

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0044155

(43) 공개일자 2024년04월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G16H 50/50 (2018.01) A61N 7/00 (2006.01)

A61N 7/02 (2006.01) G06N 3/08 (2023.01)

G16H 20/40 (2018.01) G16H 40/40 (2018.01)

(52) CPC특허분류

G16H 50/50 (2018.01)

A61N 7/02 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2022-0123592

(22) 출원일자 2022년09월28일

심사청구일자 2022년09월28일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

노건우

서울특별시 중구 청계천로 400, 104동 1611호

윤경호

서울특별시 강동구 양재대로 1650, 111동 1506호
(명일동, 래미안 솔베뉴)

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

박상열, 최내윤

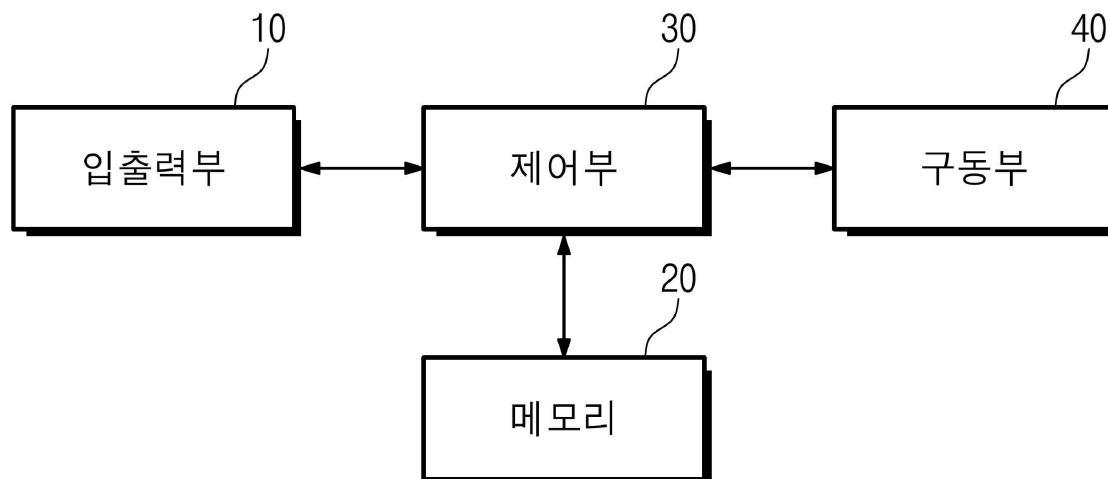
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법

(57) 요약

본 발명은 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법에 관한 것이다. 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치는 사용자가 데이터를 입력하고, 또한 사용자가 확인 가능한 형태로 데이터가 출력되게 하는 입출력부; 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램이 저장되는 메모리; 및 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램을 실행시켜, 상기 입출력부를 통해 입력된 데이터에 따른 결과 데이터를 도출하는 제어부를 포함하되, 상기 제어부는, 두개골의 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터가 입력되면, 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장 데이터를 출력한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G06N 3/08 (2023.01)
G16H 20/40 (2021.08)
G16H 40/40 (2021.08)
A61N 2007/0026 (2013.01)
A61N 2007/0091 (2013.01)

정인수

경기도 남양주시 와부읍 덕소로 270, 102동 2005호

(72) 발명자

최민욱

서울특별시 성북구 안암로9가길 53-1, 103호(안암동5가)

장민영

서울특별시 성북구 삼선교로22길 56, 에이스빌 203호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711160217
과제번호	2022-0-00824-001
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	ICTR&D혁신바우처지원사업(예타)
연구과제명	경두개 집속초음파 자극기의 AI 기반 메디컬 트윈 치료 시스템 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	(주)뉴로소나
연구기간	2022.04.01 ~ 2022.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711174342
과제번호	RS-2020-KD000084
부처명	범부처
과제관리(전문)기관명	범부처전주기의료기기연구개발사업단
연구사업명	시장친화형 글로벌 경쟁력 확보 제품 개발
연구과제명	골유합 극대화와 침강현상을 줄인 음의 포아송비 미세구조 기반 3D 프린팅 척추 케
이지 개발	
기 여 율	1/2
과제수행기관명	경북대학교병원
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

사용자가 데이터를 입력하고, 또한 사용자가 확인 가능한 형태로 데이터가 출력되게 하는 입출력부;

경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램이 저장되는 메모리; 및

상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램을 실행시켜, 상기 입출력부를 통해 입력된 데이터에 따른 결과 데이터를 도출하는 제어부를 포함하되,

상기 제어부는,

두개골의 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터가 입력되면, 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장 데이터를 출력하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제어부는, 초음파가 두개골을 지나면서 굴절이 발생하는 것을 반영하여, 상기 두개골 형상 데이터에 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 형성되는 상기 초음파 음압장 데이터를 출력하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 3차원 좌표를 나타내는 좌표 데이터 및 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 각도를 나타내는 각도 데이터를 포함하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은 심층 신경망(Deep Neural Network, DNN)을 기반으로 한 인공지능으로 제공되는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은,

압축된 상기 두개골의 형상 데이터에 대한 최소행렬을 학습하는 인코더; 및

두개골에 대한 상기 최소행렬과 정규화된 상기 초음파 변환기 위치 데이터를 입력받아, 이에 대응되는 관심영역 내 초음파 음압장을 생성하는 디코더를 포함하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은,

합성곱 신경망 기반 오토인코더 모델을 기초로 하여 구성되는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 7

제5항에 있어서,
상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은,
pix2pix 모델을 기초로 하여 구성되는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 8

제5항에 있어서,
상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은,
변분오토인코더 모델을 기초로 하여 구성되는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 9

제4항에 있어서,
상기 인공지능은 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터 및 초음파 음압장(acoustic pressure field) 데이터를 포함하는 학습 데이터를 이용하여, 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터가 입력으로 사용되고, 이에 대응한 상기 초음파 음압장 데이터가 출력으로 사용되어, 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터에 따라 초음파 음압장의 형상을 예측하도록 학습이 수행되는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치.

청구항 10

두개골 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치가 입력되는 단계; 및
상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파의 음압장 데이터를 출력하는 단계를 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치에 의해 실행시키기 위하여 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램.

청구항 11

제10항에 있어서,
상기 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 3차원 좌표를 나타내는 좌표 데이터 및 두개골에 대해 초음파 변환기가 위치되는 각도를 나타내는 각도 데이터를 포함하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램.

청구항 12

두개골 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터 및 초음파 음압장(acoustic pressure field) 데이터를 포함하는 학습 데이터를 준비하는 단계; 및
상기 학습 데이터에 있어, 상기 두개골 형상 데이터 및 상기 초음파 변환기의 위치 데이터가 입력으로 사용되고, 이에 대응하여 상기 초음파 음압장 데이터가 출력으로 사용되어, 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장을 예측하도록 인공지능을 학습시키는 단계를 포함하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램으로 제공되는 음압장 생성 인공지능 구현 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법에 관한 것으로, 보다 상세히 주어진 두개골의 형상 및 초음파 변환기의 위치에 따라 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장의 형상을 빠르게 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 집속 초음파(Focused Ultrasound; FUS)는 생체조직 내에 국소영역에 집중된 음향에너지를 조사하여 비침습적으로 의료 행위를 할 수 있어, 다양한 영역의 치료에 이용된다. 집속 초음파를 활용한 비침습적 치료를 위해서는 원하는 영역에 초음파를 조사할 수 있어야 한다. 하지만 초음파가 비가시적이며 생체 내 조직에 전달될 때 반사 및 굴절 특성을 나타낸다.
- [0003] 이러한 문제를 해결하기 위해 자기공명(magnetic resonance)을 통해 온도변화를 알아내 초음파를 가시화하는 자기공명 유도 집속 초음파(magnetic-resonance-guided FUS; MRgFUS) 시스템이 개발되었지만 시술에 많은 시간이 소요되는 문제가 있다. 또한, 경두개 치료의 경우 주로 저강도 집속 초음파가 사용되는데, 저강도 집속 초음파의 경우 비교적 온도변화가 적기 때문에 자기공명 유도 집속 초음파 시스템의 사용이 어렵다.
- [0004] 또한, 영상유도 집속 초음파(neuro-navigation)를 통해 실시간 광학 추적 장비를 이용한 초음파 변환기의 초점 위치를 미리 획득한 의료영상에 나타내는 시스템이 있지만, 두개골에 의한 초점의 위치와 세기의 변화 효과를 고려하지 못하는 한계점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 발명은 주어진 두개골의 형상 및 초음파 변환기의 위치에 따라 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장의 형상을 빠르게 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법을 제공하기 위한 것이다.
- [0006] 또한, 본 발명은 초음파가 두개골을 통과할 때 발생하는 굴절을 반영하여 초음파 음압장을 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법을 제공하기 위한 것이다.
- [0007] 또한, 본 발명은 높은 정확성을 가지고 실시간에 근접한 속도로 초음파 음압장을 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

