



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0119854
(43) 공개일자 2024년08월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03H 1/02 (2006.01) G03H 1/22 (2006.01)
G03H 1/34 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03H 1/02 (2013.01)
G03H 1/22 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-0014255
(22) 출원일자 2024년01월30일
심사청구일자 없음
(30) 우선권주장
1020230011951 2023년01월30일 대한민국(KR)

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
차준영
경기도 수원시 팔달구 효원로93번길 33, 102동 1101호(매교동, 힐스테이트 푸르지오 수원)
반현민
경기도 용인시 기흥구 서그내로 30, 402호(서천동, 림빌라)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
성병기

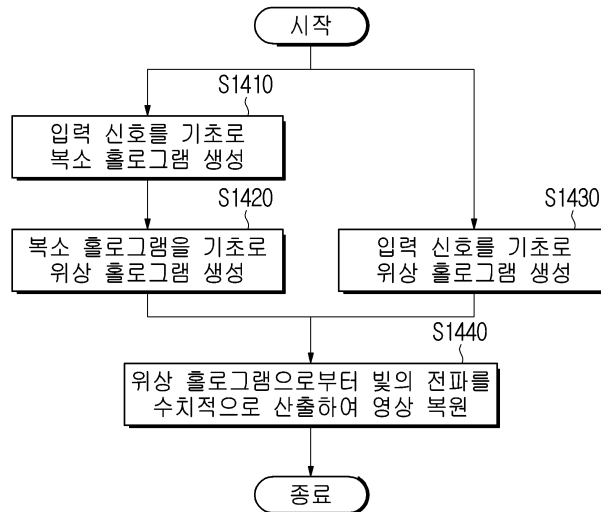
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 위상 홀로그램의 생성 및 복원 방법 및 장치

(57) 요약

위상 홀로그램의 생성 및 복원 방법이 제공된다. 위상 홀로그램 생성 방법은 입력 신호를 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 단계, 상기 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계 및 상기 위상 홀로그램을 전파하여 영상을 복원하는 단계를 포함하고, 상기 복소 홀로그램은 상기 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 생성되고, 상기 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한된다.

대표도 - 도14



(52) CPC특허분류

G03H 1/34 (2013.01)

(72) 발명자

최승미

대전광역시 중구 대종로 713, 8동 204호(중촌동,
금호아파트)

김휘용

대전광역시 유성구 은구비남로 34, 810동 201호(노
은동, 열매마을아파트8단지새미래)

명세서

청구범위

청구항 1

위상 홀로그램 생성 방법에 있어서,

입력 신호를 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 단계;

상기 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계; 및

상기 위상 홀로그램을 전파하여 영상을 복원하는 단계를 포함하고,

상기 복소 홀로그램은 상기 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 생성되고,

상기 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 복소 홀로그램을 생성하는 단계는,

상기 입력 신호를 표본화하는 단계를 더 포함하고,

상기 복소 홀로그램은 상기 표본화된 입력 신호와 상기 전달 함수를 기초로 생성되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 전달 함수는,

상기 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 표본화 계수는,

상기 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 위상 홀로그램 생성 방법은,

상기 입력 신호를 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계를 더 포함하고,

상기 위상 홀로그램을 전파하는 단계는,

상기 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램 및 상기 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 이용하는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 6

위상 홀로그램 생성 방법에 있어서,

입력 신호를 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 단계;

상기 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계; 및

상기 위상 홀로그램을 전파하여 영상을 복원하는 단계를 포함하고,

상기 영상은 상기 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 복원되고,

상기 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 전달 함수는,

상기 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 표본화 계수는,

상기 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

청구항 9

제5항에 있어서,

상기 위상 홀로그램 생성 방법은,

상기 입력 신호를 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계를 더 포함하고,

상기 위상 홀로그램을 전파하는 단계는,

상기 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램 및 상기 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 이용하는 것을 특징으로 하는, 위상 홀로그램 생성 방법.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 위상 홀로그램을 생성하고 복원하는 방법에 관한 것으로, 구체적으로 위상 홀로그램을 생성하고, 복원하는데 있어 대역폭을 제한하여 위상 홀로그램의 복원 성능을 향상시키는 기술에 관한 것이다.

[0001]

배경 기술

- [0002] 홀로그래피(holography)는 빛의 진폭과 위상 정보를 다루는 기존의 스테레오 방식의 초점-수렴 거리 불일치(vergence-accommodation conflict) 문제를 해결함으로써 완전한 3차원 영상을 재현하는 기술이다. 홀로그래피는 피사체에서 반사된 물체광과 참조광 서로 간의 간섭으로 인해 생성된 간섭무늬를 기록하여 홀로그램을 획득하고, 획득한 홀로그램에 참조광을 비추어 입체 공간상에 3차원 영상을 재현하는 기술이다.
- [0003] 종래의 홀로그램 생성 및 복원 방법에 따르면, 컴퓨터 기반 홀로그램 생성 및 복원 시, 서브샘플링에 의해서 에일리어징(aliasing)이 발생할 수 있다. 복소 홀로그램을 컴퓨터 기반으로 생성하고, 복원함에 있어, 적절하게 대역폭을 제한함으로써, 에일리어징을 제거할 수 있다.
- [0004] 반면, 종래의 홀로그램 생성 및 복원 방법을 적용하여 복소 홀로그램이 아닌 위상 홀로그램을 컴퓨터 기반으로 생성하고 복원하는 경우, 일부 전파 거리에서 심한 성능 저하가 발생할 수 있다. 특히, 서브 샘플링을 활용한 홀로그램 생성 방법을 사용하여 위상 홀로그램을 생성하는 경우, 더욱 심한 성능 저하가 발생할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 발명은 컴퓨터 기반으로 위상 홀로그램을 생성 및/또는 복원하는 경우, 전파 거리에 기초하여 대역폭 제한을 가함으로써, 위상 홀로그램으로부터 생성된 복원 영상의 품질을 향상시키는 것을 목적으로 한다.
- [0006] 본 개시에서 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 개시가 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0007] 본 개시에 따르면, 위상 홀로그램 생성 방법은, 입력 신호를 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 단계; 상기 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계; 및 상기 위상 홀로그램을 전파하여 영상을 복원하는 단계를 포함하고, 상기 복소 홀로그램은 상기 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 생성되고, 상기 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0008] 여기서, 상기 복소 홀로그램을 생성하는 단계는, 상기 입력 신호를 표본화하는 단계를 더 포함하고, 상기 복소 홀로그램은 상기 표본화된 입력 신호와 상기 전달 함수를 기초로 생성되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0009] 여기서, 상기 전달 함수는, 상기 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0010] 여기서, 상기 표본화 계수는, 상기 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0011] 여기서, 상기 위상 홀로그램 생성 방법은, 상기 입력 신호를 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계를 더 포함하고, 상기 위상 홀로그램을 전파하는 단계는, 상기 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램 및 상기 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 이용하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0012] 본 개시에 따르면, 위상 홀로그램 생성 방법은, 입력 신호를 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 단계; 상기 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계; 및 상기 위상 홀로그램을 전파하여 영상을 복원하는 단계를 포함하고, 상기 영상은 상기 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 복원되고, 상기 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0013] 여기서, 상기 전달 함수는, 상기 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0014] 여기서, 상기 표본화 계수는, 상기 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0015] 여기서, 상기 위상 홀로그램 생성 방법은, 상기 입력 신호를 기초로 위상 홀로그램을 생성하는 단계를 더 포함하고, 상기 위상 홀로그램을 전파하는 단계는, 상기 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램 및 상기 입

력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그래를 이용하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0016] 본 개시에 대하여 위에서 간략하게 요약된 특징들은 후술하는 본 개시의 상세한 설명의 예시적인 양상일 뿐이며, 본 개시의 범위를 제한하는 것은 아니다.

발명의 효과

[0017] 본 개시에 따르면, 어떠한 전파 거리에서도 에일리어징에 의한 위상 홀로그래의 복원 성능 저하를 방지하고, 복원 영상의 품질을 향상시킬 수 있다.

[0018] 본 개시에서 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 개시가 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 위상 홀로그래를 생성하고, 생성된 위상 홀로그래로부터 복원 영상을 생성하는 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 2는 서로 다른 2개의 위상 홀로그래를 서브샘플링하여, 위상 홀로그래를 생성하는 실시예를 도시한 도면이다.

도 3은 위상 홀로그래를 생성하는 인공신경망을 학습하는 방법의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 4는 인공 신경망을 이용하여 위상 홀로그래를 생성하는 방법의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 5는 전치 컨볼루션 층을 이용한 업샘플링의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 6은 원본 신호를 목표 신호로 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 7은 원본 신호를 ASM 또는 BL-ASM을 통해 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 8은 원본 신호의 주파수와 에일리어징이 발생하지 않는 전파 거리 간의 관계의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 9는 BL-ASM으로 생성된 홀로그래를 푸리에 변환한 결과의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 10은 전파 거리에 따라 에일리어징이 발생하지 않는 대역폭의 허용 범위의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 11은 기존 BL-ASM 방법에 표본화 계수를 추가하여 원본 신호를 목표 신호로 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 12는 표본화 요소에 각각의 전파 거리에 따라 에일리어징이 발생하지 않는 대역폭의 허용 범위의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 13은 전파 거리에 따른 표본화 계수의 최적 값의 일 실시예를 도시한 도면이다.

도 14는 본 발명의 컴퓨터 기반 위상 홀로그래를 생성하는 방법의 일 실시예를 도시하는 도면이다.

도 15는 본 발명의 컴퓨터 기반 위상 홀로그래를 복원하는 방법의 일 실시예를 도시하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하에서는 첨부한 도면을 참고로 하여 본 개시의 실시 예에 대하여 본 개시가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나, 본 개시는 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되지 않는다.

