



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0080431
(43) 공개일자 2021년06월30일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 G01B 11/26 (2006.01) G01B 9/00 (2006.01)
 G01C 1/00 (2006.01) G01D 5/26 (2006.01)
 G01P 3/36 (2006.01) G02B 17/00 (2006.01)
 G02B 26/06 (2006.01) G02B 27/09 (2006.01)
 G02B 5/04 (2006.01) H01S 3/08 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
 G01B 11/26 (2013.01)
 G01B 9/00 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-7014453
- (22) 출원일자(국제) 2019년10월24일
 심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2021년05월13일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2019/057846
- (87) 국제공개번호 WO 2020/086837
 국제공개일자 2020년04월30일
- (30) 우선권주장
 16/171,883 2018년10월26일 미국(US)
 16/411,921 2019년05월14일 미국(US)
- (71) 출원인
 노스롭 그루먼 시스템즈 코퍼레이션
 미국 버지니아주 22042-4511 폴스 처치 페어뷰 파크 드라이브 2980
- (72) 발명자
 루말라, 아이사, 에스.
 미국, 뉴욕 10009, 뉴욕, 이스트 6번가 스트리트 430
- (74) 대리인
 특허법인씨엔에스

전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 각도를 결정하도록 구조화된 광 조명을 갖는 공초점 광학 프로젝터를 위한 방법

(57) 요약

요소의 피치(pitch) 각도, 요(yaw) 각도, 및 롤(roll) 각도를 동시에 측정하기 위한 방법. 상기 방법은 중심점(centroid) 및 반경방향 광 피크(radial light peaks)를 갖는 광학 와류 강도 패턴을 생성하도록 나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치 내에 레이저 빔을 지향시키는 단계를 구비한다.

(뒷면에 계속)

대표도 - 도24



상기 방법은 상기 레이저 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 카메라 상으로 지향되도록 상기 SPPR 장치를 통해 전파된 후에 상기 레이저 빔을 상기 요소로부터 반사시킨다. 상기 방법은 상기 이미지 내의 중심점의 위치를 결정하고, 상기 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하고, 통합된 카운트를 사용하여 이미지에서의 반경방향 광 피크의 위치를 결정한다. 상기 방법은 상기 반경방향 광 피크를 회전시키도록 상기 레이저 빔의 주파수를 변경하고, 상기 주파수 변경으로부터 상기 요소의 롤 각도를 추정한다.

(52) CPC특허분류

G01C 1/00 (2019.08)

G01D 5/266 (2013.01)

G01P 3/36 (2013.01)

G02B 17/004 (2013.01)

G02B 26/06 (2013.01)

G02B 27/0927 (2013.01)

G02B 5/04 (2013.01)

H01S 3/08045 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

요소의 피치(pitch) 각도, 요(yaw) 각도, 및 롤(roll) 각도를 측정하기 위한 방법에 있어서,

주파수 가변 레이저 빔을 제공하는 단계;

나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치를 통해 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계로서, 상기 SPPR 장치는 상기 장치에서 상기 레이저 빔을 전후로 반사하는 대향 반사 표면을 구비하고, 상기 반사 표면 중 하나는 상이한 위상을 갖는 복수의 반사된 진폭이 결합되게 하여 복수의 진폭의 위상에 의해 형성되는 광학 와류 강도 패턴(optical vortex intensity pattern)을 생성하게 하는 나선형 스텝 인덱스(spiral step index)를 구비하고, 상기 강도 패턴은 특히 중심점(singularity centroid) 및 반경방향 광 피크(radial light peaks)를 구비하고, 상기 SPPR 장치는 제1 빔을 반사 또는 전송하고 제2 빔을 전송하는, 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계;

상기 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제1 카메라 상으로 지향되도록 상기 제1 빔을 폐쇄 셔터로부터 반사시키는 단계;

상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제2 카메라 상으로 상기 제2 빔을 지향시키는 단계;

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 각도 위치에 의해 상기 레이저 빔의 초기 주파수를 결정하는 단계;

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지들 사이의 레지스트레이션(registration)을 동기화시키는 단계;

상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하고, 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하는 단계;

빔 롤 각도(beam roll angle)의 함수로서 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하는 단계;

상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계;

빔 롤 각도의 함수로서 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하는 단계;

상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계;

상기 셔터를 개방하여 상기 제1 빔이 개방된 셔터를 통해 상기 요소 상으로 전파되고, 상기 요소로부터 반사된 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴을 포함하는 이미지를 다시 생성하는 상기 제1 카메라 상으로 지향시키는 단계;

상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 다시 결정하는 단계;

빔 롤 각도의 함수로서 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 상기 통합된 카운트를 다시 결정하는 단계;

상기 레이저 빔의 주파수를 변경하여 상기 제1 카메라에 의해 생성된 상기 이미지 내의 상기 광학 와류 강도 패턴으로 상기 반경방향 광 피크를 회전시키는 단계; 및

상기 광학 와류 강도 패턴을 회전시키는 주파수의 변경으로부터 상기 요소의 롤 각도를 추정하는 단계

를 포함하는,

방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계는 비-선형 피팅 루틴을 사용하는 단계를 구비하는, 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 셔터가 개방될 때 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지 내의 하나의 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 피치 각도를 결정하는 단계, 및 상기 셔터가 개방될 때 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지 내의 상기 일 평면에 직교하는 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 요 각도를 결정하는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 SPPR 장치는 중간 대 높은 내부 반사율 장치이고, 상기 제1 빔은 상기 SPPR 장치를 통해 전송되고, 상기 반경방향 광 피크는 높은 콘트라스트 프린지(high contrast fringe)를 갖는,

방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 상기 광학 와류 강도 패턴의 중심점의 위치를 결정하는 단계는, 상기 제1 또는 제2 카메라에 의해 생성된 이미지를 반경방향 광 피크의 수를 나타내는 복수의 사분면으로 분할하는 단계, 각각의 사분면에서 반경방향 광 피크의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 각각의 반경방향 광 피크에 비-선형 피팅 루틴을 적용하는 단계, 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 반경방향 광 피크의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 및 개별 사분면에서 상기 반경방향 광 피크의 추정된 중심점 및 폭을 이용하여 상기 광학 와류 강도 패턴의 중심점을 계산하는 단계를 구비하는,

방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 SPPR 장치는 낮은 내부 반사율 장치이고, 상기 제1 빔은 상기 SPPR 장치로부터 반사되고, 상기 반경방향 광 피크는 낮은 콘트라스트 프린지(low contrast fringe)를 갖는,

방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 광학 와류 강도 패턴의 중심점의 위치를 결정하는 단계는, 상기 제2 빔의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 상기 제2 빔에 비-선형 피팅 루틴을 적용하는 단계, 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 제2 빔의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 상기 레이저 빔의 주파수를 변경하고 상기 제2 빔의 중심점 및 폭의 위치에 대한 추정을 반복하여 상기 제2 빔 내의 광학 와류 강도 패턴을 회전시키는 단계, 상기 제2 빔에 비-선형 피팅 루틴을 적용하는 단계, 및 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 제2 빔의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계를 구비하는,

방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하기 전에 빔 강도 검출기(beam intensity detector) 및 패턴 배향 검출기(pattern orientation detector)를 사용하여 상기 레이저 빔의 강도를 안정화시키는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 상기 이미지 내의 중심점이 위치된 후에 상기 이미지로부터 배경을 제거하는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 광학 와류 강도 패턴은 4개의 반경방향 광 피크를 구비하는,

방법.

청구항 11

요소의 피치(pitch) 각도, 요(yaw) 각도, 및 롤(roll) 각도를 측정하기 위한 방법에 있어서,

주파수 가변 레이저 빔을 제공하는 단계;

나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치를 통해 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계로서, 상기 SPPR 장치는 상기 장치에서 상기 레이저 빔을 전후로 반사하는 대향 반사 표면을 구비하고, 상기 반사 표면 중 하나는 상이한 위상을 갖는 복수의 반사된 진폭이 결합되게 하여 복수의 진폭의 위상에 의해 형성되는 광학 와류 강도 패턴(optical vortex intensity pattern)을 생성하게 하는 나선형 스텝 인덱스(spiral step index)를 구비하고, 상기 강도 패턴은 특이 중심점(singularity centroid) 및 반경방향 광 피크(radial light peaks)를 구비하는, 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계;

상기 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제1 카메라 상으로 지향되도록 상기 SPPR 장치를 통해 전파된 후에 상기 레이저 빔을 상기 요소로부터 반사시키는 단계;

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하는 단계;

빔 롤 각도의 함수로서 상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하는 단계;

상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계;

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 광학 와류 강도 패턴 내의 상기 반경방향 광 피크를 회전시키도록 상기 레이저 빔의 주파수를 변경하는 단계; 및

상기 광학 와류 강도 패턴을 회전시키는 주파수의 변경으로부터 상기 요소의 롤 각도를 추정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계는 비-선형 피팅 루틴을 사용하는 단계를 구비하는, 방법.

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 카메라에 의해 생성된 이미지 내의 하나의 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 피치 각도를 결정하는 단계, 및 상기 카메라에 의해 생성된 이미지 내의 상기 하나의 평면에 직교하는 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 요 각도를 결정하는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 14

제11항에 있어서,

상기 SPPR 장치는 중간 대 높은 내부 반사율 장치이고, 상기 레이저 빔은 상기 SPPR 장치를 통해 전송되고, 상기 반경방향 광 피크는 높은 콘트라스트 프린지(high contrast fringe)를 갖는,

방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 광학 와류 강도 패턴의 중심점의 위치를 결정하는 단계는, 상기 카메라에 의해 생성된 이미지를 반경방향 광 피크의 수를 나타내는 복수의 사분면으로 분할하는 단계, 각각의 사분면에서의 반경방향 광 피크의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 각각의 반경방향 광 피크에 비-선형 피팅 루틴을 적용하는 단계, 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 반경방향 광 피크의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 및 개별 사분면으로부터 상기 반경방향 광 피크의 추정된 중심점 및 폭을 이용하여 상기 광학 와류 강도 패턴의 중심점을 계산하는 단계를 구비하는,

방법.

청구항 16

제11항에 있어서,

상기 SPPR 장치는 낮은 내부 반사율 장치이고, 상기 레이저 빔은 상기 SPPR 장치로부터 반사되고, 상기 반경방향 광 피크는 낮은 콘트라스트 프링지(low contrast fringe)를 갖는,

방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 광학 와류 강도 패턴의 중심점의 위치를 결정하는 단계는, 상기 레이저 빔의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계, 비-선형 피팅 루틴을 상기 레이저 빔에 적용하는 단계, 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 레이저 빔의 중심점 및 폭을 추정하는 단계, 상기 레이저 빔의 주파수를 변경시키고 상기 레이저 빔의 중심점 및 폭의 위치에 대한 추정을 반복함으로써 상기 레이저 빔 내의 광학 와류 강도 패턴을 회전시키는 단계, 상기 레이저 빔에 비-선형 피팅 루틴을 적용하는 단계, 및 상기 비-선형 피팅 루틴을 이용하여 상기 레이저 빔의 중심점 및 폭의 위치를 추정하는 단계를 구비하는,

방법.

