

레이저와 비전을 이용한 3차원 정보 추출 계측기 구현

천영석(울산대학교), 서영수(울산대학교), 노영식(울산대학교)

Three dimensional information detective instrument development using laser and computer vision

Y. S. Chun Y. S. Suh Y. S. Ro

Abstract - Cross Laser 와 카메라를 이용하여 2차원 영상정보를 통해 대상체의 3차원 정보를 구하는 3차원 계측 시스템을 구현하였다. 주변에서 값싸게 구할 수 있는 USB Web 카메라를 이용하여 50nm 정밀도를 가지는 구현하기 위해 카메라 보정을 실시하였으며 카메라와 레이저광 사이의 보정도 실시하였다. Cross Laser 을 사용함으로써 대상체의 평면의 방정식을 구할 수가 있어 대상체의 기울어짐에 대해서도 알 수 있다.

1. 서 론

일반적으로 컴퓨터 시각 기술을 이용하여 대상체의 3차원 정보를 얻는 방법에는 관찰자 중심의 좌표계를 기준으로 하나의 카메라를 사용하여 대상체의 자세, 움직임, 명암 등으로 깊이에 대한 정보를 찾아내는 형상인식(Shape from Shading)과 사람의 눈과 같이 두 대의 카메라를 이용하는 스테레오 시각(Stereo Vision), 그리고 한 대의 카메라와 레이저를 이용하는 방법이 있다.

음영을 이용한 형상인식법은 그 알고리즘이 복잡하고 조명의 균일성에 많은 영향을 받아 응용범위가 매우 좁은 것으로 알려져 있다. 스테레오 시각은 3차원 상에서 동일좌표인 임의의 지점이 서로 다른 2 대의 카메라 좌표계로 나타나 이들 영상 좌표계간의 매핑(mapping) 문제를 해결하는 어려움이 있다. 스테레오 시각의 이와 같은 단점을 극복하고 한 대의 카메라로 동일한 수준의 3차원 정보를 얻기 위해 레이저광을 이용한다. 레이저광은 다른 광선과 뚜렷이 구별되어지는 특성으로 인해 영상처리가 용이하며 또한 레이저광의 직진 지향성과 카메라 영상면의 기하학적 관계를 이용하면 대상체의 3차원 정보를 얻을 수가 있다.[1][2]

본 논문에서는 물체의 3차원 영상정보를 추출하기 위해 저가의 USB 카메라 한 대와 Cross Line Laser을 이용하여 3차원 정보 추출시스템을 구축하고 시스템에 존재하는 각 오차에 대한 보상을 통해 저가의 카메라로 50nm 정도의 정밀도를 가지는 계측기를 구현하였다. 아래의 3단계 과정을 거쳐 대상체의 3차원 정보를 추출하였다.

1단계 : 물체의 3차원 공간과 카메라 영상의 2차원 사이의 관계를 나타내는 인자들을 추출하는 카메라 보정을 수행하였다.

2단계 : 3차원 추출 시스템에 존재하는 각 오차에 대한 오차 보상 알고리즘을 수행하였다.

3단계 : 획득한 영상 정보를 통하여 대상체의 실제적인 3차원 정보를 추출하였다.

2. 본 론

2.1 Cross Line Laser 를 이용한 3차원 정보 추출

2.1.1 기하학적 구성도

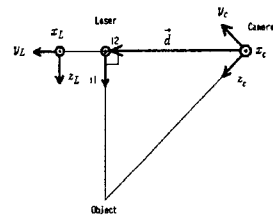


그림 1. 시스템 구성도

본 논문 시스템의 구성도는 위의 그림과 같다. 그림에서 보듯이 Object(대상체)의 수직선상에 있는 Cross Line Generator에서 레이저광이 방출된다. 그리고 Cross Line Generator에서 d 만큼 떨어진 카메라가 대상체에 비추는 레이저광을 읽어 들이게 된다. Camera에서 바라보는 3차원 공간의 좌표 값을 알아내기 위해 다음과 같은 식을 이용한다.

$$\vec{\lambda c} = \vec{d} + \eta \vec{T}_1 + \mu \vec{T}_2 \quad (1)$$

(1) 식에서 미지수 λ, η, μ 을 구하면 CCD 에 찍힌 영상으로써 3차원에서의 공간을 인식할 수 있게 된다.[3]

2.1.2 알고리즘

(1) 식의 각 인자에 대해서 알아보자.

