



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0051683
(43) 공개일자 2021년05월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 21/00 (2006.01) G02B 21/36 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G02B 21/0024 (2013.01)
G02B 21/361 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0137258
(22) 출원일자 2019년10월31일
심사청구일자 2019년10월31일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
기초과학연구원
대전광역시 유성구 엑스포로 55(도룡동)
(72) 발명자
최원식
서울특별시 노원구 노원로1가길 10, 802동 1001호 (공릉동, 청솔8단지)
윤석찬
서울특별시 성북구 종암로25길 30, 102동 902호(종암동, 삼성 래미안아파트)
이호준
서울특별시 성북구 정릉로 402, 2라동 201(돈암동, 돈암현대아파트)
(74) 대리인
특허법인남춘

전체 청구항 수 : 총 5 항

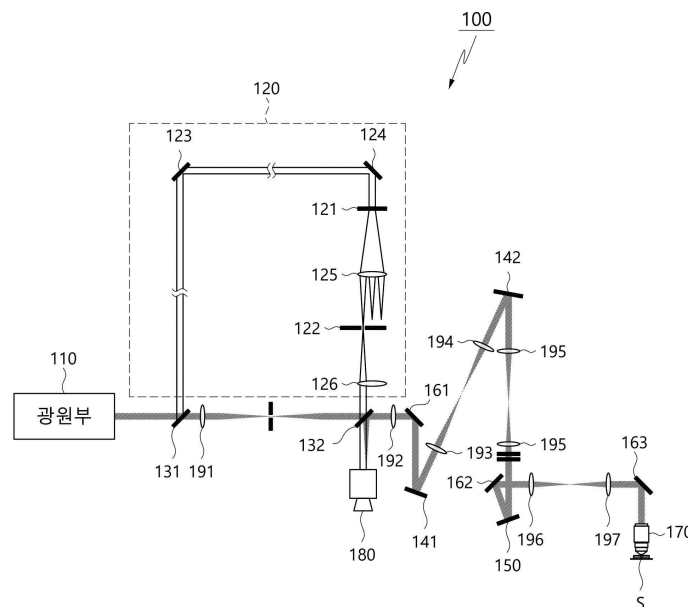
(54) 발명의 명칭 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치

(57) 요약

본 발명은 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 관한 것으로, 빔을 조사하는 광원부와, 상기 광원부로부터 조사된 빔을 샘플과와 참조파로 분할하고, 상기 샘플과가 상기 샘플로부터 반사된 반사파와 상기 참조파 간의 간섭파를 형성하는 광학 간섭계와, 상기 간섭파를 촬영하는

(뒷면에 계속)

대표도 - 도2



카메라 모듈과, 상기 광학 간섭계의 상기 샘플과의 광 경로 상에 배치되어, 상기 샘플과 상기 샘플을 스캔하도록 상기 샘플과를 반사시키는 스캐닝 미러와, 상기 광학 간섭계의 상기 샘플과의 광 경로 상에 배치되는 파면 형상 변조기와, 샘플 야기 수차의 보정을 위한 수차 보정 위상 맵을 산출하는 위상 맵 산출 모드와, 상기 수차 보정 위상 맵이 상기 파면 형상 변조기에 표시되어 상기 샘플 야기 수차가 보정된 상태로 상기 타겟 오브젝트를 이미징하는 이미징 모드로 동작하는 이미징 제어부를 포함하며; 상기 이미징 제어부는 상기 위상 맵 산출 모드에서 상기 파면 형상 변조기가 미리로 동작하도록 제어하고, CLASS 알고리즘을 기반으로 상기 수차 보정 위상 맵을 산출하는 것을 특징으로 한다.

(52) CPC특허분류

G02B 21/365 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	R1612203
부처명	기초과학연구원
과제관리(전문)기관명	기초과학연구원
연구사업명	외부연구단
연구과제명	초고심도 광학 이미징
기 여 율	1/2
과제수행기관명	기초과학연구원
연구기간	2018.01.01 ~ 2018.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	R1612204
부처명	기초과학연구원
과제관리(전문)기관명	기초과학연구원
연구사업명	외부연구단
연구과제명	초고심도 광학 이미징
기 여 율	1/2
과제수행기관명	기초과학연구원
연구기간	2019.01.01 ~ 2019.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 있어서,

빔을 조사하는 광원부와,

상기 광원부로부터 조사된 빔을 샘플파와 참조파로 분할하고, 상기 샘플파가 상기 샘플로부터 반사된 반사파와 상기 참조파 간의 간섭파를 형성하는 광학 간섭계와,

상기 간섭파를 촬영하는 카메라 모듈과,

상기 광학 간섭계의 상기 샘플파의 광 경로 상에 배치되어, 상기 샘플파가 상기 샘플을 스캔하도록 상기 샘플파를 반사시키는 스캐닝 미러와,

상기 광학 간섭계의 상기 샘플파의 광 경로 상에 배치되는 파면 형상 변조기와,

샘플 야기 수차의 보정을 위한 수차 보정 위상 맵을 산출하는 위상 맵 산출 모드와, 상기 수차 보정 위상 맵이 상기 파면 형상 변조기에 표시되어 상기 샘플 야기 수차가 보정된 상태로 상기 타겟 오브젝트를 이미징하는 이미징 모드로 동작하는 이미징 제어부를 포함하며;

상기 이미징 제어부는

상기 위상 맵 산출 모드에서 상기 파면 형상 변조기가 미러로 동작하도록 제어하고, CLASS 알고리즘을 기반으로 상기 수차 보정 위상 맵을 산출하는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 이미징 제어부는 상기 위상 맵 산출 모드에서,

상기 샘플파가 상기 샘플을 초점 스캐닝하도록 상기 스캐닝 미러를 제어하는 단계와,

초점 스캐닝을 통해 상기 샘플의 각 포인트에 대한 상기 카메라 모듈에 의해 촬영된 각각의 간섭파에 기초하여, 복수의 시분해 복소장 이미지를 획득하는 단계와,

복수의 상기 시분해 복소장 이미지를 이용하여, 위치 기저의 시분해 반사 행렬을 생성하는 단계와,

상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬로 변환하는 단계와,

상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 상기 CLASS 알고리즘에 적용하여 상기 샘플 야기 수차의 수차 위상 맵을 추출하는 단계를 수행하고;

상기 수차 위상 맵의 위상 공액(Phase conjugation)을 통해 상기 수차 보정 위상 맵을 산출하는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 생성하는 단계에서는

각각의 상기 시분해 복소장 이미지가 하나의 벡터로 상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬의 각 열에 할당되어 생성되는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬로 변환하는 단계에서는

상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 구성하는 각각의 행 벡터 및 열 벡터에 푸리에 변환이 적용되어 상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬로 변환되는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 수차 위상 맵을 추출하는 단계에서는

상기 CLASS 알고리즘에서의 수차 보정을 위해 획득되는 샘플과의 복소 동공 함수와 반사파의 복소 동공 함수 중 어느 하나가 상기 수차 위상 맵으로 추출되는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 수차, 특히 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 데 있어 보다 빠른 속도로 실시간 이미징이 가능한 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 공초점 촬영(Confocal imaging)은 심부조직의 광학 현미경검사에서 가장 널리 사용되는 구조인데, 그 이유는 초점이 안 맞는 평면에서 나오는 신호를 제거할 수 있기 때문이며, 또한 다중 산란에서 기인하는 원치 않는 노이즈를 제거할 수 있기 때문이다.

