

불규칙 매체를 통한 컴퓨터이셔널 이미징의 최근 연구 동향

장 환 철*, 윤 창 형*, 정 의 현**, 최 원 식*, 이 흥 노°

Recent Progress in Computational Imaging Through Turbid Media

Hwanchol Jang*, Changhyeong Yoon*, Euiheon Chung**, Wonshik Choi*, Heung-No Lee°

요 약

불규칙 매체를 투과하는 광학적 이미징 시스템은 피부나 생물학적 조직등의 내부를 비침습적 이미징 기법을 사용해 관찰할 수 있게 해줄 것으로 큰 기대를 받고 있다. 불규칙 매체를 통한 이미징은 대개 불규칙 매체의 투과 특성을 전달 행렬로 모델링 및 측정하고, 측정된 전달 행렬을 사용하여 이미지를 복구하는 방식을 사용한다. 이러한 전달 행렬 기반의 이미징 방법은 많은 양의 데이터를 측정 하고 후 신호 처리를 해야 한다는 어려움을 가지고 있다. 최근에는, 이 데이터 획득 문제를 압축센싱이라는 방법을 사용해 해결할 수 있다는 결과들이 있었다. 압축센싱은 상대적으로 새로운 신호 획득 및 복구 체계로써 아주 적은 양의 신호 측정만으로도 신호를 정확하게 복구해 낼 수 있다. 본 논문에서는 불규칙 매체를 통과하는 이미징에서의 전달 행렬 기반의 이미지 복구 방법이 검토되며, 또한 압축센싱을 사용한 최신 연구 동향을 소개하고자 한다.

Key Words : Imaging through turbid media, Compressed Sensing, Inverse Problem

ABSTRACT

It is expected that the techniques of optical imaging through turbid media enables non-invasive imaging through human skin and biological tissues. In recent years, many researches have shown that imaging through turbid media can be made possible by measuring the transmission matrix (TM) of the turbid medium and utilizing it for image recovery. However, this TM based image recovery requires a huge amount of data acquisition and post signal processing of them. Very recently, there were new results that this problem of huge data acquisition and processing can be resolved by using the compressed sensing (CS) framework. CS is a relatively new signal acquisition and reconstruction framework which makes possible to recover the signal of interest correctly with significantly smaller number of signal measurements. In this paper, the TM-based image recovery in imaging through turbid media is reviewed and the recent progress made by using CS is introduced.

※ 이 논문은 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (중견연구자-도약연구사업, N0. 2013-035295)

• First Author : School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology, hcjang@gist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology, heungno@gist.ac.kr, 정회원

* Department of Physics, Korea University, yncghg@korea.ac.kr, wonshik@korea.ac.kr

** Department of Medical System Engineering and School of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology, ogong50@gist.ac.kr

논문번호 : KICS2014-10-428, Received October 22, 2014; Revised December 11, 2014; Accepted December 11, 2014

1. 서 론

생체 조직, 각 유리, 하얀색 페인트와 같은 불규칙 매체(turbid media)는 비균질(inhomogeneous) 굴절율(refractive index)을 가지고 있다. 광파(light wave)들은 굴절율이 다른 부분을 만날 때 진행방향이 바뀌게 되는데 불규칙 매체는 이러한 변화가 복합적으로 존재하여 이를 통과하는 광파들이 다중산란(multiple scattering)을 겪게 만든다. 다중산란은 광파들의 방향과 경로를 불규칙화 하게 하는데, 이렇게 불규칙화 된 광파들이 서로 간섭(interference)을 일으키게 되면서 이 매체의 출력 광파들은 아주 복잡한 스펙클(speckle) 패턴을 나타내게 된다. 이 패턴은 불규칙 매체를 통과하기 전 광파들의 모습을 완전히 잃어버려서 이전의 모습을 직접적으로 관측할 수가 없게 된다. 이런 현상은 불규칙 매체를 통과하는 빛의 투과 깊이가 늘어날수록 커지게 되는데 이로 인해 더욱더 복잡한 출력 스펙클 패턴을 가지게 된다. 이로 인해, 불규칙 매체의 투과는 이미징을 위해 최대한 피해야 하는 문제점으로 인식되었고, 일정거리 이상의 불규칙 매체의 투과나 강력한 불규칙 매체의 투과는 이미징을 불가능하게 하는 요소로 여겨져 왔다¹⁾.

