

	(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2017-0079153 (43) 공개일자 2017년07월10일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) <i>H04N 19/23</i> (2014.01) <i>G06T 7/00</i> (2017.01) <i>H04N 19/88</i> (2014.01) (52) CPC특허분류 <i>H04N 19/23</i> (2015.01) <i>G06T 7/514</i> (2017.01) (21) 출원번호 10-2015-0189409 (22) 출원일자 2015년12월30일 심사청구일자 2015년12월30일 기술이전 희망 : 기술양도		(71) 출원인 인천대학교 산학협력단 인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동) (72) 발명자 전광길 인천광역시 연수구 경원대로119번길 21, 114동 904호 (동춘동, 풍림2차아파트) (74) 대리인 특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 푸리에 해석을 이용한 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법

(57) 요약

본 발명은 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법으로서, 보다 구체적으로는 이미지를 스캐닝하고 획득함에 있어서 푸리에 해석(Fourier Analysis)을 이용하여 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법에 관한 것이다.

본 발명에 따른 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법에 있어서, 대상 물체에 라인 줄무늬(line stripe) 광을 영사(projection)하는 단계; 상기 대상 물체에 영사된 라인 줄무늬를 캡처(capture)하는 단계; 캡처된 라인 줄무늬의 카메라 공간(camera space)에서의 좌표 (x^c, y^c) 에 대한 위상 ϕ_k 및 진폭 A_k 을 추출하는 단계; 상기 위상 ϕ_k 및 진폭 A_k 에 이산 푸리에 변환(DFT)을 적용시키는 단계; 및 삼각측량(triangulation)을 이용하여, 상기 좌표 (x^c, y^c) 및 푸리에 변환을 적용한 위상 ϕ_k 으로부터 3차원 좌표를 재형성(reconstruction)하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법을 개시한다.

대표도 - 도1

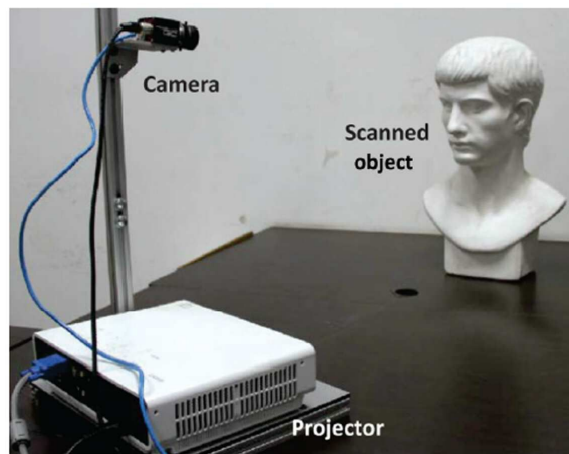


Fig. 1 The measurement system setup.

(52) CPC특허분류

H04N 19/88 (2015.01)

명세서

청구범위

청구항 1

라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법에 있어서,

대상 물체에 라인 줄무늬(line stripe) 광을 영사(projection)하는 단계;

상기 대상 물체에 영사된 라인 줄무늬를 캡처(capture)하는 단계;

캡처된 라인 줄무늬의 카메라 공간(camera space)에서의 좌표 (x^c, y^c) 에 대한 위상 φ_k 및 진폭 A_k 을 추출하는 단계;

상기 위상 φ_k 및 진폭 A_k 에 이산 푸리에 변환(DFT)을 적용시키는 단계;

삼각측량(triangulation)을 이용하여, 상기 좌표 (x^c, y^c) 및 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 으로부터 3차원 좌표를 재형성(reconstruction)하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

라인 줄무늬 광을 영사하는 단계에서,

단일 라인 줄무늬의 광의 세기 I_n^p 는, 수학식 1로 표현되는 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

[수학식 1]

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p \delta(n - y^p)$$

여기서, 상기 (x^p, y^p) 는 광을 영사(projection)하는 프로젝터 공간(projector space)에서의 좌표이고, n 은 $[0, H^p - 1]$ 범위에서의 정수값이고, 상기 H^p 는 상기 프로젝터의 수평방향의 해상도이고, 상기 $\delta(.)$ 는 임펄스 함수 또는 디랙 델타 함수(Dirac Delta function)이고, 상수 A^p 는 영사된 라인 줄무늬의 진폭임.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 상수 A^p 는 라인 줄무늬 광의 최대세기 값인 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 영사된 라인 줄무늬를 캡처하는 단계에서,

캡처된 광의 세기 I_n^c 는, 수학식 2로 표현되는 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

[수학식 2]

$$I_n^c(x^c, y^c) = A^c(x^c, y^c) e^{-\left[\frac{(n-y^p)^2}{2\sigma_w^2}\right]} + \beta(x^c, y^c)$$

여기서, 상기 A^c 는 라인 줄무늬의 진폭이고, σ_w 는 라인 줄무늬 너비의 표준편차이고, β 는 주변 광의 세기임.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 위상 및 진폭을 추출하는 단계에서,

상기 위상 및 진폭은, 각각 상기 I_n^c 를 수학식 3에 대입하여 구한 수학식 5와 수학식 4를 비교하여 추출한 수학식 6 및 수학식 7인 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

[수학식 3]

$$X_k = \sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c e^{-\frac{2\pi n}{H^p} k}$$

[수학식 4]

$$X_k = A_k e^{-j\varphi_k}$$

[수학식 5]

$$X_k = \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c e^{-\left[\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}\right]} e^{-j\frac{y^p}{H^p} 2\pi k} + H^p \beta \delta(k)$$

[수학식 6]

$$\varphi_k = \frac{y^p}{H^p} 2\pi k$$

[수학식 7]

$$A_k = \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c e^{-\left[\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}\right]} + H^p \beta \delta(k)$$

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 이산 푸리에 변환을 적용시키는 단계에서,

상기 이산 푸리에 변환을 적용시킨 상기 위상 및 진폭은, 각각 수학식 9 및 수학식 10인 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

[수학식 9]

$$\varphi_k = \arctan\left[\frac{\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)}{\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)}\right]$$

[수학식 10]

$$A_k = \left\{ \left[\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 3차원 좌표를 재형성하는 단계는,

푸리에 변환을 적용한 진폭 A_k 이 소정의 값보다 큰 경우에만, 상기 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 을 3차원 좌표 재형성에 이용하는 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 3차원 좌표를 재형성하는 단계에서,

상기 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 은, 복수개의 위상 φ_k (k 는 1이상)으로 다중주파수 위상 언래핑 (Multifrequency Phase Unwrapping)을 수행하여, 최종 언래핑된(final unwrapped) 위상 φ 인 것을 특징으로 하는 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법.