- [0008] 본 발명의 일 측면에 따르면, 사용자가 데이터를 입력하고, 또한 사용자가 확인 가능한 형태로 데이터가 출력되게 하는 입출력부; 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램이 저장되는 메모리; 및 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램을 실행시켜, 상기 입출력부를 통해 입력된 데이터에 따른 결과 데이터를 도출하는 제어부를 포함하되, 상기 제어부는, 두개골의 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터가 입력되면, 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장 데이터를 출력하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치가 제공될 수 있다.
- [0009] 또한, 상기 제어부는, 초음파가 두개골을 지나면서 굴절이 발생하는 것을 반영하여, 상기 두개골 형상 데이터에 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 형성되는 상기 초음파 음압장 데이터를 출력할 수 있다.
- [0010] 또한, 상기 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 3차원 좌표를 나타내는 좌표 데이터 및 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 각도를 나타내는 각도 데이터를 포함할 수 있다.
- [0011] 또한, 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은 심층 신경망(Deep Neural Network, DNN)을 기반으로 한 인공지능으로 제공될 수 있다.
- [0012] 또한, 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은, 압축된 상기 두개골의 형상 데이터에 대한 회소행렬을 학습하는 인코더; 및 두개골에 대한 상기 회소행렬과 정규화된 상기 초음파 변환기 위치 데이터를 입력받아, 이에 대응되는 관심영역 내 초음파 음압장을 생성하는 디코더를 포함할 수 있다.
- [0013] 또한, 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은, 합성곱 신경망 기반 오토인코더 모델을 기초로 하여 구성될 수 있다.
- [0014] 또한, 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은, pix2pix 모델을 기초로 하여 구성될 수 있다.
- [0015] 또한, 상기 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은, 변분오토인코더 모델을 기초로 하여 구성될 수 있다.

- [0016] 또한, 상기 인공지능은 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터 및 초음파 음압장(acoustic pressure field) 데이터를 포함하는 학습 데이터를 이용하여, 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터가 입력으로 사용되고, 이에 대응한 상기 초음파 음압장 데이터가 출력으로 사용되어, 상기 두개골 형상 데이터, 상기 초음파 변환기 위치 데이터에 따라 초음파 음압장의 형상을 예측하도록 학습이 수행될 수 있다.
- [0017] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 두개골 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치가 입력되는 단계; 및 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파의 음압장 데이터를 출력하는 단계를 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치에 의해 실행시키기 위하여 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램이 제공될 수 있다.
- [0018] 또한, 상기 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 상기 초음파 변환기가 위치되는 3차원 좌표를 나타내는 좌표 데이터 및 두개골에 대해 초음파 변환기가 위치되는 각도를 나타내는 각도 데이터를 포함할 수 있다.
- [0019] 본 발명의 또 다른 측면에 따르면, 두개골 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터 및 초음파 음압장(acoustic pressure field) 데이터를 포함하는 학습 데이터를 준비하는 단계; 및 상기 학습 데이터에 있어, 상기 두개골 형상 데이터 및 상기 초음파 변환기의 위치 데이터가 입력으로 사용되고, 이에 대응하여 상기 초음파 음압장 데이터가 출력으로 사용되어, 상기 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장을 예측하도록 인공 지능을 학습시키는 단계를 포함하는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램으로 제공되는 음압장 생성 인공지능 구현 방법이 제공될 수 있다.

발명의 효과

- [0020] 본 발명의 일 실시 예에 의하면, 주어진 두개골의 형상 및 초음파 변환기의 위치에 따라 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장의 형상을 빠르게 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법이 제공될 수 있다.
- [0021] 또한, 본 발명의 일 실시 예에 의하면, 초음파가 두개골을 통과할 때 발생하는 굴절을 반영하여 초음파 음압장을 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법이 제공될 수 있다.
- [0022] 또한, 본 발명의 일 실시 예에 의하면, 높은 정확성을 가지고 실시간에 근접한 속도로 초음파 음압장을 예측할 수 있는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램 및 음압장 생성 인공지능 구현 방법이 제공될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0023] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치를 나타내는 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치에 의해 결과 데이터가 도출되는 과정을 나타내는 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램으로 제공되는 음압장 생성 인공지능이 학습되는 방법을 나타내는 흐름도이다.
- 도 4 및 도 5는 학습 데이터를 전산역학을 기반으로 한 시뮬레이션을 수행하여 획득하기 위한 데이터의 구성을 나타내는 도면이다.
- 도 6은 음압장 생성 인공지능이 동작과정을 나타내는 블록도이다.
- 도 7은 본 발명의 제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.
- 도 8은 본 발명의 제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.
- 도 9는 본 발명의 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.
- 도 10은 학습된 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 좌표와 정답지에 해당하는 초점 좌표 사이의 거리를 설명하는 도면이다.

도 11은 다이소 유사 계수를 설명하는 도면이다.

도 12는 하우스도르프 거리를 설명하는 도면이다.

도 13은 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장, 전산해석기반 시뮬레이션에 의해 예측되는 초음파 음압장 및 이들을 비교하기 위해 초점 영역의 오차를 시각화한 도면이다.

도 14는 실제 공간에서 초음파의 음압장을 측정하기 위한 수조실험을 설명하는 도면이다.

도 15는 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능에 의해 예측되는 초음파의 음압장과 수조실험으로부터 측정된 초음파 음압장을 비교한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0024] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 상세히 설명할 것이다. 그러나 본 발명의 기술적 사상은 여기서 설명되는 실시 예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시 예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.
- [0025] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한, 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.
- [0026] 또한, 본 명세서의 다양한 실시 예들에서 제1, 제2, 제3 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 따라서, 어느 한 실시 예에 제 1 구성요소로 언급된 것이 다른 실시 예에서는 제 2 구성요소로 언급될 수도 있다. 여기에 설명되고 예시되는 각 실시 예는 그것의 상보적인 실시 예도 포함한다. 또한, 본 명세서에서 '및/또는'은 전후에 나열한 구성요소들 중 적어도 하나를 포함하는 의미로 사용되었다.
- [0027] 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다. 또한, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징이나 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하는 것으로 이해되어서는 안 된다. 또한, 본 명세서에서 "연결"은 복수의 구성요소를 간접적으로 연결하는 것, 및 직접적으로 연결하는 것을 모두 포함하는 의미로 사용된다.
- [0028] 또한, 하기에서 본 발명을 설명함에 있어 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 것이다.
- [0029] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치를 나타내는 도면이다.
- [0030] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치는 입출력부(10), 메모리(20), 제어부(30) 및 구동부(40)를 포함한다.
- [0031] 입출력부(10)는 사용자가 데이터를 입력하고, 또한 사용자가 확인 가능한 형태로 데이터가 출력되도록 한다. 일 예로, 입출력부(10)는 사용자가 데이터를 입력하기 위한 키보드, 마우스, 디지털이징 패드 등으로 제공될 수 있다. 또한, 입출력부(10)는 데이터 출력을 위한 디스플레이 패널 등을 포함할 수 있다. 또한, 입출력부(10)는 입력 부분과 출력 부분이 통합된 터치 스크린 등으로 제공될 수 있다. 또한, 입출력부(10)는 데이터 입력을 위한 부분 또는 데이터 출력을 위한 부분이 다른 의료 장비와 통합된 형태로 제공되어, 의료 장비가 데이터의 입력 또는 데이터의 출력을 수행하도록 제공될 수도 있다.
- [0032] 메모리(20)는 데이터가 저장될 수 있다. 메모리(20)에는 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램이 저장된 상태로 제공될 수 있다. 이 때, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은 인공지능을 기반으로 구현된다. 구체적으로, 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램은 심층 신경망(Deep Neural Network, DNN)을 기반으로 한 인공지능으로 구현된 것일 수 있다. 또한, 메모리(20)는 입출력부(10)를 통해 입력된 데이터, 입출력부(10)를 통해 입력된 데이터를 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램에 적용하여 생성된 데이터를 저장할 수 있다.
- [0033] 제어부(30)는 메모리(20)에 저장된 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램을 실행시켜, 입출력부(10)를 통해 입력된 데이터에 따른 결과 데이터가 도출되고, 도출된 결과 데이터가 입출력부(10)를 통해 출력되게 한다.

