



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0103429
(43) 공개일자 2025년07월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06N 3/06 (2023.01) G06N 3/049 (2023.01)
(52) CPC특허분류
G06N 3/061 (2013.01)
G06N 3/049 (2023.01)
(21) 출원번호 10-2024-0161440
(22) 출원일자 2024년11월13일
심사청구일자 2024년11월13일
(30) 우선권주장
1020230195653 2023년12월28일 대한민국(KR)

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
한양대학교 산학협력단
서울특별시 성동구 왕십리로 222(행당동, 한양대학교내)
(72) 발명자
김성필
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
정승준
서울특별시 성동구 왕십리로 222 한양대학교 의과대학
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
제일특허법인(유)

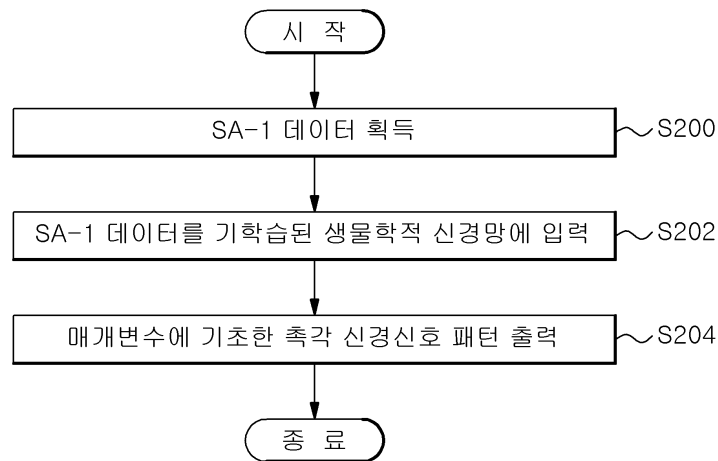
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 촉각 신경신호 생성 장치 및 촉각 신경신호 생성 방법, 촉각 신경신호를 생성하기 위해 생물학적 신경망을 학습하는 방법

(57) 요약

본 발명은 촉각 신경신호(tactile neural signal) 생성 기술에 관한 것으로, 느린 적응 1형(slowly adapting type1, SA-1) 데이터를 획득하는 획득부; 기 학습된 생물학적 신경망(biological neuron model, BNM)을 이용하여 상기 느린 적응 1형 데이터로부터 촉각 신경신호 패턴을 출력하기 위한 명령어를 포함하는 저장부; 및 상기 명령어를 수행함으로써 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수(parameter)를 기초로 상기 생물학적 신경망에서 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 처리부;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사(模寫)하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수일 수 있다.

대표도 - 도4



(72) 발명자

김재훈

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

최영인

서울특별시 성동구 왕십리로 222 한양대학교 의과대학

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2710003363

과제번호 00302489

부처명 과학기술정보통신부

과제관리(전문)기관명 한국연구재단

연구사업명 STEAM연구

연구과제명 감각 신경경로 정밀 인코딩/디코딩 모델 기반 초실감 가상촉감신호 생성/재생
기술 개발

과제수행기관명 고려대학교세종산학협력단

연구기간 2024.02.01 ~ 2025.01.31

명세서

청구범위

청구항 1

느린 적응 1형(slowly adapting type1, SA-1) 데이터를 획득하는 획득부;

기 학습된 생물학적 신경망(biological neuron model, BNM)을 이용하여 상기 느린 적응 1형 데이터로부터 촉각 신경신호 패턴을 출력하기 위한 명령어를 포함하는 저장부; 및

상기 명령어를 수행함으로써 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수(parameter)를 기초로 상기 생물학적 신경망에서 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 처리부;를 포함하되,

상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사(模寫)하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인

촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 처리부는,

상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위(membrane potential) 및 막회복변수(membrane recovery variable)를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하는 갱신 처리부; 및

상기 갱신된 막회복변수를 기초로 상기 매개변수를 결정하는 매개변수 결정부;를 포함하는

촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 생물학적 신경망은,

상기 갱신된 막회복변수에 의해 결정된 상기 매개변수를 기초로 상기 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 기 학습된 생물학적 신경망인

촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 생물학적 신경망은 이즈케비치(Izhikevich) 신경망 모델을 포함하는

촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정

보를 포함하는
촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 6

제 5 항에 있어서,
상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함하는
촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 7

제 6 항에 있어서,
상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD(earth movers distance)를 갖는
촉각 신경신호 생성 장치.

청구항 8

촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법에 있어서,
느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계;
상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및
상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되,
상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인
촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 9

제 8 항에 있어서,
상기 생물학적 신경망은,
상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위 및 막회복변수를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하고, 상기 갱신된 막회복변수를 기초로 상기 매개변수를 결정하며, 상기 매개변수를 기초로 상기 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 기 학습된 생물학적 신경망인
촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,
상기 생물학적 신경망은 이즈케비치 신경망 모델을 포함하는

촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 11

제 8 항에 있어서,

상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함하는

촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함하는

촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD를 갖는

촉각 신경신호 생성 방법.

청구항 14

촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호를 생성하기 위해 생물학적 신경망을 학습하는 방법에 있어서,

느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계;

상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위 및 막회복변수를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하는 단계;

상기 갱신된 막회복변수에 대한 매개변수를 결정하는 단계; 및

상기 매개변수를 기초로 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 상기 생물학적 신경망을 학습시키는 단계;를 포함하되,

상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인

생물학적 신경망을 학습하는 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 생물학적 신경망은 이즈케비치 신경망 모델을 포함하는

생물학적 신경망을 학습하는 방법.

청구항 16

제 14 항에 있어서,

상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함하는

생물학적 신경망을 학습하는 방법.

청구항 17

제 16 항에 있어서,

상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함하는

생물학적 신경망을 학습하는 방법.

청구항 18

제 17 항에 있어서,

상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD를 갖는

생물학적 신경망을 학습하는 방법.

청구항 19

컴퓨터 프로그램을 저장하고 있는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체로서,

상기 컴퓨터 프로그램은,

촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법을 프로세서가 수행하도록 하기 위한 명령어를 포함하고,

상기 방법은,

느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계;

상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및

상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되,

상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인

컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

청구항 20

컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로서,

상기 컴퓨터 프로그램은,

촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법을 프로세서가 수행하도록 하기 위한 명령어를 포함하고,

상기 방법은,

느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계;

상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및

상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되,

상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인

기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 생물학적 신경망(biological artificial neural networks)을 이용한 촉각 신경신호(tactile neural signal) 생성 기술과 관련이 있다.

배경 기술

[0003] 인공 촉각 기술은 인간의 촉각 기능을 모사(模寫, copy)하는 기술로서, 인간이나 로봇에게 가상 촉각을 제공할 수 있다.

[0004] 특히, 전자피부 기술의 빠른 발전으로 인해 인공 촉각 기술의 중요성과 실행 가능성이 주목 받고 있다. 현재는 주로 전자피부, 신호 전송, 그리고 촉각 인식으로 구성되어 있으며, 대부분이 생물학적 촉각 시스템을 모방하여 설계되었다.

[0005] 이에 따라, 생물 모방 접근법을 통해 인공 촉각 감각 기술을 개발하려는 많은 연구들이 진행된 바 있으며, 생물학적으로 유사성을 높일 수 있는 감각 뉴런 모델의 개발을 위한 노력들이 지속되고 있다.

[0006] 상술한 배경기술은 발명자가 본 발명의 도출을 위해 보유하고 있었거나, 본 발명의 도출 과정에서 습득한 기술 정보로서, 반드시 본 발명의 출원 전에 일반 공중에게 공개된 공지 기술이라 할 수는 없다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 등록특허공보 제10-2246807호 (2021.04.26.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명의 실시예에서는, 압력 자극에 대한 느린 적응 1형(slowly adapting type1, 이하 SA-1이라 함) 감각 뉴런의 장기(long-term) 스파이크 발화 빈도에 적응할 수 있는 촉각 신경신호 생성 기술을 제안하고자 한다.

