

◆특집◆ 나노/마이크로 하이브리드 패턴 가공 및 응용기술
엔드밀 가공을 이용한 스페큘러 홀로그램 제작

전은채^{*,**,#}, 차진호^{*}, 이재령^{*,***}, 최환진^{*,****},
김창의^{*,****}, 제태진^{*,**}, 김휘^{***}, 최두선^{*,**}

Machining of Specular Hologram using End-mill Technology

Eun-chae Jeon^{*,**,#}, Jin-Ho Cha^{*}, Je-Ryung Lee^{*,***}, Hwan-Jin Choi^{*,****},
Chang-Eui Kim^{*,****}, Tae-Jin Je^{*,**}, Hwi Kim^{***}, Doo-Sun Choi^{*,**}

(Received 31 July 2014; accepted 20 August 2014)

ABSTRACT

The specular hologram is one type of hologram, and it consists of many arcs. They are very easy to fabricate and can even be machined by hand and a compass. In this study, we designed two squares having different depths and consisting of many arcs, after which we machined the arcs using end-mill technology. The width of the machined arcs showed high repeatability. Moving tracks were observed on the bottom surface, and top burrs were noted. In spite of them, the phenomenon of the specular hologram was observed when an observer and a light source stood on the same side. The two squares seemed to have different depths when they were observed from the left and right directions. In this study, it was verified that a specular hologram can be manufactured by end-mill technology.

Key Words : End-mill(엔드밀), Specular Hologram(스페큘러 홀로그램), Machining(가공), Arc(호)

1. 서 론

홀로그램(hologram)은 1971년에 노벨상을 수상한 Gabor가 발견한 원리^[1,2]로서 2개의 레이저의 간섭 효과를 이용하여 3차원 효과를 내는 것을 말한다.

이러한 홀로그램 효과를 나타내기 위해 특정 소재 상에 수백 nm에서 수십 μm 에 이르는 패턴을 가공하여야 하며 주로 습식 에칭 등의 방법으로 제조된다. 제조된 홀로그램 마스터는 엠보싱 등을 통해 복제되어 우리가 흔히 보는 홀로그램 필름으로 제조된다. 이처럼 현재의 홀로그램 필름 제조 공정은 마스터 제조 방법이 습식 에칭 기반이기 때문에 제조공정이 복잡하여 제조비용이 높고 화학적 부산물을 생성하는 문제점이 있다.

기존의 복잡한 홀로그램 제작방법과 달리 기계적 가공방법을 사용하여 간단하게 홀로그램을 제작할 수 있는 방법이 제시되었다. 이 방법은 연구자에 따라 mechanical hologram^[3], abrasion hologram^[4,5],

* Dept. of Nano Manufacturing Technology, KIMM

Corresponding Author :

Dept. of Nano Manufacturing Technology, KIMM

E-mail : jeonec@kimm.re.kr

** Dept. of Nano-Mechatronics, UST Korea

*** School of Elec. and Info. Eng., Korea Univ.

**** School of Mechanical Eng., Pusan National Univ.

holographic engraving^[6], poor man's hologram^[7], specular hologram^[8,9] 등으로 불리우며 주기적으로 가공된 호 형상의 곡선을 이용하여 홀로그램을 구현하는 방법이다. 외부 빛이 호 전면에 반사되지만 왼쪽 및 오른쪽 눈으로 들어오는 빛이 반사된 호 위치가 서로 다르기 때문에 사람은 이를 3차원 형상으로 인식하게 된다. 비록 일반적인 홀로그램에 비해 해상도가 낮지만, 호만 가공하면 되기 때문에 매우 간단하게 제조할 수 있는 장점을 가지고 있다. 기존 연구들^[3-8]에서는 심지어 컴퍼스를 이용하여 손으로 간단하게 제작하였다. 그러나 이러한 수작업에 의한 제작은 대량생산에 적합하지 않기 때문에 본 연구에서는 스펙큘러 홀로그램을 구현하기 위한 설계기법을 개발하고 이를 실제로 가공하여 홀로그램 특성을 구현하는 연구를 수행하였다.