- [0034] 구동부(40)는 집속초음파를 발생시키는 초음파 변환기의 동작 상태를 제어한다. 구동부(40)는 제어부(30)에서 예측된 초음파 음압장에 따라 초음파 변환기의 위치를 제어할 수 있다.
- [0035] 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치에 의해 결과 데이터가 도출되는 과정을 나타내는 도면이다.
- [0036] 도 2를 참조하면, 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치는 두개골 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치가 입력되면(S10), 입력된 초음파 변환기가 인가하는 초음파에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파의 음압장 데이터를 출력한다(S20). 초음파 변환기의 위치 데이터는 생체의 머리의 외측에서의 위치 데이터로 제공된다. 초음파의 음압장 데이터는 생체에 있어, 두개골이 내측에 위치되어 뇌가 위치되는 영역에서의 초음파에 의해 형성되는 음압장의 3차원 상의 위치, 형상으로 설정된다. 이에 따라, 특정 두개골의 형태에 대해 초음파 변환기 위치를 입력하면, 이에 의해 해당 두개골의 내부에 형성되는 초음파 음압장 데이터를 실시간으로 출력, 확인할 수 있다.
- [0037] 집속 초음파(Focused Ultrasound; FUS)는 생체조직 내에 국소영역에 집중된 음향에너지를 조사할 수 있다. 이에 따라 집속 초음파는 인체의 내부에 에너지를 인가하여 진단, 치료 등의 목적으로 사용되고 있다. 특히, 집속 초음파는 뇌에 인가되는 경우, 비침습적으로 뇌 자극을 할 수 있어 뇌 자극 및 치료에 사용될 수 있는 것으로 확인되었다.
- [0038] 집속 초음파는 그 강도에 따라 고강도 집속 초음파(High-intensity FUS; HIFU)와 저강도 집속 초음파(Low-intensity FUS; LIFU)로 나뉠 수 있다. 고강도 집속 초음파는 혈전 분해(thrombolysis), 체외 충격파(extracorporeal shockwave), 열 절제(thermal ablation), 보일링 히스토트립시(boiling histotripsy) 등과 같이 대상 영역의 상태를 직접적으로 변경하여 치료 효과가 나타나도록 한다.
- [0039] 반면, 저강도 집속 초음파는 혈액 뇌 장벽(blood-brain barrier) 개방을 통한 약물전달, 비침습적 뇌 자극(brain stimulation) 등과 같은 분야에 이용된다. 또한, 저강도 집속 초음파는 최근 간질(epilepsy), 뇌 종양(brain tumors), 알츠하이머(Alzheimer's), 파킨슨병(Parkinson's disease) 등과 같은 신경계 질환의 치료에 효과가 있는 것으로 밝혀지고 있다.
- [0040] 집속 초음파에 의한 치료가 효과를 나타내기 위해서는 원하는 영역에 초음파를 조사할 수 있어야 한다. 하지만 초음파는 비가시적이며 생체 내에서 진행할 때 반사 및 굴절하는 특성을 보인다. 특히, 초음파는 파동특성으로 인해 물성이 다른 영역이 만나는 경계를 통과할 때 왜곡이 발생하며, 이에 따라 두개골이나 다공성 영역을 통과할 때 심한 왜곡이 발생한다. 이에 따라서, 초음파를 경두개 치료에 사용하는 데에는 어려움을 겪는다.
- [0041] 반면, 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치는 초음파가 진행하면서 두개골을 비롯한 영역을 지나면서 굴절이 발생하는 것을 반영하여, 입력된 두개골 형상 데이터에 대응되는 두개골의 외측에 초음파 변환기를 위치시켰을 때, 그에 따라 경두개 내측에 형성되는 초음파 음압장 데이터를 제공한다. 이에 따라, 의료 행위를 하는 사용자는 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치에 의해 제공되는 초음파 음압장 데이터를 통해 효과적으로 초음파를 이용한 의료 행위를 수행할 수 있다.
- [0042] 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 프로그램으로 제공되는 음압장 생성 인공지능이 학습되는 방법을 나타내는 흐름도이다.
- [0043] 도 3을 참조하면, 음압장 생성 인공지능의 학습을 위한 학습 데이터가 준비된다(S20). 학습 데이터는 두개골의 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치 데이터 및 음압장(acoustic pressure field) 형상 데이터를 포함한다.
- [0044] 두개골의 형상 데이터는 두개골의 입체적 형상에 관한 데이터이다. 두개골의 형상 데이터는 두개골에 대한 3차원 이미지 형태로 제공될 수 있다. 두개골의 형상 데이터는 CT(computed tomography) 촬영 등을 통해 촬영된 이미지 일 수 있다.
- [0045] 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 초음파 변환기가 위치되는 지점에 대한 데이터이다. 초음파 변환기의 위치 데이터는 두개골에 대해 초음파 변환기가 위치되는 3차원 좌표를 나타내는 좌표 데이터, 두개골에 대해 초음파 변환기가 위치되는 각도(즉, 두개골에 대해 초음파가 조사되는 각도)를 나타내는 각도 데이터를 포함한다.
- [0046] 음압장 형상 데이터는 초음파 변환기에서 조사된 초음파가 두개골의 안쪽, 즉 뇌가 위치한 영역에서 진행되는 형상에 관한 데이터이다. 음압장 형상 데이터는 3원 이미지 형태, 또는 특정 기준면을 대한 2차원 이미지 형태로 제공될 수 있다. 음압장 형상 데이터는 두개골 형상 데이터, 해당 두개골에 초음파를 인가하는 초음파

변환기의 위치 데이터와 쌍을 이루도록 제공된다. 음압장 형상 데이터는 후술하는 바와 같이 집속 초음파의 초점에 대한 정의에 따라, 반치전폭(FWHM, full-width at half-maximum) 임계값을 통해 초음파의 초점 영역과 초점 밖 영역으로 이진화 처리될 수 있다. 또한, 초점 영역의 경계가 반치전폭 임계값에 따른 경계에서 타원체 경계로 변환될 수 있다.

[0047] 이와 같은 학습 데이터는 초음파 변환기를 생체의 두개골에 인접하게 위치시켜 초음파를 조사하면서 기존의 의료 장비를 통해 두개골의 형태, 초음파가 진행되는 경로를 촬영하여 획득될 수 있다.

[0048] 또한, 학습 데이터는 전산역학을 기반으로 한 시뮬레이션을 통해 획득될 수 있다.

[0049] 도 4 및 도 5는 학습 데이터를 전산역학을 기반으로 한 시뮬레이션을 수행하여 획득하기 위한 데이터의 구성을 나타내는 도면이다.

[0050] 도 4 및 도 5를 참조하면, 시뮬레이션의 수치 모델링을 위한 데이터는 두개골 모델(110), 초음파 변환기 모델(120) 및 관심 영역(150)을 포함한다.

[0051] 두개골 모델(110)은 학습 데이터의 두개골의 형상 데이터에 대응된다. 두개골 모델(110)은 실물 두개골을 촬영하여 제공될 수 있다. 일 예로, 두개골 모델(110)을 실물 두개골을 CT 촬영하여 제공될 수 있다. 두개골 모델(110)은 물에서 만족스러운 정밀도 및 공간 분해능을 갖도록 설정 공간 해상도 이상으로 제공될 수 있다. 일 예로, 두개골 모델(110)은 0.5mm x 0.5mm x 0.5mm 이상의 공간 해상도를 갖도록 CT 촬영하여 제공될 수 있다. 두개골 모델(110)의 복셀(voxels)은 수학식 1과 같이 Hounsfield units에 따라 물과 해면골 및 피질골로 분류될 수 있다.

수학식 1

$$c_{i,j,k} = \begin{cases} 1500 \text{ m/s}, & \text{for } \phi_{i,j,k} \leq 0 \\ 2140 \text{ m/s}, & \text{for } 0 < \phi_{i,j,k} \leq 1000 \\ 2384 \text{ m/s}, & \text{for } 1000 < \phi_{i,j,k} \end{cases}$$

$$\rho_{i,j,k} = \begin{cases} 1000 \text{ kg/m}^3, & \text{for } \phi_{i,j,k} \leq 0 \\ 1000 + 1.19\phi_{i,j,k} \text{ kg/m}^3, & \text{for } 0 < \phi_{i,j,k} \leq 1000 \\ 2190 \text{ kg/m}^3, & \text{for } 1000 < \phi_{i,j,k} \end{cases}$$

$$a_{i,j,k} = 33 \text{ Np/m}, \text{ for } 0 < \phi_{i,j,k}$$

[0052] $c_{i,j,k}$ 는 초음파의 속력, $\rho_{i,j,k}$ 는 초음파의 밀도이다. 이 때, $\phi_{i,j,k} \leq 0$ 는 물, $0 < \phi_{i,j,k} \leq 1000$ 는 해면골, $1000 < \phi_{i,j,k}$ 는 피질골이다. $a_{i,j,k}$ 는 감쇄 계수이다.

[0054] 두개골 모델(110)은 서로 상이한 2개 이상의 실물 두개골 각각을 이용하여, 복수가 만들어 질 수 있다.

[0055] 초음파 변환기 모델(120)은 실물 초음파 변환기를 모델링 한다. 초음파 변환기 모델(120)은 기 설정 직경, 기 설정 곡률 반경 및 기 설정 초점 길이를 갖도록 모델링 될 수 있다. 일 예로, 초음파 변환기 모델(120)은 직경 96mm, 곡률 반경 52mm, 초점 길이 83mm로 모델링 될 수 있다. 초음파 변환기 모델(120)에는 위치 기준점(130)이 설정되어, 위치 기준점의 좌표를 초음파 변환기 모델(120)의 위치로 설정할 수 있다. 일 예로, 초음파 변환기 모델(120)에 있어 두개골 모델(110)을 향하는 출구면의 중심 영역을 위치 기준점(130)으로 설정할 수 있다. 초음파 변환기 모델(120)은 두개골 모델(110)과 인접하게 위치된 거동 영역(140)에서 위치가 가변 되면서 시뮬레

이션이 수행될 수 있다. 거동 영역(140)은 두개골 모델(110)의 상부 외면에 인접하고, 기 설정 체적을 갖도록 설정될 수 있다. 일 예로, 거동 영역(140)은 20mm x 20mm x 20mm 크기로 설정될 수 있다.

[0056] 초음파 변환기 모델(120)의 위치는 위치 기준점(130)의 3차원 좌표를 나타내는 시뮬레이션 좌표 데이터, 두개골 모델(110)에 대해 초음파 변환기 모델(120)이 위치되는 각도를 나타내는 시뮬레이션 각도 데이터를 포함한다. 시뮬레이션 각도 데이터는 출구면의 법선 벡터로 정의될 수 있다. 시뮬레이션 좌표 데이터, 시뮬레이션 각도 데이터는 각각 초음파 변환기의 좌표 데이터 및 각도 데이터에 대응된다.