청구항 18

제11항에 있어서,

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하기 전에 빔 강도 검출기 및 패턴 배향 검출기를 사용하여 상기 레이저 빔의 강도를 안정화시키는 단계를 더 포함하는,

방법.

청구항 19

제11항에 있어서,

상기 광학 와류 강도 패턴은 4개의 반경방향 광 피크를 구비하는,

방법.

청구항 20

요소의 피치(pitch) 각도, 요(yaw) 각도, 및 롤(roll) 각도를 측정하기 위한 방법에 있어서,

주파수 가변 레이저 빔을 제공하는 단계;

빔 강도 검출기 및 패턴 배향 검출기를 사용하여 상기 레이저 빔의 강도를 안정화시키는 단계;

나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치를 통해 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계로서, 상기 SPPR 장치는 상기 장치에서 상기 레이저 빔을 전후로 반사하는 대향 반사 표면을 구비하고, 상기 반사 표면 중 하나는 상이한 위상을 갖는 복수의 반사된 진폭이 결합되게 하여 복수의 진폭의 위상에 의해 형성되는 광학 와류 강도 패턴(optical vortex intensity pattern)을 생성하게 하는 나선형 스텝 인덱스(spiral step index)를 구비하고, 상기 강도 패턴은 특히 중심점(singularity centroid) 및 반경방향 광 피크

(radial light peaks)를 구비하는, 상기 레이저 빔을 지향시키는 단계;

상기 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제1 카메라 상으로 지향되도록 상기 SPPR 장치를 통해 전파된 후에 상기 레이저 빔을 상기 요소로부터 반사시키는 단계;

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하는 단계;

빔 롤 각도의 함수로서 상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하는 단계;

상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정하는 단계;

상기 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 광학 와류 강도 패턴 내의 상기 반경방향 광 피크를 회전시키도록 상기 레이저 빔의 주파수를 변경하는 단계;

상기 광학 와류 강도 패턴을 회전시킨 주파수의 변경으로부터 상기 요소의 롤 각도를 추정하는 단계;

상기 카메라에 의해 생성된 상기 이미지 내의 하나의 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 피치 각도를 결정하는 단계; 및

상기 카메라에 의해 생성된 이미지 내의 상기 하나의 평면에 직교하는 평면에서 상기 와류 강도 패턴의 시프트에 의해 상기 요소의 요 각도를 결정하는 단계

를 포함하는,

방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 관련 출원에 대한 상호 참조

[0002] 본 출원은 2018년 10월 26일자로 공초점 광학 프로트랙터(confocal optical protractor)라는 명칭으로 출원된 미국특허출원 16/171,883호의 계속 출원이다.

[0003] 본 개시내용은 일반적으로 요소의 롤 각도(roll angle), 피치 각도(pitch angle) 및 요(yaw) 각도를 측정하는 방법, 보다 상세하게 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 동시에 측정하는 방법으로서, 상기 방법은 요소로부터 그리고 카메라 또는 검출기 상으로 반사되는 강도 피크를 갖는 광학 와류 패턴 빔을 발생시키는 나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치를 사용하는, 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0004] 각도, 특히 롤 각도, 요 각도 및 피치 각도의 비접촉 측정은, 정렬 및 추적, 3D 프린팅, 리소그래피, 샘플 부품 제조 등을 포함하는 광학 구성요소, 빌딩 항공우주 부품 및 시스템 레벨 계측 애플리케이션을 제조할 때 종종 중요하다. 각도를 측정하는데 사용된 당해 기술에 채용된 대부분의 접근법은 오토콜리메터(autocollimator), 간섭계(interferometer) 및 가동형 부품을 갖는 기계식 장치를 채용한다. 롤 각도는 가장 도전적인 측정 각도이고, 그에 따라 롤 각도를 정확하게 측정할 수 있는 제한된 수의 시스템이 존재한다.

[0005] 높은 정밀도로 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위해 오토콜리메터가 성공적이었지만, 이러한 각도가 측정될 수 있는 범위는 제한된다. 또한, 롤 각도를 측정하기 위해, 오토콜리메터의 복잡한 배열이 요구된다. 간섭계는 피치 각도 및 요 각도를 측정할 수 있지만, 추가적인 광학 요소, 예를 들어 편광 광학기 및 프리즘의 복잡한 배열 없이 롤 각도를 측정할 수 없다. 또한, 거친 환경에서의 동작은 많은 자유 공간 광학기에 대해 제한된다. 기계적 프로트랙터와 같은 기계적 장치는 시스템이 콤팩트될 것을 요구하며, 각도의 비접촉 측정을 위해 극히 제한된다. 또한, 가동 부품을 갖는 시스템은 긴 시간 주기에 걸쳐 작동 중에 훨씬 더 높은 고장 확률을 가질 것이다.

[0006] 롤 각도는 전형적으로 그 둘레를 따라 빌트인 앵클라 틱(built-in angular ticks)를 구비하는 회전가능한 마운

트 상에 부품을 위치시키고, 그 후 마운트를 회전시켜 부품의 롤 각도를 결정함으로써 측정된다. 이러한 기술은 통상적으로 작은 부품을 제조할 때 잘 작동하지만, 크거나 매우 무거운 항공 시스템 부품을 제조할 때는 문제가 될 수 있다. 또 다른 공지된 롤 각도 측정 기술은 2개의 기점 사이의 관심 각도를 결정하기 위해 부품 상에 기계적 프로트랙터를 배치하는 것을 포함한다. 이러한 기술에 대해, 기계적 프로트랙터는 롤 각도를 결정하기 위해 표면과 접촉하게 될 것이고, 이는 롤 각도의 비-접촉 측정을 요구하는 적용에는 해로운 것일 수 있다. 한정된 공간에서 점점 더 작은 각도를 측정하기 위해, 프로트랙터의 반경은 더욱 크게(더 많은 앵글러 틱) 제조되어야 하거나, 또는 측정하고자 하는 각도의 정밀도를 증폭하기 위해 기계적 프로트랙터에 기어가 요구될 것이다. 이는 고정밀 측정을 위해 기계적 프로트랙터의 크기를 용이하게 증가시킬 수 있고, 그에 따라 한정된 공간에서의 각도를 측정할 때 문제가 될 수 있다. 이러한 작업은 곡면 상의 각도를 측정할 때 훨씬 더 어려워진다. 또한, 클린룸 환경에서 3D 프린팅, 리소그래피 및 부품 제조의 일부 애플리케이션은 롤 각도의 비-접촉 결정을 필요로 하며, 여기서 기계적 프로트랙터는 측정되는 부분과 접촉할 것이다. 표면이 일정한 속도로 회전하면, 롤 각도 및 회전 속도는 기계적 프로트랙터로 추정될 수 없다

[0007] 광학 시스템은 표면이 곡선이고 그리고/또는 거칠 때에도, 표면 상의 2개의 정적 지점 또는 라인 사이의 각도의 비-접촉 측정을 이루는 능력을 제공할 수 있다. 특히, 빌트인 원통형 대칭을 갖는 광학 와류의 간섭성 중첩(coherent superposition)을 사용함으로써, 각도의 비-접촉 측정은 매우 높은 정확성 및 정밀도로 이루어질 수 있다. 광학 와류의 간섭성 중첩의 특성은, 각도가 측정되어 검출기로 감지될 수 있는 표면 상에 투사될 수 있는 롤 각도(방위각)의 함수로서 주기적인 강도 변조를 형성한다는 점이다.

[0008] 공간 광 변조기(spatial light modulator), 간섭계 내의 나선형 위상 플레이트, 간섭계 내의 나선형 위상 미러 등을 사용하는 방법을 포함하는 광학 와류의 간섭성 중첩을 생성하기 위해 다양한 방법들이 당해 기술에 존재한다. 그러나, 이러한 방법은 해상도를 제한하는 광학 시스템의 선택 부품의 기계적 회전을 야기하지 않고 광학 와류의 롤 각도를 제어하는 것을 허용하지 않거나, 또는 광학 시스템은 동력식 스테이지, 즉 공간 미러의 경우에 q-플레이트, 공간 위상 플레이트 등을 구비하는 광학 요소의 복잡한 배열을 구성한다. 공간 광 변조기(SLM)를 채용하는 이들 방법에 대해, SLM 및 그 해상도를 제어하는데 컴퓨터가 요구되며, 각도 변위의 발생은 픽셀화된 SLM 스크린 및 SLM의 위상 변화의 유한한 범위로 제한된다. 이러한 도전에 의해, 광학 시스템 설계를 더 복잡하게 하지 않고서 각도 측정의 정밀도를 최대화하면서, 시스템을 소형화하기 위한 명확한 방법이 없다.

[0009] 나선형 위상 플레이트, 즉 나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치에 기초한 공진기는, 장치로부터 광을 반사하거나 장치를 통해 광을 전달시킴으로써 광학 와류의 간섭성 중첩이 생성될 수 있는 소형화된 광학 요소이다. 낮은 반사율 SPPR 장치에 대한 공진기 효과를 나타내는 기본적인 과학 연구가 있다. 회전 도플러 시프트(rotational Doppler shift)에 기초한 회전 센서의 연구도 있다. 그러나, 제조 및 생산, 또는 항공우주 시스템에서의 기점(fiducial)에 대한 롤 각도를 결정하는 것과 같은 기술적 응용을 위한 전체 광학 프로트랙터 시스템에 대한 입증은 여전히 되어야 한다.

