

능동 스테레오 비전을 이용한 실내환경의 3차원 형상 재구성 알고리즘

A Study on the 3D Shape Reconstruction Algorithm of an Indoor Environment Using Active Stereo Vision

변기원*, 주재흠**, 남기곤***

Ki-Won Byun*, Jae-Heum Joo**, Ki-Gon Nam***

요약

본 연구에서는 레이저 슬릿 빔을 이용한 능동 스테레오 정합 기법과 모자이크 기법을 결합한 3차원 형상 복원 기법을 제안한다. 능동 스테레오 정합 기법은 레이저 슬릿 빔이 조사된 좌, 우 영상에서 색상과 밝기 변화를 분석하여 레이저 라인의 위치정보를 검출하고, 등극선(epipolar line)에서 이를 비교하여 깊이 정보를 획득하는 방법이다. 모자이크 기법은 해리스 코너 검출 방법(harris corner detection)을 이용하여 영상의 특징점을 검출하고, 특징점 기술자(keypoint descriptor) 색인 분류 방법으로 연속 영상 간 특징점의 대응쌍을 찾고 상호 변환 관계를 추정하는 방법이다. 능동 스테레오 정합기법과 모자이크 기법을 이용하여 전체 연속 영상의 깊이 정보를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 획득한 연속 영상의 깊이 정보를 영상의 색상, 질감 정보와 융합(blending)과정을 거쳐 최종 3차원 형상 정보로 복원하였다. 제안한 복원기법은 레이저 슬릿 빔과 스테레오 카메라를 사용함으로써 장소와 거리 제약 조건을 극복하여 용이하면서도 강한 3차원 거리 정보를 획득할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose the 3D shape reconstruction method that combine the mosaic method and the active stereo matching using the laser beam. The active stereo matching method detects the position information of the irradiated laser beam on object by analyzing the color and brightness variation of left and right image, and acquires the depth information in epipolar line. The mosaic method extracts feature point of image by using harris corner detection and matches the same keypoint between the sequence of images using the keypoint descriptor index method and infers correlation between the sequence of images. The depth information of the sequence image was calculated by the active stereo matching and the mosaic method. The merged depth information was reconstructed to the 3D shape information by wrapping and blending with image color and texture. The proposed reconstruction method could acquire strong the 3D distance information, and overcome constraint of place and distance etc, by using laser slit beam and stereo camera.

Keywords : 3D Reconstruction, Octive stereo Matching, Mosaic,

1. 서론

3차원 형상 복원 기술은 대상 물체를 사실감 있게 표현

한다. 3차원 모델 생성 기술은 컴퓨터의 비약적인 발전과 함께 항공기 제작, 문화재 디지털화 그리고 지리정보 시스템 등에서 이용하는 사례가 늘고 있다. 물체의 3차원 복원 기술은 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다 [1].

접촉식 방법은 물체의 측정 부위를 측정 센서가 맞닿은 상태에서 3차원 좌표를 측정하는 방식이다. 고정밀의 3차원 측정 자료값을 획득할 수 있지만 압력이 가해지면 형태가 변하는 물체는 측정이 불가능하다. 비접촉식은 물체에서 반사하거나 투과되는 에너지양을 측정하여 3차원 형상을 복원하는 방법이다. 물체의 외형을 3차원으로 복원하기 위해서는 물체에서 반사되는 에너지를 측정하는데 대표적으로 레이저광을 물체에 투사하여 거리에 따른 위상변화를

* 부산대학교 전자전기공학과

** 부산가톨릭대학교 멀티미디어공학과

*** 부산대학교 전자전기공학과 (교신전자)

접수일자 : 2008. 11. 25 수정 완료 : 2009. 1. 20

게재확정일자 : 2009. 1. 28

※본 논문은 2007년도 정부재원(교육인적 자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단 지역대학우수과목(과제번호: KRF-2007-521-D00368) 지원사업으로 수행되었습니다.

측정하는 방식이 많이 연구되고 있다 [2].

비접촉식 3차원 형상 복원기술은 포인터 빔 투영법(point beam projection), 슬릿 빔 투영법(slit beam projection), 공간 부호화법(space encoding), 모아레 측정법(moire profilometry), 그리고 위상 천이 측정법(phase measure profilometry)이 있다 [3]. 포인터 빔 투영법은 광을 매개로 한 3차원 측정의 가장 기본적인 형태로서 기존 접촉식 센서를 광학식 변위 센서로 교체한 형태의 측정법이다 [4]. 포인터 빔 투영법은 한 번에 한 점의 높이만 측정할 수 있기 때문에 곡면 형상을 측정할 경우에는 고정밀도의 이동이 가능한 기구부가 필요하게 된다 [5]. 슬릿 빔 투영법은 광 삼각 분할법의 원리에 기초를 두고 있는 측정법이다. 슬릿 빔은 레이저 다이오드에 집광렌즈로 레이저를 집광시키고 CCD 카메라로 변형된 슬릿 빔을 획득하여 기하학적 관계로부터 3차원 형상의 좌표를 산출하는 방법이다 [6]. 이 방법은 전체 형상을 얻기 위해 고정밀도의 이동이 가능한 기구부에 카메라와 슬릿 빔을 일체화하는 기계 구동 시스템이 필요하다. 공간 부호화를 이용한 방법은 광 삼각분할법의 원리를 이용하지만, 슬릿 빔 투영법과는 다르게 구조화된 패턴을 해당 객체 전체 한 번에 조사하여 3차원 형상의 좌표를 산출하는 방법이다 [7][8]. 모아레 방법은 측정 대상물 위에 규칙적인 줄무늬 격자를 투영하여 발생하는 물결 모양의 등고선 무늬를 모아레 무늬라고 하고, 이것을 분석하여 물체의 형상 정보를 획득하는 방법이다 [9]. 모아레 방법은 모아레 무늬의 정밀한 분석을 위해서 격자를 위상 천이시킬 수 있기 때문에 우수한 측정도를 얻을 수 있지만, 광학계가 매우 복잡해지는 단점이 있어서 아직 대중화되지 못하고 있다 [10]. 위상 천이 측정법을 이용한 방법은 모아레 방법에서 사용되는 위상 천이법을 주된 방법으로 하여 우수한 측정도를 확보하면서 광학계를 대폭 간소화시킨 측정법이다 [3][5]. 격자의 피치를 조절하는 것과 격자를 위상 천이 시키는 것은 모두 측정프로그램에서 변수 값을 변경하기 때문에 같이 복잡한 광학계가 필요하지 않은 장점이 있다.