[0057] 관심 영역(150)은 초음파 변환기 모델(120)에서 조사된 초음파가 전파되는 형상 데이터를 획득하기 위한 영역으로 기 설정 체적을 갖도록 설정된다. 일 예로, 관심 영역(150)은 40mm x 75mm x 40mm 크기로 설정될 수 있다.

[0058] 관심 영역(150)의 중심점은 초음파 변환기 모델(120)의 초기 위치에서 초점 길이만큼 떨어진 위치에 설정될 수 있다. 관심영역이 시작되는 평면의 중심(x=20mm, y=0mm, z=20mm)은 초음파 변환기 출구면의 중심좌표와 50mm 거리를 가지도록 설정될 수 있다. 초음파 변환기 모델(120)의 위치를 변경시키면서, 관심 영역(150)내에서 초음파가 전파되는 형상의 획득을 위한 시뮬레이션이 수행된다. 관심 영역(150) 내에서 초음파 전파 모델링을 실시하기 위해 지배방정식으로 [수학식 2]와 같은 Westervelt-Lightill 방정식이 사용될 수 있다.

수학식 2

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\tilde{a}}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \text{ with } \tilde{a} = 2a \sqrt{\frac{a^2 c^4}{4\pi^2 f^2} + c^2}$$

[0059]

[0060] 여기서 p는 음파의 압력, c는 매질에서의 파동 속도, a는 매질에서의 감쇠 계수, f는 음파의 주파수, t는 시간이다.

[0061] 지배방정식의 공간 및 시간에 대한 편도함수를 근사하기 위해 [수학식 3]과 같은 finite-difference time domain(FDTD) 방법을 사용할 수 있으며, 초음파 전파는 식을 반복적으로 평가하여 수행된다.

수학식 3

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t}P_{i,j,k} = & {}^tP_{i,j,k} - C_{i,j,k}^p \left[({}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^x - {}^{t+1/2\Delta t}V_{i-1,j,k}^x) \right. \\ & + ({}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^y - {}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j-1,k}^y) \\ & \left. + ({}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^z - {}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j-1,k}^z) \right] \\ & - A_{i,j,k} {}^tP_{i,j,k}, \end{aligned}$$

$${}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^x = {}^{t-1/2\Delta t}V_{i,j,k}^x - C_{i,j,k}^{vx} \left[{}^tP_{i+1,j,k} - {}^tP_{i,j,k} \right],$$

$${}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^y = {}^{t-1/2\Delta t}V_{i,j,k}^y - C_{i,j,k}^{vy} \left[{}^tP_{i,j+1,k} - {}^tP_{i,j,k} \right],$$

$${}^{t+1/2\Delta t}V_{i,j,k}^z = {}^{t-1/2\Delta t}V_{i,j,k}^z - C_{i,j,k}^{vz} \left[{}^tP_{i,j,k+1} - {}^tP_{i,j,k} \right],$$

$$C_{i,j,k}^p = \rho_{i,j,k} c_{i,j,k}^2 \frac{\Delta t}{\delta}, \quad A_{i,j,k} = 2\Delta t a_{i,j,k} \sqrt{\frac{a_{i,j,k}^2 c_{i,j,k}^4}{4\pi^2 f^2} + c_{i,j,k}^2}$$

$$C_{i,j,k}^{vx} = \frac{2}{\rho_{i,j,k} + \rho_{i+1,j,k}} \frac{\Delta t}{\delta},$$

$$C_{i,j,k}^{vy} = \frac{2}{\rho_{i,j,k} + \rho_{i,j+1,k}} \frac{\Delta t}{\delta},$$

$$C_{i,j,k}^{vz} = \frac{2}{\rho_{i,j,k} + \rho_{i,j,k+1}} \frac{\Delta t}{\delta},$$

[0062]

[0063]

여기서, ${}^tP_{i,j,k}$ 는 절점에서의 음파의 압력(음압 값), ${}^tV_{i,j,k}^x$, ${}^tV_{i,j,k}^y$, ${}^tV_{i,j,k}^z$ 는 절점에서 시간 t에서 x, y, z축에 대한 음파의 속력, $c_{i,j,k}$ 는 초음파의 속도, $\rho_{i,j,k}$ 는 초음파의 밀도, $a_{i,j,k}$ 는 감쇄 계수이다.

[0064]

이때, FDTD를 포함하여 explicit dynamic processes를 풀기위한 알고리즘은 수치적인 오류를 가지기 때문에 [수학식 4]와 같이 표현될 수 있는 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) criterion으로 알려진 안정성 조건을 만족시켜야 한다.

수학식 4

$$\Delta t \leq \frac{\delta}{\sqrt{3}c}$$

[0065]

[0066]

여기서, Δt 는 시간간격, δ 는 이산화 된 공간 간격, c 는 파동의 속력이다.

[0067]

경두개에 사용되는 집속초음파의 적절한 주파수는 650kHz 미만으로 알려져 있으며, 본 실시 예에서는 250kHz의 초음파를 조사하여 수치 모델링을 진행하고 학습데이터를 얻기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

[0068]

전산역학 기반 시뮬레이션을 수행하면 초음파 변환기 모델(120)의 위치에 따른 관심영역 내의 초음파의 압력분포를 음압장 형상 데이터로 얻을 수 있다. 이 때 시뮬레이션은 서로 상이한 형상의 두개골 모델(110) 각각에 대해 수행되어, 그 결과가 획득될 수 있다.

[0069]

음압장 형상의 시뮬레이션 결과는 집속 초음파의 초점에 대한 정의를 통해 초음파의 초점 영역과 초점 밖 영역으로 이진화 처리될 수 있다. 집속 초음파의 초점 영역은 반치전폭(FWHM, full-width at half-maximum) 임계값에 해당되는 영역으로 정의될 수 있다.

[0070]

도 6은 음압장 생성 인공지능이 동작과정을 나타내는 블록도이다.

[0071]

도 6을 참조하면, 음압장 생성 인공지능은 준비된 학습 데이터를 통해, 두개골의 형상 데이터, 초음파 변환기의 위치와 그에 따라 생성되는 초음파 음압장의 관계를 학습한다(S21).

[0072]

이후, 음압장 생성 인공지능은 두개골 형상 데이터 및 초음파 변환기 위치가 입력되면 이에 따라 생성될 초음파 음압장 데이터를 출력한다.

[0073]

구체적으로, 준비된 학습 데이터를 통해 음압장 생성 인공지능이 학습된다.

[0074]

학습 데이터는 두개골 형상 데이터, 초음파 변환기 위치 데이터가 입력으로 사용되고, 이에 따라 관심 영역에서 형성되는 초음파 음압장 데이터가 출력으로 사용되어, 두개골 형상 및 초음파 변환기 위치에 따라 초음파 음압장 데이터를 예측하도록 학습이 수행된다.

[0075]

두개골 형상 데이터는 음압장 생성 인공지능의 효율적인 학습을 위해 대규모 시각적 데이터베이스인 ImageNet으로 기학습된 VGG(Visual Geometry Group) 네트워크를 통해 차원압축이 수행될 수 있다. 일 예로, 두개골 형상 데이터는 정규화 된 후, VGG19 네트워크를 사용하여 315*512 크기를 가진 복셀 데이터로 차원압축이 수행될 수 있다. 이때 기 학습된 VGG19 네트워크는 합성곱 층으로 구성된 특징추출부에 전역 평균 풀링 층을 추가하여 기존 학습에 사용한 이미지 데이터와는 다른 복셀 크기의 데이터를 입력 값으로 받아 차원압축을 수행할 수 있다.

[0076]

초음파 변환기의 위치 데이터는 3차원 좌표 데이터 및 각도 데이터를 포함한다. 이 때 좌표 데이터와 각도 데이터는 인공지능의 효율적인 학습을 위해 각각 최소-최대 정규화 과정을 거쳐 -1과 1 사이의 값으로 변환된 것이 사용될 수 있다. 인공지능은 오차 역전파를 통해 학습이 이루어 질 수 있다.

[0077]

음압장 형상 데이터는 초점 영역으로 설정된 부분이 출력으로 사용될 수 있다. 이 때, 초점 영역은 반치전폭 임계값에 따른 경계로 변형한 것일 수 있다. 학습이 진행되는 과정에서 음압장 데이터는 정화규 처리된 형태로 사용될 수 있다. 이 후, 음압장 생성 인공지능이 두개골의 형상 데이터 및 초음파 변환기의 위치에 따라 초음파 음압장 데이터를 1차 출력하면, 1차 출력값은 역정규화 처리된 후 최종적인 초음파 음압장 데이터가 출력된다.

[0078]

음압장 생성 인공지능은 합성곱 인공신경망(CNN; Convolutional Neural Network) 기반으로 구성될 수 있다. 음압장 생성 인공지능은 압축된 두개골의 형상 데이터에 대한 회소행렬을 학습하는 인코더(310)와 두개골에 대한 회소행렬과 정규화된 초음파 변환기 위치 데이터를 입력받아, 이에 대응되는 관심영역 내 초음파 음압장을 생성하는 디코더(320)를 포함한다.

[0079]

인코더(310)에는 두개골 형상 데이터가 입력된다. 디코더(320)에는 인코더(310)의 출력과 초음파 변환기의 위치 데이터가 함께 입력된다.

