

Three-Dimensional Shape Measurement of a Specular Object by LED Array Reflection

Jee Hong Kim[†]

Department of Display Engineering, Pukyong National University 45 Yongso-Ro, Busan 608-737, Korea

(Received November 12, 2015; Revised manuscript January 5, 2016; Accepted January 11, 2015)

An optical method to measure the three-dimensional (3D) shape of a surface with specular reflection is proposed. The proposed method is based on the analysis of the geometric path of the light from a point source, and the relative displacements of points in the reflection image. The 3D shape of a concave mirror is shown to be determined approximately via experiments, where the vision system consists of LED array illumination, a half-mirror, and an imaging sensor.

Keywords: 3-D Shape, Specular Reflection

OCIS codes: (100.0100)Image processing; (120.5700)Reflection; (150.0155)Machine vision optics

LED Array의 반사영상에 의한 경면체의 3차원 형상 측정

김지홍[†]

부경대학교 융합디스플레이공학과
Ⓣ 608-737 부산광역시 남구 용소로 45

(2015년 11월 12일 받음, 2016년 1월 5일 수정본 받음, 2016년 1월 11일 게재 확정)

본 논문은 경면체의 3차원 형상을 측정하기 위한 광학시스템에 관한 것으로, 특히 LED 배열로 이루어진 점광원과 하프미러, 이미지센서로 구성된 비전시스템을 구성하여 광로분석을 수행하고 효과적인 근사화 방법을 제시한다. 실험을 통하여 취득된 영상 내의 점광원의 상대적 위치변화로부터 경면체의 3차원형상의 효과적 추정이 가능함을 보인다.

Keywords: 3차원형상측정, 경면반사

OCIS codes: (100.0100)Image processing; (120.5700)Reflection; (150.0155)Machine vision optics

I. 서 론

최근 레이저와 LED 등 다양한 광원과 디스플레이 장치가 개발되고 고해상 카메라와 영상처리 기술을 손쉽게 접함에 따라, 3차원 표면의 형상 측정에서도 광학적 방법이 효과적으로 사용되고 있다. 이 같은 광학적 방법은 특정한 형태와 방향을 갖는 광원 및 카메라 등 센서의 조합을 구성하여 물체의 표면에서 반사되는 빛 혹은 이미지를 센서로 캡처한 후, 이를 이용하여 3차원 표면의 형상을 구하는 반사측정법(Reflectometry)이 기본을 이루며, 물체의 반사특성에 따라 효과적인 측정시스템을 구성해야 한다^{[1][2]}. 나아가서, 간섭무늬(Fringe)와 같이 특정 패턴과 위상정보를 갖는 구조광을 물체의 표면에 투사하고 반사광에 의한 이미지가 어떻게 변형되는지를 분석하여 3차원 형상정보를 알아내는 방법이 많이

사용되며^[3], 이는 통상적으로 Deflectometry로 알려져 있어 금속면과 같은 경면반사특성을 갖는 물체에 효과적으로 적용되는 사례가 보고되고 있다^[4-6]. 일반적인 광학적 방법은 특정 목적에 맞게 설계된 주기나 위상의 간섭무늬와 같은 패턴을 컴퓨터로 만들고 이를 스크린에 표시한 후, 반사체에서 반사된 영상을 카메라로 취득하여 분석하는 형태가 대부분이나, 반사된 영상만으로 정확한 3D 형상 정보를 구하기 위해서는 정확한 Calibration이나 초기값의 제공이 필요하며, 이는 Height-Slope Ambiguity에 기인한다^[6,7]. 이것은 다음과 같이 간단한 광로의 예를 통해 설명될 수 있다. Figure 1에서 광원에서 나온 빛이 반사면에서 입사각과 동일한 각도로 반사된 후 렌즈를 통해 센서에 도달하는 광로를 기준으로 반사면의 높이와 기울기가 서로 다른 경우에도 광로가 변화할 때 동일한 광로로 빛이 진행하는 경우가 존재함을 보인다. 따라

[†]E-mail: jeehongk@pknu.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

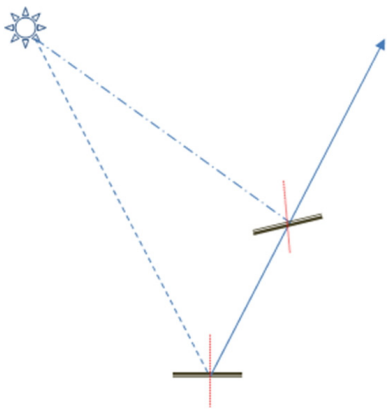


FIG. 1. Optical path of light reflected from specular surface.