청구항 9

컴퓨터에서 제1항 내지 제8항 중 어느 한 항에 기재된 각 단계를 실행하기 위한 컴퓨터로 읽을 수 있는 매체에 저장된 프로그램.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법으로서, 보다 구체적으로는 이미지를 스캐닝하고 획득함에 있어서 푸리에 해석(Fourier Analysis)을 이용하여 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 방법에 관한 것이다.

[0001]

배경 기술

[0003] 구조화된 광 일루미네이션(SLI: Structured Light Illumination, 이하 SLI)에 의하여 측정된 광학 3차원 표면은 검사(inspection), 과학적 측정 등 다양한 분야에 널리 적용되었다. 상기 SLI 시스템은 프로젝터(projector), 카메라 및 컴퓨터로 구성된다. 상기 컴퓨터 및 프로젝터에 의한 제어는 물체에 광 패턴 그룹을 영사(project)하고, 그에 상응하는 일루미네이트된 장면(illuminated scene)이 카메라에 의하여 저장된다. 패턴화된 이미지를 디코딩하는 경우, 상기 프로젝터와 상기 카메라 간의 상응(correspondence)이 유도되고(derive), 이는 삼각측량법을 통한 상기 물체의 3차원 표면을 재형성(reconstruction)하는데 이용된다.

[0004] 다양한 SLI 기술 중에서, 라인 구조화된 광 방법 중의 하나인 레이저 줄무늬 스캐닝 기술(Laser stripe scanning)은 그 패턴의 단순함과 3차원 표면 재형성의 높은 정확성으로 인해 널리 이용된다. 상기 레이저 줄무늬 스캐닝 기술은 상기 물체를 가로질러 움직이는 라인 줄무늬로 물체를 스캔한다. 일반적으로, 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 종래의 방법은 각각의 포착된(grabbed) 프레임에서 라인 줄무늬의 피크값의 검출에 기초하고, 상기 피크값 검출의 품질은 최종 측정 정확도를 결정한다. 복잡한 2차원 이미지 처리를 위한 다양한 알고리즘 적용은 단일 이미지에서 공간적인(spatially) 피크값 검출을 위하여 제안되어 왔고, 그것들 중의 일부는 심지어 서브픽셀(subpixel)에서의 정확도 향상까지 달성할 수 있다. 그러나, 스캐닝 장치의 배치뿐만 아니라 스캔된 물체의 복잡한 형상으로 인하여, 하나의 특정 열 또는 행에 둘 이상의 줄무늬 피크값이 존재하는 등의 불명료의 문제가 존재할 수 있다. 그러므로, 인접 동작(neighboring operations)과 단일 피크값의 가정에 기초한 이러한 방법으로는 불명료한 피크값을 정확하게 검출할 수가 없다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0006] (비특허문헌 0001) 구조 광 기반 초소형 카메라-프로젝터 시스템의 3차원 복원, ICROS 학술대회 609 ~ 610, 박고광, 박순용 (2010.5. 27. 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명에서는 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 새로운 방법을 개시한다. 시간축을 따라 각각의 픽셀에 푸리에 해석(Fourier analysis)을 적용함으로써, 일시적으로 계산된 위상(phase)을 통한 카메라-프로젝터 간의 상응(correspondence)을 유도한다. 그에 따라, 공간적으로 피크값을 검출함이 없이, 불명료의 문제를 해결하는 방법을 제안하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기한 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 측면에 따른 푸리에 해석을 이용한 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법에 있어서,

[0010] 대상 물체에 라인 줄무늬(line stripe) 광을 영사(projection)하는 단계; 상기 대상 물체에 영사된 라인 줄무늬를 캡처(capture)하는 단계; 캡처된 라인 줄무늬의 카메라 공간(camera space)에서의 좌표 (x^c, y^c) 에 대한 위상 φ_k 및 진폭 A_k 을 추출하는 단계; 상기 위상 φ_k 및 진폭 A_k 에 이산 푸리에 변환(DFT)을 적용시키는 단계; 삼각측량(triangulation)을 이용하여, 상기 좌표 (x^c, y^c) 및 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 으로부터 3차원 좌표를 재형성(reconstruction)하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0011] 여기서, 라인 줄무늬 광을 영사하는 단계에서, 단일 라인 줄무늬의 광의 세기 I_n^p 는, 아래의 수학식 1로 표현될 수 있다.

[0012] [수학식 1]

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p \delta(n - y^p)$$

[0013]

[0014] 여기서, 상기 (x^p, y^p) 는 광을 영사(projection)하는 프로젝터 공간(projector space)에서의 좌표이고, n은 $[0, H^p - 1]$ 범위에서의 정수값이고, 상기 H^p 는 상기 프로젝터의 수평방향의 해상도이고, 상기 $\delta(.)$ 는 임펄스 함수 또는 디랙 델타 함수(Dirac Delta function)이고, 상수 A^p 는 영사된 라인 줄무늬의 진폭임.

[0015] 또한, 상기 상수 A^p 는 라인 줄무늬 광의 최대세기 값일 수 있다.

[0016] 또한, 상기 영사된 라인 줄무늬를 캡처하는 단계에서, 캡처된 광의 세기 I_n^c 는, 아래의 수학식 2로 표현될 수 있다.

[0017] [수학식 2]

$$I_n^c(x^c, y^c) = A^c(x^c, y^c) e^{-[\frac{(n-y^p)^2}{2\sigma_w^2}]} + \beta(x^c, y^c)$$

[0018]

[0019] 여기서, 상기 A^c 는 라인 줄무늬의 진폭이고, σ_w 는 라인 줄무늬 너비의 표준편차이고, β 는 주변 광의 세기임.

[0020] 또한, 상기 위상 및 진폭을 추출하는 단계에서, 상기 위상 및 진폭은, 각각 상기 I_n^c 를 수학식 3에 대입하여 구한 수학식 5와 수학식 4를 비교하여 추출한 수학식 6 및 수학식 7일 수 있다.

