



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년02월01일
(11) 등록번호 10-1700938
(24) 등록일자 2017년01월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01B 11/25 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01B 11/2513 (2013.01)
G01B 11/2518 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0185640
(22) 출원일자 2015년12월24일
심사청구일자 2015년12월24일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020140101223 A
KR102016004717 A
기술이전 희망 : 기술양도

(73) 특허권자
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 11 항

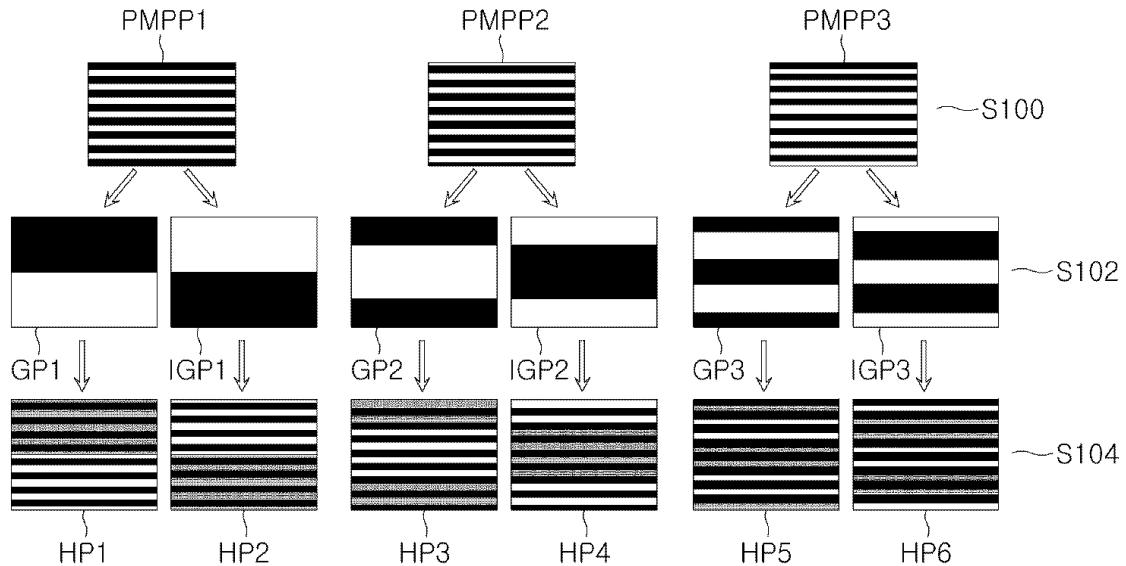
심사관 : 김민석

(54) 발명의 명칭 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 절대 위상 획득 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은, (a) 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로파일로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들을 생성하는 단계; (b) 상기 3단계 PMP 패턴들의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴으로 변환하는 단계; (c) 상기 그레이

대표도



이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴을 생성하는 단계; (d) 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하는 단계; 및 (e) 상기 3단계 PMP 패턴들을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 하이브리드 코딩 패턴들을 생성하는 단계를 포함하여, 3단계 위상 측정 프로파일로메트리에서 신호대잡음비를 개선할 수 있고, 고속으로 고품질의 3차원 측정을 수행할 수 있으며, 통상적인 3단계 PMP에 비해, 더 높은 정확성을 가지고 3차원 측정을 수행할 수 있다.

(52) CPC특허분류

G01B 11/2531 (2013.01)

G01B 11/2536 (2013.01)

G06F 17/10 (2013.01)

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로필로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들을 생성하는 단계;
- (b) 상기 3단계 PMP 패턴들의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴으로 변환하는 단계;
- (c) 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴을 생성하는 단계;
- (d) 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하는 단계; 및
- (e) 상기 3단계 PMP 패턴들을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 하이브리드 코딩 패턴들을 생성하는 단계를 포함하는, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 프린지 차수는,

[수학식 2]

$$k^p(x^p, y^p) = \left\lfloor \frac{y^p}{H^p} (f - 1) \right\rfloor$$

에 기반하여 계산되고,

상기에서 $k^p(x^p, y^p)$ 는 프로젝터 공간에서의 좌표인 (x^p, y^p) 에서의 프린지 차수이고, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 바닥 함수(floor function)이며, f 는 상기 PMP 패턴들의 공간 주파수이고, H^p 는 프로젝터의 해상도인, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 단계 (b)는,

(b-1)

[수학식 3]

$$k^p(x^p, y^p) = \sum_{n=0}^2 b_n^p(x^p, y^p) 2^n$$

에 기반하여, 상기 프린지 차수들을 3개의 바이너리 패턴들로 분해하는 단계; 및

(b-2) 상기 각 바이너리 패턴(b_n^p)을 상기 그레이 코딩 패턴으로 변환하는 단계를 포함하는, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 단계 (c)에서, 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴은, $\bar{g}_n^p = 1 - g_n^p$ 에 기반하여 생성되고,

상기 $\bar{g}_n^p$ 는 상기 역 그레이 코딩 패턴이고, g_n^p 은 상기 그레이 코딩 패턴인, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 단계 (d)에서 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하는 단계는,

상기 g_n^p 과 $\bar{g}_n^p$ 에 대해, 0의 값들을 사용자-정의된 스칼라 $s \in (0,1)$ 로 대체함으로써 수행되는, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 단계 (e)는,

[수학식 4]

$$I_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p) r_n^p(x^p, y^p)$$

[수학식 5]

$\bar{I}_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p) \bar{r}_n^p(x^p, y^p)$ 에 기반하여 상기 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p(x^p, y^p), \bar{I}_n^p(x^p, y^p))$ 을 생성하는 단계를 포함하고,

상기에서 $T_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 3단계 PMP 패턴들이며, $r_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들이고, $\bar{r}_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들인, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법.

청구항 7

(a) 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로필로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들을 생성하고, 상기 3단계 PMP 패턴들의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴으로 변환하며, 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴을 생성하고, 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하며, 상기 3단계 PMP 패턴들을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 생성된 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p, \bar{I}_n^p)$ 을 물체에 투사하고 카메라로 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p, \bar{I}_n^p)$ 이 투사된 물체의 이미지를 캡처하는 단계;

(b) 상기 캡처된 이미지들에 기반하여 래핑된(wrapped) 위상들을 계산하는 단계;

(c) 상기 캡처된 이미지들에 기반하여 프린지 차수들의 정보를 포함하는 3개의 그레이 코딩 이미지들을 복구하는 단계;

- (d) 상기 그레이 코딩 이미지들에 기반하여 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트를 디코딩하는 단계;
- (e) 상기 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트로부터 프린지 차수들을 계산하는 단계; 및
- (f) 상기 래핑된 위상들과 상기 프린지 차수들에 기반하여 절대 위상을 계산하는 단계를 포함하는, 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법.