서, 이미지센서로 취득한 영상에서의 광원의 위치 등 광로의 분석만으로는 반사면의 기울기와 위치를 동시에 구하는 것이 불가능하며, 이와 같은 Height-Slope Ambiguity를 해결하는 연구가 많이 시도되고 있다. 대표적으로 로봇팔에 부착된 스크린과 카메라를 이동하거나^[8], 복수개의 스크린과 카메라를 사용하여 추가적인 정보를 추출하여 초기화정보로 이용하는 방법이 제시되었고^[9], [7]에서는 서로 다른 2개의 입사용 패턴조명을 입사한 뒤 반사되는 2개의 반사된 영상사이의 차이를 이용하여 국소부분의 형상정보를 취득하면서 반복적으로 영역을 확장하는 방법을 제시하였으나, 많은 계산량을 요구하는 단점이 있다. 또한, [10]에서는 높이의 변화를 무시하고 기울기만을 구한 후 최소자승추적법을 사용하여 3차원형상을 근사화하는 방법을 제안하였으나 초기화를 위한 부가적 정보가 필요하고 Calibration 과정이 필요하다.

본 연구에서는 경면반사체를 대상으로 LED Array의 반사 영상에서의 광원의 위치변화를 측정하여 반사체 표면의 형상을 추정하는 광학적 측정방법을 제안한다. 이는 수면에서 반사되는 밤하늘의 별빛의 움직임에 의해 수면의 모양에 대한 정보를 추정하는 원리와 유사하다고 볼 수 있다. 제안된 광학적 방법에서는 점광원과 렌즈의 중심부를 연결한 광축에 일치한 기준점을 제공하도록 광학시스템을 구성하고 이 기준점으로부터 주위로 퍼져나가면서 높이의 변화와 기울기를 추정하는 방법을 사용하였다. 실험을 통해 LED 광원과 하프미러, CCD 카메라로 비전장치를 구성하고 입사광에 의한 반사영상을 취득, 분석하여 3차원형상의 추정하였으며 실측치와의 비교를 수행하여 제시된 방법의 효용성을 보인다.

II. 광학시스템에 의한 점광원의 반사영상 취득

본 논문에서는 앞 절에서 언급된 Height-Slope Ambiguity를 극복하는 방법 중의 하나로서, 기준점을 용이하게 선정하는 광학시스템의 구성과 반사면의 연속성을 이용하여 3차원형상을 효과적으로 구하는 근사화방법을 제시한다. 또한, 공간적으로 배열된 LED로 이루어진 조명이 평면거울에 반사되어 CCD 카메라로 취득된 영상과 곡면의 경면반사체의 표

면에서 반사되어 취득된 영상을 비교하고, 두 영상 사이의 점광원의 위치변화를 이용하여 곡면의 3차원형상을 추정한다. 우선, 경면반사체의 3차원형상 추정을 위한 영상취득장치로서 아래와 같이 비전시스템을 구성하였다.

Figure 2는 실험장치의 구성도를 간략히 도시한 것으로 LED의 배열로 이루어진 점광원에서 나온 빛이 하프미러를 통하여 반사체에서 반사된 후 카메라의 렌즈를 거쳐 이미지센서로 진행되도록 구성되어 있다. 이 때, 광원 장치의 중앙에 위치한 점광원을 기준점으로 하여 이 광원으로부터의 빛은 반사체에 수직으로 입사되고 반사되어 렌즈의 중심점을 거쳐 이미지센서의 중심에 도달하도록 일치시켰으며, 반사체는 xy테이블에 위치하여 수평으로 조정될 수 있도록 하였고 Fig. 3에 실제 구성한 장치의 모습이 보인다. 광원은 가로 세로 각 13열의 일정간격으로 배열된 LED를 사용하였고, 이미지센서로 2048×1536 화소의 화상을 취득한다. 실험을 위한 반사체로 평면거울과 오목거울을 사용하여 취득된 영상을 Fig. 4과 Fig. 5에 보인다.