[0080]

도 7은 본 발명의 제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.

- [0081] 도 7을 참조하면, 본 발명의 제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 합성곱 신경망 기반 오토인코더(AE, AutoEncoder) 모델을 기초로 하여 구성될 수 있다.
- [0082] 인코더(310a)는 6개의 합성곱 층으로 구성될 수 있다. 디코더(320a)는 6개의 전치 합성곱 층으로 구성될 수 있다. 인코더(310a)는 압축된 두개골 형상 데이터로부터 512개의 최소행렬을 생성하고, 디코더(320a)는 인코더 층에서 입력되는 두개골에 대한 최소행렬과 초음파변환기의 위치 데이터를 함께 입력 받아 초음파 음압장으로 변환한다. 이때, 인코더(310a)에 있어, C는 각 합성곱층의 특징맵의 수를 나낸다. 인코더(310a)의 입력 층은 64개의 특징맵(C), 커널사이즈(k)는 4, 스트라이드(s)는 3으로 제공될 수 있다. 인코더(310a)는 배치정규화를 사용하고 전달함수는 LeakyReLU일 수 있다. 인코더(310a)의 제1 층은 특징맵(C) 64개, 커널사이즈(k) 4, 스트라이드(s) 3이다. 인코더(310a)의 제2 층은 특징맵(C) 128개이다. 인코더(310a)의 제3 층은 특징맵(C) 256개이다. 인코더(310a)의 제4 층 내지 제 6층은 특징맵(C) 512개이다.
- [0083] 디코더(320a)의 각 층에 있어, D는 전치 합성곱 층의 특징맵의 수, k는 커널사이즈, s는 스트라이드, F는 완전 연결 계층의 노드 수를 나타낸다. 디코더(320a)는 배치정규화화를 사용하고, 전달함수는 ReLu일 수 있다. 디코더(320a)의 제1층 및 제2층은 특징맵(D) 512개이다. 디코더(320a)의 제3층은 특징맵(D) 256개이다. 디코더(320a)의 제4층은 특징맵(D) 128개이다. 디코더(320a)의 제5층은 특징맵(D) 64개, 커널사이즈(k) 4, 스트라이드(s) 1 이다. 디코더(320a)의 제6층은 특징맵(D) 151개, 커널사이즈(k) 4, 스트라이드(s) 1 이다.
- [0084] 도 8은 본 발명의 제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.
- [0085] 도 8을 참조하면, 본 발명의 제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 pix2pix 모델을 기초로 하여 구성될 수 있다. pix2pix 모델은 합성곱 신경망 구조를 기본으로 하며 생성자(310b, 320b)와 판별자(330b)가 적대적으로 학습하면서 네트워크의 성능을 향상시키는 적대적 생성 신경망(Generative Adversarial Network) 중 이미지 변환에 특화된 모델이다.
- [0086] 생성자(310b, 320b)(generator)는 인코더(310b)와 디코더(320b)를 포함하여, 압축된 두개골 형상 데이터와 초음파 변환기 위치를 입력받아 초음파 음압장 데이터를 생성한다. 인코더(310b) 및 디코더(320b)의 구조는 본 발명의 제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 인코더 및 디코더와 동일할 수 있다.
- [0087] 판별자(330b)(discriminator)는 입력받은 초음파 음압장 데이터가 생성자(310b, 320b)가 예측한 초음파 음압장 인지, 혹은 학습 데이터로 사용된 시뮬레이션으로부터 생성된 정답지인지 패치 기반으로 판별하여 네트워크 학습에 영향을 미친다. 본 발명의 제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 판별자(330b)를 더 포함함에 따라, 생성자(310b, 320b)는 예측한 초음파 음압장에 대해 평가를 받게 되어, 더 좋은 품질의 음압장을 생성할 수 있도록 학습할 수 있게 된다. 판별자(330b)는 판별을 위한 기준이 되는 Condition pressure field 가 입력되는 지점을 기준으로 전방 및 후방에 각각 2개의 층을 갖도록 구성될 수 있다. 각 층에 있어서, C는 특징맵의 수, k는 커널사이즈, s는 스트라이드를 나타낸다.
- [0088] 도 9는 본 발명의 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 구조를 나타내는 도면이다.
- [0089] 도 9를 참조하면, 본 발명의 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 합성곱 신경망 구조를 기본으로 하는 변분오토인코더(VAE, Variational AutoEncoder) 모델을 기초로 구성될 수 있다.
- [0090] 본 발명의 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 인코더(310c)의 후단에 있어, 디코더(320c)와 연결되는 지점에 위치되는 병목부(315)를 더 포함한다. 병목부(315)는 확률분포를 이용하여 입력 값에 대한 최소벡터를 생성하고, 디코더(320c)가 전달받은 최소벡터를 변환하여, 디코더(320c)가 생성하는 출력의 품질이 향상되게 한다. 병목부(315)는 생성되는 최소벡터를 통제하기 위해서 전달받은 두개골 형상 데이터로부터 평균과 분산을 계산하고, 이에 해당하는 모평균과 모분산을 가지는 정규분포로부터 최소벡터를 샘플링한다. 병목부(315)에서 최소벡터의 차원을 하이퍼파라미터로 설정할 수 있다. 일 실시 예로, 최소벡터의 차원인 하이퍼파라미터(F)는 512로 설정될 수 있다. 인코더(310c)에 있어, 병목부(315)의 앞 부분에 위치되는 부분의 구조, 디코더(320c)의 구조는 제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 인코더, 디코더와 동일할 수 있다.
- [0092] 실험 예
- [0093] 도 7 내지 도 9에 도시된 구조를 갖는 인공지능에 대해 학습을 진행하였다.
- [0094] 본 발명의 제1 실시 예에 내지 제3 실시 예 따른 음압장 생성 인공지능을 학습시키기 위한 하이퍼-파라미터는

표 1과 같이 설정될 수 있다. 제1 실시 예에 내지 제3 실시 예 따른 음압장 생성 인공지능은 오차 역전파를 위한 손실 함수로 관심영역 내 초음파 음압장에 대한 평균 제곱 오차를 기본적으로 사용한다. 또한, 본 발명의 제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 생성자(310b, 320b)가 예측한 음압장과 정답지 음압장의 진위여부를 판별자(330b)가 판별하는 적대적 손실 함수를 함께 사용하며, 이 때 평균 제곱 오차로 구현되는 재구성 손실 함수와 이진 교차 엔트로피로 구현되는 적대적 손실 함수 간의 가중치를 람다(λ)로 정의한다. 본 실험 예에서는 재구성함수의 가중치를 60으로 사용하였다.

표 1

	optimizer	learning rate	batch size	epoch	λ	latent dim.
AE	Adam	0.002	32	300		
pix2pix	Adam	0.0004	8	200	60	
VAE	Adam	0.005	8	100		512

본 발명의 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 병목부(315)에서 잠재변수를 추출하기 위한 모평균과 모분산 설정하기 위해 쿨백-라이블러 발산(KLD; Kullback-Leibler Divergence)을 정규화 손실 함수로 함께 사용한다.

제1 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능에 대한 손실함수는 [수학식 5]와 같다.

수학식 5

$$L_{AutoEncoder} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - F(x_i, c_i))^2$$

n은 학습 데이터의 개수, F는 오토인코더 네트워크, x는 두개골 형상 데이터, c는 초음파 변환기의 위치 데이터, y는 초음파 음압장에 대한 정답지 데이터를 의미한다.

제2 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능에 대한 손실함수는 [수학식 6]와 같다.

수학식 6

$$L_{generator} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\log(1 - D(x_i, c_i, G(x_i, c_i))) + \lambda \|y_i - G(x_i, c_i)\|_1]$$

$$L_{discriminator} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\log D(x_i, c_i, y_i) + \log(1 - D(x_i, c_i, G(x_i, c_i)))]$$

n은 학습데이터의 개수, x는 두개골 형상 데이터, c는 초음파 변환기 위치 데이터, y는 초음파 음압장 정답지 데이터를 의미한다. G는 생성자(310b, 320b) 네트워크를, D는 판별자(330b) 네트워크를 의미한다.

제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능에 대한 손실함수는 [수학식 7]와 같다.

수학식 7

$$L_{Variational AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - F(x_i, c_i))^2 + (\mu_i^2 + \sigma_i^2 - \ln(\sigma_i^2) - 1)]$$

n은 학습데이터의 개수, x는 두개골 형상 데이터, c는 초음파 변환기 위치 데이터, y는 음압장 정답지 데이터를

의미한다. μ , σ 는 각각 병목부(315)에서 잠재벡터를 샘플링하기 위한 가우시안 분포의 평균과 분산을 의미한다.

