(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0113690
(43) 공개일자 2018년10월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 21/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G02B 21/0056 (2013.01)
G02B 21/0084 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0045058
(22) 출원일자 2017년04월07일
심사청구일자 2017년04월07일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
최원식
서울특별시 노원구 노원로1가길 10, 802동 1001호 (공릉동, 청솔8단지)
강성삼
대구광역시 수성구 달구벌대로456길 43, 101동 814호 (수성동1가, 수성영남타운)
(74) 대리인
특허법인남촌

전체 청구항 수 : 총 9 항

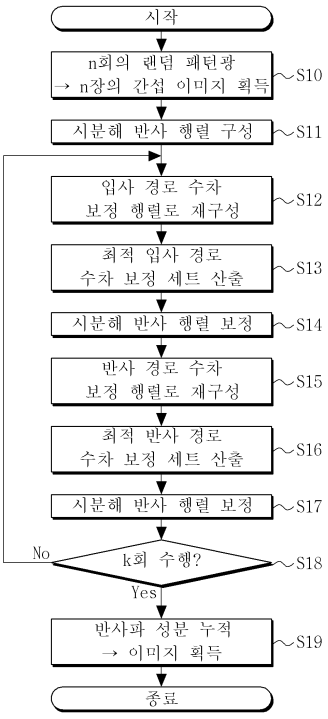
(54) 발명의 명칭 **산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법**

(57) 요 약

본 발명은 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 관한 것으로, (a) 입사빔의 입사각을 가변시키면서 상기 타겟 오브젝트로 부터 출사되는 복수의 출사빔이 획득되는 단계와; (b) 상기 입사빔의 입사파 벡터 및 상기 출사빔의 출사파 벡터로 구성되는 시분해 출사 행렬이 구성되는 단계와; (c) 상기

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도5



시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터 및 상기 입사파 벡터의 차와, 상기 입사파 벡터로 구성된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (d) 상기 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사빔과 상기 입사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (e) 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (f) 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터와, 상기 입사파 벡터 및 상기 출사파 벡터의 차로 구성된 출사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (g) 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 출사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이의 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (h) 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (i) 상기 (h) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬 내의 동일한 출사빔 성분들의 누적에 의해 이미지가 획득되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다.

(52) CPC특허분류
G02B 27/0068 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 IBS-R023
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 기초과학연구원
연구사업명 IBS 지원 사업
연구과제명 분자분광학 및 동력학연구단
기 여 율 1/1
주관기관 고려대학교 산학협력단
연구기간 2017.01.01 ~ 2017.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 있어서,

(a) 입사빔의 입사각을 가변시키면서 상기 타겟 오브젝트로 부터 출사되는 복수의 출사빔이 획득되는 단계와;

(b) 상기 입사빔의 입사파 벡터 및 상기 출사빔의 출사파 벡터로 구성되는 시분해 출사 행렬이 구성되는 단계와;

(c) 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터 및 상기 입사파 벡터의 차와, 상기 입사파 벡터로 구성된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와;

(d) 상기 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사빔과 상기 입사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와;

(e) 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와;

(f) 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터와, 상기 입사파 벡터 및 상기 출사파 벡터의 차로 구성된 출사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와;

(g) 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 출사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이의 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와;

(h) 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와;

(i) 상기 (h) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬 내의 동일한 출사빔 성분들의 누적에 의해 이미지가 획득되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 2

산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 있어서,

(A) 입사빔의 입사각을 가변시키면서 상기 타겟 오브젝트로 부터 출사되는 복수의 출사빔이 획득되는 단계와;

(B) 상기 입사빔의 입사파 벡터 및 상기 출사빔의 출사파 벡터로 구성되는 시분해 출사 행렬이 구성되는 단계와;

(C) 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터와, 상기 입사파 벡터 및 상기 출사파 벡터의 차로 구성된 출사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와;

(D) 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 출사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이의 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와;

(E) 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와;

(F) 상기 (E) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터 및 상기 입사파 벡터의 차와, 상기 입사파 벡터로 구성된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와;

(G) 상기 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사빔과 상기 입사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와;

(H) 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 (E) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 보정

되는 단계와;

(I) 상기 (H) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬 내의 동일한 출사빔 성분들의 누적에 의해 이미지가 획득되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (c) 단계 내지 상기 (h) 단계 및 상기 (C) 내지 상기 (H) 단계는 보정된 상기 시분해 출사 행렬에 대해 기등록된 기준에 따라 반복적으로 수행되며;

상기 (i) 단계 및 상기 (I) 단계는 반복적인 수행 후에 진행되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 4

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 출사빔은 상기 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사파, 또는 상기 타겟 오브젝트를 투과하는 투과파인 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 5

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (d) 단계 및 상기 (G) 단계에서 상기 입사 경로 수차 보정 세트가 반영된 상기 출사빔의 스펙트럼은 수학식

$$\mathcal{E}^{(1)}_{CLASS}(\Delta\vec{k}) = \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o(\vec{k}^i + \Delta\vec{k})\, e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

$$= \sqrt{\gamma}\, O(\Delta\vec{k}) \cdot \textstyle\sum_{\vec{k}^i} P_i^a(\vec{k}^i) P_o^a(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)} + \sqrt{\beta} \textstyle\sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

(여기서, $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$는 상기 입사 경로 수차 보정 세트이고, $P(\vec{k})$는 복소 구경 함수(Complex pupil function)로 아래첨자 'o'는 출사 경로를 'i'는 입사 경로를 의미하고, $\gamma = \exp[-2L/l_s]$ 이고, L는 매질의 두께이고, ls는 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)이고, β는 상기 반사빔 중 다중 산란파의 평균 세기(Average intensity), $\vec{k}^i$는 상기 입력파 벡터이고, $\vec{k}^o$는 반사파 벡터로 $\vec{k}^o = \vec{k}^i + \Delta\vec{k}$ 이다) 로 표현되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 6

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (g) 단계 및 상기 (D) 단계에서 상기 출사 경로 수차 보정 세트가 반영된 상기 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이 스펙트럼은 수학식

$$\mathcal{E}^{pc}_{CLASS}(\Delta\vec{k}) = \sqrt{\gamma}\, O^{-1}(\Delta\vec{k}) \cdot \sum_{\vec{k}^o} P_o^a(\vec{k}^o)^* P_i^{(1)}(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

$$+ \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^o} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp\left[i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)\right] \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

(여기서, $\vec{\theta}_o^{(1)}(\vec{k}^o)$는 상기 출사 경로 수차 보정 세트이고, $P(\vec{k})$는 복소 구경 함수(Complex pupil function)로

아래첨자 'o'는 출사 경로를 'i'는 입사 경로를 의미하고, $\gamma = \exp[-2L/l_s]$ 이고, L는 매질의 두께이고, ls는 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)이고, β 는 상기 반사빔 중 다중 산란파의 평균 세기(Average intensity), $\vec{k}^i$ 는 상기 입력파 벡터이고, $\vec{k}^o$ 는 반사파 벡터로 $\vec{k}^o = \vec{k}^i + \Delta\vec{k}$ 이다)로 표현되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 7

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (e) 단계 및 상기 (H) 단계에서 상기 시분해 출사 행렬은 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 상기 입사 경로 보정 행렬에 반영된 후 시분할 출사 행렬 형태로 재구성되어 보정되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 8

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (h) 단계 및 상기 (E) 단계에서 상기 시분해 출사 행렬은 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 상기 출사 경로 보정 행렬에 반영된 후 시분할 출사 행렬 형태로 재구성되어 보정되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

청구항 9

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 (a) 단계 및 상기 (A) 단계에서는

복수의 입사각을 포함하는 복수회의 랜덤 패턴광이 상기 입사빔으로 입사되는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 오브젝트를 이미징하는 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 오브젝트를 이미징하는데 있어 산란과 수차를 동시에 보정하여 고심도/고해상도의 이미징을 가능하게 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 오브젝트를 이미징하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 광원 파장의 대략 반인 극한 회절 한계(Ultimate diffraction-limit)의 공간 분해능을 구현하는 것은 생체 조직과 같은 산란 매질 내부의 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트의 이미징에 있어 매우 중요한 기술이다. 다중 산란 현상은 최초 입사 운동량(Incidence momenta)을 유지하려는 광파를 희석시키고, 강한 백그라운드 노이즈로 작용하는 다중 산란파를 생성하게 된다. 타겟 심도가 증가함에 따라, 이와 같은 복합적인 영향은 SNR(Signal to noise ratio)의 지수적인 감소를 야기한다. 이러한 이유로 인해, 생체 조직 내에서 발생하는 서브-미크론(Sub-micron) 스케일의 중요한 생체적 반응은 관찰하기 어려운 것으로 인식되고 있으며, 광학 현미경이 질병 경과의 초기 단계에서의 조사와 신경계와 같은 다양한 생물학적 미세 환경의 연구를 효과적으로 지원하지 못하고 있다.