최근에 이런 불규칙 매체에서의 다중산란을 상쇄시켜 이미징을 가능케 할 수 있다는 방법이 발표되어 커다란 관심을 받고 있다¹⁻³⁾. 이들은 시간 독립적인 매체에서는 빛의 산란 작용이 입력 정보들을 스크램블 시키지만, 정보의 손실을 가져오진 않는다는 사실에 주목하였다. 불규칙 매체에서의 스크램블링 작용과 이로 인해 발생하는 스펙클 패턴은 실은 일정 시간 동안 결정론적(deterministic)이며 따라서 이 결정론적인 스크램블 작용을 알고 있다면 불규칙 매체의 입력

광파를 복구 해 낼 수 있다. 여기에서 사용된 방법은 전달 행렬(transmission matrix)이라 부르는 불규칙 매체의 입, 출력 반응을 측정하여 얻어낸 후, 이 전달 행렬의 역 연산을 다중 산란된 광파로부터 얻어낸 벡터에 행해주는 산란 상쇄를 해주는 것이다²⁾. 이 방법을 통해 불규칙 매체를 통과하는 여러 이미징 시스템이 성공적으로 이뤄졌다. 뿐만 아니라, 이 불규칙 매체가 기존 광학 시스템의 회절 제약 공간 해상도를 뛰어넘을 수 있는 도구가 될 수 있다는 결과도 보였다³⁾. 이는 생체 조직을 통과한 타겟의 관측이 큰 도움이 되는 생명 의학 이미징 등 분야에서 큰 관심을 받아 많은 연구가 진행 중이다.

하지만, 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템은 많은 데이터의 측정과 처리를 필요로 한다는 문제를 가지고 있다. 전달 행렬의 측정을 위해서는 입력 광파들에 대한 불규칙 매체의 반응을 측정해야 하는데, 더 정확한 입력 광파들의 반응을 알기 위해서는 많은 기저(basis) 입력 광파들에 대한 반응을 측정해야 한다. 뿐만 아니라, 단 한번의 인버전(inversion)이 좋은 품질의 이미지를 제공해 주지 못한다. 이는 노이즈 또는 전달 행렬의 측정의 오류로 인해 이미지 복구 후에도 적지 않은 스펙클이 남아 있기 때문이다. 이 스펙클을 제거하기 위해서는 많은 수의 비간섭적인(incoherent) 샘플들로부터 복구한 이미지들의 평균화(averaging) 작업이 필요하다³⁾. 전달 행렬 측정과 평균화 작업을 위해서는 많은 데이터의 측정이 필요하며 이는 계산, 메모리, 시간 복잡도의 증가를 야기한다.

본 논문에서는 불규칙 매체를 통한 이미징 시스템 가운데 전달 행렬을 사용하는 기본적 이미지 복원 방법과 그 문제점들을 알아보고 압축센싱을 응용해 이를 극복한 사례를 살펴보려한다.

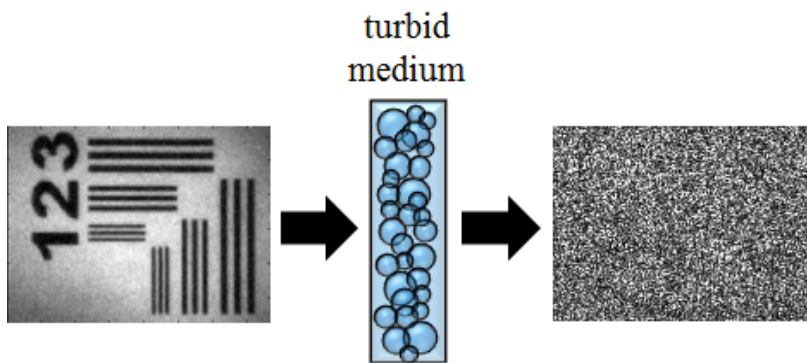


그림 1. 불규칙 매체를 통과한 이미지의 스펙클 패턴
Fig. 1. Speckle pattern of image propagated through turbid media

