



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년05월17일
(11) 등록번호 10-2533539
(24) 등록일자 2023년05월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01B 11/25 (2006.01) G01B 9/023 (2006.01)
G01B 9/025 (2006.01) G02B 27/10 (2006.01)
G03H 1/04 (2006.01) G03H 1/26 (2006.01)
G06T 17/30 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01B 11/2527 (2013.01)
G01B 11/254 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0122509

(22) 출원일자 2021년09월14일

심사청구일자 2021년09월14일

(65) 공개번호 10-2023-0039332

(43) 공개일자 2023년03월21일

(56) 선행기술조사문헌

JP2001515227 A*

KR100484637 B1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

김영주

서울특별시 송파구 송파대로 111 파크하비오
105-502

김기백

서울특별시 종로구 필운대로10길 18-5 풍성애뜰안
301호

정주원

서울특별시 서대문구 가재울미래로 2 DMC파크뷰자
이 220동 1904호

(74) 대리인

특허법인 플러스

전체 청구항 수 : 총 7 항

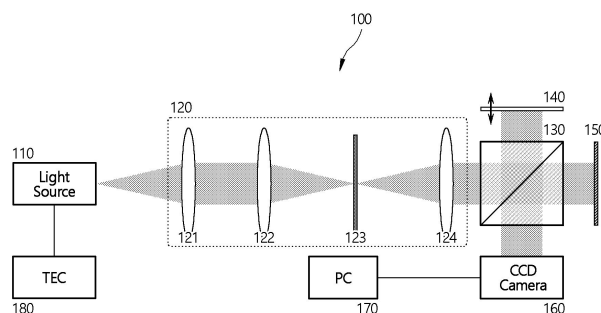
심사관 : 한동기

(54) 발명의 명칭 단일 광파장처럼 행동하는 합성파장을 기반으로 한 위상변환을 이용하는 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법에 관한 것이다. 본 발명의 목적은 두 파장의 합성파장이 그 합성파장의 크기와 같은 단일 파장처럼 행동할 수 있는 특수한 파장 조합으로 위상변환 방식을 이용하여 해상도 및 관측가능범위를 모두 높이면서도 연산부하 및 처리시간을 낮출 수 있는, 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법을 제공함에 있다.

대표도



(52) CPC특허분류

G01B 9/023 (2013.01)

G01B 9/025 (2013.01)

G02B 27/10 (2013.01)

G03H 1/0443 (2013.01)

G03H 1/2645 (2013.01)

G03H 2001/266 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

2개의 파장을 가지는 광을 사용하여 시료(150)의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)에 있어서,

서로 다른 파장을 갖는 제1파장광 및 제2파장광의 합성광 형태로 된 사용광을 방출하는 광원부(110); 상기 광원부(110)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 사용광 파장을 가변시키는 열전냉각부(180);를 포함하며,

상기 열전냉각부(180)에 의하여 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire) 패턴을 발생시키도록 파장이 조절되되,

제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일파장신호를 제1파장광 및 제2파장광의 합성광으로 간주하여 위상변이를 수행하며,

상기 열전냉각부(180)는,

제1파장광의 파장 λ_1 및 제2파장광의 파장 λ_2 간에 하기의 제1, 2조건 중 선택되는 어느 하나의 조건을 만족하도록 상기 광원부(110)의 파장을 조절하는 것을 특징으로 하는 이중파장 디지털 홀로그래피 장치.

제1조건 :

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 4사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 이고,}$$

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 1사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 일 때}$$

제2조건 :

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 2사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 이고,}$$

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 3사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 일 때}$$

청구항 2

제 1항에 있어서, 상기 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)는,

상기 광원부(110)에서 방출된 사용광을 평행광으로 변환시키는 광학계(120);

상기 광학계(120)를 통과하여 온 사용광을 기준광 및 물체광으로 분할하여 각각 기준면 및 시료(150)로 방출하는 빔스플리터(130);

기준광의 기준면을 형성하여 기준광을 반사하며, 광경로길이 변화가 가능하도록 위치가변되게 형성되는 가변거울(140);

상기 가변거울(140)로부터 반사되어 온 기준광 및 상기 시료(150)로부터 반사되어 온 물체광을 합쳐서 입사받아 이미지를 획득하는 측정부(160);

상기 가변거울(140)에서 광경로길이를 가변시킴에 따라 상기 측정부(160)에서 획득되는 위상차이미지를 이용하여 상기 시료(150) 표면의 깊이정보를 산출하는 연산부(170);

를 포함하는 것을 특징으로 하는 이중과장 디지털 홀로그래피 장치.

청구항 3

제 1항에 있어서, 상기 이중과장 디지털 홀로그래피 장치(100)는,

상기 광원부(110)가 제1과장광을 방출하는 제1광원(111), 제2과장광을 방출하는 제2광원(112), 상기 제1광원(111) 및 상기 제2광원(112)에서 방출된 광을 합쳐 사용광으로서 방출하는 광원부빔스플리터(115)를 포함하고,

상기 열전냉각부(180)가 상기 제1광원(111)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제1과장을 가변시키는 제1열전냉각기(181), 상기 제2광원(112)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제2과장을 가변시키는 제2열전냉각기(182), 를 포함하는 것을 특징으로 하는 이중과장 디지털 홀로그래피 장치.

청구항 4

삭제

청구항 5

2개의 과장을 가지는 광을 사용하여 시료의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 이중과장 디지털 홀로그래피 방법에 있어서,

서로 다른 과장을 갖는 제1과장광 및 제2과장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 과장이 조절되는 과장조건조절단계;

제1과장광 및 제2과장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일과장신호를 제1과장광 및 제2과장광의 합성광으로 간주하여 합성과장이 결정되는 합성과장결정단계;

제1과장광 및 제2과장광의 합성광 형태로 된 사용광을 시료에 조사하여 시료의 2차원 표면에 대한 위상이 0일 때의 기준이미지가 획득되는 기준이미지획득단계;

상기 합성과장결정단계에서 결정된 합성과장 값을 사용하여 위상이 90° 일 때의 비교이미지가 획득되는 비교이미지획득단계;

상기 기준이미지 및 상기 비교이미지 정보를 사용하여 시료의 2차원 표면 각 지점에서의 위상차 및 깊이정보가 산출됨으로써 시료의 3차원 복원이미지가 산출되는 복원이미지산출단계;

를 포함하며,

상기 과장조건조절단계는,

제1과장광의 과장 λ_1 및 제2과장광의 과장 λ_2 간에 하기의 제1, 2조건 중 선택되는 어느 하나의 조건이 만족하도록 과장이 조절되는 것을 특징으로 하는 이중과장 디지털 홀로그래피 방법.

제1조건 :

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 4사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 이고,}$$

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 1사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 일 때}$$

제2조건 :

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 2사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 이고,}$$

$$\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \text{ 값이 3사분면에 있고 } \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \text{ 일 때}$$

청구항 6

삭제

청구항 7

제 5항에 있어서, 상기 합성파장결정단계는,

하기의 식을 이용하여 합성파장 Λ_{12} 값이 결정되는 것을 특징으로 하는 이중파장 디지털 홀로그래피 방법.

