우이다. 따라서 사용자에게 이러한 영역에 대해 영상을 재획득하도록 피드백을 제공함으로써 문제를 해결할 수 있다. 지도의 모든 영역에서 \mathcal{M}_1 을 초과한다면 지도 전체에 수집한 정보의 양이 부족한 영역이 없다고 판단할 수 있다.

3.3 수집된 정보의 유효성 판단

지도 제작하는 상황에서 사용되는 영상 특징점의 한계로 인해 수집된 정보가 다른 위치에서 식별이 불가능한 경우, 위치추정이 부정확한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 수집된 정보의 유효성을 판단하기 위해 맵포인트가 특정한 위치에서만 식별 되는 것이 아니라 일정 거리 \mathcal{M}_2 이상 차이가 있는 다른 위치에서도 동일하게 식별 가능한지를 확인한다.

Visual SLAM의 맵포인트는 자신을 식별하고 있는 키프레임들의 정보를 저장하고 있다. 또한 키프레임

에는 자신의 위치 정보가 저장되어 있다. 따라서 특정 맵포인트를 식별하고 있는 키프레임 $KF_A = (X_A, Y_A, Z_A)$ 와 $KF_B = (X_B, Y_B, Z_B)$ 사이의 거리인 $D_{KF_A - KF_B}$ 는 식(4)을 통해 계산 가능하다.

$$D_{KF_A - KF_B} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (4)$$

이후 식(5)를 통해 계산된 거리차가 지도의 가로 길이인 $M_{Horizontal\ length}$ 와 세로 길이인 $M_{Vertical\ length}$ 의 평균값보다 일정 비율 p 을 초과하게 되면 해당 맵포인트를 집합 mp' 에 저장한다.

$$D_{KF_A - KF_B} > \mathcal{M}_2 = \frac{1}{2}(M_{Horizontal\ length} + M_{Vertical\ length}) * p \quad (5)$$

이렇게 얻어진 맵포인트의 수를 $s(mp')$ 라 하고 전체 맵포인트의 수를 S 라 했을 때 식(6)과 같이 일정 비율 \mathcal{M}_3 를 초과하면 대부분의 맵포인트가 거리 차이가 다른 위치에서도 식별 가능한 것을 의미한다.

$$s(mp')/S > \mathcal{M}_3 \quad (6)$$

이를 통해 수집된 정보의 유효성을 판단할 수 있다.

4. 실험

실험에 사용된 기기는 Samsung Galaxy S8이며 Visual SLAM은 ORB SLAM의 monocular 모델을 사용하였다[5]. 모바일 기기에서 Visual SLAM의 많은 계산량을 처리하는데 한계가 있어 별도로 서버컴퓨터에 ORB SLAM을 설치하고 네트워크를 통해 모바일 기기에서 찍은 영상을 서버 컴퓨터로 전송하는 방식으로 구현하였다.

본 실험에서는 θ 값을 15°로 설정하여 지도를 중앙을 기준으로 24개의 영역으로 분할하였다. 수집된 정보량 및 분포 확인 조건에서 일정 기준 \mathcal{M}_1 을 100으

로 설정하여 맵포인트가 100개 이상 존재하면 해당 영역에 맵포인트가 충분히 존재한다고 판단하였다. 수집된 정보의 유효성 판단에 있어서 특정 맵포인트를 식별하고 있는 키프레임들의 거리 차의 기준 m_2 를 구하기 위한 p 를 1/3로 설정하여 지도의 가로 길이와 세로 길이의 평균값의 1/3을 초과하여 거리 차이가 나는 키프레임을 가진 맵포인트의 경우 서로 다른 위치에서도 유효한 맵포인트라고 판단하였다. 이후 유효성 검사를 위한 일정 비율 m_3 을 80%로 설정하였다.

본 실험에서는 지면과 수평한 방향으로 영상이 획득되었다는 가정 하에 실제공간과 해당 공간에서 제작된 지도를 공간의 y 축에 해당하는 정보를 제거하여 평면으로 투영하여 비교하였다. Fig. 4(a)는 평면으로 투영된 실제 공간을 간략화한 그림이고, Fig. 4(b)는 동일한 공간에서 제작된 3차원 지도를 평면으로 투영시킨 지도이다. 실제 공간상의 점 P_w1 에서의 영상을 통해 획득한 지도상의 점을 $P_c1=(x_{c1}, z_{c1})$, 실제 공간의 점 P_w2 에서 동일한 방법으로 획득한 지도상의 점을 $P_c2=(x_{c2}, z_{c2})$ 라 할 때 점 P_c1 과 P_c2 사이의 선분 $l_c = ax + bz + c (x_{c2} \leq x \leq x_{c1})$ 을 지도상의 트랙으로 설정하였다. 이후 실제 공간상의 점 P_w1 에서 P_w2 사이의 선분인 l_w 을 따라 이동하며 촬영된 영상을 통해 지도상에서 추정된 위치 좌표 $P_i=(x_i, z_i)$ ($i=1,2,\dots,n$)을 획득하였다.