II. 전달 행렬을 이용하는 기본 이미지 복원

불규칙 매체를 통과한 광파를 카메라에서 얻어낸 이미지 \mathbf{r} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{T}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{T} 는 전달 행렬, \mathbf{s} 는 불규칙 매체를 통과하기 전의 광파, \mathbf{n} 은 카메라 이미지에서의 잡음 성분이며 여기서는 이 성분이 정규분포를 따르는 것으로 가정한다. 이때 각 벡터 \mathbf{r} , \mathbf{s} , \mathbf{n} 은 2차원 이미지를 벡터화(vectorization) 시킨 것이며, \mathbf{T} 의 각 열들은 각 기저 입력 광파에 대한 불규칙 매체의 출력 반응 이미지를 벡터화 시킨 것이다. 여기에서 각 변수들은 복소수의 요소들로 구성되는데, 카메라에서 얻어지는 광파의 강도(intensity) 정보인 양자화 된 실수 값뿐 아니라 광파의 위상(phase) 정보까지 포함하는 복소수 값을 얻기 위해서 홀로그래피 기법이 사용된다^{2,3)}.

여기서 \mathbf{r} 은 불규칙 매체의 다중산란에 의해서 본래의 광파인 \mathbf{s} 의 형태를 잃게 되고 복잡한 스펙클 패턴을 가지게 된다. 원래의 이미지를 복구하기 위해서는 다중산란을 상쇄시키는 작업이 필요한데, 이 작업은 두 가지 단계로 이뤄진다. 첫 번째 단계는 전달 행렬(\mathbf{T})을 측정하는 것이다^{2,3)}. 이를 위해 각 기저 입력

광파들을 불규칙 매체에 통과시키고 그 매체를 통과한 출력 이미지를 카메라에서 측정한다. 이때 많은 기저 입력 광파들을 사용할수록 시료의 더 많은 기저 성분 값을 알아낼 수 있어 더 정확한 이미지 복구가 가능해진다. 예를 들어 한 논문의 사례에서는 20000개의 기저 입력 광파를 사용하였고, 이를 통해 마이크로미터 스케일의 공간 분해능을 가질 수 있었다³⁾. 이렇게 전달 행렬 \mathbf{T} 를 얻어 내고 난 후에는, 시료에서 산란을 일으킨 광파를 불규칙 매체에 통과시킨다. 이때, 그 출력 광파 \mathbf{r} 은 스펙클 패턴을 가지고 있지만 실은 시료의 정보 \mathbf{s} 를 가지고 있다. 이제 전달행렬을 가지고 시료의 정보를 가지는 출력 광파에서의 산란 작용을 상쇄하는 역연산을 함으로써 시료의 정보를 복구해 낼 수 있다.

이때, 인버전 연산의 불완전성으로 인해 산란 작용이 확실히 상쇄되지 않게 되는데 이를 보완하기 위해 동일한 시료의 정보 \mathbf{s} 를 가지는 여러 출력 광파들을 얻어낸 후, 여기서 이 출력 광파들의 샘플수를 L 이라 부르기로 하자, 인버전으로 복구된 추정 정보들의 평균화를 취한다. 이는, 스펙클은 비간섭적인 샘플들의 평균화로 인해 그 강도가 줄어든다는 결과를 활용한 것이다⁴⁾. 참고로, 앞에서 언급한 논문의 사례에서는 $L=1000$ 개의 비간섭적인 샘플들을 평균화를 위해 사용하였다. 이 논문의 사례를 통해 본 이미지 측정의