$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

청구항 8

제 7항에 있어서, 상기 복원이미지산출단계는,

하기의 식을 이용하여 위상차 Φ 값이 산출되는 것을 특징으로 하는 이중파장 디지털 홀로그래피 방법.

$$\Phi(x, y) = \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x, y; 0) - I_R - I_O} - 1 \right]$$

(여기에서, $I(x, y; 0)$: 기준이미지의 2차원 표면 각 지점에서의 광세기, $I(x, y; \pi/2)$: 비교이미지의 2차원 표면 각 지점에서의 광세기, I_R : 기준광의 광세기, I_O : 물체광의 광세기)

청구항 9

제 8항에 있어서, 상기 복원이미지산출단계는,

하기의 식을 이용하여 깊이 h 값이 산출되는 것을 특징으로 하는 이중파장 디지털 홀로그래피 방법.

$$h(x, y) = \frac{\Delta d}{2} \\ = \frac{\Lambda_{12}}{2} \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x, y; 0) - I_R - I_O} - 1 \right]$$

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 단일 장파장처럼 행동하는 합성파장(infrared-like single synthetic wavelength)을 기반으로 한 위상변환을 이용하는 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법이다.

배경 기술

[0002] 홀로그래피(holography)란 물체의 3차원 영상정보를 2차원의 매체에 기록했다가 3차원 영상을 온전히 재생해내는 영상기록 및 재생기술을 말하는 것이다. 이렇게 3차원 영상정보가 기록된 매체를 홀로그램(hologram)이라 하며, 홀로그램을 기록할 때 사용한 빛과 특성이 같은 빛을 비추주면 3차원 영상을 재생할 수 있게 된다.

[0003] 도 1은 일반적인 홀로그래피 시스템을 개략적으로 도시한 것이다. 광원(1)에서 나온 빛이 적절한 광학계(2)를

거쳐 평행광으로 변환된 상태로 빔스플리터(3)에 도달하면, 그 중 일부는 반사되어 가변거울(4)로 향하고 나머지 일부는 투과하여 시료(5), 즉 홀로그래프를 만들고자 하는 대상물(object)로 향한다. 가변거울(4)에서 반사된 빛은 빔스플리터(3)를 투과하여 측정부(6)로 진행하며, 이를 기준광(reference beam)이라 한다. 시료(5)에서 반사된 빛은 빔스플리터(3)에서 반사되어 측정부(6)로 진행하며, 이를 물체광(object beam)이라 한다. 측정부(6)는 함께 입사된 기준광 및 물체광 간의 간섭무늬를 기록하는데, 이것이 바로 홀로그래프이다. 이렇게 기록된 홀로그래프에 기록시 사용된 빛과 같은 특성의 빛을 비추면, 물체에서 나오던 빛과 같은 빛이 홀로그래프에 기록된 간섭무늬에서 회절되어 나오게 되어, 3차원의 물체가 그 자리에 있는 것처럼 보이게 된다.

[0004] 상술한 바와 같이 홀로그래피 기술에서 사용되는 빛은 간섭무늬를 선명하게 만들 수 있어야 하므로, 광원(1)으로서 가장 단순하게는 단일파장의 빛을 발산하는 레이저가 많이 사용된다. 또한 이전에는 측정부(6)로서 필름 등과 같은 물리적인 감광매체를 사용하여 기록했다면, 최근에는 CCD카메라 등과 같은 디지털 측정매체를 사용하는 것이 더 일반적이다. 측정부로서 CCD카메라를 사용할 경우 입사되는 빛을 신호정보로서 다룰 수 있으므로, 이를 분석하여 보다 오류를 더 줄임으로써 보다 선명하고 정확한 3차원 정보를 얻을 수 있게 된다. 이러한 오류 제거 등을 위하여, 도 1에 도시된 바와 같이 측정부(6)에 PC 등으로 구현될 수 있는 별도의 연산부(7)가 더 구비될 수 있다.

[0005] 단일파장 홀로그래피 시스템에서 최적화된 3차원 복원영상을 얻는 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다. 도 1과 같은 시스템에서, 측정부(6)로 입사되는 출력광 즉 기준광 및 물체광이 합쳐진 빛은, 1차 이미지, 0차 이미지, -1차 이미지 세 가지 성분이 중첩된 상태이다. 이 중 0차 이미지(zero-order image)는 말하자면 DC성분이며, -1차 이미지는 공액상(conjugate image)으로서 대부분 허상으로 간주된다. 즉 3차원 복원영상을 위해 출력광에서 필요한 것은 1차 이미지이며, 0차 및 -1차 이미지는 제거되는 것이 바람직하다. 이처럼 원하는 이미지(즉 1차 이미지)만 남기고 원하지 않는 이미지(0차 및 -1차 이미지)를 제거하기 위하여, 일반적으로 위상변이(phase-shift) 방법을 이용하였다. 즉 위상이 90° ($\pi/2$) 차이나는 2개의 이미지를 얻고, 이들을 기반으로 위상변이 알고리즘을 수행하여 원하는 이미지 즉 1차 이미지만 추출해 내는 것이다. 위상을 변화시키기 위해서는 광경로의 길이를 변화시킬 필요가 있는데, 바로 이를 위하여 가변거울(4)이 동작한다. 즉 도 1을 기준으로 할 때, 가변거울(4)이 상하방향으로 사용광 파장의 1/4만큼 이동해 줌으로써, 90° 의 위상차를 가지는 2개의 이미지를 얻을 수 있게 된다.

[0006] 한편 이러한 단일파장을 기반으로 한 홀로그래피 시스템의 한계에 대하여 설명한다. 광원에서 나오는 빛 즉 사용광의 파장을 λ_1 이라 할 때, 축방향으로 관측할 수 있는 범위는 $\lambda_1/2$ 가 된다. 시료 표면을 매우 자세하게 관찰하고 싶다면 해상도를 높이기 위해 λ_1 값이 매우 작아져야 할 것이 당연하다. 그런데 그렇게 되면 관측가능범위 역시 함께 매우 작아지게 되어, 미세한 단차는 측정할 수 있으나 반대로 관측가능범위를 벗어나는 큰 단차는 측정이 불가능해지게 되는 문제가 생긴다. 즉 예를 들어 600nm 파장 레이저를 사용했다면, 시료의 균열, 요철 등에서 300nm 정도 수준의 것들은 정확하게 관측이 가능하나, 예를 들어 1 μ m 정도의 깊은 균열 같은 것은 올바르게 관측해내지 못하게 되는 것이다.

[0007] 이러한 문제를 해소하기 위하여 도입된 것이 바로 이중파장 홀로그래피 시스템이다. 이중파장 홀로그래피 시스템은 도 1과 동일한 구성의 시스템을 사용하여 동작하되, 광원에서 나오는 빛이 2개의 파장을 갖는다. 즉 λ_1 파장을 가지는 빛과 λ_2 파장을 가지는 빛이 섞여서 나오는 것이다. 사용광이 이러한 이중파장일 때, 합성파장 Λ 는 하기의 식으로 구할 수 있다.

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

[0008] 이처럼 이중파장을 사용할 경우, 관측가능범위는 $\Lambda/2$ 가 되므로 단일파장을 사용할 때에 비하여 비약적으로 관측가능범위를 넓힐 수 있다. 예를 들어 600nm, 630nm 2개의 파장을 갖는 이중파장 레이저를 사용한다면, 식 (1)로 계산된 합성파장에 따른 관측가능범위는 6300nm, 즉 6.3 μ m 정도까지로 크게 넓어진다. 이러한 이중파장 홀로그래피 시스템을 실현하고자 할 때, 가장 단순하게는 도 1과 같은 시스템에서 광원이 이중파장 빛을 발산하도록 하기만 해도 된다. 보다 구체적으로는, 한국특허등록 제1152798호("듀얼 파장 디지털 홀로그래피를 이용한 3D 측정 장치", 2012.05.29.) 등 다양한 문헌에 이중파장 홀로그래피 시스템이 잘 개시되어 있다.

