

컴퓨터 시각과 레이저 구조광을 이용한 물체의 3차원 정보 추출⁺

Three Dimensional Geometric Feature Detection Using Computer Vision System and Laser Structured Light

황 현*	장 영 창**	임 등 혁*
정회원	정회원	
H. Hwang	Y. C. Chang	D. H. Im

ABSTRACT

An algorithm to extract the 3-D geometric information of a static object was developed using a set of 2-D computer vision system and a laser structured lighting device. As a structured light pattern, multi-parallel lines were used in the study. The proposed algorithm was composed of three stages. The camera calibration, which determined a coordinate transformation between the image plane and the real 3-D world, was performed using known 6 pairs of points at the first stage. Then, utilizing the shifting phenomena of the projected laser beam on an object, the height of the object was computed at the second stage. Finally, using the height information of the 2-D image point, the corresponding 3-D information was computed using results of the camera calibration. For arbitrary geometric objects, the maximum error of the extracted 3-D feature using the proposed algorithm was less than 1~2mm. The results showed that the proposed algorithm was accurate for 3-D geometric feature detection of an object.

주요용어(Key Words): Computer vision, Laser structured light, 3-D feature detection

1. 서 론

컴퓨터 시각을 이용한 농산물의 외형 특징 추출은 대부분의 경우 대상체의 둘레, 면적 등의 2차원 기하학적 정보 또는 색깔, 조직(texture) 등의 형상정보에 주로 의존하고 있다. 그러나 적용분야에 따라서는 체적이나 3차원 형상 등의 3차원 정보가 작업수행에 효율적일 수 있다. 예를 들면, 과실류를 자동으로 수확하는 경우에 작업 대상체의 형상인식이 요구되며 나아가 기준면과 실제 물체 면을 직각으로 연결하는 3차원 거리 정보가 필요하다.

일반적으로 컴퓨터 시각 기술을 응용하여 대상체에 대한 3차원 정보를 얻는 방법으로는 관찰자 중심

의 좌표계를 기준으로 하나의 카메라를 사용하여 대상체의 자세(orientation), 움직임, 조직, 명암 등으로부터 깊이에 대한 정보를 찾아내는 형상인식(shape from shading)과 사람의 눈과 같이 두 대의 카메라를 이용하는 스테레오 시각(stereo vision), 그리고 한 대의 카메라와 구조광(structured lighting)을 이용하는 방법이 있다.

음영을 이용한 형상 인식법은 그 알고리즘이 복잡하고 조명의 균일성에 많은 영향을 받으므로 응용 범위가 매우 좁은 것으로 알려져 있다. 스테레오 시각은 각각의 카메라를 통하여 2차원 영상을 얻고 이들간에 삼각측량법을 이용하여 3차원 정보를 산출한다. 이 방법은 한쪽 카메라의 임의의 점에 대하여

⁺ 본 연구는 한국과학재단 지원 “농산물 비파괴품질 및 안전성평가 기술연구센터”의 연구비 지원에 의한 것임.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

** 서울대학교 농업생명과학대학 농업개발연구소

다른 카메라의 대응점 추출을 위한 영상 좌표계간 매핑(mapping) 문제를 해결해야 한다. 또한 초점거리와 초점각을 산출하기가 복잡하며 이를 찾기 위한 연산시간이 길다는 단점도 지니고 있다.

스테레오 시각이 갖는 이와 같은 단점을 극복하고 한 대의 카메라를 이용하여 동일한 수준의 3차원 정보를 효과적으로 얻기 위해서 레이저 구조광을 이용한다. 레이저광은 유도 방출(stimulated emission)에 의해 증폭된 단파장광으로 지향성을 가지고 광의 세기가 거리에 따라 변화하지 않는 특성을 갖는다. 따라서 레이저광을 이용하여 획득된 영상으로부터 레이저의 직진 지향성과 카메라 영상면과의 기하학적 관계를 이용하여 3차원 물체의 윤곽 정보를 얻을 수 있다.

Hu 등(1989)은 그물 형태의 구조광과 표면 위의 주어진 점은 공간상에서 유일하다는 기하학적 구속(geometric constraint)과 물체의 표면은 일반적으로 부드럽고 표면 위의 점들은 3차원 공간상에서 연속적인 위치에 있다는 위상학적 구속(topological constraint)을 이용하여 물체의 3차원 정보를 획득하는 연구를 수행하였다. 그들은 스테레오 시각의 다치(gray level) 영상에 대한 특징점 인식에 대한 난제는 해결하지 못했으나 레이저 구조광의 격자점 측정에 적용 가능한 기하학적이고 위상학적인 규칙들로부터 대응점의 문제를 해결하였다.

Wang(1991)은 대상체에 1쌍 이상의 평행 구조광을 투사하고 표면의 변화에 따른 구조광 변이를 추적함으로써 좌표계, 관찰자의 위치 등에 영향을 받지 않고 표면의 고유한 특징인 주곡률(principal curvature), 가우시안(Gaussian)곡률, 곡률선(line of curvature)을 고차 미분방정식을 사용하여 추출하였다. Huynh(1997)은 64개의 구조광을 발생시키는 측정기구를 이용하여 3차원 정보를 산출하고자 하였다. 그는 3개의 동일 직선계 점들로 이루어진 4개의 기지의 비동일 평면상을 이용하여 각 레이저 평면광에서 영상좌표를 공간좌표로 변환하는 수학적 접근법을 제시하였다.