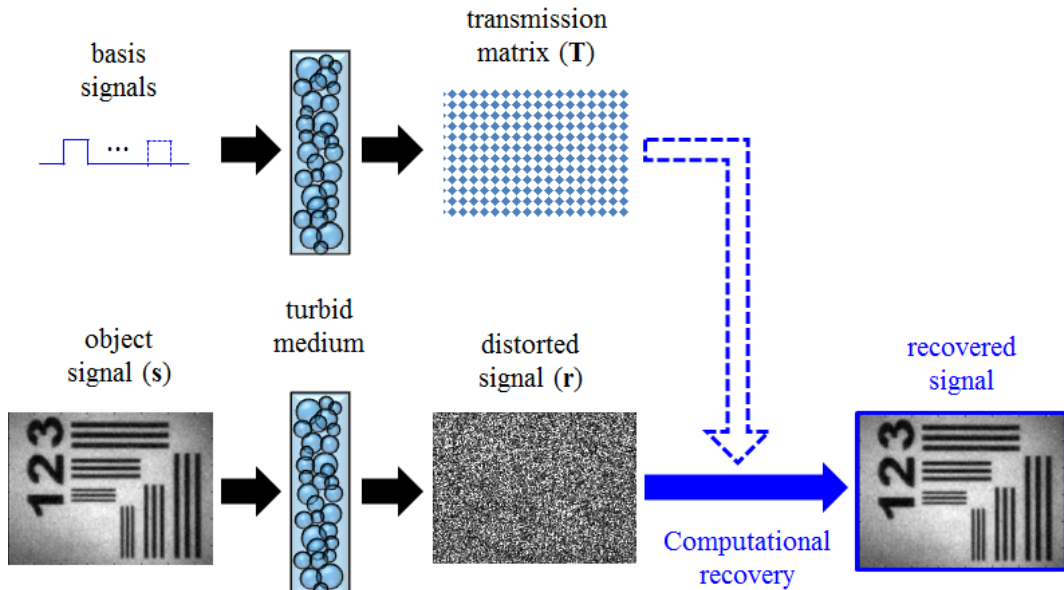


그림 2. 전달행렬을 사용한 이미지 복구
Fig. 2. Image recovery using transmission matrix

개수들로 볼 때 그 수치가 무시할 수 있는 수치가 아님을 알 수 있다.

인버전 작업에서 사용하는 기본적인 연산자는 위상 변화 (phase conjugation) 연산자^[1]와 역행렬 연산자^[2-3]이다. 위상 변화 연산자는 광파의 진행은 시간 가역적(time-reversible) 과정이라는 것과 따라서 다중 산란도 시간 가역 연산자(time-reversible operator)를 통해 상쇄될 수 있다는 결과를 근거로 하고 있으며, 이는 \mathbf{T} 의 켈레 전치 행렬 (conjugate transpose)로 표현된다. 이 연산자를 출력 광파 벡터 \mathbf{r} 에 곱해주면 \mathbf{T} 가 정규 직교 (orthonormal)한 경우에는 본래 시료의 정보 \mathbf{s} 를 잘 복원할 수 있다. 하지만 \mathbf{T} 가 직교하지 않다면, \mathbf{T} 를 통한 \mathbf{s} 의 요소들간의 간섭을 상쇄시키지 못하므로 정확한 복구가 불가능하게 된다. 그리고 역행렬 연산자는 \mathbf{T} 의 가성반전 (pseudoinversion) 행렬을 말한다. 가성반전을 통한 이미지 복구는 \mathbf{T} 가 직교하지 않는 경우에 많은 경우 켈레 전치 행렬을 사용한 복구보다 좋은 결과를 보여주나 잡음 증폭으로 인해 안정적인 정보 복구가 어렵다.