[0010] 이러한 이중파장 홀로그래피 시스템을 실현하는 방식은 크게 다음과 같이 두 가지로 나눌 수 있다.

[0011] 첫째, λ_1 단일파장 시스템 및 λ_2 단일파장 시스템으로 각각 λ_1 단일파장 이미지 및 λ_2 단일파장 이미지를 각

각 구하고, 상술한 합성파장 식을 이용하여 합성파장으로 얻은 이미지를 만들어낸다. "Dual-wavelength digital holography with a low-coherence light source based on a quantum dot film"(Jae-Yong Lee et al., Opt. Lett. 42, 5082-5085, 2017)에 이러한 기술이 상세히 소개되어 있다. 이러한 방식은 사실상 "이중파장 빛"을 사용하는 것이 아니라 "단일파장 빛을 2번" 사용하는 것이므로, 엄밀히는 이중파장 기술이라고 하기는 어렵다. 이 방식의 경우, 실제로는 단일파장 기술을 쓰는 것이므로 상대적으로 계산이 쉽다고 볼 수 있겠지만, 다른 관점에서 보자면 2개의 이미지를 얻는 과정에서 실제 측정조건들을 서로 최대한 정확히 동일하게 유지해야 하는 것 자체가 어렵고, 이러한 과정에서 오류가 발생할 우려가 있다.

[0012] 둘째, λ_1 및 λ_2 이중파장 빛을 사용하여 한 번에 이미지를 얻은 후, 공간도메인(spatial domain)에서 필터링함으로써 파장별 위상을 획득하여 복원하는 방법이 있다. "Compact dual-wavelength off-axis digital holography for quantitative phase imaging"(Mingguang Shan et al., Proc. SPIE 11249, Quantitative Phase Imaging VI, 112491E, 14 February, 2020)에 이러한 기술이 상세히 소개되어 있다. 그러나 이러한 방식의 경우, 각 파장의 위상별 정보를 얻기 위해 분리(separation) 또는 추출(extraction) 과정이 필수적이어서, 더 많은 연산부하 및 처리시간을 필요로 한다는 단점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0013] (특허문헌 0001) 1. 한국특허등록 제1152798호("듀얼 파장 디지털 홀로그래피를 이용한 3D 측정 장치", 2012.05.29.)

비특허문헌

[0014] (비특허문헌 0001) 1. "Dual-wavelength digital holography with a low-coherence light source based on a quantum dot film"(Jae-Yong Lee et al., Opt. Lett. 42, 5082-5085, 2017)

(비특허문헌 0002) 2. "Compact dual-wavelength off-axis digital holography for quantitative phase imaging"(Mingguang Shan et al., Proc. SPIE 11249, Quantitative Phase Imaging VI, 112491E, 14 February, 2020)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 따라서, 본 발명은 상기한 바와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 두 파장의 합성파장이 그 합성파장의 크기와 같은 단일 파장처럼 행동할 수 있는 특수한 파장 조합으로 위상변환 방식을 이용하여 해상도 및 관측가능범위를 모두 높이면서도 연산부하 및 처리시간을 낮출 수 있는, 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0016] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)는, 2개의 파장을 가지는 광을 사용하여 시료(150)의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)에 있어서, 서로 다른 파장을 갖는 제1파장광 및 제2파장광의 합성광 형태로 된 사용광을 방출하는 광원부(110); 상기 광원부(110)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 사용광 파장을 가변시키는 열전냉각부(180);를 포함하며, 상기 열전냉각기(180-1과 180-2)에 의하여 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 파장이 조절되되, 제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일파장신호를 제1파장광 및 제2파장광의 합성광으로 간주하여 위상변이를 수행할 수 있다.

[0017] 이 때 상기 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)는, 상기 광원부(110)에서 방출된 사용광을 평행광으로 변환시키는 광학계(120); 상기 광학계(120)를 통과하여 온 사용광을 기준광 및 물체광으로 분할하여 각각 기준면 및

시료(150)로 방출하는 빔스플리터(130); 기준광의 기준면을 형성하여 기준광을 반사하며, 광경로길이 변화가 가능하도록 위치가변되게 형성되는 가변거울(140); 상기 가변거울(140)로부터 반사되어 온 기준광 및 상기 시료(150)로부터 반사되어 온 물체광을 합쳐서 입사받아 이미지를 획득하는 측정부(160); 상기 가변거울(140)에서 광경로길이를 가변시킴에 따라 상기 측정부(160)에서 획득되는 위상차이미지를 이용하여 상기 시료(150) 표면의 깊이정보를 산출하는 연산부(170); 를 포함할 수 있다.

[0018] 또한 상기 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)는, 상기 광원부(110)가 제1파장광을 방출하는 제1광원(111), 제2파장광을 방출하는 제2광원(112), 상기 제1광원(111) 및 상기 제2광원(112)에서 방출된 광을 합쳐 사용광으로서 방출하는 광원부빔스플리터(115)를 포함하고, 상기 열전냉각부(180)가 상기 제1광원(111)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제1파장을 가변시키는 제1열전냉각기(181), 상기 제2광원(112)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제2파장을 가변시키는 제2열전냉각기(182)를 포함할 수 있다.

[0019] 또한 상기 열전냉각부(180)는, 제1파장광의 파장 λ_1 및 제2파장광의 파장 λ_2 간에 하기의 제1, 2조건 중 선택되는 어느 하나의 조건을 만족하도록 상기 광원부(110)의 파장을 조절할 수 있다.

[0020] 제1조건 :

[0021] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 4사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0022] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 1사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0023] 제2조건 :

[0024] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 2사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0025] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 3사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0026] 또한 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법은, 2개의 파장을 가지는 광을 사용하여 시료의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 이중파장 디지털 홀로그래피 방법에 있어서, 서로 다른 파장을 갖는 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 파장이 조절되는 파장조건조절단계; 제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일파장신호를 제1파장광 및 제2파장광의 합성광으로 간주하여 합성파장이 결정되는 합성파장결정단계; 제1파장광 및 제2파장광의 합성광 형태로 된 사용광을 시료에 조사하여 시료의 2차원 표면에 대한 위상이 0일 때의 기준이미지가 획득되는 기준이미지획득단계; 상기 합성파장결정단계에서 결정된 합성파장 값을 사용하여 위상이 90° 일 때의 비교이미지가 획득되는 비교이미지획득단계; 상기 기준이미지 및 상기 비교이미지 정보를 사용하여 시료의 2차원 표면 각 지점에서의 위상차 및 깊이정보가 산출됨으로써 시료의 3차원 복원이미지가 산출되는 복원이미지산출단계; 를 포함할 수 있다.

[0027] 이 때 상기 파장조건조절단계는, 제1파장광의 파장 λ_1 및 제2파장광의 파장 λ_2 간에 하기의 제1, 2조건 중 선택되는 어느 하나의 조건이 만족하도록 파장이 조절될 수 있다.

[0028] 제1조건 :

[0029] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 4사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0030] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 1사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0031] 제2조건 :

[0032] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 2사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0033] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 3사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0034] 또한 상기 합성파장결정단계는, 하기의 식을 이용하여 합성파장 Λ_{12} 값이 결정될 수 있다.

[0035]
$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

[0036] 또한 상기 복원이미지산출단계는, 하기의 식을 이용하여 위상차 Φ 값이 산출될 수 있다.

[0037]
$$\Phi(x, y) = \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x, y; 0) - I_R - I_O} - 1 \right]$$

[0038] (여기에서, $I(x, y; 0)$: 기준이미지의 2차원 표면 각 지점에서의 광세기, $I(x, y; \pi/2)$: 비교이미지의 2차원 표면 각 지점에서의 광세기, I_R : 기준광의 광세기, I_O : 물체광의 광세기)

[0039] 또한 상기 복원이미지산출단계는, 하기의 식을 이용하여 깊이 h 값이 산출될 수 있다.