[0010] 정적 표면 및 회전 표면 상의 롤 각도를 측정하는 광학 프로트랙터라는 명칭으로 2018년 4월 2일자로 출원되고, 본 출원의 양수인에게 양도되고 참고로 본원에 편입된 미국특허출원 15/943,240호는 정적 표면 또는 회전 표면 상의 2개의 지점 사이의 롤 각도를 측정하기 위한 나선형 위상 플레이트 공진기(SPPR) 장치를 사용하는 광학 프로트랙터를 개시하고 있다. 프로트랙터는 레이저 빔을 발생시키는 가변 레이저 소스(tunable laser source), 및 상기 레이저 빔을 단일 모드 레이저 빔으로 변환하는 것에 응답하는 광학 구성요소를 구비한다. SPPR 장치는 단일 모드 레이저 빔을 수신하고, 장치에 빔을 전후로 반사하는 대향 반사 표면을 구비한다. 반사 표면 중 하나는 상이한 위상을 갖는 복수의 반사 빔이 광학 와류 강도 패턴을 갖는 장치로부터 출력 빔으로서 결합되게 하는 나선형 스텝 인덱스(spiral step index)를 구비하며, 여기서 강도 패턴은 반경방향 광 강도 라인을 구비한다. 프로트랙터는 요소 상에 출력 빔을 투사하는 렌즈, 상기 요소로부터 반사된 광을 검출하는 검출기, 및 상기 검출기로부터의 신호에 응답하는 프로세서를 구비한다. 프로세서는 요소 상에 투사된 광학 와류 강도 패턴을 구비하는 반사된 광의 이미지를 생성하고, 레이저 소스가 레이저 빔의 주파수를 변화시켜 강도 라인 중 하나가 지점 중 첫번째 것과 정렬되게 한다. 그 후, 프로세서는 레이저 소스가 레이저 빔의 주파수를 다시 변화시켜 하나의 강도 라인이 지점 중 두번째 것과 정렬되게 하고, 여기서 레이저 빔의 주파수들 사이의 차이는 지점들 사이의 각도를 결정하는데 사용된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 하기에서는 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 동시에 측정하기 위한 방법을 개시 및 기술한다. 상기 방법은 나선형 위상 플레이트 공진기(spiral phase plate resonator; SPPR) 장치를 통해 주파수 가변 레이저 빔을 지향시키며, 상기 SPPR 장치는 상기 장치에서 상기 레이저 빔을 전후로 반사하는 대향 반사 표면을 구비하고, 상기 반사 표면 중 하나는 상이한 위상을 갖는 복수의 반사된 진폭이 결합되게 하여 복수의 진폭의 위상에 의해 형성되는 광학 와류 강도 패턴(optical vortex intensity pattern)을 생성하게 하는 나선형 스텝 인덱스(spiral step index)를 구비하고, 상기 강도 패턴은 특히 중심점(singularity centroid) 및 반경방향 광 피크(radial light peaks)를 구비하고, 상기 SPPR 장치는 제1 빔을 반사 또는 전송하고 제2 빔을 전송한다. 상기 방법은 상기 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제1 카메라 상으로 지향되도록 상기 제1 빔을 폐쇄 셔터로부터 반사시키고, 상기 광학 와류 강도 패턴의 이미지를 생성하는 제2 카메라 상으로 상기 제2 빔을 지향시키고, 상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 각도 위치에 의해 상기 레이저 빔의 초기 주파수를 결정하고, 상기 제1 및 제2 카메라에 의해 생성된 이미지들 사이의 레지스트레이션(registration)을 동기화시킨다. 상기 방법은 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정하고, 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 결정한다. 또한, 상기 방법은 빔 롤 각도(beam roll angle)의 함수로서 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하고, 상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정한다. 또한, 상기 방법은 빔 롤 각도의 함수로서 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 통합된 카운트를 결정하고, 상기 통합된 카운트를 사용하여 상기 제2 카메라에 의해 생성된 이미지에서 상기 반경방향 광 피크의 위치를 결정한다. 그 다음, 상기 방법은 상기 셔터를 개방하여 상기 제1 빔이 개방된 셔터를 통해 상기 요소 상으로 전파되고, 상기 요소로부터 반사된 제1 빔이 상기 광학 와류 강도 패턴을 포함하는 이미지를 다시 생성하는 상기 제1 카메라 상으로 지향시킨다. 상기 방법은 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점의 위치를 다시 결정하고, 빔 롤 각도의 함수로서 상기 제1 카메라에 의해 생성된 이미지에서의 중심점으로부터 반경방향을 따라 상기 통합된 카운트를 다시 결정한다. 상기 방법은 상기 레이저 빔의 주파수를 변경하여 상기 제1 카메라에 의해 생성된 상기 이미지 내의 상기 광학 와류 강도 패턴으로 상기 반경방향 광 피크를 회전시키고, 상기 광학 와류 강도 패턴을 회전시키는 주파수의 변경으로부터 상기 요소의 롤 각도를 추정한다.

[0012] 본 개시내용의 추가적인 특징은 첨부된 도면들과 관련하여 취해진 하기의 설명 및 첨부된 청구범위로부터 명백해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1은 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위한 공초점 광학 프로트랙터의 개략적인 블록도로서, 측정 빔은 나선형 위상 플레이트 공진기(SPPR) 장치로부터 반사된 다음 요소로부터 반사되는 도면이다.

도 2는 도 1에 도시된 광학 프로트랙터로부터 분리된 SPPR 장치의 등각도이다.

도 3은 내부에 반사되어 있는 빔을 도시하는 SPPR 장치의 측면도이다.

도 4는 원 내에 배열된 8개의 단일 픽셀 검출기를 구비하는 단일 픽셀 검출기 어레이의 도면이다.

도 5는 도 1에 도시된 프로트랙터의 SPPR 장치로부터 반사된 빔의 광학 와류 강도 프로파일 이미지이다.

도 6은 도 1에 도시된 프로트랙터의 SPPR 장치를 통해 전송되는 기준 빔의 광학 와류 강도 프로파일 이미지이다.

도 7 및 8은 도 5에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 피치 각도를 측정하기 위해 중심점 위 및 아래에서 각각 반사된 도면이다.

도 9 및 10은 도 5에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 요 각도를 측정하기 위해 좌측 및 우측으로 각각 이동된 도면이다.

도 11 및 12는 도 5에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 롤 각도를 측정하기 위해 각각 시계방향 및 반시계방향으로 회전된 도면이다.

도 13은 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위한 공초점 광학 프로트랙터의 개략적인 블록도로서, 측정 빔이 SPPR 장치를 통해 전송되는 도면이다.

도 14는 도 13에 도시된 프로트랙터의 SPPR 장치를 통해 전송된 빔을 도시하는 광학 와류 강도 프로파일 이미지이다.

도 15 및 16은 도 14에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 피치 각도를 측정하기 위해 중심점 위 및 아래에서 각각 반사된 도면이다.

도 17 및 18은 도 14에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 요 각도를 측정하기 위해 좌측 및 우측으로 각각 이동된 도면이다.

도 19 및 도 20 은 도 14에 도시된 광학 와류 강도 프로파일 이미지로서, 빔이 롤 각도를 측정하기 위해 시계방향 및 반시계방향으로 각각 회전되는 도면이다.

도 21은 높은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 대한 빔 중심점을 찾는 프로세스를 도시하는 흐름도이다.

도 22는 낮은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 대한 빔 중심점을 찾는 프로세스를 도시하는 흐름도이다.

도 23은 피치 각도 및 요 각도를 결정하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도이다.

도 24는 롤 각도를 결정하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 동시에 측정하기 위한 방법으로서, 상기 방법은 SPPR 장치를 사용하는, 상기 방법에 관한 본 개시내용의 실시예에 대한 하기의 설명은 단지 예시적인 것일 뿐이며, 본 개시내용 또는 그 적용 또는 용도를 제한하도록 의도되지 않는다.
- [0015] 아래에서 상세히 설명되는 바와 같이, 본 개시내용은 요소의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위한 이동 부품 없이 "모든 광학" 프로세스를 제공하는 광학 시스템, 또는 광학 프로트랙터를 기술한다. 광학 시스템은 무인 항공기, 비행기, 항공기 캐리어, 탄도 미사일 등과 같은 다양한 구성요소 및 부품의 제조 및 생산을 위해 적용되며, 여기서 부품의 피치 각도, 요 각도 및 롤 각도의 비-접촉 측정이 중요하다. 또한, 광학 시스템은 패턴 인식 동안에 이러한 각도를 결정하기 위해 로봇 및 자율주행 차량과 같은 기계 비전 애플리케이션을 갖는다.
- [0016] 광학 시스템의 주요 요소는 소정 주파수의 광 빔이 장치 내에서 다중 반사된 라운드 트립을 받아 빔 각도의 합수로서 각도 강도 변조 간섭 패턴(angular intensity modulation interference pattern)을 갖는 출력 빔을 생성하는 나선형 위상 플레이트 공진기(SPPR) 장치이다. SPPR 장치로 들어가는 빔의 파장의 정밀한 변화는, 정적 표면 상에 투사되는 경우 피치 각도, 요 각도 및 롤 각도를 측정하기 위해 검출될 수 있는 SPPR 장치로부터 출력된 빔의 패턴 내의 각도 강도 피크를 회전시킨다. 출력 빔 내의 강도 변조 간섭 패턴은 SPPR 장치로부터 나오는 선택 광학 와류 권선 번호의 간섭성 중첩의 결과이다.
- [0017] 진동 및 온도 구배의 존재와 같은 가혹한 환경 하에서도 측정되는 각도의 높은 정확도를 보장하기 위해, 광학 시스템을 캘리브레이션하기 위한 방법이 필요하다. 이 방법은 광학 와류 강도 패턴의 회전 각도를 빔의 파장으로 캘리브레이션하는 단계, 및 기준 빔을 갖는 CCD 카메라와 같은 검출기 상의 광 강도 패턴의 각도 변위를 모니터링하는 단계를 포함한다. 레이저 소스로부터의 빔의 파장의 변화, 광학 시스템의 굴절을 변화, 또는 측정되는 표면의 진동과 같은 광학 시스템에서의 임의의 스푸리어스(spurious) 변화는 각도의 측정 동안에 보상될 수 있다. CCD 카메라로부터의 이미지는 광학 와류의 중심 및 각도의 결정에서 시스템적인 에러의 다른 형태를 발견할 때 감소된 에러를 갖는 이미지 처리 알고리즘을 사용하여 실시간으로 판독된다. SPPR 장치에 대한 입력 빔의 주파수는 위상 로킹 스킴(phase locking schemes), 진폭 로킹 스킴(amplitude locking schemes) 등과 같은 표준 기술을 사용하여 로킹 및 변화하며, 주파수의 증분은 측정, 캘리브레이션 및 실시간 모니터링을 위해 강도 패턴을 회전시킬 것이다.
- [0018] 도 1은 정적 또는 회전 표면 상의 기준 라인 사이의 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 동시에 측정하고, 회전 표면의 회전 속도를 결정하는 상술된 유형의 광학 시스템(10)의 개략적인 블록도이다. 시스템(10)은, 예를 들어 TEM₀₀ 가우시안 모드(Gaussian mode)에서 레이저 빔(18)을 제공하는 단일 모드 광섬유(14) 내로, 예를 들어 가시-IR 주파수 범위에서 간섭성 레이저 빔을 방출하는 좁은 선포 레이저 소스(12)를 구비한다. 대안적인 실시

예에서, 단일 모드 광섬유(14) 대신에 다른 광학 요소가 TEM₀₀ 가우시안 모드를 제공하기 위해 사용될 수 있다. 예를 들어, 적절하게 설계된 개구(도시되지 않음)는 빔(18)을 TEM₀₀ 가우시안 모드에 두거나 또는 광학 모드를 클린업하는데 사용될 수 있다. 섬유(14)로부터 방출된 빔(18)은 빔(18)이 최소의 발산을 갖는 전체 광학 시스템(10)을 통해 전파되는 것을 보장하기 위해 섬유(14)의 단부에 위치한 시준기(collimator)(16)에 의해 시준된다. 레이저 소스(12)로 다시 반사된 광은 레이저 공동 내의 빔 지터(beam jitter)가 출력 레이저 빔(18)의 강도 변동 또는 레이저 파장에서 스푸리어스(spurious) 주파수 시프트를 야기하게 할 수 있고, 이는 레이저 공동 내의 모드의 불안정성을 야기하고, 레이저 소스(12)가 로크를 벗어나게 한다. 따라서, 광 아이솔레이터(20)는 레이저 빔(18)의 레이저 소스(12)로의 후방 반사를 방지하기 위해 시준기(16)의 출력 이후에 위치된다.