[0003] 공간 분해능의 목표를 극한 회절 한계로 설정하는 경우, 다중 광 산란에 의한 SNR의 감쇄는 단지 하나만의 문제가 아니며, 실제로 소위 표본 유도 수차(Specimen-induced aberration) 또한 동일하게 중요하다. 최초 입사 운동량을 유지하는 신호파는 다중 광 산란에 의해 그 세기가 약화될 뿐만 아니라, 물질의 불균질성(Heterogeneity)에 의해 위상 또한 지연된다.

[0004] 이와 같은 신호파의 위상 지연은 전파각(Propagation angle)에 종속하여 변하고, 위상 지연 현상은 입사 경로 및 반사 경로 모두에서 발생한다. 이와 같은 각도-종속 위상 지연(Angle-dependent phase retardation)은 타

겟 이미지의 재구성에 왜곡(Distortion) 현상을 야기하고, 표본 유도 수차의 주요 원인으로 작용하게 된다. 또한, 이미지 재구성 단계에서 신호파의 적절한 누적을 방해하고, 다중 광 산란에 의해 야기되는 문제에 더하여 SNR의 추가적인 감소를 야기한다.

[0005] 예를 들어, 짧은 산란 평균 자유 경로(Scattering mean free path)의 두께를 갖는 전형적인 생물학적 조직의 표본 유도 수차는 타겟 오브젝트 이미지의 단일 산란 강도를 대략 백배로 약화시킨다. 이와 같은 수차에 의한 유해한 영향은 고해상도 이미지에서 확연히 나타나며, 이는 높은 공간 주파수 정보를 갖는 큰 입사각에서의 파장 전파가 긴 경로를 통해 통과하는 경향이 있어, 큰 위상 지연을 경험할 가능성이 높기 때문이다. 산란 매질에서 타겟 오브젝트를 이미징할 때 수차의 실질적인 문제는 강한 다중 광 산란의 존재로 인해 수차를 확인하기 극히 어렵다는데 있다.

[0006] 이와 관련하여, 기존 연구에서 산란과 수차를 개별적으로 처리하려는 시도가 많았다. 산란을 처리하기 위한 방법들은 단일 산란파를 선택적으로 수집하기 위해 시간 게이팅(Temporal gating) 및/또는 공초점 게이팅(Confocal gating)을 사용하였다. 그러나, 표본 유도 수차의 존재는 이와 같은 게이팅 동작을 쉽게 약화시킨다.

[0007] 신호파의 보다 많은 누적을 위해 고유 채널(Eigen channel)을 사용하는 방법이 Popoff 등의 논문 "Exploiting the Time-Reversal Operator for Adaptive Optics, Selective Focusing, and Scattering Pattern Analysis(Physical Review Letters 107, 263901 (2011).)" 등에서 시도되었으나, 수차 보정을 보장하지는 못하고 있다.

[0008] 본 발명자에 의해 출원된 한국등록특허 제10-168873호 "광 간섭 단층 영상 촬영 장치"와 논문 "Imaging deep within a scattering medium using collective accumulation of single-scattered waves(Nature Photonics 9, 253-258, 2015)"에서 CASS(Collective accumulation of single scattering)으로 표현된 방법을 제안하였다.

[0009] CASS 방법은 타임-게이팅 검출(Time-gated detection)과 공간 입출력 상관 관계(Spatial input-output correlation)을 결합하고 있다. CASS 방법은 매질에 의해 산란되지 않고 타겟 오브젝트에 의해 한번 산란한 단일 산란파를 우선적으로 누적하는데 특징이 있다. 이는 작업 심도를 현저히 증가시키는 결과를 제공해서 11MFPs 이상에서 1.5㎛의 공간 분해능이 유지된다.

[0010] 예를 들어, 기존의 방법들을 이용할 경우, 동일한 실험 조건하에서 0.6㎛의 공간 분해능은 8 MPFs 이상에서만 유지될 수 있었다. 그러나, 단일 산란파의 누적을 방해하는 생물학적 조직 안에서의 표본 유도 수차가 주된 제약으로 작용하게 된다. 엄밀히 말하면, 성취 가능한 심도는 작은 MFPs에 의해 야기되는 본질적인 제약에 비해 얇다.

[0011] 반면, 수차를 처리하는 방법은 적응 광학(Adaptive optics) 분야에서 활발하게 제안되어 왔다. 수차는 직접적인 파면 센싱 또는 실험적인 피드백 제어에 의해 저니크 다항식(Zernike polynomials)에 기초하여 특성화될 수 있다. 이와 같은 접근은 형광 이미징에 특히 효과적인데, 이는 단지 입사파의 수차 보정 문제이기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 다중 산란을 다루는 능력은 파면 형성 디바이스에서 제어 요소의 불충분한 숫자에 의해 제약을 받는다. 코헤런트 이미징(Coherent imaging)을 위한 적응 광학은 다중 산란 노이즈가 존재할 때 실행하기 더 어려우며, 다중 광 산란이 무시할 정도로 적은 케이스에서만 성공적인 수행이 가능하게 된다.

[0012] 만약 다중 광 산란에 의해 야기되는 백그라운드 노이즈가 다뤄지지 않으면, 단일 산란파의 세기가 다중 산란된 광에 의해 야기되는 백그라운드 노이즈의 세기보다 작게 된다. 반면, 수차가 다뤄지지 않아 단일 산란파가 충분하게 효과적으로 누적되지 못해 다중 산란파와 효과적으로 구별되기 어렵다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 이에 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해소하기 위해 안출된 것으로써, 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내부의 타겟 오브젝트를 이미징하는데 있어, 산란과 수차를 동시에 보정하여 단일 산란의 누적을 극대화할 뿐만 아니라 이미지 왜곡 현상을 현저히 감소시켜 고심도/고해상도의 이미징이 가능한 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0014] 상기 목적은 본 발명에 따라, 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 있어서, (a) 입사빔의 입사각을 가변시키면서 상기 타겟 오브젝트로 부터 출사되는 복수의 출사빔이 획득되는 단계와; (b) 상기 입사빔의 입사파 벡터 및 상기 출사빔의 출사파 벡터로 구성되는 시분해 출사 행렬이 구성되는 단계와; (c) 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터 및 상기 입사파 벡터의 차와, 상기 입사파 벡터로 구성된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (d) 상기 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사빔과 상기 입사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (e) 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (f) 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터와, 상기 입사파 벡터 및 상기 출사파 벡터의 차로 구성된 출사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (g) 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 출사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이의 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (h) 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 (e) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (i) 상기 (h) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬 내의 동일한 출사빔 성분들의 누적에 의해 이미지가 획득되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 의해서 달성된다.

[0015] 한편, 상기 목적은 본 발명의 다른 실시 형태에 따라, 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 있어서, (A) 입사빔의 입사각을 가변시키면서 상기 타겟 오브젝트로 부터 출사되는 복수의 출사빔이 획득되는 단계와; (B) 상기 입사빔의 입사파 벡터 및 상기 출사빔의 출사파 벡터로 구성되는 시분해 출사 행렬이 구성되는 단계와; (C) 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터와, 상기 입사파 벡터 및 상기 출사파 벡터의 차로 구성된 출사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (D) 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 출사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이의 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (E) 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (F) 상기 (E) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 상기 출사파 벡터 및 상기 입사파 벡터의 차와, 상기 입사파 벡터로 구성된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성되는 단계와; (G) 상기 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트가 반영되고, 상기 출사빔과 상기 입사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 산출되는 단계와; (H) 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 상기 (E) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬이 보정되는 단계와; (I) 상기 (H) 단계에서 보정된 상기 시분해 출사 행렬 내의 동일한 출사빔 성분들의 누적에 의해 이미지가 획득되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 의해서도 달성된다.

[0016] 여기서, 상기 (c) 단계 내지 상기 (h) 단계 및 상기 (C) 내지 상기 (H) 단계는 보정된 상기 시분해 출사 행렬에 대해 기 등록된 기준에 따라 반복적으로 수행되며; 상기 (i) 단계 및 상기 (I) 단계는 반복적인 수행 후에 진행될 수 있다.

[0017] 또한, 상기 출사빔은 상기 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔, 또는 상기 타겟 오브젝트를 투과하는 투과빔일 수 있다.

[0018] 그리고, 상기 (d) 단계 및 상기 (G) 단계에서 상기 입사 경로 수차 보정 세트가 반영된 상기 출사빔의 스펙트럼은 수학식

$$\mathcal{E}^{(1)}_{CLASS}(\Delta\vec{k}) = \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o(\vec{k}^i + \Delta\vec{k})\, e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

[0019] $$= \sqrt{\gamma}\, O(\Delta\vec{k}) \cdot \textstyle\sum_{\vec{k}^i} P_i^a(\vec{k}^i) P_o^a(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)} + \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

[0020] (여기서, $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$는 상기 입사 경로 수차 보정 세트이고, $P(\vec{k})$는 복소 구경 함수(Complex pupil function)로 아래첨자 'o'는 출사 경로를 'i'는 입사 경로를 의미하고, $\gamma = \exp[-2L/l_s]$ 이고, L는 매질의 두께이고, ls는 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)이고, β는 상기 반사빔 중 다중 산란파의 평균 세기(Average intensity), $\vec{k}^i$는 상기 입력파 벡터이고, $\vec{k}^o$는 반사파 벡터로 $\vec{k}^o = \vec{k}^i + \Delta\vec{k}$ 이다)로 표현될 수 있다.