김중형(1989)은 원통형 레이저를 평면 물체에 투사했을 때 레이저는 타원의 형태로 나타나는데 이 타원의 형태 변화는 대상체 표면상태와 기울어짐 등에 연관이 있다고 보았으며 이를 이용하여 대상체의

기하학적 정보를 획득하는 연구를 수행하였다.

카메라 보정은 기본적으로 공간상의 좌표와 이 좌표의 투영점인 영상점 좌표사이의 관계를 규정해주는 것이다. 2차원 영상을 이용하여 3차원의 정보를 얻을 때 카메라의 보정 정확도가 3차원 정보의 정확도에 많은 영향을 주게 된다.

Liu 등(1990)은 2차원에서 3차원으로 변환되는 직선과 점의 관계로부터 카메라의 위치를 결정하는 연구를 수행하였다. Wang 등(1991)은 3쌍의 평행면으로 구성된 평판 육각형을 목표점으로 사용하고 이 목표점의 소실(vanishing)선의 기울기가 좌표계의 진동각(swing angle)과 연관된다는 기하학적 정보를 이용하여 카메라 보정을 수행했다. Heikkila (1997) 등은 일반적으로 카메라 보정은 내부인자와 외부인자만을 고려하여 수행되지만 보정의 정확도를 높이기 위해서는 조명과 영상의 변화도 포함되어야 한다고 제안하였다.

본 연구에서는 물체의 3차원 형상정보를 추출하기 위하여 한 대의 카메라와 다수의 평면광 형태로 투사되는 레이저 구조광을 이용한 3차원 정보 추출 시스템을 구축하고 획득한 2차원 영상으로부터 3차원 정보를 추출하는 알고리즘을 개발하고자 하였으며 대상체의 3차원 정보 추출은 3단계 과정을 통하여 수행하였다.

1단계로써 물체의 3차원 공간정보와 카메라 영상정보의 관계에 영향을 미치는 인자들을 추출하는 카메라 보정을 수행하였다. 2단계로써 다수의 레이저 평행 구조광의 형상변이로부터 높이 정보를 추출하였으며 마지막 단계로, 획득한 높이 정보를 이용하여 대상체의 영상으로부터 실질적인 3차원 정보를 추출하였다. 제안한 3차원 정보추출 과정과 알고리즘의 정확성은 3차원 공간상의 기지의 점들과 기본도형 등을 이용하여 검증하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

본 연구를 위한 실험장치는 영상입력부, 영상처리부, 레이저 발생장치, 출력부 등으로 구성하였다. 영상처리부는 2MB의 프레임 메모리를 갖는 컬러 프

레이미 그래픽(TCX, Oculus)의 G프레임을 이용하였고 주컴퓨터는 IBM PC 호환형 컴퓨터(Pentium 100 MHz)를 사용하였다. 영상 획득용 카메라는 흑백 CCD 카메라(TM-7CN, PULNIX)를 이용하였고 구조광 생성은 670nm의 파장으로 평면광 사이각도가 0.77°인 19개의 평면광을 생성하는 레이저 발생기(SNF 519L 670S-5-45°, LASIRIS)를 사용하였다. 이 레이저 발생기는 헤드부를 교체하면 평행광, 십자광, 점광 등의 레이저 패턴을 형성할 수 있다.

카메라와 레이저 발생기는 부착위치의 정밀 이동 및 회전각 조절이 용이하도록 XYZ 방향 그리고, 회전각의 미세조정이 가능한 부착장치를 이용하여 알루미늄 프로파일에 장착하였다. 그림 1은 구성된 실험장치를 보여주고 있다.

나. 카메라 보정

카메라로부터 획득한 대상체의 2차원 영상좌표를 3차원 좌표로 변환하기 위해서는 좌표변환에 영향



Fig. 1 The computer vision and laser structured lighting system for 3-D geometric feature extraction.

을 주는 카메라 렌즈의 초점거리, 영상면의 중심좌표, 화소좌표가 갖는 실제 측도 등의 내부인자와 카메라의 고정애 따르는 자세(펜, 틸트각) 및 위치 등의 외부인자에 대한 정확한 정보를 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 인자들을 직접 추출하지 않고 카메라 자체를 측정장치로 사용하여 한 평면 내에 존재하지 않는, 기지의 3차원 공간상의 6점에 대하여 영상평면에서 화소 좌표값들을 구한 후, 2차원 영상좌표계와 3차원 좌표계를 대응함으로써 카메라 보정을 수행하였다.

카메라로부터 얻어지는 임의의 영상점 P_1 의 화소 좌표와 이에 대응되는 3차원 기준 좌표계 상의 점 P_w 를 균일(homogeneous) 좌표형식으로 표시하면 $P_1 = [U \ V \ W \ 1]^T = [KU \ KV \ KW \ K]^T$ 가 되며 $P_w = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 K는 균일 좌표계 형식으로 표현하는 경우 발생하는 투영변수를 의미하며 U와 V는 영상의 좌측 상단점을 원점으로 할 때 우측과 아래 방향으로 양의 값을 갖는 수평과 수직 방향의 화소값을 나타낸다. 또한 W는 3차원 상의 점이 2차원 영상면으로 투영될 때 소실되는 미지의 값으로 기준면으로부터의 거리를 나타낸다.