Figure 4과 Fig. 5를 보면 반사면의 높이나 기울기에 따라 점광원의 위치가 여러 방향으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 취득영상에서 점광원의 위치는 해당하는 부분의 무게중

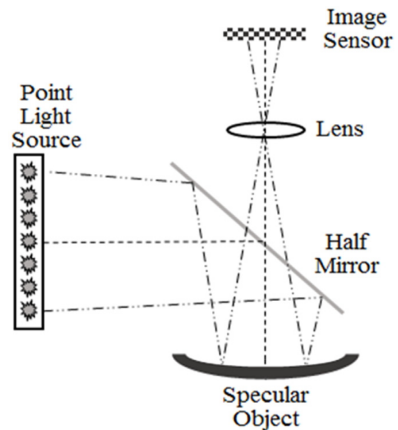


FIG. 2. Depiction of experimental system.

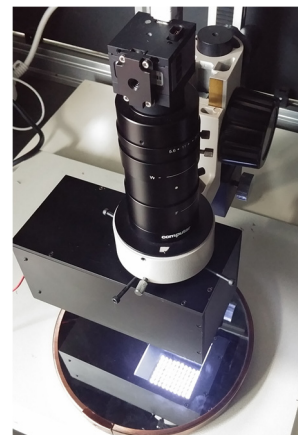


FIG. 3. Picture of experimental system.

심으로 구하였고^[11], 평면거울을 기준으로 오목거울일 때의 반사영상에서 점광원의 위치가 변화한 거리와 방향을 Fig. 6

와 Table 1에 보인다. Figure 6를 보면 위치의 변화가 기준이 되는 56번 점광원을 중심으로 대칭이 아님을 보이며, 이는 오목거울의 형상이 어느 정도 왜곡되어 있음을 관찰할 수 있었다.

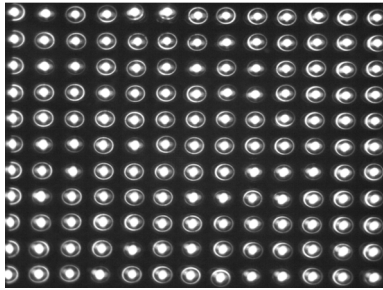


FIG. 4. Captured image from flat mirror.

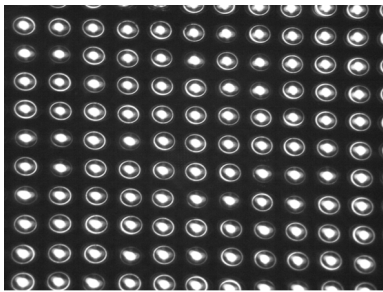


FIG. 5. Captured image from concave mirror.

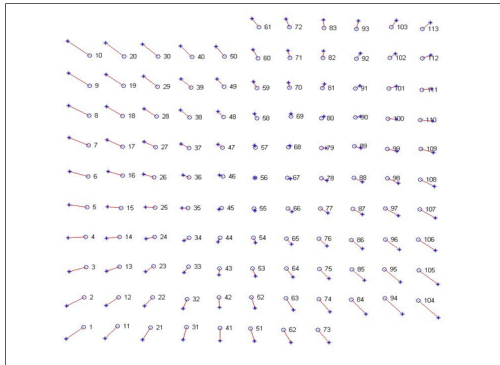


FIG. 6. Movement of point lights.