[0021] 또한, 상기 (g) 단계 및 상기 (D) 단계에서 상기 출사 경로 수차 보정 세트가 반영된 상기 역위상의 입사빔과 출사빔 간의 차이 스펙트럼은 수학식

$$\mathcal{E}_{CLASS}^{pc}(\Delta\vec{k}) = \sqrt{\gamma}\mathcal{O}^{-1}(\Delta\vec{k}) \cdot \sum_{\vec{k}^o} P_o^a(\vec{k}^o)^* P_i^{(1)}(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

$$+ \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^o} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp\left[i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)\right] \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

[0022]

[0023] (여기서, $\vec{\theta}_o^{(1)}(\vec{k}^o)$는 상기 출사 경로 수차 보정 세트이고, $P(\vec{k})$는 복소 구경 함수(Complex pupil function)로 아래첨자 'o'는 출사 경로를 'i'는 입사 경로를 의미하고, $\gamma = \exp[-2L/l_s]$ 이고, L는 매질의 두께이고, ls는 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)이고, β는 상기 반사빔 중 다중 산란파의 평균 세기(Average intensity), $\vec{k}^i$는 상기 입력파 벡터이고, $\vec{k}^o$는 반사파 벡터로 $\vec{k}^o = \vec{k}^i + \Delta\vec{k}$ 이다)로 표현될 수 있다.

[0024] 그리고, 상기 (e) 단계 및 상기 (H) 단계에서 상기 시분해 출사 행렬은 상기 최적 입사 경로 수차 보정 세트가 상기 입사 경로 보정 행렬에 반영된 후 시분할 출사 행렬 형태로 재구성되어 보정될 수 있다.

[0025] 또한, 상기 (h) 단계 및 상기 (E) 단계에서 상기 시분해 출사 행렬은 상기 최적 출사 경로 수차 보정 세트가 상기 출사 경로 보정 행렬에 반영된 후 시분할 출사 행렬 형태로 재구성되어 보정될 수 있다.

[0026] 그리고, 상기 (a) 단계 및 상기 (A) 단계에서는 복수의 입사각을 포함하는 복수회의 랜덤 패턴광이 상기 입사빔으로 입사될 수 있다.

발명의 효과

[0027] 상기 구성에 따라 본 발명에 따르면, 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내부의 타겟 오브젝트를 이미징하는데 있어, 산란과 수차를 동시에 보정하여 단일 산란의 누적을 극대화할 뿐만 아니라 이미지 왜곡 현상을 현저히 감소시켜 고심도/고해상도의 이미징이 가능한 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법이 제공된다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트로의 입사빔 및 반사빔의 형태를 나타낸 도면이고,

도 2는 수차에 의한 영향을 확인하기 위한 실험 결과를 설명하기 위한 도면이고,

도 3은 기존의 CASS 방법에 따라 획득된 이미지의 예를 나타낸 도면이고,

도 4는 본 발명에 따른 이미징 방법을 구현하기 위한 실험 셋업 개요도이고,

도 5는 본 발명에 따른 산란 및 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법을 설명하기 위한 도면이고,

도 6 및 도 7은 본 발명에 따른 산란 및 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에서의 각 행렬 및 각 수차 보정 세트를 나타낸 도면이고,

도 8 내지 도 10은 본 발명에 따른 산란 및 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법의 효과를 설명하기 위한 도면이고,

도 11은 본 발명에 따른 산란 및 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법이 적용되는 다른 예를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 이하에서는 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 실시예에 대해 상세히 설명한다.

[0030] 본 발명의 설명에 앞서 강한 다중 산란의 존재 하에서 수차에 의한 영향에 대해 살펴본다.

[0031] 도 1을 참조하여 설명하면, 두꺼운 산란 매질 내에 존재하는 타겟 오브젝트로 입사되는 입사파(평면파)는 $E(x,y,z=0;\vec{k}^i)=\exp[-ik_x^i x-ik_y^i y]$로 표현될 수 있다. 여기서, $\vec{k}^i=(k_x^i,k_y^i)$는 입사파의 횡파 벡터, 즉 파형 벡터이다.

[0032] 두께 L의 산란 매질을 통과하면, 입사파의 최초 모멘텀(Momentum)을 유지하는 파의 세기는 exp(-L/ls)에 의해 약화되는데, ls는 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)로 다중 광 산란에 의해 야기된다. 더욱이, 비산란파는 $\vec{k}i$에 종속하는 위상 지연 $\phi_i(\vec{k}^i)$을 겪게 된다. 그런 다음, 비산란파는 진폭 반사율이 오브젝트 함수 $O(x,y)$로 표현되는 타겟 오브젝트로부터 반사되고, 오브젝트 함수의 푸리에 변환(Fourier transform)인 오브젝트 스펙트럼 $\mathcal{O}(\Delta\vec{k})$에 의한 횡파 벡터를 얻는다. 출사파, 즉 도 1에 도시된 바와 같이 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사파(이하, '반사파'라 함)의 파형 벡터는 $\vec{k}^o=\vec{k}^i+\Delta\vec{k}$로 표현될 수 있고, 반사파는 다중 산란 과정에 의해 약화될 뿐만 아니라, 입사파의 입사각에 종속하는 위상 지연 $\phi_o(\vec{k}^o)$로 표현되는 추가적인 수차를 겪게 된다. 따라서, 광의 이동 시간인 $\tau_0=2L/c$를 갖는 반사파의 각도 스펙트럼은 [수학식 1]과 같이 표현될 수 있다.

[0033] [수학식 1]

[0034] $$\mathcal{E}_o(\vec{k}^o;\vec{k}^i)=\sqrt{\gamma}P_o^a(\vec{k}^i+\Delta\vec{k})\mathcal{O}(\Delta\vec{k})P_i^a(\vec{k}^i)+\sqrt{\beta}\mathcal{E}_o^M(\vec{k}^i+\Delta\vec{k};\tau_0)$$

[0035] [수학식 1]에서, 우측의 첫 번째 항은 단일 산란파를 나타내고, 두 번째 항이 단일 산란파와 동일한 파형 벡터와 이동 시간을 갖는 다중 산란파를 나타내고 있다. 이 때, 나머지의 다중 산란파는 타임-게이팅 검출(Time-gating detection)에 의해 배제될 수 있다.

[0036] [수학식 1]에서 $P_i^a(\vec{k}^i)=P(\vec{k}^i)\exp[-i\phi_i(\vec{k}^i)]$와 $P_o^a(\vec{k})=P(\vec{k}^o)\exp[-i\phi_o(\vec{k}^o)]$는 각각 입사 경로와 반사 경로에서의 복소 구경 함수(Complex pupil function)이고, $P(\vec{k})$는 이상적인 대물렌즈의 구경 함수이다. 이상적인 대물렌즈에서, $P(\vec{k})=1$ for $|\vec{k}|\le k_0\alpha$를 만족하는데, α는 대물렌즈의 개구수(Numerical aperture)이고, k_0는 자유공간(Free space)에서의 파형 벡터의 크기(Magnitude)이며, 그 외의 경우에서 $P(\vec{k})$=0이 된다.

[0037] $\gamma=\exp[-2L/l_s]$는 타겟 오브젝트를 왕복 이동하는 단일 산란파의 세기 감쇄를 나타낸다. β는 카메라에서 검출된 다중 산란파의 평균 세기(Average intensity)로, 이미징 광학, 타임-게이팅 윈도우(Time-gating window), 및 산란 매질의 광학적 특성에 의해 결정된다. 타겟 오브젝트의 정보를 포함하는 단일 산란파는 γ/β가 타겟 오브젝트의 깊이가 증가함에 따라 감소하기 때문에, 강력한 다중 산란파에 의해 모호해질 수 있다.

[0038] 상술한 CASS 방법에서는 단일 산란파의 누적을 통해 강력한 다중 산란에 의한 영향을 제거하였다. CASS 방법에서는 N_m개의 입사파의 파형 벡터에 대한 반사파의 공간 주파수 스펙트라(Spatial frequency spectra)를 측정하였다. 단일 산란파의 적절한 누적을 위해, 동일한 오브젝트 스펙트럼 $\Delta\vec{k}$으로부터 비롯된 반사파를 합산(coherently added)하였다. 이는 [수학식 2]와 같이 나타낼 수 있다.