[0040]
$$h(x, y) = \frac{\Delta d}{2}$$

$$= \frac{\Lambda_{12}}{2} \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x, y; 0) - I_R - I_O} - 1 \right]$$

발명의 효과

[0041] 본 발명에 의하면, 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법에 있어서, 무아레(moire) 위상변환 방식을 이용하여 해상도 및 관측가능범위를 모두 높이면서도 연산부하 및 처리시간을 낮출 수 있는 효과가 있다. 보다 구체적으로 설명하자면, 본 발명에서는 주기차이가 작은 두 개의 패턴무늬가 무아레 패턴을 형성하는 것과 유사한 특수한 조건을 만족하는 한 쌍의 파장을 이용하여 이중파장 홀로그래피 이미지를 획득한다. 이 때 두 파장 각각의 간섭패턴이 하나의 간섭패턴을 이룰 때 이 간섭패턴을 합성파장의 간섭패턴으로 간주하여 획득한 이미지의 위상변이(phase-shift)를 수행한다. 이와 같이 함으로써 연산부하 및 처리시간을 비약적으로 줄일 수 있으면서도, 이중파장 홀로그래피 기술의 장점인 해상도 및 관측가능범위 확장 효과를 모두 한꺼번에 얻을 수 있게 되는 것이다.

도면의 간단한 설명

[0042] 도 1은 일반적인 홀로그래피 시스템.

도 2는 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치.

도 3은 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치의 상세구성.

도 4는 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치에서 사용되는 서로 다른 파장의 광들 및 합성광.

도 5는 합성광 분석.

도 6 및 도 7은 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법을 이용한 시뮬레이션 결과 및 실제값 비교.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0043] 이하, 상기한 바와 같은 구성을 가지는 본 발명에 의한 이중파장 디지털 홀로그래피 장치 및 방법을 첨부된 도면을 참고하여 상세하게 설명한다.

[0044] [1] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치

[0045] 도 2는 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치를 도시한 것이다. 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피

장치(100)는 2개의 파장을 가지는 광을 사용하여 시료(150)의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 장치이다. 기본적인 구성은 종래의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치와 거의 유사하게, 광원부(110), 광학계(120), 빔스플리터(130), 가변거울(140), 측정부(160), 연산부(170)를 포함하며, 여기에 특히 본 발명에서 필요로 하는 특정한 조건의 이중파장을 만들어낼 수 있도록 하기 위한 장치인 열전냉각부(180)을 포함한다. 이하에서 각부에 대하여 보다 구체적으로 설명한다.

- [0046] 상기 광원부(110)는 서로 다른 파장을 갖는 제1파장광 및 제2파장광의 합성광 형태로 된 사용광을 방출한다. 이때 본 발명에서는 사용광의 2개의 파장이 서로 특수한 관계를 가지도록 한다. 이에 대해서는 이후 보다 상세히 설명한다.
- [0047] 상기 광학계(120)는 상기 광원부(110)에서 방출된 사용광을 평행광으로 변환시키는 역할을 하는 것이다. 도 2의 예시에서는 상기 광학계(120)가, 발산하는 형태의 사용광을 평행하게 만드는 제1렌즈(121), 제1렌즈(121)를 통과해 나온 평행한 사용광을 다시 수렴하여 편환(123)로 통과시키는 제2렌즈(122), 편환(123)을 통과해 나온 사용광을 다시 평행하게 만드는 제3렌즈(124)를 포함한다. 물론 이는 하나의 예시일 뿐으로 상기 광학계(120)는 사용광을 잘 정제된 평행광으로 만들어줄 수만 있다면 다른 어떤 구성이어도 무방하다.
- [0048] 상기 빔스플리터(130)는 상기 광학계(120)를 통과하여 온 사용광을 기준광(reference beam) 및 물체광(object beam)으로 분할하여 각각 기준면 및 시료(150)로 방출한다. 도 2에서, 사용광이 상기 빔스플리터(130)로 진행하여 와서 반사된 빛이 기준광이 되며, 통과한 빛이 물체광이 된다.
- [0049] 상기 가변거울(140)은 기준광의 기준면을 형성하여 기준광을 반사하며, 광경로길이 변화가 가능하도록 위치가변되게 형성된다. 상기 가변거울(140)은 위상차이미지를 획득하기 위해 사용되므로, 파장 수준의 미세한 위치조절이 가능하게 형성되어야 한다. 따라서 상기 가변거울(140)은 압전구동기(piezoelectric actuator) 등과 같이 정밀동작이 가능한 구동장치를 포함하여 이루어진다.
- [0050] 상기 측정부(160)는 상기 가변거울(140)로부터 반사되어 온 기준광 및 상기 시료(150)로부터 반사되어 온 물체광을 합쳐서 입사받아 이미지를 획득한다. 상기 가변거울(140)에서 반사된 기준광은 상기 빔스플리터(130)를 통과하고, 상기 시료(150)에서 반사된 물체광은 상기 빔스플리터(130)에서 반사되므로, 두 빛은 자연스럽게 합쳐져서 상기 측정부(160)로 들어가게 된다. 상기 측정부(160)는 앞서 설명한 바와 같이 CCD카메라 등과 같이 픽셀단위로 광신호를 감지할 수 있는 감광장치로 이루어질 수 있다.
- [0051] 상기 연산부(170)는 상기 가변거울(140)에서 광경로길이를 가변시킴에 따라 상기 측정부(160)에서 획득되는 위상차이미지를 이용하여 상기 시료(150) 표면의 깊이정보를 산출하는 역할을 한다. 즉 앞서 설명한, 위상 0도에서의 -1차, 0차, 1차 이미지 및 위상 90도에서의 -1차, 0차, 1차 이미지를 사용하여 -1차, 0차 이미지를 제거하고 1차 이미지를 구하는 연산을 수행하는 것이다.
- [0052] 상기 열전냉각부(180)는, 상기 광원부(110)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 사용광 파장을 가변시키는 역할을 한다. 앞서 설명한 바와 같이 본 발명에서는, 사용광의 2개의 파장, 즉 제1파장 및 제2파장이 특수한 관계를 만족시키도록 결정된다. 이를 위해 상기 광원부(110)의 파장을 미세하고 정밀하게 조절할 수 있도록 상기 열전냉각부(180)이 구비되는 것이다. 보다 구체적으로는, 상기 열전냉각부(180)는, 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 파장을 조절한다.
- [0053] 추가적으로, 도 2 상에서는 상기 광원부(110) 및 상기 열전냉각부(180)이 마치 하나의 장치인 것처럼 도시되었으나, 실제로 장치를 꾸밀 때는 도 3의 상세구성과 같은 식으로 이루어질 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 광원부(110)가 제1파장광을 방출하는 제1광원(111), 제2파장광을 방출하는 제2광원(112), 상기 제1광원(111) 및 상기 제2광원(112)에서 방출된 광을 합쳐 사용광으로서 방출하는 광원부빔스플리터(115)를 포함하고, 상기 열전냉각부(180)가 상기 제1광원(111)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제1파장을 가변시키는 제1열전냉각기(181), 상기 제2광원(112)에 구비되어 가열 또는 냉각을 인가함으로써 제2파장을 가변시키는 제2열전냉각기(182)를 포함할 수 있다. 이렇게 함으로써 상기 광원(110)에서 방출되는 2개의 파장 각각을 정밀하게 조절할 수 있게 된다.
- [0054] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)에서는, 상술한 바와 같이 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 파장이 조절되도록 이루어진다. 이것이 바로 앞서 설명한 파장들 간의 특수한 조건이다. 제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴은, 그 자체로 주기적인 파장을 형성하며, 전체적으로 볼 때 어떠한 단일파장신호처럼 보일 수 있다. 본 발명에서는, 이처럼 제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일파장신호를 제1파장광 및 제2파장광의 합성

광으로 간주하여 위상변이를 수행한다.