[0021] 본 개시의 실시 예를 설명함에 있어서 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 개시의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그에 대한 상세한 설명은 생략한다. 그리고, 도면에서 본 개시에 대한 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[0022] 본 개시에 있어서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소와 "연결", "결합" 또는 "접속"되어 있다고 할 때, 이는 직접적인 연결관계 뿐만 아니라, 그 중간에 또 다른 구성요소가 존재하는 간접적인 연결관계도 포함할 수 있다. 또한 어떤 구성요소가 다른 구성요소를 "포함한다" 또는 "가진다"고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한

다른 구성요소를 배제하는 것이 아니라 또 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

- [0023] 본 개시에 있어서, 제1, 제2 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용되며, 특별히 언급되지 않는 한 구성요소들 간의 순서 또는 중요도 등을 한정하지 않는다. 따라서, 본 개시의 범위 내에서 일 실시 예에서의 제1 구성요소는 다른 실시 예에서 제2 구성요소라고 칭할 수도 있고, 마찬가지로 일 실시 예에서의 제2 구성요소를 다른 실시 예에서 제1 구성요소라고 칭할 수도 있다.
- [0024] 본 개시에 있어서, 서로 구별되는 구성요소들은 각각의 특징을 명확하게 설명하기 위함이며, 구성요소들이 반드시 분리되는 것을 의미하지는 않는다. 즉, 복수의 구성요소가 통합되어 하나의 하드웨어 또는 소프트웨어 단위로 이루어질 수도 있고, 하나의 구성요소가 분산되어 복수의 하드웨어 또는 소프트웨어 단위로 이루어질 수도 있다. 따라서, 별도로 언급하지 않더라도 이와 같이 통합된 또는 분산된 실시 예도 본 개시의 범위에 포함된다.
- [0025] 본 개시에 있어서, 다양한 실시 예에서 설명하는 구성요소들이 반드시 필수적인 구성요소들을 의미하는 것은 아니며, 일부는 선택적인 구성요소일 수 있다. 따라서, 일 실시 예에서 설명하는 구성요소들의 부분집합으로 구성되는 실시 예도 본 개시의 범위에 포함된다. 또한, 다양한 실시 예에서 설명하는 구성요소들에 추가적으로 다른 구성요소를 포함하는 실시 예도 본 개시의 범위에 포함된다.
- [0026] 본 개시의 명세서에 기재된 "...부", "...모듈", "...수단" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0028] 디지털 홀로그래피 기술 개요
- [0029] 홀로그래피(holography)는 빛의 진폭과 위상 정보를 다루는 기존의 스테레오 방식의 초점-수렴거리 불일치(vergence-accommodation conflict)문제를 해결함으로써 완전한 3차원 영상을 재현하는 기술이다. 홀로그래피는 피사체에서 반사된 물체광과 참조광 서로 간의 간섭으로 인해 생성된 간섭무늬를 기록하여 홀로그램을 획득하고, 획득한 홀로그램에 참조광을 비추어 입체 공간상에 3차원 영상을 재현하는 기술이다.
- [0030] 디지털 홀로그래피 기술은 홀로그래피 원리를 이용하여 전하 결합 소자(CCD, Charge Coupled Device) 카메라와 같은 영상 획득 장치로 3차원 영상 데이터를 획득하고 공간 광 변조기(SLM, Spatial Light Modulator)와 같은 디스플레이 소자로 홀로그램 영상을 재현하는 것을 말한다. CCD 등의 카메라에서 획득되거나 수치적 방법에 의해 생성된 간섭패턴을 디지털 홀로그램으로 지칭할 수 있다.
- [0031] SLM은 광범위하게는 위치에 따라 빛을 변조시키는 모든 종류의 장치를 의미한다. 빔 프로젝터와 그림자를 이용한 새도우 아트 또한 공간 광 변조를 활용한 사례라 볼 수 있다.
- [0032] 홀로그램 영상을 획득하는 기술은 실제 물체의 3차원 정보를 획득하는 방법과 컴퓨터 그래픽으로부터 영상을 획득하는 방법으로 구분될 수 있다.
- [0033] 실제 물체를 직접적으로 획득할 수 있는 기술로는 대표적으로 자가 간섭계(Self-interference) 기술과 광 스캐닝 홀로그래피(Optical Scanning Holography), 컴퓨터 생성 홀로그램(CGH, Computer Generated Hologram)이 있다.
- [0034] 컴퓨터 생성 홀로그래피(CGH, Computer Generated Holography)는 광파의 진행을 수치적으로 시뮬레이션하여 홀로그램 영상을 합성하는 연구분야이다. 컴퓨터 생성 홀로그램(CGH, Computer Generated Hologram)은 광파의 진행을 수치적으로 시뮬레이션하여 얻은 홀로그램 영상이다.
- [0035] 위상 홀로그램(Phase-only Hologram): 홀로그램에서 복소 신호는 진폭(amplitude)과 위상(phase)으로 표현될 수 있다. 위상 홀로그램은 복소 데이터에서 오직 위상 정보만으로 구성된 홀로그램을 뜻한다.
- [0036] 본 발명은 위상 홀로그램의 생성 및/또는 복원하는 방법에 관한 것이다.
- [0038] 도 1은 위상 홀로그램을 생성하고, 생성된 위상 홀로그램으로부터 복원 영상을 생성하는 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0039] 도 1을 참조하면, 입력 신호(X)를 기초로 복소 홀로그램(Hc)이 생성될 수 있다. 복소 홀로그램은 $H_c = a \exp(j\theta)$ 으로 표현될 수 있다. 여기서, a는 복소 홀로그램의 진폭을 지시할 수 있으며, θ 는 복소 홀로그램의 위상을 지

시할 수 있다.

- [0040] 복소 홀로그램은 수치적으로 생성되거나 광학적으로 획득될 수 있다. 수치적으로 복소 홀로그램을 생성하는 방법은 각 스펙트럼 기반 방법(Angular Spectrum Method; ASM), 프레넬 기반 방법(Fresnel Diffraction) 등을 포함할 수 있다. 각 스펙트럼 기반 방법 및 프레넬 기반 방법은 입력 신호(X)를 전파거리 d 만큼 전파하는 방법일 수 있다.
- [0041] 그리고, 복소 홀로그램(Hc)을 기초로 위상 홀로그램이 생성될 수 있다. 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램을 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램으로 지칭할 수 있다. 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램은 복소 홀로그램의 진폭을 무시하는 방법(Discarding Amplitude; DA), 이중 위상 표현 기반 방법(Double Phase Amplitude Coding; DPAC), 인공 신경망 기반 방법(Neural Network; NN) 등을 포함하는 방법을 통해 생성될 수 있다.
- [0042] 위상 홀로그램을 생성하는 또다른 방법으로, 입력 신호를 기초로 입력 영상 기반 위상 홀로그램 생성 방법을 사용하여 위상 홀로그램을 생성할 수 있다. 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 입력 영상 기반 위상 홀로그램으로 지칭할 수 있다. 입력 영상 기반 위상 홀로그램은 게르베르그-색스톤 알고리즘(Gerchberg-Saxton Algorithm), 확률적 경사 하강법(Stochastic Gradient Descent) 등의 반복 최적화 방법, 인공 신경망 기반 방법(Neural Network; NN) 등을 포함하는 방법을 통해 생성될 수 있다.
- [0043] 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램 및 입력 영상 기반 위상 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램이 생성될 수 있다. 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램 및 입력 영상 기반 위상 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램은 $H_p = \exp(j\phi)$ 으로 표현될 수 있다.
- [0044] 위상 홀로그램을 기초로 영상을 복원함으로써, 복원 신호가 생성될 수 있다. 복원 신호는 수치적으로 생성되거나 광학적으로 획득될 수 있다. 복원 신호는 각 스펙트럼 기반 방법(Angular Spectrum Method; ASM), 프레넬 기반 방법(Fresnel Diffraction), 프라운호퍼 기반 방법(Fraunhofer Diffraction) 등을 포함하는 방법을 이용하여 수치적으로 복원될 수 있다.
- [0046] 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램을 생성하는 방법을 이중 위상 표현 기반 방법(DPAC)을 예시로 하여 좀더 상세히 설명한다. 이중 위상 표현 기반 방법은, 복소 홀로그램을 서로 다른 2개의 위상 홀로그램으로 변환하고, 변환된 서로 다른 2개의 위상 홀로그램을 통해 하나의 위상 홀로그램을 생성하는 방법일 수 있다.
- [0047] 일 실시예에 따르면, 복소 홀로그램은 서로 다른 2개의 위상 홀로그램의 산술 평균(arithmetic mean)으로 표현될 수 있다. 복소 홀로그램은 아래의 수식과 같이 서로 다른 2개의 위상 홀로그램의 산술 평균을 통해 표현될 수 있다.

수학식 1

$$a \exp(j\theta) = \frac{1}{2} \exp(j\phi_1) + \frac{1}{2} \exp(j\phi_2),$$

$$\phi_1 = \theta + \cos^{-1} a$$

$$\phi_2 = \theta - \cos^{-1} a$$

- [0048]
- [0049] 수학식 1의 $a \exp(j\theta)$ 는 복소 홀로그램을 지시할 수 있으며, a는 복소 홀로그램의 진폭을 지시하고, θ 는 복소 홀로그램의 위상을 지시할 수 있다. 여기서, a는 $0 \leq a \leq 1$ 을 만족하는 실수이다.
- [0050] 수학식 1에 따르면, 복소 홀로그램의 위상 θ 와 진폭 a를 통해 서로 다른 위상 값 ϕ_1 , ϕ_2 이 산출될 수 있다.

서로 다른 위상 값 위상 ϕ_1 , ϕ_2 을 이용하여, 서로 다른 2개의 위상 홀로그램 $\exp(j\phi_1)$, $\exp(j\phi_2)$ 가 표현될 수 있다. 따라서, 복소 홀로그램 $\text{aexp}(j\theta)$ 는 서로 다른 2개의 위상을 가지는 위상 홀로그램 $\exp(j\phi_1)$, $\exp(j\phi_2)$ 의 산술 평균으로 표현될 수 있다.