III. 위치변화를 이용한 3차원 형상추정

앞 절에서 구한 각 점광원들의 위치의 변화정보로부터 반사면의 3차원 형상을 추정하기 위해 광원으로부터의 빛이 반사체에서 반사되어 렌즈를 통해 이미지센서로 입력되는 기하학적 광로분석을 이용하기로 한다. 일반적인 3차원형상은 반사면의 높이와 기울기가 동시에 변화하는 경우가 대부분이며, 간단한 2차원 도해를 이용하여 광로분석을 기술한다.

Figure 7에는 점광원 L로부터의 빛이 반사면에서 반사되고 카메라 렌즈를 통해 입사되어 센서에 도달하는 광로가 나타나 있다. 점광원 L의 위치를 l 로, 렌즈에서 CCD까지의 거리를 f 로 하고, 반사점 A의 높이를 기준으로 하고 점 A로부터 렌즈까지의 z축상의 거리를 Z_1 , 점광원까지의 거리를 Z_2 로, 점광원 L의 빛이 렌즈에 입사될 때의 입사각을 ϕ , 센서에 도달한 C의 위치를 h 로 나타낸다. 높이와 기울기가 동시에 변화하여 반사면의 점 B에서 반사한다고 하자. 높이가 ΔZ , 기울기가 δ 만큼 변화한 경우, 반사광이 렌즈에 입사되는 입사각을 ϕ' , 센서 도달점 C의 위치를 h' 로 표시하면 식(1)과 (2)가 성립한다.

$$l = Z_1 \tan \phi + Z_2 \tan \phi \tag{1}$$

$$l = (Z_1 + \Delta Z) \tan \phi' + (Z_2 + \Delta Z) \tan(\phi' + 2\delta) \tag{2}$$

여기서 $\tan \phi = \frac{h}{f}$, $\tan \phi' = \frac{h'}{f}$ 이다.

동일한 점광원에 대해 그 위치가 일정함에 따라, 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 반사면의 기울기와 위치변화를 포함한 식이 성립함을 알 수 있다.

$$Z_1 \tan \phi + Z_2 \tan \phi = (Z_1 + \Delta Z) \tan \phi' + (Z_2 + \Delta Z) \tan(\phi' + 2\delta) \tag{3}$$

TABLE 1. Displacement & orientation of movements (unit : pixel & deg.)

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11											
1						34.4	126	27.9	111	26.1	94	26.7	77	28.0	55	32.6	43					
2	82.4	144	71.8	141	61.6	138	50.9	133	41.4	127	31.8	118	25.0	106	22.0	87	20.2	57	22.0	39	28.2	23
3	76.0	147	65.5	144	54.0	141	42.5	137	32.6	130	23.7	118	17.3	100	14.3	65	16.4	38	23.1	18	29.2	6
4	69.4	152	58.0	148	46.0	146	35.5	140	24.8	133	15.7	117	9.1	84	10.0	37	16.3	11	26.0	-2	36.2	-6
5	64.5	156	51.9	155	39.4	153	26.9	049	17.0	140	7.3	113	6.4	39	13.0	-4	20.6	-14	30.1	-15	40.2	-19
6	57.3	164	45.9	164	33.5	163	20.2	160	11.2	153	0.0	0	9.5	-18	17.5	-24	27.7	-26	36.7	-26	47.0	-27
7	54.6	172	40.2	174	29.1	176	18.0	-180	8.9	-153	8.5	-69	17.0	-40	26.6	-34	34.7	-33	44.9	-32	55.2	-32
8	53.1	-177	39.2	-174	26.9	-165	17.5	-149	13.9	-111	17.1	-69	24.2	-52	33.2	-44	44.0	-39	54.2	-38	63.8	-35
9	53.2	-164	41.2	-157	30.0	-143	23.0	-124	22.1	-95	27.5	-71	33.8	-56	43.2	-48	51.6	-44	63.0	-42	73.2	-39
10	59.1	-152	47.2	-144	37.6	-130	33.8	-109	33.0	-88	37.6	-73	45.7	-61	54.2	-52	64.4	-48	73.5	-45	83.5	-43
11	65.6	-142	55.2	-134	46.1	-120	42.2	-104	42.0	-89	43.7	-74	47.4	-62	54.8	-52						

TABLE 2. Estimated heights of concave mirror (unit : mm)