[0019] 광 아이솔레이터(20)를 통해 전파되는 단일 모드 빔(18)은 빔 스플리터(22)에 의해 분할되며, 여기서 빔(18)의 작은 부분은 빔 강도를 모니터링하는 고속 검출기(24)로 전송되고, 빔(18)의 나머지 부분은 SPPR 장치(26)로 보내지고, 여기서 그 유한 반사율의 결과로서 장치(26)에서 다시 반사된다. 도 2는 등각도이고, 도 3은 시스템(10)으로부터 분리된 장치(26)의 측면도이다. 장치(26)는, 시준기(16)로부터의 빔(18)이 블록(28)으로 전파하도록 충분히 광학적으로 투과성인 블록(28)의 입력측 상에 매끄러운 반사 물질 코팅과 같은 반사 플레이트(30)를 갖는 유리와 같은 광학적으로 투명한 블록(28)을 구비한다. 또한, 장치(26)는 출력 빔이 전파되어 장치(26)로부터 출력될 수 있도록 충분히 광학적으로 투과성인 블록(28)의 출력측 상의 높이(Δh)를 갖는 방위각으로 변화하는 스텝(34)을 갖는 반사 물질 코팅을 갖는 중합체 또는 유리 층과 같은 단계식(step-wise) 나선형 반사기(32)를 구비한다. 매끄러운 반사 재료 코팅이 블록(28) 상에 반사 표면을 제공하기 위해 이러한 설계에서 채용되지만, 대안적인 설계에서 나노스케일 구조가 블록(28)에서 빔(18)의 반사율을 제공하는데 사용될 수 있다.

[0020] 표면 반사율이 없는 블록(28)을 통해 전파되는 빔(18)이 있다면, 잘 정의된 권선 수를 갖는 광학 와류 빔은 장치(26)의 출력 평면 상에서 생성될 것이고, 여기서 장치(26)는 나선형 위상 플레이트로서 작용한다. 장치(26)의 대향 표면 상에 유한 반사율을 제공하고 점진적으로 변화하는 방위각 두께를 갖는 반사기(32)를 제공함으로써, 장치(26)는 나선형 위상 플레이트 공진기(SPPR)로서 동작하며, 여기서 광학 와류 빔은 특정한 포지티브 권선 수에 의해 분리된 광학 와류의 간섭성 중첩으로서 장치(26)로부터 출력된다. 다시 말해, 장치(26) 내의 빔(18)의 각각의 반사는 상이한 권선 수, 즉 오비탈 각운동량을 각각 갖는 진폭(U_1-U_N)으로서 도시된 장치(26)로부터 출력되는 고유 위상을 갖는 개별적인 광학 와류 빔을 생성하며, 여기서 빔은 상이한 궤도 각운동량 상태를 갖는 상이한 권선 수와 모든 광학 와류 진폭(U_1-U_N)의 중첩이고, 본원에서 광학 와류 강도 패턴으로 지칭된다. 따라서, 광학 와류 강도 패턴은 와류 빔의 각도의 함수로서 변하는 빔(U_1-U_N)의 위상에 기초하여 주기적인 강도 간섭 패턴이고, 여기서 강도 패턴의 회전은 빔(18)의 주파수에 의해 제어된다.

[0021] 빔(18)의 광학 와류 강도 패턴은 반사된 측정 빔(40)으로서 SPPR 장치(26)의 입력측으로부터 빔 스플리터(22)를 향해 출력되며, 캘리브레이션 목적으로 사용되는 전송된 기준 빔(42)으로서 SPPR 장치(26)의 출력측으로부터 출력된다. 이러한 비-제한적인 실시예에서, SPPR 장치(26)는 대략 0.04의 내부 반사율을 갖는 상용-오프-더-셸브(commercial-off-the-shelf; COTS) 장치이다. 이러한 반사율은 측정 빔(40) 내의 와류 강도 피크가 높은 콘트라스트로 되고, 전송된 기준 빔(42) 내의 와류 강도 피크가 낮은 콘트라스트로 되도록 한다. 각도 측정에 대해 반사된 빔(40)을 사용함으로써, 보다 뚜렷한 피크는 배경 광이 보다 용이하게 제거될 수 있게 한다.

[0022] 기준 빔(42)은 SPPR 장치(26)로부터의 2개의 초점 거리에 위치한 렌즈(50)에 의해 감쇠기(56)를 통해 CCD 카메라(54)로 이미징되어, 물 각도 계산을 위한 빔 배향의 기준을 제공한다. 측정 빔(40)은 측정 빔(40)의 작은 부분을 광학 와류 측정 빔(40)의 배향 및 SPPR 장치(26)로부터 반사된 빔(40)의 강도를 유지하는 검출기(62)로 지향시키는 제2 빔 스플리터(60)를 향해 빔 스플리터(22)에 의해 반사된다. 검출기(62)는 CCD 카메라와 같은 다중 픽셀 검출기로서 도시되어 있지만, 여기서 논의되는 목적에 적합한 임의의 검출기일 수 있다. 예를 들어, 검출기(62)는 도 4에 도시된 바와 같이 원형 링에 배열된 8개의 단일 픽셀 검출기(78)를 구비하는 단일 픽셀 검출기 어레이(76)일 수 있다. 원형 링은 빔(40)의 회전 변위를 고정밀도로 측정할 수 있다.

[0023] 측정 빔(40)의 주요 부분은 렌즈(64) 또는 일련의 렌즈에 의해 셔터(68)를 통해 플랫폼(66) 상으로 이미징되는데, 여기서 렌즈(64)는 빔(40)을 콜리메이팅하여 공초점 이미징 지오메트리(confocal imaging geometry)에서 플랫폼(66)을 이미징한다. 플랫폼(66)으로부터의 반사된 빔은 빔 스플리터(60)에 의해 각도 측정을 제공하는 CCD 카메라(70)로 지향되는데, 여기서 렌즈(64)는 카메라 상의 반사된 빔을 이미징한다. 카메라(70)의 전방에 위치한 협대역 필터(72)는 다른 파장에서 배경 광의 소스를 감소시킨다. 또한, 렌즈(64)는 카메라(70)의 시야(field-of-view; FOV)를 감소시킬 것이고, 카메라(70)에 들어가는 후방산란된 광의 양을 감소시킬 것이다. 셔

터(68)가 폐쇄될 때, 빔(40)은 빔 스플리터(60)를 통해 카메라(70) 상에 반사된다. 셔터(68)가 개방될 때, 빔(40)은 셔터(68)를 통과하고 플랫폼(66)으로부터 카메라(70) 상으로 역-반사된다. 또한, CCD 카메라(70)는 빔(40)의 초기 위치를 캘리브레이션하는 역할을 한다.

[0024] x-y-z 좌표계는 플랫폼(66)에 대해 도시되어 있으며, 여기서 x-축에 대한 회전은 요 각도를 나타내고, y-축에 대한 회전은 피치 각도를 나타내고, z-축에 대한 회전은 롤 각도를 나타낸다. 카메라(70) 상에 이미징되는 높은 콘트라스트 프린지를 갖는 측정 빔(40)의 광학 와류 강도 프로파일은 도 5에 도시되어 있으며, 여기서 장치(26)는 낮은 내부 반사율 SPPR 장치, 예컨대 $|r_2|^2=0.04$ 이며, 여기서 r_2 는 SPPR 장치(26)의 표면에서의 반사에 대한 프레넬 계수이다. 카메라(54) 상에 이미징되는 낮은 콘트라스트 프린지를 갖는 기준 빔(42)의 광학 와류 강도 프로파일도 도 6에 도시되어 있다. 이들 도면에서, 음영 영역은 와류 강도 피크를 나타낸다. 시스템(10)은 이러한 실시예에서 더 높은 내부 반사율 장치가 구현될 때 잘 작동하며, SPPR 장치(26)는 순방향 또는 역방향으로 향할 수 있다.

[0025] 시스템(10)은 각도의 정확한 결정을 위해 카메라(54)를 사용하여 상술한 것과 동일한 방식으로 캘리브레이션된다. 이러한 측정으로부터, 광학 시스템(10)의 캘리브레이션 기능을 효과적으로 정의하는 전달 함수가 획득된다. 전달 함수는 광학 시스템(10) 내의 요소의 열적 효과의 존재 하에서도, 레이저 주파수의 변화를 각도 변화로 변환한다. 이상적으로, 낮은 열팽창 계수를 갖는 물질은 고정밀 측정을 위해 광학 시스템(10)에서 사용될 것이다. 그럼에도 불구하고, 측정 전 또는 측정 동안 캘리브레이션 프로세스로부터 카메라 업데이트는 열적 효과 및 진동의 존재 하에서도 정적 표면 상의 각도 결정을 가능하게 한다. 빔(42)의 포커스 후에 수행된 측정을 위해, 가우스 위상(Gouy phase)은 기준 빔(42)의 회전에서 추가적인 시프트를 야기할 것이다. 이러한 효과는 광학 시스템(10)의 캘리브레이션 동안 쉽게 고려된다.

[0026] 시스템(10)은 광학 와류 빔이 플랫폼(66)을 조명하는 목적을 위해 긴 거리에 걸쳐 시준된 상태로 유지될 수 있게 한다. 롤 각도를 결정하기 위해, 빔(18)의 주파수는 각도 강도 프로파일을 회전시키도록 시프트된다. 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위해, 빔(40)의 중심점은 한 지점으로부터 다른 지점으로 이동된다. LiDAR, RADAR 등과 같은 거리 측정 장치는 요 각도 및 피치 각도를 측정할 때 거리를 추정하기 위해 사용될 수 있다.

[0027] 프로세서(74)는 시스템(10)을 제어하고, 카메라(54, 70) 및 검출기(62)로부터 신호를 수신하고, 레이저 소스(12)를 튜닝하여, 본원의 설명과 일치하는 롤 각도, 요 각도 및 피치 각도의 측정을 결정한다. 아래에서 더 상세히 설명되는 바와 같이, 빔(40)은 플랫폼(66)과 카메라(70) 사이의 거리를 결정하고 초기 빔 프로파일을 식별하기 위해 기준 위치에 있을 때 플랫폼(66)으로부터 반사된다. 설명된 배향에서 y-축을 따른 초기 빔 프로파일의 중심점 위 또는 아래의 빔 프로파일에서의 시프트는 도 7 및 8의 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같은 피치 각도의 측정이다. 또한, 설명된 배향에서 x-축을 따른 초기 빔 프로파일의 중심 지점의 좌측 또는 우측으로의 빔 프로파일에서의 시프트는 도 9 및 10의 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같은 요 각도의 측정이다. 플랫폼(66)까지의 거리 및 카메라(70) 상의 빔(40)의 시프트는 피치 각도 및 요 각도를 측정하는데 사용된다. 빔(40)은 플랫폼(66) 상의 기준점(도시되지 않음)에 대해 시계방향 또는 반시계방향으로 회전되어 도 11 및 12의 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같이 롤 각도를 측정한다.