[0003] 그러나, 샘플 야기 수차(Sample-induced aberration)가 존재하는 경우, 타겟 오브젝트 정보를 포함하는 신호는 점 확산 함수(Point spread function)의 번짐(blur) 때문에 공초점 핀 홀로부터 멀리 퍼지게 된다. 이는 이미지의 콘트라스트를 감소시키게 되고, 이미지의 심도가 증가할수록 분해능(Resolving power)을 감소시키는 원인이 된다.

[0004] 샘플 야기 수차를 해결하고 아울러 산란 매질 내의 깊은 곳에서 이상적인 회절 제한 촬영(Diffraction-limited imaging)을 달성하기 위한 핵심 사항은, 비-공초점(non-confocal) 신호, 즉, 공초점 핀 홀이 아닌 다른 위치에 도달하는 신호를, 코히어런트하게(Coherently) 다시 초점을 맞추어 공초점 검출 위치로 맞추는 것이다. 번진 신호(blurred signal)뿐 만 아니라 다중 산란 노이즈가 비-공초점 위치에 도달하기 때문에, 다중 산란 노이즈가 아니라 번진 신호에 대해 선택적으로 다시 초점을 맞추는 것이 매우 중요하다.

[0005] 비-공초점 신호를 초점을 맞추어 공초점 위치로 보내기 위한 가장 간단한 방법은 가변형 거울(Deformable mirror) 또는 액정공간광변조기(liquid-crystal spatial light modulator)와 같은 파면성형변조기(Wavefront shaping modulator)를 조명 광 경로 및/또는 검출 광 경로 내에 위치시키는 것이다. 번진 신호를 선택적으로 포커싱하기 위해 공초점 이미지의 강도(Intensity) 또는 선명도(Sharpness)를 최대화시키는 방식으로 공간 광 변조기의 파면을 반복적으로 조정한다.

[0006] 이와 같은 센서리스 적응제어광학(Sensorless adoptive optics) 방법이 주로 형광촬영(Fluorescence imaging)에서 고위수차를 발견할 수 있지만, 피드백 프로세스에 소요되는 시간은 각각의 반복 단계에 대해 이미지를 획득하는데 필요한 것만큼 오래 걸리는 경향이 있다. 모델-기반 양상의 수차 교정 방법(Model-based modal aberration correction approach)은 최적화에 필요한 시간을 줄일 수 있지만, 제르니케 다항식(Zernike polynomials)의 몇몇의 가장 낮은 모드에 대해서만 효과가 있다.

[0007] 이미지 획득 수를 최소한으로 하여 샘플 야기 수차를 보정하기 위해서, 후방산란(backscattered) 신호의 파면을 측정하는 것에 기초한 여러 가지 접근법이 제안되어 왔다. 파면을 기록하기 위해, 샤크-하트만(Shack-Hartmann) 파면 센서와 간섭현미경검사(Interference microscopy)가 널리 사용되어 왔다. 이러한 소위 파면 센서에서 측정

한 파면으로부터 수차를 발견하는 것은 매우 중요한 단계이다. 보통, 조명 및 검출 광 경로에 대한 샘플 유도 수차는 측정된 파면에 영향을 미친다. 수학적으로, 조명 점 확산 함수와 타겟 오브젝트의 곱셈(multiplication)에 의해 검출 점확산함수의 합성적분(Convolution)이 발생하는데, 이로써 샘플 야기 수차를 포함하는 각각의 점 확산 함수를 추출하는 것이 어려워진다.

[0008] 종래의 연구결과들은 단지 제한적인 경우에만 이러한 더블-패스(Double-pass) 문제를 해결했었다. 천문학에서의 가이드 스타(Guide star)와 유사하게, 샘플 내의 포인트와 같은 소스가 존재하는 가장 간단한 경우에, 타겟 오브젝트와 조명 점 확산 함수를 곱하는 것은 단순히 포인트 소스이다. 따라서, 동공면에서의 측정된 파면은 검출 광 경로 내의 샘플 야기 수차와 동일하게 된다. 가이드 스타는 항상 사용할 수 있는 것은 아니지만, 비선형 여기(excitation)와 망막 이미징 내의 광 수용체(photo-receptor) 셀은, 고유의 가이드 스타와 가까운 역할을 할 수 있다.

[0009] 또 다른 전략으로서 기대할 수 있는 것은 평면파를 조명하는 것인데, 이로써 조명 광 경로 내의 수차를 최소화시킬 수 있다. 그리고, 이미지 선명도와 같은 이미지 측정 기준을 계산을 통해 최적화함으로써, 검출된 파면에서 수차를 발견할 수 있다. 평면 조명과의 트레이드-오프(Trade-off)로서, 이러한 접근방법은 공초점 동기(confocal gating)의 손실 때문에 다중 산란 노이즈의 영향을 쉽게 받게 된다.

[0010] 이와 관련하여, 본원출원의 발명자의 논문 "High-resolution adaptive optical imaging within thick scattering media using closed-loop accumulation of single scattering(Nature Communications volume 8, Article number: 2157, 2017)"에서 산란과 수차를 동시에 보정할 수 있는 CLASS(Closed-loop accumulation of single scattering)으로 표현된 알고리즘을 제안하였다.

[0011] CLASS 알고리즘에서는 시분해 반사 행렬을 각도별 스펙트럼으로 변환한 후, 각도별 빛의 파면의 위상 변화를 수치적으로 찾아내어 보상함으로써, 타겟 오브젝트의 이미징에 필요한 단일 산란 누적 광 신호를 극대화하여 이미지를 최적화하고 있다.

[0012] 발명자가 제안한 CLASS 방법과 같은 시분해 홀로그래프 이미징 방식은 평면파를 이용한 간섭계 방식으로 샘플광과 참조광의 간섭 이미지를 획득한다. 이 때 샘플광과 참조광의 시간적 파면(Temporal wavefront)의 차이가 광원의 가간섭 거리 이내로 제한된다. 따라서 세밀한 시분해 정보를 얻기 위해 가간섭 거리가 짧은 광원을 이용할 경우, 마이크로 스케일의 시간적 파면 오차가 허용된다.

[0013] 마이크로 스케일에서 샘플광의 시간적 파면을 참조광의 시간적 파면에 맞추기 위해, 기존의 시분해 홀로그래프 이미징 방식에서는, 도 1에 도시된 바와 같이, 액정을 기본 매질로 구성한 공간 광 변조기(Spatial light modulator)를 사용하여 샘플에 조사되는 입사파의 각도를 변조하였다. 그러면, 샘플광의 시간적 파면은 유지하면서 공간적 파면만 바꿀 수 있었다.