[0010] 본 발명의 실시예에서는, SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴을 모사하여 스파이크 패턴과 유사한 스파이크 발화 패턴을 생성할 수 있는 생물학적 신경망의 학습 기술을 제안하고자 한다.

[0011] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 상기에서 언급한 것으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 해결하고자 하는 과제는 아래의 기재들로부터 본 발명이 속하는 통상의 지식을 가진 자에 의해 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0013] 본 발명의 실시예에 따르면, 느린 적응 1형(slowly adapting type1, SA-1) 데이터를 획득하는 획득부; 기 학습된 생물학적 신경망(biological neuron model, BNM)을 이용하여 상기 느린 적응 1형 데이터로부터 촉각 신경신호 패턴을 출력하기 위한 명령어를 포함하는 저장부; 및 상기 명령어를 수행함으로써 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수(parameter)를 기초로 상기 생물학적 신경망에서 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 처리부;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사(模寫)하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인 촉각 신경신호 생성 장치를 제공할 수 있다.
- [0014] 여기서, 상기 처리부는, 상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위(membrane potential) 및 막회복변수(membrane recovery variable)를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하는 갱신 처리부; 및 상기 갱신된 막회복변수를 기초로 상기 매개변수를 결정하는 매개변수 결정부;를 포함할 수 있다.
- [0015] 또한, 상기 생물학적 신경망은, 상기 갱신된 막회복변수에 의해 결정된 상기 매개변수를 기초로 상기 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 기 학습된 생물학적 신경망일 수 있다.
- [0016] 또한, 상기 생물학적 신경망은 이즈케비치(Izhikevich) 신경망 모델을 포함할 수 있다.
- [0017] 또한, 상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있다.
- [0018] 또한, 상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함할 수 있다.
- [0019] 또한, 상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD(earth movers distance)를 가질 수 있다.
- [0020] 또한, 상기 매개변수는 상기 막회복변수의 시간 규모를 결정하는 제1 매개변수와, 상기 막전위에 대한 민감도를 결정하는 제2 매개변수를 포함하고, 상기 매개변수 결정부는 상기 제2 매개변수를 고정시킨 상태에서 상기 제1 매개변수를 조정하여 상기 매개변수를 결정할 수 있다.
- [0021] 또한, 상기 매개변수 결정부는 상기 스파이크 발화 패턴 정보가 생성될 때마다 상기 제1 매개변수를 점진적으로 감소시켜가면서 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크의 발화 빈도를 최소화하도록 상기 매개변수를 결정할 수 있다.
- [0022] 본 발명의 실시예에 따르면, 촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법에 있어서, 느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계; 상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인 촉각 신경신호 생성 방법을 제공할 수 있다.
- [0023] 여기서, 상기 생물학적 신경망은, 상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위 및 막회복변수를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하고, 상기 갱신된 막회복변수를 기초로 상기 매개변수를 결정하며, 상기 매개변수를 기초로 상기 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 기 학습된 생물학적 신경망일 수 있다.
- [0024] 또한, 상기 생물학적 신경망은 이즈케비치 신경망 모델을 포함할 수 있다.
- [0025] 또한, 상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있다.
- [0026] 또한, 상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함할 수 있다.
- [0027] 또한, 상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD를 가질 수 있다.
- [0028] 본 발명의 실시예에 따르면, 촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호를 생성하기 위해 생물학적 신경망을 학습하는 방법에 있어서, 느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계; 상기 느린 적응 1형 데이터를 기초로 막전위 및 막회복변수를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력하는 단계; 상기 갱신된 막회복변수에 대한 매개변수를 결정하는 단계; 및 상기 매개변수를 기초로 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 상기 생물학적 신경망을 학습시키

는 단계;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수인 생물학적 신경망을 학습하는 방법을 제공할 수 있다.

[0029] 여기서, 상기 생물학적 신경망은 이즈케비치 신경망 모델을 포함할 수 있다.

[0030] 또한, 상기 느린 적응 1형 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있다.

[0031] 또한, 상기 촉각 신경신호 패턴은 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함할 수 있다.

[0032] 또한, 상기 스파이크 발화 패턴 정보는 상기 느린 적응 1형 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD를 가질 수 있다.

[0033] 본 발명의 실시예에 따르면, 컴퓨터 프로그램을 저장하고 있는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체로서, 상기 컴퓨터 프로그램은, 촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법을 프로세서가 수행하도록 하기 위한 명령어를 포함하고, 상기 방법은, 느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계; 상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수일 수 있다.

[0034] 본 발명의 실시예에 따르면, 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로서, 상기 컴퓨터 프로그램은, 촉각 신경신호 생성 장치의 촉각 신경신호 생성 방법을 프로세서가 수행하도록 하기 위한 명령어를 포함하고, 상기 방법은, 느린 적응 1형 데이터를 획득하는 단계; 상기 느린 적응 1형 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력하는 단계; 및 상기 느린 적응 1형 데이터와 매개변수를 기초로 상기 생물학적 신경망을 통해 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리하는 단계;를 포함하되, 상기 매개변수는 상기 느린 적응 1형 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 상기 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수일 수 있다.

발명의 효과

[0036] 본 발명의 실시예에 의하면, SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴을 모사하여 스파이크 패턴과 유사한 스파이크 발화 패턴을 생성하도록 생물학적 신경망을 학습하고, 학습된 생물학적 신경망을 통해 압력 자극에 대한 SA-1 감각 뉴런의 장기 스파이크 발화 빈도에 적응할 수 있는 촉각 신경신호를 생성함으로써, 기존 모델들에 비해 생물학적인 SA-1 감각 뉴런과 훨씬 가까운 촉각 신경신호 패턴을 생성할 수 있다. 특히, 수 초 내지 수십 초 동안 지속되는 촉각에 대해 느리게 적응하는 촉각 신경의 특징을 하나의 수학적 모델로서 효과적으로 모델링하고, 이를 통해 가상의 촉각 신경 패턴을 생성할 수 있다.

[0037] 본 발명은 기존 생물학적 뉴런 모델들이 겪었던 장기 적응 구현의 어려움을 성공적으로 극복하였다. 이러한 성과는 실제 생물체의 SA-1 감각 뉴런이 지속적인 압력에 반응하여 스파이크 발화 빈도를 조절하는 과정을 정확하게 반영한 결과이다. 이렇게 개발된 새로운 모델은 기계적 자극에 대해 더욱 정확하고 생물학적인 반응을 보이므로, 인공 촉각 기술의 효율성과 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 결론적으로, 본 발명에서 개발한 생물학적 뉴런 모델은 높은 수준의 생물학적 유사성을 통해 인공 촉각 감각 시스템의 성능을 향상시키는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. 이로써, 로봇이나 인공 지능 시스템이 인간의 촉각 능력을 더욱 정확하게 모방하고 이해하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

도면의 간단한 설명

[0039] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 기능을 설명하기 위한 블록도이다.