[0055] 이와 같이 함으로써 본 발명에서는, 종래의 이중파장 홀로그래피 기술에서 매우 복잡한 연산과정을 통해 추출 및 복원을 수행하던 것과는 달리, 연산을 간소화하면서도 정확도는 충분히 유지할 수 있게 된다. 따라서 종래와 같은 성능을 얻으면서도 연산부하 및 처리시간을 비약적으로 줄일 수 있다.

[0056] [2] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법

[0057] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법은 기본적으로 2개의 파장을 가지는 광을 사용하여 시료의 표면에 대한 위상차이미지를 획득하여 위상변이(phase-shift)를 통해 3차원 복원이미지를 산출하는 방법으로서, 상술한 바와 같은 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치(100)를 사용하여 수행될 수 있다.

[0058] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법은, 파장조건조절단계, 합성파장결정단계, 기준이미지획득단계, 비교이미지획득단계, 복원이미지산출단계를 포함한다. 이제 앞서 장치 설명에서 언급한 '파장들 간의 특수한 관계'가 구체적으로 어떻게 되는지, 또한 본 발명에서는 어떠한 알고리즘을 통해 위상변이를 수행하는지에 대하여, 각 단계의 상세한 설명을 통해 구체적으로 설명한다.

[0059] 본 발명에 대하여 설명하기 전에 배경지식으로서 먼저 홀로그래피 분석원리를 설명하면 다음과 같다. 먼저 광원이 단일파장인 경우 기준광(reference beam) 및 물체광(object beam)의 파장함수는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 아래첨자 R은 기준광을, O는 물체광을 뜻하며, A는 진폭, Φ 는 위상이다.

$$\begin{aligned} U_R(x,y) &= A_R \exp(i\Phi_R) \\ U_O(x,y) &= A_O \exp(i\Phi_O) \end{aligned} \quad \dots \text{식(1)}$$

[0061] 이 때 기준광 및 물체광의 간섭패턴의 광세기는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_R(x,y;\Phi_R) &= |U_R + U_O|^2 \\ &= U_R^T U_R + U_O^T U_O + U_R^T U_O + U_O^T U_R \\ &= A_R^2 + A_O^2 + 2A_R A_O \cos(\Phi_R - \Phi_O) \end{aligned} \quad \dots \text{식(2)}$$

[0063] 광원이 이중파장일 경우, 3차원 복원이미지의 전체(total)광세기 I_t 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_t(x,y;\Phi_R) &= I_1(x,y;\Phi_{R1}) + I_2(x,y;\Phi_{R2}) \\ &= A_{R1}^2 + A_{O1}^2 + 2A_{R1} A_{O1} \cos(\Phi_{R1} - \Phi_{O1}) \\ &\quad + A_{R2}^2 + A_{O2}^2 + 2A_{R2} A_{O2} \cos(\Phi_{R2} - \Phi_{O2}) \end{aligned} \quad \dots \text{식(3)}$$

[0065] 제1파장광 및 제2파장광의 진폭이 동일할 경우, 기준광 및 합성광 간의 위상차를 고려하여 식(3)의 전체광세기를 다시 정리하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_t(x,y;\Phi_R) &= 2A_R^2 + 2A_O^2 \\ &\quad + 2A_R A_O \left[\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta d\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta d\right) \right] \end{aligned} \quad \dots \text{식(4)}$$

[0067] 이하에서는 위와 같은 홀로그래피 분석원리를 기반으로 하여 본 발명의 각 단계를 구체적으로 설명한다.

[0068] 상기 파장조건조절단계에서는, 서로 다른 파장을 갖는 제1파장광 및 제2파장광의 합성광이 맥놀이(beat)현상을 일으켜 무아레(moire)패턴을 발생시키도록 파장이 조절된다. 도 4는 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 장치에서 사용되는 서로 다른 파장의 광들 및 합성광을 도시한 것으로, 합성광이 맥놀이파동(beat wave) 형태로 나타나고 있음을 잘 알 수 있다. 이 때 도 4에서 보이는 바와 같이, 맥놀이파동이 전체적으로 그리는 형태는 마치 하나의 사인파와 유사한 양상을 보이게 된다. 정성적으로는 합성광이 맥놀이현상을 일으키도록 한다고 설명하였으나, 이 조건을 보다 명확하게 정량적으로 설명하자면, 상기 파장조건조절단계에서는, 제1파장광의 파장 λ_1 및 제2파장광의 파장 λ_2 간에 하기의 제1, 2조건 중 선택되는 어느 하나의 조건이 만족하도록 파장이 조절된다. 왜 하기와 같은 조건이 필요하게 되는지는 이후 단계를 통해 설명될 것이다.

[0069] 제1조건 :

[0070] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 4사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0071] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 1사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0072] 제2조건 :

[0073] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 2사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 이고,

[0074] $\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 값이 3사분면에 있고 $\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 일 때

[0075] 상기 합성파장결정단계에서는, 제1파장광 및 제2파장광에 의해 발생된 무아레패턴으로부터 도출되는 단일파장신호를 제1파장광 및 제2파장광의 합성광으로 간주하여 합성파장이 결정된다. 도 5는 이러한 합성광을 분석하여 단일파장신호를 도출한 것을 나타내는 것으로, 가늘고 진한 실선은 합성광을 나타내고, 직선은 위상분포를 나타내며, 굵고 연한 실선은 도출된 단일파장신호를 나타낸다. 이렇게 도출된 단일파장신호의 합성파장 Λ_{12} 는 하기의 식과 같이 나타낼 수 있다.

[0076]
$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

[0077] 상기 기준이미지획득단계에서는, 제1파장광 및 제2파장광의 합성광 형태로 된 사용광을 시료에 조사하여 시료의 2차원 표면에 대한 위상이 0일 때의 기준이미지가 획득된다. 앞서 설명한 식(4), 즉 이중파장 홀로그래피에서 두 파장광을 합친 광세기 식에 위상이 0이라는 조건을 적용하면, 기준이미지의 광세기는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

[0078]
$$\begin{aligned} I(x, y; 0) &= 2A_R^2 + 2A_O^2 \\ &+ 2A_R A_O \left[\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta d\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta d\right) \right] \end{aligned} \quad \dots \text{식(5)}$$

[0079] 상기 비교이미지획득단계에서는, 상기 합성파장결정단계에서 결정된 합성파장 값을 사용하여 위상이 90° 일 때의 비교이미지가 획득된다. 상기 기준이미지획득단계에서와 유사하게 식(4) 및 합성파장 Λ_{12} 를 사용하여, 비교이미지의 광세기는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

[0080]
$$\begin{aligned} I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) &= 2A_R^2 + 2A_O^2 \\ &+ 2A_R A_O \left[\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta d - \frac{\Lambda_{12}}{4}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta d - \frac{\Lambda_{12}}{4}\right) \right] \end{aligned} \quad \dots \text{식(6)}$$

[0081] 최종적으로 구하고 싶은 것은 Δd 값이므로, 이를 구하기 위해 식(5) 및 식(6)을 수학적으로 결합하면 식(7)을 도출할 수 있다. 식(7)에서, I_R 및 I_O 는 각각 기준광의 광세기 및 물체광의 광세기를 나타내는 것이며, 이는 미리 측정하여 알 수 있는 상수값이다.