- [0106] 학습된 음압장 생성 인공지능에 대한 성능을 평가하기 위해 반치전폭 (FWHM, full width half maximum)으로 정의되는 초음파 음압장의 초점영역을 다음과 같은 네 가지 지표를 사용하여 비교하였다.
- [0107] 1) 학습된 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 좌표와 정답지에 해당하는 초점 좌표 사이의 거리(ΔFP)를 측정한다.
- [0108] 2) 학습된 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 영역 경계와 정답지에 해당하는 초점 영역 경계 사이의 최대 오차를 측정하기 위해 하우스도르프 거리(HD, Hausdorff distance)를 계산한다.
- [0109] 3) 학습된 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 영역과 정답지에 해당하는 초점 영역에 대한 유사성을 평가하기 위해 다이스 유사 계수(DSC, Dice similarity coefficient)를 계산한다.
- [0110] 4) 학습된 음압장 생성 인공지능의 실용성을 평가하기 위해 음압장 생성 인공지능에 사용된 모델의 학습시간과 추론시간을 측정한다.
- [0111] 도 10은 학습된 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 좌표와 정답지에 해당하는 초점 좌표 사이의 거리를 설명하는 도면이고, 도 11은 다이스 유사 계수를 설명하는 도면이고, 도 12는 하우스도르프 거리를 설명하는 도면이다.
- [0112] 도 10 내지 도 12에 있어서, 흰색 영역(pre)은 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장의 초점 영역을 나타내고, 짙은 회색 영역(gT)은 전산해석 시뮬레이션에 의한 초음파 음압장의 초점 영역을 나타내고, 옅은 회색 영역은 두 초점 영역이 일치하는 부분을 나타낸다.
- [0113] 표 2은 상술한 측정 기준에 따라서, 제1 실시 예에 내지 제3 실시 예 따른 음압장 생성 인공지능의 성능을 비교한 것이다.

표 2

	ΔFP [mm] (focal point error)	HD [mm] (hausdorff distance)	DSC (dice similarity coeff.)	Training time [min]	Test time [ms]
AE	5.06 $\pm$ 3.62	11.81 $\pm$ 5.00	0.59 $\pm$ 0.18	439	1.44
pix2pix	4.25 $\pm$ 2.70	10.34 $\pm$ 4.01	0.64 $\pm$ 0.15	1071	1.30
VAE	4.17 $\pm$ 2.89	10.68 $\pm$ 4.19	0.64 $\pm$ 0.15	177	1.22

- [0115] 제2 실시 예 및 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 평균 4.25mm이내의 오차로 초음파 음압장 초점의 위치를 예측하였다. 이 때 초점 영역 경계의 오차도 평균 10.7mm 이내, 초점영역의 유사도 0.63이상의 성능으로 예측이 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히, 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 인공신경망의 학습시간이 177분으로 가장 짧으며, 초음파 음압장의 예측시간 또한 1.22ms로 가장 짧아 제1 실시 예 내지 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능 중 가장 실용성이 높다고 평가할 수 있다. 도 13은 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장, 전산해석기반 시뮬레이션에 의해 예측되는 초음파 음압장 및 이들을 비교하기 위해 초점 영역의 오차를 시각화한 도면이다.
- [0116] 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장(generated field), 전산해석기반 시뮬레이션에 의해 예측되는 초음파 음압장(ground truth)는 형태적으로 높은 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상호 비교를 위해 반치전폭(FWHM, full-width at half-maximum)으로 정의된 초점 영역 사이에도 높은 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있다.
- [0117] 도 14는 실제 공간에서 초음파의 음압장을 측정하기 위한 구조실험을 설명하는 도면이다.
- [0118] 도 14를 참조하면, 초음파 변환기(transducer)는 함수 발생기로부터 생성되고, 선형 증폭기에 의해 증폭된 전기 신호가 임피던스 매칭되어 작동될 수 있다. 두개골의 실제 위치와 방향은 광학 카메라를 통해 측정될 수 있다. 두개골에는 4개의 도넛모양 마커가 위치되어, 이를 기준으로 하여 실제 공간과 수치 모델링 공간 상의 좌표계를 설정할 수 있다. 수중청음기를 통해서 XY, YZ, XZ 평면에 대한 음압장 데이터를 획득할 수 있다. 3개의 각각 상이한 두개골에 대해서 각각 5번의 실험 및 측정을 진행하여 총 15개의 실험 데이터를 확보하였고 본 발명의 일

실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능의 초음파 음압장 예측 데이터의 성능을 평가하기 위해 사용하였다.

[0120] 표 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능이 예측한 값과 도 14의 수조 실험 측정에 의해 측정된 음압장 데이터를 비교한 것이다.

표 3

Plane	AE	pix2pix	VAE
Focal position error (ΔFP) [mm]			
XY	3.59 ± 1.03	3.96 ± 1.69	3.13 ± 1.12
YZ	3.44 ± 0.72	2.97 ± 0.80	3.49 ± 0.73
XZ	0.78 ± 0.29	1.03 ± 0.29	1.15 ± 0.37
Hausdorff distance (HD) [mm]			
XY	9.30 ± 2.30	8.76 ± 2.55	9.34 ± 1.26
YZ	5.26 ± 0.89	4.78 ± 1.00	5.72 ± 0.94
XZ	2.13 ± 0.26	2.25 ± 0.14	2.29 ± 0.29
Dice similarity coefficient (DSC)			
XY	0.79 ± 0.04	0.79 ± 0.04	0.76 ± 0.03
YZ	0.85 ± 0.03	0.86 ± 0.03	0.84 ± 0.04
XZ	0.86 ± 0.02	0.83 ± 0.03	0.83 ± 0.04

[0122] 표 3을 통해 알 수 있듯이 본 발명의 제1 실시 예 내지 제3 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능들은 관심영역 내 초음파 음압장의 초점 위치 예측에서 평균 오차 $7.34 \pm 2.80\text{mm}$, 초점 영역 경계 예측에서 평균 오차 $2.62 \pm 0.78\text{mm}$, 초점 영역의 유사도 평균 0.82 ± 0.03 로 높은 성능을 보인다. 도 15는 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능에 의해 예측되는 초음파의 음압장과 수조실험으로부터 측정된 초음파 음압장을 비교한 도면이다.

[0123] 음압장 생성 인공지능이 예측한 초음파 음압장(generated field), 수조실험을 통해 측정된 초음파 음압장(ground truth)는 형태적으로 높은 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상호 비교를 위해 반치전폭(FWHM, full-width at half-maximum)으로 정의된 초점 영역 사이에도 높은 유사성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

[0124] 본 발명의 일 실시 예에 따른 경두개 집속초음파 음압장 예측 장치는 빠른 시간에 높은 정확도를 가지고 초음파 집속기에 의해 경두개 내에 형성되는 초음파 음압장 예측 결과를 산출한다. 구체적으로, 기존 전산해석기반 집속초음파 시뮬레이션은 두개골 데이터와 초음파 변환기의 위치 데이터 입력에 따른 관심영역 내 초음파 음압장을 계산하는데 개당 약 100초가 소요되는 반면, 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 관심영역에서의 음압장 예측을 약 1.2ms에 수행하여, 실시간 예측이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, 본 발명의 일 실시 예에 따른 음압장 생성 인공지능은 다양한 두개골 형상 데이터를 기반으로 학습을 수행할 수 있으면서 인공신경망 학습에 177분을 소요하므로 실용성 높다. 또한, 학습에 사용되는 데이터를 증가시켜, 효율적인 학습과 성능향상을 기대할 수 있다.

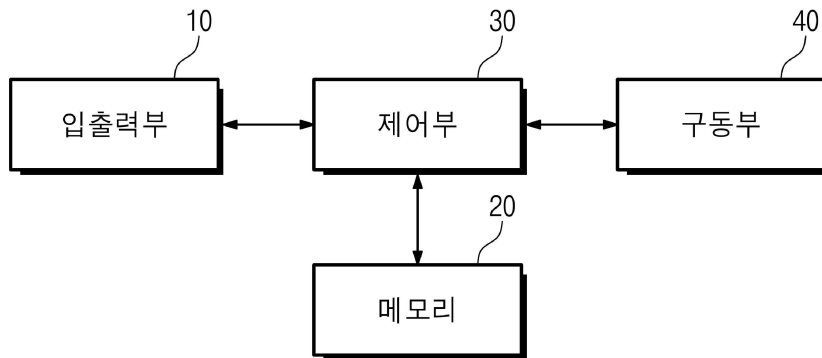
[0125] 이상, 본 발명을 바람직한 실시 예를 사용하여 상세히 설명하였으나, 본 발명의 범위는 특정 실시 예에 한정되는 것은 아니며, 첨부된 특허청구범위에 의하여 해석되어야 할 것이다. 또한, 이 기술분야에서 통상의 지식을 습득한 자라면, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않으면서도 많은 수정과 변형이 가능함을 이해하여야 할 것이다.