도 2는 도 1의 처리부의 구체적인 기능을 설명하기 위한 블록도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치에서 촉각 신경신호를 생성하기 위해 생물학적 신경망을 학습하는 방법을 설명하는 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치에서 촉각 신경신호를 생성하는 방법을 설명하는 흐름

도이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 다양한 막회복변수에 따른 시뮬레이션 결과를 비교하기 위한 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 매개변수를 조정된 경우의 시뮬레이션 결과를 비교하기 위한 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 모델별 스파이크 패턴 응답을 비교하기 위한 도면이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 모델별 스파이크 거리를 비교하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0040] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명의 범주는 청구항에 의해 정의될 뿐이다.
- [0041] 본 발명의 실시예들을 설명함에 있어서 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명은 본 발명의 실시예들을 설명함에 있어 실제로 필요한 경우 외에는 생략될 것이다. 그리고 후술되는 용어들은 본 발명의 실시예에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0042] 생물학적 감각 시스템에서는 피부의 기계 수용체에 대한 기계적 자극이 활동 전위로 변환되어 촉각 감각 섬유를 통해 중추 신경 시스템으로 전달된다. SA-1 감각 뉴런은 지속적으로 압력을 전송하면서 인코딩(encoding) 과정을 진행하며, 피부의 형태와 질감을 인식하는데 중요한 역할을 수행한다고 알려져 있다. 이러한 SA-1 감각 뉴런의 특성을 이해하는 것은 인공 촉각 감각 기술 개발에 매우 중요하다고 할 수 있다.
- [0043] 이에 본 발명의 실시예에서는, 압력 자극에 대한 SA-1 감각 뉴런의 장기 스파이크 발화 빈도(firing rate) 적응을 특징으로 하는 새로운 생물학적 뉴런 모델(biological neuron model, BNM)을 제안하고자 한다.
- [0044] 이를 위해, 본 발명은 설치류의 피부 신경으로부터 수집한 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 열 데이터를 모사하여 유사한 스파이크 발화 패턴을 생성하는 것을 목표로 하고 있다. 기존의 이즈케비치(Izhikevich) 모델을 포함한 BNM 모델들은 수 초 내지 수십 초 동안의 장기 적응을 구현하기 어렵다는 한계가 있으나, 본 발명에서 개발한 향상된 BMN은 이즈케비치 모델에 따라 SA-1 감각 뉴런의 연속적인 발화에 따라 막회복을 억제하는 매개변수를 조절함으로써 장기 스파이크 발화 빈도 적응을 구현하고자 한다.
- [0045] 이즈케비치 모델은 신경세포의 전기적 활동을 효과적으로 모델링하는데 효과적이라는 점에서 널리 인정받고 있으나, 이러한 이즈케비치 모델은 주로 단기적인 신경 활동 패턴에 집중하고 있어서, 느린 적응 1형 감각 뉴런에서 관찰되는 장기적 적응 현상, 즉 수 초에서 수 십 초 동안의 발화 빈도 변화를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.
- [0046] 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 발명에서는 장기적 적응에 관한 새로운 매개변수를 도입한 확장 모델을 제안하고자 한다.
- [0047] 제안된 장기적 적응 매개변수들은 설치류의 느린 적응 1형 감각 뉴런에서 수 초에서 수십 초 동안 나타나는 발화 빈도의 장기적 적응 현상을 효과적으로 모델링할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해, 장기적 적응 현상의 복잡성과 세밀성을 더욱 정확하게 재현할 수 있다. 본 발명에서 제안하는 생물학적 신경망 모델은 신경세포가 생성하는 전기적 신호인 '스파이크'의 패턴을 분석하여 뉴런의 활동 상태와 그 변화를 더욱 정밀하게 추적하고 예측하는데 활용될 수 있다. 특히, 이 기술은 지속되는 자극에 대한 감각 적응을 설치류의 실제 촉각 신경 반응과 유사하게 재현할 수 있다는 특성을 갖는다.
- [0048] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 대해 상세히 설명하기로 한다.
- [0049] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치(100)의 기능을 설명하기 위한 블록도이다.

- [0050] 도 1에 도시한 바와 같이, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 획득부(110), 처리부(120) 및 저장부(130)를 포함할 수 있다.
- [0051] 도 1에서 예시된 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 사용자가 소지하는 전자기기로서, 본 발명의 실시예에서 전자기기는, 예를 들면 스마트폰(smartphone), 전자북 리더기(e-book reader), 태블릿 컴퓨터(tablet personal computer), 랩탑 컴퓨터(laptop personal computer), 넷북 컴퓨터(netbook computer), 데스크탑 컴퓨터(desktop computer), 서버 컴퓨터(server computer) 및 웨어러블(wearable) 디바이스 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 다른 실시예에서 전자기기는, 네트워크 보안 장비, 내비게이션(navigation) 장비, 선박용 전자 장비(예를 들어, 선박용 항법 장치, 자이로 콤팩스 등), 항공 전자기기(avionics), 차량용 헤드 유닛(head unit), 상점의 POS(point of sales) 및 사물 인터넷 장치(internet of things) 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 또한, 전자기기에는 전자기기의 각종 동작들(예를 들어, 온/오프 명령, 구동 명령, 화면 출력 등)을 실행시키기 위한 애플리케이션(application)이 탑재될 수 있다. 애플리케이션은, 예를 들어 스마트폰 애플리케이션, PC(personal computer) 애플리케이션, 셋톱박스(STB) 애플리케이션, 웹(web) 애플리케이션, 인스턴트(instant) 애플리케이션 등을 포함할 수 있고, 특정 애플리케이션에 한정될 필요는 없다.
- [0052] 도 1에서 획득부(110)는 본 발명의 실시예에 따라 SA-1 데이터를 획득할 수 있다. 이러한 SA-1 데이터는, 예를 들어 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있다. 획득부(110)는 촉각 신경신호 생성 장치(100)에서 SA-1 데이터를 획득하기 위한 수단으로서, 예를 들어 촉각 신경신호 생성 장치(100)의 입출력 인터페이스, 통신 장치 등을 포함할 수 있다. 통신 장치의 경우, 촉각 신경신호 생성 장치(100)와 SA-1 데이터를 제공하는 외부 서버를 연결하기 위한 네트워크 장비를 포함할 수 있다. 여기서, 네트워크 장비는, 예를 들어 예를 들어 블루투스(Bluetooth), 지그비(zigbee), 와이파이(Wi-Fi), UWB(ultra-wide band) 등의 근거리 네트워크 장비, 인터넷, 이동통신망 등의 광대역 네트워크 장비를 포함할 수 있으며, 특정 네트워크 장비에 한정될 필요는 없다.
- [0053] 처리부(120)는 저장부(130) 내의 명령어를 수행함으로써 SA-1 데이터와 매개변수를 기초로, 저장부(130) 내의 생물학적 신경망에서 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 처리할 수 있다. 여기서, 매개변수는 SA-1 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사(模寫)하여 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수일 수 있으며, 이러한 매개변수를 이용하는 처리부(120)는, 예를 들어 마이크로프로세서(microprocessor) 기반의 처리 장치를 포함할 수 있다. 처리부(120)의 구체적인 구성 및 기능 설명은 도 3 및 도 4에서 상세히 다루기로 한다.
- [0054] 저장부(130)는 기 학습된 생물학적 신경망을 포함할 수 있고, 획득부(110)를 통해 획득된 SA-1 데이터로부터 촉각 신경신호 패턴을 출력하기 위한 명령어를 포함할 수 있다. 여기서 저장부(130)는, 예를 들어 RAM(random access memory), ROM(read only memory) 등의 메모리, 네트워크로 연결된 로컬 디스크(local disc), 스토리지(storage) 등의 기록매체를 포함할 수 있으며, 본 발명의 실시예를 구현함에 있어서 특정 기록매체에 한정될 필요는 없다. 또한, 저장부(130) 내에 포함되는 생물학적 신경망은, 예를 들어 생물학적 뉴런의 막전위 동역학을 반영하기 위한 신경망 모델, 예를 들어 이즈케비치(Izhikevich) 모델을 포함할 수 있다.
- [0055] 도 2는 도 1의 처리부(120)의 구체적인 기능을 설명하기 위한 블록도이다.
- [0056] 도 2에 도시한 바와 같이, 처리부(120)는 갱신 처리부(122) 및 매개변수 결정부(124)를 포함할 수 있다.
- [0057] 갱신 처리부(122)는 획득부(110)를 통해 획득된 SA-1 데이터를 기초로 막전위(membrane potential) 및 막회복변수(membrane recovery variable)를 갱신 처리하여 갱신된 막회복변수를 출력할 수 있다.
- [0058] 매개변수 결정부(124)는 갱신 처리부(122)에서 갱신된 막회복변수를 기초로 매개변수를 결정할 수 있다.
- [0059] 막전위와 막회복변수는 각각 자체의 미분 방정식에 따라 갱신되며, 막전위가 특정 임계값을 초과하면 스파이크가 발생한다. 이후에 막회복변수가 스파이크 생성 후의 막전위 조정 역할을 수행한다. 막전위와 막회복변수를 갱신하기 위한 미분 방정식은 다음 [수학식 1]로 표현될 수 있다.