본 연구에서는 레이저 슬릿 빔 투영법을 개선한 능동 스테레오 정합기법과 모자이크 기법을 결합하여 3차원 형상을 재구성하는 방법을 제안한다. 기존 단일 카메라와 다중 레이저를 이용한 3차원 형상 복원 기술은 일정한 각도와 거리에 따른 카메라 초점 거리 제한이 있었다. 기존 방법 대신에 좌, 우 스테레오 카메라 중앙에 레이저 빔을 초점 방향과 같은 방향으로 위치시켜 거리 제한 문제를 해결하였다. 능동 스테레오 정합 기법은 레이저 슬릿 빔이 조사된 좌, 우 영상에서 색상과 밝기 변화를 분석하여 레이저 라인의 위치정보를 검출하고, 등극선(epipolar line)에서 이를 비교하여 깊이 정보를 획득하는 방법이다. 모자이크 기법은 해리스 코너 검출 방법(harris corner detection)을 이용하여 영상의 특징점을 검출하고, 특징점 기술자(keypoint descriptor) 색인 분류 방법으로 연속 영상 간 특징점의 대응쌍을 찾아 상호 변환 관계를 추정하는 방법이다. 능동 스테레오 정합기법과 모자이크 기법을 이용하

여 전체 연속 영상의 깊이 정보를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 획득한 연속 영상의 깊이 정보를 영상의 색상, 질감 정보와 융합(blending)하여 최종 3차원 형상으로 복원하였다. 제안한 복원기법은 레이저 슬릿 빔과 스테레오 카메라를 사용함으로써 장소와 거리등의 제약 조건을 극복하고 용이하면서도 강인한 3차원 거리 정보를 획득하였다.

II. 관련연구

비접촉식 능동형 센싱법에 의한 3차원 복원에서 구조화 패턴 조사에 사용되는 가장 대표적인 광원은 레이저와 빔 프로젝트이다. 레이저를 이용한 3차원 복원의 대표적인 사례로, Levoy는 Michelangelo 프로젝트에서 단일 레이저 라인을 구조화 조명으로 이용하여 다비드상을 정밀 복원하였다 [11]. 단일 레이저 광원은 특정 파장대에 에너지가 집중되어 있어 광학 필터를 이용한 패턴 검출이 비교적 용이하고 환경조도의 영향을 덜 받는다. 하지만 한 번의 영상 획득으로 얻어지는 3차원 거리 정보가 레이저가 투영된 단일 라인에 한정 되어 복원에 많은 시간이 소요된다. 또 다른 구조화 패턴 조사 광원인 빔 프로젝트의 경우에는 한번에 넓은 영역에 대한 패턴 조사가 가능하다. 따라서 한번의 영상획득으로 대상 물체의 전면에 대한 3차원 거리 정보 획득이 가능하여 실시간 3차원 모델링에 널리 이용되고 있다. Hlat-Holt [12][13]는 빔 프로젝트를 광원으로 이용하여 대상 물체의 실시간 표면 모델링을 하였다. 프로젝트 광원은 환경조도가 증가할 때 패턴 검출이 어려운 특성적 한계와 반복적 패턴의 라벨링 문제가 해결해야 될 문제점으로 제기되고 있다. 능동형 센싱법에서는 구조화 패턴의 정확한 검출이 복원의 정밀도를 결정하는 중요한 요소이다. 라인 레이저를 이용한 방법에서는 조사된 레이저 라인의 정확한 중심을 찾기 위해 Blais [14]는 가우시안(gaussian) 형태의 밝기 변화를 보이는 레이저 라인의 최대 밝기 지점을 찾는 방법을 제안하였다. Salvi [15]는 바코드 형태의 줄무늬를 투영시킨 후, 줄무늬의 경계선을 추적하는 방법을 제안하였다.

III. 제안하는 3차원 형상 복원시스템

3.1 전체 시스템 블록도

제안하는 3차원 형상시스템의 전체 블록도는 그림 3.1과 같다. 시스템은 크게 능동 스테레오 정합기법의 깊이 검출(depth detection) 과정, 모자이크 기법의 영상 간 동기화 과정(frame synchronization), 그리고 동차행렬(homography matrix) 추정의 깊이 보간(depth interpolation)과정으로 구분된다. 깊이 검출 과정에서 레이저 슬릿 빔이 조사된 좌, 우 영상을 획득하고, 가우시안-라플라시안(laplacian of gaussian, LoG) 에지 추출 연산자와 국부 극점 검출법(local peak detection)으로 레이저 라인의 중심 후보 영역을 검출한다. 검출된 영역에서 좌, 우 영상의 색상과 밝기 변화를 분석하고 레이저 라인 색상 반

응이 나타나는 곳과 겹치는 부분을 레이저 라인 후보로 결정한다. 레이저 라인 후보 영역은 라벨링 과정을 통하여 최종 레이저 라인으로 검출된다. 검출된 레이저 라인에서 등곡선의 삼각분할법을 이용하여 깊이 정보를 계산하고 3차원 정보를 획득한다. 이렇게 획득된 3차원 정보는 단일 영상의 레이저 슬릿 빔에 관한 깊이 정보만을 알 수 있다. 전체적인 3차원 형상을 복원하기 위해서 연속 영상 간의 동기화 정보를 얻어야만 한다. 영상 간 동기화 과정에서 해리스 코너 검출법은 레이저 슬릿 빔이 조사된 우측 영상의 특징점을 검출한다. 특징점 기술자 색인 분류법은 검출된 같은 특징점의 대응쌍을 찾고 상호 변환 관계를 추정하여 동기화 정보를 계산한다. 마지막 깊이 보간 과정에서 3차원 깊이 정보와 동기화 정보를 병합하여 전체 깊이 정보를 계산한다. 획득한 전체 깊이 정보는 3차원 점군으로 연결하고 3차원 동차행렬을 추정한다. 전체 깊이 정보는 영상의 색상, 질감정보와 융합(blending)하여 3차원 형상으로 복원된다.

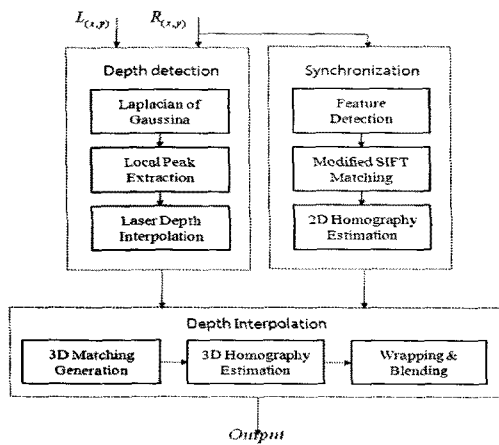


그림 3. 1. 3차원 형상 복원 시스템 블록다이어그램.
Fig. 3. 1. Block diagram of 3D shape reconstruction.

3.2 레이저 슬릿 빔 조사방법

레이저 슬릿 빔 조사 방법에는 삼각분할법을 이용한 형상 측정 방법과 스테레오 카메라를 이용한 형상 측정 방법이 있다. 그림 3.2 (a)는 기존 레이저 슬릿 빔 삼각분할법을 이용한 3차원 형상 측정 방법이다. 카메라와 기준 평면과의 거리가 가까울수록 레이저 조사 방향의 각도가 작아지고, 반대로 거리가 멀수록 각도가 커지게 된다. 따라서 다른 물체를 측정할 때마다 카메라와 기준 평면과의 거리가 다르게 되므로 반복적으로 레이저 슬릿 빔 조사 방향 각도를 정확하게 수정해야하는 번거로움이 있다. 그림 3.2 (b)는 좌, 우 스테레오 카메라 중앙에 카메라 초점 방향과 같은 방향으로 레이저 슬릿 빔을 설치한 제안한 조사방법이다. 이 방법은 카메라와 기준 평면과의 거리가 다르더라도 레이저 슬릿 빔 조사 방향 각도를 수정할 필요가 없다. 또한 레이저 슬릿 빔의 조사 방향과 카메라의 초점 방향이 같은 방향이므로 카메라의 초점 성능에 따라 기준 평면과

카메라의 거리 제한성 없이 레이저 슬릿 빔 영상을 획득할 수 있다.