3차원 기준 좌표계 상의 점 P_w 는 4×4 선형 좌표 변환행렬 $C = \{C_{ij}\}$ 를 이용하면 영상좌표계 상의 점 P_1 로 다음과 같이 변환된다.

$$P_1 = CP_w \dots\dots\dots (1)$$

소실되는 미지의 정보 W를 무시하고 (1)식을 전개하면 다음과 같다.

$$KU = C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14} \dots\dots\dots (2)$$

$$KV = C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24} \dots\dots\dots (3)$$

$$K = C_{41}X + C_{42}Y + C_{43}Z + C_{44} \dots\dots\dots (4)$$

그리고, 식(4)를 식(2)와 (3)에 대입하면

$$C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z - C_{41}UX - C_{42}UY - C_{43}UZ - C_{44}U + C_{14} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z - C_{41}VX - C_{42}VY - C_{43}VZ - C_{44}V + C_{24} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

여기서, 계수 C_{4i} 는 두 좌표계 상의 전반적인 확대·축소를 나타내는 변수로써 1로 두어도 무방하다. 따라서, 식(5)와 (6)은 모두 11개의 미지계수를 포함한다.

3차원 기준 좌표계 상의 한 점과 이에 대응되는 영상점으로 두 개의 식을 산출할 수 있으므로 기준 좌표계 상의 한 평면에 있지 않은 6개점의 좌표값과 이에 대응하는 영상좌표값을 이용하여 11개의 미지계수값을 얻어 보정 행렬을 산출하였다.

본 연구에서는 3차원 공간상의 기지점을 얻기 위해 샘플차트를 작성하였고, 최초 바닥면의 높이를 영(Z 좌표 = 0)으로 하고 샘플패턴의 중앙점을 XY 축의 원점으로 하는 3차원 기준좌표계를 설정하였다. 그림 2는 사용된 샘플 차트를 보여주고 있다.

샘플차트의 중앙점은 카메라 입력 영상평면(512×480)의 중앙점 화소좌표(256, 240)와 일치시켰다. 샘플점은 샘플차트의 높이를 10mm 간격으로 변화시켜 가며 100mm 까지 임의로 비교적 영상의 왜곡 현상이 적은 대상체 측정영역($R_x = 100 \sim 400$, $R_y = 100 \sim 300$ 화소)내에서 선정하였다.

각 영상평면상의 임의의 점은 기하학적 구조상의 왜곡정보로부터 얻어지는 높이정보 Z 좌표값과 이들 6개의 샘플 점으로부터 얻은 보정계수를 이용하여 3차원 기준 좌표계 상의 점으로 식(5)와 (6)을 기준으로 다음과 같이 변환된다.

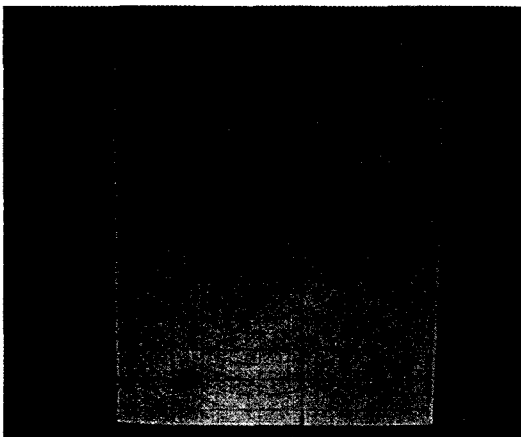


Fig. 2 The sample chart for camera calibration.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A_{11} &= C_{11} - C_{41}U, \\ A_{12} &= C_{12} - C_{42}U, \\ A_{21} &= C_{21} - C_{41}V, \\ A_{22} &= C_{22} - C_{42}V, \\ K_1 &= -C_{13}Z + C_{43}UZ + U - C_{14}, \\ K_2 &= -C_{23}Z + C_{43}VZ + V - C_{24} \end{aligned}$$

다. 높이정보 추출

본 논문에서는 카메라 입력 영상평면과 3차원 공간 좌표계의 XY 평면은 평행하다고 가정하고 다수의 직선 평면광 형태의 투사광을 사용하여 대상체의 3차원 정보를 추출하였다.

물체 표면에 투영된 레이저 곡선상의 임의의 한 점과 그에 대응하는 XY 평면상의 한 점이 렌즈를 통해 영상에 투사된다. 이 때 물체의 높이 정보는 영상으로부터 XY 평면으로 투영된 직선과 이동되어진 직선광의 차이 정보를 추적함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

그림 3과 4에서 $Q(Q_x, Q_y, Q_z)$ 점은 임의의 물체의 표면상의 점이고 $S(S_x, S_y, 0)$ 점은 Q 를 Z 축에 평행하게 XY 평면에 투사해서 얻는 점이다. 그림 3은 $i-1$ 번째, i 번째, $i+1$ 번째 평행광 내에서 이 물체의 높이에 따라 S_{i-1}, S_i, S_{i+1} 점이 Q_{i-1}, Q_i, Q_{i+1} 로 투사되는 상태를 보여준다. 그림 4로부터 R 은 물체가 없을 때 Q 를 지나 XY 평면상에 투사되는 레이저 구조광의 한 점을 나타낸다. 여기서 $\angle QRS$ 는 레이저의 투사각 θ 와 같게 되며 Q 점의 높이정보 Q_z 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_z &= \tan(\theta) \times \overline{RS} \\ &= \tan(\theta) \times (\overline{PS} - \overline{PR}) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