청구항 8

청구항 7에 있어서,

상기 단계 (b)에서,

상기 래핑된 위상(ϕ)은,

[수학식 8]

$$\phi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \sin(\frac{2\pi n}{3})}{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \cos(\frac{2\pi n}{3})} \right] \text{에 기반하여 계산되고,}$$

상기에서 $\tilde{I}_n^c$ 는 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)이며,

상기 $\tilde{I}_n^c$ 는,

[수학식 6]

$$\tilde{I}_n^c(x^c, y^c) = I_n^c(x^c, y^c) + \bar{I}_n^c(x^c, y^c) \text{에 기반하여 계산되고}$$

$I_n^c(x^c, y^c)$ 는 상기 카메라에 의해 캡처된 상기 하이브리드 코딩 패턴(I_n^p)이 투사된 물체의 이미지에
서 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)이며,

$\bar{I}_n^c(x^c, y^c)$ 는 상기 카메라에 의해 캡처된 상기 하이브리드 코딩 패턴($\bar{I}_n^p$)이 투사된 물체의 이미지에
서 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)인, 3차원 형상 재구성을 위한 절대 위상 획득
방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 단계 (c)에서,

상기 프린지 차수들의 정보를 포함하는 3개의 그레이 코딩 이미지들(g_n^c)은,

[수학식 9]

$$g_n^c = \begin{cases} 0 & \text{if } I_n^c \leq \bar{I}_n^c \\ 1 & \text{if } I_n^c > \bar{I}_n^c \end{cases} \text{에 기반하여 복구되는, 3차원 형상 재구성을 위한 절대 위상 획득 방법.}$$

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 단계 (e)에서,

상기 프린지 차수들(k^c)은,

[수학식 10]

$$k^c = \sum_{n=0}^2 b_n^c 2^n$$

에 기반하여 계산되고,

상기에서 b_n^c 은 상기 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트인, 3차원 형상 재구성을 위한 절대 위상 획득 방법.

청구항 11

청구항 10에 있어서,

상기 단계 (f)에서,

상기 절대 위상(Φ)은,

[수학식 11]

$$\Phi = \frac{\phi + 2\pi k^c}{f}$$

에 기반하여 계산되고,

상기 f는 상기 PMP 패턴들의 공간 주파수인, 3차원 형상 재구성을 위한 절대 위상 획득 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 절대 위상 획득 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 구조화된 조명 기술로서 지칭되는, 위상 측정 프로파일로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry)는 3차원 표면 측정에 널리 사용되고, 전형적으로, 3단계 PMP, 즉 3개의 균일한 위상 시프트를 갖는 고주파수 패턴들이 고속 측정을 달성하기 위하여 사용된다(비특허문헌 1). 고주파수 패턴들의 위상 모호성을 신뢰성 있게 제거하기 위하여, 시간적으로 위상을 펼치기(unwrap) 위한 기준으로서 그레이 코딩 패턴들 또는 단위-주파수 사인파 패턴들이 일반적으로 사용된다. 따라서 적어도 총 6개의 패턴들이 절대 위상을 복구하는데 필요하다.

[0003] 최근에, 측정 속도를 개선하기 위하여, 위상 펼침(phase unwrapping)을 위해 사용되는 패턴들의 수를 감소시키는 다양한 방법들이 제안되어왔다(비특허문헌2 및 비특허문헌 3). 하지만, 이러한 방법들은 신호대잡음비(SNR) 또는 정확성을 저하시킨다. PMP를 스테레오 비전과 결합하는 멀티뷰 위상 시프팅 접근법은 위상 펼침을 회피하고 따라서 실시간 재구성을 달성할 수 있지만, 측정 시스템이 복잡해지고 비용이 증가한다(비특허문헌 4 및 비특허문헌 5).

[0004] 적은 수의 패턴들을 사용하는 경우, 3단계 PMP는 센서 잡음과 주변광과 같은 불확실한 노이즈에 민감하다(비특허문헌 6 및 비특허문헌 7). 3단계 PMP의 SNR을 개선하기 위하여, 일반적인 해법은 PMP 패턴들의 공간 주파수 또는 진폭을 증가시키는 것이다. 3 그레이 코딩 패턴들을 3 PMP 패턴들로 교체하고 계단(stair) 함수를 위상 영역에 내장시킴으로써, 비특허문헌 8은 8보다 높은 주파수를 갖는 패턴들로부터 계산된 위상을 시간적으로 펼쳤다(unwrapped). 하지만, 3단계 PMP의 위상 에러가 상당히 많기 때문에, 실제로, 특히 스캐닝된 표면들이 복잡한 형

상을 갖고 불연속성을 갖는 경우, 8보다 높은 패턴 주파수는 강건하게 절대 위상을 복구하기에는 바람직하지 않다.

- [0005] 공간 주파수를 증가시키는 것 이외에, 사인과 패턴들의 진폭을 증가시키는 것도 어려운데, 왜냐하면 프로젝터-카메라 시스템의 다이내믹 레인지가 전형적으로 고정되기 때문이다. 비특허문헌 9는 원래의 사인과 패턴들에 3배수차 고조파를 추가함으로써 패턴 진폭을 약간 확장하였다. 전반적으로, 고속으로 고품질의 3차원 측정을 수행하는 분야에서 3단계 PMP의 SNR을 개선하는 것은 도전으로 남아 있다.

선행기술문헌

비특허문헌

- [0006] (비특허문헌 0001) Venugopal Srinivasan, Hsin-Chu Liu, and Maurice Halioua, "Automated phase-measuring profilometry of 3-d diffuse objects," Applied Optics, vol. 23, no. 18, pp. 31053108, 1984.
- (비특허문헌 0002) Kai Liu, Yongchang Wang, Daniel L Lau, Qi Hao, and Laurence G Hassebrook, "Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-d shape measurement," Optics Express, vol. 18, no. 5, pp. 52295244, 2010.
- (비특허문헌 0003) Chao Zuo, Qian Chen, Guohua Gu, Shijie Feng, and Fangxiaoyu Feng, "High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes," Optics Express, vol. 20, no. 17, pp. 1949319510, 2012.
- (비특허문헌 0004) Zhongwei Li, Kai Zhong, You Fu Li, Xiaohui Zhou, and Yusheng Shi, "Multiview phase shifting: a full-resolution and high-speed 3d measurement framework for arbitrary shape dynamic objects," Optics Letters, vol. 38, no. 9, pp. 13891391, 2013.
- (비특허문헌 0005) William Lohry, Vincent Chen, and Song Zhang, "Absolute three-dimensional shape measurement using coded fringe patterns without phase unwrapping or projector calibration," Optics Express, vol. 22, no. 2, pp. 1287-1301, 2014.
- (비특허문헌 0006) Yongchang Wang, Kai Liu, Qi Hao, Xianwang Wang, Daniel L Lau, and Laurence G Hassebrook, "Robust active stereo vision using kullback-leibler divergence," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 34, no. 3, pp. 548563, 2012.
- (비특허문헌 0007) Jielin Li, Laurence G Hassebrook, and Chun Guan, "Optimized two-frequency phase-measuring-profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity," Journal of the Optical Society of America A, vol. 20, no. 1, pp. 106115, 2003.
- (비특허문헌 0008) Yajun Wang and Song Zhang, "Novel phase-coding method for absolute phase retrieval," Optics Letters, vol. 37, no. 11, pp. 20672069, 2012.
- (비특허문헌 0009) Chao Zuo, Qian Chen, Guohua Gu, Xiubao Sui, and Jianle Ren, "Snr improvement in three-step phase shifting profilometry," in Photonics and Optoelectronics (SOP), 2012 Symposium on. IEEE, 2012, pp. 14.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 고주파수 위상 측정 프로필로메트리(PMP) 패턴들에 그레이 코딩 패턴들을 내장시키는 하이브리드 코딩 방법을 사용하여 3단계 위상 측정 프로필로메트리에서 신호대잡음비(SNR)를 개선할 수 있으며 고속으로 고품질의 3차원 측정을 수행할 수 있는, 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법을 제공하는 것이다.