[0028] 시스템(10)에서, 피치 각도, 요 각도 및 롤 각도를 측정하는데 사용되는 측정 빔(40)은, 기술된 바와 같이, 장치(26)가 낮은 내부 반사율을 갖기 때문에 높은 콘트라스트 프린지를 형성하도록 SPPR 장치(26)로부터 반사된다. 대안적인 실시예에서, SPPR 장치(26)는 $|r_2|^2=0.57$ 과 같은 중간-범위 내부 반사율 장치로 대체될 수 있으며, 여기서 장치(26)를 통해 전송된 빔은 측정 빔이다. 도 13은 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 동시에 측정하기 위한 이러한 유형의 광학 시스템(80)의 개략적인 블록도이며, 여기서 시스템(10)에서의 유사한 요소는 동일한 참조번호에 의해 식별된다. 이러한 실시예에서, SPPR 장치(26)는 높은 내부 반사율을 갖는 커스텀 장치인 SPPR 장치(82)로 대체되고, 검출기(24) 및 빔 스플리터(22)는 제거되고, 빔 스플리터(84)는 SPPR 장치(82)의 하류에 제공되며, 여기서 장치(82)로부터의 와류 빔은 기준 빔(42)과 측정 빔(40)으로 분할된다.

[0029] SPPR 장치(82)를 통한 전송된 빔 광 강도 프로파일은 도 14에 도시되어 있다. 시스템(10)에 대해 상술된 바와 동일한 방식으로, 빔(40)은 플랫폼(66)과 카메라(70) 사이의 거리를 결정하고 초기 빔 프로파일을 식별하기 위해 기준 위치에 있을 때 플랫폼(66)으로부터 반사된다. 설명된 배향에서 y-축을 따른 초기 빔 프로파일의 중심점 위 또는 아래의 빔 프로파일에서의 시프트는 도 15 및 16에서 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같은 피치 각도의 측정이다. 또한, 초기 빔 프로파일의 중심점 위 또는 아래의 빔 프로파일에서의 시

프트는 도 17 및 18의 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같은 요 각도의 측정이다. 다시, 이는 플랫폼(66)까지의 거리 및 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위한 카메라(70) 상의 빔(40)의 시프트이다. 빔(40)은 플랫폼(66) 상의 기준점(도시되지 않음)에 대해 시계방향 또는 반시계방향으로 회전하여 도 19 및 20의 광학 와류 강도 프로파일 이미지에 의해 도시된 바와 같이 롤 각도를 측정한다.

[0030] 그 표면에서 낮은 반사율을 갖는 COTS SPPR 장치 또는 그 표면에서 높은 반사율을 갖는 맞춤형 제작된 SPPR 장치는, 설명된 바와 같이, 시스템(10, 80)에 대한 공초점 광학 프로트랙터(COP)에서 사용될 수 있다. COTS SPPR 장치에 대해, 장치의 표면에서의 반사율은 비교적 낮으며, 즉 $|r_2|^2 \sim |0.219|^2 = 0.047$ 이다. 따라서, 카메라(70)의 내부 표면, 및 관심 플랫폼(66) 상에 회전 위치 측정을 할 수 있는 최대 광자의 수에 비해 회전 측정을 하는 대략 2/3보다 적은 광자 수가 있을 것이다. 플랫폼(66)의 알베도(albedo)에 따라, 카메라(70) 상에 이미징되는 훨씬 더 적은 광 입자들이 존재할 수 있다. 광학 프로트랙터의 이러한 공초점 기하학적 구조의 주요 장점 중 하나는 SPPR 장치의 반사율에 관계없이 높은 콘트라스트 프린지(유니티)의 존재이다. 이는 특히 COTS SPPR 장치에 대해 보다 양호한 신호 대 잡음비를 허용한다. SPPR 장치의 반사율이 $|r_2|^2 = |0.577|^2 = 0.33$ 의 값으로 증가하면, 광 입자의 최대 수는 카메라(70) 상의 증가된 신호 대 잡음비를 위해 SPPR 장치의 전송 지오메트리에서 회전 위치 측정을 수행할 것이다.

[0031] SPPR 장치(26)를 통한 전송 진폭, 및 SPPR 장치(26)로부터의 반사 진폭을 설명하는 수학적은 매트릭스 형식화를 이용하여 유도될 수 있다. 명확성과 간결성을 위해, SPPR 장치(26 또는 82)를 통한 전송은 다음과 같이 표현된다:

[0032]
$$T[\phi] = B + A * T_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta], \quad (1)$$

[0033] 여기서, A, B 및 ϕ_0 은 진폭을 추정하고, 배경을 추정하고, 핏(fit routines)을 갖는 각 강도 패턴 신호의 회전을 추적하는데 이용되고, $T_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta]$ 는 프레넬 반사 계수(r_2), 및 방위각으로 변화하는 강도 피크(β)의 수를 갖는 SPPR의 각도 위치(ϕ_0)를 구성하는 정규화된 전송 함수이다. 파라미터(r_2 및 β)는 시스템(10)이 구성되고 시스템 동작 동안 변하지 않는 경우의 공지된 파라미터이다. SPPR 장치(26 또는 82)의 반사율은 $|r_2|^2$ 로 정의된다.

[0034] 마찬가지로, SPPR 장치(26)으로부터의 반사는 다음과 같이 표현된다:

[0035]
$$R[\phi] = B + A * R_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta], \quad (2)$$

[0036] 여기서, $R_1[\phi, \phi_0, r_2, \beta]$ 는 정규화된 반사 함수이다.

[0037] 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도는 외부 표면으로부터 카메라(70) 상으로 역-반사된 광학 와류 빔의 특정한 특성의 트랙을 유지함으로써 측정된다. 이러한 특성은 개별 강도 피크의 중심, 전체 광학 와류 빔의 중심점 및 광학 와류 강도 프로파일의 회전 변위를 포함한다. 각도가 측정될 플랫폼(66)의 표면 상에 투사된 4개의 강도 피크가 존재하는 일례가 제공된다. 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도를 측정하기 위한 알고리즘은 개별 강도 피크의 위치 및 광학 와류의 중심이 높은 정확도 및 정밀도로 알려질 수 있게 할 것이다. 4개의 개별적인 강도 피크에 기인하여, 하나의 좁은 강도 피크가 각도를 결정하기 위해 사용된다면, 측정 정밀도는 롤 각도, 피치 각도 및 롤 각도의 측정에서 4배만큼 개선된다. 이러한 설계는 4개의 강도 피크를 사용하지만, SPPR 장치(26)로부터 나오는 더 많은 강도 피크 또는 더 적은 강도 피크가 존재할 수 있다.

[0038] 롤 각도는 광학 와류의 회전, 즉 카메라(70) 상의 광학 와류 빔의 회전 변위(각도 변위)를 유지함으로써 결정된다. 롤 각도의 결정에서의 해상도는 롤 각도가 측정되는 큰 범위를 유지하는 동안 상당히 높다. 이러한 각도는 360° 측정 범위에 걸쳐 연장될 수 있다. 피치 각도는 카메라(70) 상의 외부 플랫폼으로부터 광학 와류 빔 중심의 수직 변위의 트랙을 유지함으로써 결정된다. 유사하게, 요 각도는 외부 플랫폼으로부터 역-반사된 광학 와류 빔의 수평 변위의 트랙을 유지함으로써 결정된다. 요 각도 및 피치 각도는 타겟까지의 거리 및 카메라(70) 상의 빔의 변위로부터 계산된다. 광학 와류 빔이 플랫폼(66)으로부터 역-반사되기 전에, 광학 와류 빔(40)의 초기 위치를 결정하기 위해 서터(68)가 폐쇄될 때 서터(68)로부터 내부적으로 역-반사된다. 이는 빔 중심의 초기 위치, 및 각도 세기 피크들의 초기 위치를 포함한다. 이러한 프로세스는 카메라(54, 70) 및 검출기(62) 상에서 광학 와류 빔(40)의 내부 회전을 모니터링할 뿐만 아니라, 카메라(54)를 사용하여 레이저 강도 및

검출기(24)를 사용하여 레이저 강도를 포함하는 다른 시스템 캘리브레이션 프로세스와 차례로 발생한다. 다른 실시예에서, 초기 위치는 초기 각도 캘리브레이션을 위한 공지된 각도의 외부 평면 상에서 결정될 수 있다. 또한, 레이저 파장을 광학 와류 빔의 회전으로 변환하는 저장된 전달 함수가 존재한다.

[0039] 요 각도 및 피치 각도를 추정하기 위해 롤 각도 및 변위를 측정하기 위한 각도 변위는 비-선형 피팅 루틴으로부터 추정된다. 요 각도 및 피치 각도는 각각 카메라(70)의 x-축 및 y-축 상의 4개의 강도 피크의 중심점에서의 수직 및 수평 변위뿐만 아니라, 타겟에 대한 거리로부터 결정된다. 롤 각도는 강도 피크의 회전 변위에 의해 결정된다. 단일 콘트라스트(unity contrast)를 갖는 카메라(70) 상에 투사된 4개의 개별적인 강도 피크가 존재하기 때문에, 이들 강도 피크는 개별적으로 피팅된다. 강도 피크의 위치로부터, 전체 빔의 중심점이 획득된다. 중심점은 우선 적절한 공식을 사용하여 데이터로부터 계산되고, 그 다음 이들 값은 관심 위치를 추적하기 위해 비-선형 피팅 루틴에서 초기 값으로서 사용된다. 빔 중심점의 정확한 결정은 역-반사된 빔의 각도 변위를 결정하는 제1 단계이다. 이미지에서 스펙클(speckle)이 존재하는 경우, 복수의 이미지가 함께 평균화될 수 있어 스펙클의 영향을 감소시킨다.

[0040] 롤 각도, 피치 각도 및 요 각도의 결정은 빔(40)의 절대 중심에 대한 지식을 필요로 한다. 특이점, 즉 SPPR 장치(26)에 의해 생성된 매우 작은 광학 와류 코어(또는 코어)를 갖는 광학 와류 빔에 대해, 빔(40)의 중심은 모든 강도 피크가 함께 나오는 지점으로 정의되며, 이는 빔의 중심점과 동일하다. 빔(40)의 중심을 계산하기 위한 알고리즘이 아래에서 논의된다. 알고리즘은 짝수의 광학 와류 강도 피크에 대해 잘 작동하고, 즉 β 가 짝수이고, 그에 따라 이러한 목적을 위해, $\beta=4$ 인 것을 가정한다. 그럼에도 불구하고, 알고리즘은 홀수의 강도 피크에 대해 잘 작동하도록 구성될 수 있다. 알고리즘이 2가지의 경우, 즉, 카메라(70) 상에 이미징되는 빔(40)의 높은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일을 위한 제1 경우, 및 카메라(70) 상에 이미징되는 빔(40)의 낮은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일을 위한 제2 경우를 위해 논의된다. 특히, SPPR 장치(26 또는 82)의 선택에 따라서, 카메라(70)는 높거나 낮은 콘트라스트 프린지를 수신할 수 있다. SPPR 장치가 낮은 반사율을 가지는 경우, 카메라(70)는 낮은 콘트라스트 프린지를 갖는 이미지를 생성하지만, 중간 대 고 반사율 SPPR 장치, 즉 커스텀 SPPR 장치에서는, 카메라(70)는 높은 콘트라스트 프린지를 갖는 이미지를 생성한다. 카메라(70)는 시스템(10, 80)에 대해 비교적 높은 콘트라스트 프린지를 항상 가질 것이다.