여기서, \overline{PS} 는 P' 와 Q 에 대응하는 영상평면 내에서 화소좌표 I_Q 와 O 로부터 $\overline{I_QO} \times \overline{SCY}_2$ 로써 구한다. 여기서 \overline{SCY}_2 는 높이 Z 에서 얻어지는 Y 방향 화소의 실측계수를 나타낸다. 한편 \overline{PR} 은 $\overline{I_RO} \times \overline{SCY}$ 로 구할 수 있으며 \overline{SCY} 는 기준면에서 얻어지는 Y 방향

화소의 실측계수를 나타낸다. 이와 같이 영상평면내의 길이 정보로부터 실측값을 얻기 위해서는 대상체의 높이에 따른 영상정보의 측도를 알아야 한다. 그러나, 측도를 알기 위해서는 역으로 대상체의 높이를 알아야 하는 문제가 있다.

하지만, 대상체의 높이는 투사광 i 의 XY 평면상의 투사선으로부터 이탈되는 변이량이 대상체의 높이가 증가함에 따라 같이 증가하는 점을 이용하여 대상체의 높이에 따른 투사광 i 의 변이량을 측정하여 이동량과 측도와와의 상관 관계식을 구할 수 있으며, 높이와 투사광 변이량과의 직접적인 상관관계 역시 구할 수 있다.

그런데, Q_z 는 θ 값이 크거나 작은 경우 $\tan(\theta)$ 로 인하여 RS의 미소변화에 매우 민감하게 크게 변화하는 문제가 있다. 또한 레이저 투사광간의 비선형성, 투사 기준면과 영상평면간의 비평행성으로 인하여 실질적으로는 오차를 내포하게 된다. 높이와 투사광 변이량의 직접적인 상관관계는 이러한 오차요소에 대한 보정을 겸할 뿐 아니라 투사각에 의한 대상체 높이의 예민함을 배제할 수 있기 때문에 본 연구에서는 기초 실험을 거쳐 높이와 투사광의 변이량에 대한 직접적인 상관 관계식을 이용하였다.

인접한 투사광간의 각도가 $\Delta\theta$ 인 n 개의 투사광이

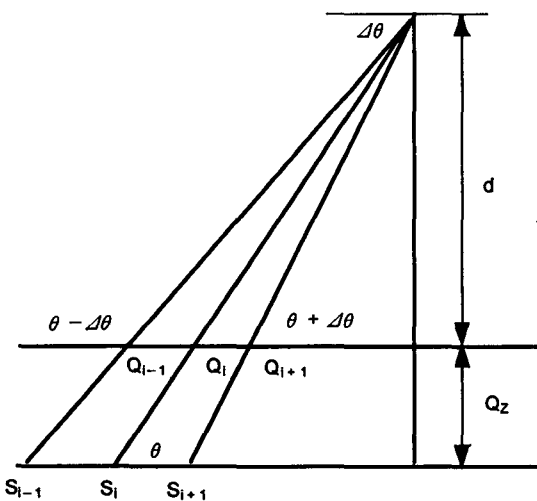


Fig. 3 The structured geometry of $i-1$ th, i th, $i + 1$ th laser plane.

평면에 투사되는 경우 높이 Q_z 인 대상면에 의한 투사광 $i-1, i, i + 1$ 의 이동량은 그림 3에서 보는 바와 같이 다음과 같다.

$$S_{i-1} = Q_z \tan(\pi/2 - (\theta - \Delta\theta)) = Q_z \tan(\theta^* - \Delta\theta)$$

$$S_i = Q_z \tan(\pi/2 - \theta) = Q_z \tan(\theta^*)$$

$$S_{i+1} = Q_z \tan(\pi/2 - (\theta + \Delta\theta)) = Q_z \tan(\theta^* + \Delta\theta)$$

여기서 $\theta^* = \pi/2 - \theta$

그리고 변이량간의 차이는 다음 식으로 표현된다.

$$S_i - S_{i-1} = Q_z (\tan(\theta^*) - \tan(\theta^* - \Delta\theta)) \dots\dots (9)$$

$$S_{i+1} - S_i = Q_z (\tan(\theta^* + \Delta\theta) - \tan(\theta^*)) \dots\dots (10)$$

주어진 물체의 높이에 대하여 각 투사광의 XY 평면 투사선으로부터의 변이량은 XY 평면과 투사 평면광의 투사각도가 작아짐에 따라 증가폭이 커지고 투사각도가 커짐에 따라 증가폭은 작아지게 되며 $\pi/4$ 의 투사각에서는 일정하게 된다. 본 연구에서는 다수의 투사 평면광 중 10번째에 해당하는 중심 투사 평면광의 투사각을 65° 로 설정하였다. 식 (9)와 (10)으로부터 투사각을 65° , 그리고 투사광간 각도 0.77° 의 상태에서 높이 100mm의 경우 산출되는 변이량의 변화는 중심 투사광의 이동량을 기준으

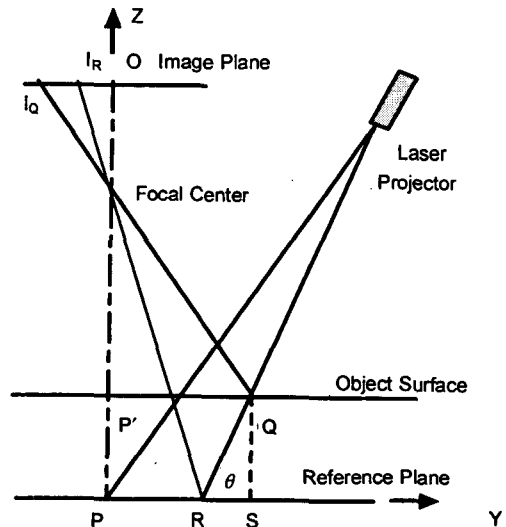


Fig. 4 The triangulation for height information extraction of an object.