[0021] [수학식 3]

$$X_k = \sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c e^{-\frac{2\pi n}{H^p} k}$$

[0022]

[0023] [수학식 4]

$$X_k = A_k e^{-j\varphi_k}$$

[0024]

[0025] [수학식 5]

$$X_k = \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c e^{-[\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}]} e^{-j\frac{y^p}{H^p} 2\pi k} + H^p \beta \delta(k)$$

[0026]

[0027] [수학식 6]

$$\varphi_k = \frac{y^p}{H^p} 2\pi k$$

[0028]

[0029] [수학식 7]

[0030]

[0031] 또한, 상기 이산 푸리에 변환을 적용시키는 단계에서, 상기 이산 푸리에 변환을 적용시킨 상기 위상 및 진폭은, 각각 수학식 9 및 수학식 10일 수 있다.

[0032] [수학식 9]

[0033]

[0034] [수학식 10]

[0035]

[0036] 또한, 상기 3차원 좌표를 재형성하는 단계는, 푸리에 변환을 적용한 진폭 A_k 가 소정의 값보다 큰 경우에만, 상기 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 을 3차원 좌표 재형성에 이용할 수 있다.

[0037] 또한, 상기 3차원 좌표를 재형성하는 단계에서, 상기 푸리에 변환을 적용한 위상 φ_k 는, 복수개의 위상 φ_k (k는 1 이상)으로 다중주파수 위상 언래핑(Multifrequency Phase Unwrapping)을 수행하여, 최종 언래핑된(final unwrapped) 위상 φ 일 수 있다.

발명의 효과

[0039] 본 발명을 이용함으로써 복잡한 2차원 이미지 처리 기술을 이용하지 않아도 되고, 모든 동작은 픽셀화이즈(pixelwise)이므로 라인 줄무늬 불명료의 문제를 쉽게 해결할 수 있다. 또한, 스캔된 물체의 3차원 표면을 계산하기 위하여 위상(phase)을 이용함으로써, 재형성된 3차원 좌표는 자연적으로 서브픽셀(subpixel) 정확성을 달성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0041] 본 발명에 관한 이해를 돕기 위해 상세한 설명의 일부로 포함되는, 첨부도면은 본 발명에 대한 실시예를 제공하고, 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술적 사상을 설명한다.

도 1은 프로젝터 및 카메라를 포함하는 3차원 측정 시스템이다.

도 2의 (a) 내지 (d)는 각각 위상 φ_1 , φ_6 , φ_{24} 의 시각화한 이미지 및 최종 언래핑된 위상(final unwrapped phase) φ 를 도시한 것이고, (e) 내지 (h)는 각각 320번째 열(column)에서의 (a) 내지 (d)의 cross section을 도시한 것이다.

도 3의 (a)는 $n=190$ 일 때의 저장 이미지, (b)는 A_1 , (c)는 이진화된 A_1 , (d)는 φ_4 , (e)는 φ_{16} , (f)는 최종 언래핑된 위상 φ 의 시각화 이미지를 도시한 것이다.

도 4는 본 발명에 따른 3차원 재형성(reconstruction)된 석고상의 정면 및 측면을 도시한 것이다.

도 5의 (a)는 복잡한 구조를 가지는 장면(scene), (b)는 $n=380$ 일 때의 저장된 이미지를 도시한 것이다.

도 6의 (a) 및 (b)는 선형 근사법(LA)에 의하여 재형성된 3차원 점구름(point clouds)의 정면 및 측면을 도시한 것이고, (c) 및 (d)는 본 발명에 따른 방법에 의하여 재형성된 3차원 점구름의 정면 및 측면을 도시한 것이다.

도 7은 위상 오차(phase error)의 표준편차와 k_m 의 관계를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0042] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 이하에서는 특정 실시예들을 첨부된 도면을 기초로 상세히 설명하고자 한다.

[0043] 이하의 실시예는 본 명세서에서 기술된 방법, 장치 및/또는 시스템에 대한 포괄적인 이해를 돕기 위해 제공된다. 그러나 이는 예시에 불과하며 본 발명은 이에 제한되지 않는다.

[0044] 본 발명의 실시예들을 설명함에 있어서, 본 발명과 관련된 공지기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다. 그리고, 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다. 상세한 설명에서 사용되는 용어는 단지 본 발명의 실시예들을 기술하기 위한 것이며, 결코 제한적이지는 안 된다. 명확하게 달리 사용되지 않는 한, 단수 형태의 표현은 복수 형태의 의미를 포함한다. 본 설명에서, "포함" 또는 "구비"와 같은 표현은 어떤 특성들, 숫자들, 단계들, 동작들, 요소들, 이들의 일부 또는 조합을 가리키기 위한 것이며, 기술된 것 이외에 하나 또는 그 이상의 다른 특성, 숫자, 단계, 동작, 요소, 이들의 일부 또는 조합의 존재 또는 가능성을 배제하도록 해석되어서는 안 된다.

[0045] 또한, 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되는 것은 아니며, 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.

[0046] 이하에서는, 본 발명에 따른 푸리에 해석을 이용한 의한 라인 구조화된 광 패턴 디코딩 방법을 예시적인 실시 형태들을 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

- 방법

[0049] 영사된(projected) 라인 줄무늬는 물체를 가로질러 수직방향으로 움직이고, 단일 라인은 아래의 수학적 식 1로 표현될 수 있다.

수학적 식 1

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p \delta(n - y^p)$$

[0051]

[0053] I_n^p 는 프로젝터의 좌표 (x^p, y^p) 에서의 광의 세기이고, n 은 $[0, H^p - 1]$ 범위에서의 정수값이다. 상기 H^p 는

프로젝터의 수평 해상도(resolution)이다. 상기 $\delta(\cdot)$ 는 임펄스 함수 또는 디랙 델타 함수(Dirac Delta function)이고, 상수 A^p 는 영사된(projected) 상기 라인 줄무늬의 진폭이고, 일반적으로 이것은 프로젝터의 최대세기 값으로 설정된다. 예를 들어, 8비트 컬러 뎀스(color depth)의 프로젝터에서는 255로 설정된다. 그러므로, 2차원 패턴 I_n^p 에서 오직 n번째 열에서의 세기값만 A^p (white)이고 다른 세기값은 0(black)이다.