2. 스펙큘러 홀로그램 호 설계

앞서 설명한 바와 같이 스펙큘러 홀로그램은 호 상에 반사된 빛의 위치를 왼쪽 눈과 오른쪽 눈이 서로 다르게 인식하기 때문에 상(object)이 깊이를 갖는 것으로 인식하게 하는 것이 원리이다. 기존 논문들에서 제시한 이론들을 바탕으로 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서 S, R, L은 각각 외부광원, 오른쪽 눈, 왼쪽 눈의 위치를 의미하고 P_R과 P_L은 외부광원의 빛이 반사되어 각각 오른쪽 눈과 왼쪽 눈으로 들어갈 때 빛이 반사된 위치를 의미한다. P_R과 P_L의 위치 차이에 의해 사람은 빛이 반사된 위치가 실제의 위치와는 달리 O 위치로 인식하게 되어 실제 깊이(z 방향)와 다르게 인식하게 된다. 이때 호의 곡률을 다르게 하면 사람이 인식하는 깊이가 다르게 되어 다양한 깊이감을 나타낼 수 있다.

실제 호를 가공하기 위해서는 호의 중심점 C와 반지름(r_c)을 알면 되는데, 이는 Fig. 1에서 나타나는 기하학적 관계에서 유도되는 아래의 세 개의 식들을 풀면 구할 수 있다. 여기서 호는 모두 하나의 평면 상에 존재하기 때문에 z=0인 평면 상에 위치한다고 가정하고 광원에서 나온 빛이 호에 반사될 때의 입사각과 반사각은 같다. 또한 오른쪽 눈과

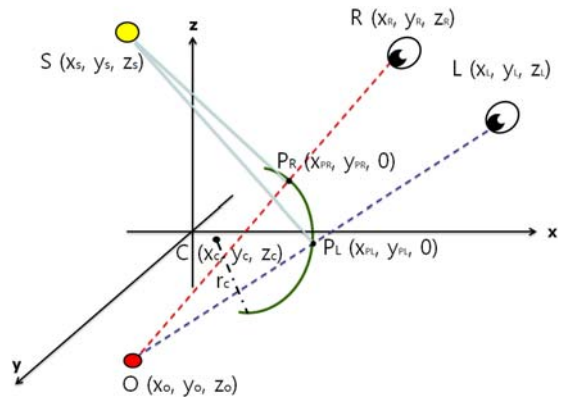


Fig. 1 A principle of specular hologram

왼쪽 눈 간의 간격은 일반적으로 사용되는 65mm를 사용하고 S, R, L의 위치는 임의로 설정한다. 최종적으로 O의 위치는 구현하고자 하는 3차원 형상의 좌표값을 사용한다. P_R과 P_L의 좌표는 각각 R과 O, L과 O를 잇는 직선들이 z=0 평면과 만나는 점의 좌표에서 구할 수 있다.

$$(x_{PR} - x_c)^2 + (y_{PR} - y_c)^2 = r_c^2 \quad (1)$$

$$(x_{PL} - x_c)^2 + (y_{PL} - y_c)^2 = r_c^2 \quad (2)$$

$$\frac{\overline{SP_L} \circ \overline{t_{PL}}}{|\overline{SP_L}| \times |\overline{t_{PL}}|} = \cos \theta = \frac{\overline{SP_R} \circ \overline{t_{PR}}}{|\overline{SP_R}| \times |\overline{t_{PR}}|} \quad (3)$$

여기서 미지수는 C점의 x, y 좌표(x_c, y_c)와 반지름 r_c이고 식이 3개이기 때문에 하나의 해가 결정된다. 그러나 실제로는 구현하고자 하는 3차원 형상을 구성하는 점좌표(O)가 최소 수십 개 이상이므로 호의 수도 최소 수십 개 이상이어야 하고 식 자체가 복잡하기 때문에 수동으로 해를 구하는 것이 매우 어렵다. 또한 호들의 반지름이 계속 달라지기 때문에 가공된 호들이 서로 겹치면서 형상이 무너지는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제점들로 인하여 기존 연구들에서도 스펙큘러 홀로그램을 실제로 제작할 때는 컴퍼스를 이용하여 동일한 반지름의 호들을 가공하였다.