이 문제를 줄이거나 보완하기 위해서 두 가지 방법을 취할 수 있다. 첫 번째로 \mathbf{T} 의 행의 개수를 증가시킬 수 있는데 이는 \mathbf{T} 가 직교 행렬에 좀 더 접근하게 해 줄 수 있다. 그래서 보다 정확한 이미지 복구를 이

뤄낼 수 있다. 두 번째 방법은 비간섭적 샘플 평균화에 쓰이는 샘플의 수를 늘리는 것이다. 이를 이용하면 스펙클의 강도를 더욱 줄일 수 있다. 하지만 이 두 방법들은 측정 및 처리해야 할 데이터의 양을 더욱 늘리게 되어 불규칙 매체를 통한 이미지 시스템의 계산 복잡도, 메모리 복잡도, 시간 복잡도를 높하게 된다. 이는 시료의 변화하는 정보를 오랜 시간동안 관찰 하려 할 때나 또는 짧은 시간에 급격히 변화는 시료의 동적인(dynamic) 변화를 관찰 하려 할 때에 실현하기가 어렵다.

III. 압축센싱(compressed sensing)을 사용한 이미지 복원

압축센싱은 상대적으로 새로운 신호 획득 및 복구 체계로써, 복구하고 싶은 신호의 차원이 획득된 관측치의 차원보다 작은 비결정 선형시스템 (underdetermined linear system)에서도 정확한 신호의 복원을 가능하게 해주는 기법이다^[5]. 압축센싱은 이미 홀로그래피^[6]나 형광 현미경^[7]등의 다양한 광학 이미징 분야에 적용되어 성공적인 결과들을 보여주었다. 만약 압축센싱이 우리가 고려한 시스템 모델 (1)에 성공적으로 적용된다면 \mathbf{r} 의 차원 M 이 \mathbf{s} 의 차원 N

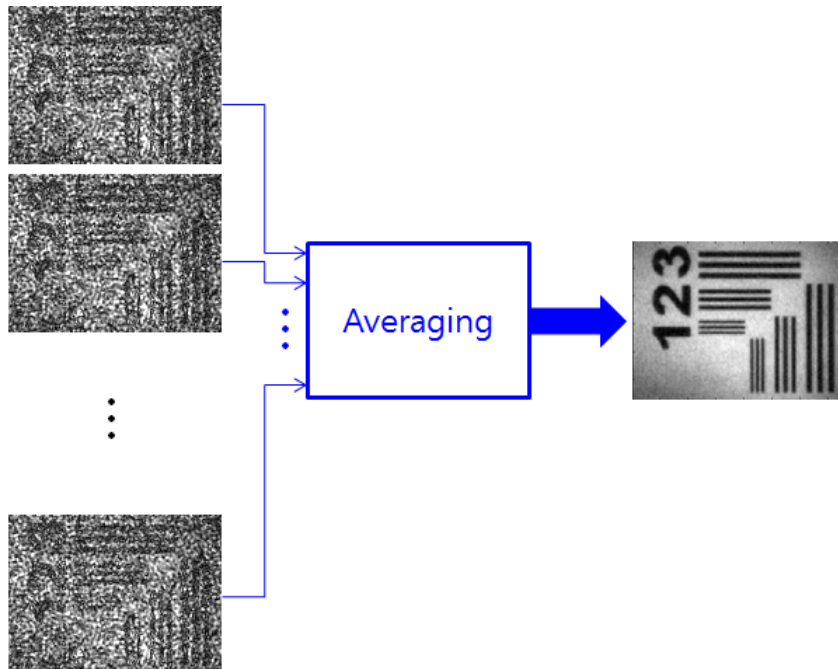


그림 3. 이미지 평균화 과정
Fig. 3. Image averaging process

보다 작은 시스템($M < N$)으로도 s 의 정보를 정확히 복구해 낼 수 있게 해준다. 발표된 결과로는 원하는 데이터의 차원 N 에 비해 획득해야 하는 데이터의 차원 M 을 상당히 작게 할 수 있다. 또한, 압축센싱은 T 가 완전히 직교하지 않을 때에도 이미지를 잘 복구할 수 있으며, 잡음 증폭과 같은 부작용이 없어 안정적인 복구를 지원해 준다. 따라서, 인버전 과정의 불완전성이 감소되며 이로 인해 비간섭적 샘플 평균화를 위해서 필요한 샘플수 L 도 크게 줄일 수 있다. 이는, 이전 섹션에서 언급한 다른 인버전 연산들이 가지는 데이터 복잡도의 문제를 크게 완화시켜 줄 수 있다.