수학식 2

$$I_n^c(x^c, y^c) = A^c(x^c, y^c) e^{-\left[\frac{(n-y^p)^2}{2\sigma_w^2}\right]} + \beta(x^c, y^c)$$

상기 I_n^c 는 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서 캡처된 광의 세기이고, A^c 는 라인 줄무늬의 진폭 및 표면 반사율과 전적으로(positively) 연관되어 있고, σ_w 는 라인 줄무늬 너비의 표준편차이고, β 는 주변 광의 세기이다. 일반적으로, 카메라 블러링(blurring) 효과는 제한적이고, 저장된 라인 줄무늬의 폭은 좁다. 그러므로, σ_w 값은 작다.

라인 구조화된 광을 위한 디코딩 알고리즘들은 공간 도메인(domain)에서 라인 줄무늬의 피크값들을 검출한다. 그것들은 열 방향으로(column-wisely) (x^c, y^c) 에서 피크값에 있는지 결정하는 것을 시도한다. 만약, (x^c, y^c) 에 대한 피크값이 존재한다면, 프로젝터 공간에서 그에 대응하는 y^p 는 n으로 쓰이게 될 것이다 ($n = y^p$ 일 때가 피크값). 그러므로, 3차원 좌표는 삼각측량을 통하여 (x^c, y^c, y^p) 으로부터 재형성(reconstruction)될 수 있다. 그러나, 다시 불명료의 문제가 존재한다면, 상기 피크값을 공간적으로 검출하는 알고리즘은 실패할 수도 있다.

본 발명에서는 공간적인 2차원 이미지 프로세싱 방법을 이용하지 않고, 이산 푸리에 해석을 이용한 디코딩 방법을 적용하여 (x^c, y^c) 각각에 대한 위상을 일시적으로 추출한다. 본 발명에 따른 방법을 각 카메라 픽셀을 위하여 시간축을 따라 적용함으로써, (x^c, y^c) 의 표기(notatation)는 단순화를 위하여 수식으로부터 제거될 수 있다. 상기 방법은 아래에서 보다 상세히 설명한다.

수학식 2에 따르면, 저장된 이미지의 (x^c, y^c) 에서의 시간적 순서는 1차원 이산 신호이다. 즉, I_n^c 는 $n = 0, 1, \dots, H^p - 1$ 범위에서 주변 광의 세기 β 및 가우시안 함수를 구성하고, 그것의 피크값은 $n = y^p$ 에 위치된다[y^p 는 (x^c, y^c) 에 대응되는 프로젝터의 좌표]. 본 발명에서는 다음 수학식 3을 이용하여 시간적 순서에 따라 I_n^c 에 이산 푸리에 변환(DFT: Discrete Fourier Transform)을 수행한다.

수학식 3

$$X_k = \sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c e^{-\frac{2\pi n}{H^p}k}$$

[0063]

[0065] X_k 는 I_n^c 의 스펙트럼 구성요소이고, $k = 0, 1, \dots, H^p - 1$ 이다. X_k 는 아래의 수학식 4와 같이 나타낼 수도 있다.

수학식 4

$$X_k = A_k e^{-j\varphi_k}$$

[0067]

[0069] A_k 및 φ_k 는 각각 X_k 의 진폭 및 위상이다.

[0070] 상기 수학식 3을 상기 수학식 2에 적용하면, 아래의 수학식 5를 구할 수 있다.

수학식 5

$$X_k = \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c e^{-\left[\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}\right]} e^{-j\frac{y^p}{H^p}2\pi k} + H^p\beta\delta(k)$$

[0072]

[0074] 상기 수학식 4 및 수학식 5를 비교하면, X_k 의 위상과 진폭을 다음과 같이 구할 수 있다.

수학식 6

$$\varphi_k = \frac{y^p}{H^p} 2\pi k$$

[0076]

수학식 7

$$A_k = \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c e^{-\left[\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}\right]} + H^p \beta \delta(k)$$

[0078]

[0080] 수학식 6으로부터 상기 φ_k 의 세 가지 특성을 관찰할 수 있다.

[0081]

첫 번째로, k 가 1이상인 범위에서 각각의 φ_k 는 y^p , 즉 (x^c, y^c) 에 대응되는 상기 프로젝터의 좌표를 산출한다. 다시 말해, k 가 1이상인 범위에서 φ_k 중 어느 하나를 추출함으로써, 카메라-프로젝터 간의 상응(correspondence)을 구하는 것이 가능하다. 두 번째로, $k=1$ 이면 φ_k 는 절대 위상(absolute phase)이고, $k>1$ 이면 φ_k 는 k 주기로 랩핑된다(wrapped). 세 번째로, 상기 수학식 2에서 설명한 바와 같이, A^c 및 β 는 각각 반사율 및 주변 광의 영향을 나타낸다. 상기 수학식 6에 따르면, φ_k 는 상기 A^c 및 β 와는 상관관계가 없다. 즉, φ_k 는 반사율과 주변 광의 영향을 받지 않는다. 상기 수학식 7에 따르면, A_k 는 $k=0$ 일 때, 피크값을 가지는 가우시안 함수를 포함한다. 지수함수의 감쇠비율, 즉 $\frac{2\pi^2\sigma_w^2 k^2}{(H^p)^2}$ 는 매우 작고, k 가 1이상인 범위에서 A_k 는 k 가 증가함에 따라 천천히 감소한다. 그러므로, 만약 k 가 상대적으로 작다면, k 가 1이상인 범위에서 A_k 는 고정된 값으로 간주될 수 있고, 그것은 아래의 수학식 8과 같다.

수학식 8

$$A_k \doteq \sqrt{2\pi}\sigma_w A^c$$

[0083]

[0085] 이산 푸리에 변환(DFT)에 따라, φ_k 및 A_k 는 I_n^c 로부터 각각 아래의 수학식 9 및 수학식 10과 같이 계산될 수 있다.