수학식 1

$$\dot{v} = Av^2 + Bv + C - u + I_{input}$$

$$u' = a(bv - u)$$

$$if, v \geq 30mV, then \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases}$$

[0060]

[0061]

[수학식 1]에서 v 는 막전위, u 는 막회복변수, a 는 막회복변수의 시간 규모를 결정하기 위한 매개변수, b 는 막전위에 대한 민감도를 결정하기 위한 매개변수를 의미할 수 있다.

[0062]

나머지 c 및 d 도 매개변수이며, 본 발명의 생물학적 신경망의 모델링을 위해서 매개변수 b , c 및 d 는 고정시키고, 매개변수 a 를 조정할 수 있다. 구체적으로, 스파이크 발화 패턴 정보가 생성될 때마다 SA-1 데이터의 스파이크의 발화 빈도를 최소화하는 방향으로 매개변수 a 를 점진적으로 감소시킬 수 있다.

[0063]

본 발명에서는 생물학적 신경망으로 이즈케비치 모델의 시뮬레이션에 오일러 기법을 적용하였다. 오일러 기법은 일차 미분 방정식을 푸는 수치적 방법으로, 단순한 구현과 선형 및 비선형 미분 방정식의 해결 가능성을 가지고 있어 널리 쓰이고 있다.

[0064]

본 발명에서는 이즈케비치 모델의 매개변수를 세밀하게 조정하여 모델의 전반적인 동역학을 조절하였다. 특히, 스파이크 발화 빈도 장기 적응을 구현하기 위해 이즈케비치 모델의 새로운 매개변수를 설정하였다.

[0065]

본 발명에서 적용되는 생물학적 신경망의 매개변수는 아래 [표 1]과 같이 정리될 수 있다.

표 1

A		B		C	
$0.04 \frac{1}{mVms}$		$5 \frac{1}{ms}$		$140 \frac{mV}{ms}$	
a	b	c	d		
$0.01 \frac{1}{ms}$	0.2	$-65mV$	$8mV$		

[0066]

[0067]

본 발명의 실시예에 적용되는 생물학적 신경망은 이러한 매개변수를 기초로 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 학습될 수 있다.

[0068]

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치(100)에서 촉각 신경신호를 생성하기 위해 생물학적 신경망을 학습하는 방법을 설명하는 흐름도이다.

[0069]

도 3에 도시한 바와 같이, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 SA-1 데이터를 획득할 수 있다(S100). 이러한 SA-1 데이터는, 예를 들어 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있으며, SA-1 데이터의 수집 과정은 다음과 같이 예시될 수 있다.

[0070]

본 발명에 사용한 동물실험은 대한민국 농림축산검역본부의 실험 동물 사용에 대한 가이드라인에 따라 수행되었으며, 한양대학교 동물실험윤리위원회(HY-IACUC-13-037A)로부터 승인받았다. 8주령 C57BL/6 종의 수컷 마우스를 사용하여, 단일 터치 A-섬유의 기계적 자극에 대한 신경 활성 반응을 조사하기 위해 Ex-vivo 녹화를 수행하였다.

[0071]

본 발명에서는 총 6개체의 동물에 대해 기계적 자극을 적용했다. 이 자극은 기계적 자극기를 통해 전달되었으며, 마지막으로 자극기의 수동 보정 작업이 이루어졌다. 이 보정 과정은 자극기의 팁을 미세 저울에 대해 눌러 압력을 측정하며, 1g에서 50g 사이의 무게에서 액추에이터의 전압을 기록함으로써 수행되었다. 이러한 과정을 통해, 각 실험 동물에게 정확한 자극을 적용할 수 있다.

- [0072] SA-1 데이터가 획득되면, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 획득된 SA-1 데이터를 기초로 막전위 및 막회복변수를 갱신 처리할 수 있다(S102).
- [0073] 이후, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 갱신된 막회복변수에 대한 매개변수를 결정할 수 있다(S104).
- [0074] 매개변수가 결정되면, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 해당 매개변수를 기초로 촉각 신경신호 패턴을 생성하도록 저장부(130) 내의 생물학적 신경망을 학습시킬 수 있다(S106).
- [0075] 여기서, SA-1 데이터는 설치류의 피부 신경으로부터 수집된 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보를 포함할 수 있으며, 생물학적 신경망을 통해 출력되는 촉각 신경신호 패턴은 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대인 스파이크 발화 패턴 정보를 포함할 수 있다.
- [0076] 이때, 스파이크 발화 패턴 정보는 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD(earth movers distance)를 가질 수 있다.
- [0077] 기존의 이즈케비치 모델은 일반적으로 1000ms 미만의 제한된 시간 동안 스파이크 발화 빈도 적응을 보인다. 하지만, 촉각 신경 시스템이 거의 20초 동안의 지속적인 압력 자극을 받았을 때, SA-1 신경의 반응은 기존의 모델을 초과하는 더 긴 기간 동안 적응했다.
- [0078] 이러한 장기적 적응을 재현하기 위해, 본 발명에서는 스파이크가 발생할 때마다 적응의 시간 척도를 나타내는 매개변수 a 를 점진적으로 감소시키는 방식으로 이즈케비치 모델을 수정하였다. 이는 다음 [수학식 2]로 표현될 수 있다.

수학식 2

$$\dot{v} = Av^2 + Bv + C - u + S_p I_{input}$$

$$\dot{u} = a(bv - u)$$

$$if, v \geq 30mV, then \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \\ a \leftarrow a/D_p \end{cases}$$

[0079]

- [0080] 본 발명에 적용되는 생물학적 신경망은 장기 적응 이즈케비치 모델로 명명될 수 있다.

$$v \quad u$$

- [0081] 이러한 모델은 초기 v 와 u 값들을 이용하여 생물학적 SA-1 신경의 장기 적응을 지속적인 자극에 대해 효과적으로 모방하였다.

- [0082] 이 모델은 다음 두 가지 새로운 매개변수를 도입하였다.

$$S_p$$

- [0083] 첫째, 매개변수 S_p 는 생물학적 SA-1 신경의 최대 발화 빈도와 인공 뉴런의 최대 발화 빈도가 일치하도록 인공 뉴런에 주입되는 전류의 크기를 조절하는 역할을 한다.

$$D_p$$

$$a$$

- [0084] 둘째, 매개변수 D_p 는 막 전위 회복을 조절하는 매개변수 a 의 점진적인 감소를 가능케 한다. 본 발명에서는 생물

$$S_p \quad D_p$$

학적 SA-1 신경의 스파이크 열 패턴과 가장 잘 일치하는 S_p 와 D_p 의 최적값을 찾기 위해 격자 검색(grid search)방식을 적용하였다.