- [0051] 이중 위상 표현 방식을 통해 획득한 서로 다른 2개의 위상 홀로그램을 서브샘플링함으로써, 하나의 위상 홀로그램을 생성할 수 있다. 서로 다른 2개의 위상 홀로그램에 대한 서브샘플링은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0052] 도 2는 서로 다른 2개의 위상 홀로그램을 서브샘플링하여, 위상 홀로그램을 생성하는 실시예를 도시한 도면이다.
- [0053] 도 2의 $\exp(j\phi_1)$, $\exp(j\phi_2)$ 는 서로 다른 2개의 위상 홀로그램을 지시할 수 있다. 그리고, $\exp(j\phi)$ 는 $\exp(j\phi_1)$, $\exp(j\phi_2)$ 의 서브샘플링을 통해 획득된 위상 홀로그램을 지시할 수 있다. 그리고, $\exp(j\phi_1)$, $\exp(j\phi_2)$ 및 $\exp(j\phi)$ 각각에 표기된 $(1, 1)$, $(1, 2)$, ..., (M, M) 는 각 좌표에 해당하는 위상 값을 지시할 수 있다.
- [0054] 서브샘플링은 $\exp(j\phi_1)$ 의 위상 값과 $\exp(j\phi_2)$ 의 위상 값을 교대로 배치하는 것을 의미할 수 있다.
- [0055] 도 2의 실시예에 따르면, $\exp(j\phi)$ 의 $(1, 1)$ 위치에 $\exp(j\phi_1)$ 의 $(1, 1)$ 좌표의 위상 값이 배치될 수 있고, $\exp(j\phi)$ 의 $(1, 2)$ 위치에 $\exp(j\phi_2)$ 의 $(1, 2)$ 좌표의 위상 값이 배치될 수 있다.
- [0056] 반면, 다른 실시예에 따르면, $\exp(j\phi)$ 의 $(1, 1)$ 위치에 $\exp(j\phi_2)$ 의 $(1, 1)$ 좌표의 위상 값이 배치될 수 있고, $\exp(j\phi)$ 의 $(1, 2)$ 위치에 $\exp(j\phi_1)$ 의 $(1, 2)$ 좌표의 위상 값이 배치될 수 있다.
- [0057] 다른 실시예에 따르면, 위상 홀로그램은 인공 신경망을 기반으로 생성될 수 있다. 인공 신경망을 기반으로 하는 위상 홀로그램의 생성 방법은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0059] 도 3은 위상 홀로그램을 생성하는 인공신경망을 학습하는 방법의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0060] 도 3은 생성된 위상 홀로그램으로부터 복원 영상을 생성하여, 원본 영상과의 비교를 통해 위상 홀로그램을 생성하는 인공 신경망을 학습하는 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0061] 도 3을 참조하면, 입력 신호(X)를 기초로 복소 홀로그램(Hc)이 생성될 수 있다. 복소 홀로그램은 $Hc = \text{aexp}(j\theta)$ 으로 표현될 수 있다. 그리고 복소 홀로그램(Hc)을 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램 생성 신경망에 입력하여 위상 홀로그램이 생성될 수 있다. 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램을 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램으로 지칭할 수 있다.
- [0062] 위상 홀로그램을 생성하는 또다른 방법으로, 입력 신호를 입력영상 기반 위상 홀로그램 생성 신경망에 직접 입력하여 위상 홀로그램이 생성될 수 있다. 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 입력 영상 기반 위상 홀로그램으로 지칭할 수 있다. 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램 및/또는 입력 영상 기반 위상 홀로그램을 기초로 영상 복원을 수행함으로써, 복원 신호가 생성될 수 있다.
- [0063] 위상 홀로그램 생성 신경망은 복원 신호와 원본 신호의 차이인 목적 함수를 계산하고, 역전파 알고리즘을 이용하여, 목적 함수를 최소화하는 방향으로 학습될 수 있다.
- [0064] 인공 신경망을 이용하여 위상 홀로그램을 생성하는 방법은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0066] 도 4는 인공 신경망을 이용하여 위상 홀로그램을 생성하는 방법의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0067] 도 4를 참조하면, 위상 홀로그램 생성 신경망은 복소 홀로그램 및/또는 입력 신호를 획득할 수 있다. 획득한 신호에 다운샘플링을 적용하여 특징 맵이 출력될 수 있다. 여기서, 다운샘플링은 컨볼루션 층(Convolution layer), 풀링 층(Pooling layer), 보간법(Interpolation) 중 적어도 하나를 이용하여 수행될 수 있다. 다운샘플링 과정에서, 복소 홀로그램 및/또는 입력 신호의 공간 정보가 일부 유실될 수 있다. 따라서, 다운샘플링을 통해, 복소 홀로그램 및/또는 입력 신호에 대해 추가적인 표본화를 가하는 것과 유사한 효과가 발생할 수 있다.

[0068] 그리고, 특징 맵에 업샘플링을 적용하여, 위상 홀로그램이 출력될 수 있다. 여기서, 업샘플링은 전치 컨볼루션 층(Transposed convolution layer), 서브픽셀 컨볼루션 층(Sub-pixel convolution layer), 보간법(Interpolation) 중 적어도 하나를 이용하여 수행될 수 있다.

[0069] 여기서, 전치 컨볼루션 층을 이용한 업샘플링은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.

[0071] 도 5는 전치 컨볼루션 층을 이용한 업샘플링의 일 실시예를 도시한 도면이다.

[0072] 도 5를 참조하면, 2X2 크기의 입력 값에 대해, 3X3 크기의 커널로 스트라이드(Stride) 1 만큼 전치 컨볼루션 연산을 수행하는 경우, 4X4 크기의 출력 값이 산출될 수 있다. 4X4 크기의 출력 값은 아래와 같이 산출될 수 있다.

수학식 2

$$\begin{bmatrix} o_1 & o_2 & o_3 & o_4 \\ o_5 & o_6 & o_7 & o_8 \\ o_9 & o_{10} & o_{11} & o_{12} \\ o_{13} & o_{14} & o_{15} & o_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 k_9 & i_1 k_8 + i_2 k_9 & i_1 k_7 + i_2 k_8 & i_2 k_7 \\ i_1 k_6 + i_3 k_9 & i_1 k_5 + i_2 k_6 + i_3 k_8 + i_4 k_9 & i_1 k_4 + i_2 k_5 + i_3 k_7 + i_4 k_8 & i_2 k_4 + i_4 k_7 \\ i_1 k_3 + i_3 k_6 & i_1 k_2 + i_2 k_3 + i_3 k_5 + i_4 k_6 & i_1 k_1 + i_2 k_2 + i_3 k_4 + i_4 k_5 & i_2 k_1 + i_4 k_4 \\ i_3 k_3 & i_3 k_2 + i_4 k_3 & i_3 k_1 + i_4 k_2 & i_4 k_1 \end{bmatrix}$$

[0074] 전치 컨볼루션 연산을 통해 공간적으로 축소된 특징들을 바탕으로 업샘플링을 수행하는 경우, o_1, o_4, o_{13}, o_{16} 과 같은 일부 출력 값은 단일한 입력 값에만 영향을 받을 수 있다. 반면, o_6, o_7, o_{10}, o_{11} 과 같은 일부 출력 값은 모든 입력 값에 영향을 받을 수 있다.

[0075] 전치 컨볼루션 연산의 커널의 크기와 스트라이드, 패딩(Padding)을 설정하는 방법에 따라서, 단일 입력 값에만 영향을 받는 출력 값은 격자 무늬 형태로 출력될 수 있다. 이 경우, DPAC 방법에 따른 서브샘플링과 유사한 효과가 발생할 수 있다.

[0077] 다른 실시예에 따르면, 이중 위상 표현에 기반한 위상 홀로그램 생성 방법이나 인공 신경망 기반 위상 홀로그램 생성 방법 외에도 위상 홀로그램을 생성할 수 있다.

[0078] 진폭 무시 방법은 복소 홀로그램 $H_c = a \exp(j\theta)$ 에서, 복소 홀로그램의 진폭 a 를 버리고 복소 홀로그램의 위상 θ 만 취하여 위상 홀로그램 $H_p = \exp(j\phi) = \exp(j\theta)$ 를 생성하는 방법일 수 있다.

[0079] 게르베르그-색스틴 알고리즘 (또는, Iterative Fourier Transform Algorithm, IFTA)은 입력 신호 X 로부터 반복 최적화(Iterative Optimization) 방법을 통해 위상 홀로그램 $H_p = \exp(j\phi)$ 를 생성하는 방법일 수 있다. 게르베르그-색스틴 알고리즘은 아래와 같이 동작할 수 있다.

[0080] 랜덤하게 생성된 위상 ϕ_0 을 통해 초기 위상 홀로그램 $\exp(j\phi_0)$ 이 생성된다. 초기 위상 홀로그램 $\exp(j\phi_0)$ 또는 위상 홀로그램 $\exp(j\phi)$ 를 수치적으로 복원한 결과 $\hat{X}_{\exp(j\phi')}$ 를 생성한다.

[0081] 수치적으로 복원한 결과의 진폭 $\hat{X}$ 와 원본 신호 X 와의 차이를 계산한다. 여기서, 수치적으로 복원한 결과의 진폭 $\hat{X}$ 와 원본 신호 X 의 차이 값이 미리 설정된 임계 값보다 작은 경우, 초기 위상 홀로그램 $\exp(j\phi_0)$ 또는 위상 홀로그램 $\exp(j\phi)$ 를 최종적으로 생성된 위상 홀로그램으로 결정한다. 반면, 수치적으로 복원한 결과의 진폭 $\hat{X}$ 와 원본 신호 X 의 차이 값이 미리 설정된 임계 값보다 큰 경우, 아래의 동작을 추가로 수행한다.

[0082] 수치적으로 복원한 결과 생성된 $\hat{X}_{\exp(j\phi)}$ 의 진폭 $\hat{X}$ 을 원본 신호 X 로 대체하여, 복소 신호 $X \exp(j\theta)$ 가 생

성된다. 그리고, 생성된 복소 신호를 수치적으로 전파하여 복소 홀로그램 $A_{\exp(i\theta)}$ 이 생성된다. 생성된 복소 홀로그램 $A_{\exp(i\theta)}$ 의 진폭을 1로 제한하여 위상 홀로그램 $\exp(i\phi)$ 이 생성된다. 그리고, 앞서 설명한 과정을 반복적으로 수행한다.

- [0084] 도 6은 원본 신호를 목표 신호로 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0085] 도 6에 따르면, 원본 신호는 전파 방향 z 를 따라 전파 거리 d 만큼 떨어진 곳으로 전파될 수 있다. 입력 신호를 도 6의 원본 신호로 하여 전파 거리 d 만큼 전파한 결과를 수치적으로 계산함으로써 복소 홀로그램이 생성될 수 있으며, 반대로 위상 홀로그램을 도 6의 원본 신호로 하여 전파 거리 d 만큼 전파한 결과를 수치적으로 계산함으로써, 복원된 영상 신호가 생성될 수 있다. 신호를 전파하는 방법은 아래에 설명하는 바와 같이 모델링될 수 있다.
- [0086] $g(z_0)$ 는 공간 도메인의 전파 방향 z 상에서, z_0 에 위치한 원본 신호를 의미할 수 있다. $G(z_0)$ 는 푸리에 변환 연산(F)를 통해 공간 도메인의 $g(z_0)$ 를 주파수 도메인으로 변환한 결과와 같을 수 있다.
- [0087] $h(d)$ 는 공간 도메인의 $g(z_0)$ 를 d 만큼 전파하기 위한 전파 커널(Propagation kernel)을 의미할 수 있다. $H(d)$ 는 주파수 도메인의 $G(z_0)$ 를 d 만큼 전파하기 위한 전달 함수(Transfer function)를 의미할 수 있다. $H(d)$ 는 푸리에 변환 연산(F)를 통해 공간 도메인의 $h(d)$ 를 주파수 도메인으로 변환한 결과와 같을 수 있다.
- [0088] $g(z_0+d)$ 는 공간 도메인의 전파 방향 z 상에서 z_0+d 에 위치한 목표 신호를 의미할 수 있으며, $g(z_0)$ 를 d 만큼 전파한 결과를 나타낼 수 있다. 공간 도메인에서 $g(z_0+d)$ 는 $g(z_0)$ 와 $h(d)$ 의 컨볼루션(Convolution) 연산을 통해 산출될 수 있다.
- [0089] $G(z_0+d)$ 는 주파수 도메인의 전파 방향 z 상에서 z_0+d 에 위치한 목표 신호를 의미할 수 있으며, $G(z_0)$ 를 d 만큼 전파한 결과를 나타낼 수 있다. 주파수 도메인에서 $G(z_0+d)$ 는 $G(z_0)$ 와 $H(d)$ 의 곱(Multiplication) 연산을 통해 산출될 수 있다. $G(z_0+d)$ 는 $g(z_0+d)$ 를 푸리에 연산을 통해 주파수 도메인으로 변환한 결과와 같을 수 있다.
- [0090] 빛의 전파를 수치적으로 계산하는 방법의 실시예로서, 각 스펙트럼 기반 방법과 프레넬 기반 방법 등이 있을 수 있다. 여기서, 각각의 방법에서 사용되는 전달 함수 $H(d)$ 는 서로 다를 수 있다.
- [0091] 각 스펙트럼 기반 방법은 전파 방향 z 축 위의 z_0 에 위치한 입력 신호 $g(z_0)$ 를 초기값으로 하는 헬름홀츠(Helmholtz) 2차 편미분 방정식을 해를 구함으로써, 전파 거리 d 만큼 떨어진, z 축 위의 z_0+d 에 위치한 목표 신호 $g(z_0+d)$ 를 구하는 방법이다.
- [0092] z 축 위의 z_0 에 위치한 입력 신호 $g(z_0)$ 가 2차원 신호임을 가정하면, ASM을 통해 $g(z_0)$ 를 전파 거리 d 만큼 떨어진 z_0+d 위치로 전파된 신호 $g(z_0+d)$ 는 아래의 수식과 같이 표현될 수 있다.