[0014] 그런데, 이러한 액정을 이용한 공간 광 변조기는 기본적으로 변환 속도가 10Hz 정도 수준을 가지고 있어, 시분해 반사 행렬을 측정하는 속도가 매우 느린 단점이 있다. 따라서, 기존의 시분해 홀로그래프 이미징 방식에서는 시분해 반사행렬을 측정하는데 걸리는 시간이 십분 이상으로 생체를 실시간으로 관찰하는 것이 현실적으로 어렵다고 여겨지고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 이에 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해소하기 위해 안출된 것으로써, 수차, 특히 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는데 있어 보다 빠른 속도로 실시간 이미징이 가능한 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0016] 상기 목적은 본 발명에 따라, 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 있어서, 빔을 조사하는 광원부와, 상기 광원부로부터 조사된 빔을 샘플과와 참조파로 분할하고, 상기 샘플과가 상기 샘플로부터 반사된 반사파와 상기 참조파 간의 간섭파를 형성하는 광학 간섭계와, 상기 간섭파를 촬영하는 카메라 모듈과, 상기 광학 간섭계의 상기 샘플과의 광 경로 상에 배치되어, 상기 샘플과가 상기 샘플을 스캔하도록 상기 샘플과를 반사시키는 스캐닝 미러와, 상기 광학 간섭계의 상기 샘플과의 광 경로 상에 배치되는 파면 형상 변조기와, 샘플 야기 수차의 보정을 위한 수차 보정 위상 맵을 산출하는 위상 맵 산출

모드와, 상기 수차 보정 위상 맵이 상기 파면 형상 변조기에 표시되어 상기 샘플 야기 수차가 보정된 상태로 상기 타겟 오브젝트를 이미징하는 이미징 모드로 동작하는 이미징 제어부를 포함하며; 상기 이미징 제어부는 상기 위상 맵 산출 모드에서 상기 파면 형상 변조기가 미러로 동작하도록 제어하고, CLASS 알고리즘을 기반으로 상기 수차 보정 위상 맵을 산출하는 것을 특징으로 하는 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치에 의해서 달성된다.

[0017] 여기서, 상기 이미징 제어부는 상기 위상 맵 산출 모드에서, 상기 샘플파가 상기 샘플을 초점 스캐닝하도록 상기 스캐닝 미러를 제어하는 단계와, 초점 스캐닝을 통해 상기 샘플의 각 포인트에 대한 상기 카메라 모듈에 의해 촬영된 각각의 간섭파에 기초하여, 복수의 시분해 복소장 이미지를 획득하는 단계와, 복수의 상기 시분해 복소장 이미지를 이용하여, 위치 기저의 시분해 반사 행렬을 생성하는 단계와, 상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬로 변환하는 단계와, 상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 상기 CLASS 알고리즘에 적용하여 상기 샘플 야기 수차의 수차 위상 맵을 추출하는 단계를 수행하고; 상기 수차 위상 맵의 위상 공액(Phase conjugation)을 통해 상기 수차 보정 위상 맵을 산출할 수 있다.

[0018] 또한, 상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 생성하는 단계에서는 각각의 상기 시분해 복소장 이미지가 하나의 벡터로 상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬의 각 열에 할당되어 생성될 수 있다.

[0019] 그리고, 상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬로 변환하는 단계에서는 상기 위치 기저의 상기 시분해 반사 행렬을 구성하는 각각의 행 벡터 및 열 벡터에 푸리에 변환이 적용되어 상기 공간 주파수 기저의 상기 시분해 반사 행렬로 변환될 수 있다.

[0020] 그리고, 상기 수차 위상 맵을 추출하는 단계에서는 상기 CLASS 알고리즘에서의 수차 보정을 위해 획득되는 샘플 파의 복소 동공 함수와 반사파의 복소 동공 함수 중 어느 하나가 상기 수차 위상 맵으로 추출될 수 있다.

발명의 효과

[0021] 상기 구성에 따라 본 발명에 따르면, 기존의 CLASS 알고리즘은 평면파를 조사하는 상태에서 공간 광 변조기와 같은 파면 형성 변조기의 파면을 복수회 변화시켜 이미지를 얻어 이를 수치적으로 계산하여, 파면 형성 변조기의 파면 변화에 따른 촬영 시간이 길어지는 반면, 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치는 스캐닝 미러의 각도 조절을 통한 초점 스캔 방식으로 수차 보정 위상 맵을 산출함으로써, 촬영 속도가 줄일 수 있다.

[0022] 또한, 수차 보정 위상 맵이 산출한 이후 이를 파면 형상 변조기에 표시된 상태로 샘플 야기 수차가 물리적으로 보정되어 수차 보정을 위한 별도의 이미지 처리 과정 없이 실시간으로 타겟 오브젝트의 이미징이 가능하게 된다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1은 종래의 CLASS 알고리즘에 적용되는 이미징 장치를 나타낸 도면이고,
 도 2는 본 발명에 따른 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치의 셋업 예를 나타낸 도면이고,
 도 3 내지 도 7은 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치에서 수차 보정 위상 맵을 산출하는 과정을 설명하기 위한 도면이고,
 도 8은 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치의 효과를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 이하에서는 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 실시예에 대해 상세히 설명한다.

[0025] 도 2는 본 발명에 따른 수차를 야기하는 샘플 내의 타겟 오브젝트를 이미징하기 위한 초점 스캔 방식의 이미징 장치(100)의 셋업 예를 나타낸 도면이다.

[0026] 도 2를 참조하여 설명하면, 본 발명의 실시예에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치(100)는 광원부(110), 광학 간섭계, 카메라 모듈(180), 스캐닝 미러(141, 142), 파면 형상 변조기(150) 및 이미징 제어부(미도시)를 포함한다. 여기서, 본 발명에서는 이미징 장치(100)가 광학 간섭계를 통해 초점 스캔 방식으로 간섭광을 이미징한다.

[0027] 광원부(110)는 빔을 조사한다. 본 발명에서는 중심 파장이 900nm, 대역폭이 25nm, 반복률이 80MHz인 티타늄-사파이어 레이저(Ti:Sapphire laser)가 적용되는 것을 예로 하는데, 짧은-코히어런스 광원이 사용되는 것을 예로

한다.