여기서 압축센싱은 모든 비결정 선형시스템에서 성공적인 결과를 보장하지는 않는다. 특정 시스템에서 압축센싱이 성공적으로 적용되기 위해서는 두 가지 주요 조건들이 만족되어야 한다^[5]. 첫 번째로 입력 신호 s 가 희소한(sparse) 표현을 가져야 한다. 여기서 신호가 희소하다는 것은 대부분의 s 의 요소들의 값이 0으로 근사화되고, 단지 몇 개(K 개)의 요소만 ($K \ll N$) 0으로 근사화되지 않는 값을 가진다는 것을 의미한다. 두 번째로 측정 행렬이, 여기서는 전달 행렬이, 균등(isometric)해야 한다. 여기서 행렬이 균등하다는 말은 벡터 s 가 T 로 선형변환(linear transformation)을 겪기 전, s , 이나 후, Ts , 나 둘 다의 거리(norm)가 비슷해야 한다는 것을 말한다.

최근, 압축센싱을 활용한 불규칙 매체를 통한 이미징 시스템에서 기존의 방법과 비교했을 때 데이터의 양을 상당히 줄이면서도 시료의 정보를 정확히 복구해 낼 수 있다는 결과가 보고되었다^[8,9]. 첫 번째 연구 그룹은 압축센싱을 적용하여 각 측정 샘플에서의 정보 복구의 정확도를 늘렸고, 이를 활용해 비간섭적 평균화에 필요한 샘플의 수(L)를 기존의 방법과 비교해 크게 줄일 수 있었다^[8]. 두 번째 연구 그룹은 압축센싱을 적용하여 원하는 신호를 복구하기 위해 필요한 센서의 수, 즉, M 을 줄일 수 있었다^[9]. 이 두 연구

그룹은 모두 동일하게 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템이 압축센싱의 체계에 아주 적합함을 발견하고, 이에 압축센싱을 적용함으로써 성공적인 결과를 얻었다. 그럼, 압축센싱의 적합성을 확인하기 위해 앞에서 언급한 두 가지 조건을 살펴보자. 우선, 첫째 조건인 신호의 희소성은 s 자체의 희소성만을 말하는게 아니다. 이에 국한되지 않고, s 가 다른 어떤 직교행렬에 의한 선형변화에 의해서라도 희소한 표현을 갖게 된다면 이 조건을 만족시키게 된다^[5]. 대부분의 자연적인 이미지가 웨이블릿 영역(Wavelet domain)에서 희소한 표현을 갖는다는 점^[10]을 고려하면, 대부분의 이미징 시스템에서의 신호는 희소할 거라고 가정할 수 있다. 또한, 웨이블릿 영역이 아니더라도 s 를 희소하게 표현 해주는 어느 특정 직교행렬을 발견할 수 있다면 이 조건이 만족될 수 있다. 이에 따라, 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템에서의 대부분의 신호는 첫 번째 조건을 만족한다고 말할 수 있다. 두 번째 조건인 전달행렬의 균등성을 확인하기 위해서는 모든 가능한 희소 신호 s 를 T 에 의한 선형변환에 적용해보고 그 거리값의 변화를 살펴보는 철저(exhaustive) 검사를 해야 한다. 이는 일반적으로는 보이기 어려운 조건이나, 측정 행렬의 각 요소가 독립적 가우시안(Gaussian)분포를 따르는 특별한 경우에는 행렬의 균등성이 아주 높은 확률로 보장됨이 많은 이론과 분석 논문에서 보여졌다^[5]. 여기서 주목할 점은, 불규칙 매체의 전달행렬이 복소수 가우시안분포를 따른다는 것이다. 이 점은 광파들이 겪는 다중산란의 횡수가 클 경우 그 출력 광파가 복소수 가우시안분포를 갖는다는 결과에 근거 한다^[4,8,9]. 따라서, 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템은 압축센싱의 성공적 적용을 위한 주요 두 가지 조건을 모두 만족시킨다고 말할 수 있다. 이 때, 신호의 복구는 다음과 같은 최적화 문제의 해를 구함으로써 이뤄진다^[5].