로 할 때 각각 1.98mm와 -2.02mm의 차이를 갖는다.

따라서, 본 연구에서는 두 가지 방법으로 변이량과 높이와의 상관관계를 규정하였다.

첫 번째 방법은 각 투사광의 높이에 따른 이동량의 변화를 무시하고 중심 투사광($i = 10$)을 기준으로 화소 이동량을 측정하여 이동량과 높이와의 상관관계식을 구하고 이를 모든 레이저 투사광에 적용하였다. 이 경우 높이 추출 알고리즘의 실행시간이 단축되는 장점을 갖는다. 그러나, 이 방법은 각각의 레이저 평면광이 식 (9)와 (10)에서 보듯이 같은 높이에 대하여 이동량의 차이를 보이므로 중심투사광에서만 투사광일수록 실제의 높이와는 오차가 커지는 단점이 있다.

두 번째 방법은 각각의 투사광에 대하여 이동량과 높이와의 관계식을 구하여 각 투사광에 독립적인 상관관계식을 적용하는 것으로 각 상관관계식은 실험장치 구성과 더불어 결정되게 된다.

라. 3차원 정보 추출 알고리즘

본 연구에서는 카메라 보정과 영상에서 레이저 투사광의 이동량 변화를 이용한 높이 추출 기법을 바탕으로 다음의 알고리즘을 통하여 3차원 정보를 획득하였다.

가) 레이저 구조광이 투사된 물체의 영상을 획득한 후 영상을 이치화한다.

나) 영상의 잡음을 없애기 위해 수학적 형태학 (mathematical morphology)의 기법인 closing을 수행하고 영상을 세선화한다.

다) 대상체의 표면에 투사되어 변화된 레이저 투사광은 영상 내에서 임의의 곡선을 갖게 되며 XY 평면(기준면)에 속하지 않는다. 따라서 영상 내에서 나타난 세선 상의 임의의 한 점이 몇 번째 투사광에 의해 발생되는가를 찾는다. 이 때 탐색은 위에서 아래방향으로, 좌에서 우측방향으로 순차적으로 수행한다.

라) 세선 상의 임의의 점에 대해 일정간격으로 영상좌표를 추출한다.

마) 투사광의 변이량과 높이와의 상관관계를 구한다. 첫 번째 방법이 적용될 경우 중심 투사광인

i번째 세선을 기준으로 얻은 높이와 화소 이동량 (ΔV)의 관계식을 이용하며, 두 번째 방법을 적용하는 경우 데이터 베이스에 저장된 각 해당 투사광에 따른 관계식을 이용한다.

바) 투사광의 순서에 따라 임의의 점에 대해 각 화소 이동량을 산출하고 이동량에 따른 높이를 계산한다.

사) 카메라 보정을 통해서 얻어진 변환 행렬을 이용하여 선택된 임의의 점에 대해 X, Y 좌표값을 구하고 최종적으로 추출점의 실측좌표(X, Y, Z)를 저장한다.

마. 3차원 정보 추출 알고리즘의 검증

카메라 보정과정을 통해서 얻은 좌표 변환 행렬과 레이저 구조광을 이용하여 임의의 물체에 대하여 좌표값을 산출하고 실측치와 비교함으로써 제안된 3차원 정보추출 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

검정을 위해서 먼저 샘플차트의 높이를 10mm 간격으로 변화시켜 가며 100mm까지 대상체 측정 영역($R_x = 100 \sim 400, R_y = 100 \sim 300$ 화소)내의 임의의 점을 대상으로 실험하였다. 또한 그림 5와 같은 임의의 기하도형에 대하여 3차원 정보추출 알고리즘을 적용한 후 추출치와 실측치를 비교하였다.

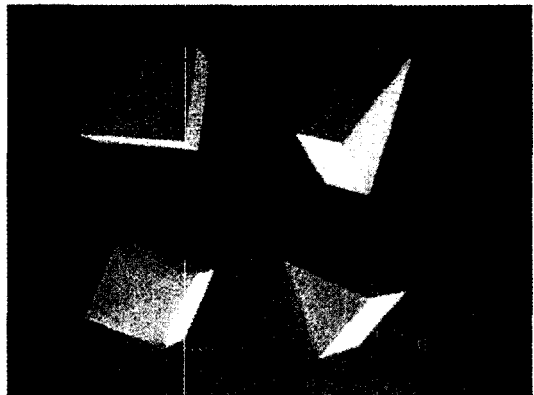


Fig. 5 Various geometric objects to verify 3-D feature extraction algorithm.