- [0085] 이 과정에서, 30개의 SA-1 신경 스파이크 열 패턴 각각에 대해 20초 동안의 자극 기간 동안 발화 빈도를 추정하고, 이를 기반으로 지수 함수를 적합시키는 방식으로 진행하였다. 이 과정을 통해 30개의 매개변수 세트를 얻었다.

$$S_p \quad D_p$$

[0086] 그런 다음, 가능한 모든 S_p 와 D_p 값의 조합과 비교하여, 장기 적응 이즈케비치 모델을 사용하여 스파이크 트레인을 생성하였다. 이렇게 생성된 스파이크 트레인을 바탕으로 발화 빈도를 추정하고, 이를 지수 함수에 적합시키는 방식으로 진행하였다.

$$\{\hat{\alpha}_{c,p} \quad \hat{\beta}_{c,p}\} \quad \{\hat{\alpha}_{c,p} \quad \hat{\beta}_{c,p}\}$$

[0087] 이를 통해 매개변수 $\{\hat{\alpha}_{c,p} \quad \hat{\beta}_{c,p}\}$ 의 추정치를 얻을 수 있었으며, 각 c 와 p 에 대해 $\{\hat{\alpha}_{c,p} \quad \hat{\beta}_{c,p}\}$ 의 가능한 모든 조합 중에서 최적값에 가장 가까운 값을 찾을 수 있다.

$$c = 1, \dots, 5, \quad p = 1, \dots, 6 \quad \{S_{c,p} \quad D_{c,p}\}$$

[0088] 이를 통해 얻은 결과를 바탕으로, $\{S_{c,p} \quad D_{c,p}\}$ 에 대한 $\{S_{c,p} \quad D_{c,p}\}$ 의 최적 세트를 추정하고, 이를 뉴런들에 대해 평균을 내어 매개변수화 하였다.

$$p = 1, \dots, 6 \quad \{S_p \quad D_p\}$$

[0089] 마지막으로, $\{S_p \quad D_p\}$ 에 대한 $\{S_p \quad D_p\}$ 세트를 사용하여 장기 적응 이즈케비치 모델을 사용해 신경 활동 모사 반응을 생성하였다.

[0090] 도 4는 이와 같이 학습된 생물학적 신경망(장기 적응 이즈케비치 모델)을 이용하여, 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치(100)에서 촉각 신경신호를 생성하는 방법을 설명하는 흐름도이다.

[0091] 도 4에 도시한 바와 같이, 촉각 신경신호 생성 장치(100)는 SA-1 데이터를 획득하고(S200), 획득된 SA-1 데이터를 기 학습된 생물학적 신경망에 입력할 수 있다(S202).

[0092] SA-1 데이터가 입력되면, 생물학적 신경망은 매개변수에 기초한 촉각 신경신호 패턴을 출력할 수 있다(S204).

[0093] 여기서, 매개변수는 SA-1 데이터의 스파이크 패턴 정보를 모사하여 촉각 신경신호 패턴을 출력하도록 결정되는 매개변수일 수 있으며, 이러한 매개변수에 의해 출력되는 촉각 신경신호 패턴은 SA-1 감각 뉴런 스파이크 패턴 정보와 유사도가 최대한 스파이크 발화 패턴 정보를 포함할 수 있다. 구체적으로, 스파이크 발화 패턴 정보는 SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴 정보와 최소 EMD를 가질 수 있다.

[0094] 본 발명에서는 스파이크 디스턴스 메트릭(spike distance metric)을 사용하여 장기 적응 인공 뉴런 모델이 생물학적 SA-1 신경 활동 전위와 얼마나 유사한 반응을 재현하는지 평가하였다. 스파이크 디스턴스는 두 시계열 스파이크 반응 간의 최단 거리를 계산하는 EMD를 사용하여 계산하였다. 이는 한 시계열 스파이크 반응에서 다른 하나로 스파이크의 일부를 이동시키는데 필요한 최단 거리를 측정하는 방식으로, 스파이크 디스턴스가 작을수록 모델에 의해 생성된 신경 활성 반응이 생물학적 이론과 더 가까움을 의미한다고 볼 수 있다.

[0095] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치(100)의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 이와 같은 다양한 막회복변수에 따른 시뮬레이션 결과를 비교하기 위한 도면이다.

[0096] 도 5는 다양한 회복 시간 상수 a 값을 가진 기본 이즈케비치 모델의 시뮬레이션 결과로서, 도 5의 (a)는 스파이크 패턴을 생성하기 위한 이즈케비치 뉴런 모델 시뮬레이션을 구동하는 입력 전류의 개략적 표현을, (b)는 적응 매개변수 a 가 0.01로 설정된 경우에 20초 동안 100 pA의 입력 전류에 대응하여 원래의 스파이크 발화 빈도 적응을 보여주는 대표적인 스파이크 열 생성을, (c)는 (b)에서 나타난 스파이크 열의 최고 및 정상 발화 빈도를, (d)는 이즈케비치 뉴런 모델 시뮬레이션을 구동하는데 사용된 0에서 300까지 1씩 증가하는 입력 전류 값을, (e)는 적응 매개변수 a 가 0.001로 설정된 수정된 스파이크 발화 빈도 적응을 보여주는 대표적인 스파이크 열 생성을, (f)는 (e)에서 제시된 스파이크 열의 최고 및 정상 발화 빈도를 각각 나타낸다.

[0097] 도 5의 시뮬레이션 결과는 이즈케비치 모델에서 매개변수 a 를 조절하여 지속적인 막회복을 억제하더라도, 이것이 생물학적 SA-1 신경에서 관찰된 스파이크 패턴과 유사한 결과를 이끌어내지 않았음을 보여준다. 또한, 지속적인 막회복을 억제하더라도 발화 적응 기간에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나, 본 발명의 실험 데이터는 SA-1 신경이 지속적인 압력에 장기적으로 적응한 후 안정화되는 경향이 있음을 보여주고 있다. 이를 모델링하기 위해, 본 발명에서는 이즈케비치 모델을 감쇠 매개변수 D_p 와 입력 스케일러 S_p 를 사용하여 수정하고, 이들이 장기 적응에 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다.

[0098] 제안된 장기 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델은 스파이크가 발생할 때마다 막 회복을 억제하는 매개변

수 a 를 점진적으로 감소시켰다. 결과적으로, ISI도 점차적으로 증가하였다. 이를 통해, 더욱 느린 시간 상수로 스파이크 발화 빈도 적응을 구현할 수 있었으며, 이를 통해 몇 초 동안의 적응 기간을 가진 스파이크 패턴을 생성할 수 있었다.

[0099] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치(100)의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 이와 같이 매개변수를 조정한 경우의 시뮬레이션 결과를 비교하기 위한 도면이다.

[0100] 도 6은 수정된 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델의 감쇠 및 입력 스케일 매개변수에 대한 반응 패턴 및 발화 빈도를 나타내는 도면으로서, 도 6의 (a)는 입력 스케일러가 50으로 고정된 상태에서 수정된 스파이크 발

$$D_p$$

화 빈도 적응 이즈케비치 모델의 반응 패턴(감쇠 매개변수 $=1.2, 1.01$, 또는 1)을, (b)는 입력 스케일러가 50으로 고정된 세 가지 감쇠 매개변수에 대한 발화 빈도를, (c)의 실선은 최고 발화 빈도를 나타내며, 점선은

$$D_p$$

20초 동안 입력 스케일러가 50으로 고정된 상태에서 감쇠 매개변수 D_p 에 대한 평균 발화 빈도를 나타낸다. 또

$$D_p$$

한, (d)는 입력 스케일러가 50으로 고정된 상태에서 감쇠 매개변수 D_p 에 대한 시간 상수를, (e)는 감쇠 매개변수가 1.01로 고정된 상태에서 수정된 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델에 의한 스파이크 열 생성(입력

$$S_p$$

스케일러 $=20, 50$, 또는 100)을, (f)는 감쇠 매개변수가 1.01로 고정된 세 가지 다른 입력 스케일러에 대한 발화 빈도를, (g)의 실선은 최고 발화 빈도를 나타내며, 점선은 20초 동안 감쇠 매개변수가 1.01로 고정된 상태

$$S_p$$

에서 입력 스케일러 S_p 에 대한 평균 발화 빈도를 나타낸다. 또한, (h)는 감쇠 매개변수가 1.01로 고정된 상태에

$$S_p$$

서 입력 스케일러 S_p 에 대한 시간 상수를 나타낸다.