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1						0.154	0.149	0.116	0.108	0.130	0.248
2	0.344	0.250	0.201	0.139	0.104	0.103	0.084	0.082	0.077	0.102	0.207
3	0.281	0.205	0.160	0.102	0.065	0.057	0.041	0.041	0.074	0.099	0.172
4	0.223	0.148	0.100	0.069	0.031	0.024	0.032	0.030	0.043	0.084	0.153
5	0.182	0.108	0.060	0.032	0.013	0.006	0.012	0.032	0.041	0.082	0.165
6	0.155	0.102	0.057	0.025	0.005	0.000	0.005	0.025	0.055	0.105	0.157
7	0.157	0.112	0.060	0.033	0.012	0.006	0.013	0.032	0.062	0.127	0.187
8	0.172	0.123	0.078	0.050	0.031	0.026	0.030	0.050	0.100	0.151	0.225
9	0.220	0.149	0.114	0.081	0.060	0.054	0.065	0.096	0.150	0.202	0.265
10	0.259	0.192	0.158	0.126	0.108	0.095	0.108	0.152	0.190	0.263	0.313
11	0.297	0.269	0.224	0.189	0.171	0.163	0.166	0.212			

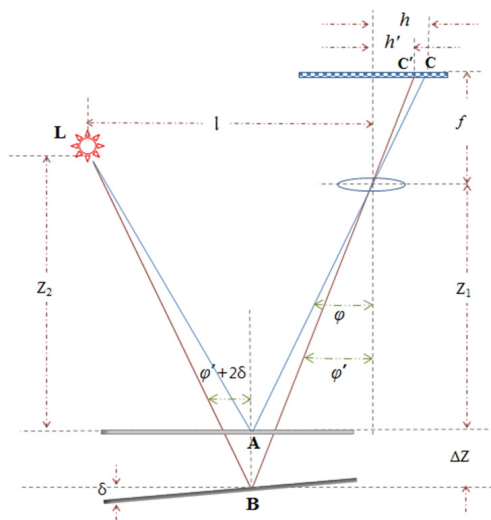


FIG. 7. Optical path of light reflected from specular surface.

위 식을 관찰하면 점광원의 위치 h 와 h' 의 값을 알 때, 식 (3)을 만족하는 ΔZ , δ ,는 무수히 많음을 알 수 있다. 따라서 취득한 영상을 이용한 광로분석만으로 기울기와 위치를 동시에 구할 수는 없으며, 높이의 변화나 기울기 중 하나를 아는 경우에만 다른 하나를 구할 수 있다^[12].

제안된 방법에서는 우선 실험용 광학계에서 오목거울을 이동하여 취득영상의 중심에 기준점광원이 오도록 한다. 이 경우 반사면에서 기준점광원으로부터의 빛이 반사되는 지점의 기울기는 광축에 수직이 되고 이 지점을 기준점으로 한다. 이 지점은 오목거울에서는 가장 위치가 낮은 점으로서 기준점의 주위는 다른 반사점보다 기울기가 완만한 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서, 이 기준점에 해당하는 점광원을 중심으로 인접한 점광원의 반사점에서는 기울기의 변화는 없고 높이만 변화하였다는 가정 하에 높이의 변화만을 구하였다. 다음으로 기준점과 인접한 점광원 사이의 높이의 변화를 이용하여 반사되는 지점의 기울기를 근사적으로 구하고, 이 기울기를 기준점에서 멀어지는 방향으로 다음에 위치한 광원의 반사지점의 기울기로 설정하여 가로세로 방향으로 확산하면서 근사화된 기울기를 이용하여 높이의 변화를 구하고,

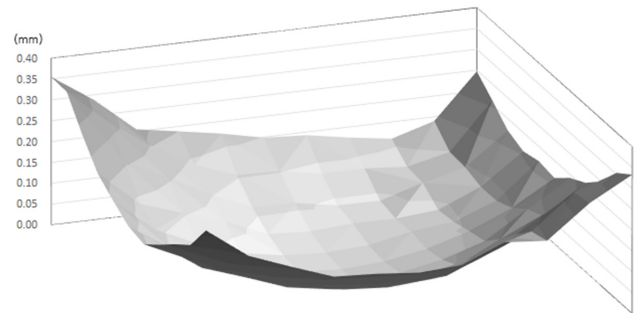


FIG. 8. Estimated 3-D shape by proposed method.