수학식 3

[0093]
$$g(z_0 + d) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{g(z_0)\} \cdot H_{AS}(d)\}$$

[0094] 여기서, $\mathcal{F}$ 와 $\mathcal{F}^{-1}$ 은 각각 푸리에 변환 연산과 역 푸리에 변환 연산을 의미한다.

[0095] 그리고, ASM의 전달 함수(Transfer function) $H_{AS}(d)$ 은 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 4

$$H_{AS}(d) = \exp\left(j2\pi d \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - u^2 - v^2}\right)$$

[0096]

[0097]

여기서, u 와 v 는 주파수 도메인에서의 x 축과 y 축을 의미할 수 있다. 그리고, λ 는 전달하려는 신호의 파장의 길이를 의미한다.

[0099]

프레넬 기반 방법은 각 스펙트럼 기반 방법을 확장한 방법으로서, 빛이 전파 방향 z 축에 근축 근사(Paraxial approximation)하고 있음을 가정한다.

[0100]

z 축 위의 z_0 에 위치한 입력 신호 $g(z_0)$ 가 2차원 신호임을 가정하면, 프레넬 기반 방법을 통해 $g(z_0)$ 를 전파 거리 d 만큼 떨어진 z_0+d 위치로 전파된 신호 $g(z_0+d)$ 는 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 5

$$g(z_0 + d) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{g(z_0)\} \cdot H_{FR}(d)\}$$

[0101]

[0102]

여기서, $\mathcal{F}$ 와 $\mathcal{F}^{-1}$ 은 각각 푸리에 변환 연산과 역 푸리에 변환 연산을 의미한다.

[0103]

그리고, 프레넬 기반 방법의 전달 함수(Transfer function) $H_{FR}(d)$ 은 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 6

$$H_{FR}(d) = \exp\left(j2\pi d \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\lambda}{2}(u^2 + v^2)\right)\right)$$

[0104]

[0105]

여기서, u 와 v 는 주파수 도메인에서의 x 축과 y 축을 의미할 수 있다. 그리고, λ 는 전달하려는 신호의 파장의 길이를 의미한다.

[0107]

연속 신호를 대상으로 하는 빛의 전파 방법을 디지털 기반으로 계산하는 과정에서 표본화(Sampling)가 발생할 수 있다. 표본화는 일정한 표본화 간격(Sampling interval)으로 연속 신호를 이산 신호로 변환하는 과정이다. 표본화 결과 이산적으로 변환된 신호는 디지털 형식으로 표현될 수 있다.

[0108]

연속 신호를 이산 신호로 변환하는 표본화 과정에서 정보 손실이 발생할 수 있다. 표본화 간격이 일정 수준 이상으로 커질 경우, 주파수 도메인 상에서 복제된 스펙트럼 간의 간격이 좁아질 수 있다. 따라서, 스펙트럼 간에 서로 겹치는 현상이 발생할 수 있다. 스펙트럼 간의 중첩 현상을 에일리어징(Aliasing) 현상이라고 지칭할 수 있다. 에일리어징 현상을 방지하기 위해서, 연속 신호를 대상으로 하는 빛의 전파 방법은 표본화 정리(Sampling Theorem)를 만족해야 한다.

[0109]

빛의 전파 과정을 컴퓨터 기반으로 수치적으로 계산함에 있어서, 표본화 정리를 만족하며 계산되는 것이 바람직하다. 표본화 정리를 만족하며 컴퓨터 기반으로 ASM을 통해 빛이 전파하는 과정을 수치적으로 계산하는 것을 대역폭 제한된 ASM(Band-limited Angular Spectrum Method; BL-ASM)이라고 할 수 있다. BL-ASM에 따른 신호 전파 방법은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.

- [0111] 도 7은 원본 신호를 ASM 또는 BL-ASM을 통해 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0112] 도 7을 참조하면, 원본 신호는 전파 방향 z 를 따라 전파 거리 d 만큼 떨어진 곳으로 전파될 수 있다. $g(z_0)$ 는 공간 도메인의 전파 방향 z 상에서 z_0 에 위치한 원본 신호를 의미할 수 있다. $G(z_0)$ 는 푸리에 변환 연산(F)를 통해 공간 도메인의 $g(z_0)$ 를 주파수 도메인으로 변환한 결과와 같을 수 있다.
- [0113] 여기서, ASM과 BL-ASM의 차이는 아래에 설명하는 바와 같다. ASM에 따르면, 목표 신호는 주파수 도메인의 원본 신호 $G(z_0)$ 와 ASM의 전달 함수 $H_{AS}(d)$ 를 곱한 후, 역 푸리에 변환 연산을 수행한 결과 산출될 수 있다.
- [0114] 반면, BL-ASM은 ASM의 전달 함수인 $H_{AS}(d)$ 를 사용하는 대신에, $H_{AS}(d)$ 의 주파수 범위, 즉 대역폭을 제한한 BL-ASM 전달함수 $H_{BL}(d)$ 를 사용할 수 있다. 여기서, $H_{AS}(d)$ 에 저역 통과 필터(Low Pass Filter; LPF)를 적용함으로써, $H_{AS}(d)$ 의 대역폭을 제한할 수 있다. 저역 통과 필터는 u 축과 v 축의 최대 주파수를 각각 $u_{BL}(d)$ 와 $v_{BL}(d)$ 로 제한하도록 구현될 수 있다.
- [0115] BL-ASM 방식에 따라 에일리어징 없이 빛을 전파하는 원리는 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0116] BL-ASM 방식에 따른, 주파수 도메인에서의 표본화 간격은 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 7

[0117]
$$\Delta u = \frac{1}{N \times \Delta x}$$

- [0118] 여기서, Δx 는 공간 도메인에서 표본화 간격을 의미하며, N 은 표본화 개수를 의미한다.
- [0119] 그리고, 공간 도메인 상의 신호가 가질 수 있는 주파수 범위는 아래와 같이 정의될 수 있다.

수학식 8

[0120]
$$-N \times \frac{\Delta u}{2} \leq u \leq N \times \frac{\Delta u}{2} \equiv u_{max}$$

- [0121] 여기서, u_{max} 는 신호의 최대 주파수를 의미한다.
- [0122] ASM이 표본화 정리를 만족하도록 하는 전파 거리는 아래와 같이 산출될 수 있다.

수학식 9

[0123]
$$d < \frac{1}{2\Delta u} \sqrt{\frac{1}{\lambda^2 u^2} - 1} \equiv d_{max}(u)$$

- [0124] 여기서, $d_{max}(u)$ 는 에일리어징 없이 신호를 전파할 수 있는 최대 전파 거리를 지시할 수 있다. λ 는 전달하려는 파장의 길이를 나타낸다. 그리고, Δu 는 주파수 도메인에서의 표본화 간격을 의미한다.
- [0125] 주파수가 u 인 신호를 $d_{max}(u)$ 보다 작은 전파 거리 d 로 전파하는 경우, 에일리어징 없이 신호를 전파할 수 있다. 반면, 주파수가 u 인 신호를 $d_{max}(u)$ 보다 큰 전파 거리로 전파하는 경우, 에일리어징이 발생할 수 있다.
- [0126] 주파수 u 가 커질수록 $d_{max}(u)$ 값은 작아질 수 있다. 따라서, 원본 신호를 에일리어징 없이 전파하기 위해서는, 신호를 $d_{max}(u_{max})$ 보다 작은 거리로 전파해야 한다.
- [0127] 그리고, ASM이 표본화 정리를 만족하도록 하는 주파수는 아래와 같이 산출될 수 있다.

수학식 10

$$|u| < \frac{1}{\lambda \sqrt{(2d\Delta u)^2 + 1}} \equiv |u_{BL}(d)|$$

[0128]

[0129] 여기서, $u_{BL}(d)$ 는 신호를 에일리어징 없이 전파할 수 있는 주파수 범위를 지시한다. $|u_{BL}(d)|$ 보다 작은 주파수 $|u|$ 를 가지는 신호를 전파 거리 d 만큼 전파하는 경우, 에일리어징 없이 전파할 수 있다. 반면, $|u_{BL}(d)|$ 보다 큰 주파수를 가지는 신호를 전파 거리 d 만큼 전파하는 경우, 에일리어징이 발생할 수 있다.

[0130] λ 는 전달하려는 파장의 길이를 나타낸다. 그리고, Δu 는 주파수 도메인에서의 표본화 간격을 의미한다.

[0131] 수학식 9 내지 수학식 10을 통해 표현되는, 에일리어징이 발생하지 않는 원본 신호의 주파수 및 전파 거리 간의 관계는 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.

[0133] 도 8은 원본 신호의 주파수와 에일리어징이 발생하지 않는 전파 거리 간의 관계의 일 실시예를 도시한 도면이다.

[0134] 도 8을 참조하면, x축은 신호의 주파수 u 를 나타내고, y축은 전파 거리 d 를 나타낸다. x축과 y축으로 이루어진 좌표계에 그려진 그래프는, 표본화 간격 Δx , Δy 가 $6.4\mu\text{m}$ 이고, 표본화 개수 M , N 은 각각 512이며, 파장의 길이 λ 는 532nm 인 경우의 $d_{\text{max}}(u)$ 혹은 $u_{BL}(d)$ 를 나타낸다. 여기서, x축의 최댓값은 신호가 가질 수 있는 최대 주파수 u_{max} 를 의미할 수 있다.

[0135] 수학식 9 및 수학식 10 및 도 8에 도시된 바와 같이, 주파수 u 가 커질수록 $d_{\text{max}}(u)$ 는 작아질 수 있다. 또한 전파 거리 d 가 커질수록 $|u_{BL}(d)|$ 는 작아질 수 있다.