제안한 그림 3.2 (b)의 레이저 슬릿 빔 조사 원리는 카메라 렌즈를 중심으로 이미지 평면과 물체사이의 두 삼각형의 닮음비를 이용하면 식(1)과 같이 얻을 수 있다.

$$z = \frac{b \cdot f}{x_l - x_r} \tag{1}$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리를 나타내며, x_l, x_r 는 좌, 우 평면에서 레이저 슬릿 빔의 각각의 위치를 나타낸다. b 는 좌, 우 카메라 렌즈간의 거리이다. 결국은 스테레오 카메라를 이용하여 획득한 좌, 우 영상에서 레이저 슬릿 빔 위치를 파악하여 각 등곡선에 따른 변이를 계산할 수 있고, 이것은 곧 3차원 거리정보를 나타낸다.

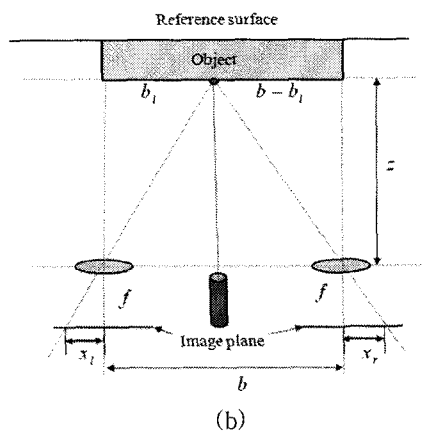
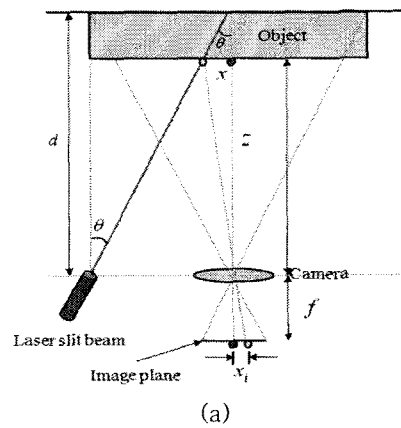


그림 3. 2. 레이저 슬릿 빔 삼각분할법.
(a) 기존 조사방법, (b) 제안하는 조사방법.
Fig. 3. 2. Triangular partition method of laser slit beam. (a) Existing method, (b) Proposed method.

3.3 레이저 슬릿 빔 라인 검출

레이저 슬릿 빔 투영법을 이용한 3차원 형상 복원 기술은 우수한 정밀도에도 불구하고 레이저 라인의 검출단계에

서 조명환경이나 표면의 색상, 재질 반사도 등에 민감하여 제한적으로 사용되었다. 기존 레이저 라인 추출 기법은 650nm의 파장을 가지는 붉은 레이저 라인이 투영된 R 채널 영상에서 라인의 밝기가 크게 증가하는 문제점이 있었다. R 채널 영상에서 가우시안 필터링을 적용하면 잡음이 제거되고 레이저 라인 밝기가 가우시안 형태의 밝기 변화로 나타나는 것을 실험으로 확인 하였다. 이 때, 레이저 라인의 중심은 레이저 라인과 수직인 방향으로의 1차 미분 함수가 영교차(zero-crossing) 하는 지점으로 결정하였다. 가우시안 필터의 크기가 적정 크기를 초과할 때에는 스텝 에지를 라인에지로 오판할 가능성이 있으며, 반대의 경우에는 폭을 가지는 레이저 라인의 정확한 영교차 지점을 판단하기가 어려운 단점이 제시되었다 [16]. 기존 연구에서 나타난 문제점들을 보완하고 강인한 레이저 라인 중심 에지를 검출하기 위하여 Marr-Hildreth [17]의 LoG 에지 검출 방법과 국부 극점 검출 방법을 결합한 새로운 레이저 라인 추출 기법을 제안한다. 그림 3.3은 제안하는 레이저 라인 추출 기법의 시스템 블록도이다.

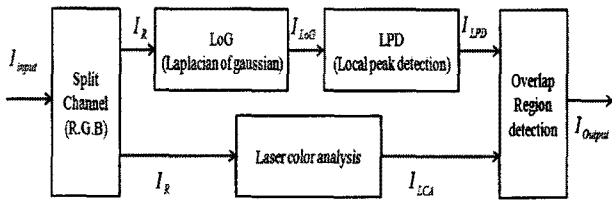


그림 3.3. 제안하는 레이저 라인 검출 시스템.

Fig. 3.3. Laser line detection of proposed system.

시스템 블록도에서 입력 영상을 R, G, B 채널별로 분리하고 R 채널의 영상을 LoG 연산자를 이용하여 레이저 라인 폭을 검출한다. 그림 3.4는 가우시안 필터의 크기에 따른 라플라시안 극점을 조사하여 위치가 변하지 않고 고정된 극점을 찾는 국부 극점 검출법이다. 이 극점이 검출된 레이저 라인 폭에서 중심 후보 영역이다. 후보로 등록된 위치가 레이저 색상 반응이 나타나는 곳과 오버랩(overlap) 되는지를 확인하여 최종 레이저 라인 후보로 결정한다.

3.4 레이저 색상 반응 분석

650nm 파장을 가진 레이저 색상은 주사되는 바탕의 색상에 따라 반응을 달리한다. 그림 3.3에서 사용되는 레이저 라인은 650nm의 파장을 가지고 있다. 이 파장의 광은 사람 시각의 붉은색 원추 세포를 자극하기 때문에 사람이 인지할 때는 붉은색으로 판단된다. 실세계에서 레이저의 색상 반응은 물체표면의 고유한 색상 반사도의 차이와 백색광의 영향으로 인해 일정하지가 않다. 그림 3.5(a)는 백색광이 존재하는 실험 환경에서 서로 다른 색상 반사도를 가지는

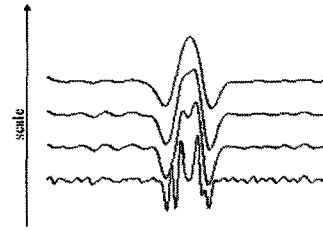


그림 3.4. 가우시안 필터 크기에 따른 레이저 라인 폭과 극점 검출.

Fig. 3.4. Peak detection and laser line width by gaussian filter size.

표면에 투영된 레이저 라인의 색상 변화를 보여주고 있다. 백색의 표면은 모든 파장대의 빛을 잘 반사하는 특성을 가지고 있고 검은색 표면은 그 반대의 경우이다. 이처럼 그림 3.5 (b)와 (c)는 실험을 통해서 투영된 표면의 색상 반응에 따라 조금씩 달라지는 레이저 라인의 색상을 사람이 판단하여 레이저 라인이라고 판단되는 영역만을 분리하여 R-G, R-B 평면에 분포 상태를 나타낸 그림이다. 그림 3.5의 두 그래프에서 레이저의 컬러 분포 영역이 R값이 255가 아닌 부분에서 각각 G/R과 B/R의 값이 파란색 직선 아래에 놓이게 됨을 알 수 있다. 여기서 G/R, B/R의 값이 높은 색지점은 표면의 백색광 색반응이 각각 G, B의 반응이 높은 곳에서 추출된 레이저 라인이다. 반대의 경우는 백색광에 대한 색반응이 R값이 높은 표면에서 검출된 레이저 라인이라고 할 수 있다. 여기서 R값이 255인 경우에 파란색 직선 아래 위치하지 않은 이유가 G/R, B/R 값은 비례해서 증가하고 있는 반면, 영상 입력장치에서 R값이 센서의 표현 한계를 넘어서서 나타난 현상이다.