3. 결과 및 고찰

가. 카메라 보정 및 레이저 영상처리

본 연구에서 구성된 기계시각 시스템에 대하여 샘플차트의 높이를 변화시켜 가며 얻은 6개의 샘플점으로부터 산출한 카메라의 X, Y 좌표 변환행렬은 다음과 같았다.

$$\begin{bmatrix} -0.0167 & -1.5308 & -0.0638 & 238.9482 \\ 1.0831 & -0.1903 & -0.0782 & 255.8447 \\ 0.0000 & -0.0009 & -0.0003 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

이와 같이 산출된 변환행렬은 직접적으로 영상좌표에 적용할 수 있으며 임의의 점에 대하여 레이저 구조광으로부터 얻은 Z 좌표값과 화소좌표 U와 V를 식(7)에 대입하면 영상좌표에 대응하는 3차원 기준좌표계상의 X와 Y 좌표값을 얻을 수 있다.

표 1은 6개의 샘플점의 3차원 좌표값, 대응되는 화소좌표, 그리고 변환행렬을 이용하여 역산출한 6개 샘플의 좌표값을 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 Z 좌표값이 알려지면 변환행렬을 이용하여 X와 Y 좌표값은 매우 정확히 추출됨을 알 수 있다.

실측치와 비교하여 최대오차는 0.5 mm를 넘지 않았다.

그림 6은 레이저 구조광이 투사되는 상태에서 오면체의 다치영상(그림 5.(b))을 보여주고 있다. 그림에서 직선은 레이저 평행광 내에 물체가 존재하지 않아 레이저가 바닥에 투사된 형태로 나타난 것이며 오면체가 존재하는 곳에서 평행광이 높이에 따라 이동되는 형상을 보여주고 있다.

본 연구에서는 외부 조명을 차단하고 레이저 구조광만을 사용하기 때문에 영상면에는 흑색의 배경 위

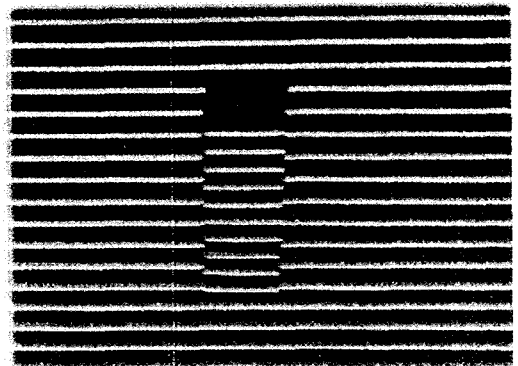


Fig. 6 A gray scale image of pentahedron with laser structured light.

Table 1 Computed and actual coordinates of sample points for camera calibration (X, Y, Z unit : mm)

Node	U	V	Z	Computed X (Actual X)	Computed Y (Actual Y)
1	239	255	100	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
2	239	269	80	12.5 (12.5)	0.0 (0.1)
3	178	285	60	25.0 (25.0)	43.0 (43.3)
4	201	228	40	-25.0 (-25.2)	28.0 (27.9)
5	288	202	20	-50.0 (-50.0)	-38.0 (-37.5)
6	271	288	0	28.0 (27.9)	-25.0 (-25.0)

에 백색의 레이저 구조광만이 나타난다. 이 다치영상을 경계값을 기준으로 이치화한다.

그림 7은 이치화한 영상에서 잡음을 제거하기 위해 1회의 closing을 통하여 레이저선 경계에 나타나는 영상잡음을 제거하고 세선화한 결과를 보여주고 있다.

세선의 두께는 단일 화소선의 크기이며 직선에 나타나는 미세한 굴곡은 기준면(XY 평면)이 미세한 곡면이기 때문에 발생한 것이다. 또한 레이저 구조광이 물체에 대해 경사지게 투사됨으로써 구조광의 두께가 일정치 않은 현상을 보였고 이는 각 세선의 위치 결정에 영향이 있을 것으로 생각되었다. 그러나 이로 인한 세선의 위치변화는 1~2 화소선 정도

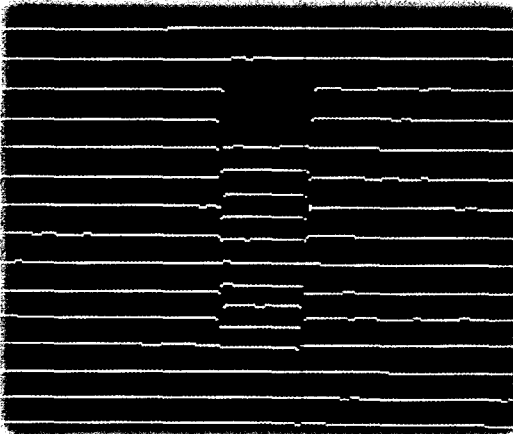


Fig. 7 A skeleton image of pentahedron with laser structured light.

로 나타나 공간좌표 추정에 영향이 없을 것으로 판단하였다. 그림에서 보는 바와 같이 영상을 세선화 처리한 후에도 구조광이 발생시킨 대상체의 형상 특성은 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

나. 높이정보 추출

본 연구에서는 물체의 높이(카메라와 물체간의 거리 변화)를 결정하기 위해서 두 가지 방법을 고려했다. 첫째는 중심 투사광에 대한 화소 이동량과 높이와의 상관관계식을 산출하고 그 관계식을 전체 투사광에 적용하는 것이며, 둘째는 19개의 각 투사광에 대해 개별적인 상관관계식을 설정하여 사용하는 것이다. 두 방법 모두 비선형적 특성을 고려하여 높이에 따른 상관 관계식은 투사광 이동량의 2차 함수로서 구하였다.