수학식 9

$$\varphi_k = \arctan\left[\frac{\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)}{\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)}\right]$$

[0087]

수학식 10

$$A_k = \{ [\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \sin(\frac{2\pi nk}{H^p})]^2 + [\sum_{n=0}^{H^p-1} I_n^c \cos(\frac{2\pi nk}{H^p})]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

[0089]

[0091] 이론적으로는, (x^c, y^c) 에서의 3차원 삼각측량을 위하여 φ_1 을 직접적으로 이용할 수 있다. 그러나, 실제로는 φ_k (φ_1 을 포함)는 랜덤 잡음(random noise)으로 인하여 상당한 위상 오차(phase error)가 발생할 수 있다. 상기 SLI에서 널리 적용되는 접근법에 따라, 위상 언래핑(unwrapping)은 효과적으로 위상 오차를 억제할 수 있다. 그러므로 본 발명에서는 정확한 위상을 얻기 위하여, φ_1 및 선택된 몇몇 φ_k (k는 1이상)을 이용한 다중주파수 위상 언래핑을 수행한다. k의 최대값은 k_m 으로 정의한다. 최종 언래핑된(final unwrapped) 위상 φ 을 획득한 후, 3차원 좌표는 삼각측량을 통하여 (x^c, y^c, φ) 으로부터 계산될 수 있다.

[0092] 상기 수학식 7에 따르면, k가 1이상인 범위에서 A_k 는 A^c , 즉 (x^c, y^c) 에서의 저장된 광 줄무늬의 진폭에 비례한다. 음영 지역(shadow area)에서는 영사된(projected) 광의 세기가 저장되지 않기 때문에, 이러한 영역에서의 A_k 는 0이 된다. 그러므로, 본 발명에서는 A_k 를 음영 지역으로부터 유효 지역(valid area)을 구분하기 위한 것으로 이용한다. 구체적으로는, (x^c, y^c) 에서의 A_k (k는 1이상)의 값, 예를 들어 (x^c, y^c) 에서 A_1 이 작은 임계값(threshold)보다 크다면, (x^c, y^c) 에서 φ 에 상응하는 값은 유효하고 3차원 재형성을 위해 포함될 수 있다.

[0094] -위상 오차(Phase Error)의 해석

[0095] 실제로, 전자 시스템에서 잡음(noise)은 피할 수 없는 요소이다. 그러므로, 본 발명에 따른 디코딩 알고리즘에서 잡음의 영향을 해석하기 위하여 잡음 ω_n 을 상기 수학식 2에 적용하면 아래의 수학식 11과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 11

$$\tilde{I}_n^c = I_n^c + \omega_n$$

[0097]

[0099] 상기 ω_n 는 평균이 0이고, 표준편차(STD: Standard Deviation) σ 를 갖는 가우시안 분산이다. 상기 수학식 9를 상기 수학식 11에 대입하면, 아래의 수학식 12와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 12

$$\tilde{\Phi}_k = \arctan \left[\frac{A_k \sin(\Phi_k) + \sum_{n=0}^{H^p-1} \omega_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)}{A_k \cos(\Phi_k) + \sum_{n=0}^{H^p-1} \omega_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{H^p}\right)} \right]$$

[0101]

[0103] 또한, 만약 상기 잡음값이 작다면, 상기 위상 오차인 $\Delta\phi_k$ 는 아래의 수학식 13과 같이 계산될 수 있다.

수학식 13

$$\Delta\Phi_k = \Phi_k - \tilde{\Phi}_k \approx \frac{1}{A_k} \sum_{n=0}^{H^p-1} \omega_n \sin\left(\Phi_k - \frac{2\pi nk}{H^p}\right)$$

[0105]

[0107] 상기 위상 오차 분산은 평균이 0인 가우시안 분산에 따라 모델링 될 수 있다. 따라서, 상기 위상 오차 표준편차는 위상 품질의 지표로 이용될 수 있고, 상기 표준편차가 작을수록 위상의 정확성은 더 높아지는 것이다. $\Delta\phi_k$ 의 표준편차는 아래의 수학식 14와 같이 유도된다.

수학식 14

$$\sigma^{\Delta\Phi_k} = \frac{\sigma}{A_k} \left(\frac{H^p}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

[0109]

[0110] 다중주파수 위상 언래핑을 수행함으로써, 래핑된 $\tilde{\Phi}_{k_m}$ 는 상기 절대 위상 $\tilde{\Phi}$ 으로 언래핑되고, 상기 위상 오차의 표준편차는 아래의 수학식 15와 같이 된다.

수학식 15

$$\sigma^{\Delta\Phi} = \frac{\sigma}{k_m A_{k_m}} \left(\frac{H^p}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

[0112]

[0114] k_m 이 상대적으로 작으면, 상기 수학식 8에서 볼 수 있는 바와 같이 A_{k_m} 은 고정된 값으로 간주될 수 있다. 이러한 경우, k_m 이 증가함에 따라, $\sigma^{\Delta\Phi}$ 는 감소한다. 실제로는 k_m 이 증가함에 따라 A_{k_m} 은 서서히 감소한다. 그러므로, k_m 이 상당한 정도로 커지면, $\sigma^{\Delta\Phi}$ 가 k_m 에 따라 감소하는 것은 중단될 수 있다. 다시 말해, k_m 이 증가함에 따라 반드시 정확성의 향상이라는 결과를 낳는 것은 아니다.

[0116] -실험 결과

[0117] 도 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 본 발명에 따른 3차원 측정 시스템은 800 x 600 해상도의 8-bits-depth Casio XJ-A 155V 프로젝터 및 640 x 480 해상도의 8-bits-depth Prosilica GC650 카메라로 구성된다. 상기 수학식 1로부터 생성되는 모든 라인 패턴은 $A^p = 255$ 이고 n 은 0에서 599까지 값으로 변화한다.

[0118] -언래핑된(unwrapped) 위상의 시각적 증명

[0119] 위상 unwrapping이 효과적으로 위상 오차를 줄이는 것을 시각적으로 증명하기 위해, 평평한 백색판을 스캔하고, 언래핑을 수행하기 전후의 위상을 보여준다. $k=1, 6, 24$ 값으로 수학식 9를 이용하여 φ_k 를 계산하였다. 그리고 나서, 최종 언래핑된 위상 φ 는 다중 주파수 위상 언래핑에 의하여 위상 φ_1 , φ_6 , φ_{24} 으로부터 구해진다. φ_1 , φ_6 , φ_{24} 및 φ 은 각각 도 2(a) 내지 (d)에서 볼 수 있다. φ_1 , φ_6 , φ_{24} 및 φ 의 320번째 열에서의 단면적(cross section)은 도 2(e) 내지 (h)에서 도시하였다. 만약 잡음에 의한 오염이 없다면, φ_1 및 φ 는 이상적인 기울기 단면적(slope cross section)을 가질 것이다. 도 2(h)와 도 2(e)를 비교하면, φ_1 이 랜덤 잡음에 의하여 왜곡되어있고, 반면에 최종 언래핑된 위상 φ 는 높은 정확성을 달성한다는 것이 명백히 드러난다.