- [0008] 본 발명이 해결하고자 하는 다른 과제는 고주파수 위상 측정 프로필로메트리(PMP) 패턴들에 그레이 코딩 패턴들을 내장시키는 하이브리드 코딩 방법을 사용하여 3단계 위상 측정 프로필로메트리에서 신호대잡음비를 개선할

수 있으며 고속으로 고품질의 3차원 측정을 수행할 수 있는, 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은,

(a) 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로필로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들을 생성하는 단계;

(b) 상기 3단계 PMP 패턴들의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴으로 변환하는 단계;

(c) 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴을 생성하는 단계;

(d) 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하는 단계; 및

(e) 상기 3단계 PMP 패턴들을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 하이브리드 코딩 패턴들을 생성하는 단계를 포함한다.

본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 있어서, 상기 프린지 차수는,

[수학식 2]

$$k^p(x^p, y^p) = \left\lfloor \frac{y^p}{H^p}(f - 1) \right\rfloor$$

에 기반하여 계산되고,

상기에서 $k^p(x^p, y^p)$ 는 프로젝터 공간에서의 좌표인 (x^p, y^p) 에서의 프린지 차수이고, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 바닥 함수(floor function)이며, f 는 상기 PMP 패턴들의 공간 주파수이고, H^p 는 프로젝터의 해상도일 수 있다.

또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 있어서, 상기 단계 (b)는,

(b-1)

[수학식 3]

$$k^p(x^p, y^p) = \sum_{n=0}^2 b_n^p(x^p, y^p) 2^n$$

에 기반하여, 상기 프린지 차수들을 3개의 바이너리 패턴들로 분해하는 단계; 및

(b-2) 상기 각 바이너리 패턴(b_n^p)을 상기 그레이 코딩 패턴으로 변환하는 단계를 포함할 수 있다.

또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 있어서, 상기 단계 (c)에서, 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴은, $\bar{g}_n^p = 1 - g_n^p$ 에 기반하여 생성되고,

상기 $\bar{g}_n^p$ 는 상기 역 그레이 코딩 패턴이고, g_n^p 은 상기 그레이 코딩 패턴일 수 있다.

또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 있어서, 상기 단계 (d)에서 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하는 단계는, 상기 g_n^p 과 $\bar{g}_n^p$ 에 대해, 0의 값들을 사용자-정의된 스칼라 $s \in (0, 1)$ 로 대체함으로써 수행될 수 있다.

또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 있어서, 상기 단계 (e)는,

[0028] [수학식 4]

$$I_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p)r_n^p(x^p, y^p)$$

[0029]

[0030] [수학식 5]

[0031] $\bar{I}_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p)\bar{r}_n^p(x^p, y^p)$ 에 기반하여 상기 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p(x^p, y^p), \bar{I}_n^p(x^p, y^p))$ 을 생성하는 단계를 포함하고,

[0032] 상기에서 $T_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 3단계 PMP 패턴들이며, $r_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들이고, $\bar{r}_n^p(x^p, y^p)$ 는 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들일 수 있다.

[0033] 상기 다른 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법은,

[0034] (a) 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로필로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들을 생성하고, 상기 3단계 PMP 패턴들의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴으로 변환하며, 상기 그레이 코딩 패턴들 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴을 생성하고, 상기 그레이 코딩 패턴들과 상기 역 그레이 코딩 패턴들에 소정의 스칼라를 적용하며, 상기 3단계 PMP 패턴들을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 상기 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 생성된 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p, \bar{I}_n^p)$ 을 물체에 투사하고 카메라로 하이브리드 코딩 패턴들 $(I_n^p, \bar{I}_n^p)$ 이 투사된 물체의 이미지를 캡처하는 단계;

[0035] (b) 상기 캡처된 이미지들에 기반하여 래핑된(wrapped) 위상들을 계산하는 단계;

[0036] (c) 상기 캡처된 이미지들에 기반하여 프린지 차수들의 정보를 포함하는 3개의 그레이 코딩 이미지들을 복구하는 단계;

[0037] (d) 상기 그레이 코딩 이미지들에 기반하여 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트를 디코딩하는 단계;

[0038] (e) 상기 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트로부터 프린지 차수들을 계산하는 단계; 및

[0039] (f) 상기 래핑된 위상들과 상기 프린지 차수들에 기반하여 절대 위상을 계산하는 단계를 포함한다.

[0040] 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에 있어서, 상기 단계 (b)에서, 상기 래핑된 위상(ϕ)은,

[0041] [수학식 8]

$$\phi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \sin(\frac{2\pi n}{3})}{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \cos(\frac{2\pi n}{3})} \right]$$

[0042]에 기반하여 계산되고,

[0043] 상기에서 $\tilde{I}_n^c$ 는 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)이며,

[0044] 상기 $\tilde{I}_n^c$ 는,

[0045] [수학식 6]

$$\tilde{I}_n^c(x^c, y^c) = I_n^c(x^c, y^c) + \bar{I}_n^c(x^c, y^c)$$

[0046]에 기반하여 계산되고

[0047] $I_n^c(x^c, y^c)$ 는 상기 카메라에 의해 캡처된 상기 하이브리드 코딩 패턴(I_n^p)이 투사된 물체의 이미지에
서 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)이며,

[0048] $\bar{I}_n^c(x^c, y^c)$ 는 상기 카메라에 의해 캡처된 상기 하이브리드 코딩 패턴($\bar{I}_n^p$)이 투사된 물체의 이미지에
서 카메라 공간에서의 좌표 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)일 수 있다.

[0049] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에 있어서, 상기 단계 (c)에서,
상기 프린지 차수들의 정보를 포함하는 3개의 그레이 코딩 이미지들(g_n^c)은,

[0050] [수학식 9]

$$g_n^c = \begin{cases} 0 & \text{if } I_n^c \leq \bar{I}_n^c \\ 1 & \text{if } I_n^c > \bar{I}_n^c \end{cases}$$

[0051] 에 기반하여 복구될 수 있다.