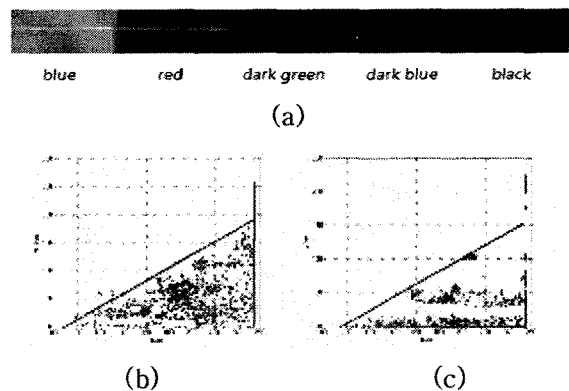


그림 3.5. 레이저 라인의 색상 분포.

- (a) 테스트 색상 패턴, (b) R-G 평면,
- (c) R-B 평면.

Fig. 3.5. Laser color distribution.

- (a) Test color pattern, (b) R-G plane,
- (c) R-B plane.

그림 3.5에서 레이저 색반응의 경계가 되는 직선 라인의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$G = 1.13 \cdot R - 101.7 \quad (2)$$

$$B = 0.96 \cdot R - 90.24 \quad (3)$$

여기서 R-G 관계식의 기울기가 R-B 관계식의 기울기보다 크게 나타난 이유는 R-G 색상의 경우의 파장대가 인접하고 있어 비례 관계가 크기 때문이다. 식(2)와 (3)은 무광택 도료가 도포되어 있는 색상 표면에 투영된 레이저의 색상 샘플을 이용해서 만들어진 식이다. 표면의 재질과 반사 특성이 다른 표면에서는 위의 식과는 다소 다른 관계식을 얻을 수도 있을 것이다. 결론적으로 레이저가 투영된 영상의 화소값 영역이 R-G 평면과 R-B 평면에서 식(2)와 (3)으로 결정되는 직선 라인 아래쪽에 위치할 때 레이저의 색반응을 보이는 지점이라고 판단할 수 있다. 또한 라인 에지로 판단한 에지 영역이 레이저 색반응을 보이는 지점과 겹칠 때 그 지점을 최종적으로 레이저 라인 후보로 결정한다. 레이저 라인 후보 영역은 다음절에서 설명하는 제안하는 라벨링 과정을 통하여 최종 레이저 라인으로 검출된다.

3.5 레이저 라인 라벨링

레이저 라인 검출 단계를 거친 결과 영상은 레이저 라인의 경우 1, 배경의 경우 0으로 된, 그림 3.6 (a)와 같은 이진(binary) 영상이다. 이진 영상에서 매 라인 좌에서 우로 스캔하면서 다음의 *step 1* ~ *step 5*의 과정을 통하여 레이저 라인을 라벨링한다.

step 1. 각각 j 번째 레이저 라인에서 $\pm n$ 개의 라인에 대한 X 좌표값 빈도의 히스토그램(histogram)을 구한다.

step 2. 계산한 히스토그램을 참고로 하여 각 레이저 라인의 기준값을 구한다.

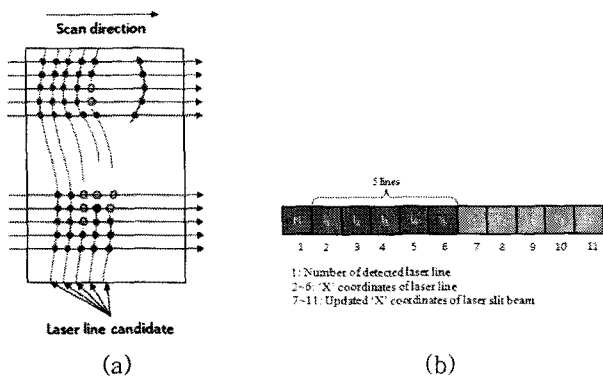


그림 3.6. 레이저 라인 라벨링.

(a) 라벨링 결과 영상, (b) 라인 정보 저장 슬롯.

Fig. 3.6. Laser line labeling.

(a) Result image of labeling.
(b) Line information slot.

step 3. 검출된 레이저 라인 개수가 사용된 레이저 슬릿

빔 개수와 동일한 경우 *step 2* 에서 구한 기준값과 오차 범위 내에 오면 검출된 값을 그대로 사용한다.

step 4. 검출된 레이저 라인 개수가 사용된 레이저 슬릿 빔 개수와 동일하지 않은 경우는 가장 가까이 있으면서 오차 범위 내에 있는 검출된 값을 사용한다.

step 5. 만약 *step 4* 단계에서 결정되지 않은 슬롯이 있다면 사용된 레이저 슬릿 빔 개수만큼의 기준값 중에 해당되는 슬롯의 값을 사용한다.

3.6 레이저 슬릿 빔 깊이 계산

레이저 라인의 깊이 정보는 라벨링 과정을 거친 레이저 슬릿 빔의 정보로부터 삼각 분할법을 이용하여 계산한다. 식(4)는 삼각분할법을 나타낸 식이다. 그림 3.7은 삼각분할법을 이용하여 레이저 슬릿 빔의 깊이 계산 방법을 나타낸 그림이다. 식(4)에서 b 는 좌, 우 렌즈간의 거리이며, Z 는 레이저 슬릿 빔이 조사된 위치와 렌즈 중심 간의 거리이며 f 는 초점거리이다. 등곡선 제약 조건에 따라 식(4)를 이용하여 순서적으로 깊이 정보를 계산한다.

$$Z = \frac{b \cdot f}{L_L^j - L_R^j}, \quad j = 0, 1, \dots, 4 \quad (4)$$

레이저 슬릿 빔을 이용한 스테레오 정합은 시공간적 특성을 이용하여 이루어진다. 영상의 깊이 값들은 시간에 따라 변화하는 시간적 특성을 가진다. 영상 간 상이한 깊이 정보를 이용하여 3차원 점군으로 매핑하기 전에 슬릿 빔 사이의 깊이 정보는 선형적으로 나타난다고 가정하고 깊이 정보를 가지는 영역에 선형 보간 과정을 거친다.

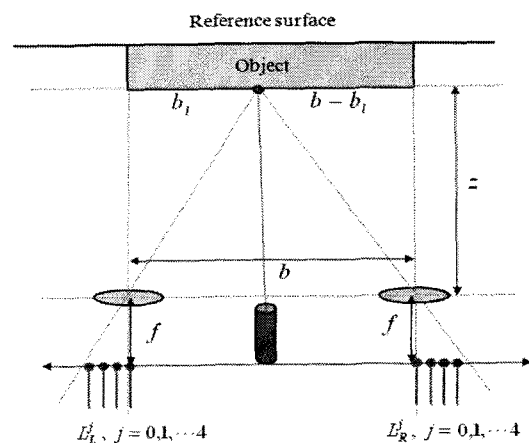


그림 3.7. 삼각분할을 이용한 레이저 슬릿 빔 깊이 계산.