첫째 방법으로 중심광에 대한 높이의 상관 관계식은, $Z = -0.0044(\Delta V)^2 + 1.7575(\Delta V) - 1.7989$ 로 나타났다. 표 2는 이 측도 관계식을 이용하여 높이별로(0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm) 12개씩 임의로 선정한 영상좌표들에 대해 추정된 Z 좌표값의 일부를 보여주고 있다. 표에서 Z_c는 샘플점의 실제 높이를 나타내며 (U, V)는 샘플점의 영상좌표이고 Z_e은 높이추출 알고리즘으로부터 추정된 높이이다.

표 2에서 보는 바와 같이 영상의 중심부에 해당하는 측정영역에서는 높이 추정이 정확하여 실측높이 100mm에서 대략 0.2mm를 넘지 않았다. 실측높이

Table 2 Estimated heights of sample points using the correlation equation based on the central projection plane

Order of laser light (projection angle)	Real (Z _r) and estimated (Z _e) height of sample points (mm)											
	Z _r = 0		Z _r = 20		Z _r = 40		Z _r = 60		Z _r = 80		Z _r = 100	
	(U, V)	Z _e	(U, V)	Z _e	(U, V)	Z _e	(U, V)	Z _e	(U, V)	Z _e	(U, V)	Z _e
2nd (58.84°)	(255,116)	0.0	(255,127)	17.0	(255,140)	37.9	(255,153)	57.2	(255,168)	77.8	(255,184)	97.5
6th (61.92°)	(255,179)	0.0	(255,191)	18.7	(255,204)	39.4	(255,218)	60.1	(255,233)	80.4	(255,248)	98.7
10th (65.00°)	(255,239)	0.0	(255,252)	20.3	(255,264)	39.4	(255,278)	60.1	(255,293)	80.4	(255,309)	99.8
14th (68.08°)	(255,297)	0.0	(255,309)	18.7	(255,322)	39.4	(255,336)	60.1	(255,350)	79.1	(255,366)	98.7
18th (71.16°)	(255,352)	0.0	(255,364)	18.7	(255,376)	37.9	(255,390)	58.7	(255,405)	79.1	(255,420)	97.5

80mm 이하에서는 오차 1mm 이하의 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다.

특히 14번째 이상의 구조광들은 실측높이 60mm 이후부터 측정영역에서 벗어나 있는 것으로서 높이가 증가될수록 영상의 가장자리로 이동되며 추정 오차는 크게 나타나고 있다. 실제적으로 실측높이 100mm의 경우에 대략 첫 번째와 10번째 구조광 사이가 영상의 측정영역에 해당되는데 이 때 추정오차는 3mm를 넘지 않았다. 첫 번째 방법에 기초한 높이 추정은 중심투사광 근처의 영역에서는 적용 가능한 것으로 판단되었다.

표 3은 각 투사광에 대해 독립적으로 높이의 상관관계식을 설정하고 이들을 사용하여 표 2와 같은 영상좌표들에 대해 추정 Z 좌표값을 구한 것이다. 따라서 19개의 구조광에 대해 19개의 측도 상관관계식이 존재하게 되며 이들은 저장되었다가 해당 구조광에 대하여 높이를 추정할 때 독립적으로 적용된다.

표 3에서 보는 바와 같이 두 번째 높이 설정법에 기초한 높이추정은 샘플점들의 높이와 측정영역에

관계없이 매우 정확한 것으로 나타났으며 추정오차는 1mm(1~2화소)를 넘지 않았다. 이것은 각 투사광에 대하여 상관관계식이 카메라 렌즈의 굴곡 변이, 영상평면과 XY 기준평면과의 기하학적 평행대응에 대한 불일치, 레이저 평행광의 렌즈 비선형성으로 인한 투사광 간의 간격 변화 등 여러 오차요인이 높이 추정 알고리즘의 상관식에 포함되어진 때문으로 판단된다.

다. 3차원 정보 추출

높이정보 추출 알고리즘의 적용 결과에 따르면 두 번째 높이 설정법에 의한 높이 추정이 보다 정확한 것으로 나타나, 본 연구에서는 그림 5와 같은 임의의 기하학적 도형에 대한 3차원 정보 추출은 두 번째 방법에 기초한 알고리즘을 적용함으로써 구하였다.

표 4는 그림 5의 기하학적 도형 (b)에서 임의의 표면점에 대한 3차원 좌표의 추정치와 실측치를 보여 주고 있으며, 표에서 최우측열에 오차(XYZ점의 실제

Table 3 Estimated heights of sample points using individual correlation equation of the projection plane

Order of laser light (projection angle)	Real (Z_r) and estimated (Z_e) height of sample points (mm)											
	$Z_r = 0$		$Z_r = 20$		$Z_r = 40$		$Z_r = 60$		$Z_r = 80$		$Z_r = 100$	
	(U, V)	Z_e	(U, V)	Z_e	(U, V)	Z_e	(U, V)	Z_e	(U, V)	Z_e	(U, V)	Z_e
2nd (58.84°)	(255,116)	0.0	(255,127)	19.3	(255,140)	40.4	(255,153)	59.8	(255,168)	80.3	(255,184)	99.9
6th (61.92°)	(255,179)	0.0	(255,191)	19.7	(255,204)	39.7	(255,218)	60.1	(255,233)	80.6	(255,248)	99.7
10th (65.00°)	(255,239)	0.0	(255,252)	20.9	(255,264)	39.5	(255,278)	59.8	(255,293)	80.1	(255,309)	100.0
14th (68.08°)	(255,297)	0.0	(255,309)	19.7	(255,322)	39.9	(255,336)	60.4	(255,350)	79.7	(255,366)	100.1
18th (71.16°)	(255,352)	0.0	(255,364)	20.8	(255,376)	39.3	(255,390)	59.8	(255,405)	80.5	(255,420)	99.8