[0052] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에 있어서, 상기 단계 (e)에서,
상기 프린지 차수들(k^c)은,

[0053] [수학식 10]

$$k^c = \sum_{n=0}^2 b_n^c 2^n$$

[0054] 에 기반하여 계산되고,

[0055] 상기에서 b_n^c 은 상기 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트일 수 있다.

[0056] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에 있어서, 상기 단계 (f)에서,
상기 절대 위상(Φ)은,

[0057] [수학식 11]

$$\Phi = \frac{\phi + 2\pi k^c}{f}$$

[0058] 에 기반하여 계산되고,

[0059] 상기 f는 상기 PMP 패턴들의 공간 주파수일 수 있다.

발명의 효과

[0060] 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 절대 위상 획득 방법에 의하면, 고주파
수 위상 측정 프로필로메트리(PMP) 패턴들에 그레이 코딩 패턴들을 내장시키는 하이브리드 코딩 방법을 사용하
여 3단계 위상 측정 프로필로메트리에서 신호대잡음비를 개선할 수 있으며 고속으로 고품질의 3차원 측정을 수
행할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0061] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법을 설명하기 위한 개략도.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법의 흐름도.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법의 흐름도.

도 4a 및 도 4b는 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법과 절대 위상 획득 방법이 적용될 수 있는 측정 시스템을 도시한 도면.

도 5의 (a)는 수학식 8로부터 추출된 래핑된 위상의 비주얼화를 도시한 도면.

도 5의 (b)는 수학식 9와 수학식 10으로부터 계산된 프린지 차수들의 비주얼화를 도시한 도면.

도 5의 (c)는 최종 절대 위상을 도시한 도면.

도 5의 (d), (e) 및 (f)는 각각 320번째 컬럼에서 도 3의 (a), (b) 및 (c)의 단면을 도시한 도면.

도 6의 (a) 및 (b)는 정면 및 측면에서 본 재구성된 3차원 포인트 클라우드들을 도시한 도면.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 절대 위상 획득 방법과 표준적인 3단계 PMP 방법에 의해 획득된 320번째 컬럼에서의 위상 에러의 단면을 도시한 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0062] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다.

[0063] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합되는 의미와 개념으로 해석되어야 한다.

[0064] 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다.

[0065] 또한, "제1", "제2", "일면", "타면" 등의 용어는, 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다.

[0066] 이하, 본 발명을 설명함에 있어, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0067] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0068] 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에서는, 신규한 하이브리드 코딩 패턴 생성 방법을 이용하여 3단계 PMP에서 SNR을 개선한다. 프린지 차수들(fringe orders)을 복구하기 위하여 3개의 그레이 코딩 패턴들을 직접 사용하는 것 대신에, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은 3개의 그레이 코딩 패턴들과 3개의 역 그레이 코딩 패턴들을 3단계 PMP 패턴들에 각각 내장시켜, 프린지 진폭을 스칼라로 변조함으로써 6개의 PMP 패턴들을 생성한다.

[0069] 또한 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에서는, 상기 6개의 PMP 패턴들이 물체에 투사된 영상을 캡처하여 상기 3개의 그레이 코딩 패턴들과 3개의 역 그레이 코딩 패턴들이 내장된 패턴들로부터, 래핑된(wrapped) 위상과 프린지 차수들 양자를 복호하고, 이에 기반하여 절대 위상을 획득한다. 상기 스칼라를 적절하게 선택함으로써, 본 발명의 실시예의 SNR은 통상적인 3단계 PMP의 SNR보다 더 높는데, 왜냐하면 최종 절대 위상이 통상적인 3단계 PMP에서는 6개의 패턴들 중 3개로부터 추출되는데 반하여 본 발명의 실시예에서는 모든 6개의 하이브리드 패턴들로부터 최종 절대 위상이 추출되기 때문이다. 이론적인 분석과 실험 결과들 양자는 본 발명을 검증한다.

[0070] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은, 3단계의 균일한 위상 시프트를 갖는 3단계 위상 측정 프로파일로메트리(PMP: Phase Measuring Profilometry) 패턴들(PMP1, PMP2, PMP3)을 생성하는 단계(S100), 상기 3단계 PMP 패턴들(PMP1, PMP2, PMP3)의 각 좌표에 대한 프린지 차수(fringe order)를 그레이 코딩 패턴(GP1, GP2, GP3)으로 변환하고, 상기 그레이 코딩 패턴들(GP1, GP2, GP3) 각각에 대한 역 그레이 코딩 패턴들(IGP1, IGP2, IGP3)을 생성하는 단계(S102), 및 상기 그레이 코딩 패턴들(GP1, GP2, GP3)과 상기 역 그레이 코딩 패턴들(IGP1, IGP2, IGP3)에 소정의 스칼라를 적용하고, 상기 3단계 PMP 패턴들(PMP1, PMP2, PMP3)을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들과 역 그레이 코딩 패턴들에 기반하여 변조함으로써 하이브리드 코딩 패턴들(HP1, HP2, HP3, HP4, HP5, HP6)을 생성하는 단계(S104)를 포함한다.

[0071] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에서는, 스칼라를 사용하여 프린지 진폭을 변조함으로써 3단계 PMP 패턴들(PMPP1, PMPP2, PMPP3) 내에 그레이 코딩 패턴들을 사용하여 부호화된 프린지 차수들을 내장시켜, 하이브리드 코딩 패턴들(HP1, HP2, HP3, HP4, HP5, HP6)을 생성한다.

[0072] 한편, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득방법에서는, 상기 하이브리드 코딩 패턴들(HP1, HP2, HP3, HP4, HP5, HP6)이 물체에 투사되고, 상기 하이브리드 코딩 패턴들(HP1, HP2, HP3, HP4, HP5, HP6)이 투사된 물체의 이미지가 카메라에 의해 캡처되는 경우, 상기 캡처된 이미지에 기반하여 래핑된 위상과 프린지 차수들을 복구한 후 복구한 위상과 프린지 차수들에 기반하여 절대 위상을 획득한다.

[0073] 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은, 마이크로프로세서에 의해 실행되는 소정의 프로그램 코드들을 포함하는 소프트웨어로 구현될 수 있고, 마이크로프로세서와 메모리를 포함하는 제어부에서 수행될 수 있다. 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법은, 소정의 프로그램 코드들을 실행할 수 있는 마이크로프로세서와 메모리를 포함하고 소정의 패턴 이미지를 투사할 수 있는 프로젝터 등을 포함하는 전자 장치에서 수행될 수 있다.