[0039] [수학식 2]

$$\mathcal{E}_{CASS}(\Delta\vec{k}) = \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o(\vec{k}^i + \Delta\vec{k})$$

$$= \sqrt{\gamma}O(\Delta\vec{k}) \cdot \sum_{\vec{k}^i} P_i^a(\vec{k}^i) P_o^a(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) + \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^i + \Delta\vec{k})$$

[0040]

[0041] 여기서, [수학식 2]의 우측의 첫 번째 항의 합산(summation)은 입사 경로 및 반사 경로의 복소 구경 함수 간의 교차 상관관계(Cross-correlation)이고, $\sqrt{N_m}$에 비례하는 오브젝트 함수를 증폭시킨다. 그에 반해, 다중 산란파의 진폭은 $\sqrt{N_m}$에 비례하여 커진다. 따라서, 세기의 신호대 잡음비는 γ/β에서 $(\gamma/\beta)N_m$로 증가하고, 단일 산란 세기는 $N_m > \beta/\gamma$일 때 다중 산란 세기보다 더 커진다.

[0042] 그러나, 수차의 존재는 단일 산란 신호의 누적을 현저하게 약화시킨다. 이는 복소값 구경 함수(Complex-valued pupil function)의 교차 상관관계가 불균등(Inequality)에 의해 항상 수차가 없는 이상적인 경우보다 작기 때문이다. 수차에 의한 영향을 수치화하기 위해, 본 발명에서는 수차가 존재할 때의 총 누적 단일 산란 세기와 수차가 존재하지 않을 대의 총 누적 단일 산란 세기 간의 비율인 파라미터 η을 [수학식 3]과 같이 정의한다.

[0043] [수학식 3]

$$\eta = \frac{\left\| \sum_{\vec{k}^i} P_i^a(\vec{k}^i) P_o^a(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) \right\|_{\Delta\vec{k}}^2}{\left\| \sum_{\vec{k}^i} P(\vec{k}^i) P(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) \right\|_{\Delta\vec{k}}^2} \leq 1$$

[0044]

[0045] 여기서, $\|f(\Delta\vec{k})\|_{\Delta\vec{k}}^2$는 모든 $\Delta\vec{k}$에 대한 f의 절대값 제곱의 합산을 의미한다. 수차로 인해, CASS 방법에 따른 이미징의 신호 대 잡음비는 $(\gamma/\beta)N_m$에서 $(\eta\gamma/\beta)N_m$로 감소한다. 이는, 앞서 언급한 바와 같이, $N_m > \beta/\gamma$가 만족하더라도 타겟 오브젝트를 분석할 수 없다는 것을 암시한다.

[0046] 수차에 의한 영향을 평가하는 기준으로, 본 발명에서는 Strehl ratio(S)와, 수차가 있는 경우와 없는 경우의 포인트 분포 함수(Point-spread-function)의 피크 세기의 비율(η)을 사용한다. S와 η는 수차가 증가함에 따라 약화되지만, 일반적으로 S<η이다. 기존의 적응 광학 분야에서는 S≥0.1에 대응하여 수차를 처리할 수 있다. 그러나, 본 발명에서 다루는 수차의 정도는 S가 기존의 적응 광학 분야에서 핸들링할 수 있는 것보다 2 자리수 이상으로 작다. 신호 세기의 감소에 더하여, 교차-상관관계가 측정된 오브젝트 함수에 $\Delta\vec{k}$에 종속하는 위상 지연이 더해지게 되고, 이는 재구성된 타겟 오브젝트의 이미지를 왜곡시킨다.

[0047] 도 2는 수차에 의한 영향을 확인하기 위한 실험 결과를 설명하기 위한 도면이다. 도 2을 참조하여 설명하면, $\beta = 20\gamma$이고, N_m=1245인 조건하에서 시뮬레이션을 수행되었다. 시뮬레이션에서 사용된 FOV(Field of view)의 크기가 20㎛×20㎛^{2}이다. 또한, 본 발명에서는 도 2의 (a) 및 (b)에 각각 도시된 바와 같은, η=1/400 및 S=1/3600를 야기하는 임의의 수차 $\phi_i(\vec{k}^i)$ 및 $\phi_o(\vec{k}^o)$을 적용하였다.

[0048] 상기와 같은 두 개의 복소 구경 함수의 교차-상관관계 지도의 진폭은, 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 1 이하였고, 이는 단일 산란의 누적이 잘 이루어지지 않음을 암시한다.

[0049] 도 3의 (a) 및 (b)는 각각 다중 산란이 존재하지 않은 상태에서, 수차가 없는 기존의 CASS 방법에 따른 이미지와, 수차가 있는 기존의 CASS 방법에 따른 이미지를 각각 나타내고 있다. 도 3의 (a) 및 (b)에 도시된 바와 같이, 타겟 오브젝트는 600nm 거리로 분리된 한 쌍의 포인트 파티클로, 소스 파장 λ=800nm에서 0.8NA에 대한 회절-한계 해상도에 상응한다. 예상대로, 수차에 의한 영향에 의해, 두 파티클이 완벽하기 구분되어 이미징되지

않음을 확인할 수 있다.

[0050] 도 3의 (c) 및 (d)는 각각 다중 산란이 존재하는 상태에서, 수차가 없는 기존의 CASS 방법에 따른 이미지와 수차가 있는 기존의 CASS 방법에 따른 이미지를 나타내고 있다.

[0051] 도 3에 도시된 바와 같이, 산란과 수차가 동시에 존재하는 경우(도 3의 (d) 참조), 수차만 존재하는 케이스(도 3의 (b) 참조)에 비해 두 파티클이 명확하게 구분되도록 이미징하는 것이 더 어려운데, 단일 산란파의 누적이 적절하게 이루어지지 않을 뿐만 아니라, 단일 산란파가 다중 산란파에 의해 감춰지기 때문이다.

[0052] 이하에서는 도 4 및 도 5를 참조하여, 본 발명에 따른 산란과 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법에 대해 상세히 설명한다. 본 발명에서는 도 1 및 도 4에 도시된 바와 같이, 입사파가 매질에 입사되어 입사 경로를 지난 후, 타겟 오브젝트로부터 반사되어 다시 매질을 따라 반사 경로를 거쳐 이미징되는 반사의 경우를 예로 한다.

[0053] 도 4는 본 발명에 따른 이미징 방법을 구현하기 위한 실험 셋업 개요도이다. 도 4를 참조하여 설명하면, 중심파장 800 nm, 대역폭이 25 nm인 Ti-Sapphire 펨토초 레이저와 Mach-Zhender 간섭계를 이용한 간섭 현미경 시스템이 적용된다.

[0054] 레이저에서 나온 광은 렌즈(L1)를 거쳐 광 분할기(BS1)에서 샘플빔(Sample beam)과 기준빔 (Reference beam)으로 분할되어 진행한다. 샘플빔의 경로에는 공간 광 변조기(SLM : Spatial light modulator)가 배치되어 샘플에 입사하는 광의 패턴, 즉 입사각을 조절한다. 본 발명의 실시예에서는 2800장의 랜덤한 패턴을 공간 광 변조기에 띄워 샘플에 입사되는 입사빔으로 적용한다.

[0055] 공간 광 변조기를 거친 랜덤 패턴의 입사빔(이하, '랜덤 패턴광'이라 함)은 4f 이미징 시스템을 거쳐 샘플로 입사된다. 그리고, 샘플 내의 매질을 거쳐 타겟 오브젝트로부터 반사된 광은 4f 이미징 시스템을 거쳐 카메라로 전달된다. 이와 같은 과정에서 광 분할기(BS6)를 통해 샘플로부터 반사된 반사빔은 기준빔과 결합되어 간섭광을 형성하고, 이를 통해 간섭 이미지가 카메라에 의해 획득된다. 여기서, 샘플빔 및 반사빔의 광 경로에는 광 분할기(BS3), 렌즈(L2, L3, L4, L5, L6)가 배치될 수 있다.

[0056] 한편, 기준빔의 광 경로에 회절격자(DG)를 놓고 회절격자에 의한 1차 회절빔 만을 걸러내어 BS6을 통해 샘플에서 반사된 반사빔과 탈축 홀로그램을 형성하도록 한다. 여기서, 기준빔의 광 경로 경로에 스캔 미러(Scan mirror)를 놓아 기준빔의 광 경로의 길이를 조절할 수 있다. 본 발명의 일 실시예로 사용한 펨토초 레이저는 약 10 μm의 가간섭 거리를 갖는 제품이 적용되었다. 즉, 샘플빔과 기준빔의 경로차가 가간섭 거리 이내에 있을 경우에만 간섭 패턴을 만들어 내고, 푸리에 변환을 통해 간섭 성분만을 걸러내어 반사빔의 시분해 복소 이미지를 얻어낼 수 있다.

[0057] 여기서, 샘플빔 및 반사빔의 광 경로, 그리고 기준빔의 광 경로에는 광 분할기(BS3, BS4, BS5)), 렌즈(L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12)가 배치될 수 있다.