우변의 식에서 $\eta \vec{T}_1 + \mu \vec{T}_2$ 의 부분은 Laser Beam Vector 라고 하며 Cross Line Generator에서 나오는 Laser Beam 을 표현한 것이다. Laser Beam이 \vec{c} 와 같은 형태로 나오기 때문에 두 부분으로 나누어서 Laser Beam Vector 을 구한다. 그리고 Laser Beam을 나타내는 unit vector 을 \vec{T}_1, \vec{T}_2 로 나타내었다. Laser Beam 이 나아가는 방향을 \vec{T}_1 , 그리고 Line을 만들어 내는 부분을 \vec{T}_2 로서 표현하였다. 그리고 변수 η, μ 을 통해서

우선 \vec{c} (Laser에서 Object 로 바라볼 때) 의 Line Vector 을 구해보면, \vec{T}_1 은 Laser Beam 이 나아가는 방향이며 레이저 좌표계의 z_L 값을 나타낸다. \vec{T}_2 는 레이저 좌표계의 x_L, y_L 으로 표현된다. 따라서 $\vec{T}_1 = [001]^T$ 으로 나타낼 수 있다. Laser Line 의 직선 방정식이 $y = -x$ 이므로 $\vec{T}_2 = [1 -1 0]^T$ 이다.

따라서 (2)의 Laser Vector l 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\therefore l_1 = \eta l_1 + \mu l_2 = \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \\ \eta \end{bmatrix} \quad (2)$$

다음으로 (3) (Laser에서 Object 로 바라볼 때) 의 Line Vector 을 구해보면 앞서 방법과 같이 해서 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\therefore l_2 = \eta l_1 + \mu l_2 = \begin{bmatrix} \mu \\ \mu \\ \eta \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 식과 (3) 식으로 Cross Line Generator에서 나오는 Laser Beam을 Vector 로 나타낼 수가 있다.

\vec{d} 는 카메라 좌표계와 레이저 좌표계 사이의 거리를 나타낸다. 이 벡터는 차후 카메라 보정을 통해서 추출한다.

마지막으로 \vec{c} 에 대해서 살펴보면, 카메라의 화소에 찍힌 임의의 점이 3차원 공간에 어느 지점을 가리키는 지를 알려주는 방향벡터이다. 이를 Direction Vector of Pixel(DVP)로 지칭한다.

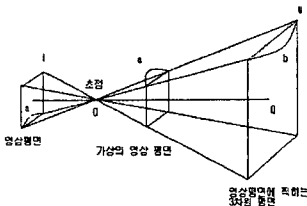


그림 2. Direction Vector of Pixel (\vec{c})

위의 그림에서 카메라 핀홀 모델을 보게 되면 3차원 공간의 평면 W 은 영상평면 I 에 d/b 비만큼 축소된 것을 볼 수가 있다. 따라서 각 Pixel 의 DVP 은 초점에서부터 거리 H 만큼 떨어져 있는 3차원 상의 평면을 가리키게 된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_u} & \frac{\cos \theta}{\alpha_u} & -\frac{v_0}{\alpha_v} \cos \theta & -\frac{u_0}{\alpha_u} \\ 0 & \frac{\sin \theta}{\alpha_v} & -\frac{v_0}{\alpha_v} \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(단, x_p, y_p 는 카메라의 pixel 좌표이다)

지금까지 구해온 (1)식의 각 인자를 이용해서 미지수 λ, η, μ 을 구해보면,

$$\lambda \vec{c} = \vec{d} + \eta \vec{l}_1 + \mu \vec{l}_2$$

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \eta \\ \mu \end{bmatrix} = [C, -R\vec{l}_1, -R\vec{l}_2]^{-1} * \vec{d} \quad (5)$$

(5) 식을 통해서 λ, η, μ 을 구할 수가 있다.

λ, η, μ 을 통해서 Laser에서 바라본 3차원 공간은 다음 식을 통해 알 수가 있다.

$$L_w = \eta \vec{l}_1 + \mu \vec{l}_2 \quad (6)$$

(6) 식을 통해 본 과제의 결론을 알 수가 있는 것이다. 그리고 Camera에서 바라본 3차원 공간은 다음과 식에 의해 구할 수 있다

$$C_w = \vec{\lambda} \vec{c} \quad (7)$$

2.2 카메라 보정

2.2.1 카메라 사영행렬

카메라로부터 획득한 대상체의 2차원 영상좌표를 3차원 좌표로 변환하기 위해서는 좌표변환에 영향을 주는 카메라 렌즈의 초점거리, 영상면의 중심좌표 등의 카메라 내부변수와 카메라 자세를 알려주는 카메라 외부변수에 대해 정확한 정보를 필요로 한다.[2]