[0082]
$$\begin{aligned} &\frac{I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x, y; 0) - I_R - I_O} \\ &= \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta d - \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta d - \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_1}{|\lambda_1 - \lambda_2|}\right)}{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta d\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta d\right)} \end{aligned} \quad \dots \text{식(7)}$$

[0083] 여기에서, 제1파장광의 파장 λ_1 및 제2파장광의 파장 λ_2 가 앞서 상기 파장조건조절단계에서의 제1조건 또는 제2조건을 만족할 경우, 식(7)은 하기의 식(8)과 같이 훨씬 단순화될 수 있다. 본 발명에서는 바로 이 식(8)을 이

용하여 위상차 Φ 및 깊이정보 h 를 산출하게 된다.

$$\frac{I\left(x,y;\frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x,y;0) - I_R - I_O} = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \left(1 + \tan\left(\frac{\pi}{\Lambda_{12}} \Delta d\right) \right) \quad \dots \text{식(8)}$$

상기 복원이미지산출단계에서는, 상기 기준이미지 및 상기 비교이미지 정보를 사용하여 시료의 2차원 표면 각 지점에서의 위상차 및 깊이정보가 산출됨으로써 시료의 3차원 복원이미지가 산출된다. 즉 식(8)을 정리함으로써, 위상차 Φ 를 구하는 식(9) 및 깊이 h 를 구하는 식(10)을 도출할 수 있으며, 이처럼 시료의 2차원 표면 각 지점에서의 깊이정보가 구해짐에 따라 결과적으로 시료의 3차원 표면형상을 완전히 복원해 낼 수 있게 되는 것이다.

$$\Phi(x,y) = \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x,y;\frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x,y;0) - I_R - I_O} - 1 \right] \quad \dots \text{식(9)}$$

$$h(x,y) = \frac{\Delta d}{2} = \frac{\Lambda_{12}}{2} \arctan \left[\pm \sqrt{2} \frac{I\left(x,y;\frac{\pi}{2}\right) - I_R - I_O}{I(x,y;0) - I_R - I_O} - 1 \right] \quad \dots \text{식(10)}$$

물론 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 기술을 완전히 이해하기 위해서는 식(1) 내지 식(7)과 같은 기술내용을 알아야 하겠으나, 사용관점으로 보자면 앞서 설명한 파장들 간의 제1, 2조건을 만족하는 파장만 선택한다면 식(1) 내지 식(7)보다 훨씬 단순화된 식(8) 내지 식(10)을 통해 쉽게 3차원 복원이미지를 구할 수 있다. 다시 말해 연산부가 식(8) 내지 식(10)을 기반으로 한 연산동작만 수행하면 되기 때문에, 종래에 비하여 연산부하 및 처리시간을 비약적으로 줄일 수 있게 되는 것이다.

하기의 표는 본 발명의 제1, 2조건을 만족하는 λ_1 , λ_2 조합의 구체적인 예시이다. 즉 하기의 표를 만족하는 조합으로 2개의 파장을 선택한다면, 상술한 식(10)을 이용하여 매우 신속하게 3차원 복원이미지를 연산해 낼 수 있다.

$\lambda_1(\text{nm})$	$\lambda_2(\text{nm})$	$\Delta d(\text{nm})$	$\Lambda_{12}(\mu\text{m})$
380	380.32	0.32	0.45163
:	:	:	:
636.81	636.87	0.06	6.75942
636.82	none	none	none
636.83	666.45	29.62	14.329
:	:	:	:
637.14	647.5	10.36	39.82
:	:	:	:
662.32	665.04	2.72	161.937
:	:	:	:
749.90	749.94	0.04	14059.500

[3] 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 기술 결과분석

도 6 및 도 7은 본 발명의 이중파장 디지털 홀로그래피 방법을 이용한 시뮬레이션 결과 및 실제값을 비교한 것으로, 본 발명의 기술이 충분한 정확도를 얻을 수 있는지 확인하기 위한 것이다.

도 6의 각 행은 맨 앞에 제시된 파장조합에서 수행된 실험결과와 관련된 내용을 나타내고 있다. 여기에서 (a), (b), (c), (d)를 5-1실험, (e), (f), (g), (h)를 5-2실험, (i), (j), (k), (l)을 5-3실험이라 한다.

5-1실험 (a)를 보면, λ_1 , λ_2 가 636.83nm, 666.56nm 조합임이 나타난다(이 조합은 위에 제시된 표에도 기재되어 있는 조합이다). (b)는 (a)의 파장조합으로 촬영한 위상 0에 대한 홀로그램 이미지, 즉 기준이미지이다. 도 6에서는 생략되었지만 위상 90°에 대한 홀로그램 이미지, 즉 비교이미지가 더 획득되어 있다. (c)는 (b)에 도시된 바와 같은 기준이미지 및 생략된 비교이미지를 기반으로, 앞서 설명한 식(9)를 통해 구한 위상차를 2차원 각 지점에 표시한 위상차 지도(phase map)이다. (d)는 (c)에서 A-A'로 표시된 부분의 깊이(h) 그래프로서, 실제값(Actual value)이 점선으로, 시뮬레이션 결과값(Simulation value)이 굵고 연한 실선으로 표시되어 있다. 도

시된 바와 같이 시뮬레이션 결과값이 실제값과 거의 일치할 정도로 높은 정확도로서 따라가고 있음을 확인할 수 있다.

[0095] 5-1실험 뿐만 아니라 5-2실험, 5-3실험에서도 (d), (h), (l)에 기재된 MAE(Mean Absolute Error) 값들을 확인해 보면, 측정하고자 하는 3차원 형상의 크기가 μm 수준(즉 10^{-6} 수준)인 것과 비교하였을 때 훨씬 작은 값으로 나오는 것을 확인할 수 있다. 즉 5-1~3실험 모두에서 매우 우수한 정확도를 얻을 수 있음이 확인된다. 또한 (d), (h), (l)에서 보이는 바와 같이 측정하고자 하는 3차원 형상은 각각 0~6 μm 단차 형상, 0~18 μm 단차 형상, 0~60 μm 단차 형상인데, 사용된 파장들은 모두 수백 nm 수준이다. 즉 수백 nm 수준의 짧은 파장으로 측정함으로써 해상도를 높일 수 있음과 동시에 이중과장을 사용함으로써 수십 μm 수준의 상당히 넓은 관측가능범위를 실현할 수 있음 역시 확인된다. 즉 본 발명의 방법을 이용하여, 연산부하 및 처리시간을 줄이고, 해상도 및 관측가능범위를 높이면서, 매우 우수한 정확도까지 달성될 수 있음이 도 6의 결과로부터 명확히 확인되는 것이다.

[0096] 도 7은 1.8 μm 의 깊이를 갖는 좀더 복잡한 형상을 측정하는 예시를 도시하고 있다. (a), (b), (c)를 6-1실험, (d), (e), (f)를 6-2실험이라 한다. (b)는 (a)에서 A-A' 단면의 깊이 그래프, (c)는 (a)에서 B-B' 단면의 깊이 그래프로서, 도 6의 모든 실험결과들과에서와 마찬가지로 매우 우수한 정확도를 보인다. 6-2실험은 6-1실험과 동일한 파장조합을 사용하되 반치폭(FWHM)이 상대적으로 넓은 광을 사용하는 경우의 실험결과이다. 6-1실험에 비해서는 정확도가 다소 떨어지지만, 허용범위의 MAE 값을 도출하여 본 발명의 이론의 정당성이 확인될 수 있다.