부호의 설명

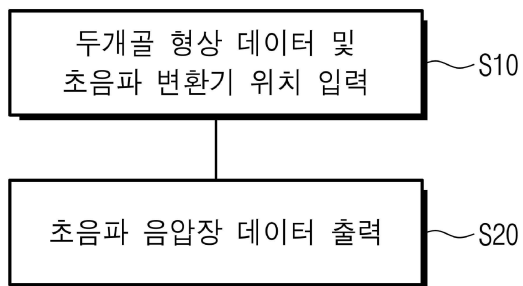
[0126] 10: 입출력부 20: 메모리
30: 제어부 40: 구동부

도면

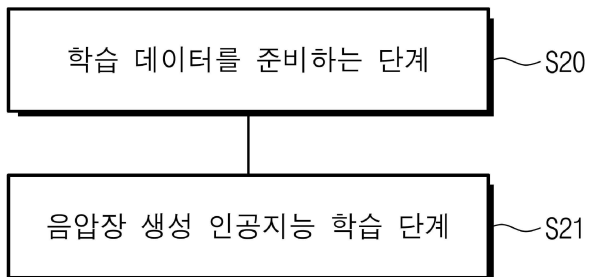
도면1



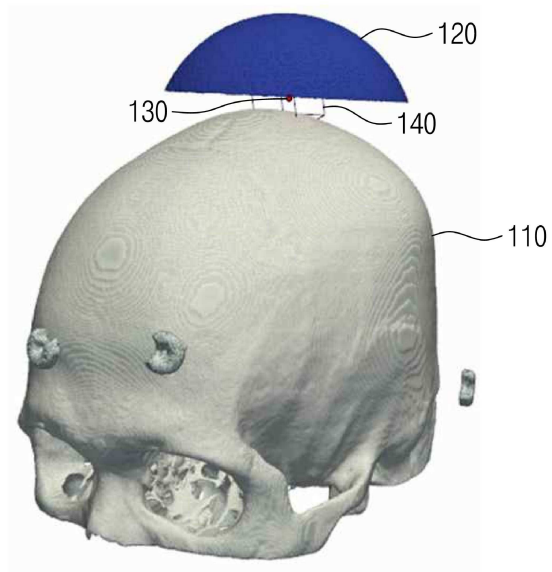
도면2



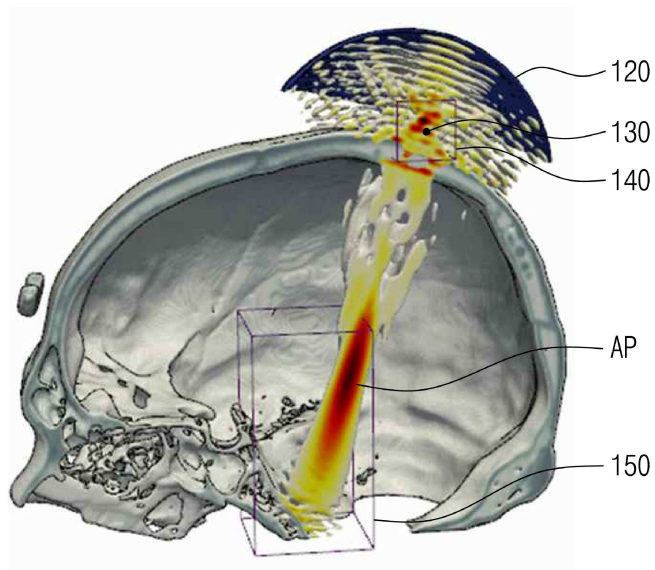
도면3



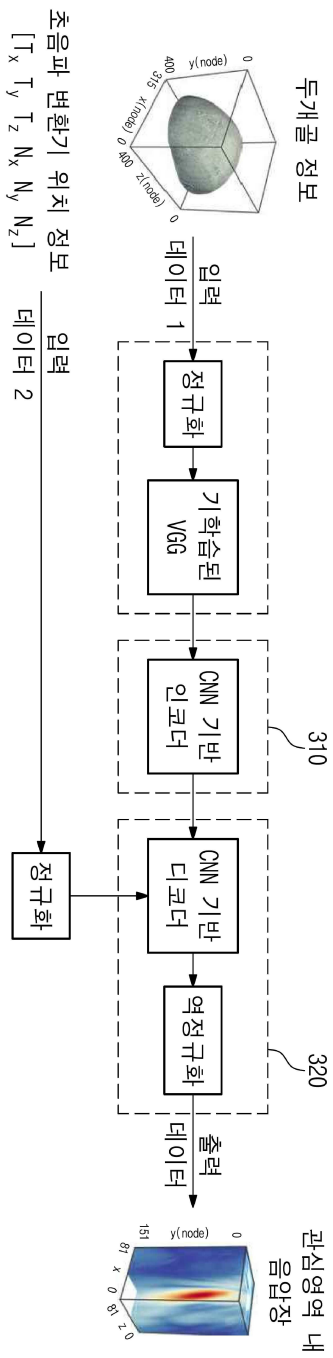
도면4



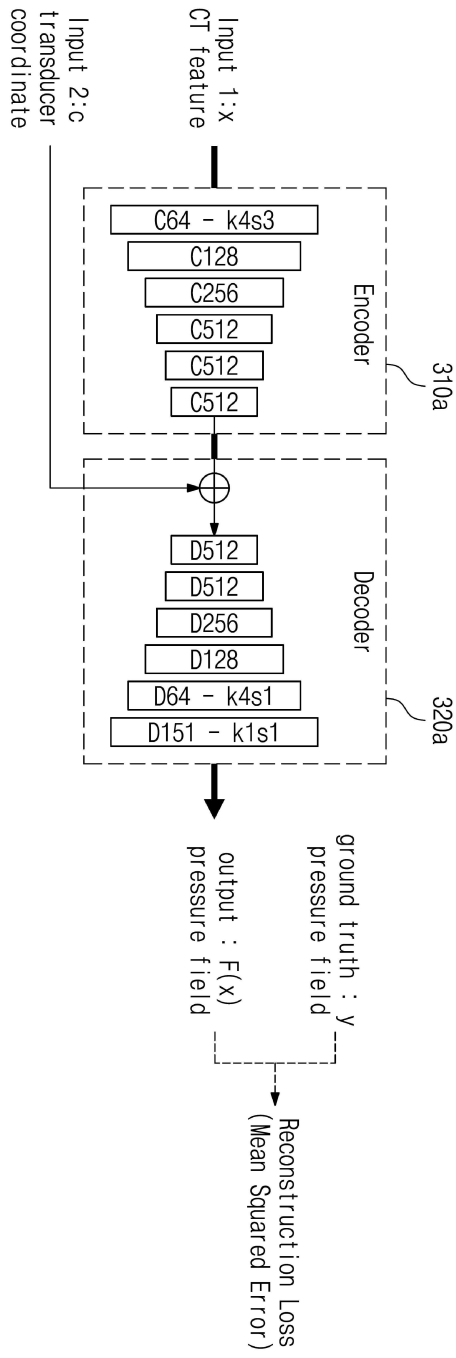
도면5



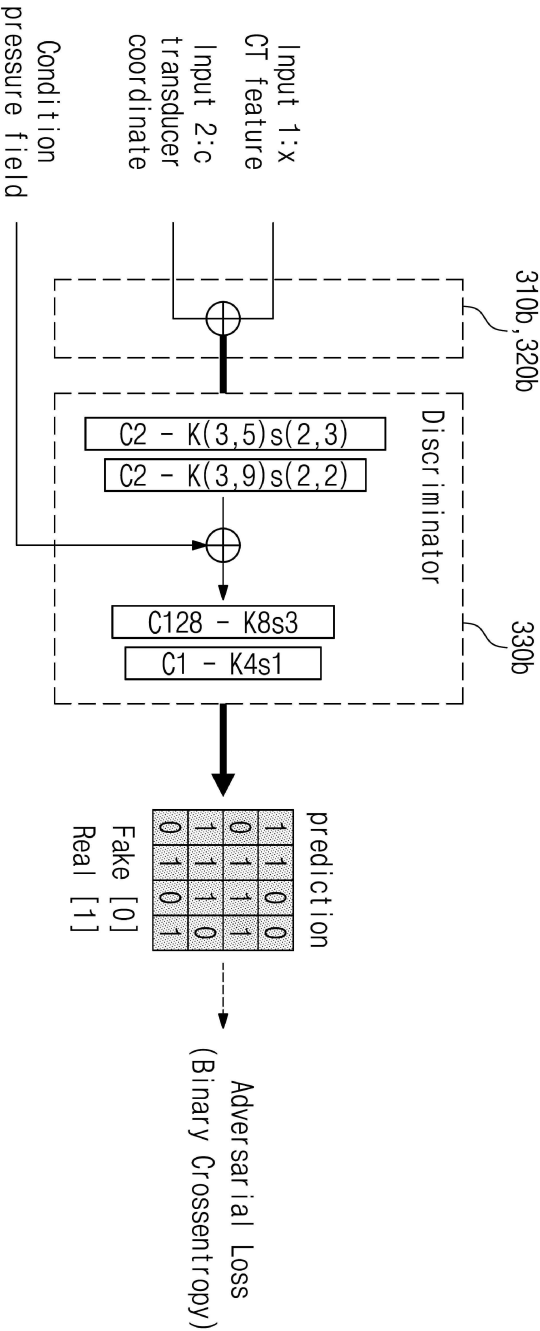
도면6



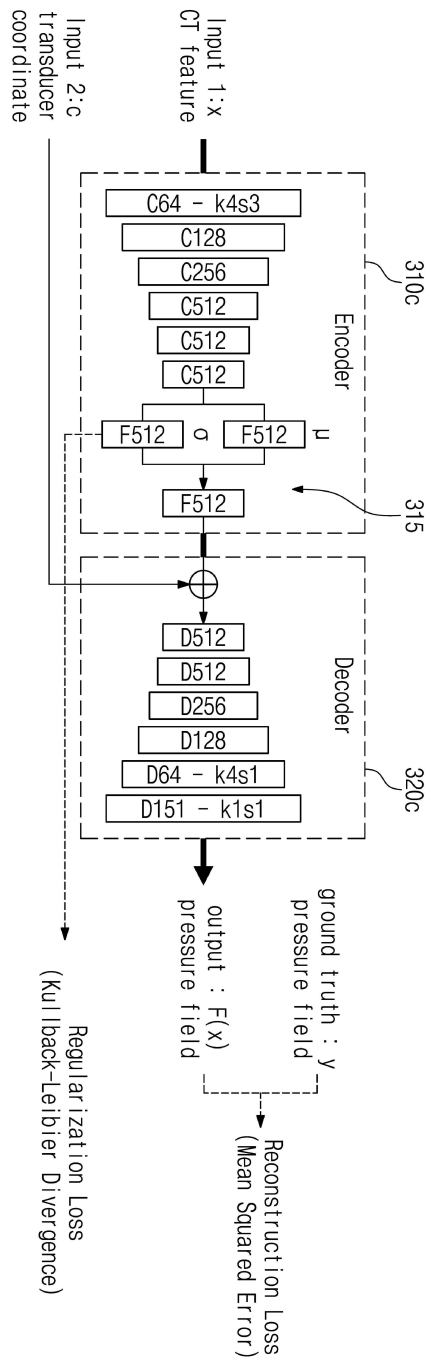
도면7



도면8

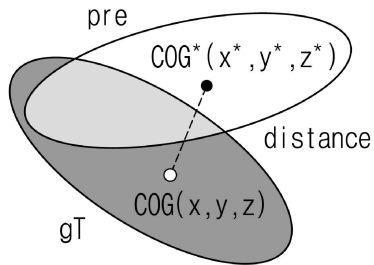


도면9



도면10

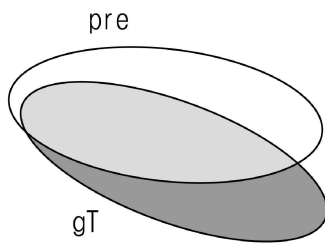