[0058] 도 5는 본 발명에 따른 산란 및 수차를 동시에 야기하는 매질 내의 타겟 오브젝트를 이미징하는 방법을 설명하기 위한 도면으로, 도 4에 도시된 실험 셋업을 이용하여 구현하는 것을 예로 한다.

[0059] 먼저, 입사빔의 입사각을 가변시키면서 타겟 오브젝트로부터 반사되는 복수의 반사빔을 획득한다. 본 발명에서는 상술한 바와 같이, 공간 광 변조기를 이용하여 복수의 입사각으로 구성된 랜덤 패턴광을 n회, 예컨대 2800회의 랜덤 패턴광을 이용하여 2800 장의 간섭 이미지를 획득하는 것을 예로 한다(S10). 여기서, 입사빔을 획득하기 위해, 샘플단에 거울을 놓고, 샘플의 측정시와 동일한 2800장의 랜덤 패턴광을 이용하여 입사빔에 대한 복소 이미지를 측정한다.

[0060] 그런 다음, 거울에 대해 측정한 입사빔과, 샘플에 대해 측정된 반사빔을 이용하여 도 6의 (a)에 도시된 바와 같은 시분해 반사 행렬을 구성한다(S11). 여기서, 시분해 반사 행렬은, 도 6의 (a)에 도시된 바와 같이, 입사빔의 파형 벡터, 즉 입사파 벡터 $\vec{k}^i$와, 반사빔의 파형 벡터, 즉 반사파 벡터 $\vec{k}^o$로 구성된다.

[0061] 그런 다음, 시분해 반사 행렬을, 도 6의 (b)에 도시된 입사 경로 수차 보정 행렬로 재구성한다(S12). 여기서, 입사 경로 수차 보정 행렬은 반사파 벡터와 입사파 벡터의 차와, 입사파 벡터로 구성된다.

[0062] 그런 다음, 입사 경로 수차 보정 행렬에 입사 경로 수차 보정 세트 $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$가 반영되고, 반사빔과 입사빔 간의

차이 스펙트럼($\Delta\vec{k}$)의 복소합 토탈 세기가 최대가 되는 최적 입사 경로 수차 보정 세트 $\theta_i(\vec{k}^i)$가 산출된다(S13).

[0063] 이와 같이, 산출된 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 시분해 반사 행렬을 보정하게 되면, 입사 경로에서 야기되는 수차의 보정이 가능하게 된다.

[0064] 이하에서는, 입사 경로에서 발생하는 수차의 보정 과정을 이론적으로 설명한다.

[0065] 먼저, 입사 경로에서 야기되는 수차를 $\phi_i(\vec{k}^i)$라 하고, 이를 보정하기 위한 입사 경로 수차 보정 세트를 상술한 바와 같이, $\theta_i(\vec{k}^i)$로 가정한다.

[0066] 임의의 입사 경로 수차 보정 세트 $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$를 반사빔과 입사빔 간의 차이 스펙트럼($\Delta\vec{k}$)에 적용하면, [수학식 4]와 같이 표현될 수 있다. 여기서, [수학식 4]는 [수학식2]를 통해 도출되는 바, 그 상세한 설명은 생략한다.

[0067] [수학식 4]

$$\mathcal{E}_{CLASS}^{(1)}(\Delta\vec{k}) = \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o(\vec{k}^i + \Delta\vec{k})\, e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

[0068] $$= \sqrt{\gamma}\mathcal{O}(\Delta\vec{k}) \cdot \textstyle\sum_{\vec{k}^i} P_i^a(\vec{k}^i) P_o^a(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)} + \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^i} \mathcal{E}_o^M(\vec{k}^i + \Delta\vec{k}) e^{i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)}$$

[0069] 그런 다음, 반사빔과 입사빔 간의 차이 스펙트럼($\Delta\vec{k}$)의 복소합 토탈 세기가 최대화하는 $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$의 세트를 [수학식 5]를 통해 산출하여, 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 산출한다.

[0070] [수학식 5]

[0071] $$\max_{\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)} \sum\nolimits_{\Delta\vec{k}} \left|\mathcal{E}_{CLASS}^{(1)}(\Delta\vec{k})\right|^2$$

[0072] [수학식 5]에서 개별적인 $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$를 0에서 2π까지 변화시키면서 반사빔과 입사빔 간의 차이 스펙트럼($\Delta\vec{k}$)의 복소합 토탈 세기를 최대화하는 특정값 $\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)$를 최적 입사 경로 수차 보정 세트로 찾게 된다.

[0073] 단일 산란파가 상기와 같은 과정에 관여하게 되고, 다중 산란파는 적게 관여한다는 점에 주목할 수 있다. 상이한 입사각에 의해 획득되는 다중 산란파의 맵은 서로에 대해 상관되지 않으며, 위상 보정을 곱한 후에 남아 있다. 따라서, 반시빔의 스펙트럼의 토탈 세기를 최대화 과정은 단일 산란파의 수차 보정에만 기여하게 된다.

[0074] 다시 도 5 및 도 6을 참조하여 설명하면, 상기와 같은 과정을 통해 산출된 최적 입사 경로 수차 보정 세트는 도 6의 (c)에 도시된 바와 같다. 여기서, 본 발명에서는 최적 입사 경로 수차 보정 세트를 입사 경로 보정 행렬에 반영한 후 시분할 반사 행렬 형태로 재구성함으로써, 시분할 반사 행렬의 입사 경로의 수차가 보정되는 것을 예로 한다. 이 때, 최적 입사 경로 수차 보정 세트는 입사 경로 보정 행렬의 각각의 열에 반영되는데, 하나의 열에는 동일한 최적 입사 경로 수차 보정값이 반영된다.

[0075] 상기와 같이, 시분할 반사 행렬의 입사 경로의 수차가 보정되면, 시분할 반사 행렬을 반사 경로 수차 보정 행렬로 재구성한다(S16). 여기서, 반사 경로 수차 보정 행렬은 도 7의 (a)에 도시된 바와 같이, 반사 벡터와, 입사파 벡터 및 반사파 백터의 차로 구성된다.

[0076] 보다 구체적으로 설명하면, 반사 경로 수차 보정 행렬은 반사빔에 따른 입사빔의 변화를 나타내는 것으로, 반사빔이 입사빔($-\vec{k}^o$)으로 하여 타겟 오브젝트로 입사되고, 입사빔이 반사빔($-\vec{k}^i = -(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})$)으로 검출되는 것을 가정한다. 이와 같은 역 과정(Phase conjugation)을 통해, 반사 경로 수차 보정 행렬에 대응하는 역위상의 입사빔과 반사빔 간의 차이 스펙트럼에 임의의 반사 경로 수차 보정 세트 $\vec{\theta}_o^{(1)}(\vec{k}^o)$가 반영되면, [수학식 6]

과 같이 표현될 수 있다.

[0077] [수학식 6]

$$\varepsilon_{CLASS}^{pc}(\Delta\vec{k}) = \sqrt{\gamma}O^{-1}(\Delta\vec{k}) \cdot \sum_{\vec{k}^o} P_o^a(\vec{k}^o)^* P_i^{(1)}(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

$$+ \sqrt{\beta} \sum_{\vec{k}^o} \varepsilon_o^M(\vec{k}^o - \Delta\vec{k})^* \exp\left[i\theta_i^{(1)}(\vec{k}^i)\right] \exp i\theta_o^{(1)}(\vec{k}^o)$$

[0078]

[0079] 그런 다음, [수학식 5]에서와 동일하게, 역위상의 입사빔과 반사빔 간의 차이 스펙트럼의 복소합 토탈 세기가 최대가 되게 하는 $\vec{\theta}_o^{(1)}(\vec{k}^o)$ 를 산출하여 최적 반사 경로 수차 보정 세트를 산출하게 된다(S16).

[0080] 그런 다음, 최적 반사 경로 수차 보정 세트를 이용하여 다시 시분할 반사 행렬이 보정되는데(S17), 최적 반사 경로 수차 보정 세트가 반해 경로 보정 행렬에 반영된 후 시분할 반사 행렬 형태로 재구성되어 보정되는 것을 예로 한다. 여기서, 최적 반사 경로 수차 보정 세트는 반사 경로 보정 행렬의 각각의 행에 반영되는데, 하나의 행에는 동일한 최적 반사 경로 수차 보정값이 반영된다.

[0081] 여기서, 본 발명에서는 상술한 입사 경로의 수차 보정과 반사 경로의 수차 보정 과정, 즉 S12 단계 내지 S17 단계가 기 등록된 기준에 따라 반복적으로 수행되는 것을 예로 한다. 도 5에서는 기 설정된 횟수, 예컨대, K 회가 반복 진행되는 것을 예로 하고 있으나, 도 6의 (c) 및 도 7의 (b)에 도시된 최적 입사 경로 수차 보정 세트 및/또는 최적 반사 경로 수차 보정 세트의 값들이 '0'에 근접할 때까지 반복 수행되도록 설정될 수 있다.