- [0028] 광학 간섭계는 광원부(110)로부터 조사된 빔을 샘플파와 참조파로 분할하고, 샘플파가 타겟 오브젝트를 포함한 샘플로부터 반사된 반사파와 참조파 간의 간섭파를 형성한다. 본 발명에서는 광학 간섭계로 마흐-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계로 구성되는 것을 예로 한다.
- [0029] 도 2를 참조하여 보다 구체적으로 설명하면, 광원부(110)로부터 조사된 빔은 제1 빔 스플리터(131)(131)에 의해 샘플파와 참조파로 분할된다. 샘플로부터 반사된 반사파와, 참조 광 경로를 거친 참조파는 제2 빔 스플리터(132)(132)를 지나면서 결합되어 상술한 바와 마흐-젠더(Mach-Zehnder) 간섭파를 형성하여 카메라 모듈(180)에 의해 촬영된다.
- [0030] 제1 빔 스플리터(131)에 의해 분할된 샘플파는 제2 빔 스플리터(132)를 통과하여 샘플을 향하게 된다. 제2 빔 스플리터(132)를 통과한 샘플파는 스캐닝 미러(141,142), 파면 형상 변조기(150) 및 대물 렌즈(170)를 거쳐 샘플에 조사되고, 샘플로부터 반사된 반사파는 대물 렌즈(170), 파면 형상 변조기(150), 스캐닝 미러(141,142)를 거쳐 제2 빔 스플리터(132)에 의해 반사되면서 참조파와의 간섭에 의해 간섭파를 형성하여 카메라 모듈(180)로 향하게 된다.
- [0031] 여기서, 본 발명에 따른 대물 렌즈(170)는 샘플로 초점광을 조사하도록 구성되는데, 본 발명에서는 침수형 대물 렌즈(170)(Water immersion objective lens)가 적용되는 것을 예로 한다.
- [0032] 도 2에 도시된 샘플파의 광 경로 상의 광학적 구성 요소의 배치는 일 예에 불과하며, 샘플 내의 타겟 오브젝트로 초점광을 조사할 수 있도록 다양한 형태로 마련될 수 있으며, 스캐닝 미러(141,142)와 파면 형상 변조기(150)의 위치도 변경될 수 있음은 물론이다.
- [0033] 도 2의 미설명 참조번호 191 내지 198은 광 경로 상에 배치되는 렌즈이고, 161 내지 163은 광 경로의 변경을 위해 설치되는 미러이다.
- [0034] 참조파의 광 경로 상에는 복수의 렌즈(125,126), 회절 격자(121), 미러(123,124)가 설치될 수 있다. 회절 격자(121)에 의한 1차 회절된 회절빔은 조리개(122)에 의해 선택되어 평면파 형태로 카메라로 향하게 되고, 상술한 바와 같이, 제2 빔 스플리터(132)(132)에서 반사파와 간섭되어 간섭파를 형성하면서 카메라 모듈(180)로 향하게 된다. 회절 격자(121)에 의해 1차 회절된 회절빔 만이 참조광으로 카메라 모듈(180)로 향하게 되어, 템포럴 펄스 파면(temporal pulse front)이 카메라 평면에 평행하게 유지되면서, 동위상의 파면(phase front)은 카메라 모듈(180)의 평면에 대하여 기울어진다.
- [0035] 본 발명에서는 샘플파와 참조파 사의 간섭이 탈-축 간섭(Off-axis interferogram)을 형성하고, 이를 통해 코히어런스(coherence) 길이의 절반인 15 μm 의 템포럴 게이팅 폭(temporal gating width)에서 반사파의 진폭과 위상 맵을 검출하는 것을 예로 한다.
- [0036] 한편, 스캐닝 미러(141,142)는 광학 간섭계의 샘플파의 광 경로 상에 배치되어, 샘플파가 샘플을 스캔하도록 샘플파를 반사시킨다. 본 발명에서는 한 쌍의 갈바노미터 스캐닝 미러(Galvanometer scanning mirror)가 샘플파의 광 경로 상에 배치되는 것을 예로 한다.
- [0037] 한 쌍의 갈바노미터 스캐닝 미러는 각각 샘플 평면의 x축 및 y축에 대해 초점빔이 스캐닝되도록 이미징 제어부의 제어에 따라 샘플파의 각도를 조절한다. 본 발명에서는 한 쌍의 갈바노미터 스캐닝 미러가 일반적인 공초점 현미경(Confocal microscope)에서와 같이 샘플에 초점빔을 레스터-스캔(Raster-scan)하여 초점빔을 샘플 평면에 스캔하게 된다. 여기서, 한 쌍의 갈바노미터는 샘플파의 광 경로 상에서 모두 대물 렌즈(170)의 후방 동공(Back pupil)에 컨주게이트한(Conjugate) 평면에 위치하도록 배치된다.
- [0038] 한 쌍의 갈바노미터 스캐닝 미러에 의해 스캐닝된 초점빔은 샘플로부터 반사되어 다시 대물 렌즈(170)를 거쳐 샘플파의 광 경로를 따라 제2 빔 스플리터(132)로 향하게 되는데, 한 쌍의 갈바노미터 스캐닝 미러(141,142)에 의해 디-스캔(De-scan)된 후 최종적으로 컨주게이트 이미지 평면(Conjugate image plane)에 위치하는 카메라 모듈(180)로 수집된다.
- [0039] 파면 형상 변조기(150)는 광학 간섭계의 샘플파의 광 경로 상에 배치된다. 본 발명에서는 파면 형상 변조기(150)로 액정(Liquid crystal) 기반의 공간 광 변조기(Spatial light modulator : SLM)가 적용되는 것을 예로 한다.
- [0040] 이미징 제어부는 위상 맵 산출 모드와 이미징 모드로 동작한다. 위상 맵 산출 모드에서는 샘플 유기 수차의 보

정을 위한 수차 보정 위상 맵이 산출되고, 이미징 모드에서는 위상 맵 산출 모드에서 산출된 수차 보정 위상 맵이 파면 형상 변조기(150)에 표시되어 샘플 야기 수차가 보정된 상태로 타겟 오브젝트가 이미징된다.

[0041] 여기서, 이미징 제어부는 위상 맵 산출 모드에서 파면 형상 변조기(150)가 단순히 미러로 동작하도록 제어하고, 기 공지된 CLASS 알고리즘을 기반으로 하여 수차 보정 위상 맵을 산출한다. 그리고, 이미징 제어부는 이미징 모드에서 CLASS 알고리즘을 통해 산출된 수차 보정 위상 맵이 파면 형상 변조기(150)에 표시되어 샘플 야기 수차가 물리적으로 보정되는 상태에서 타겟 오브젝트를 이미징함으로써, 실시간으로 타겟 오브젝트를 이미징할 수 있게 된다.

[0042] 이하에서는, 도 3을 참조하여 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치(100)에서 수차 보정 위상 맵을 산출하는 방법에 대해 구체적으로 설명한다.

[0043] 먼저, 이미징 제어부는 파면 형상 변조기(150)가 단순히 미러로서 동작하도록 제어한 상태에서, 한 쌍의 스캐닝 미러(141,142)를 제어하여, 샘플과 샘플을 초점 스캔, 예컨대, 상술한 바와 같이 레스터 스캔하도록 제어한다(S30).

[0044] 그런 다음, 각각의 스캔 포인트에서 샘플로부터 반사되어 오는 반사파와, 참조파 간의 간섭파를 카메라 모듈(180)이 촬영하도록 제어하는데(S31), 각각의 스캔 포인트에 대해 촬영된 간섭파에 기초하여, 복수의 시분해 복소장 이미지(Time-gated complex field image)(또는 시분해 복소장 맵(Time-gated complex field map), 이하 동일)를 획득한다(S32).

[0045] 보다 구체적으로 설명하면, 도 4의 (a) 및 (b)는 수차가 없을 때 카메라 모듈(180)에 의해 취득된 강도 이미지와 위상 이미지를 나타낸 도면이고, 도 4의 (c) 및 (d)는 수차가 존재할 때 카메라 모듈(180)을 통해 취득된 강도 이미지 및 위상 이미지이다. 도 4의 (a)에 도시된 바와 같이, 수차가 없는 경우 초점 폭이 400nm로, 회절-제한 스팟(Diffraction-limited spot)과 동일하게 얻어지고, 위상은 도 4의 (b)에 도시된 바와 같이 초점이 형성된 스팟 근처에서만 의미를 갖는 것을 확인할 수 있다.

[0046] 그러나, 샘플에 수차가 존재하게 되면, 약 10배 가량의 약화된 피크 강도를 갖고, 스팟의 분포가 현저히 확장된 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로, 위상 이미지의 경우에도 의미가 있는 위상값이 이미지 전체에 확장된 것을 확인할 수 있다.

[0047] 본 발명에서는 도 5의 (a)에 도시된 바와 같이, 테스트 샘플로 홈메이드 지멘스 타겟(Homemade Siemens star target)을 강력한 고차(Higher-order) 수차를 야기하는 두 층의 폴로리에틸렌 테페프탈레이트(Polyethylene terephthalate) 아래에 배치하여 실험하였다.

[0048] 시분해 복소장 이미지를 획득하는 과정을 구체적으로 설명하면, 샘플 평면에서의 포인트 $\mathbf{r}_{in}$ 으로 조준된 초점빔에 대해, 디-스캔(De-scanned) 좌표 $\mathbf{r}_{cam}$ 에 위치한 카메라 평면에서의 반사파 $E_{cam}(\mathbf{r}_{cam}; \mathbf{r}_{in})$ 의 시분해 복소장 이미지는 [수학식 1]과 같이 표현할 수 있다.