이에 본 연구에서는 동일한 반지름의 호들로 구

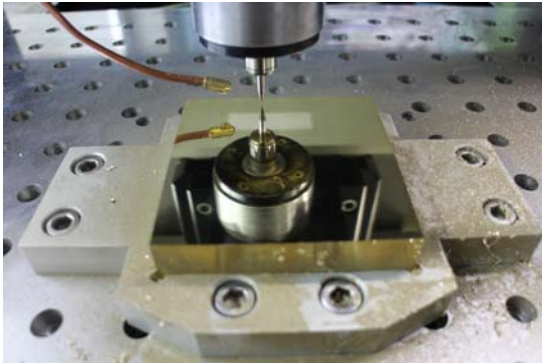


Fig. 2 A machining process of arcs for specular hologram on 64brass using an end-mill tool

성된 정사각형을 상(object)으로 선정하되 서로 다른 깊이감을 나타내기 위하여 정사각형 A와 정사각형 B를 구성하는 호들의 반지름을 서로 다르게 선정하였다. 두 정사각형은 한 변의 길이가 80mm인 정사각형 A가 한 변의 길이가 20mm인 정사각형 B를 둘러싸고 있으며 정사각형 A가 정사각형 B보다 더 낮은 곳에 위치하는 것으로 설계하였다. 이를 위해 정사각형 A와 정사각형 B의 호의 반지름을 각각 150mm와 70mm로 선정하였다. 각 정사각형으로 이루는 호들은 500 μ m 간격을 갖게 하였다.

3. 엔드밀을 이용한 호 가공

앞서 설계된 두 개의 정사각형을 구성하는 호들을 엔드밀 가공법을 이용하여 Fig. 2와 같이 가공하였다. 이때 사용한 엔드밀 공구는 초경소재로 제작되었으며 지름은 70 μ m이다. 금형 소재는 64 황동을 사용하였다. 호들의 깊이는 50 μ m로 설정하였으며, 공구파손을 방지하고 가공 품질을 향상시키기 위해서 10, 10, 10, 10, 8, 2 μ m 깊이로 단계적으로 중첩가공하였다. 스피ن들의 회전수는 50,000rpm으로 하였고, 이송속도는 5mm/s로 설정하였다. 호 가공 전에 R50mm 다이아몬드 공구를 이용하여 경면가공을 실시하여 거친 표면에 의한 반사광의 산란현상을 방지하였다. 호들의 가공이 완료된 후 호들의 형상의 재현성을 확인하기 위하여 각 사각형의 변마다 3곳의 지점을 선정하여 호

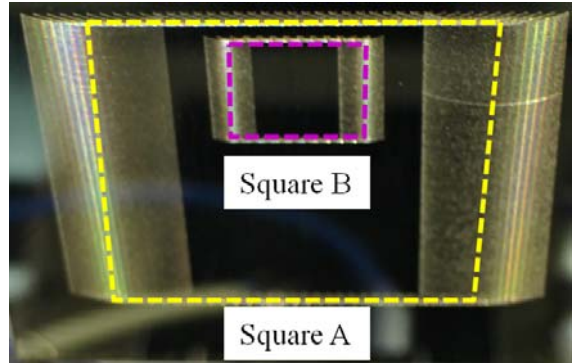


Fig. 3 Shape of the machined two squares consisting of many arcs

의 폭을 측정하였다. 그리고 광원 위치(S)와 보는 위치(R,L)에 따른 홀로그램 특성을 평가하였다. 자세한 결과는 다음에 서술하였다.

엔드밀 가공을 통해 가공된 호들의 전체 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서는 왼쪽, 오른쪽으로 시선을 이동하였을 때 홀로그램 현상이 나타나는 것을 목표로 하였기 때문에 호들이 좌우로 길고 상하로는 짧게 나타났다. 가공된 호들은 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 500 μ m 간격으로 가공이 되었다. A 사각형에서 측정된 호들의 평균 폭은 74.40 μ m, 표준 편차는 1.49 μ m로 나타났고, B 사각형에서 측정된 평균 폭 및 표준 편차는 각각

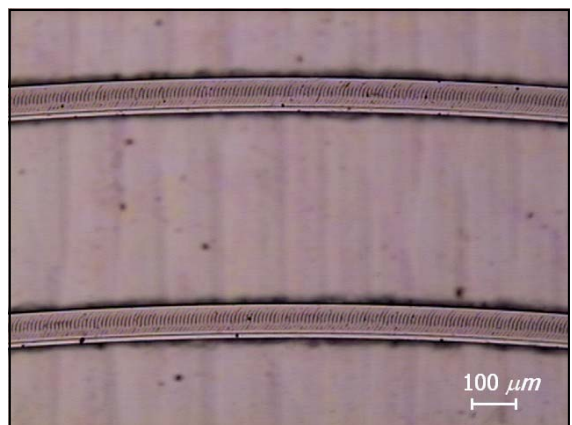


Fig. 4 Detailed shapes of the machined arc (focused on the bottom surface for observing moving track)