Table 4 Results of sample points of the object (b) in figure 5 from 3-D geometric feature detection algorithm

Sample point	Image coordinate (U, V)	Number of line	Laser displacement (ΔV)	Real coordinate (X, Y, Z)	Estimated coordinate (X', Y', Z')	ΔE SQRT $((X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2)$ (mm)
1	(242, 215)	8th	51	(-35.0, -2.0, 77.0)	(-36.2, -1.8, 77.8)	1.2
2	(260, 214)	8th	50	(-35.0, -15.0, 77.0)	(-37.3, -15.3, 76.5)	2.4
3	(260, 239)	11th	31	(-15.0, -15.0, 46.0)	(-14.8, -15.7, 47.3)	1.5
4	(277, 238)	11th	29	(-15.0, -30.0, 46.0)	(-15.7, -28.9, 45.8)	1.3
5	(260, 271)	15th	5	(-15.0, -15.0, 6.0)	(-14.5, -16.2, 6.3)	1.3

좌표와 X'Y'Z' 추출좌표간의 거리)를 표시하였다.

표 4에서 보는 바와 같이 추정치와 실측치와의 최대오차는 3mm를 넘지 않았다. 이는 임의의 도형 표면점에 대한 실측치를 얻을 때 내재되는 오차를 고려할 때 3차원 정보 추출 알고리즘은 매우 정확한 것으로 판단되었다. 따라서 표에 보여진 오차는 추정치와 실측치의 차이로서 대부분은 실측오차(대략 2mm 이내)에 기인된 것으로 생각된다.

본 연구에서는 한 대의 카메라와 다수의 평행직선 패턴으로 구성된 레이저 구조광을 이용하여 대상체의 3차원 형상정보를 추출하는 알고리즘을 개발하고자 하였으며 검정 결과는 개발된 알고리즘이 매우 정확히 대상체 표면의 형상정보를 추출하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 구성된 레이저 구조광은 그림 6에서 보는 바와 같이 대상체의 한 쪽에서만 투사되기 때문에 대상체의 전체 형상 정보가 추출되는 것이 아니라 카메라에서 보는 한 쪽의 정보만이 추출된다. 따라서 보다 복잡한 형상을 갖는 물체에 대한 3차원 형상정보를 추출하기 위해서는 레이저 구조광의 투사 시스템에 대한 보완이 필요하다고 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 레이저의 직진성을 이용하여 2차원 영상에서 3차원 형상정보를 추출하기 위해 한 대의 카메라와 레이저 구조광을 사용하는 기계시각 시스템을 구축하고 3차원 영상 보정 및 화소 이동량에 따른 높이정보 추출방법을 제시하였으며 획득된 영상내의 레이저 구조광 변화에 근거하여 3차원 정보를 추출하는 알고리즘을 개발하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 카메라 보정을 위하여 6개 기지의 실측좌표를 이용하여 X, Y 좌표변환 행렬을 구하였으며 좌표변환 행렬의 변환오차는 0.5mm 이내로 나타났다.

2) 레이저 구조광을 이용한 3차원 물체의 높이정보 추출 알고리즘이 개발되었다. 특히 높이를 투사광의 이동량의 2차함수로 나타내었고 레이저 이동량으로부터 대상체의 높이정보를 구하였다. 3차원 물체의 높이정보 추출 알고리즘은 추출 오차가 1~2mm 이내로 매우 정확한 것으로 검정되었다.

3) 대상체의 3차원 정보추출 알고리즘이 개발되었으며 임의의 기하학적 도형들을 이용하여 알고리즘을 검정하였다. 검정결과 실측 XYZ 좌표와 추정 X'Y'Z' 좌표간의 차이는 최대 1~2mm 이내로 매우 작은 것으로 나타났다.

4) 본 연구에서 구성된 레이저 구조광은 대상체의 한쪽 면만을 투사하므로 컴퓨터 시각의 단점인 대상체의 반대쪽이 측정되지 않는다는 단점을 극복하지 못했다. 따라서 보다 복잡한 형상을 갖는 물체에 대해 총체적인 3차원 형상정보를 추출하기 위해서는 레이저 구조광의 투사 시스템에 대한 보완이 필요하다고 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 김종형. 1989. 평면 물체 인식을 위한 원통형 레이저 빔 투사형 시각정보 처리 시스템의 개발. 한국과학기술원 박사 논문.
2. Heikkila, J. and O. Silven. 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. IEEE Proceedings 1063-6919/97:1106-1112.
3. Hu, G. and G. Stockman. 1989. 3-D surface solution using structured light and constraint propagation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(4):390-402.
4. Huynh, D. Q. 1997. Calibration of a structured light system: a projective approach. IEEE Proceedings 1063-6919/97:225-230.
5. Liu, Y., T. S. Huang and O. D. Faugeras. 1990. Determination of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondence. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12(1):28-37.
6. Wang, L. and Wen-hsiang Tsai. 1991. Camera calibration by vanishing lines for 3-D computer vision. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(4):370-376.
7. Wang, Y. F. 1991. Characterizing three-dimensional surface structures from visual images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(1):52-60.