[0082] 상기와 같은 과정을 통해, 수차 보정이 완료되면, 시분할 반사 행렬 내의 동일한 반사빔 성분들의 누적에 의해 최종적인 이미지가 획득된다(S19). 여기서, 반사빔 성분들의 누적을 통한 이미지 획득은 상술한 CASS 방법에 대응하게 된다. 즉, 누적 과정을 통해 다중 산란의 영향을 제거하게 된다.

[0083] 이하에서는, 도 8 내지 도 10을 참조하여 본 발명에 따른 이미징 방법에 따른 효과를 설명하기 위한 실험 결과에 대해 설명한다.

[0084] 도 8의 (a)에 도시된 바와 같이, 6.0㎜의 곡률 반경을 가지고 y축 방향을 따라 원통형의 그루브 형상을 갖는 불균일한 수차 층(Aberrating layer)을 준비한다. 그리고, 수차 층과 매개물질(water, n=1.33) 간의 굴절률의 불일치 때문에, 원통형의 그루브는 비대칭적인 수차, 예컨대, 난시(astigmatism)를 야기한다. 7ls-두께의 산란층(scattering layer)은 수차 층의 아래에 위치시킨다. 이와 같은 배치는 수차와 산란의 독립적인 제어를 가능하게 한다.

[0085] 그리고, 수차 층 및 산란 층의 아래에 금 도금된 타겟 오브젝트를 위치시킨다. 금 도금된 타겟 오브젝트의 가는 선들의 간격은 600㎚로 배치시킨다. 0.8NA에 상응하는 공간 주파수 대역폭과 30ㅅ30㎛^{2}의 조사 영역에 의해 결정되는 모든 직교 프리 모드(orthogonal free mode)를 커버하기 위해,2800개의 랜덤 패턴광을 조사하여, 도 9의 (a)에 도시된 바와 같은 시분해 반사 행렬을 구성하였다.

[0086] 그리고, 도 9의 (a)에 도시된 시분해 반사 행렬을 이용하여, 기존의 CASS 방법과 본 발명에 따른 이미징 방법을 이용하여 각각 이미지를 생성하였고, 도 9의 (b)에 도시된 바와 같이 기존의 CASS 방법은 수차에 의해 해상도가 극히 낮아 금 도금된 타겟의 구별이 어려웠다. 반면, 본 발명에 따른 이미징 방법에서는 도 9의 (b)에 도시된 바와 같이, 타겟의 구별이 명확해짐을 확인할 수 있다.

[0087] 다시, 도 8의 (b)는 생물학적 조직의 실험을 위해, 도 8의 (a)에 도시된 타겟 상부에 생쥐의 뇌 조직의 조각을 위치시켰다. 뇌 조직은 대략 산란 평균 자유 경로(scattering mean free path)가 대략 100㎛인 500㎛ 두께의 조각이 사용되었다. 도 8의 (b)에 도시된 바와 같은 산란 및 수차를 야기하는 생물학적 매질에 대해 동일한 실험을 수행하였으며, 도 10의 (a) 및 (b)에 각각 도시된 바와 같이, 기존의 CASS 방법과 본 발명에 따른 이미징 방법에 따라 이미지를 획득하였다.

[0088] 도 9에서와 마찬가지로, 생물학적 조직에 대해서도 본 발명에 따른 이미징 방법이 수차와 산란을 동시에 제거해 줌으로써, 고심도 고해상도의 이미징이 가능함을 확인할 수 있다.

[0089] 전술한 실시예에서는, 도 5에 도시된 바와 같이, 입사 경로의 수차가 먼저 보정되고 반사 경로의 수차가 보정되는 것을 예로 설명하고 있으나, 그 반대로 반사 경로의 수차 보정 후에 입사 경로의 수차가 보정될 수 있음은

물론이다.

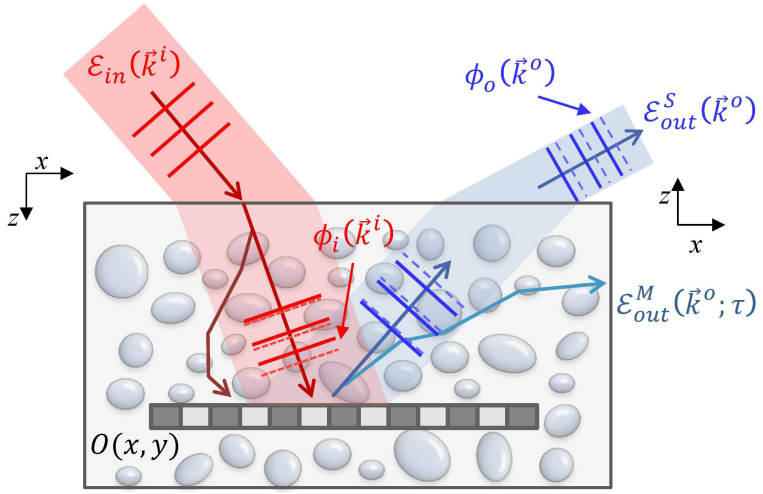
[0090] 또한, 전술한 실시예들에서는 도 1에 도시된 바와 같이, 타겟에서 반사되는 반사빔에 대해 적용되는 것을 예로 하고 있다. 이외에도, 도 11에 도시된 바와 같이, 산란과 수차를 야기하는 매질 내부에 위치하는 타겟 오브젝트가 입사빔을 투과시키고, 투과빔을 촬영하는 경우에도 본 발명에 따른 이미징 방법이 적용 가능하게 된다.

[0091] 이 경우, 전술한 실시예에 대한 설명에서 '반사'라는 표현은 '투과'로 대체되어 설명이 가능하며, 반사의 경우와 동일하게 본 발명의 기술적 사상이 투과에도 적용 가능하다. 본 명세서는 '반사'와 '투과'의 개념을 포함하는 '출사'의 개념을 사용하며, 타겟 오브젝트의 정보를 가지고 타겟 오브젝트로부터 나오는 빔을 '출사빔'으로 정의할 수 있으며, 출사빔에는 형광이 포함될 수 있음은 물론이다.

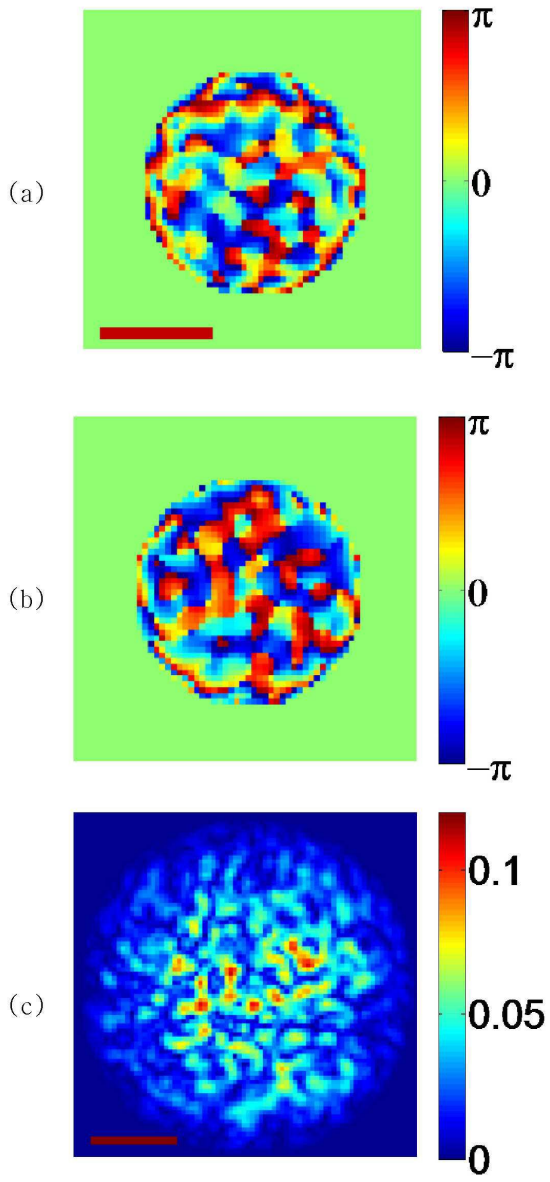
[0092] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