[0136] 또한, $d_{\text{max}}(u_{\text{max}})$ 보다 작은 전파 거리로 신호를 전파할 경우, 모든 주파수 대역대에서 에일리어징이 발생하지 않을 수 있다. 즉, $d_{\text{max}}(u_{\text{max}})$ 보다 작은 전파 거리로 신호를 전파하는 경우, 신호를 온전히 전파할 수 있다.

[0137] 도 8에서, 최대 주파수 u_{max} 를 가지는 신호를 $d_{\text{max}}(u_{\text{max}})$ 보다 큰 전파 거리 d (예를 들어, 30cm)로 전파하고자 하는 경우, 에일리어징이 발생할 수 있다. 에일리어징 없이 신호를 전파하기 위해서는, $d_{\text{max}}(u_{\text{max}})$ 보다 작은 전파 거리(예를 들어, 5cm)로 신호를 전파하거나, $|u_{BL}(d)|$ (예를 들어, 20000)보다 작은 주파수의 신호를 전파해야 한다.

[0138] ASM을 통해 신호를 전파함에 있어, 에일리어징이 발생하는 주파수 대역대를 제한하여 신호를 전파하는 방법을 BL-ASM이라 할 수 있다.

[0139] 컴퓨터 기반으로 에일리어징 없이 전파 거리 d 만큼 신호를 전파하는 BL-ASM은 아래와 같이 표현될 수 있다.

수학식 11

$$g[m, n; z_0 + d] = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{g[m, n; z_0]\} \cdot H_{BL}[p, q; d]\}$$

[0140]

[0141] 여기서, m , n 는 공간 도메인 상의 2차원 연속 좌표 x , y 를 표본화 간격 Δx , Δy 와 표본화 개수 M , N 으로 표본화한 좌표를 의미한다. m , n 값의 범위는 각각 $0 \leq m < M$, $0 \leq n < N$ 이다.

[0142] p , q 는 주파수 도메인 상의 2차원 연속 좌표 u , v 를 표본화 간격 Δu , Δv 와 표본화 개수 M , N 으로 표본화하여 이산 좌표로 표현한 것이다. p , q 의 값의 범위는 m , n 과 동일하다.

[0143] 빛의 전파 과정을 산출하기 위한 BL-ASM의 전달 함수는 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 12

[0144]

$$H_{BL}[p, q; d] = H_{AS}[p, q; d] \text{rect}\left(\frac{u[p]}{2u_{BL}(d)}\right) \text{rect}\left(\frac{v[q]}{2v_{BL}(d)}\right)$$

[0145]

BL-ASM의 전달 함수는 ASM의 전달 함수를 이산적으로 표현한 $H_{AS}[p, q; d]$ 에 구형 함수를 활용한 저역 통과 필터를 곱하여 구할 수 있다. $u[p]$, $v[q]$ 는 각각 p , q 위치의 u , v 축 상의 주파수 값을 의미한다. $u[p]$, $v[q]$ 는 각각 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 13

[0146]

$$u[p] = -\frac{N}{2} \times \Delta u + p\Delta u, \quad v[q] = -\frac{N}{2} \times \Delta v + q\Delta v$$

[0147]

$|u_{BL}(d)|$, $|v_{BL}(d)|$ 는 각각 u , v 축에서 에일리어징 없이 신호를 전파할 수 있는 최대 주파수를 의미한다. $|u_{BL}(d)|$, $|v_{BL}(d)|$ 는 각각 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 14

[0148]

$$u_{BL}(d) = \frac{1}{\lambda\sqrt{(2d\Delta u)^2 + 1}}, \quad v_{BL}(d) = \frac{1}{\lambda\sqrt{(2d\Delta v)^2 + 1}}$$

[0149]

BL-ASM은 에일리어징이 발생할 수 있는 주파수 범위를 표본화 정리에 따라 제한함으로써, 효과적으로 복소 홀로그램을 생성하고 복원할 수 있다. 다만, BL-ASM을 통해 위상 홀로그램을 컴퓨터 기반으로 복원하는 경우, 일부 전파 거리에서 성능 저하가 심하게 발생할 수 있다.

[0150]

특히, DPAC 방법이나 인공 신경망 기반 위상 홀로그램 생성 방법과 같이, 서브샘플링 또는 서브샘플링과 유사한 효과를 가지는 과정을 포함하는 방법으로 위상 홀로그램을 생성함에 있어, BL-ASM을 적용하여 위상 홀로그램을 생성하거나 복원하는 경우, 복원 성능이 저하될 수 있다. 특히, 주파수 대역대를 제한하지 않고도 에일리어징이 발생하지 않을 것이라 예상되는 $d_{\max}(u_{\max})$ 보다 작은 전파 거리로 홀로그램 생성을 했을 경우, 복원 성능이 심각하게 저하될 수 있다.

[0152]

도 9는 BL-ASM으로 생성된 홀로그램을 푸리에 변환한 결과의 일 실시예를 도시한 도면이다.

[0153]

도 9를 참조하면, 주파수 대역대를 제한하지 않고도 에일리어징이 발생하지 않을 것이라 생각되는 $d_{\max}(u_{\max})$ 보다 작은 전파 거리 d 로 전파된 홀로그램을 푸리에 변환한 결과이다. 여기서, 각각의 홀로그램은 도 9의 (a)에 도시된, BL-ASM을 통해 생성된 512×512 크기의 복소 홀로그램 H_c 와 도 9의 (b)에 도시된, 서브샘플링을 이용한 방법을 활용해 생성된 512×512 크기의 위상 홀로그램 H_p 이다.

[0154]

복소 홀로그램 H_c 를 푸리에 변환한 경우, 저주파수 성분이 고주파수 성분에 비해 높을 수 있다. 그에 반해, 서브샘플링을 이용한 방법으로 생성된 위상 홀로그램 H_p 을 푸리에 변환한 경우, 저주파수 성분뿐 아니라 고주파수 성분 역시 높아질 수 있다.

[0155]

도 9의 (b)에 도시된 푸리에 변환 결과에 따르면, 서브샘플링으로 인해 위상 홀로그램이 고주파수 성분을 추가적으로 가지도록 생성되었다. 그리고, 추가적으로 생성된 고주파수 성분으로 인하여, 에일리어징에 의한 성능 저하가 발생하였다.

[0156]

따라서 에일리어징이 발생하지 않을 것이라 예상되는 $d_{\max}(u_{\max})$ 이하의 전파 거리에서도 추가적으로 대역폭을 제한하는 것이 바람직하다.

- [0158] BL-ASM은 저역 통과 필터를 추가하여 디지털 도메인 기반으로 이산적으로 변환된 신호의 에일리어징이 발생하지 않도록 ASM을 확장한 것이다.
- [0159] 위상 홀로그래를 생성할 때, DPAC 방법 및/또는 인공 신경망 기반 위상 홀로그래 생성 방법과 같이 서브샘플링 과정을 수반하는 방법을 활용하는 경우, 에일리어징이 추가적으로 발생할 수 있다. 따라서 전파 거리에 따라 기존 BL-ASM에 비해 더 좁아진 대역폭을 가지도록 하는 새로운 BL-ASM 방법이 필요하다.
- [0160] 이에, 본 발명은 디지털 복소 홀로그래의 전파에서 잘 동작하던 BL-ASM을 디지털 위상 홀로그래에 적용 가능하도록 확장하는 것이다.
- [0162] 도 10은 전파 거리에 따라 에일리어징이 발생하지 않는 대역폭의 허용 범위의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0163] 도 10을 참조하면, 전파 거리에 따라 에일리어징 없이 전파할 수 있는 대역폭의 허용 범위가 도시되어 있다. 그 래프에서 x축은 전파 거리를 의미하며, dn에서 n 값이 커질수록 전파 거리가 증가함을 의미한다. y축은 대역폭 허용 범위를 의미한다.
- [0164] 도 10의 점선은 신호가 가질 수 있는 최대 주파수 대역폭 범위를 의미한다. 실선은 BL-ASM을 통해 에일리어징 없이 전파할 수 있는 대역폭 허용 범위 $2|u_{BL}(d)|$ 를 나타낸다. 그리고, 이점쇄선은 본 발명에 의해 추가적으로 제한된 대역폭 허용 범위 $2|u_{BL}^+(d)|$ 를 나타낸다.
- [0165] 도 10을 참조하면, 본 발명에서 제안한 방법에 따르면, 대역폭 허용 범위는 BL-ASM의 대역폭 허용 범위보다 좁 으며, BL-ASM에 의해 대역폭 제한이 되지 않았던 전파 거리에 대해서도 대역폭을 제한할 수 있다.
- [0166] 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM에 따른 신호 전파 방법은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0168] 도 11은 기존 BL-ASM 방법에 표본화 계수를 추가하여 원본 신호를 목표 신호로 전파하는 방법에 대한 모델링의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0169] 도 11을 참조하면, 원본 신호는 전파 방향 z 를 따라 전파 거리 d 만큼 떨어진 곳으로 전파될 수 있다. $g(z_0)$ 는 공간 도메인의 전파 방향 z 상에서 z_0 에 위치한 원본 신호를 의미할 수 있다. $G(z_0)$ 는 공간 도메인에 존재하는 $g(z_0)$ 를 푸리에 변환 연산(F)를 통해 주파수 도메인으로 변환한 결과와 같을 수 있다.
- [0170] 여기서, BL-ASM과 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM의 차이는 아래에 설명하는 바와 같다. BL-ASM에 따르면, 전달 함수 $H_{AS}(d)$ 에 u 축과 v 축의 최대 주파수를 각각 $u_{BL}(d)$ 와 $v_{BL}(d)$ 로 제한하는 저역 통과 필터를 거쳐 생성된 전달 함수인 BL-ASM 전달함수 $H_{BL}(d)$ 를 사용할 수 있다. 여기서, $H_{AS}(d)$ 에 저역 통과 필터를 적용함으로써, $H_{AS}(d)$ 의 대역폭을 제한할 수 있다. 그리고, 주파수 도메인의 원본 신호 $G(z_0)$ 에 BL-ASM의 전달 함수 $H_{BL}(d)$ 를 곱 한 후 역 푸리에 변환 연산을 적용하여, d 만큼 떨어진 곳에서의 목표 신호를 구할 수 있다.
- [0171] 반면, 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM에 따르면, 전달 함수 $H_{AS}(d)$ 에 u 축과 v 축의 최대 주파수를 각각 $u_{BL}^+(d, \alpha)$ 와 $v_{BL}^+(d, \alpha)$ 로 제한하는 저역 통과 필터를 거쳐 생성된 전달 함수인 BL-ASM 전달함수 $H_{BL}^+(d, \alpha)$ 를 사용할 수 있다. 여기서, α 는 저역 통과 필터에 적용되는 표본화 계수일 수 있다.
- [0172] $H_{AS}(d)$ 에 저역 통과 필터를 적용함으로써, $H_{AS}(d)$ 의 대역폭을 제한할 수 있다. 그리고, 주파수 도메인의 원본 신호 $G(z_0)$ 에 BL-ASM의 전달 함수 $H_{BL}^+(d, \alpha)$ 를 곱한 후 역 푸리에 변환 연산을 적용하여, d 만큼 떨어진 곳에서의 목표 신호를 구할 수 있다.
- [0173] 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM 방식에 따라 에일리어징 없이 신호를 전파하는 원리는 아래에 설명하는 바 와 같을 수 있다.
- [0174] 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM 방식에서의 주파수 도메인에서의 표본화 간격은 아래와 같이 계산될 수 있

다.