[0074] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법은, 마이크로프로세서에 의해 실행되는 소정의 프로그램 코드들을 포함하는 소프트웨어로 구현될 수 있고, 마이크로프로세서와 메모리를 포함하는 제어부에서 수행될 수 있다. 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법은, 소정의 프로그램 코드들을 실행할 수 있는 마이크로프로세서와 메모리를 포함하고 이미지를 캡처할 수 있는 카메라 등을 포함하는 전자 장치에서 수행될 수 있다.

[0075] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법은, 소정의 프로그램 코드들을 실행할 수 있는 마이크로프로세서와 메모리를 포함하고 소정의 패턴 이미지를 투사할 수 있는 프로젝션 기능 및 이미지를 캡처할 수 있는 이미지 캡처 기능을 포함하는 전자 장치에서 수행될 수도 있다.

[0077] 1. 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법

[0078] 도 2를 참조하여, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 대해 상세히 설명하기로 한다.

[0079] 도 2를 참조하면, 단계 S200에서, 3단계 PMP 패턴들(PMPP1, PMPP2, PMPP3)이 생성된다.

[0080] 전형적인 3단계 PMP 패턴들(PMPP1, PMPP2, PMPP3)은 $\{T_n^p : n = 0, 1, 2\}$ 로 표기될 수 있고, 수학적 1과 같이 표현된다.

수학식 1

$$T_n^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos\left(\frac{2\pi f y^p}{H^p} - \frac{2\pi n}{3}\right)$$

[0081]

[0082] 상기에서 (x^p, y^p) 는 프로젝터 공간에서의 좌표이고, $T_n^p(x^p, y^p)$ 에서의 강도(intensity)이며, A^p 와 B^p 는 각각 사인과 패턴의 직류(DC) 성분들과 진폭을 나타내고, f 는 패턴들의 공간 주파수를 나타내며, H^p 는 프로젝터 해상도의 높이를 나타내고, n 은 위상 시프팅(phase-shifting)의 인덱스이다. 프린지 차수들(fringe orders)의 내장과 복구를 용이하게 하기 위하여, 나중에 설명되는 바와 같이, $A^p > B^p$ 이고 $f \leq 8$ 이라고 가정한다.

[0083] 단계 S202에서, 프린지 차수를 그레이 코딩 패턴으로 변환한다.

[0084] 위상의 2π 불연속성 내에서 정렬된 프린지 차수는 수학식 2와 같이 정의된다.

수학식 2

$$k^p(x^p, y^p) = \left\lfloor \frac{y^p}{H^p} (f - 1) \right\rfloor$$

[0085]

[0086]

상기에서 $k^p(x^p, y^p)$ 는 (x^p, y^p) 에서의 프린지 차수이고, $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 수학에서 바닥 함수(floor function)이다.

[0087]

그리고 상기 프린지 차수의 그레이 코딩 표현은 다음과 같이 생성될 수 있다. 첫째, 상기 프린지 차수들의 그레이 스케일 패턴은 수학식 3을 만족하는, 3개의 바이너리 패턴들($\{b_n^p : n = 0, 1, 2\}$)로 분해된다.

수학식 3

$$k^p(x^p, y^p) = \sum_{n=0}^2 b_n^p(x^p, y^p) 2^n$$

[0088]

[0089]

그 다음, 각 바이너리 패턴(b_n^p)은, 그것의 유일한 그레이 코딩 패턴인 g_n^p 으로 변환된다.

[0090]

단계 S204에서, 마찬가지로, 다른 3개의 역 그레이 코딩 패턴들($\bar{g}_n^p$)이 $\bar{g}_n^p = 1 - g_n^p$ 에 의해 생성된다.

[0091]

3단계 고주파수 PMP 패턴들과 3개의 그레이 코딩 패턴들을 각각 투사하는 대신에, 본 발명의 일 실시예에서는 다음과 같이 고주파수 PMP 패턴들 내에 그레이-코딩된 프린지 차수들을 내장시킨다.

[0092]

다음, 단계 S206에서, 그레이 코딩 패턴(g_n^p)과 역 그레이 코딩 패턴($\bar{g}_n^p$)에 대해, 0의 값들을 사용자-정의된 스칼라 $s \in (0, 1)$ 로 대체시켜, 각각 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들(r_n^p)과 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들($\bar{r}_n^p$)을 생성한다.

[0093]

단계 S208에서, 3차원 스캐닝, 즉 3차원 형상 측정에 사용되는 패턴들을 최종적으로 생성하기 위하여 3단계 PMP 패턴들(T_n^p)을 상기 스칼라가 적용된 그레이 코딩 패턴들(r_n^p)과 스칼라가 적용된 역 그레이 코딩 패턴들($\bar{r}_n^p$)에 기반하여 수학식 4 및 수학식 5와 같이 변조함으로써, 하이브리드 코딩 패턴들($I_n^p(x^p, y^p)$, $\bar{I}_n^p(x^p, y^p)$)을 생성한다.

수학식 4

$$I_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p)r_n^p(x^p, y^p)$$

수학식 5

$$\bar{I}_n^p(x^p, y^p) = T_n^p(x^p, y^p)\bar{r}_n^p(x^p, y^p)$$

2. 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법

도 3을 참조하여, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 절대 위상 획득 방법에 대해 상세히 설명하기로 한다.

도 3을 참조하면, 단계 S300에서, 도 2에 도시된 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 의해 생성된 6개의 하이브리드 코딩 패턴들, 즉 $\{I_n^p\}$ 과 $\{\bar{I}_n^p\}$ 가 프로젝터(도 4a 및 도 4b 참조)에 의해 순차적으로 물체에 투사되고, 6개의 하이브리드 코딩 패턴들이 투사된 물체의 이미지가 카메라(도 4a 및 도 4b 참조)에 의해 캡처된다.

다음, 단계 S302에서, 캡처된 이미지들에 기반하여 래핑된(wrapped) 위상이 계산된다.

수학식 6과 같이, 각각 I_n^c 과 $\bar{I}_n^c$ 로서 표시되는, I_n^p 과 $\bar{I}_n^p$ 에 대응하는 캡처된 패턴 이미지들은 3단계 PMP 이미지들($\{\tilde{I}_n^c : n = 0, 1, 2\}$)을 생성하는데 사용된다.

수학식 6

$$\tilde{I}_n^c(x^c, y^c) = I_n^c(x^c, y^c) + \bar{I}_n^c(x^c, y^c)$$

상기에서 (x^c, y^c) 는 카메라 공간에서의 좌표이고, $\tilde{I}_n^c$ 는 (x^c, y^c) 에서의 강도(intensity)를 나타낸다. 단순화를 위하여, 상기 좌표 표시 (x^c, y^c) 는 하기의 수학식들에서 제거된다.

수학에서 이상적으로, $\tilde{I}_n^c$ 는 수학식 7과 같이 모델링된다.