변화된 높이를 이용하여 다시 곡면의 기울기를 근사적으로 구하는 과정을 순차적으로 진행하면서 3차원형상을 추정하는 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 경면반사체에서는 Fig. 6에서 56번으로 표시된 점광원을 기준점으로 하였으며 주변의 점광원 8개에 대한 위치의 변화를 먼저 구하였다. 이 때는 높이만 변화하고 기울기는 변하지 않는다는 가정으로 구할 수 있으며, 이렇게 구한 높이의 변화를 이용하여 8개의 점광원의 반사점의 가로 세로방향의 기울기를 추정하였다. 다음으로 다시 기준점에서 멀어지는 방향으로 상하좌우의 반사점에 대해 앞서 구한 기울기가 근사적으로 같다는 가정으로 높이의 변화를 구하였고, 이렇게 구한 높이의 변화를 이용하여 가로 세로 방향의 기울기의 변화를 추정하였다. 이와 같은 방법을 반복하면서 중심이 되는 기준점에서 멀어지는 방향으로 높이의 변화와 가로 세로 방향의 기울기를 추정하여 전체적인 곡면 형상을 구하였다. 실험에 사용한 오목거울에 대해 추정된 높이의 변화와 기울기가 Table 2에 보이며 전체적인 곡면의 형상이 Fig. 8에 보인다.

제안된 방법은 3차원 형상의 근사화된 높이를 제공하나 초기화가 간단하고 높이와 기울기가 동시에 변하는 경우에도 적용이 가능하다. 실험에 사용된 오목거울의 경우, 추정된 범위안에서 높이변화의 실측치를 3차원측정기(Mitutoyo MACH-V9106)를 사용하여 구하였으며, 그 결과가 Table 3에 보인다. 실측치와 비교해서 최대오차를 보인 지점에서 그 크기는 0.05 mm, 실측치 대비 19%의 오차를 보이며, 이 오차는 점광원의 간격을 정교하게 하여 줄일 수 있을 것이다. 오차를 용이

TABLE 3. Measured heights of concave mirror (unit : mm)

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1						0.142	0.133	0.107	0.100	0.133	0.248
2	0.332	0.241	0.182	0.134	0.095	0.097	0.073	0.062	0.061	0.089	0.201
3	0.263	0.192	0.143	0.085	0.054	0.054	0.040	0.023	0.052	0.080	0.138
4	0.204	0.143	0.085	0.062	0.016	0.011	0.017	0.010	0.033	0.053	0.128
5	0.163	0.093	0.058	0.016	0.007	0.004	0.013	0.028	0.040	0.068	0.141
6	0.134	0.088	0.047	0.020	0.001	0.000	0.001	0.024	0.050	0.075	0.117
7	0.157	0.095	0.054	0.010	0.013	0.005	0.002	0.009	0.050	0.126	0.170
8	0.161	0.106	0.069	0.043	0.024	0.023	0.031	0.035	0.095	0.132	0.195
9	0.193	0.147	0.106	0.081	0.047	0.055	0.050	0.078	0.153	0.178	0.215
10	0.224	0.175	0.132	0.098	0.092	0.080	0.091	0.126	0.166	0.223	0.270
11	0.303	0.240	0.221	0.186	0.155	0.155	0.166	0.186			

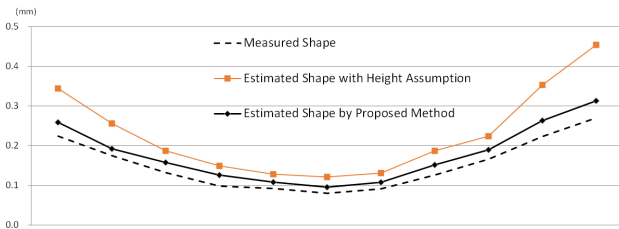


FIG. 9. Comparison of measurements and estimated shapes.