Fig. 3.7. Depth calculation of laser slit beam by triangulation method.

그림 3.8은 실험을 통하여 좌, 우 레이저 입력 영상에서 레이저 라인 검출 결과, 삼각 분할을 이용한 깊이 계산 결과, 그리고 선형 보간 결과를 나타낸 그림이다.

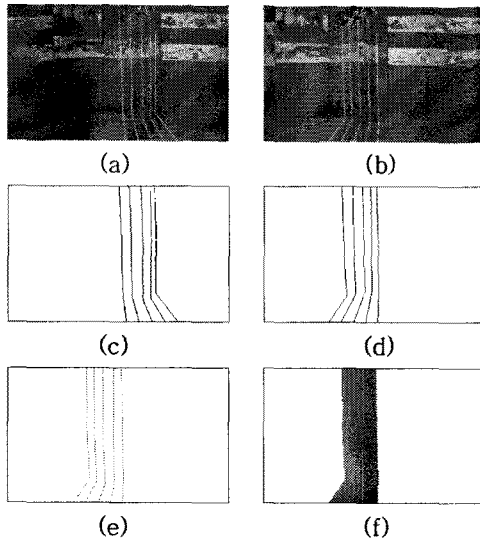


그림 3. 8. 레이저 슬릿 빔 검출.
 (a) 좌측 입력 영상, (b) 우측 입력영상, (c) 검출된 좌측레이저 영상, (d) 검출된 우측레이저 영상, (e) 깊이 영상, (f) 선형 보간 영상.

Fig. 3. 8. Detection of laser slit beam.
 (a) Left input image, (b) Right input image, (c) Detected left laser image, (d) Detected right laser image, (e) Depth image, (f) Interpolation image.

3.7 화면간 동기화 정보 획득

3.7.1 특징점 검출

기존 연구에서 Lowe의 SIFT 알고리즘을 이용하여 특징점을 검출하였다 [18]. SIFT를 이용한 특징점 검출은 영상의 이동, 회전 그리고 크기 변화에 대하여 강인한 특성을 요구하기 때문에 특징점 검출 단계에 많은 계산량이 요구되었다. 해리스 코너를 이용한 특징점 검출은 코너 포인터(corner pointer)를 찾는 방법이다 [19]. 코너 포인터는 영상이 회전하여도 같은 위치가 찾아지는 장점이 있다. 제안하는 연구에서 사용하는 입력영상은 크기 변환을 고려하지 않는다. 스테레오 카메라를 설치한 고정밀도의 기구장치가 측정 물체와 일정한 거리를 유지하기 때문이다. 따라서 해리스 코너 검출법은 SIFT 알고리즘과 비교할 때, 계산 처리 시간이 적게 소모된다. 해리스 코너 알고리즘에 관한 수식은 다음 식(5)와 같다.

$$E(u, v) \cong [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $M = \sum \omega(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$ 이다. 식(5)에서

$w(x, y)$ 는 윈도우 마스크를 나타내고, I_x, I_y 는 x, y 에서의 픽셀 밝기값을 나타낸다, $[u, v]$ 는 x 와 y 방향으로

의 작은 변화량을 의미하고 변화량을 나타내는 함수 $E(u, v)$ 의 값은 평탄한 영역에서는 그 값이 작게 나타나고, 코너 위치에서는 값이 크게 나타난다. 본 연구에서는 행렬 M 의 고유값을 직접 구하는 대신에 식(6)의 코너 응답 함수를 이용하여 코너 포인터를 검출하였다.

$$R = \det(M) - k \cdot \text{tr}(M)^2 \quad (6)$$

여기서, $\det(M)$ 은 행렬 M 의 행렬식을 의미하고, $\text{tr}(M)$ 은 행렬 M 의 대각합을 의미한다. $R \gg 0$ 인 부분이 코너 포인터 부분이다. 일반적으로 코너 응답 함수에서 상수 k 값은 0.04 ~ 0.06 사이의 값이다.

3.7.2 특징점 기술자 생성

특징점 기술자 생성은 영상 간 같은 특징점을 정합하기 위하여 사용된다. 검출된 특징점들 중에서 기울기 방향을 계산하여 대표 기준 방향을 찾는다. 특징점 기술자는 특징점을 중심으로 하는 일정 크기 행렬 내 요소의 기울기 크기값과 방향값을 이용하여 만든 특징점 주위의 기울기 방향 히스토그램이다. 기울기 크기값과 방향값은 아래 식을 이용하여 구한다.

$$M = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}, \theta = \tan^{-1} \frac{L_x}{L_y} \quad (7)$$

여기서 $L_x = I_R(x+1, y) - I_R(x-1, y)$, $L_y = I_R(x, y+1) - I_R(x, y-1)$ 이다. 특징점을 중심으로 15x15 윈도우 내 각 화소의 기울기의 크기값과 방향값을 이용하여 특징점 기술자를 생성하였다.

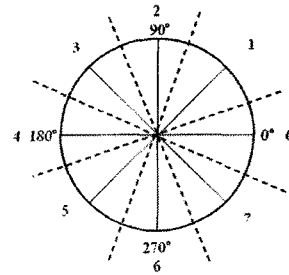


그림 3. 9. 기울기 8방향코드.
 Fig. 3. 9. Gradient 8-direction code.

그림 3.9는 기울기 8방향 코드를 나타낸 그림이다. 기울기 방향값은 그림 3.9와 같이 방향값 범위를 360에서 8방향으로 변환한다. 윈도우 내의 기울기 크기값 중에서 가장 큰 값을 가지는 것을 찾고 그 화소의 기울기 방향값을 0으로 설정하여 나머지 화소의 기울기 방향을 변경한다.

그림 3.10은 특징점 기술자 생성 방법을 나타낸 그림이다. 윈도우 내 각각 모든 화소에 대한 기울기 크기값과 방향값이 제정될되면 그림 3.10과 같이 15x15 윈도우를 각 부분이 5x5 윈도우 크기를 가지는 윈도우로 전체 9등분으로 분할한다. 분할된 각각의 5x5 윈도우내에서 같은 기울기 방향을 가지는 화소의 크기값을 누적하여 8방향 히스토그램을 작

성한다. 결국은 15×15 원도는 3×3개의 5×5 원도로 분할하여 3×3개의 8방향 히스토그램을 형성할 수 있다. 즉, 15×15 원도로부터 3×3×8=72차원의 특징점 기술자를 생성하였다.

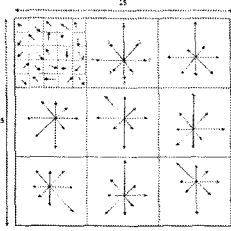


그림 3. 10. 특징점 기술자 생성 방법.
Fig. 3. 10. The method of keypoint descriptor generation

3.7.3 특징점 정합

특징점을 중심으로 생성된 특징점 기술자를 이용하여 두 영상을 정합한다. 8방향에 대한 기울기 크기값, 즉 72차원의 유클리디안 거리(euclidean distance)를 이용하여 최소 거리를 갖는 2개의 특징점들을 하나의 대응쌍으로 결정한다. 대응쌍을 찾기 위해 모든 특징점들을 검색하는데 많은 시간이 소요되므로 k-d tree(k-dimension tree)를 이용하여 전체 검색 시간을 효율적으로 단축시켰다.