[0041] 도 21은 카메라(70) 상에 이미징되는 빔(40)의 높은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일의 중심을 결정하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도(90)이다. 서터(68)는 외부 표면으로부터의 광이 없도록 박스(92)에서 폐쇄되지만, 일부 설계에서 서터(68)를 폐쇄할 필요가 없을 수 있다. 서터(68)가 폐쇄될 때, 빔(40)은 박스(94)에서 서터(68)로부터 카메라(70) 상으로 역-반사된다. 카메라(70) 상의 픽셀 스크린은 박스(96)에서 빔(40) 내의 강도 피크의 수를 나타내는 복수의 사분면으로 분할된다, 이러한 예에서, 4개의 강도 피크, 즉 $\beta=4$, 그에 따라 4개의 사분면이 있으며, 여기서 각각의 사분면은 박스(98)에서 x-축 및 y-축에 통합된다. 각 사분면에서의 강도 피크의 중심점 및 폭은 박스(100)에서 수집된 데이터를 사용하여 추정되고, 이들 값은 4개의 사분면 모두에 대해 개별적으로 저장된다. 비-선형 피팅 루틴(non-linear fitting routine)은 박스(102)에서 각 사분면의 강도 피크에 적용되고, 피팅 루틴의 초기 값은 박스(100)에서 추정되고, 가우스 유사 함수는 하나의 비-제한적인 실시예에서 피팅 루틴의 모델로서 사용된다. 각 강도 피크의 x 및 y 중심점 위치 및 폭은 박스(106)에서 피팅 루틴을 사용하여 추정된다. 각 강도 피크의 중심 위치의 값으로부터, 빔(40)의 중심 위치는 서브-픽셀 정밀도로 계산되고, 그 값은 박스(108)에 저장된다. 빔(40)의 중심 위치를 계산하는 한가지 방법은 대각선 사분면들에서 각각의 x 및 y 강도 피크의 평균을 취하는 것이다. 각각의 사분면에서 개별적인 강도 피크의 중심점 및 폭의 값, 및 전체 빔의 중심점은 서터(68)가 폐쇄 또는 개방될 때 각도의 결정에서 초기 위치를 형성한다.

[0042] 낮은 프린지 콘트라스트는 SPPR 장치(26)의 반사율이 낮을 때 SPPR을 통한 광 전송의 경우에 대한 것이다. 이는 시스템(10) 내의 광학 하드웨어에 대한 경우일 것이며, 여기서 이미지/프레임은 통상적으로 동적 캘리브레이션 동안 카메라(54) 상에서 모니터링된다. 광학 와류 빔(40)의 중심을 찾는 것은 시스템(10)이 초기에 구축될 때 일반적으로 행해진다. 그 후, 중심점은 시스템 동작 동안 중앙 위치에 통계적으로 유의적인 편차가 존재하지 않는다는 것을 보장하기 위해 이 절차를 사용하여 모니터링된다.

[0043] 도 22는 카메라(54) 상에 이미징된 빔(42)의 낮은 콘트라스트 프린지를 갖는 광학 와류 강도 프로파일의 중심을 결정하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도(112)이다. 빔(42)은 박스 1(14)에서 SPPR 장치(26)를 통해 전송되고, 통합된 x 축 및 y 축 상의 카운트는 박스(116)에서 계산된다. 빔(42)의 중심점 및 폭은 수집된 데이터를 사용하여 박스(118)에서 추정되고, 이들 값은 저장된다. 비-선형 피팅 루틴은 박스(102)에서 빔(42)에 인가되고, 여기서 피팅 루틴의 초기 값은 박스(118)에서 추정되고, 가우스 유사 함수는 하나의 비-제한적인 실시예에

서 전체 빔(42)에 대한 피팅 루틴에서 모델로 사용된다. 빔(42)의 x 및 y 중심점 위치 및 폭은 박스(112)에서 비-선형 피팅 루틴으로부터 획득된다. 박스(116 내지 124)에서의 동작은 박스(126)에서의 빔 중심(중심점) 위치의 일관성을 보장하기 위해 빔(42)의 레이저 주파수를 변화시킴으로써 상이한 회전 각도로 반복된다. 낮은 반사율 SPPR 장치가 사용되는 경우, 이러한 값은 박스(128)에서 빔(42)의 중심 위치의 이전에 저장된 값과 비교된다. 초기 캘리브레이션 동안 저장된 값들로부터 많은 편차가 존재하지 않아야 한다. 즉, 편차는 서브픽셀 값보다 많지 않아야 한다.

[0044] 도 23은 플랫폼(66)의 피치 각도 및 요 각도를 계산하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도(130)이다. 서터(68)는 박스(132)에서 폐쇄되어 외부 표면으로부터 카메라(70) 상에 광이 존재하지 않는다. 빔(40)은 박스(136)에서 서터(68)(또는 외부 캘리브레이션 표면)로부터 그리고 카메라(70) 내로 역-반사된다. 빔(40)의 중심점은 박스(136)에서 흐름도(90 또는 112)에서 전술한 바와 같이 계산된다. 서터(68)는 박스(138)에서 개방되고, 역-반사된 빔의 중심점은 박스(140)에서 계산된다. 피치 각도는 박스(142)에서 카메라(70) 상의 빔(40)의 수직 변위로부터 결정되고, 여기서 수직 변위의 각각의 값은 피치 각도의 측정치에 대응한다. 요 각도는 박스(144)에서 카메라(70) 상의 수평 변위로부터 결정되고, 여기서 수평 변위의 각각의 값은 요 각도에 대응한다. 피치 각도 및 요 각도가 연속적으로 변화하면, 박스(146)에서 카메라(70)의 스크린 상의 위치의 함수로서 변화하는 각도를 추정하기 위해 연속적인 측정이 수행될 수 있다. 피치 각도 및 요 각도는 박스(148)에 저장된다.

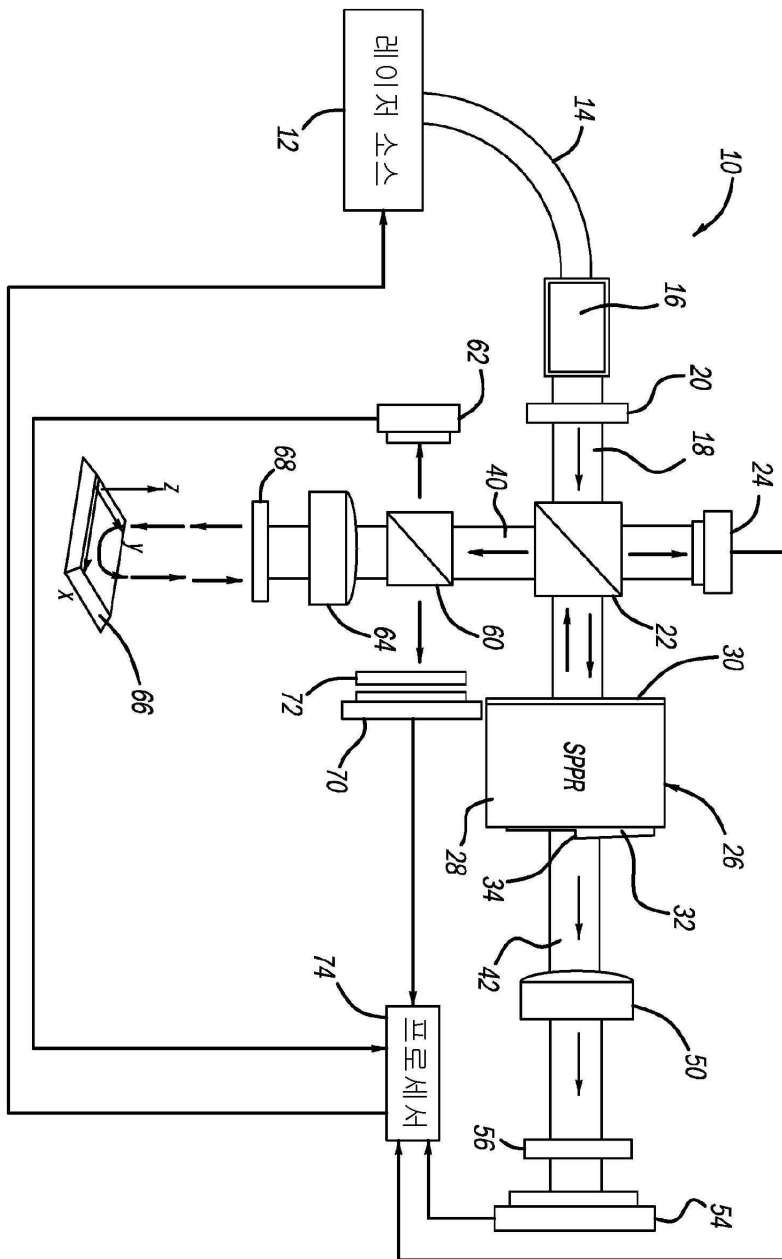
[0045] 도 24는 기준(fiducial) 또는 2개 이상의 지점들 사이에 대한 플랫폼(66)의 롤 각도를 계산하기 위한 프로세스를 도시하는 흐름도(150)이다. 서터(68)는 박스(152)에서 폐쇄되어 플랫폼(66)에 광이 입사되지 않는다. 레이저 소스(12)의 강도는 박스(154)에서 검출기(24, 62) 및 카메라(54)를 사용하여 안정화되고, 레이저 소스(12)의 초기 주파수는 박스(156)에서 카메라들(54, 70) 상의 강도 피크의 각도 위치에 의해 결정된다. 카메라(54, 70)는 박스(158)에서 동기화되어 이들이 동시에 이미지 프레임을 수신하는 것을 보장한다. 카메라(54, 70) 상의 빔(40)의 중심점은 박스(160)에서 흐름도(90 또는 112)에 기술된 바와 같이 추정된다. 배경의 존재는 비-선형 피팅 루틴에 의해 획득된 값으로 뺀다. 서터(68)로부터 카메라(70) 상으로 역-반사되는 빔(40)의 중심점은 박스(162)에서 추정된다. 빔 중심점 위치로부터 시작하는 반경방향을 따른 통합 카운트는 박스(164)에서 카메라(54) 상의 롤 각도의 함수로서 계산되고, 비-선형 피팅 루틴을 사용하여 각도 강도 피크의 위치는 박스(166)에서 추정되고, 여기서 이들 값은 저장된다. 빔 중심점 위치로부터 시작하는 반경방향을 따른 통합 카운트는 박스(168)에서 카메라(70) 상의 롤 각도의 함수로서 계산되고, 비-선형 피팅 루틴을 사용하여 각도 강도 피크의 위치는 박스(170)에서 추정되고, 여기서 이들 값은 저장된다.