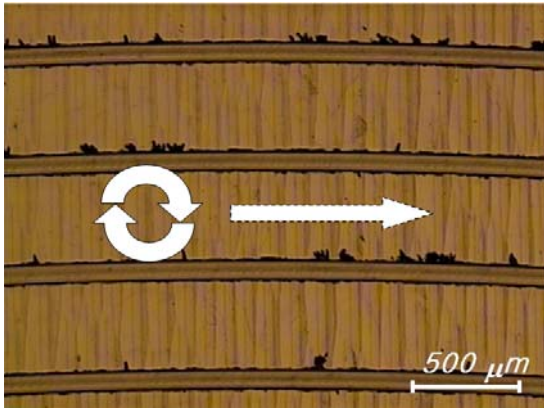


Fig. 5 Detailed shapes of the machined arc (focused on the top surface for observing top burr)

76.64 μm 와 1.49 μm 로 높은 재현성을 나타내었다. 측정된 폭은 엔드밀 공구 지름보다는 조금 더 크게 나타난 수치로 엔드밀 가공 중에 일반적으로 발생하는 현상이다. Fig. 4의 가공된 호의 밀면을 자세히 관찰하면 엔드밀 공구가 회전하면서 표면에 발생하는 moving track이 생성^[10]된 것을 확인할 수 있다.

상면 버 발생 여부를 관찰하기 위하여 Fig. 5와 같이 현미경 초점을 상면에 맞추어서 관찰하였다. 사진에서 보는 바와 같이 가공된 호의 사진 상의 아래 부분에 비해 위 부분에 상면 버가 더 많이 발생하였다. 공구의 회전방향(등근 실선 화살표)과 엔드밀 공구에 대한 가공물의 상대적인 이동방향(곧은 점선 화살표)을 고려하면 호 위부분은 공구방향과 가공물의 이동방향이 같기 때문에 하향절삭이 발생한다. 이에 반해 호의 아래 부분은 두 방향이 서로 반대이기 때문에 상향절삭이 발생한다. 일반적으로 상향절삭 지점의 표면이 매끄럽지 못한 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 하향절삭 영역에서 상면 버가 발생하였다. 이는 엔드밀 공구와 가공물이 완벽하게 수직을 이루지 못하고 호의 위 방향으로 약간 기울어진 상태에서 가공되어 발생하는 것으로 예상되지만 정확한 원인은 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 스펙클러 홀로그램 현상 평가

Hologram 현상은 사람이 두 개의 눈을 가지고 있기 때문에 생기는 현상이므로 가장 기본적인 평가 방법은 사람이 눈으로 관찰하는 것이다. 스펙클러 홀로그램 현상이 나타나기 위해서는 사각형의 각 변에서 하나의 선이 선명하게 시인되어서 두 개의 사각형이 보여야 하고 눈의 위치에 따라 두 사각형의 상대적 위치가 바뀌어야 한다. Fig. 6과 같이 광원을 S1 위치에 두고 관찰자의 눈으로 관찰하였을 때는 광원의 높이 및 좌우 방향을 바꾸어도 일부 위치에서 희미하게 몇 개의 선이 시인되는 경우는 있었으나 거의 대부분 사각형의 각 변에서 선이 시인되지 않았다. 이러한 현상은 Fig. 3의 가공된 시편을 180도 회전하여 호의 곡률 방향을 반대로 하였을 때도 동일하였다. 이에 반해 광원의 위치를 S2 위치로 바꾸었을 때는 광원의 높이 및 좌우 방향을 바꾸는 것에 관계없이 사각형의 변들에서 하나의 선이 명확하게 시인되었다. 가공된 시편을 180도 회전하였을 때도 역시 명확하게 시인되었다. 즉, 광원과 관찰자의 눈이 가공된 시편(호) 기준으로 같은 방향에 있을 때는 스펙클러 홀로그램 현상이 나타나지만 반대 방향에 있을 때는 나타나지 않는다.