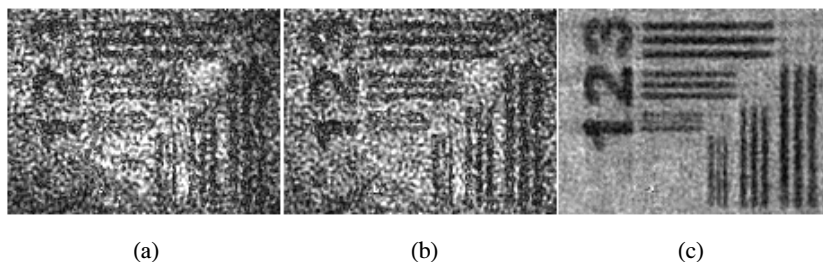


그림 4. 5개의 샘플을 평균화하여 ($L=5$) 복구한 이미지 [8]; $M=4389$, $N=20000$. (a) 위상 변화, (b) 가성반전, (c) 압축센싱.
 Fig. 4. Reconstructed images averaged over five samples ($L=5$) using (a) phase conjugation, (b) pseudoinversion, and (c) compressed sensing reconstruction, respectively [8]. Here, $M=4389$, $N=20000$.

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s}} \|\Psi^* \mathbf{s}\|_1 \text{ subject to } \mathbf{r} = \mathbf{T}\mathbf{s} \quad (2)$$

여기서 Ψ 는 \mathbf{s} 를 최소한 표현으로 변환시켜주는 행렬 이고, $\|\cdot\|_1$ 은 해당 벡터의 각 요소들의 절댓값들이 합 을 의미한다.

앞에서 언급했듯이 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템은 압축센싱의 적용이 적합하였고, 압축센싱에 서의 복구 방법인 (2)의 문제를 풀이로 복구하고 자 하는 이미지를 적은양의 데이터 측정으로도 정확하게 얻어낼 수 있었다.

이 결과는, 불규칙 매체를 통과하는 이미징 시스템 에서의 데이터 획득 요구량을 기존의 복구 방법과 비 교하여 크게 줄일 수 있음을 보여주고 있다. 이는 압 축센싱을 활용한 불규칙 매체를 통한 이미징 시스템 이 1) 메모리 복잡도를 줄여주어 관찰하고자 하는 시 료의 행동 양식을 긴 시간동안 관찰 할 수 있게 해주 며, 또한 2) 필요한 샘플수를 감소시켜 시간 복잡도를 줄이고 이로 인해 짧은 시간동안 이뤄지는 시료의 동 적인 행동 양식을 더 정확히 관찰 할 수 있게 해줄 수 있다는 것을 보여준다.

IV. 결 론

비균질 매체에서의 이미지의 전달은 전달 행렬의 측정과 이를 활용한 이미지 복구로써 더 이상 불가능 한 일이 아님이 보여졌다. 하지만, 전달 함수를 획득 하기 위해서, 또한, 남아 있는 스펙클을 줄이기 위해 서 요구되는 데이터 측정 및 처리량이 크게 늘어난다. 이는 시료를 관찰 하는 총 시간과 동적 특징 관찰에 한계점으로 작용하게 되었다. 최근 이 높은 데이터 복잡도 문제를 해결하기 위해서, 압축 센싱의 적용이 시도 되었고, 그 결과는 매우 성공적이었다. 이는 앞 으로 이뤄질 불규칙 매체를 통과하는 비침습성 (non-invasive) 시료 관찰을 위해 압축센싱이 긴요하 게 사용될 수 있다는 것을 시사한다. 압축센싱분야에 서 개발된 신호처리 기술이 많다. 이들을 사용하여 이 미지의 분해능의 향상과 관찰가능한 시료의 시간 한 계치를 더욱 늘릴 수 있는 연구를 할 수 있을 것으로 예상된다.