- Focal point difference (ΔFP)



$$\Delta FP = \left| |COG - COG^*| \right|_1$$

도면11

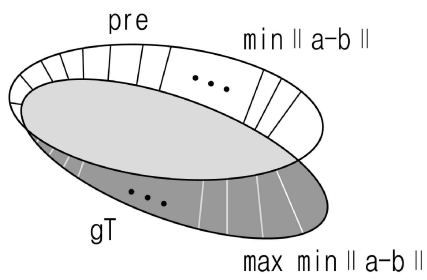
- Dice similarity coefficient (DSC)



$$\text{Dice} = \frac{2 \times \text{Intersection}}{\text{gT} + \text{pre}}$$

도면12

- Hausdorff distance (HD)



$$HD = \max(h(A,B), h(B,A))$$

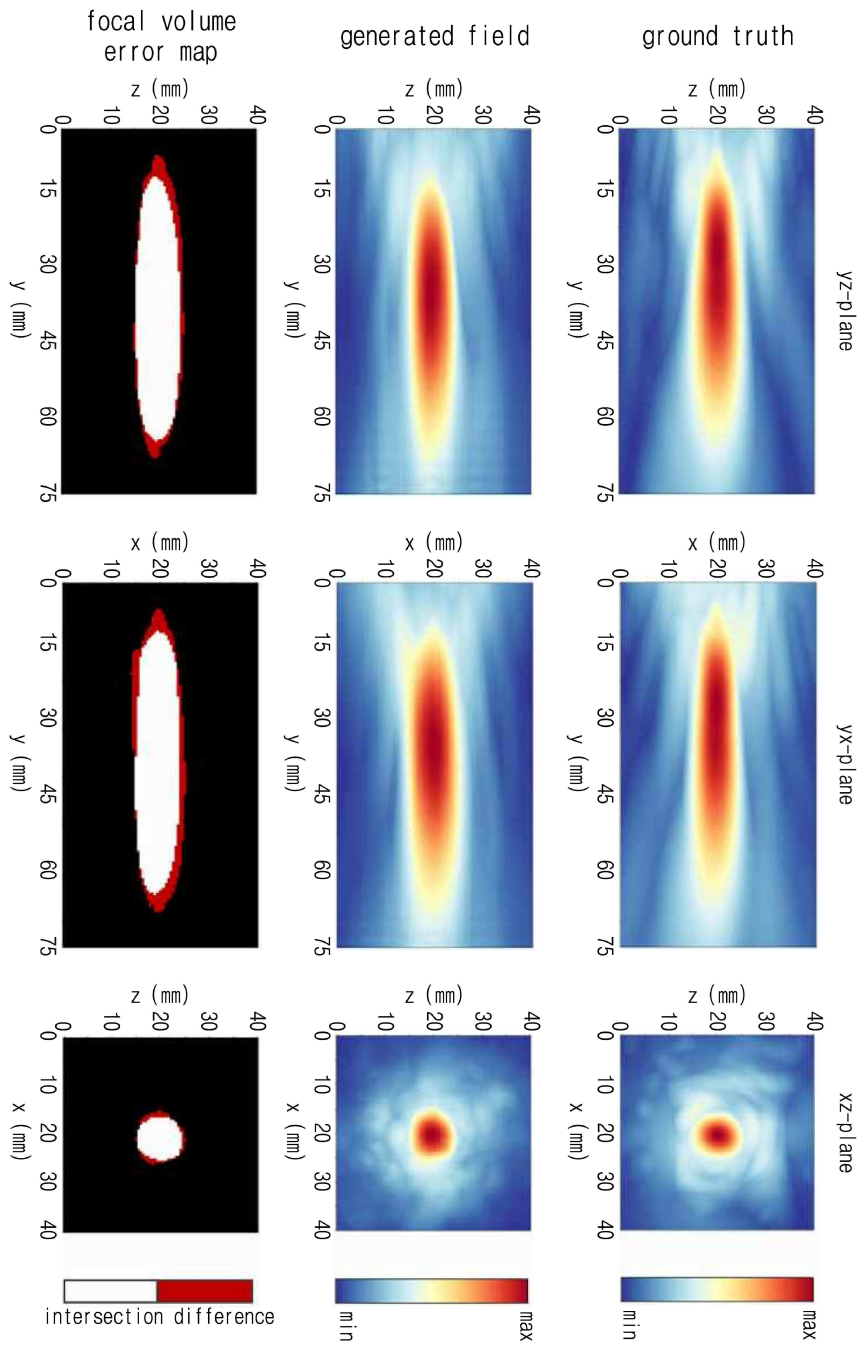
$$h(A,B) = \max \min ||a - b||$$

$$h(B,A) = \max \min ||b - a||$$

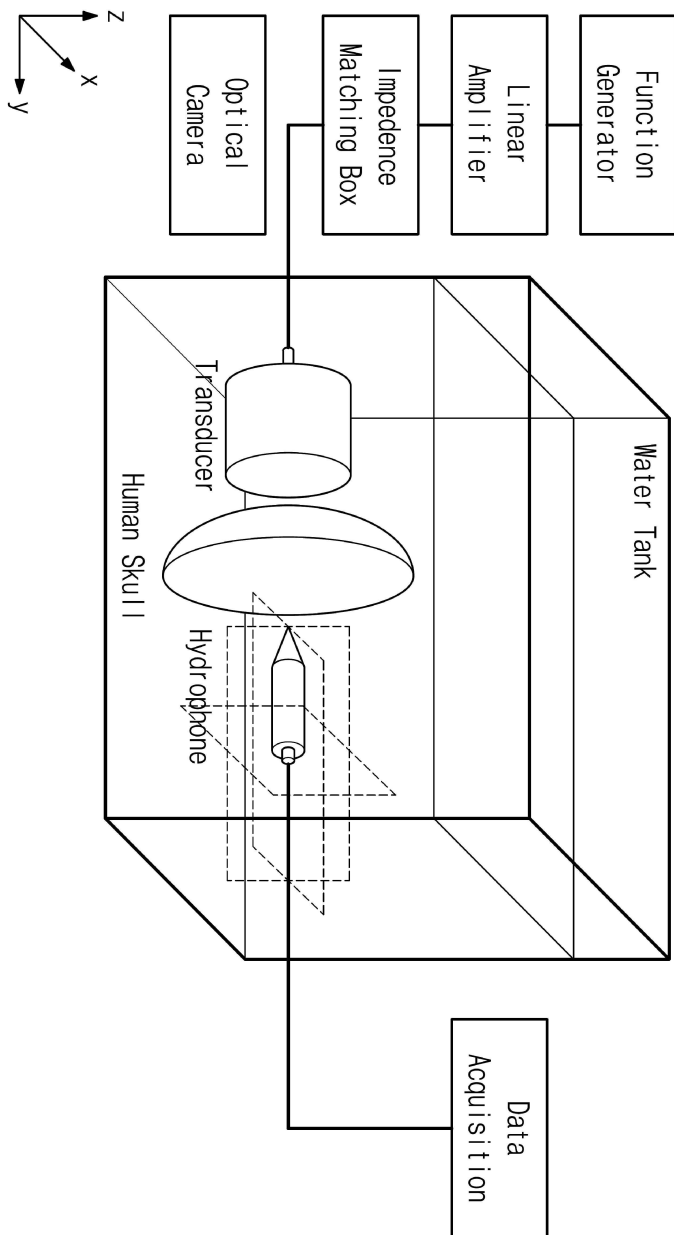
point $a \in \text{boundary } A$

point $b \in \text{boundary } B$

도면13



도면14



도면15