이 논문에서 쓰인 카메라 보정방법은 3차원 공간의 좌표값을 이미 알고 있는 점들을 카메라로 통해 관측함으로써 카메라 보정을 수행하게 된다.[4]

카메라의 사영 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$s \vec{m} = P \vec{M} = A [R, t] \vec{M} \quad (8)$$

여기서 \vec{m} : 영상 좌표, \vec{M} : 3차원 좌표

A: 카메라 내부 행렬

R: 카메라 회전행렬(외부변수)

t: 카메라 전이행렬(외부변수)

카메라 보정을 통해 사영행렬 P의 내부인자인 A, R, t의 각 인자들을 구할게 된다.

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_u & -\alpha_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & \alpha_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{11}^T \\ r_{21}^T \\ r_{31}^T \end{bmatrix}, \quad t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2.2 카메라와 레이저광 사이의 보정

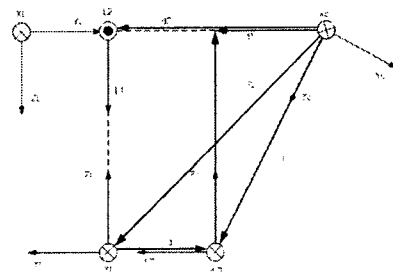


그림 3. 카메라와 레이저광 사이의 오차

여기서 (c): 카메라 좌표계

(l): 레이저 좌표계

(m): 카메라 보정 모델 좌표계

(t): 표면에 비친 레이저광 좌표계

본 논문의 이상적인 시스템은 그림 1과 같이 레이저의 광축과 카메라의 광축이 일치하는 경우이나 실제 시스템은 그림 3과 같이 벡터 \vec{g} 와 같은 오차가 발생하게 된다. 따라서 벡터 \vec{g} 에 관해서 보상하는 알고리즘을 기술해 보고자 한다.

카메라 보정을 통해서 카메라와 보정 모델 사이의 변환행렬 T_1 을 알고 있으며 그림 3에서 보면 다음과 같이 됨을 알 수가 있다.

$$T_1 = d_1 - h \quad (10)$$

카메라와 레이저 사이의 변환 관계는

$$\begin{aligned} d_2 &= d_1 - g \\ &= T_1 + h - g \end{aligned} \quad (11)$$

그리고 레이저광 좌표계와 보정 모델 좌표계사의 오차를 나타내는 벡터 \vec{g} 는 DVP 에 의해서 구할 수 있다. 카메라 좌표계와 레이저광 좌표계 사이를 나타내는 변환 행렬 T_2 는 DVP 로 나타낼 수 있으며 이를 aDv 으로 표현한다. 미지수 α 를 구하기 위해서는 T_2 을 보정 모델 좌표계으로 기준으로 표현하게 되면 z축의 높이가 0이 된다.

$$\alpha(R_1)^{-1}Dv + (R_1)^{-1}t_1 = 0 \quad (12)$$

여기서 R_1, t_1 은 T_1 의 내부의 회전, 전이행렬이다.

(12) 을 통해 구한 aDv 에서 대해 보정 모델 좌표계로 변환하면 $T_{m-c}(aDv) = [x_2 \ y_2 \ 0]^T$ 가 되며 T_1 을 보정 모델 좌표계로 변환하면 $T_{m-c}(T_1) = [0 \ 0 \ 0]^T$ 이므로 오차 \vec{g} 는 다음 식으로 표현된다.

$$g = [-x_2 \ -y_2 \ 0]^T \quad (13)$$

(13)식을 이용하여 (4)식을 다시 풀어보면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} s \\ \eta \\ \mu \end{bmatrix} = [C \ -R\vec{t}_1, \ -R\vec{t}_2]^{-1} * \vec{d}_1 \quad (14)$$

2.3 실험

2.3.1 실험장치

본 논문에서 구축한 실험 장치는 크게 영상처리를 위한 카메라, 대상물 이동을 위한 X,Y,Z axis States 그리고 Cross Laser Generator의 세 부분으로 구성되어 있다. 영상처리를 위한 카메라는 주변에 쉽게 구할 수 있는 USB Web CMOS 카메라이다. 비디오 출력은 최대 640*480영상을 제공한다. 대상체의 정밀한 움직임을 위해 1um의 정밀도를 가지는 SIGMA KOKI 사의 X,Y,Z axis States 을 이용하였다. 그리고 레이저는 LANICS 사의 2.5mW 의 출력을 가지는 Cross Laser Generator 을 가지고 그림 4와 같이 구성하였다.