[0046] 서터(68)는 박스(172)에서 개방되고, 빔(40)은 플랫폼(66) 상에 투사되어 박스(174)에서 카메라(70) 상에 이미징된다. 반사된 빔(40)의 초기 주파수는 빔(40)의 배향이 플랫폼(66) 상의 기준점에 정렬하는 주파수에 대응한다. 플랫폼(66) 상에 이미징되는 빔(40)의 중심점은 박스(176)에서 흐름도(90 또는 112)를 사용하여 결정된다. 빔(40)의 중심점으로부터 시작하는 반경방향을 따른 통합 카운트는 박스(178)에서 롤 각도의 함수로서 계산된다. 강도 피크의 위치는 박스(180)에서 비선형 최적 피팅 루틴으로부터 획득된다. 비-선형 피팅 루틴에 대한 강도 피크의 초기 위치설정은 캘리브레이션 프로세스로부터 저장되고, 여기서 빔(40)은 박스(182)에서 서터(68)로부터 역-반사된다. 플랫폼(66)이 회전될 때, 광학 와류 빔은 광학 와류 강도 프로파일의 배향을 회전시키는 레이저 빔 주파수의 변화를 통해 회전을 추적한다. 롤 각도는 카메라(70) 상의 각도 강도 피크의 위치로부터 추정된 광학 와류 빔의 배향의 변화로부터 박스(184)에서 추정된다. 플랫폼(66)이 증분 단계에서 회전되면, 빔(40)의 광학 와류 패턴은 롤 각도를 결정하기 위해 증분 단계에서 회전될 수 있다. 빠른 속도로 플랫폼(66)의 연속적인 회전이 있다면, 회전 도플러 시프트를 사용하여 롤 각도가 얻어질 수 있다.

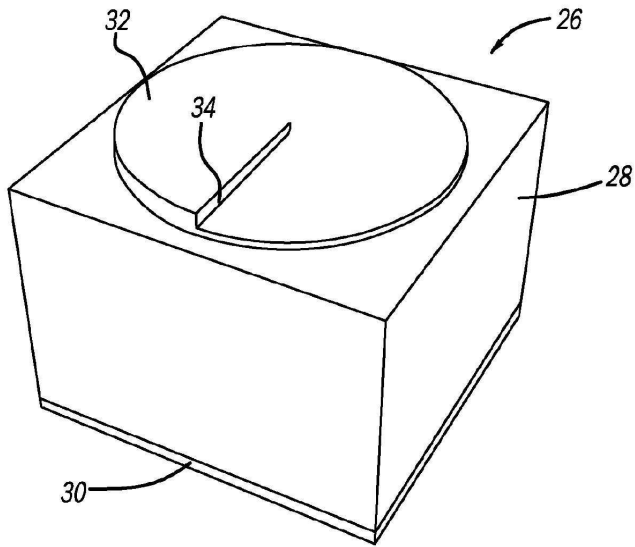
[0047] 전술한 논의는 본 발명의 단지 예시적인 실시예를 개시하고 기술한다. 당업자는 하기의 청구범위에 정의된 바와 같은 본 개시내용의 사상 및 범위를 벗어나지 않고서 다양한 변경, 수정 및 변화가 이루어질 수 있다는 것을 이러한 논의 및 첨부된 도면 및 청구범위로부터 용이하게 인식할 것이다.