[0049] [수학식 1]

$$E_{cam}(\mathbf{r}_{cam}; \mathbf{r}_{in}) = \int P_{out}(\mathbf{r}_{cam} + \mathbf{r}_{in}; \mathbf{r}) \cdot [O(\mathbf{r}) \cdot P_{in}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_{in})] d^2\mathbf{r} + E_m(\mathbf{r}_{cam}; \mathbf{r}_{in}).$$

[0050] 여기서, $P_{in}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_{in})$ 은 샘플 평면 내의 포인트 $\mathbf{r}$ 에서의 샘플 야기 E-필드(field) 점 확산 함수이고, $O(\mathbf{r})$ 은 타겟 오브젝트의 오브젝트 함수이다. $P_{out}(\mathbf{r}_{cam} + \mathbf{r}_{in}; \mathbf{r})$ 은 반사파의 E-필드 점 확산 함수를 나타낸 것으로, $\mathbf{r}_{cam} + \mathbf{r}_{in}$ 은 스캐닝 미러(141,142), 즉 갈바노미터 스캐닝 미러의 디-스캔 동작을 설명하고 있다. 그리고, $E_m(\mathbf{r}_{cam}; \mathbf{r}_{in})$ 은 타겟 오브젝트에서 반사되지는 않지만 타겟 오브젝트 위의 산란 매질에 의해 복수회 산란된 시분해 다중 산란파(Time-gated multiply scattered wave)에 기인한 스펙클(Speckle field)을 나타낸다.

[0052] [수학식 1]에 나타난 시분해 복소장 이미지는 갈바노미터 스캐닝 미러에 의한 디-스캔으로 인해 모든 스캐닝 포인트에 대해 카메라의 중앙의 한 점에서 검출되는 바, 입력 위치와 출력 위치를 구분할 수 없다. 즉, 도 5의 (b)에 도시된 바와 같이, 각각의 스캐닝 포인트에 대응하는 위치의 시분해 복소장 이미지가 획득되지 않는다.

따라서, 입력 위치와 출력 위치를 구분하기 위해 물리적으로 조명한 위치 만큼 쉬프트시키는 과정이 필요하다.

[0053] 본 발명에서는 샘플 야기 수차를 식별하기 위해, [수학식 1]의 시분해 복소장 이미지를 실험실 프레임 좌표 $\mathbf{r}_{out}$ 에서 반사파 $E_{lab}(\mathbf{r}_{out}; \mathbf{r}_{in})$ 의 시분해 복소장 이미지로 변환한다. $E_{cam}(\mathbf{r}_{cam}; \mathbf{r}_{in})$ 은 $-\mathbf{r}_{in}$ 만큼 디=스캔된 후에 획득되기 때문에, 이러한 시프트는 [수학식 2]로 보상할 수 있다.

[0054] [수학식 2]

$$E_{lab}(\mathbf{r}_{out}; \mathbf{r}_{in}) = E_{cam}(\mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}; \mathbf{r}_{in})$$

[0056] [수학식 2]를 통해 도 5의 (b)에 도시된 바와 같이, 카메라 평면에서 위치가 변화된 시분해 복소장 이미지가 획득 가능하게 된다. 도 5의 (b)에서는 진폭 이미지 즉, 강도 이미지만을 도시하고 있으나, 이에 대응하는 위상 이미지도, 도 3의 (d)에 도시된 바와 같이 함께 획득된다.

[0057] 각각의 스캔 포인트에 대한 시분해 복소장 이미지가 획득되면, 복수의 시분해 복소장 이미지를 이용하여 위치 기저(Position basis)의 시분해 반사 행렬을 생성한다(S33). 도 5의 (b)에 도시된 시분해 복소장 이미지의 세트를 이용하여, $E_{lab}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_j)$ 을 위치 기저의 시분해 반사 행렬의 행렬 성분 r_{ij} 에 할당함으로써 위치 기저의 시분해 반사 행렬 $\mathbf{R}$ 을 생성할 수 있다. 즉, 각각의 시분해 복소장 이미지가 하나의 벡터로 위치 기저의 시분해 반사 행렬의 각 열에 할당됨으로써, 위치 기저의 시분해 반사 행렬의 생성이 가능하게 된다. 위치 기저의 시분해 반사 행렬은 [수학식 3]과 같이 표현할 수 있으며, 도 6의 (a)에 도시된 바와 같다.

[0058] [수학식 3]

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}_{out}^T \mathbf{O} \mathbf{P}_{in} + \mathbf{M}$$

[0060] [수학식 3]에서 $\mathbf{O}$ 는 반사 지오메트리 내의 대각 행렬(Diagonal matrix)이고, 타겟 오브젝트의 오브젝트 함수를 나타낸다. 즉, $o_{ii} = O(\mathbf{r}_i)$ 이다. $\mathbf{P}_{in}$ 은 입력 점 분산 함수이고, 행렬 성분은 $p_{ij} = P_{in}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_j)$ 에 의해 구성되고, 마찬가지로 출력 점 분산 함수 $\mathbf{P}_{out}$ 가 구성될 수 있다. $\mathbf{P}^T$ 는 P의 전치 행렬을 나타낸다. $\mathbf{M}$ 은 시분해 다중 후방 산란파를 나타내는 랜덤 행렬이다.

[0061] 여기서, 시분해 반사 행렬 $\mathbf{R}$ 의 주요 대각 성분으로부터 공초점 이미지를 얻을 수 있으나, 다중 산란 노이즈로 인해 도 7의 (a)에 도시된 바와 같이, 샘플 유도 수차로 인해 공초점 이미지는 흐리게(Blurred) 나타나고, 심하게 왜곡된다. 또한, 후방 산란파의 많은 부분이 시분해 반사 행렬 $\mathbf{R}$ 의 비-대각(Off-diagonal) 성분에서 검출되어, 공초점 이미지 내에서 신호 강도가 감소하는 현상이 나타난다.

[0062] 샘플 야기 수차가 보정된 이미지를 얻기 위해, 본 발명에서는 CLASS 알고리즘을 적용한다. CLASS 알고리즘의 적용을 위해 위치 기저의 시분해 반사 행렬을 변환하여, 공간 주파수 기저(Spatial frequency basis)의 시분해 반사 행렬을 생성한다(S34)

[0063] 행렬 변환은 위치 기저의 시분해 반사 행렬을 구성하는 각각의 행 벡터와 열 벡터에 푸리에 변환을 적용함으로써, 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬을 생성하는 것을 예로 한다. 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬 $\tilde{\mathbf{R}}$ 은 [수학식 4]와 같이 표현할 수 있으며, 도 6의 (b)에 도시된 바와 같다.

[0064] [수학식 4]

$$\tilde{\mathbf{R}} = \tilde{\mathbf{P}}_{out}^T \tilde{\mathbf{O}} \tilde{\mathbf{P}}_{in} + \tilde{\mathbf{M}}$$

[0066] [수학식 4]에서 $\tilde{\mathbf{O}} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{O} \mathbf{F}$ 는 반사 지오메트리 내의 타겟 오브젝트의 스펙트럼 행렬로, 한켈 행렬(Hankel matrix) 형태를 갖는다. 한켈 행렬에서는 타겟 오브젝트 이미지의 공간 주파수 스펙트럼 $\tilde{O}(\mathbf{k}_i)$ 에 의해 반대칭-대각(Skew-diagonal) 성분 $\tilde{o}_{i-j,j}$ 이 제공된다. 즉, $\tilde{o}_{i-j,j} = \tilde{O}(\mathbf{k}_i)$ 이다. 그리고, $\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{F}$ 는 k 공간 내 샘플 평면으로 파동 전파를 위한 전달 행렬(Transmission matrix)이고, $\tilde{\mathbf{M}}$ 은 시분해 다중 산란파에 대한 k 공간 내의 랜덤 행렬이다.