$$D_p$$

[0101] 시뮬레이션을 통해, 본 발명은 감쇠 매개변수 D_p 를 변경함으로써 생기는 영향을 파악할 수 있었다. 특히, 입력

$$S_p$$

$$D_p$$

스케일러 S_p 를 고정된 상태에서 D_p 를 1에서 1.2까지 증가시켰다(도 6a). 기본 이즈케비치 모델에서는, 매개변

$$a$$

$$D_p$$

수 a 가 감쇠되지 않을 때 ($=1$), 스파이크 발화 빈도는 약 100 ms의 짧은 적응 기간 후에 안정화되었다는 것을 관찰하였다.

$$D_p$$

[0102] 감쇠 매개변수 D_p 가 1에서 1.2로 증가함에 따라 최대 발화 빈도와 평균 발화 빈도 모두 감소하는 것을 확인할 수 있었다(도 6c). 최대 발화 빈도는 특정 시간 간격 동안의 최고 발화 빈도를 나타내며, 반면에 평균 발화 빈도는 동일한 간격 동안의 평균 발화 빈도를 의미한다. 장기 적응의 본질적 특성으로 인해 최대 발화 빈도와 평균 발화 빈도 모두를 검토하는 것이 중요하며, 이 두 지표 사이에 차이를 보였다. 본 발명의 목표는 감쇠 매개

$$S_p$$

변수나 이즈케비치 입력 스케일러 S_p 와 관련하여 최대 발화 빈도와 평균 발화 빈도 사이의 차이를 보여주는 것이다. 이 분석은 모델의 동작을 본 발명의 연구 맥락에서 종합적으로 이해하는 데 중요하다. 감쇠 매개변수가 특정 범위 내에서 점진적으로 증가함에 따라 시간 상수는 상응하게 감소하며, 이는 뉴런의 발화 빈도 적응 기간이 짧아짐을 의미한다(도 6d). 이는 감쇠 매개변수가 스파이크 패턴 형성과 뉴런의 적응 동역학에 중요한 영향을 미친다는 것을 시사한다.

$$S_p$$

[0103] 입력 스케일러 S_p 에 대해서는, 감쇠 매개변수를 1.01로 고정된 상태에서 입력 스케일러를 0에서 200으로 변경하면 SA-1 감각 신경의 스파이크 패턴이 달라짐을 알 수 있다(도 6e). 구체적으로, 입력 스케일러가 증가함에 따

라 최대 발화 빈도가 증가하였다(도 6f). 입력 스케일러가 점진적으로 증가함에 따라 평균 발화 빈도도 증가하였다(도 6g). 감쇠 매개변수가 일정하게 유지되는 동안에도 입력 스케일러는 적응의 시간 상수에 영향을 미쳤다(도 2h). 입력 스케일러가 20, 50, 그리고 100으로 점진적으로 증가함에 따라, 시간 상수는 각각 10.88, 6.52, 그리고 4.38로 감소하였다. 이러한 결과는 감쇠 매개변수와 입력 스케일러가 SA-1 뉴런의 동역학을 어떻게 형성하는지에 대한 통찰을 제공할 수 있다.

[0104] 장기 스파이크 발화 빈도 이즈케비치 모델에 의해 생성된 스파이크 열은 다양한 입력 압력 강도에 대해 생물학적 SA-I 뉴런과 유사하게 수 초 동안 스파이크 발화 빈도 적응을 보였다. 반면에 기본 스파이크 발화 빈도 이즈케비치 모델과 ISI 기반 스파이킹 모델은 이와 같은 장기 스파이크 발화 빈도를 보이지 않았다.

[0105] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 이와 같은 모델별 스파이크 패턴 응답을 비교하기 위한 도면이다.

[0106] 도 7에서 (a)는 생물학적 SA-1 감각 신경을, (b)는 장기 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델(본 발명에 따른 생물학적 신경망)을, (c)는 ISI 학습 모델을, (d)는 기본 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델에서의 스파이크 패턴 응답을 각각 나타낸다.

[0107] 본 발명에서는 스파이크 열 거리를 측정하는 EMD를 사용하여 모델에 의해 생성된 스파이크 열과 생물학적 SA-I 감각신경 사이의 유사성을 평가하였다. 더 작은 스파이크 거리는 모델의 스파이크 열이 그 생물학적 상응물과 더 가깝게 일치함을 나타낸다.

[0108] 본 발명의 결과는 장기 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델이 다른 모델보다 훨씬 작은 스파이크 거리를 나타냄을 보여준다

[0109] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 촉각 신경신호 생성 장치의 시뮬레이션 결과를 설명하기 위한 그래프로서, 이러한 모델별 스파이크 거리를 비교하기 위한 도면이다.

[0110] 도 8의 (a)는 생물학적 SA-1 감각 신경의 스파이크 열과 각 모델이 생성한 스파이크 열 간의 스파이크 거리를 보여주는 바이올린 플롯을, (b)는 세 모델 간의 최고 발화 빈도와 안정상태 발화 빈도의 비교(Student's t-test에 따라 유의미한 P값; $***P<0.001$)를 나타낸다.

[0111] 도 8의 (a)와 같이, 장기 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델이 다른 모델들에 비해 훨씬 작은 스파이크 거리를 나타냄을 확인하였으며($P<0.01$), 도 8의 (b)와 같이 장기 스파이크 발화 빈도 적응 이즈케비치 모델에서의 최대 발화 빈도와 정상 상태에서의 발화 빈도 간의 차이는 다른 모델들보다 생물학적 데이터와 더 유사함을 확인할 수 있었다.

[0112] 이상 설명한 바와 같은 본 발명의 실시예에 의하면, SA-1 감각 뉴런의 스파이크 패턴을 모사하여 스파이크 패턴과 유사한 스파이크 발화 패턴을 생성하도록 생물학적 신경망을 학습하고, 학습된 생물학적 신경망을 통해 압력 자극에 대한 SA-1 감각 뉴런의 장기 스파이크 발화 빈도에 적응할 수 있는 촉각 신경신호를 생성함으로써, 기존 모델들에 비해 생물학적인 SA-1 감각 뉴런과 훨씬 가까운 촉각 신경신호 패턴을 생성할 수 있다. 특히, 수 초 내지 수십 초 동안 지속되는 촉각에 대해 느리게 적응하는 촉각 신경의 특징을 하나의 수학적 모델로서 효과적으로 모델링하고, 이를 통해 가상의 촉각 신경 패턴을 생성할 수 있다. 본 발명은 기존 생물학적 뉴런 모델들이 겪었던 장기 적응 구현의 어려움을 성공적으로 극복하였다. 이러한 성과는 실제 생물체의 SA-1 감각 뉴런이 지속적인 압력에 반응하여 스파이크 발화 빈도를 조절하는 과정을 정확하게 반영한 결과이다. 이렇게 개발된 새로운 모델은 기계적 자극에 대해 더욱 정확하고 생물학적인 반응을 보이므로, 인공 촉각 기술의 효율성과 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 결론적으로, 본 발명에서 개발한 생물학적 뉴런 모델은 높은 수준의 생물학적 유사성을 통해 인공 촉각 감각 시스템의 성능을 향상시키는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. 이로써, 로봇이나 인공 지능 시스템이 인간의 촉각 능력을 더욱 정확하게 모방하고 이해하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

[0113] 한편, 첨부된 블록도의 각 블록과 흐름도의 각 단계의 조합들은 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들에 의해 수행될 수도 있다. 이들 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 범용 컴퓨터, 특수용 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비의 프로세서에 탑재될 수 있으므로, 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비의 프로세서를 통해 수행되는 그 인스트럭션들이 블록도의 각 블록에서 설명된 기능들을 수행하는 수단을 생성하게 된다.