광원의 위치가 S2일 때는 스펙클러 홀로그램 현상이 잘 시인되지만 S1 위치일 때는 잘 나타나지 않는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 광원이

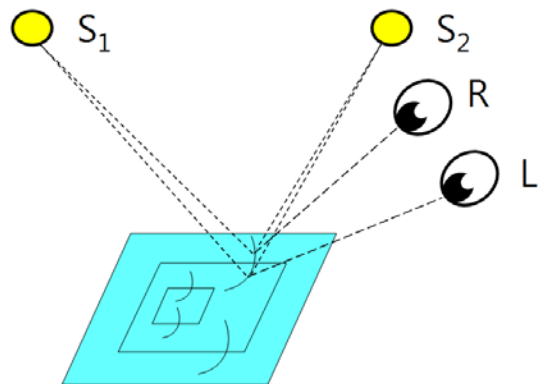


Fig. 6 The position of a light sources (S₁ or S₂) and an observer

S_1 위치에 있을 때는 Fig. 7(a)와 같이 오직 밑면에 반사된 빛만 눈에 들어올 수 있는데, 앞서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 밑면에 형성된 moving track에 의해 빛이 반사되면서 산란된다. 이로 인해 하나가 아닌 여러 곳에서 산란된 빛이 눈에 들어와서 여러 개의 선으로 희미하게 시인되거나, 산란된 빛이 눈에 들어오지 않아서 아무런 선이 보이지 않는다. 이에 반해 광원이 S_2 위치에 있을 때는 Fig. 7(b)와 같이 옆면과 밑면의 반대편 모서리 부분에서 강하게 반사된 빛이 관찰자의 눈으로 들어오기 때문에 밝은 1개의 선으로 시인된다. 실제로 광원의 위치가 관찰자의 눈 높이와 같고 빛의 방향이 시선과 일치할 때 가장 밝은 선이 시인되었다. 즉, 일반적인 스페큘러 홀로그램 이론에서는 호의 높이가 없고 산란 없는 반사를 가정하기 때문에 광원의 위치가 어느 위치여도 상관없지만, 실제로는 호가 음각이며 빛 반사 시에 산란이 있기 때문에 관찰자와 광원이 같은 쪽에 있어야 한다.

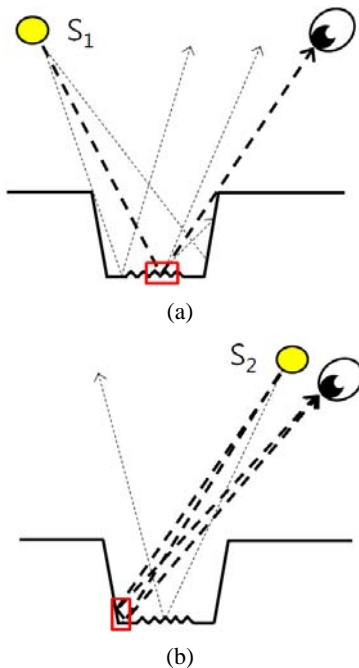
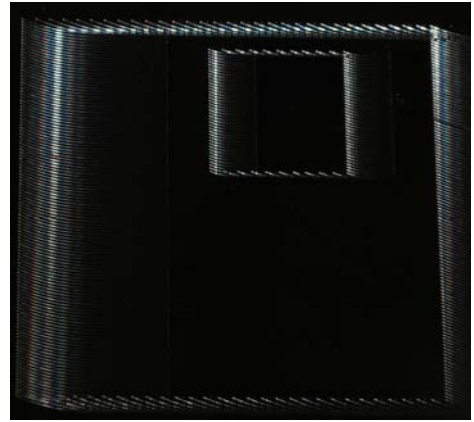
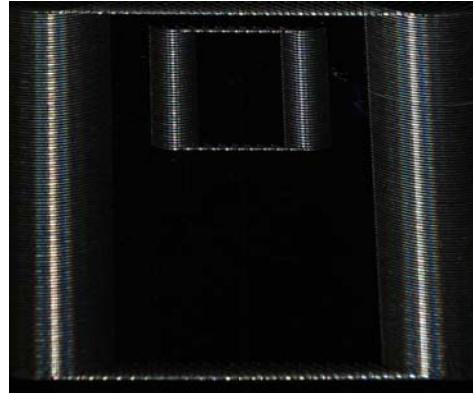