- [0067] 여기서, $\tilde{\mathbf{P}}$ 의 대각 성분은 단일 산란파에 관한 것이며, 단일 산란파는 파동 전파의 방향에 영향을 미치지 않고, 단지 진폭과 위상만이 변화한다. 반면 랜덤으로 입사파의 방향과 복소 진폭(Complex amplitude) 모두를 변경함으로써, 비-대각항들(Off-diagonal terms)은 다중 산란파를 발생시킨다.
- [0068] 조명 필드(Field of illumination, FOI)에 대해 점확산 함수가 시프트-불변(Shift-invariant)인 경우, 즉, $P(\mathbf{r}_{\text{out}}; \mathbf{r}_{\text{in}}) = P(\mathbf{r}_{\text{out}} - \mathbf{r}_{\text{in}})$ 인 경우, $\mathbf{P}$ 는 토폴리츠 행렬(Toeplitz matrix) 형태를 갖는다. 그리고, $\tilde{\mathbf{P}}$ 는 대각 성분이 복소 동공 함수(Complex pupil function) $\tilde{P}(\mathbf{k})$ 의 대응하는 대각 행렬이다.
- [0069] 상기와 같이, 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬이 생성되면, 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬을 CLASS 알고리즘에 적용한다(S35). CLASS 알고리즘은 상술한 논문에서 개시된 바와 같이, 공초점 이미지의 전체 강도를 최대화시킴으로써, 조명 측과 검출 측, 즉 입사파와 반사파 모두에서 동공 수차를 추정한다. CLASS 알고리즘은 다중 산란파가 아닌 비-대각 성분에 위치한 수차파(Aberrated wave)가 코히어런트하게(Coherently) 대각 성분에 추가됨으로써, 수차를 보정한다.
- [0070] 본 발명에서는 CLASS 알고리즘을 이용하여, 샘플과, 즉 입력 복소 동공 함수(Input complex pupil function)과 반사파, 즉 출력 복소 동공 함수(Output complex pupil function)를 추출하여, 둘 중 어느 하나를 수차 위상 맵으로 추출하는 것을 예로 한다. 도 7의 (c) 및 (d)는 각각 입력 복소 동공 함수와 출력 복소 동공 함수를 나타낸 도면이다.
- [0071] 여기서, 수차 위상 맵의 위상 공액(Phase conjugation)을 도 6의 (b)에 도시된 공간 주파수 기저의 시분해 반사 행렬의 행과 열에 적용하고, 이를 위치 기저의 시분해 반사 행렬로 변환하면, 도 6의 (c)에 도시된 바와 같이 대각 성분의 크기가 크게 향상되었고, 비-대각 성분의 크기는 도 6의 (a)와 비교할 때 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 그리고, 도 6의 (c)에 도시된 위치 기저의 시분해 반사 행렬로부터 추출된 공초점 이미지는 도 7의 (b)에 도시된 바와 같이, 보정 전의 이미지 대비 50배 만큼 그 강도가 증가하였고, 공간 해상도(Spatial resolution)은 이상적인 회절 한계(Diffraction limit)인 400nm에 가까운 420nm인 것으로 추정되었다.
- [0072] 상기와 같은 보정 원리를 이용하여, 이미징 제어부는 수차 위상 맵의 위상 공액을 수차 보정 위상 맵으로 산출하게 된다(S37).
- [0073] 상기와 같은 과정, 즉 위상 맵 산출 모드에서 수차 보정 위상 맵이 산출되면, 이미징 제어부는 수차 보정 위상 맵이 파면 형성 변조기에 표시되도록 제어하고, 스캐닝 미러(141, 142)의 제어를 통해 초점 스캔 방식에 따라 타겟 오브젝트를 이미징하게 되면, 샘플 야기 수차가 파면 형상 변조기(150)에 표시된 수차 보정 위상 맵에 의해 물리적으로 보정되어 각각의 스캔 포인트에 대해 수차가 보정된 이미지가 카메라 모듈(180)을 통해 획득될 수 있다.
- [0074] 상기 구성에 따라, 기존의 CLASS 알고리즘은 평면파를 조사하는 상태에서 공간 광 변조기와 같은 파면 형성 변조기의 파면을 복수회 변화시켜 이미지를 얻어 이를 수치적으로 계산하여, 파면 형성 변조기의 파면 변화에 따른 촬영 시간이 길어지는 반면, 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치(100)는 스캐닝 미러(141, 142)의 각도 조절을 통한 초점 스캔 방식으로 수차 보정 위상 맵을 산출함으로써, 촬영 속도가 줄일 수 있다.
- [0075] 또한, 수차 보정 위상 맵이 산출한 이후 이를 파면 형상 변조기(150)에 표시된 상태로 샘플 야기 수차가 물리적으로 보정되어 수차 보정을 위한 별도의 이미지 처리 과정 없이 실시간으로 타겟 오브젝트의 이미징이 가능하게 된다.
- [0076] 도 8은 본 발명에 따른 초점 스캔 방식의 이미징 장치(100)의 효과를 설명하기 위한 도면이다.
- [0077] 일반적으로, 위상 기준의 반사 행렬 현미경(Phase-referenced reflection-matrix microscopy, RMM)은 향상된 신호 대 잡음비로 고위 수차를 다룰 수 있기 때문에, 쥐의 비손상 두개골 아래의 이미지를 얻는데 사용된다. 쥐의 두개골은 다수의 미세한 마이크로 조작을 포함하고 있어, 강력한 다중 산란 노이즈 뿐만 아니라 극단적으로 높은 고위 광학 수차를 유발한다.
- [0078] 현재까지, 두개골 아래를 촬영하기 위해 다광자 이미징(Multi-photon imaging) 기술만이 사용되었고, 라벨-프리 반사 이미징(Label-free reflectance imaging) 기술은 불가능한 것으로 여겨졌다. 이는, 주로 다광자 현미경 검사에서 일방향 수차만 중요하기 때문인데, 반사 촬영에서 왕복 수차들은 모두 함께 이미지를 손상시킨다.
- [0079] 실험적은 증명을 위해, 도 8의 (a)에 도시된 바와 같이, 쥐의 두개골 전체를 콜라겐 젤의 상부에 배치하였다.

두개골은 3주차 쥐로부터 추출하였고, 두께는 약 100 μm 로 추출하였다. 대물렌즈의 초점(objective focus)은 두개골의 바닥면 아래의 240 μm 로 설정하였다.

[0080] 두개골에 의해 야기되는 강한 수차 때문에, 일반적인 공간섭 현미경(Optical coherence microscopy)에 의해 촬영된 이미지는, 도 8의 (b)에 도시된 바와 같이, 콜라겐 섬유를 시각화하지 못한다.

[0081] 실제로, 두개골에 의한 수차는 매우 심각하고 복잡해서, 심지어는 시계(view field)에 따라서도 달라졌다. 따라서, CLASS 알고리즘은 전체 50x50 μm^2 초점 스캔 영역에 적용했을 때 전혀 작용하지 않았다.

[0082] 콜라겐 섬유 구조는 CLASS 알고리즘을 국부적으로 8x8 μm^2 의 서브-영역에 적용하였을 때에만 눈으로 볼 수 있었고, 8x8 μm^2 는 두개골의 평면도가 동일한 패치 크기이다. 따라서, 스캔 영역을 6x6 패치로 분할하였고, 각각의 영역에 대해 독립적으로 CLASS 알고리즘을 적용하였다. 이렇게 함으로써, 전체 시계에 대하여 미세한 콜라겐 섬유를 선명하게 분석하였다(도 8의 (c) 참조).