References

[1] A. P. Mosk, A. Lagendijk, G. Lerosey, and M. Fink, "Controlling waves in space and time

for imaging and focusing in complex media," *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 283-292, 2012.

[2] S. M. Popoff, G. Lerosey, R. Carminati, M. Fink, A. C. Boccara, and S. Gigan, "Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, no. 10, 100601, Mar. 2010.

[3] Y. Choi, M. Kim, C. Yoon, T. D. Yang, K. J. Lee, and W. Choi, "Overcoming the diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, no. 2, 023902, Jul. 2011.

[4] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 1145-1150, 1976.

[5] E. J. Candès, Y. C. Eldar, D. Needell, and P. Randall, "Compressed sensing with coherent and redundant dictionaries," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 31, pp. 59-73, 2011.

[6] D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki, and S. Lim, "Compressive holography," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 13040-13049, 2009.

[7] L. Zhu, W. Zhang, D. Elnatan, and B. Huang, "Faster STORM using compressed sensing," *Nature Methods*, vol. 9, pp. 721-723, 2012.

[8] H. Jang, C. Yoon, E. Chung, W. Choi, and H.-N. Lee, "Speckle suppression via sparse representation for wide-field imaging through turbid media," *Opt. Express*, vol. 22, pp. 16619-16628, 2014.

[9] A. Liutkus, D. Martina, S. Popoff, G. Chardon, O. Katz, G. Lerosey, S. Gigan, L. Daudet, and I. Carron, "Imaging with nature: compressive imaging using a multiply scattering medium," *Scientific Reports*, vol. 4, pp. 1-7, 2014.

[10] M. Aharon, M. Elad, and A. Bruckstein, "K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, pp. 4311-4322, 2006.

장 환 철 (Hwanchol Jang)



2006년 2월 : 한동대학교 전산전자공학부 졸업
2008년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학부 석사
2008년 3월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학부 박사과정

<관심분야> MIMO 통신, 스피어 디코딩, 압축 센싱, 광학 이미징

최 원 식 (Wonshik Choi)



1997년 2월 : 서울대학교 물리학과 졸업
1999년 2월 : 서울대학교 물리학과 석사
2004년 2월 : 서울대학교 물리학과 박사
2009년 3월~현재 : 고려대학교 물리학과 교수

<관심분야> 바이오 이미징

윤 창 형 (Changhyeong Yoon)



2010년 2월 : 고려대학교 물리학과 졸업
2012년 2월 : 고려대학교 물리학과 석사
2012년 3월~현재 : 고려대학교 물리학과 박사과정
<관심분야> 바이오 이미징, 바이오 메티컬 이미징

이 흥 노 (Heung-No Lee)



1993년 5월 : UCLA 전자공학과 졸업
1994년 10월 : UCLA 전자공학과 석사
1999년 10월 : UCLA 전자공학과 박사
2002년 1월~2008년 12월 : University of Pittsburgh 전자컴퓨터공학과 교수
2009년 1월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학부 교수
<관심분야> 정보이론, 신호처리이론, 통신/네트워크 이론, 무선통신, 압축센싱, 미래 인터넷, 뇌-컴퓨터 인터페이스

정 의 현 (Euiheon Chung)



1996년 2월 : KAIST 항공우주공학과 졸업 (물리학 부전공)
1998년 2월 : KAIST 항공우주공학과 석사
2007년 2월 : Harvard-MIT 의공학 박사
2011년 2월~현재 : 광주과학기술원 의료시스템학과, 기전공학부 교수

<관심분야> 생체 의공학 이미징, 중앙 및 신경광자학, 중개의학