도면

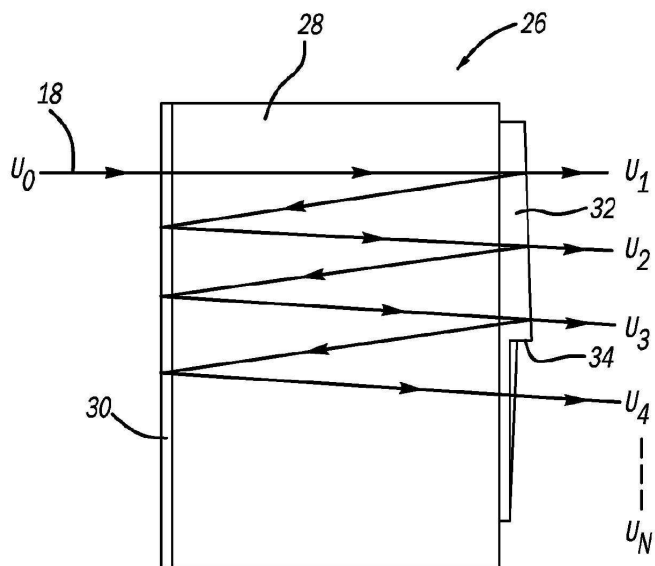
도면1



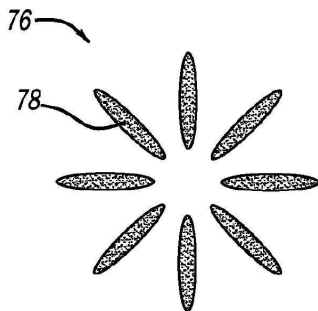
도면2



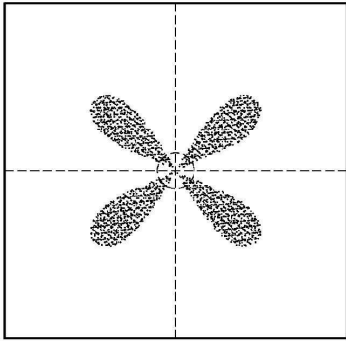
도면3



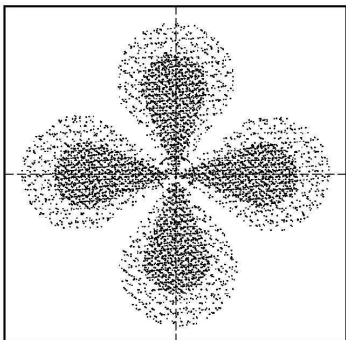
도면4



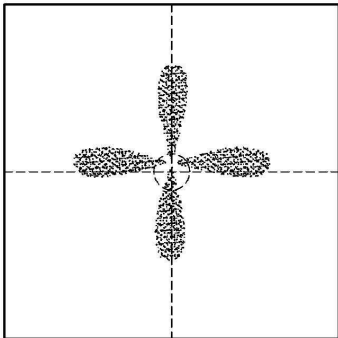
도면5



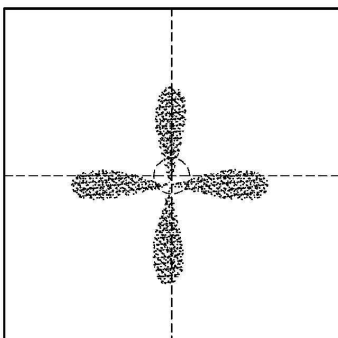
도면6



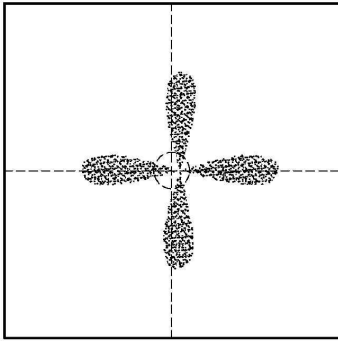
도면7



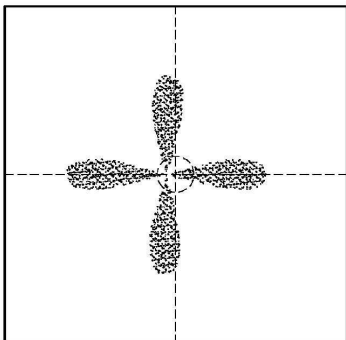
도면8



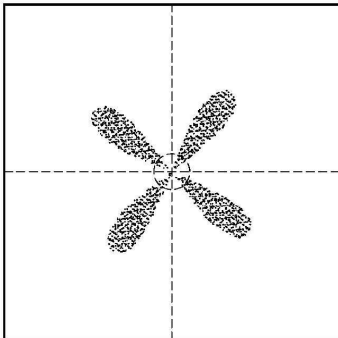
도면9



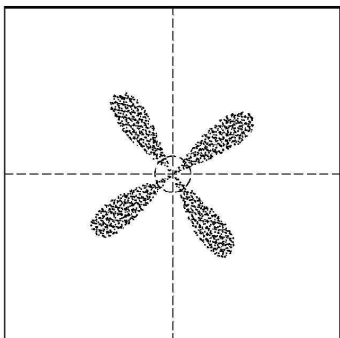
도면10



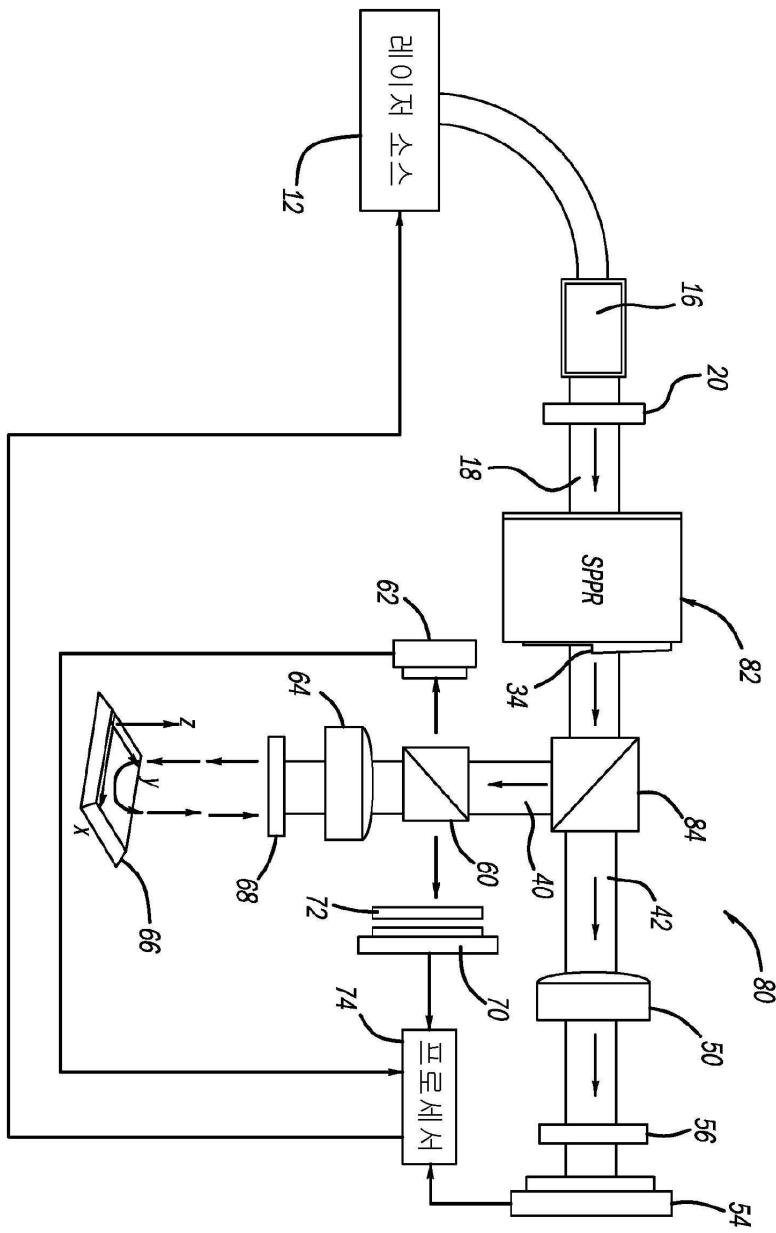
도면11



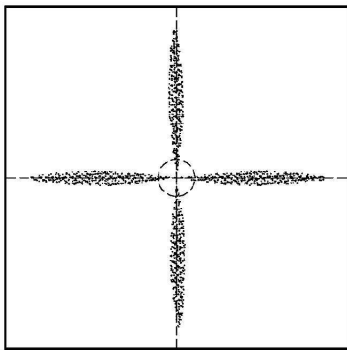
도면12



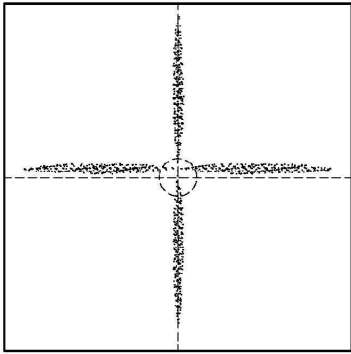
도면13



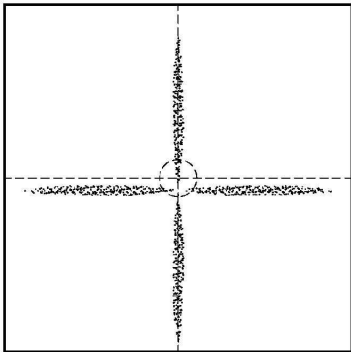
도면14



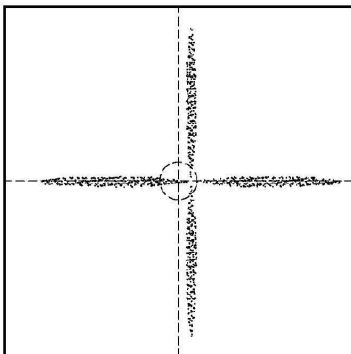
도면15



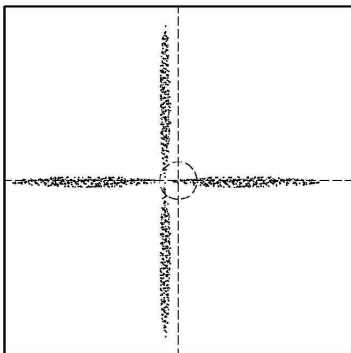
도면16



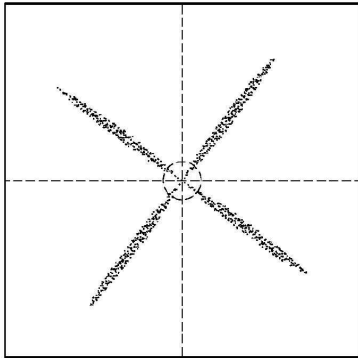
도면17



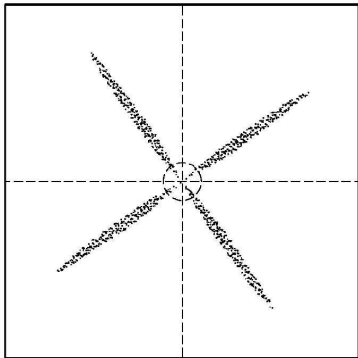
도면18



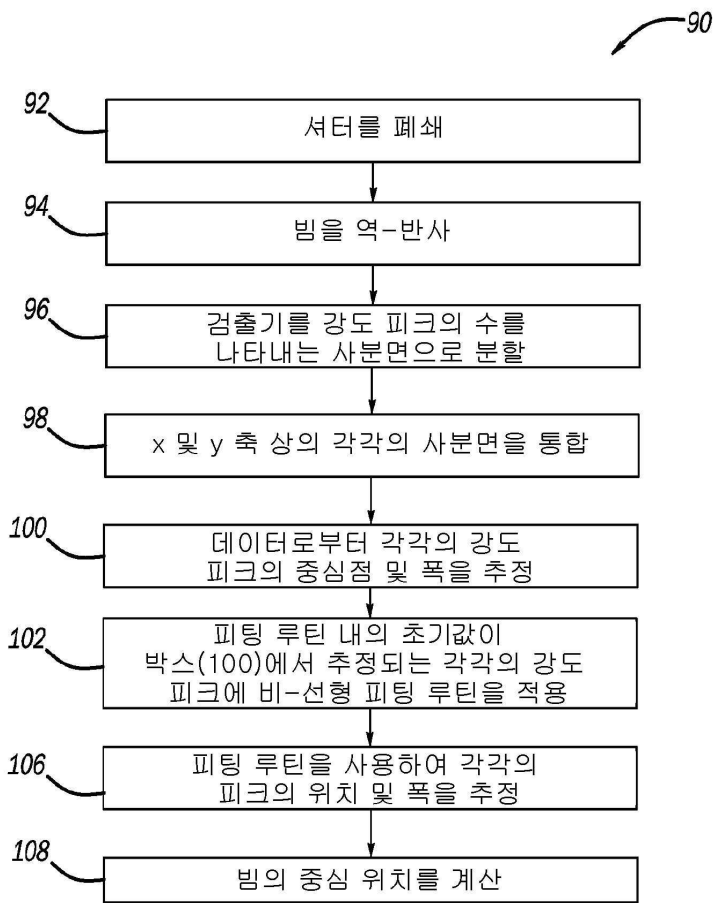
도면19



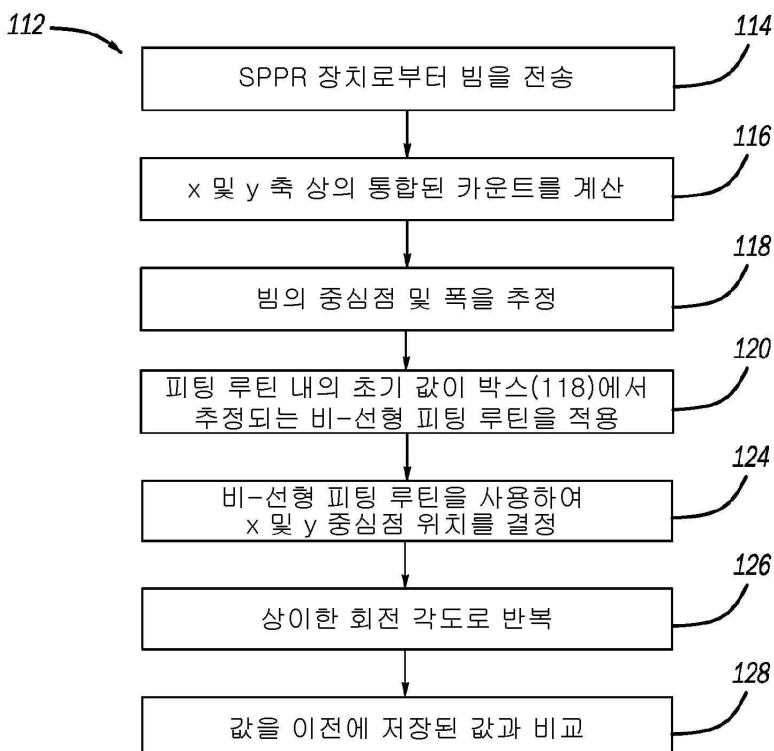
도면20



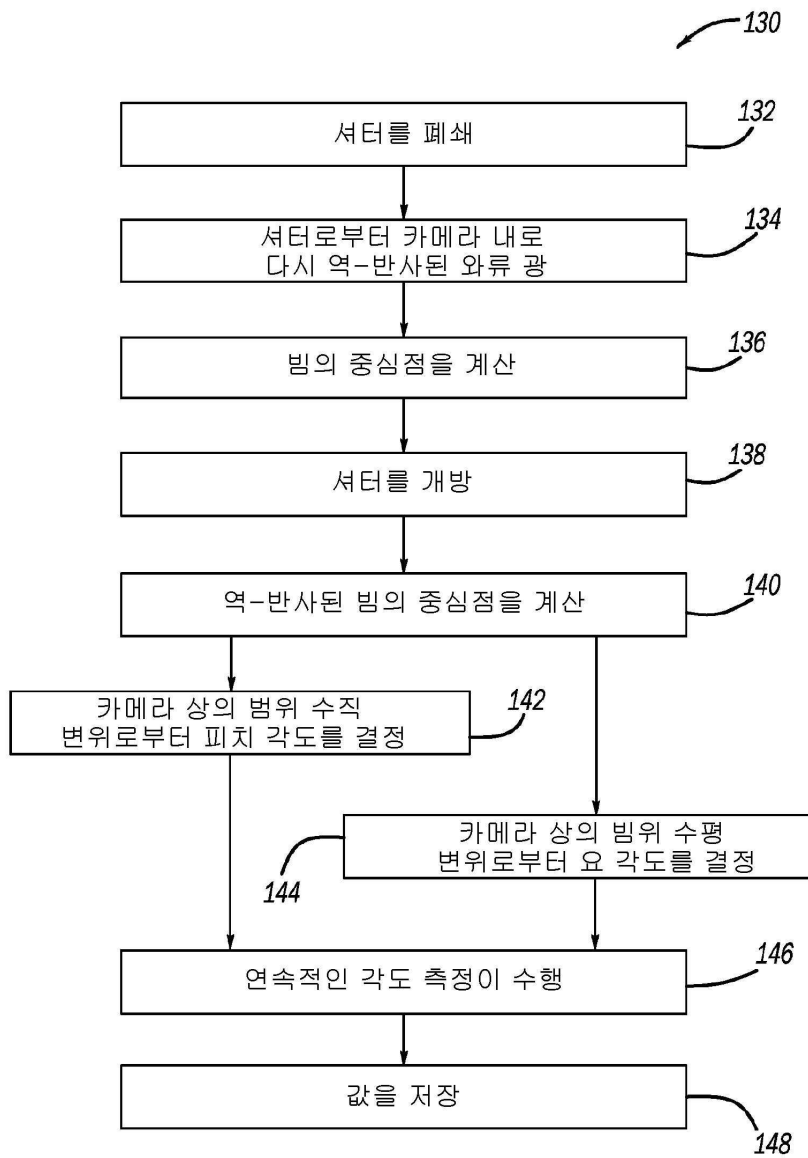
도면21



도면22



도면23



도면24