3.8. 단일 영상 간의 동기화 정보

개별 영상간의 동기화 정보인 호모그래피를 계산하기 위하여 그림 3.11의 I_{t-1} 영상에 있는 어느 하나의 특징점을 $\mathbf{x}=(x,y)^T$ 라 하고 I_t 영상의 대응점을 $\mathbf{x}'=(x',y')^T$ 라 하면 대응쌍을 이루는 두 영상간의 좌표사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\mathbf{x}' = H\mathbf{x} \tag{8}$$

여기서, H 는 3×3 호모그래피 행렬이다. H 를 계산하기 위해서는 식(8)를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\mathbf{x} \times H\mathbf{x} = 0 \tag{9}$$

최소 4개의 대응점을 식(9)에 대입하여 전개하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$A\mathbf{h} = 0 \tag{10}$$

여기서, \mathbf{h} 는 H 의 9×1의 열벡터이고, A 는 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}' 를 조합한 $n \times 9$, ($n \geq 4$) 행렬이다. 식(10)은 SVD(singular value decomposition)를 통해 최소의 고유치를 가지는 고유벡터를 \mathbf{h} 로 설정하였다. 제안하는 연구에서는 RANSAC(random sample consensus) [21] 방법을 이용하여 다음과 같은 방법으로 최적의 호모그래피를 추정하였다.

step 1. 전체 대응쌍에서 임의적으로 4 개의 대응쌍을 선택하여 식(8)를 만족하는 호모그래피를 계산한다.

step 2 계산된 호모그래피를 전체 대응쌍에 적용하여 다음 식을 만족하는 대응쌍의 개수를 알아낸다.

$$d(\mathbf{x}', \mathbf{x}' = H\mathbf{x}) < D \tag{11}$$

여기서, $d(\mathbf{x}', \mathbf{x}' = H\mathbf{x})$ 는 \mathbf{x}' 와 $\mathbf{x}' = H\mathbf{x}$ 사이의 거리를 구하는 함수이고 D 는 임계치(threshold)를 나타낸다. 이 식을 만족하는 대응쌍을 inlier라 부르고, 그렇지 않은 것을 outlier라 한다. **step 3.** 반복적으로 **step 1**과 **step 2**를 수행하여 허용범위 이상의 inlier를 가지는 호모그래피를 선택한다.

step 4. 선택된 호모그래피를 사용하여 **step 2**를 적용하여 inlier들을 추출하고, 그 inlier들을 모두 이용하여 호모그래피를 갱신한다.

3.9 3차원 깊이 영상 생성

레이저 슬릿 빔이 조사된 좌, 우측 영상에서 레이저의 위치를 검출하고 라벨링 과정을 거친 후, 삼각분할법을 이용하여 레이저 슬릿 빔의 깊이 정보를 계산하였다. 영상마다 레이저가 조사된 좌, 우측 영상을 스테레오 정합을 하여 깊이 정보를 획득하면 조사된 레이저 슬릿 빔에 관한 3차원 정보만 가지고 있다. 전체적인 3차원 정보는 선형 보간된 연속 화면의 3차원 정보를 병합함으로써 얻을 수 있다.

앞에서 설명한 선형 보간 과정을 거친 $Z(x,y)$ 에서 깊이 정보를 가지는 임의의 한 점은 (x,y) 로 표현한다면 추정된 $H_{3 \times 3}$ 를 통해 (x',y') 로 변환이 된다.

그림 3.11은 3차원 점군 매핑 과정을 나타낸 그림이다. 그림 3.11에서 보여지는 것처럼 (x,y) 의 깊이정보 $Z(x,y)$ 는 곧 $Z(x',y')$ 의 깊이 정보를 가지는 임의의 한 점과 매핑이 된다. 선형 보간 과정을 거친 깊이 정보를 가지는 영역내의 임의의 점들을 검출하여 Z 와 Z' 간의 대응쌍을 생성한다. 추정된 상호 변환을 통해 (x,y) 와 (x',y') 는 위치 정보와 깊이 정보를 가지는 $\mathbf{p}(x,y,z(x,y))$, $\mathbf{p}'(x',y',z'(x',y'))$ 로 표현할 수 있다. 3D 정합점 생성 과정을 거쳐 생성된 대응쌍을 이루는 3차원 데이터 $\mathbf{p}(x,y,z(x,y))$, $\mathbf{p}'(x',y',z'(x',y'))$ 는 식(12)와 같은 관계가 성립된다.

$$\mathbf{p}' = H\mathbf{p} \tag{12}$$

여기서, H 는 4×4 호모그래피 행렬이다. 호모그래피를 계산하기 위해서는 식(9)와 동일한 방법으로 SVD를 통해 \mathbf{h} 를 계산하고 RANSAC 알고리즘을 통하여 최적의 호모그래피를 추정하였다.

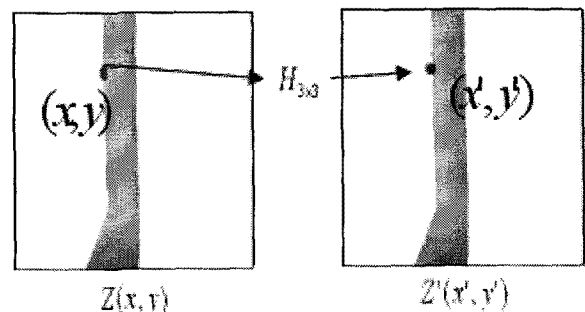


그림 3. 11. 3차원 점군 매핑.
Fig. 3. 11. 3D point cloud mapping.

추정된 3차원 호모그래피를 이용하여 래핑(wrapping) 과

정을 수행한다. 래핑은 영상을 원하는 형태로 기하학적 변형을 하는 과정을 말한다. 이러한 과정이 끝나면 각각의 영상이 자연스럽게 하나의 영상이 되도록 영상 융합 (image blending)을 거쳐 3차원 형상으로 복원한다.

IV. 실험 결과

본 연구에서는 Point Grey 사의 Blumbee stereo camera를 이용하여 영상을 획득하였고 레이저 슬릿 빔 센서는 RayNix 사의 650 nm 파장 대역을 가지는 센서를 사용하였다. 그림. 4.1 (a)와 (b)는 레이저 슬릿 빔 R 채널영상에서 각 라인에 대한 극점 검출 결과 영상이다. 그림 4.1 (a) 레이저 슬릿 빔이 조사된 입력영상을 채널 별로 분리한 R채널 영상이다. 레이저 라인에 해당하는 영역에서 밝기값이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 그림 4.1 (b)는 하나의 스캔라인에 대한 LoG 연산자와 국부 극점 검출법을 이용하여 레이저 라인에 해당하는 영역에서 반응이 나타나는 것을 보여주고 있다.

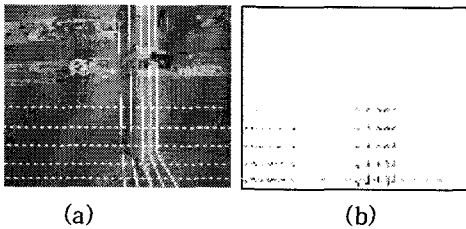


그림 4. 1. 레이저 슬릿 빔 검출.
(a) R채널 영상, (b) 각 라인에 대한 극점 검출 결과 영상.