[0083] 도 8의 (d)는 36개의 이미지 패치에 대하여 획득한 수차 위상 맵을 나타낸 도면이다. 패치마다 약 15,000 개의 픽셀이 있고, 이는 극도로 많은 개수이다. 수차 위상 맵은 매우 복잡하여, 인접하는 동공 함수들 사이의 정규화된 상관관계(normalized correlation)가 평균적으로 0.1 미만인 된다.

[0084] 본 발명에 따른 이미징 장치(100)는 상술한 바와 같이, 수차를 하드웨어적으로 보정한다. 두개골에 의한 수차는 위치에 따라 달라지므로, 한 번에 각각의 평면도가 동일한 패치에 대하여 물리적으로 보정을 실시할 수 있다.

[0085] 예를 들어, 도 8의 (d)에서 빨간색 원으로 표시된 수차 위상 맵이 도 8의 (e)에 도시된 바와 같으며, 위상 공역을 통해 공간 광 변조기 상에 기록된다. 공간 광 변조기에 의해 물리적으로 수차가 보정되지 전과 후의 이미지가 각각 도 8의 (g) 및 (h)에 나타난 바와 같다.

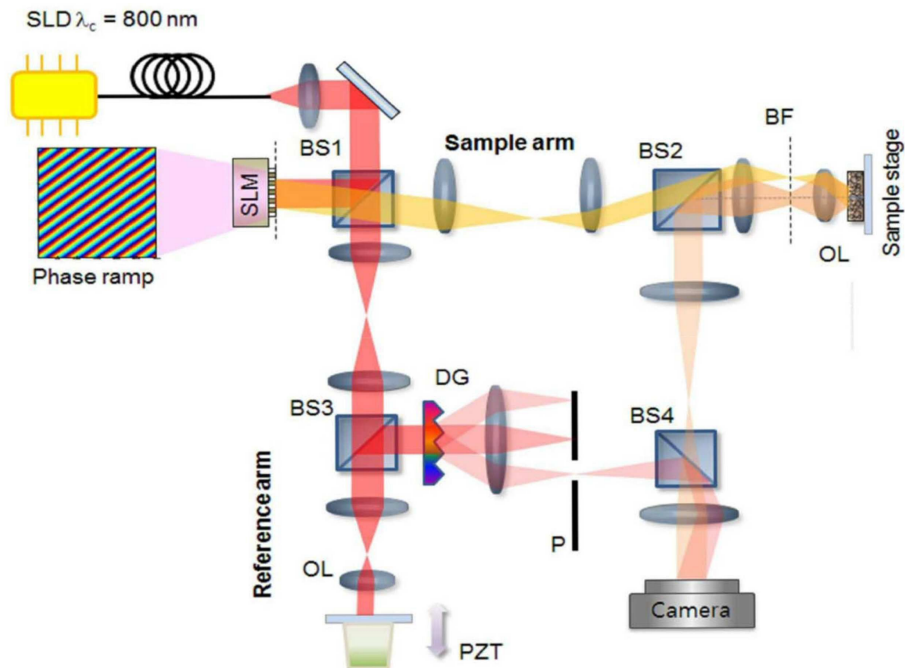
[0086] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

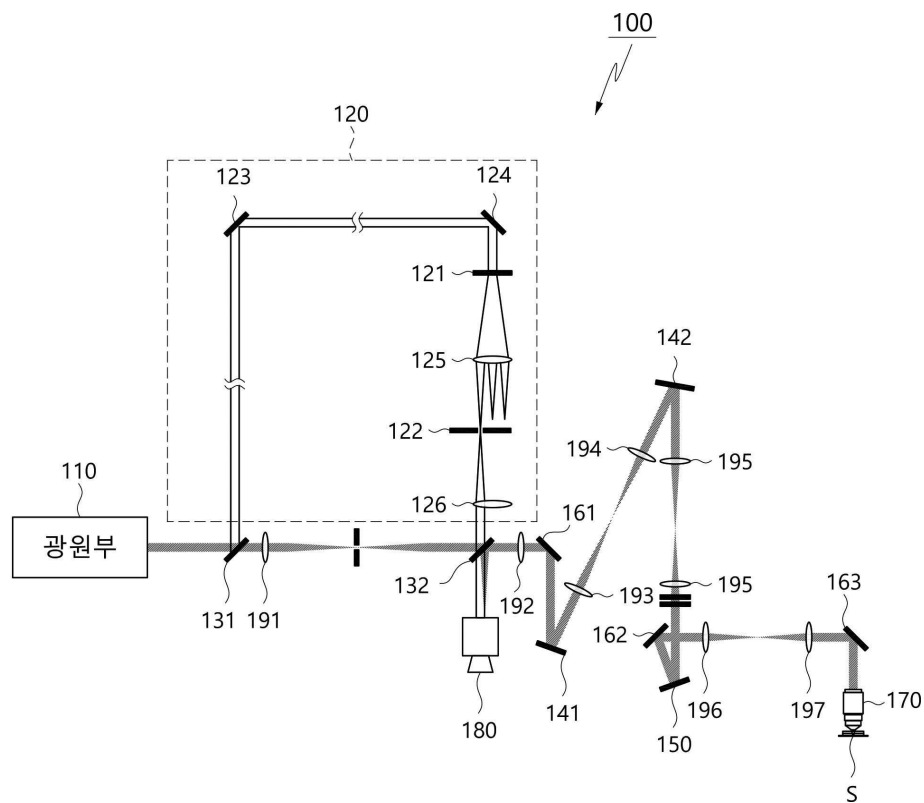
[0087]	100 : 이미징 장치	110 : 광원부
	121 : 회절 격자	122 : 조리개
	123, 124, 161, 162, 163 : 미러	
	125, 126, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198 : 렌즈	
	131 : 제1 빔 스플리터	132 : 제2 빔 스플리터
	141, 142 : 스캐닝 미러	150 : 파면 형상 변조기
	170 : 대물 렌즈	180 : 카메라 모듈