수학식 7

$$\tilde{I}_n^c = \tilde{A}^c + \tilde{B}^c \cos \left[\phi - \frac{2\pi n}{3} \right]$$

상기에서 $\tilde{A}^c$ 와 $\tilde{B}^c$ 는 각각 (x^c, y^c) 에서의 캡처된 사인파 이미지들의 DC 성분 및 변조이고, ϕ 는 표준

PMP 알고리즘을 통해 수학식 8에 의해 계산될 수 있는 래핑된 위상(wrapped phase)이다.

[0107] 따라서, 단계 S302에서는 하기 수학식 8에 기반하여 래핑된(wrapped) 위상이 계산된다.

수학식 8

$$\phi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \sin(\frac{2\pi n}{3})}{\sum_{n=0}^2 \tilde{I}_n^c \cos(\frac{2\pi n}{3})} \right]$$

[0108]

[0109] 그 다음, 단계 S304에서, 프린지 차수들의 정보를 포함하는 3개의 그레이 코딩 이미지들(g_n^c)이 수학식 9와 같이 I_n^c 과 $\bar{I}_n^c$ 로부터 복구된다.

수학식 9

$$g_n^c = \begin{cases} 0 & \text{if } I_n^c \leq \bar{I}_n^c \\ 1 & \text{if } I_n^c > \bar{I}_n^c \end{cases}$$

[0110]

[0111] 그 다음, 단계 S306에서, 그레이 코딩 이미지들(g_n^c)의, 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트(b_n^c)를 디코딩한다.

[0112] 그 다음, 단계 S308에서, 다이렉트-바이너리 코딩 카운터파트(b_n^c)로부터, 프린지 차수들의 맵이 수학식 10에 의해 계산된다.

수학식 10

$$k^c = \sum_{n=0}^2 b_n^c 2^n$$

[0113]

[0114] 상기에서 k^c 는 (x^c, y^c) 에서의 프린지 차수의 값이다.

[0115] 그 다음 단계 S310에서, 래핑된(wrapped) 위상(ϕ)과 그것의 대응하는 프린지 차수들(k^c)에 기반하여, 수학식 11에 의해 절대 위상(Φ)이 획득된다.

수학식 11

$$\Phi = \frac{\phi + 2\pi k^c}{f}$$

[0116]

[0117] 최종적으로, 단계 S312에서, 3차원 좌표들, 즉 3차원 형상이 삼각측량법을 통해 x^c , y^c 및 상기 획득된 절대 위상(Φ)으로부터 재구성된다.

[0119] 3. SNR 분석

[0120] 동일한 공간 주파수의 조건하에서, 본 발명의 일 실시예에 의한 방법의 SNR과 표준적인 3단계 PMP 방법의 SNR이 비교된다. 3개의 패턴들은 위상 계산에 사용되고 다른 3개의 패턴들은 프린지 차수 복구에 사용된다. 그리고 SNR의 개선과 관련된 스칼라(s)의 경계가 유도된다.

[0121] 수학식 1에 기재된 표준적인 3단계 PMP 패턴들이 물체 스캐닝에 직접 사용되는 경우, 실제로, 대응하는 캡처된 이미지들은 수학식 12와 같이 모델링된다.

수학식 12

$$T_n^s = A + B \cos \left[\Phi - \frac{2\pi n}{3} \right] + \omega_n^s$$

[0122]

[0123] 상기에서 ω_n^s 은 $\omega_n^s \sim N(0, \sigma^2)$ 를 갖는 부가적인 가우스 잡음이고, T_n^s 은 ω_n^s 에 의해 오염된 강도(intensity)이다.

[0124] 상기 표준적인 3단계 PMP 접근법의 SNR은 수학식 13과 같이 정의된다.

수학식 13

$$S_1 = \left(\frac{3B^2}{2\sigma^2} \right)^{0.5}$$

[0125]

[0126] 반면에, 본 발명의 실시예에서, 부가적인 잡음을 가지고, 수학식 7은 수학식 14와 같이 기재된다.

수학식 14

$$\tilde{I}_n^c = \tilde{A}^c + \tilde{B}^c \cos \left(\Phi - \frac{2\pi n}{3} \right) + \omega_n^{s1}$$

[0127]

[0128] 상기에서 ω_n^{s1} 은 $\tilde{I}_n^c$ 와 연관된 부가적인 가우스 잡음이다.

[0129] 수학식 6에 따라, $\tilde{I}_n^c$ 의 각 이미지가 2개의 직접적으로 캡처된 이미지들을 가산함으로써 획득되기 때문에, 상기 가우스 잡음은 $\omega_n^{s1} \sim N(0, 2\sigma^2)$ 이고, 변조들, $\tilde{B}^c$ 와 B는 수학식 15에 의해 관련된다.

수학식 15

[0130]
$$\tilde{B}^c = (1 + s)B$$

[0131] 그러므로, 본 발명의 일 실시예에 의한 방법의 SNR은 수학식 16과 같다.

수학식 16

[0132]
$$S_2 = \left\{ \frac{3[(1 + s)B]^2}{4\sigma^2} \right\}^{0.5}$$

[0133] 본 발명의 일 실시예에 의한 방법의 SNR을 표준적인 3단계 PMP 알고리즘의 SNR보다 크게 하기 위하여, $S_2 > S_1$ 라고 가정한다.

[0134] 그 다음 s의 하단 경계는 $s > \sqrt{2} - 1$ 과 같이 유도된다. 그러므로, 이론적으로, 상당한 SNR 개선을 달성하기 위하여, 프린지 차수 정보를 전달하는 그레이 코딩 이미지들(g_n^c)이 수학식 9에 의해 정확하게 복구될 수 있는 한, 상기 스칼라(s)는 $(\sqrt{2} - 1, 1)$ 의 범위 내에 있어야 할 뿐만 아니라, 가능한 한 커야 한다.

[0136] 4. 실험 결과

[0137] 본 발명의 일 실시예에 의한 방법의 성능을 검증하기 위하여 실험들이 수행되었다. 도 4a 및 도 4b에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법과 절대 위상 획득 방법이 적용될 수 있는 구조화된 조명 시스템은 640×480의 해상도를 갖는 8비트-심도의 프로실리카 GC650 카메라(404)와 800×600의 해상도를 갖는 8비트-심도의 카시오 XJ-A155 프로젝터(402)를 포함한다.

[0138] 제어 장치(400)는 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법 및 절대 위상 획득 방법을 실행하는 장치로서, 마이크로프로세서(406)와 메모리(408)를 포함하고, 프로젝터(402)에 3차원 형상 측정을 위한 패턴을 생성하여 제공하고, 카메라(404)에 의해 캡처된 이미지들에 기반하여 절대 위상을 획득하며, 획득된 절대 위상에 기반하여 3차원 측정을 수행함으로써 피측정 물체의 3차원 형상을 재구성한다.