[0114] 이들 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 특정 방식으로 기능을 구현하기 위해 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한

데이터 프로세싱 장비를 지향할 수 있는 컴퓨터 이용 가능 또는 컴퓨터 판독 가능 기록매체(또는 메모리) 등에 저장되는 것도 가능하므로, 그 컴퓨터 이용 가능 또는 컴퓨터 판독 가능 기록매체(또는 메모리)에 저장된 인스트럭션들은 블록도의 각 블록에서 설명된 기능을 수행하는 인스트럭션 수단을 내포하는 제조 품목을 생산하는 것도 가능하다.

[0115] 그리고, 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비 상에 탑재되는 것도 가능하므로, 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비 상에서 일련의 동작 단계들이 수행되어 컴퓨터로 실행되는 프로세스를 생성해서 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비를 수행하는 인스트럭션들은 블록도의 각 블록에서 설명된 기능들을 실행하기 위한 단계들을 제공하는 것도 가능하다.

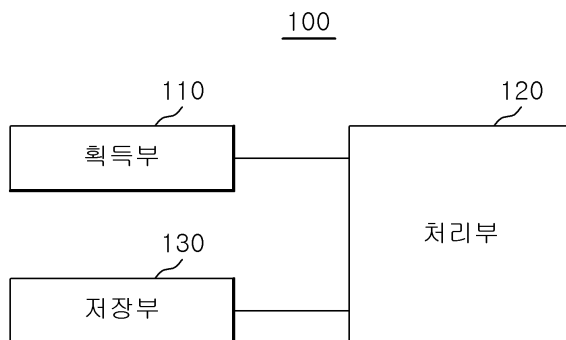
[0116] 또한, 각 블록은 특정된 논리적 기능(들)을 실행하기 위한 적어도 하나 이상의 실행 가능한 인스트럭션들을 포함하는 모듈, 세그먼트 또는 코드의 일부를 나타낼 수 있다. 또, 몇 가지 대체 실시 예들에서는 블록들에서 언급된 기능들이 순서를 벗어나서 발생하는 것도 가능함을 주목해야 한다. 예컨대, 잇달아 도시되어 있는 두 개의 블록들은 사실 실질적으로 동시에 수행되는 것도 가능하고 또는 그 블록들이 때때로 해당하는 기능에 따라 역순으로 수행되는 것도 가능하다.

부호의 설명

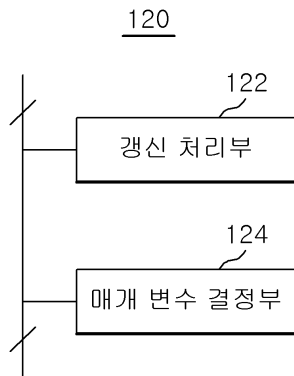
- [0118] 100: 촉각 신경신호 생성 장치
110: 획득부
120: 처리부
122: 갱신 처리부
124: 매개변수 결정부