Fig. 4. 1. Detection of laser slit beam.
(a) R channel image, (b) Output image of detection by a line.

그림 4.2의 (c), (d)는 LoG 연산과 국부 극점 검출 방법을 결합하여 레이저 라인 중심 후보 영역을 검출하고 색상 반응 분석과 라벨링을 통하여 최종 레이저 라인을 검출한 영상이다. 레이저 슬릿 빔이 포함된 입력 영상에서 제안한 방법에 따라 정확하게 레이저 라인이 검출된 것을 확인할 수 있다.

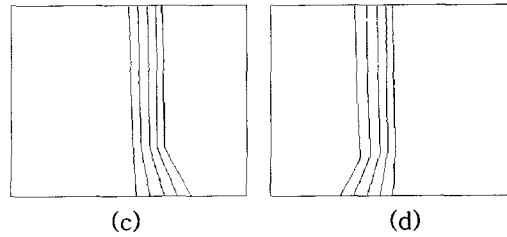
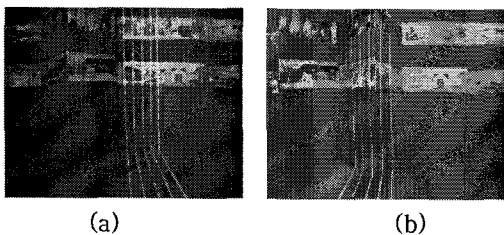


그림 4. 2. 레이저 슬릿 빔 검출.
(a) 좌측 입력 영상, (b) 우측 입력영상, (c) 좌측라벨링 레이저 영상, (d) 우측라벨링 레이저 영상.

Fig. 4. 2. Detection of laser slit beam.
(a) Left input image, (b) Right input image, (c) Label laser image of left, (d) Label laser image of right.

그림. 4.3은 특징점을 검출하고 같은 대응쌍을 이루는 특징점들을 정합한 그림이다. 그림 4.3 (a)와 (b)는 좌, 우 영상에서 헤리스 코너를 이용하여 검출한 특징점들을 나타내었다. 앞 식(6)의 헤리스 코너 응답함수에서 코너 여부의 임계값을 10000으로 설정하고 임계값보다 큰 최대값을 찾아 코너 포인터로 결정하였다. 그림 4.3 (c)는 검출된 특징점을 중심으로 특징점 기술자를 생성하고 72차원의 유클리디안 거리 계산을 이용하여 정합한 결과를 보여주고 있다. 특징점 주위의 일정 크기 행렬 요소의 기울기 방향값과 크기값을 대상으로 대응쌍을 찾기 때문에 outlier가 없는 정확하게 정합이 되는 것을 확인하였다.

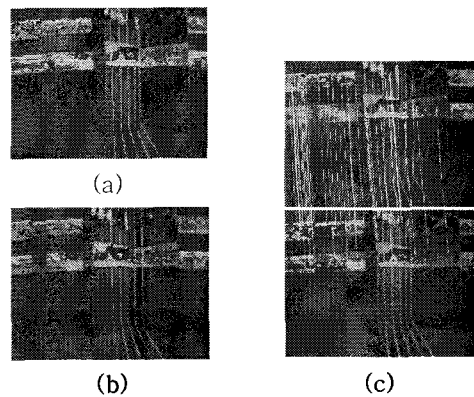


그림 4. 3. 특징점 검출과 정합.
(a) t-1 시간 특징점 검출 영상, (b) t 시간 특징점 검출 영상, (c) 특징점 정합 영상.

Fig. 4. 3. Keypoint detection and matching.
(a) Keypoint detection image when t-1 time, (b) Keypoint detection image when t time, (c) Keypoint matching image.

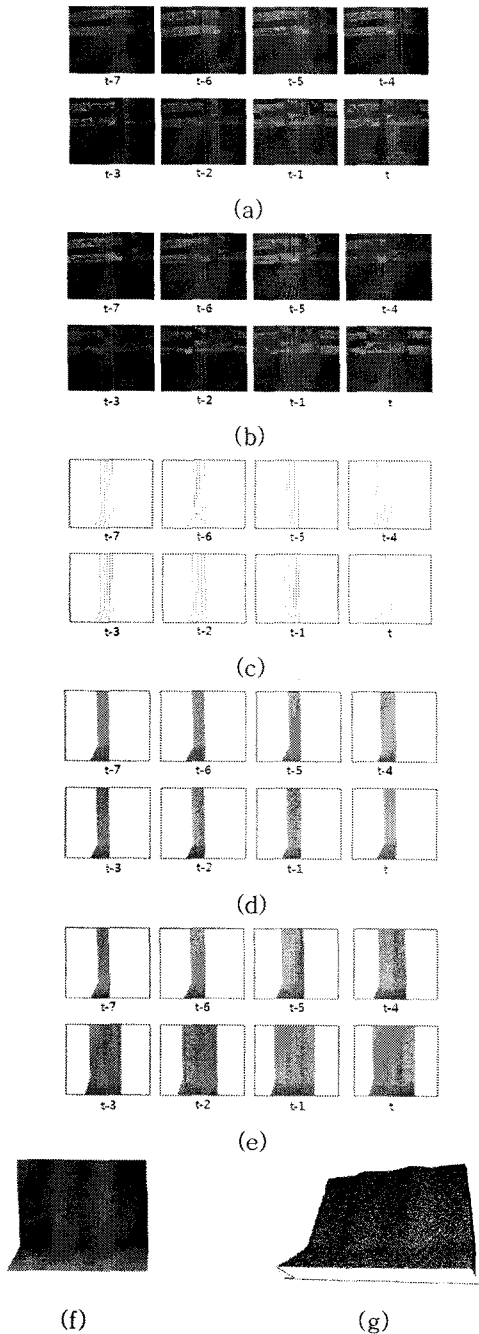


그림 4. 4. 3차원 복원 과정 영상.

(a) 좌측 연속 입력 영상, (b) 우측 연속 입력 영상, (c) 좌, 우 스테레오 정합 깊이 영상, (d) 좌, 우 스테레오 정합 깊이 보간 영상, (e) 동기화 정보를 이용한 깊이 영상 정합 과정, (f) 동기화 정보를 이용한 깊이 영상 정합 결과, (g) 3차원 형상 복원 영상.

Fig. 4. 4. Process of 3D reconstruction.

(a) A series of input image of left, (b) A series of input image of right, (c) Depth image of left and right that stereo matching, (d) Linear interpolation depth image of left

and right that stereo matching, (e) Process of depth matching image using synchronization information, (f) Result of depth matching image using synchronization information, (g) 3D shape reconstruction image.

그림 4.4 (a)와 (b)는 레이저 슬릿 빔이 조사된 좌, 우 입력영상을 나타낸 그림이다, (c)는 (a)와 (b)의 스테레오 정합을 통한 깊이 영상을 나타낸 그림이다. 그림 4.4 (d)는 (c)의 개별 영상 간 선형 보간한 결과를 나타낸 그림이다. 그림 4.4 (e)는 (d)의 선형 보간된 연속 화면의 3차원 정보를 병합하는 과정을 나타낸 그림이다. 그림 4.4 (f)는 깊이 정보를 가지는 영역 내의 임의의 점들을 추출하여 정합 포인트를 생성하고 3차원 호모그래피를 추정함으로써 전체 3차원 형상 복원 결과 영상을 나타낸 그림이다. 복원 결과 영상에서 돌출된 부분은 주변에 비해 밝은 색으로 나타나고 있으며 시각적으로 굴곡 형상을 쉽게 인지할 수 있는 것을 확인하였다. 그림 4.4 (g)는 (f)의 3차원 정보를 3차원 그래픽 프로그램을 사용한 결과 영상을 나타낸 그림이다.