수학식 15

$$\Delta u' = \alpha \times \Delta u$$

여기서, 표본화 간격 $\Delta u'$ 은 BL-ASM 방식에 따라 계산된 주파수 도메인에서의 표본화 간격 Δu 에 표본화 계수 α 를 곱한 표본화 간격이다. 표본화 계수 α 는 1보다 크거나 같은 실수 값을 가질 수 있다. 따라서 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM 방식에 따라 계산된 주파수 도메인에서의 표본화 간격은 BL-ASM 방식에 따라 계산된 주파수 도메인에서의 표본화 간격보다 크거나 같을 수 있다.

컴퓨터 기반으로 에일리어징 없이 전파 거리 d 만큼 신호를 전파하는 BL-ASM은 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 16

$$g[m, n; z_0 + d, \alpha] = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{g[m, n; z_0]\} \cdot H_{BL}^+[p, q; d, \alpha]\}$$

여기서, m, n 는 공간 도메인 상의 2차원 연속 좌표 x, y 를 표본화 간격 $\Delta x, \Delta y$ 와 표본화 개수 M, N 으로 표본화한 좌표를 의미한다. m, n 값의 범위는 각각 $0 \leq m < M, 0 \leq n < N$ 이다.

p, q 는 주파수 도메인 상의 2차원 연속 좌표 u, v 를 표본화 간격 $\Delta u, \Delta v$ 와 표본화 개수 M, N 으로 표본화하여 이산 좌표로 표현한 것이다. p, q 의 값의 범위는 m, n 과 동일하다.

빛의 전파 과정을 BL-ASM을 통해 산출함에 있어, BL-ASM의 전달 함수 $H_{BL}^+(p, q; d, \alpha)$ 는 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 17

$$H_{BL}^+[p, q; d, \alpha] = H_{AS}[p, q; d] \text{rect}\left(\frac{u[p]}{2u_{BL}^+(d, \alpha)}\right) \text{rect}\left(\frac{v[q]}{2v_{BL}^+(d, \alpha)}\right)$$

BL-ASM의 전달 함수는 ASM의 전달 함수를 이산적으로 표현한 $H_{AS}[p, q; d]$ 에 구형 함수를 활용한 저역 통과 필터를 곱하여 구할 수 있다. $u[p], v[q]$ 는 각각 p, q 위치의 u, v 축 상의 주파수 값을 의미한다.

$|u_{BL}^+(d)|, |v_{BL}^+(d)|$ 는 각각 u, v 축에서 에일리어징 없이 신호를 전파할 수 있는 최대 주파수를 의미한다. $|u_{BL}^+(d, \alpha)|, |v_{BL}^+(d, \alpha)|$ 는 각각 아래와 같이 계산될 수 있다.

수학식 18

$$u_{BL}^+(d, \alpha) = \frac{1}{\lambda \sqrt{(2d\Delta u')^2 + 1}}, v_{BL}^+(d, \alpha) = \frac{1}{\lambda \sqrt{(2d\Delta v')^2 + 1}}$$

표본화 요소를 도입하여 추가적으로 대역폭을 제한한 BL-ASM 방식의 전파 거리에 따른 대역폭 허용 범위는 아래와 같을 수 있다.

도 12는 표본화 요소에 각각의 전파 거리에 따라 에일리어징이 발생하지 않는 대역폭의 허용 범위의 일 실시예

를 도시한 도면이다.

- [0190] 도 12를 참조하면, 표본화 요소에 따라 전파 거리에 따른 대역폭 허용 범위가 도시된다. x축은 전파 거리를 의미한다. x축의 dn 에서 n 값이 커질수록 전파 거리가 증가한다. y축은 대역폭 허용 범위를 의미한다.
- [0191] 도 12의 점선은 신호의 최대 주파수 대역폭 범위를 의미한다. 파선은 BL-ASM을 통해 에일리어징 없이 전파할 수 있는 신호의 대역폭 범위를 지시한다. 본 발명에서 표본화 계수 α 를 1로 설정할 경우, 최대 주파수 대역폭 범위는 BL-ASM에서의 대역폭 범위와 동일하다.
- [0192] 실선 및 이점쇄선으로 나타내어진 그래프는 표본화 계수 α 를 1보다 더 큰 값으로 설정했을 때 에일리어징 없이 전파할 수 있는 신호의 대역폭 범위를 나타낸다. 특정 전파 거리를 기준으로, 표본화 계수 α 값이 커짐에 따라 에일리어징 없이 전파할 수 있는 신호의 대역폭 범위는 작아질 수 있다.
- [0193] 그리고, 특정 표본화 계수 α 를 기준으로, 전파 거리 d 가 커짐에 따라 에일리어징 없이 전파할 수 있는 신호의 대역폭 범위는 작아질 수 있다. 대역폭 범위를 지나치게 제한할 경우, 원본 신호가 가진 정보를 많이 잃어버릴 수 있다. 따라서, 특정 전파 거리에서 효율적으로 신호를 전파할 수 있는 최적의 표본화 계수 α 를 설정하는 것이 바람직하다.
- [0194] 전파 거리에 따른 표본화 계수의 최적 값은 아래에 설명하는 바와 같을 수 있다.
- [0196] 도 13은 전파 거리에 따른 표본화 계수의 최적 값의 일 실시예를 도시한 도면이다.
- [0197] 도 13을 참조하면, 전파 거리에 따른 최적의 표본화 계수가 도시되어 있다. x축은 전파 거리를 의미하며, dn 에서 n 값이 커질수록 전파 거리는 증가한다. y축은 최적의 표본화 계수를 의미한다.
- [0198] 도 13을 참조하면, 최적의 표본화 계수는 전파 거리에 반비례할 수 있다. 즉, 전파 거리가 증가함에 따라, 표본화 계수 α 를 1에 근사하게 설정하는 것이 바람직하다.
- [0199] 다만, 기존 BL-ASM에서 주파수 대역대를 제한하지 않고도 에일리어징이 발생하지 않는 $d_{\max}(u_{\max})$ 보다 작은 전파 거리로 신호를 전파하는 경우에는 표본화 계수 α 를 키우는 것이 바람직하다.
- [0201] 도 14는 본 발명의 컴퓨터 기반 위상 홀로그램을 생성하는 방법의 일 실시예를 도시하는 도면이다.
- [0202] 입력 신호를 기초로 복소 홀로그램이 생성될 수 있다(S1410).
- [0203] 생성된 복소 홀로그램을 기초로 위상 홀로그램이 생성될 수 있다(S1420). 그리고, 입력 신호를 기초로 위상 홀로그램이 생성될 수 있다(S1430). 여기서, 복소 홀로그램을 기초로 생성된 위상 홀로그램을 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램으로 지칭하고, 입력 신호를 기초로 생성된 위상 홀로그램을 입력 신호 기반 위상 홀로그램으로 지칭할 수 있다.
- [0204] 위상 홀로그램은 전파 거리만큼 전파될 수 있으며, 위상 홀로그램으로부터 영상이 복원될 수 있다(S1440). 영상은 수치적으로 산출된 빛의 전파를 기초로 위상 홀로그램으로부터 복원될 수 있다. 여기서, 복소 홀로그램 기반 위상 홀로그램 및/또는 입력 신호 기반 위상 홀로그램 중 적어도 하나를 이용하여 생성된 위상 홀로그램이 전파될 수 있다.
- [0205] 여기서, 복소 홀로그램은 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 생성되고, 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한될 수 있다.
- [0206] 여기서, 복소 홀로그램을 생성하는 단계는, 입력 신호를 표본화하는 단계를 더 포함하고, 복소 홀로그램은 표본화된 입력 신호와 전달 함수를 기초로 생성된 홀로그램일 수 있다.
- [0207] 여기서, 전달 함수는 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성된 전달 함수일 수 있다. 표본화된 입력 신호 및 저역 통과 필터를 적용한 전파 커널을 기초로 생성된 전달 함수를 이용하여 복소 홀로그램을 생성하는 실시예는 도 7 내지 도 11에서 설명한 바와 같다.
- [0208] 여기서, 표본화 계수는, 도 13에서 설명한 바와 같이 전파 거리에 반비례하도록 설정될 수 있다.
- [0209] 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 표본화 계수에 기초하여 대역폭을 제한하는 저역 통과 필터 및 저역 통과

필터를 적용한 전파 커널을 기초로 복소 홀로그램을 생성하는 실시예는 도 11 내지 도 13에서 설명한 바와 같다. 여기서, 영상은 위상 홀로그램의 전파 거리에 기초하여 대역폭을 제한하는 전달 함수를 이용하여 복원되고, 대역폭은, 홀로그램의 파장, 전파 거리, 표본화 간격 및 표본화 계수에 기초하여 제한될 수 있다.

[0210] 여기서, 전달 함수는 위상 홀로그램에 적용되는 전파 커널에 저역 통과 필터(low pass filter)를 적용한 결과 생성된 전달 함수일 수 있다. 표본화된 입력 신호 및 저역 통과 필터를 적용한 전파 커널을 기초로 생성된 전달 함수를 이용하여 영상을 복원하는 생성하는 실시예는 도 7 내지 도 11에서 설명한 바와 같다.

[0211] 여기서, 표본화 계수는, 도 13에서 설명한 바와 같이 전파 거리에 반비례하도록 설정될 수 있다.

[0212] 전파 거리에 반비례하도록 설정되는 표본화 계수에 기초하여 대역폭을 제한하는 저역 통과 필터 및 저역 통과 필터를 적용한 전파 커널을 기초로 영상을 복원하는 실시예는 도 11 내지 도 13에서 설명한 바와 같다.

[0214] 본 개시의 예시적인 방법들은 설명의 명확성을 위해서 동작의 시리즈로 표현되어 있지만, 이는 단계가 수행되는 순서를 제한하기 위한 것은 아니며, 필요한 경우에는 각각의 단계가 동시에 또는 상이한 순서로 수행될 수도 있다. 본 개시에 따른 방법을 구현하기 위해서, 예시하는 단계에 추가적으로 다른 단계를 포함하거나, 일부의 단계를 제외하고 나머지 단계를 포함하거나, 또는 일부의 단계를 제외하고 추가적인 다른 단계를 포함할 수도 있다.