이후 식 (7)을 통해 l_c 와 P_i 사이의 거리 $R_i (i=1,2,\dots,n)$ 를 계산하였는데 실험에서 사용된 ORB SLAM monocular 모델에서 발생하는 지도마다 다른 크기 문제를 해결하기 위해 추가적으로 l_c 의 길이로 나누었다.

$$R_i = \frac{|ax_i + bz_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} * \frac{1}{l_c} \quad (7)$$

식 (8)을 통해 R_i 의 평균인 R_{avg} 를 계산해 위치 추

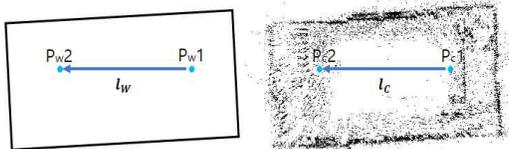


Fig. 4. (a) Image of projected actual space (b) Projected map produced by Visual SLAM.

정의 정확도에 대한 기준으로 설정하였으며 해당 값은 작을수록 높은 정확도를 가진 것을 뜻한다.

$$R_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (8)$$

또한 R_i 들이 얼마나 평균값인 R_{avg} 주변에 모여 있는지를 나타내는 수식 (9)을 통하여 표준편차 R_{std} 을 계산해 위치 추정의 안정성의 기준으로 설정하였으며 해당 값은 작을수록 높은 안정성을 가진 것을 뜻한다.

$$R_{std} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - R_{avg})^2} \quad (9)$$

실험에 사용된 공간 A, B, C는 서로 다른 공간으로 각각의 공간에서 본 논문에서 제안된 방법으로 검증된 지도와 아닌 지도를 획득하여 서로 비교하였다. Fig. 5-7(b), (d) 그래프의 x 축은 지도상의 점 P_c1 에서 트랙 l_c 을 따라 점 P_c2 로 이동하였을 때 추정된 위치 P_i 를 뜻하고 y 축은 추정된 위치 P_i 와 트랙 l_c 사이의 거리를 의미한다.

Fig. 5(a)는 공간 A에서 제작된 본 논문에서 제안된 수집된 정보의 유효성 판단을 통과하지 못한 지도로 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 1.196×10^{-2} , 8.766×10^{-3} 이다.

같은 공간의 검증된 지도인 Fig. 5(c)는 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 3.287×10^{-3} , 2.704×10^{-3} 으로 검증되지 않은 지도에 비해 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 72.51%, 69.15% 감소하였다.

Fig. 6(a)은 공간 B에서 제작된 본 논문에서 제안된 공간 전체에 대한 정보 수집 판단을 통과하지 못

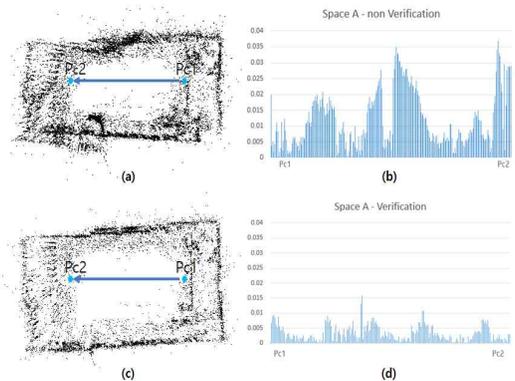


Fig. 5. (a) Unverified map of space A (b) Distance of unverified map of space A ((c) Verified map of space A (d) Distance of verified map of space A

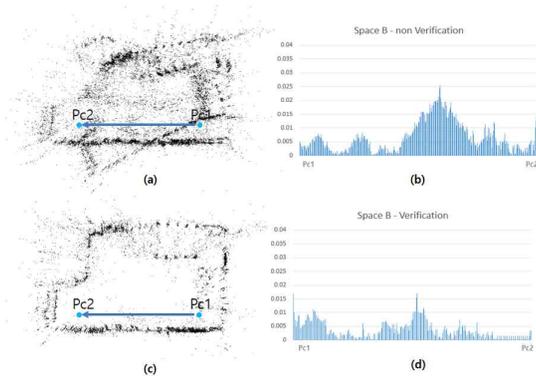


Fig. 6. (a) Unverified map of space B (b) Distance of unverified map of space B (c) Verified map of space B (d) Distance of verified map of space B.

한 지도로 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 6.618×10^{-3} , 5.505×10^{-3} 이다.

같은 공간의 검증된 지도인 Fig. 6(c)는 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 3.775×10^{-3} , 3.219×10^{-3} 으로 검증 되지 않은 지도에 비해 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 42.96%, 41.53% 감소하였다.

Fig. 7(a)은 공간 C에서 제작된 본 논문에서 제안된 수집된 정보의 유효성 판단을 통과하지 못한 지도로 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 8.01×10^{-3} , 8.704×10^{-3} 이다.