[0120] -측정 정확성의 비교

[0121] 본 발명에 따른 방법과 기존의 공간 피크값 검출기들의 정확성을 비교하기 위해, 평평한 백색판을 스캔하고 위상 오차를 계산한다. 본 발명에 따른 방법에서, $k_m=64$ 이다. 기존의 피크값 검출기는 가우시안 근사법(Gaussian Approximation), 선형 근사법(LA: Linear Approximation) 및 물체의 중심을 포함하는 비교를 위하여 채택되었다. 이러한 공간 검출기들은 서브픽셀 (x^c, y^c) 과 정수 y^p 간의 맵핑을 수행하기 때문에, 비교의 편의성의 측면에서, 정수 (x^c, y^c) 에 상응하는 범위에서 서브픽셀 y^p 를 평가함으로써 이러한 맵핑은 위상으로 바뀐다. 실제 위상은 다중주파수 위상 프로필로메트리(PMP: Multifrequency phase Measuring Profilometry)로부터 얻을 수 있다. 아래의 표 1을 보면, 다른 방법에 따른 위상 오차의 표준편차값으로부터, 본 발명에 따른 방

법의 정확성이 가장 좋다는 것을 확인할 수 있다.

표 1

Table 1 The phase error comparison.

Methods	Standard deviation of the phase error (rad)
The proposed	0.00183
Gaussian approximation	0.00191
Linear approximation	0.00188
Centre of mass	0.00212

[0123]

[0125]

-3차원 재형성

[0126]

3차원 스캐닝하기 전에, 본 발명에 따른 시스템을 교정할 필요가 있다. 실제 좌표를 아는 40개의 특징점을 가지는 교정 타겟(calibration target)을 이용한다. 첫번째로, 교정 타겟으로부터 취해진 이미지로부터 2차원 특징을 추출함에 따라 실세계(world) 좌표와 카메라 좌표 간에 상응하는 특징들을 얻을 수 있다. 상기 상응하는 특징들로부터 실세계-카메라 변환 매트릭스 M_{wc} 가 계산된다. 두번째로, 상기 PMP를 이용하여 얻어진 카메라-프로젝터 상응뿐만 아니라 카메라 좌표에서 추출된 특징을 프로젝트 좌표에 위치시킨다. 마지막으로, 실세계(world) 좌표와 프로젝트 좌표 간의 매칭된 특징으로부터 실세계-프로젝터 변환 매트릭스 M_{wp} 가 계산된다. 상기 교정 파라미터 M_{wc} 및 M_{wp} 는 이후 위상-to-좌표 변환에 이용될 것이다.

[0127]

상기 도 1에서의 석고상은 본 발명에 따른 방법을 증명하기 위해 시각적으로 재형성된다. 첫번째로, 수학식 1에서의 라인 구조화된 광 패턴을 이용하여 상기 석고상을 스캔한다. 도 3(a)는 n=190일 때 저장된 이미지이다. 두번째로, 도 3(b)에 볼 수 있는 바와 같이, 저장된 이미지로부터, A_1 을 계산한다. 그리고 나서, 임계값(threshold) 40으로 A_1 을 이진화하고, 도 3(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 이진화된 A_1 은 음영 지역의 유효하지 않은 상을 제거하기 위한 마스크로서 이용된다. 세번째로, 수학식 9를 이용함으로써, φ_1 , φ_4 , φ_{16} 및 φ_{64} 를 각각 추출한다. 추출된 위상으로부터, 다중주파수 위상 연래핑을 이용한 최종 연래핑된 위상 φ 를 얻는다. 도 3(d) 내지 3(f)는 각각 φ_1 , φ_4 , φ_{16} 및 φ 을 시각화한 것이다. 3차원 점 구름(3-D point clouds)은 삼각측량에 의하여 재형성된다. 도 4(a) 및 4(b)는 3차원 점구름의 정면도 및 측면도를 나타낸다.

[0128]

라인 줄무늬가 불명료한 경우를 위한 본 발명에 따른 방법의 이점을 나타내기 위하여, 도 5(a)에 보이는 복잡한 구조의 장면(scene)을 스캔한다. 도 5(b)는 n=380일때의 저장된 이미지이고, 불명료의 문제가 존재한다. 예를 들어, 몇몇 열(column)에는 다중 피크값이 존재할 수 있다. 선형 근사화(LA)를 적용하였을 때, 도 6(a) 및 6(b)의 박스 영역 안에서 보이는 것처럼 그것의 3차원 재형성 점구름에는 분명한 결점이 존재한다. 본 발명에 따른 방법으로, 도 6(c) 및 6(d)의 박스 영역 안에서 보이는 것처럼 상기 불명료의 문제를 성공적으로 해결할 수 있다.

[0129] - k_m 과 측정 정확성의 관계 결정

[0130] 상기 수학적 식 15에서 볼 수 있는 바와 같이, 최종 언래핑된 위상의 정확성은 k_m 에 의하여 결정된다. k_m 과 측정 정확성을 실험적으로 입증하기 위하여, 라인 구조화된 광을 이용하여 평평한 백색판을 스캔하고, k_m 값을 변화시키면서 위상 오차의 표준편차를 계산한다. 도 7에서 볼 수 있는 바와 같이, k_m 이 20 이하인 범위에서는 k_m 이 증가함에 따라 위상 오차의 표준편차는 급격히 감소하고, $20 < k_m < 120$ 범위에서는 대체로 낮은 상태를 유지한다. k_m 이 120을 초과하면 다시 증가한다. 이 결과는 앞서 검토한 위상 오차 해석과도 일치한다. 따라서, 본 발명에 따른 실험 조건에서 정확한 위상을 얻기 위해서는, k_m 은 [20,120]의 범위에 속하도록 하는 것이 바람직하다.