[0097] 특히 도 7의 실험을 수행함에 있어서, 종래의 이중과장 홀로그래피 기술을 사용하였을 때 처리속도가 1259ms, 메모리사용량이 2.51GB였으나, 본 발명의 기술을 사용하였을 때 처리속도가 94ms, 메모리사용량이 920MB로 비약적으로 처리속도 및 연산부하를 줄일 수 있음이 확인된다.

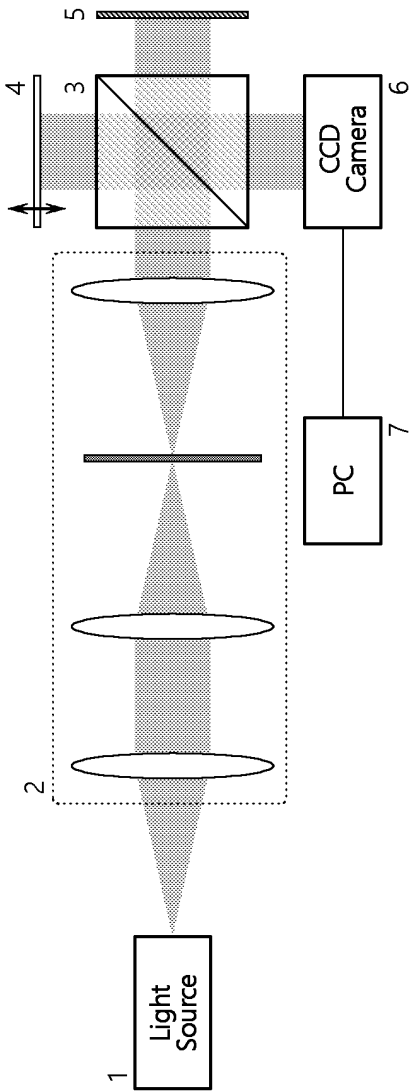
[0098] 본 발명은 상기한 실시예에 한정되지 아니하며, 적용범위가 다양함은 물론이고, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이다.

부호의 설명

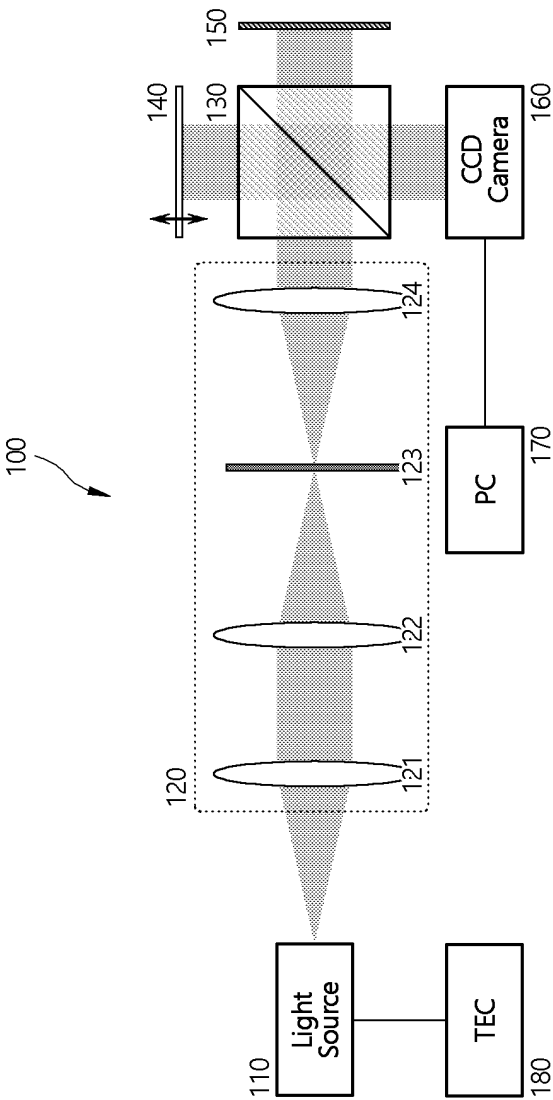
[0099] 100 : 이중과장 디지털 홀로그래피 장치
 110 : 광원부 115 : 광원부빔스플리터
 111 : 제1광원 112 : 제2광원
 120 : 광학계
 121 : 제1렌즈 122 : 제2렌즈
 123 : 편홀 124 : 제3렌즈
 130 : 빔스플리터 140 : 가변거울
 150 : 시료 160 : 측정부
 170 : 연산부 180 : 열전냉각부
 181 : 제1열전냉각기 182 : 제2열전냉각기