같은 공간의 검증된 지도인 Fig. 7(c)는 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 6.561×10^{-3} , 6.136×10^{-3} 으로 검증 되지 않은 지도에 비해 R_{avg} 값과 R_{std} 값이 각각 18.06%, 32.06% 감소하였다

본 실험에서 얻은 R_{avg} 값과 R_{std} 값들을 비교했을

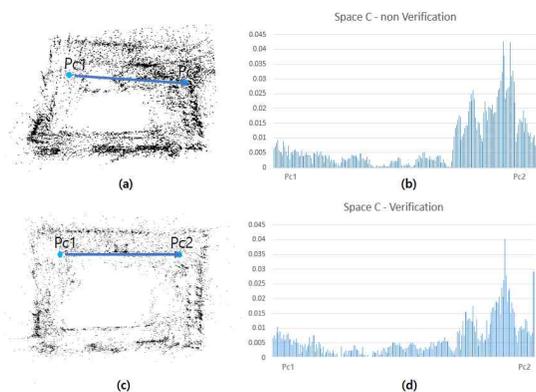


Fig. 7. (a) Unverified map of space C (b) Distance of unverified map of space C (c) Verified map of space C (d) Distance of verified map of space C.

때, 검증된 지도를 사용한 경우, 검증이 되지 않은 지도에 비해 값들이 모두 낮게 측정이 된 것을 확인되었다. 이는 검증된 지도를 사용한 위치추정의 정확도와 안정성이 기존에 비해 개선된 것을 뜻한다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

제안한 시스템은 공간 전체에 대한 정보 수집 여부 판단, 지도상의 정보가 부족한 영역 여부 판단, 수집된 정보의 유효성 판단을 통해 Visual SLAM을 통해 제작된 지도의 자율적 완성도를 평가한다. 공간 지도 제작 시 모든 방향에 대한 정보 수집 이후에는 중복된 정보수집으로 Loop Closing이 필연적으로 발생한다. 이를 확인하여 모든 방향에 대한 정보 수집 여부를 판단한다. 이후 지도 내 카메라 자세의 원활한 추정을 위해 맵포인트가 지도 전반에 일정량 이상 존재하는 것을 판단한다. 이를 위해 맵포인트를 이미지로 투영하여 다양한 영상처리 기법을 활용한다. 마지막으로 맵포인트가 서로 다른 위치에서도 식별 가능한 것을 확인하여 수집된 정보의 유효성을 판단한다. 검증된 지도는 실험을 통해 기존의 지도에 비해 위치 추정의 정확도와 안정성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 사용자들은 지도 제작에 대한 사전 지식과 경험 없이 정확도와 안정성이 보장된 지도 제작이 가능하게 될 것이며 더 나아가 지도를 기반으로 한 다양한 증강현실 콘텐츠 개발에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대된다.

향후 다양한 공간에서 최적화된 지도의 완성도를 판단하는 방법에 대한 연구와 검증된 지도의 위치 추정의 정확도와 안정성을 더욱 향상시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCE

[1] R.T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.

[2] Y.M. Lee and Y.D. Seo, "Vision-Based SLAM in Augmented/Mixed Reality," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 12-20, 2009.

[3] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part

- I The Essential Algorithms,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol 13, Issue 2, pp. 99–110, 2006.
- [4] Y.K. Jin, “Robot Navigation and SLAM Technology: Application Examples of Visual SLAM Related Technology for Robot Navigation,” *Robotics and Humanoids*, Vol. 15, No. 2, pp. 31–37, 2018.
- [5] R. Mur-Artal, J.M.M. Montiel, and Juan D. Tardós, “ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1147–1163, 2015.
- [6] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, “Visual Odometry,” *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 652–659, 2004.
- [7] Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras, and Q.T. Luong, “A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry,” *Artificial Intelligence*, Vol. 78, Issue 1–2, pp. 87–119, 1995.
- [8] J.G. Kang, W.S. Choi, S.Y. An, and S.Y. Oh, “Improving Accuracy of SLAM Using Online Estimation of Odometry Error,” *Proceedings of Korean Institute of Intelligent System Fall Conference 2009*, Vol. 19, No. 2, pp. 267–270, 2009.



김 한 솔

2012년~현재 한동대학교 전산전자공학부 학사
관심분야: 영상처리, VR, AR, 자율주행



감 제 원

2014년~현재 한동대학교 전산전자공학부 학사
관심분야: VR, AR, 그래픽스, 패턴인식, 영상처리



황 성 수

2002년 한동대학교 입학
2008년 한동대학교 졸업(전산전자 복수전공)
2008년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 입학
2010년 석사학위 취득
2015년 박사학위 취득
2015년~현재 한동대학교 전산전자공학부 조교수
관심 분야: 컴퓨터 비전을 활용한 자율 주행 이동체 개발, 증강현실 콘텐츠 개발, 3차원 데이터 생성과 부호화, 장애인을 위한 인터페이스 개발