[0132] - 결론

[0133] 본 발명에서는 이산 푸리에 해석(DFT)을 이용하여, 라인 구조화된 광 패턴을 디코딩하는 새로운 방법을 개시한다. 시간축을 따라 저장된 이미지에 이산 푸리에 해석을 수행함으로써, 선택된 스펙트럼 구성요소의 몇몇 위상 맵(phase map)을 추출한다. 그리고 나서, 추출된 위상 맵으로부터 3차원 재형성(reconstruction)을 위하여 이용되는 최종 위상(Final Phase)은 다중주파수 위상 언래핑(Multifrequency Phase Unwrapping)에 의하여 얻어진다. 본 발명에 따른 방법은 라인 줄무늬를 추출하는 동안의 인접 동작(Neighboring operations)없고, 안정적이며, 강력하다. 실험 결과 또한, 줄무늬 피크값 검출에 기초한 종래의 접근법에 비교하여, 본 발명에 따른 방법이 정확하고, 불명료의 문제를 성공적으로 해결할 수 있음을 보여준다.

도면

도면1

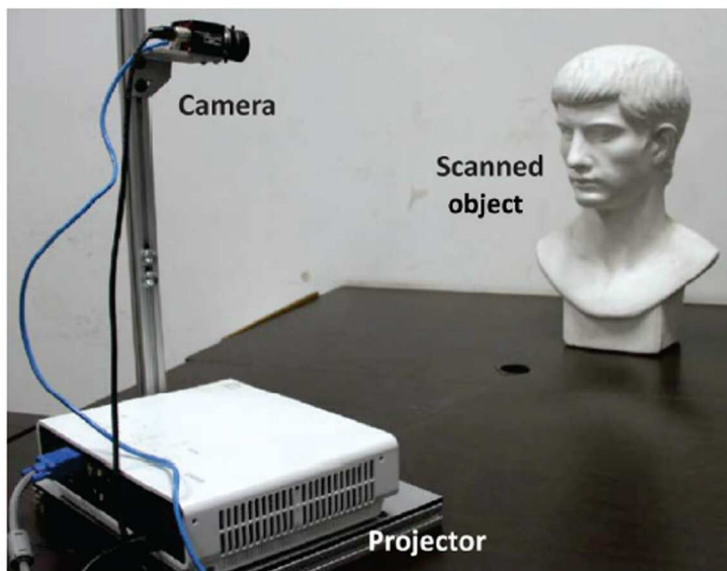


Fig. 1 The measurement system setup.

도면2

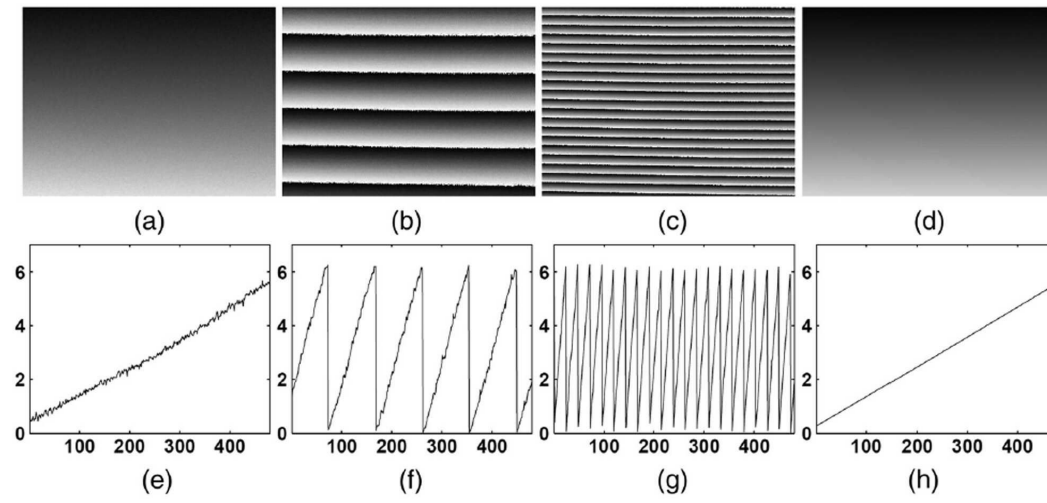


Fig. 2 Visualizations of (a) Φ_1 , (b) Φ_6 , (c) Φ_{24} , and (d) the final unwrapped phase Φ ; and, at 320th column, (e), (f), (g), and (h) cross sections of (a), (b), (c) and (d), respectively.

도면3

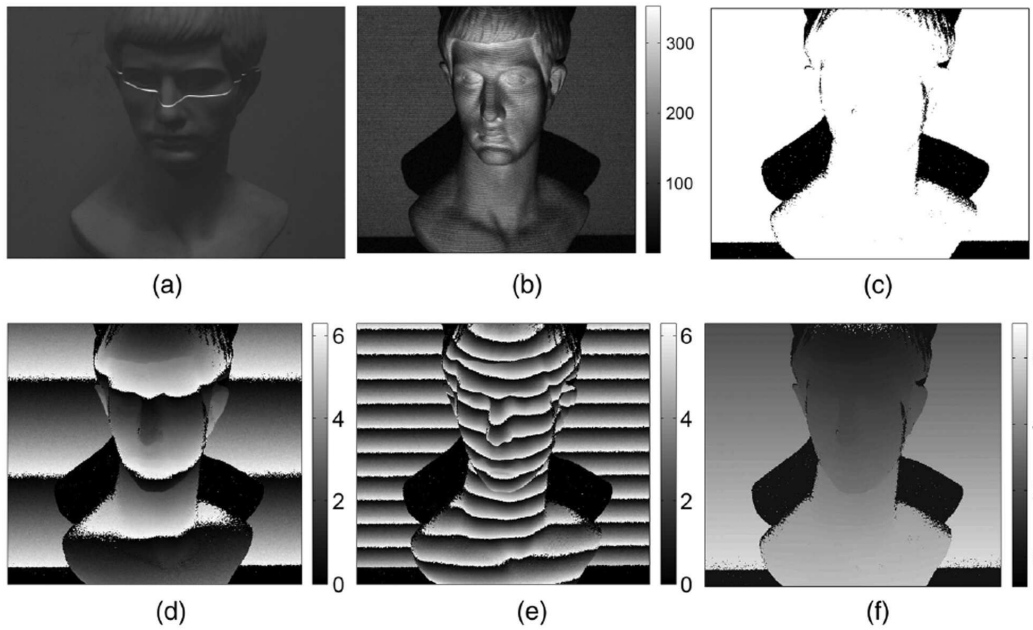


Fig. 3 (a) A recorded image for $n = 190$; visualizations of (b) A_1 , (c) binarized A_1 , (d) Φ_4 , (e) Φ_{16} , and (f) the final unwrapped phase Φ .