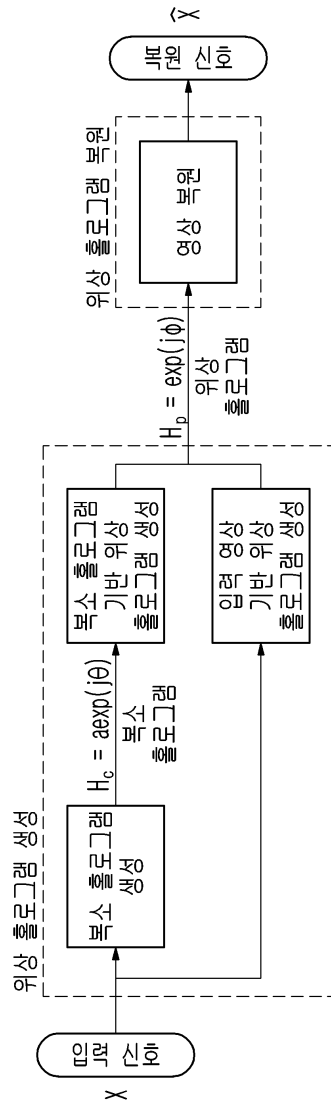
[0215] 본 개시의 다양한 실시 예는 모든 가능한 조합을 나열한 것이 아니고 본 개시의 대표적인 양상을 설명하기 위한 것이며, 다양한 실시 예에서 설명하는 사항들은 독립적으로 적용되거나 또는 둘 이상의 조합으로 적용될 수도 있다.

[0216] 또한, 본 개시의 다양한 실시 예는 하드웨어, 펌웨어(firmware), 소프트웨어, 또는 그들의 결합 등에 의해 구현될 수 있다. 하드웨어에 의한 구현의 경우, 하나 또는 그 이상의 ASICs(Application Specific Integrated Circuits), DSPs(Digital Signal Processors), DSPDs(Digital Signal Processing Devices), PLDs(Programmable Logic Devices), FPGAs(Field Programmable Gate Arrays), 범용 프로세서(general processor), 컨트롤러, 마이크로 컨트롤러, 마이크로 프로세서 등에 의해 구현될 수 있다.

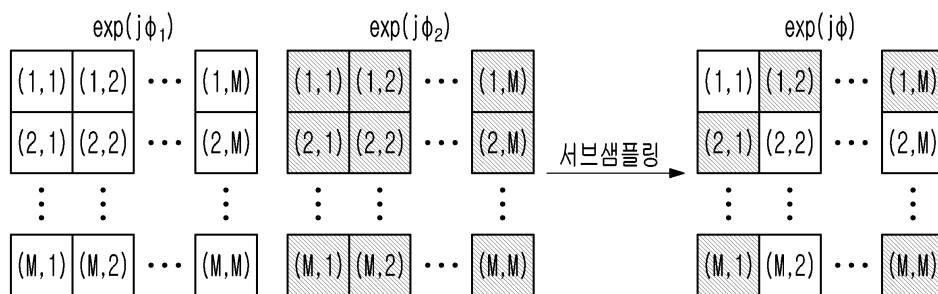
[0217] 본 개시의 범위는 다양한 실시 예의 방법에 따른 동작이 장치 또는 컴퓨터 상에서 실행되도록 하는 소프트웨어 또는 머신-실행가능한 명령들(예를 들어, 운영체제, 애플리케이션, 펌웨어(firmware), 프로그램 등), 및 이러한 소프트웨어 또는 명령 등이 저장되어 장치 또는 컴퓨터 상에서 실행 가능한 비-일시적 컴퓨터-판독가능 매체(non-transitory computer-readable medium)를 포함한다.

도면

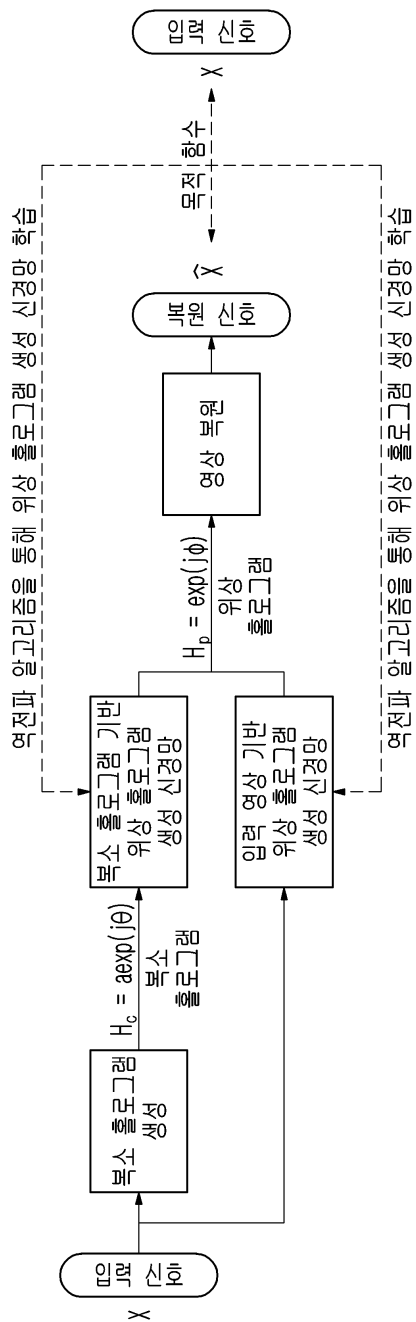
도면1



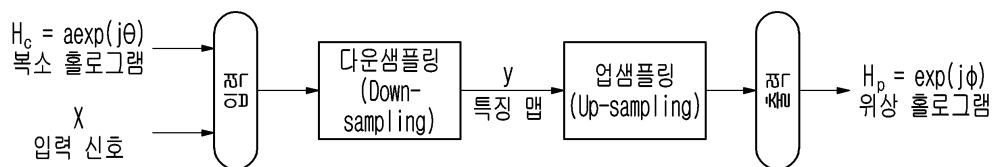
도면2



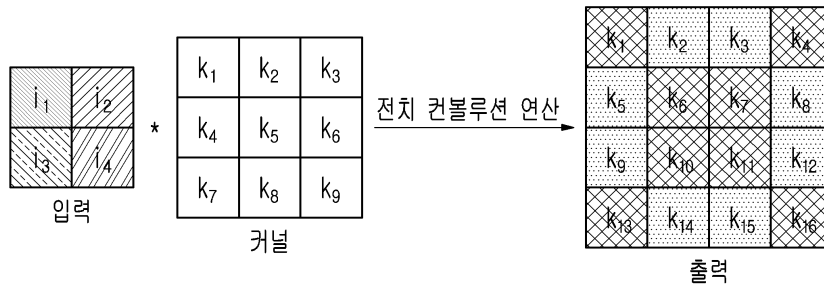
도면3



도면4



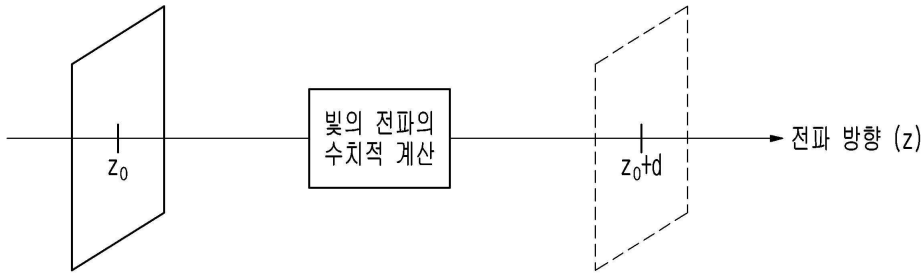
도면5



도면6

공간 도메인

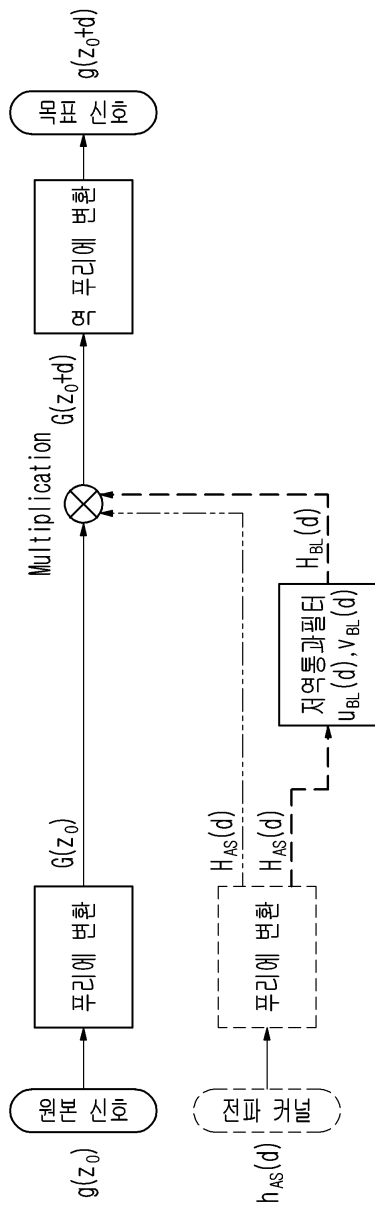
원본 신호 (Source wavefield) $g(z_0)$	전파 커널 (Propagation kernel) $h(d)$	목표 신호 (Destination wavefield) $g(z_0+d) = g(z_0) * h(d)$
---	---	--



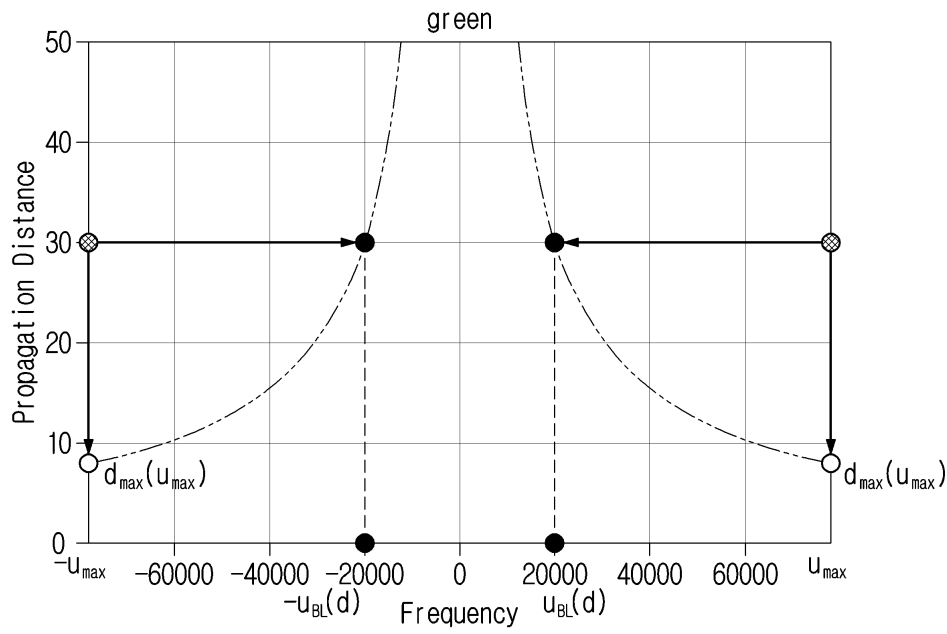
$G(z_0) = F\{g(z_0)\}$	$H(d) = F\{h(d)\}$ 전달 함수 (Transfer function)	$G(z_0+d) = G(z_0) \cdot H(d)$
------------------------	--	--------------------------------