하게 관찰하기 위해 Table 2의 10번째 열의 높이의 추정치를 실측치 및 높이의 변화만 가정한 추정치와 비교한 예가 Fig. 9에 보이며, 기존의 방법과 비교하면 약 1/3 수준으로 감소하는 결과를 알 수 있었으며, 이것은 기울기에 의한 광로변화를 높이의 변화와 동시에 고려하여 계산함에 따라 나타난 효과일 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 경면반사체의 3차원형상의 측정을 위한 비전시스템의 구성과 영상처리방법을 제안하였다. 비전시스템에서는 LED를 일정간격으로 배열한 점광원과 하프미러 및 CCD 카메라를 사용하였고, 경면반사체의 표면에서 반사된 영상내의 점광원의 위치정보로부터 반사면의 높이와 기울기를 계산하여 반사면의 3차원형상을 추정하는 영상처리방법을 제시하였다. 이를 위해, 조명과 이미지센서의 중심을 연결한 광축을 일치시켜 기준점의 설정을 용이하게 하였으며, 점광원에서 나온 빛의 광로를 분석을 통하여 취득된 영상의 점광원의 위치에 의해 반사면의 기울기와 높이를 근사적으로 측정하는 방법을 제시하였다. 실험을 통하여 완만한 곡면을 갖는 오목거울의 3차원형상 측정결과를 보이고, 기존의 방법에 비해 1/3 수준의 오차감소를 보였으며, 보다 정밀하고 유연한 광학계의 구성을 통하여 정확한 3차원형상측정이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2012-0477)

References

1. F. Chen, G. M. Brown, M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Optical Engineering* **39**, 10-22 (2000).
2. R. Y. Chiao, and P. G. Kwiat, "Quantum optical tests of the foundations of physics," *Atomic, Molecular, and Optical Physics Handbook*, G. W. F. Drake, ed. (AIP Press, Woodbury, NY, USA, 1996).
3. G. Jaeger and A. V. Sergienko, "Multi-photon quantum interferometry," *Progress in Optics* **42**, 277-324 (2001).
4. W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, "Linear optical quantum computing with photonic qubits," *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135-174 (2007).
5. X. Su, Q. Shang, "Dynamic 3-D shape measurement method: A review," *Optics and Lasers in Engineering* **48**, 191-204 (2010).
6. T. Bothe, W. Li, C. Kopylow, W. P. Juptner, "High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection," *Proc. Optical Metrology in Production Engineering (SPIE 5457)*, 411-422 (2004).
7. S. Kammel, F. P. Leon, "Deflectometric Measurement of Specular Surfaces," *IEEE Tr. Instrumentation and Measurement* **57**, 763-769 (2008).
8. Y. Caulier, "Inspection of complex surfaces by means of structured light patterns," *Optics Express* **18**, 6642-6649 (2010).
9. Y. Xiao, X. Su, W. Chen and Y. Liu, "Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror with fringe reflection photogrammetry," *Applied Optics* **51**, 457-464 (2012).
10. W. Horbach, T. Dang, "3D reconstruction of specular surfaces using a calibrated projector-camera setup," *Machine Vision and Applications* **21**, 331-340 (2010).

11. J. Balzer, S. Werling, "Principles of Shape from Specular Reflection," *Journal of the International Measurement Confederation, Measurement* **43**, 1305-1317 (2010).
12. D. Hong, H. Park and H. Cho, "Design of a Multi-Screen Deflectometer for Shape Measurement of Solder Joints on a PCB," *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)* 127-132 (2009).
13. H. Guo, P. Feng, T. Tao, "Specular surface measurement by using least squares light tracking technique," *Optics and Lasers in Engineering* **48**, 166-171 (2010).
14. C. R. GONZALES, R. E. Woods, *Digital Signal Processing*, Addison Wesley Co., 1993.
15. J. Kim, "Estimation of the 3-D Shape Surface with Specular Reflections," *J. Opt. Soc. Korea* **18**, 672-678 (2014).