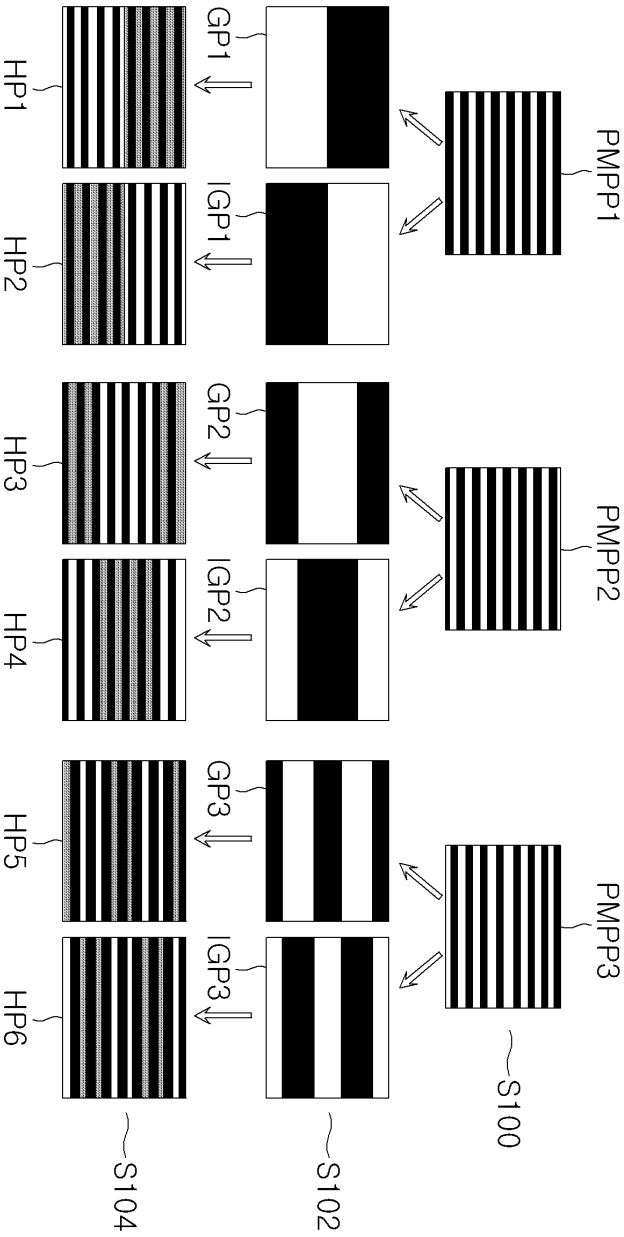
[0140] 4.1. 3차원(3-D) 형상 재구성

[0141] 도 4a에 도시된 석고상을 스캔하기 위하여 본 발명의 일 실시예에 의한 3차원 형상 측정을 위한 패턴 생성 방법에 의해 생성된 하이브리드 코딩 패턴들이 사용된다. 수학식 1에서의 패턴들의 파라미터들은 $A^p = 150$, $B^p = 100$, 그리고 $f=8$ 이다. 그리고 수학식 4와 수학식 5에서의 스칼라는 $s=0.9$ 이다. 노이즈의 존재하에 프린지 차수를 강건하게 복구하기 위하여, 수학식 9에 기재된 바와 같이, I_n^c 과 $\bar{I}_n^c$ 사이의 강도(intensity) 차이들은 충분히 커야 한다는 것을 주의하라.

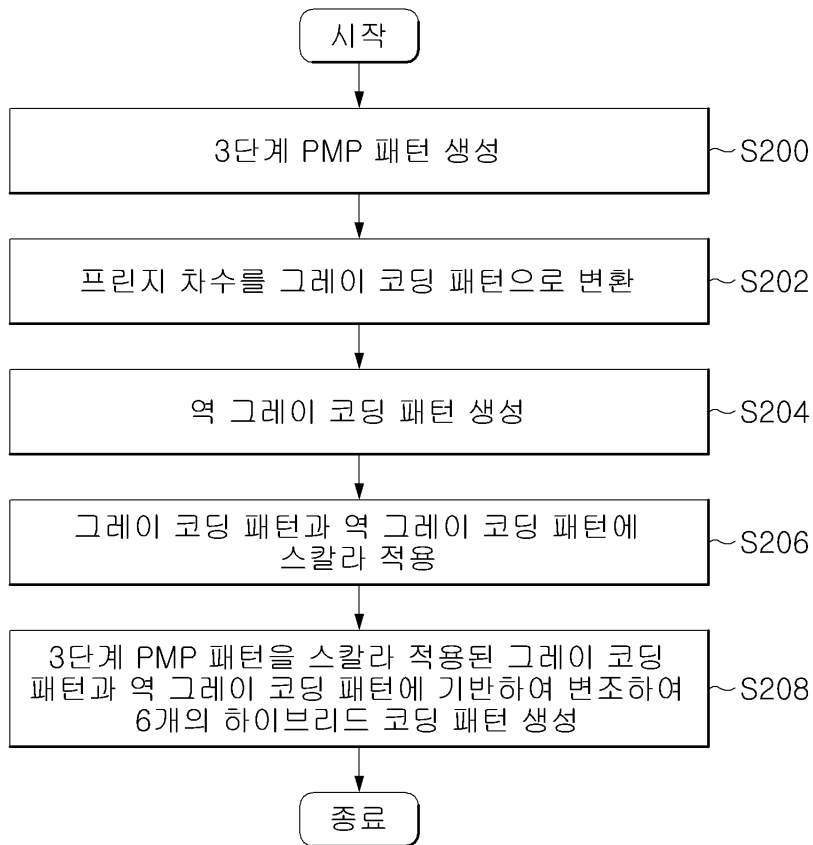
[0142] 따라서, 패턴 파라미터들 A^p , B^p 와 s가 $A^p > B^p$ 를 만족시켜야 할 뿐만 아니라, 적당한 마진이 보