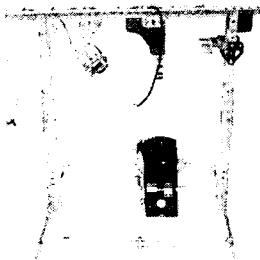


그림 4. 실험 장치

2.3.2 3차원 기준 좌표계

13개의 샘플점들의 2차원 영상좌표와 3차원의 기준좌표계 정보를 이용하여 카메라 보정을 한 결과 카메라 사영 행렬 P는 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$P = \begin{bmatrix} 5.8442 & 1.4532 & -1.9117 & 325.6419 \\ -0.0491 & -3.8961 & -4.7201 & 244.7106 \\ -0.0004 & 0.0038 & -0.0050 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.3 대상체의 높이 변화에 따른 3차원 정보 추출

그림 5의 영상이 기준선상의($z_0=0$) 대상체에 레이저를 비춘 영상이다. 이 기준선상의 영상좌표 (u, v)의 변화폭의 차이를 가지고 (14)을 이용하여 대상체의 높이를 추출하였다.

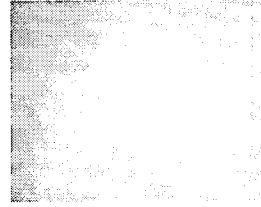


그림 5. 레이저광이 비춰진 기준선상의 대상체

표 1을 보면 대상체의 높이에 따른 3차원 형상정보를 측정된 결과이다. 이 실험은 X,Y,Z axis States 위에 대상체를 올려놓고 z축을 따라서 1mm씩 이동한 것이다.

z_L 은 레이저 좌표계에서 바라본 대상체의 높이이다. z_0 는 기준선상의 대상체를 X,Y,Z axis States으로 1mm이동한 것으로 3차원 측정 결과의 비교치이다. 그리고 z_{Gap} 는 기준선상의 대상체를 기준으로 한 높이 차이를 나타낸다. z_{Gap} 을 보게 되면 대략 50nm 내의 측정오차가 있음을 볼 수 있다.

표 1. 대상체의 높이 측정 결과

No	z (subpixel)	z_L	z_0 (mm)	z_{Gap} (mm)	Error
1	227.7189	124.0365	0	0	0
2	231.4825	125.0632	1	1.0267	0.0267
3	235.2255	126.0855	2	2.0490	0.0490
4	238.5685	127.0087	3	2.9722	0.0278
5	242.0128	127.9773	4	3.9408	0.0592
6	245.7417	129.0481	5	5.0116	0.0116
7	249.2590	130.0476	6	6.0110	0.0110
8	252.7467	131.0590	7	7.0225	0.0225
9	256.0498	132.0217	8	7.9851	0.0149
10	259.6278	133.0873	9	9.0507	0.0507
11	262.8257	134.0211	10	9.9846	0.0154

3. 결 론

본 논문에서 사용된 실험장치로 이용하여 측정된 결과를 보면 상당한 정밀도를 가짐을 볼 수가 있다. Cross Laser Beam 을 이용한 목적이 대상체의 평면의 방정식을 알 수 있으므로 계측기로부터의 높이 및 기울어짐까지 측정하는데 있었다. 그러나 위의 실험처럼 높이만 변화하였을 때도 최대 2° 정도 나는 것을 볼 수 있었다. 차후 연구과제는 평면의 각도의 측정은 오차가 많이 발생하므로 이 오차를 줄이는 알고리즘에 대한 연구가 좀 더 보완이 되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김선일, 정재문, 양윤보, "레이저 슬릿광을 이용한 3차원 계측 장치에 관한 연구", 대한전자공학회논문지B, 제29B권2호, pp 27-39, 1992
- [2] 오세영, 황현, 장여창, 임동혁, "컴퓨터 시각과 레이저 구조광을 이용한 물체의 3차원 정보 추출", 한국농업기계학회지, 1998년 하계 학술대회 논문집, pp 291-300, 1998
- [3] http://www.muellerr.ch/engineering/laserscanner/tutorial/the_principle.html
- [4] Gang Xu, 쯔지 사부로, "3차원 비전", 대영사, pp 105-109, 2000