도면

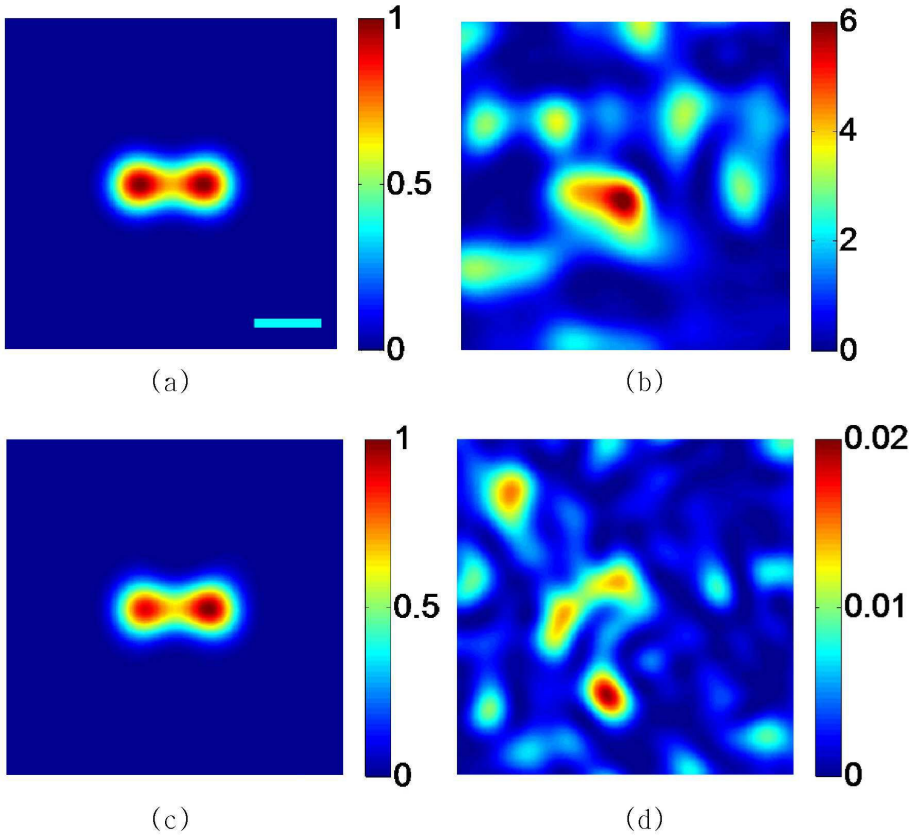
도면1



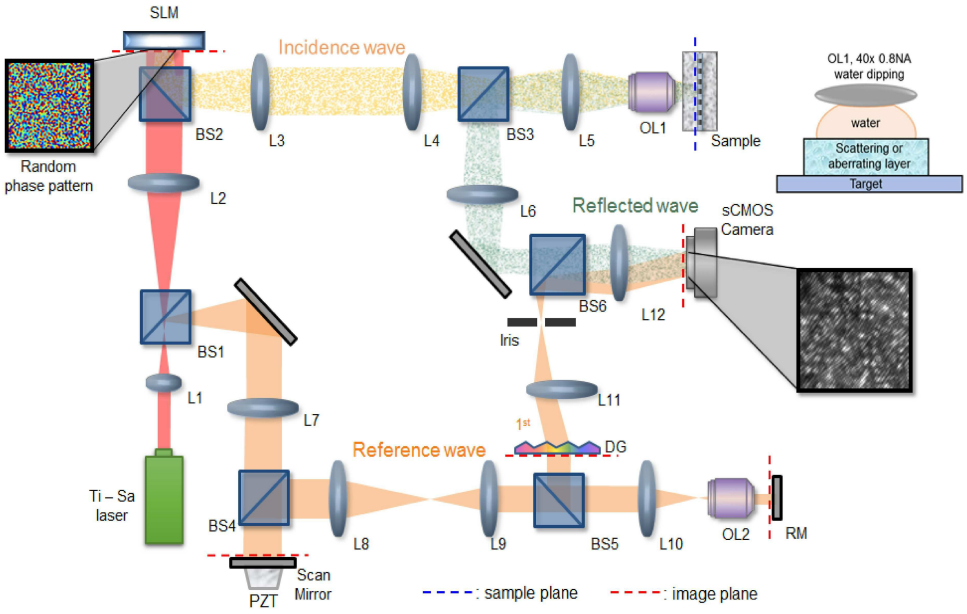
도면2



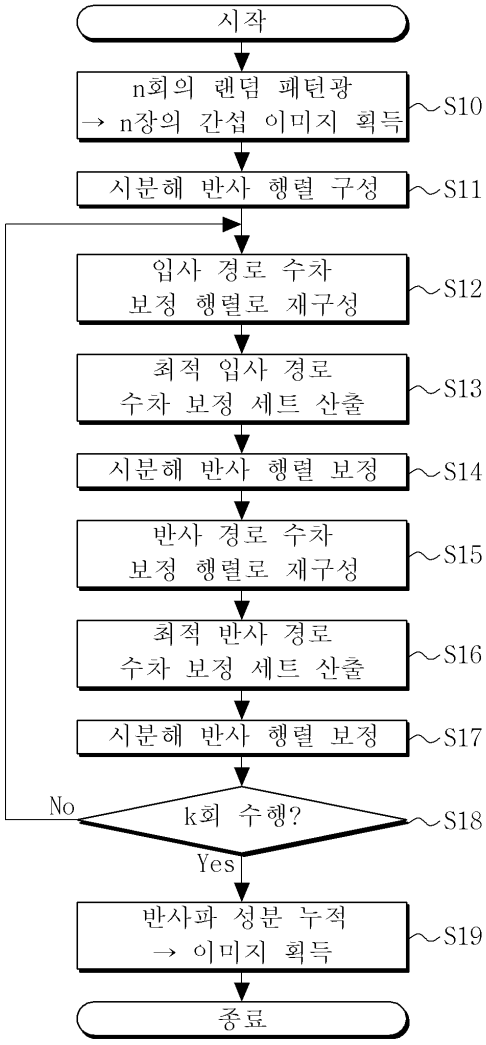
도면3


1
0.5
0
6
4
2
0
(a)
(b)
1
0.5
0
0.02
0.01
0
(c)
(d)

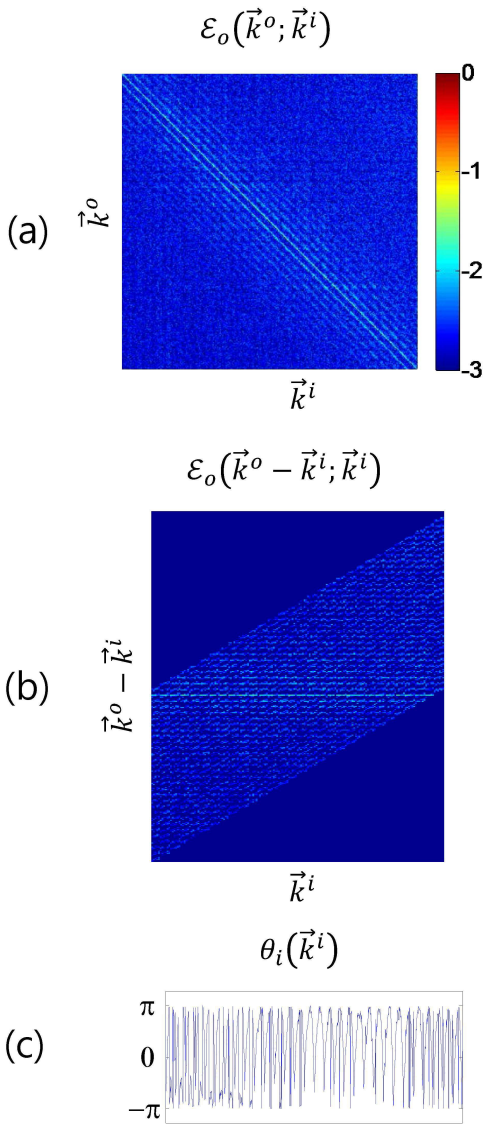
도면4


SLM
Incidence wave
Random phase pattern
BS2
L3
L4
BS3
L5
OL1
Sample
OL1, 40x 0.8NA water dipping
water
Scattering or aberrating layer
Target
L2
L6
Reflected wave
sCMOS Camera
BS6
L12
Iris
BS1
L1
L7
L11
1st
DG
Reference wave
Ti – Sa laser
BS4
L8
L9
BS5
L10
OL2
RM
Scan Mirror
PZT
: sample plane
: image plane

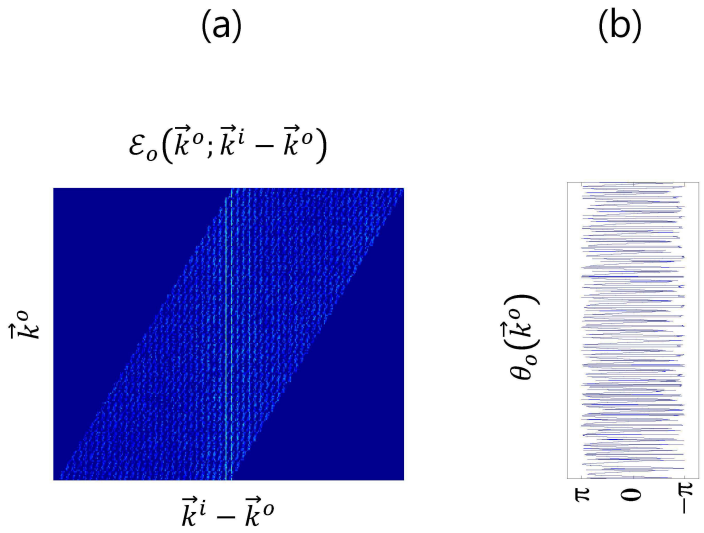
도면5


시작
n회의 랜덤 패턴광
→ n장의 간섭 이미지 획득
S10
시분해 반사 행렬 구성
S11
입사 경로 수차
보정 행렬로 재구성
S12
최적 입사 경로
수차 보정 세트 산출
S13
시분해 반사 행렬 보정
S14
반사 경로 수차
보정 행렬로 재구성
S15
최적 반사 경로
수차 보정 세트 산출
S16
시분해 반사 행렬 보정
S17
No
k회 수행?
S18
Yes
반사파 성분 누적
→ 이미지 획득
S19
종료