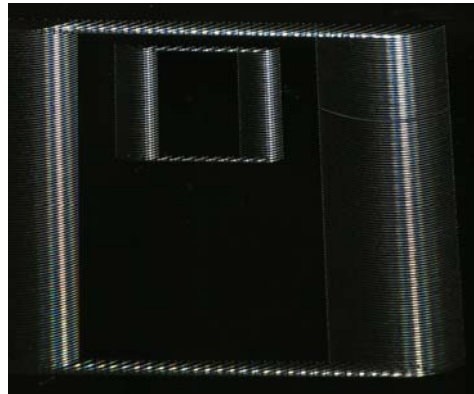
Fig. 7 Schematic diagrams of light paths when a light source is located (a) S_1 and (b) S_2



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Specular hologram images of the machined two squares observed from (a) left, (b) middle and (c) right

광원이 S₂ 위치에 있을 때 왼쪽, 가운데 그리고 오른쪽에서 사진기로 찍은 이미지를 Fig. 8에 나타내었다. 왼쪽에서 오른쪽으로 이동함에 따라 사각형의 변 위에 시인되는 선의 위치가 달라졌으며, 두 개의 사각형의 상대적 위치가 서로 달라졌다. 따라서 두 사각형을 구성하는 호들은 동일한 평면 상에 가공되었음에도 불구하고 두 개의 사각형은 서로 다른 높이에 있는 것처럼 보였다. 이러한 현상이 바로 홀로그래프 현상이므로 본 연구에서 가공된 호들로 인해 스펙큘러 홀로그래프가 구현되었음을 알 수 있다.

본 연구에서 엔드밀 가공법을 사용하여 가공된 호들은 기존 연구에서 컵퍼스 등으로 손으로 가공한 호들과는 달리 모양과 크기가 일정하였다. 이와 더불어 엔드밀 공구나 가공 조건을 달리함으로써 호들의 모양과 크기를 조절할 수 있기 때문에 스펙큘러 홀로그래프에 대한 체계적인 연구가 가능하다. 또한 금형소재에 가공함으로써 대량생산을 위한 금형 가공도 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 호에 반사된 빛이 왼쪽, 오른쪽 눈에 들어오는 경로 차에 의해 발생하는 스펙큘러 홀로그래프 현상을 엔드밀 가공을 통해 구현하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔드밀 가공법을 사용하여 일정 간격으로 반복되는 호들을 이용하면 깊이감을 느낄 수 있는 스펙큘러 홀로그래프를 제작할 수 있다.
2. 가공된 호의 밑면 모서리 부분이 스펙큘러 홀로그래프 현상 구현이 가장 큰 역할을 한다.
3. 엔드밀 가공법을 사용하여 기존 연구와는 달리 일정한 형상의 호들을 금형소재에 가공할 수 있으며, 호의 형상을 자유롭게 제어할 수 있기 때문에 스펙큘러 홀로그래프에 대한 체계적인 연구 및 금형제작이 가능하다.

후 기

“본 연구는 산업통상자원부 “100nm~100 μ m 나노복합구조물 응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 100%절감 성형시스템 개발” 지원으로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Gabor, D., "A New Microscopic Principle", Nature, Vol. 161, pp. 777-778, 1948.
2. Gabor, D., "Microscopy by Reconstructed Wavefronts", Proc. of the Royal Soc. London, Vol. 197, pp. 454-487, 1949.
3. Plummer, W. T., and Gardner, L. R., "A Mechanically Generated Hologram?", Appl. Opt., Vol. 31 No. 31, pp. 6585-6588, 1992.
4. Beaty, W. J., "Drawing Holograms by Hands", Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging, Vol. 5005, pp. 156-167, 2003.
5. Duke, T., "Drawing Light-fields: Hand-drawn Approaches to Abrasion Holography", J. of Phys., Vol. 415, pp. 1-8, 2013.
6. Garfield, E., "The World's First Holographic Engraving", Essays of an Infor. Scientists, Vol. 5, pp. 348-354, 1981.
7. Abramson, N., "Incoherent Holography", Proc. SPIE, Vol. 4149, pp. 153-164, 2000.
8. Brand, M., "Specular Holography", Appl. Opt., Vol. 50 No. 25, pp. 5042-5046, 2011.
9. Politch, J., "Sampling in Holography of Diffused Objects or with Diffused Illumination", Opto-elect., Vol. 6, pp. 421-431, 1974.
10. Kim, G. D., "Effects of 2-dimensional Vibration on the Surface Roughness in Micro Milling" J. of KSMPE, Vol. 12 No. 4, pp. 81-86, 2013.