도면

도면1



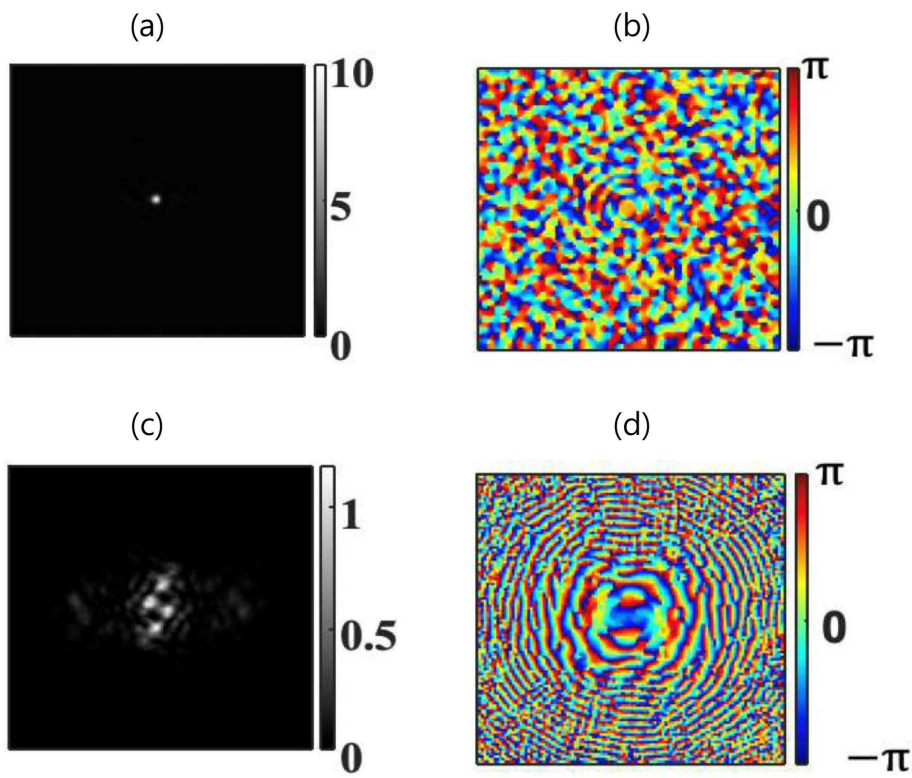
도면2



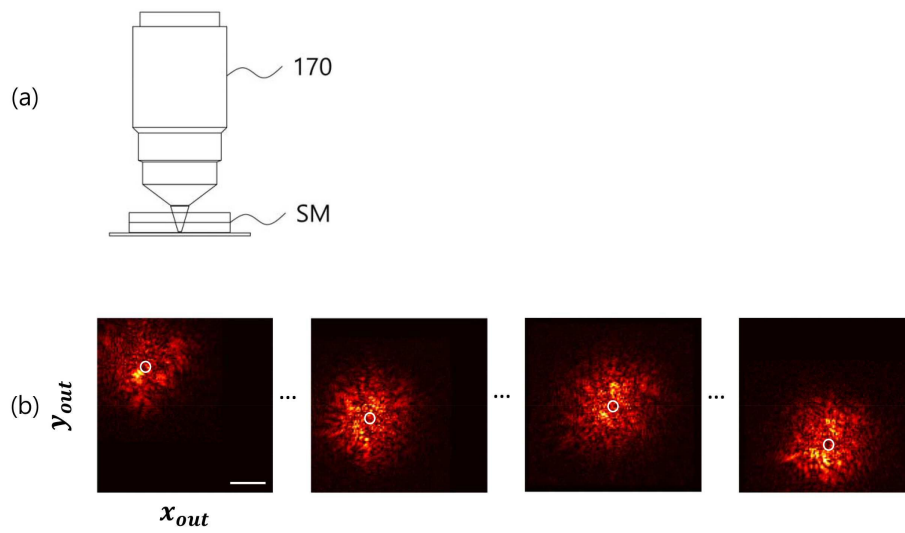
도면3



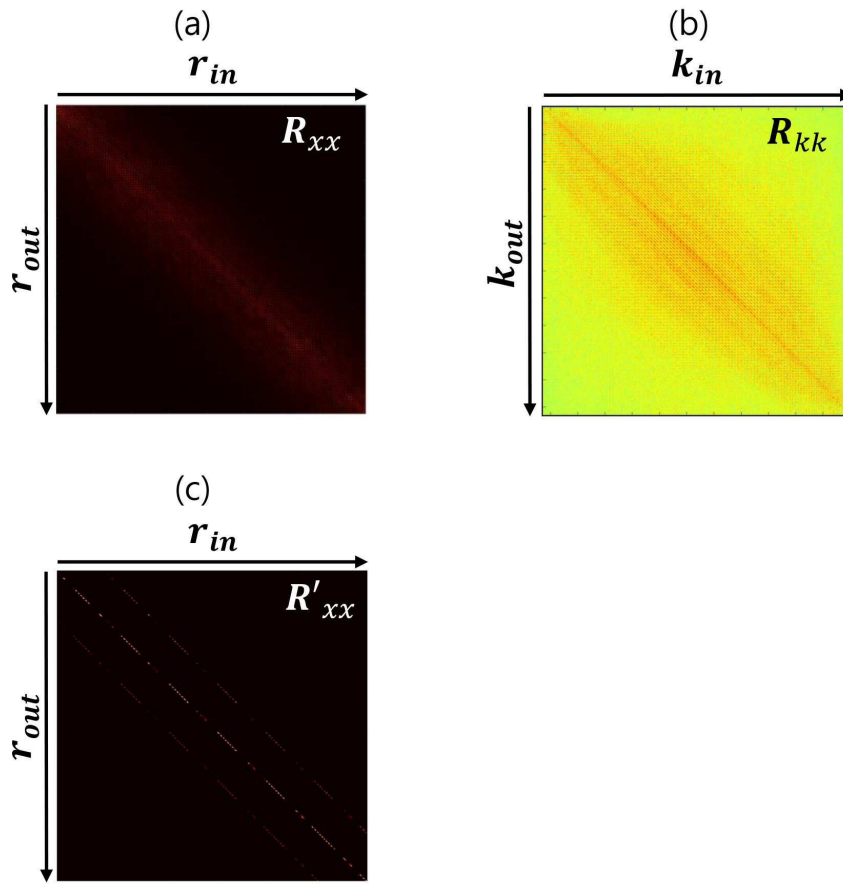
도면4



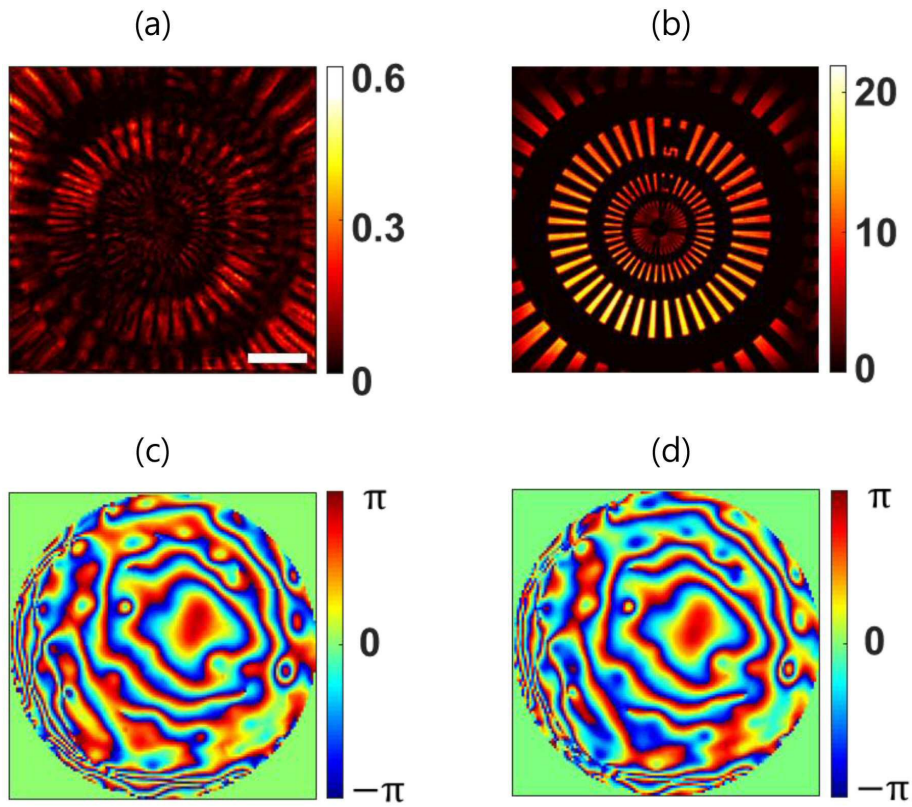
도면5



도면6



도면7



도면8