주파수 도메인

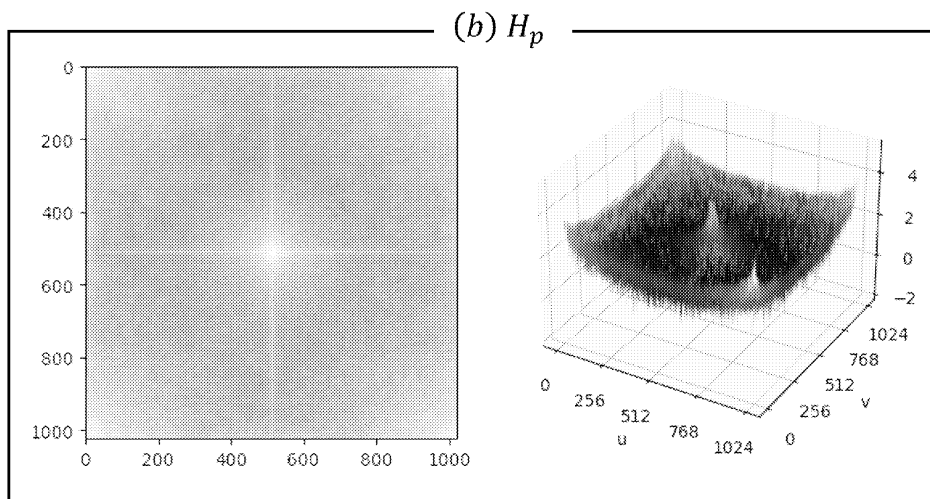
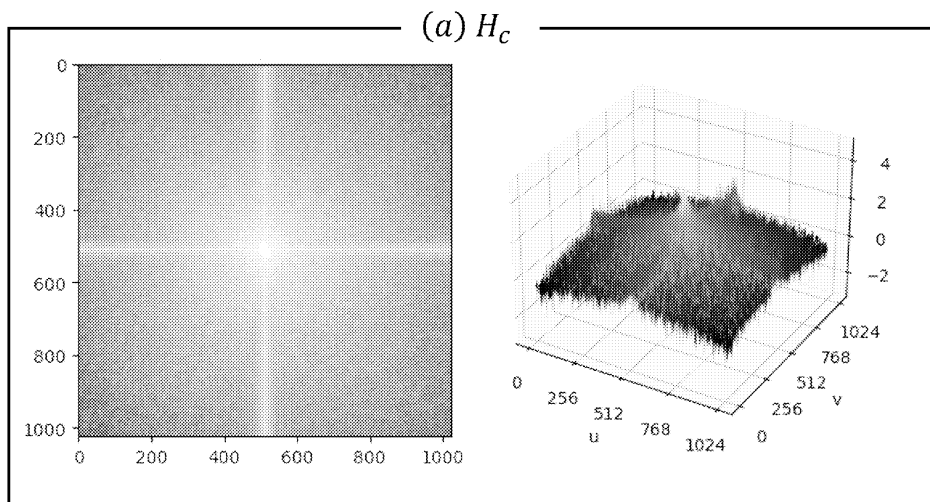
도면7



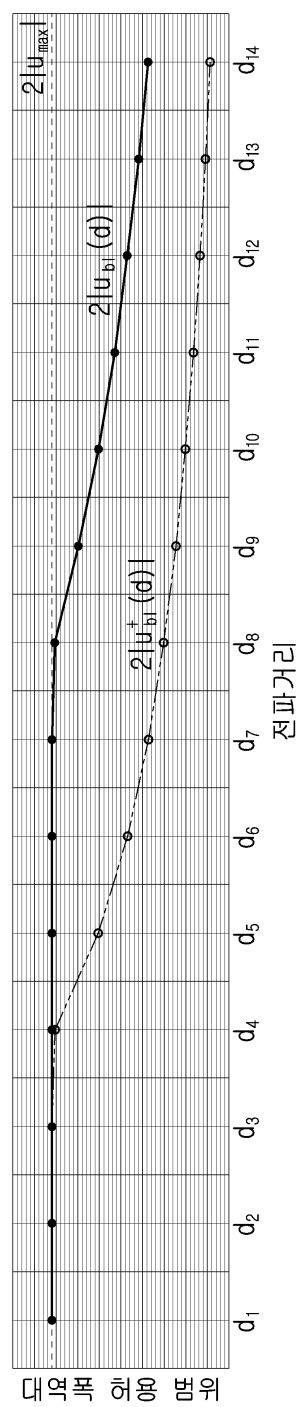
도면8



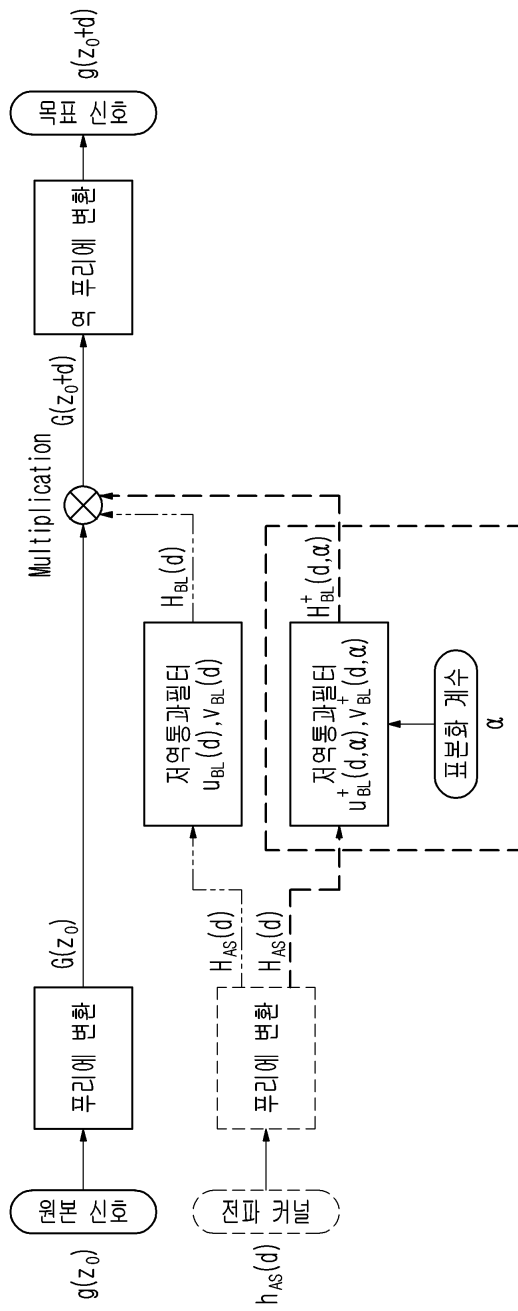
도면9



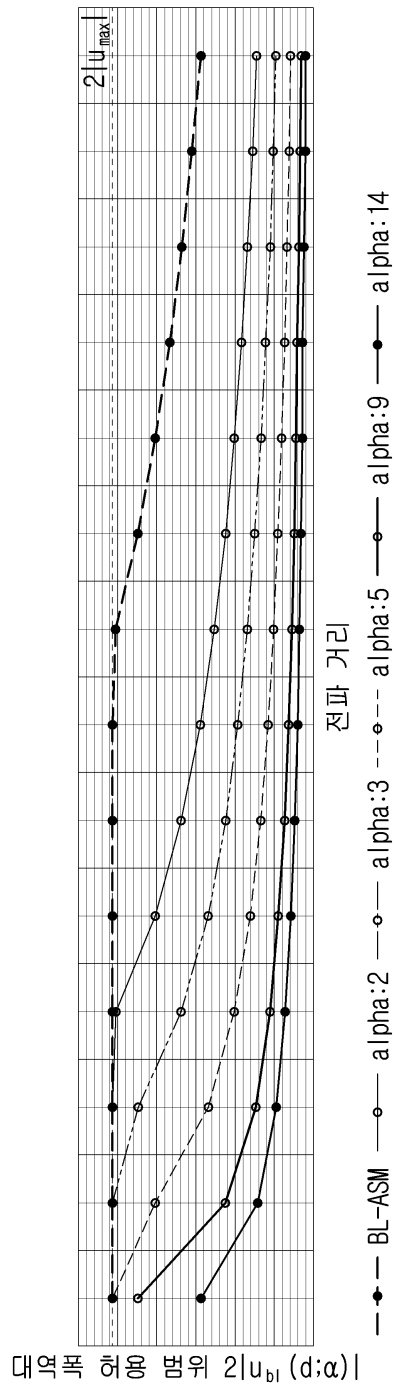
도면10



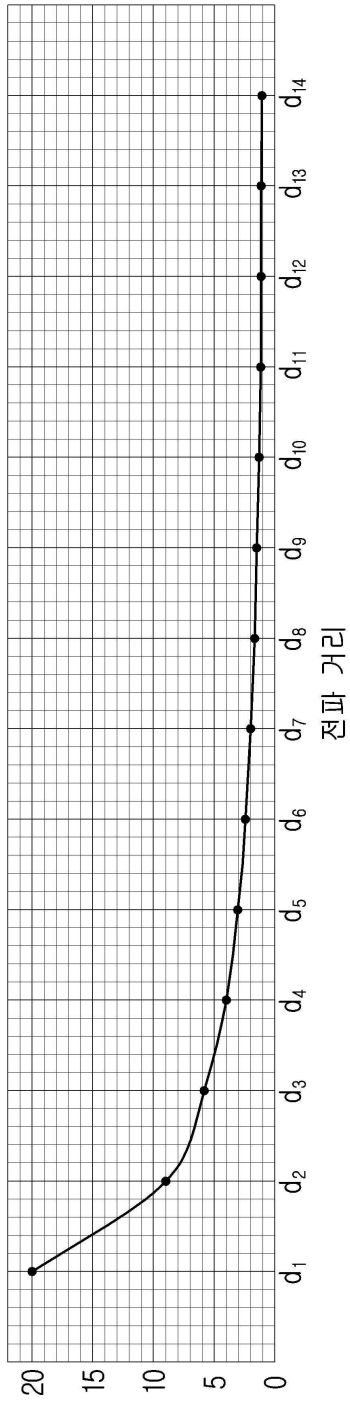
도면11



도면12



도면13



도면14