도면6

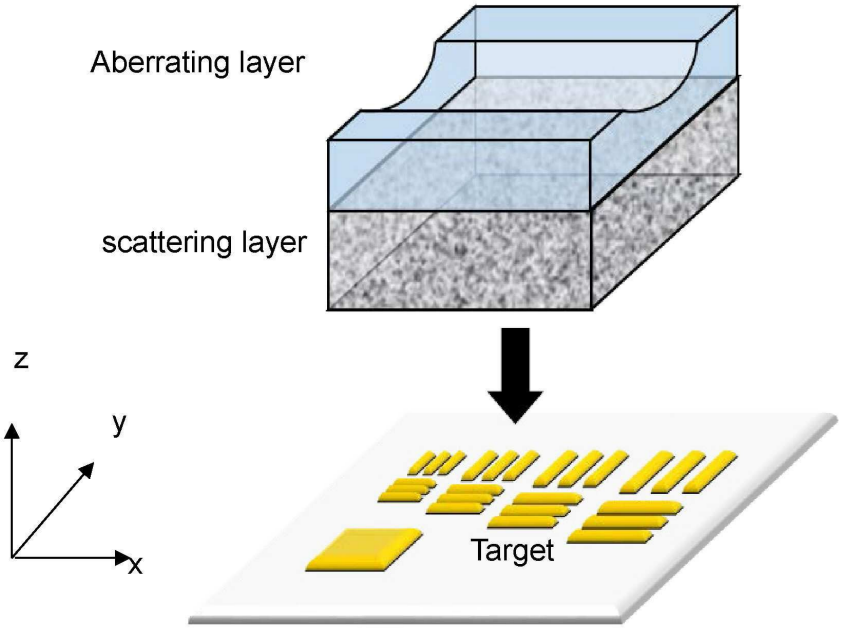

(a)
$\mathcal{E}_o(\vec{k}^o;\vec{k}^i)$
$\vec{k}^o$
$\vec{k}^i$
0
-1
-2
-3
(b)
$\mathcal{E}_o(\vec{k}^o-\vec{k}^i;\vec{k}^i)$
$\vec{k}^o-\vec{k}^i$
$\vec{k}^i$
(c)
$\theta_i(\vec{k}^i)$
π
0
−π

도면7

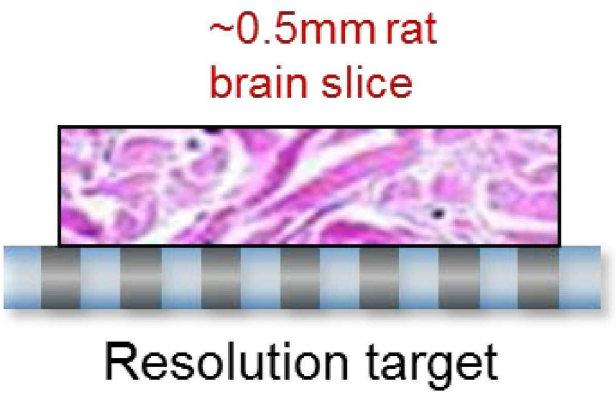

(a)
(b)
$\varepsilon_o(\vec{k}^o;\vec{k}^i-\vec{k}^o)$
$\vec{k}^o$
$\vec{k}^i-\vec{k}^o$
$\theta_o(\vec{k}^o)$
π
0
−π

도면8

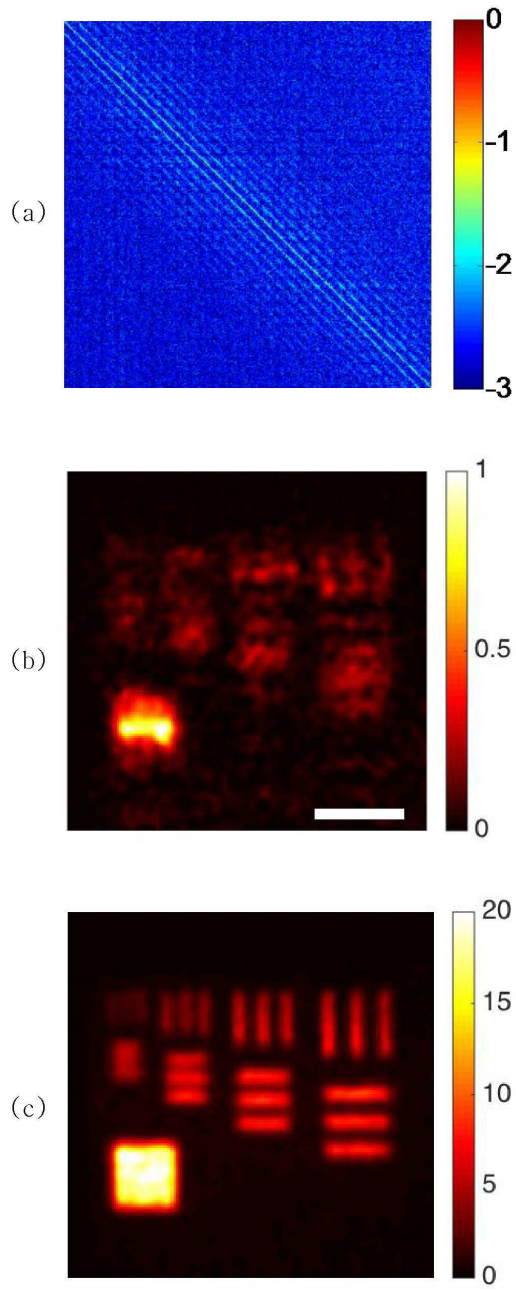
(a)


Aberrating layer
scattering layer
z
y
x
Target

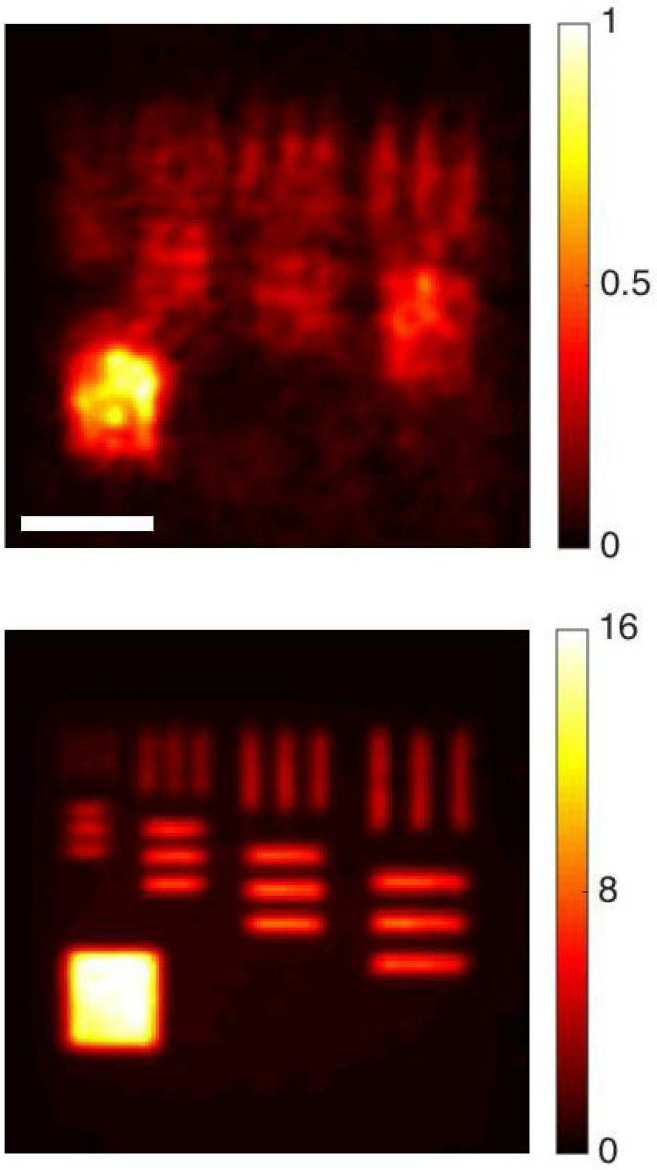
(b)


~0.5mm rat
brain slice
Resolution target

도면9



도면10



도면11