V. 결론

본 논문에서 레이저 슬릿 빔을 이용한 능동 스테레오 정합 기법과 모자이크 기법을 결합한 3차원 형상 복원 기법을 제안하였다. 기존의 능동형 3차원 복원 방법이 우수한 복원 정밀도에도 불구하고 카메라와 기준평면과의 거리에 따라 레이저 슬릿 빔 각도를 일일이 수정해야 하는 거리적 제한성의 문제점을 안고 있었다. 이를 해결하기 위하여 스테레오 카메라의 초점과 같은 방향으로 레이저 슬릿 빔이 조사되는 방법을 제시하였고, 카메라와 기준 평면과의 거리가 다르더라도 빔의 조사 방향 각도를 수정할 필요 없이 영상을 획득할 수 있음을 확인하였다. 레이저 라인 검출단계에서 기존의 능동형 3차원 복원 방법은 가우시안 필터링을 적용한 레이저 라인과 수직인 방향으로의 1차 미분 함수가 영교차(zero-crossing) 하는 지점에 레이저 라인의 중심으로 결정하였다. 이 때, 가우시안 필터의 크기에 따라 정확한 레이저 라인 중심을 찾기가 어려웠다. LoG 연산자와 국부 극점 검출법은 가우시안 필터의 크기에 따른 라플라시안 극점을 조사하여 위치가 변하지 않고 고정되는 단일 극점, 즉 레이저 중심을 찾음으로써 이를 해결하였다. 모자이크 기법의 영상 간의 동기화 과정에서 영상 정합은 단순 특징점을 비교하지 않고, 특징점 주위의 기울기 방향 값과 크기값을 나타내는 특징점 기술자를 검색하여 영상 간의 같은 특징점을 쌍으로 하는 대응쌍을 정확하게 매칭하였다. 개별 프레임을 하나로 연결하는 동기화 정보 획득이 특징점 매칭을 이용한 영상 정합 기법으로 가능함을 보였다. 호모그래피 추정에 기반한 깊이 보간 과정에서 레이저가 조사된 좌, 우 영상을 스테레오 정합을 하여 깊이 정보를 획득하고 선형 보간된 연속 화면의 3차원 깊이 정

보를 가지는 영역 내의 임의의 점들을 추출하여 정합 포인트를 생성하여 3차원 호모그래피를 추정함으로써 전체 3차원 형상으로 복원하였다.

본 논문에서 제안한 3차원 복원 기법을 실험을 통하여 성능을 검증하였으며 앞으로 실내 환경의 3차원 형상을 재구성하는데 효율적으로 이용될 것을 기대한다.

참 고 문 헌

[1] B. Curless, "SIGGRAPH 2000 Courses on 3D Photography," in *Symp. Siggraph 2000*, New Orleans, Louisiana, Jul. 2000.

[2] C. W. Chu, J. Y. Park, H. W. Kim, J. C. Park, S. J. Lim and B. K. Koo, "Recent Trends of 3D Reconstruction Technology," in *Proc. IEEK 2007* vol. 22, no. 4, pp. 1-11, Apr. 2007.

[3] F. Blais, "Review of 20 years of range sensor development," *J. Electronic Imaging*, vol. 13, no. 1, pp. 231-240, Jan. 2004.

[4] R. A. Jarvis, "A perspective on range finding techniques for computer vision," *IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 5, no. 2, pp. 122-139, Mar. 1983.

[5] Intertech Co.,Ltd, <http://www.3dtool.com>

[6] F. Blais, M. Rioux, and J. A. Beraldin, "Practical considerations for a design a high precision 3D laser scanner system," in *Proc. SPIE959*, pp. 225-246, 1999.

[7] F. Blais and J. A. Beraldin, "Calibration of an anamorphic laser based 3D range sensor," in *Proc. SPIE3174*, pp. 113-122, 1997.

[8] F. Blais, M. Rioux, J. Domey, and J. A. Beraldin, "A very compact real time 3D sensor for mobile robot applications," in *Proc. SPIE1007*, pp.330-338, 1988.

[9] H. Takasaki, "Moire topography," *Appl. Opt.* vol. 9, pp. 1467-1472, 1970.

[10] A. Asundi, "Computer aided moire methods," *Opt. Lasers Eng.* vol. 17, pp. 107-116, 1993.

[11] M. Levoy et al. "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," in *Proc. ACM SIGGRAPH2000*, pp. 131-144, July. 2000.

[12] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz, "Stripe Boundary Codes for Real-Time Structured-Light Range Scanning of Moving Objects," in *Proc. IEEE Conf. Computer Vision*, vol. 2, pp. 359-366, 2001.

[13] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy, "Real-Time 3D Model Acquisition," in *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 438-446, 2002.

[14] F. Blais, M. Rioux, "Real-time numerical peak detector," *Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp.

145-155, Jan. 1986.

[15] J. Salvi, J. Pags and J. Batlle. "Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems," *Pattern Recognition*, vol 37, no. 4, pp. 827-849, Apr. 2004.

[16] Y. Y. Yi, S. Y. Ye and K. G. Nam, "3D surface Reconstruction of Moving Object Using Multi-Laser Strips Irradiation," *J. of IEEK*. vol. 44, no. 2, pp. 144-152, Mar. 2007.

[17] M. Nixon and A. Aguado, *Feature Extraction & Image Processing*, United. Kingdom. Newnes, 2002.

[18] K. W. Byun, J. U. Im, D. D. Kim and K. G. Nam, "The 3D Shape Reconstruction System Based on Active Stereo Matching," in *Proc. IEEK 2008*. vol. 44, no. 1, pp. 1003-1004, Jun. 2008.

[19] C. J. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector", in *Proc of the Alvey Vision Conf*, pp. 147-151, 1988.

[20] P. Torr and D. W. Murry, "Outlier detection and motion segmentation", in *Proc. Sensor Fusion VI*, Boston MA, pp. 432-443. Jun. 1993.



변 기 원(Ki-Won Byun)

1998년 2월 동아대 전자공학과(공학사)
2006년 2월 부산대 전자공학과(공학석사)
2007년 3월 ~ 현재 부산대학교 박사과정

※주관심분야 : 영상신호처리, 얼굴인식, 스테레오비전.



주 재 흠(Jae-Heum Joo)

1988년 2월 부산대 전자공학과(공학사)
1990년 2월 부산대 전자공학과(공학석사)
2000년 2월 부산대 전자공학과(공학박사)
2001년 3월 ~ 현재 부산가톨릭대학교 멀티미디어공학과 부교수

※주관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전



남 기 곤(Ki-Gon Nam)

1977년 2월 부산대 전자공학과(공학사)
1981년 2월 부산대 전자공학과(공학석사)
1989년 2월 부산대 전자공학과(공학박사)

1990년 9월 ~ 현재 부산대학교 전자전기공학과 교수
※주관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 신호처리.