도면

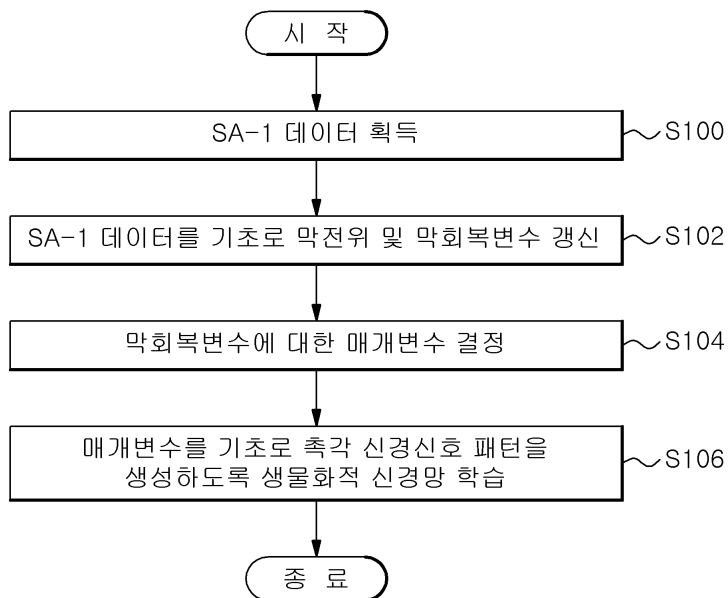
도면1



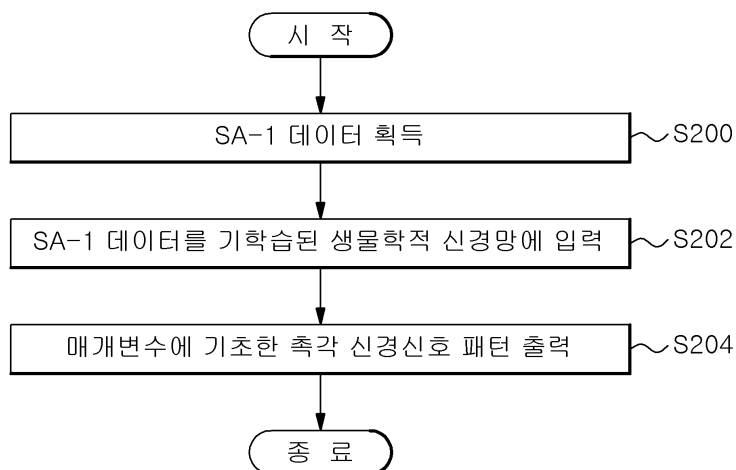
도면2



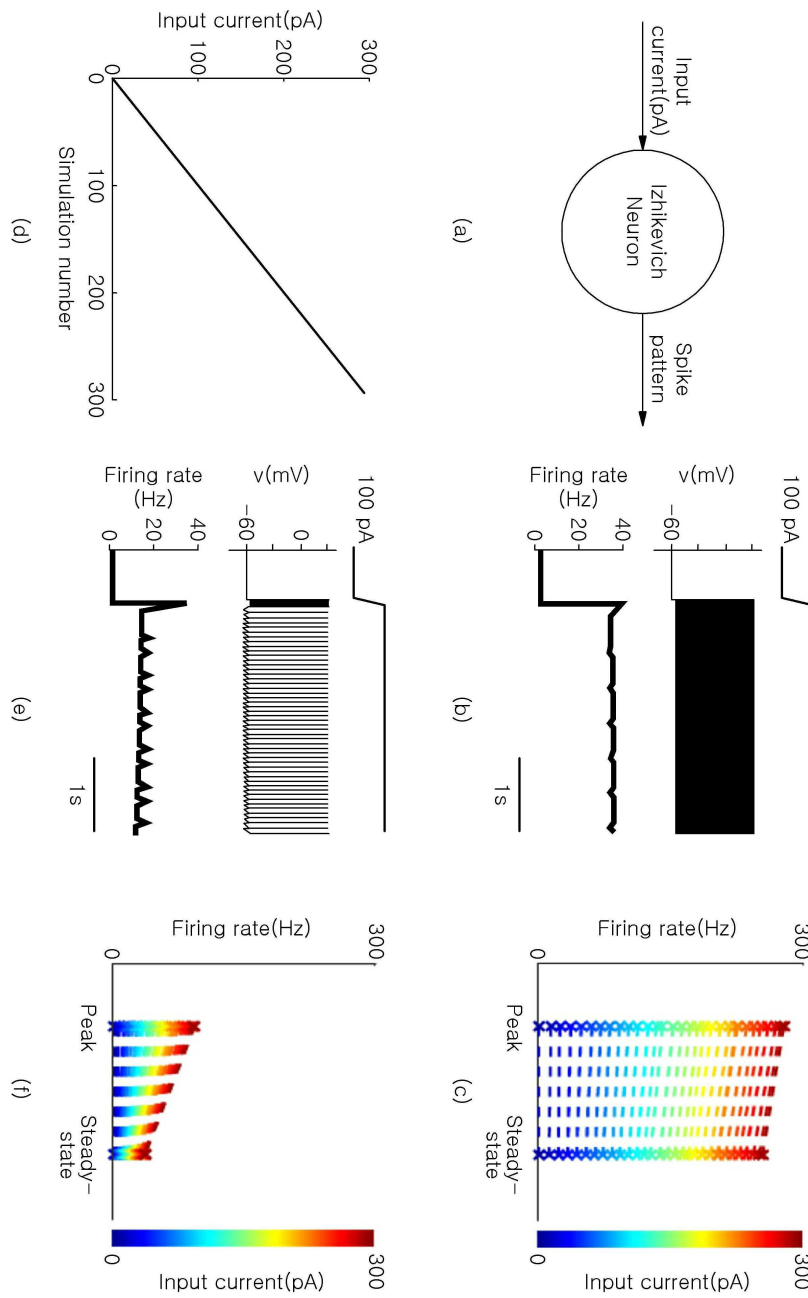
도면3



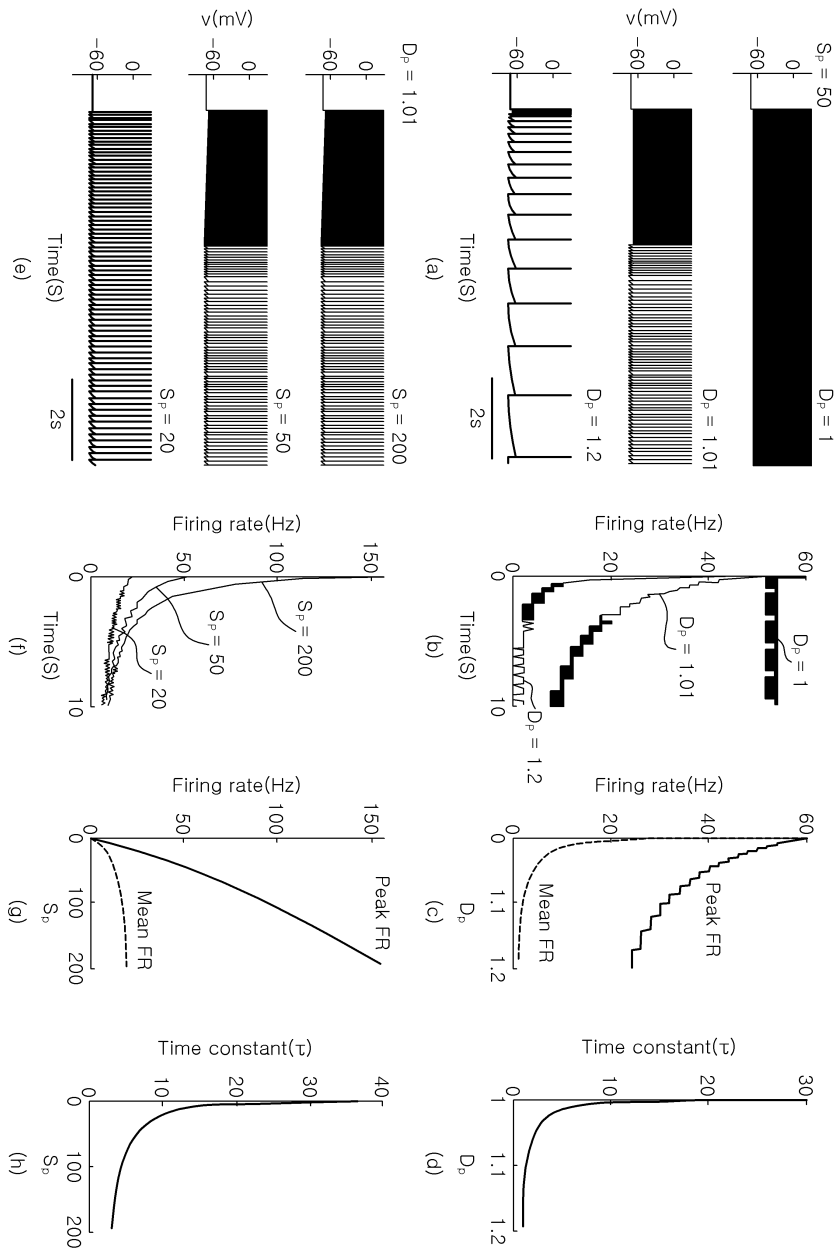
도면4



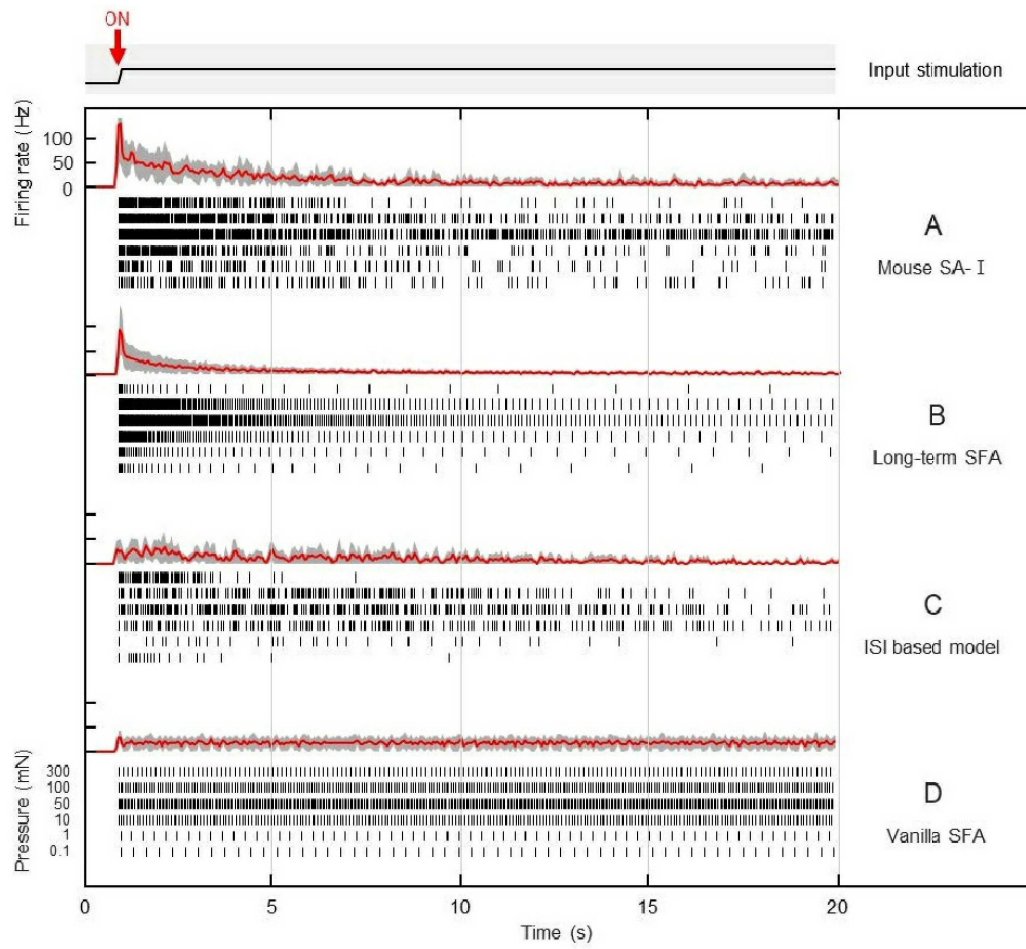
도면5



도면6



도면7



도면8