도면

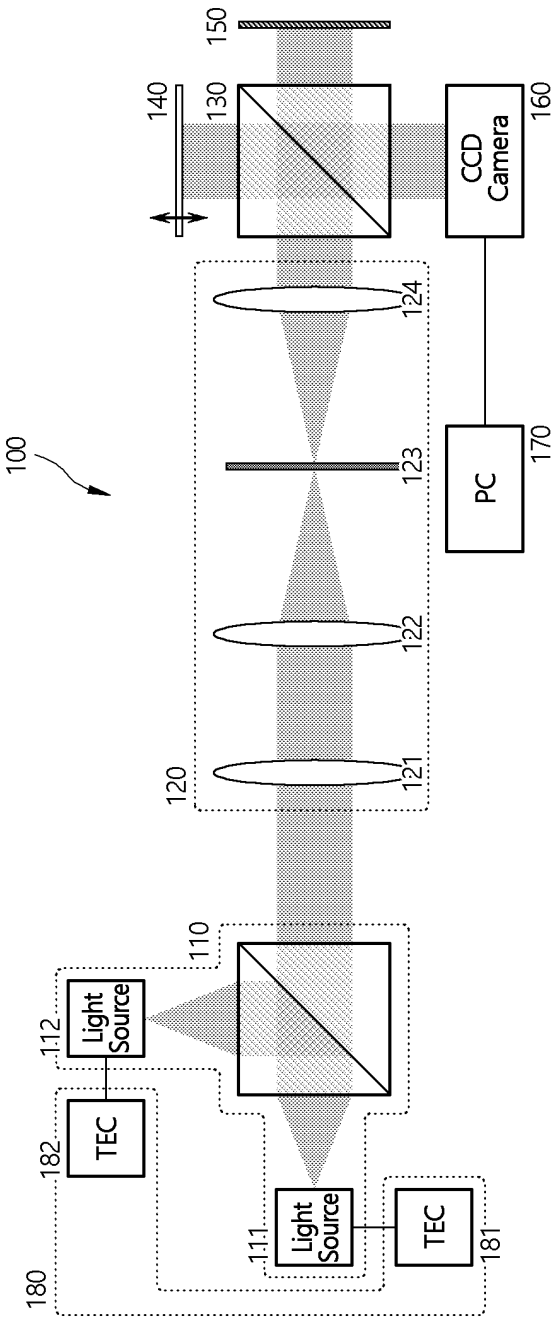
도면1



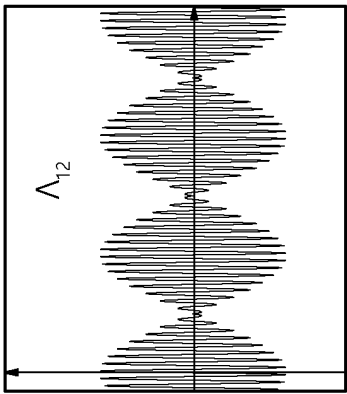
도면2



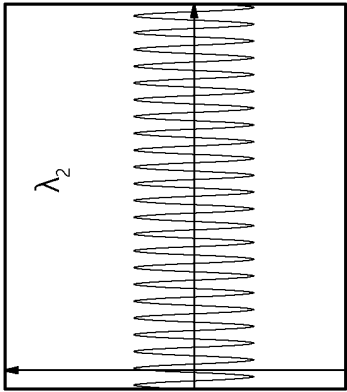
도면3



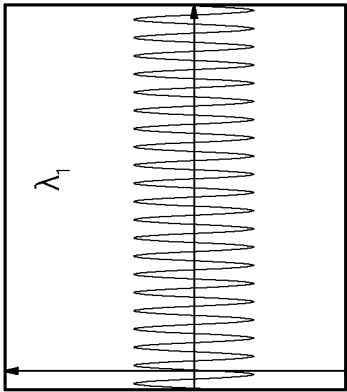
도면4



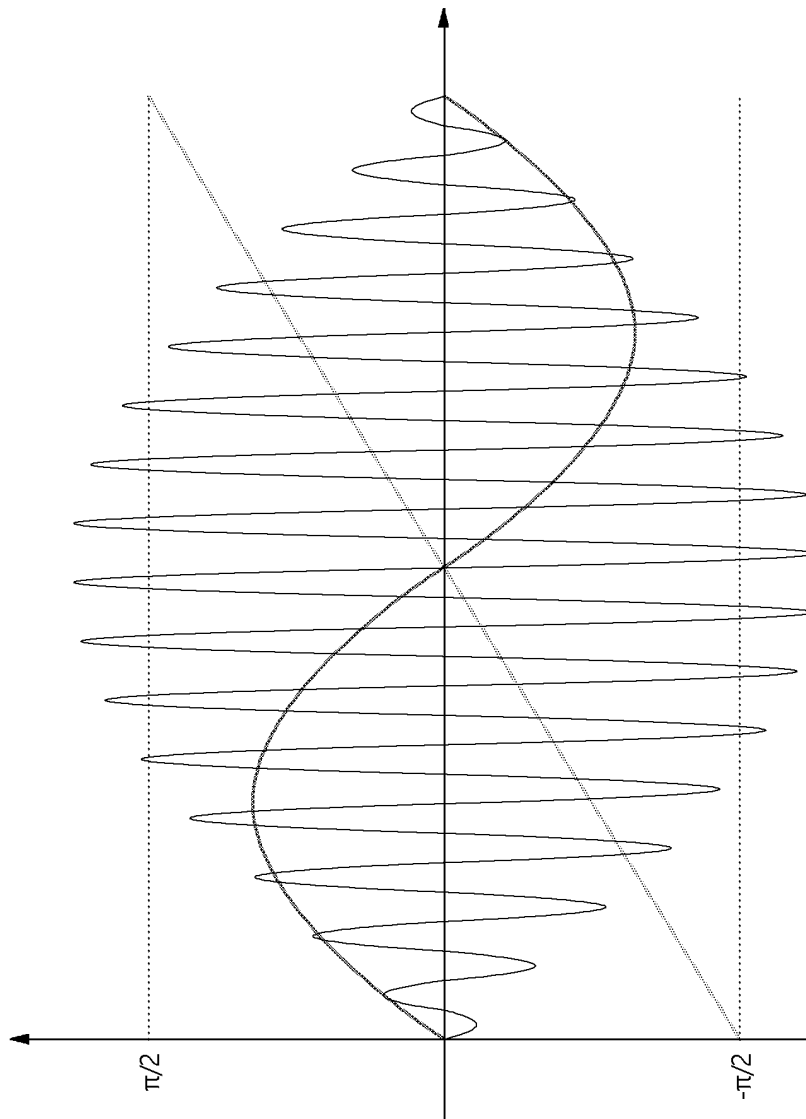
||



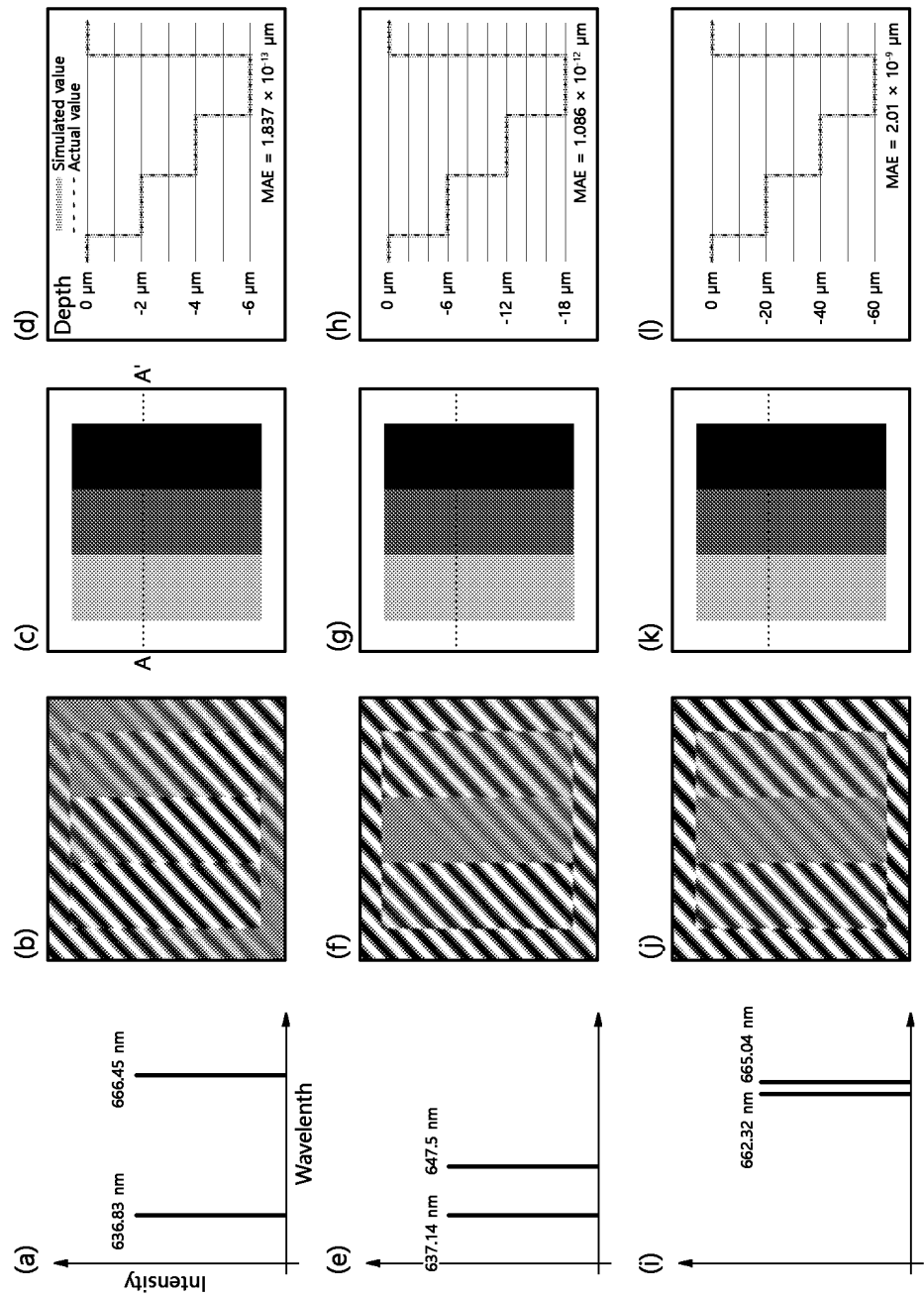
+



도면5



도면6



도면7