도면

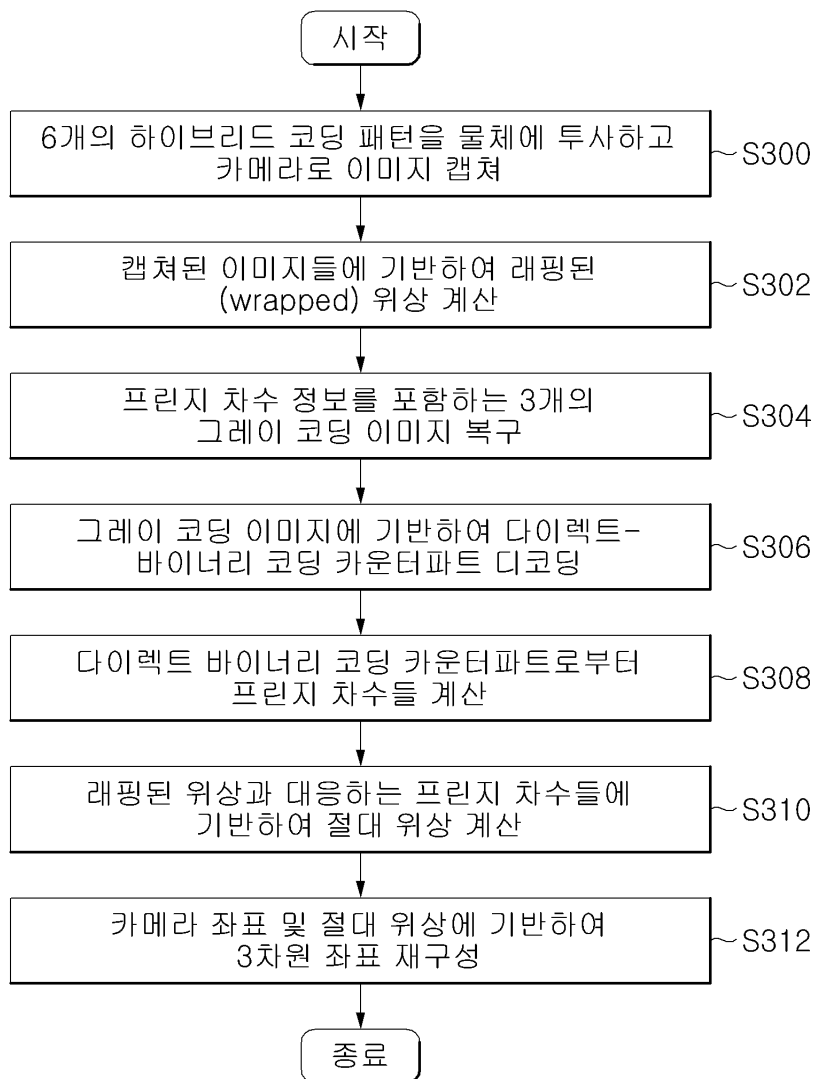
도면1



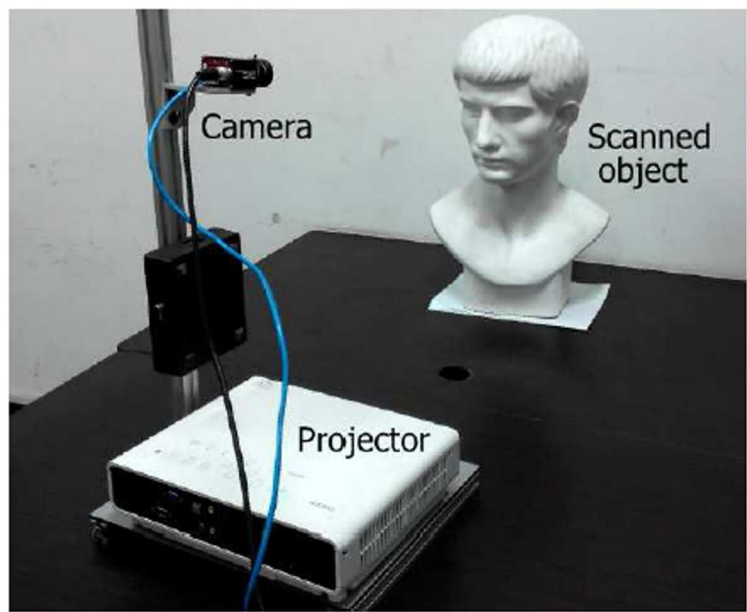
도면2



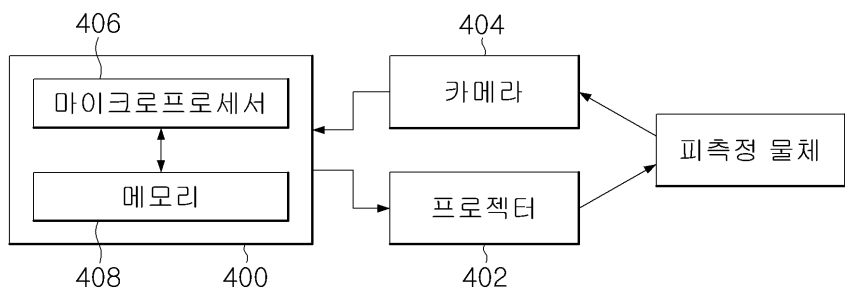
도면3



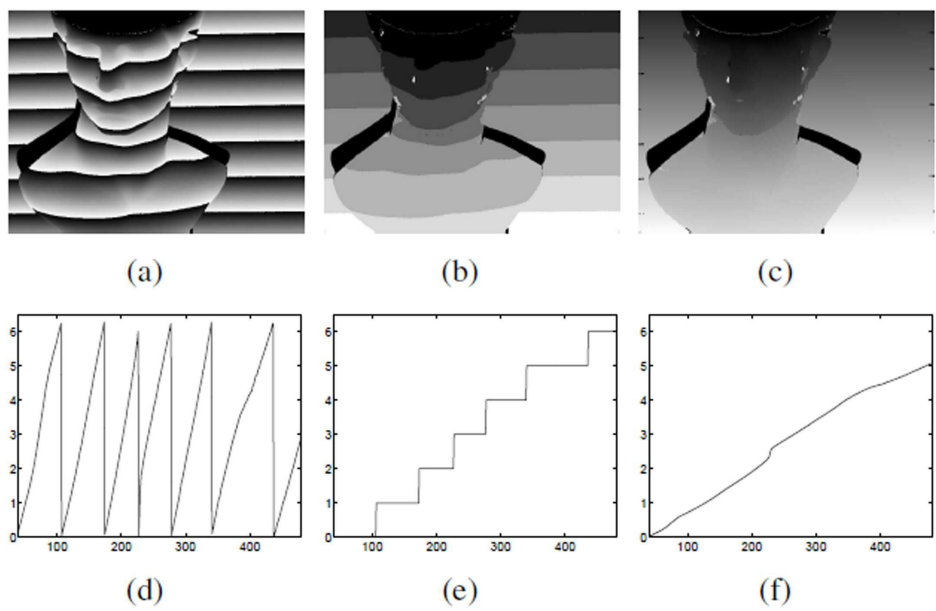
도면4a



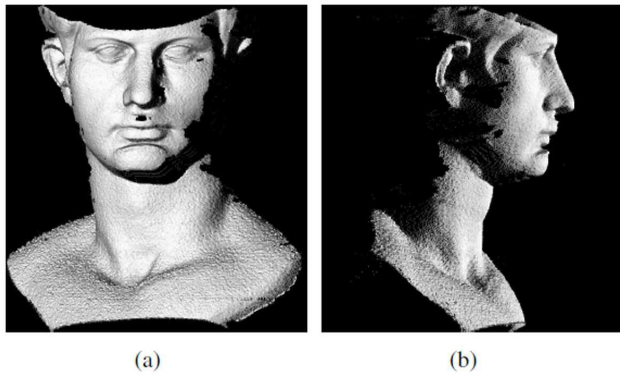
도면4b



도면5



도면6



도면7