도면4

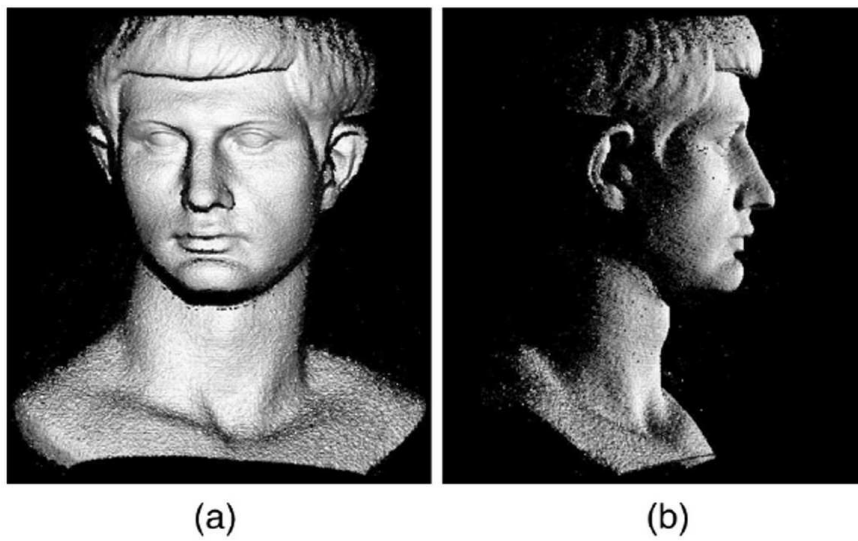


Fig. 4 Three-dimensional (3-D) reconstruction of a plaster statue viewed from: (a) front and (b) side by using the proposed method.

도면5

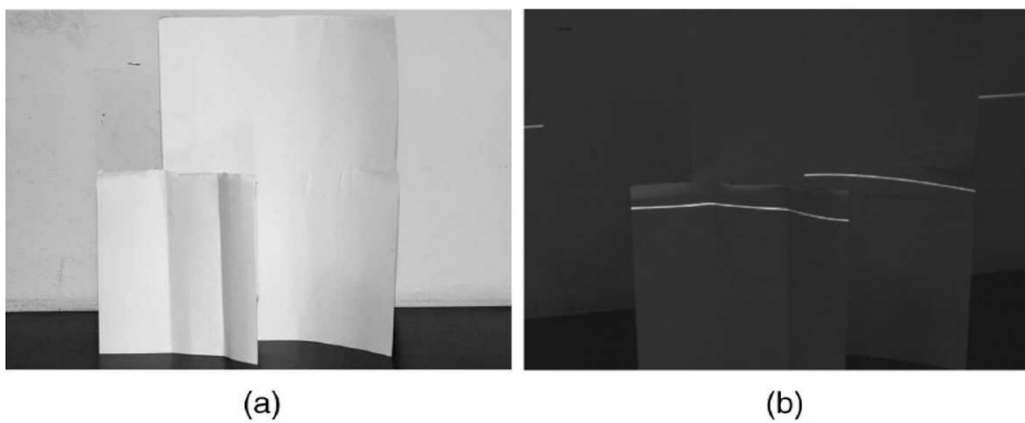


Fig. 5 (a) A scene with complex structure and (b) a recorded image for $n = 380$.

도면6

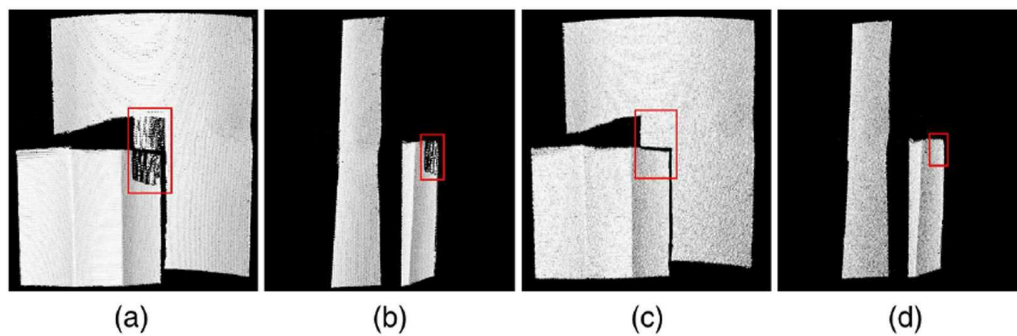


Fig. 6 Viewed from front and side, the 3-D point clouds reconstructed by: (a), (b) linear approximation; and (c), (d) the proposed method.

도면7

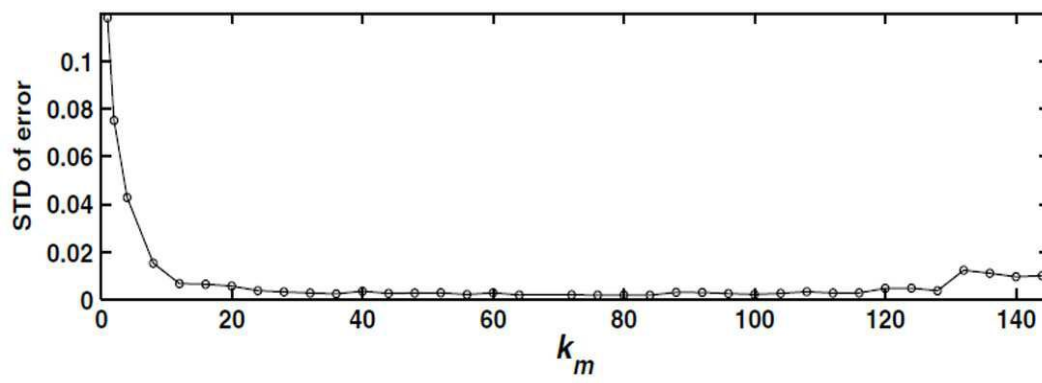


Fig. 7 Standard deviation of the phase error versus k_m .