

ECoG 신호 기반 행동 의도 분류 및 로보틱 시스템을 통한 행동 재현

Classifying Intended Behavior based on ECoG Signal and Reconstructing via Robotic Systems

박찬진¹, 허성원², 정호진¹, 윤한얼³

Chanjin Park, Sungwon Heo, Ho-Jin Jung, and Han Ul Yoon

¹연세대학교 일반대학원 전산학과

E-mail: {cjpark04, hojinj}@yonsei.ac.kr

²연세대학교 미래캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부

E-mail: swheo@yonsei.ac.kr

³연세대학교 소프트웨어학부

E-mail: huyoon@yonsei.ac.kr

요약

인간이 행동을 수행하기 이전에 활성화되는 뇌파 신호를 디코딩하면, 다음에 행할 행동을 예측할 수 있다. 본 논문에서는 원숭이의 electrocorticography 뇌파 신호를 디코딩하여 행동 의도를 분류하고, 분류된 행동 시퀀스들을 로보틱 시스템을 통해 재현하고자 한다. 우선, 뇌파 신호를 전처리하기 위해 wavelet 변환하여 event-related potential이 나타난 스펙트로그램 시퀀스 이미지를 얻는다. 다음으로, 인공신경망을 통해 policy를 학습하는 deep Q-network을 통해 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지로부터 행동 의도를 분류한다. 최종적으로, 분류된 행동 시퀀스들을 로보틱 시스템을 통해 재현한다. 제안하는 방법론을 통해, 뇌파 신호로부터 로보틱 시스템을 구동하는 인터페이스 구성에 대한 가능성을 검증한다.

키워드 : Electrocorticography, Deep Q-Network, Behavior Recognition, Behavior Reconstruction

1. 서 론

사람이 수행하는 행동들은 뇌파 신호가 입력으로 전달된 central nervous system-to-musculoskeletal system의 최종 출력물이다. 따라서, 뇌파 신호를 디코딩하면, 사람의 다양한 행동 의도를 파악할 수 있다. S. Metzger et al.은 뇌파 신호를 디코딩하여 언어 장애가 있는 사람의 발화 의도를 파악하였고[1], R. Zang et al.은 요리하는 로봇 매니퓰레이터가 집어야 할 물건과 집어야 할 위치, 수행할 행동을 순차적으로 파악해서 구상한 순서에 맞게 요리 테스크를 수행하였다[2].

본 논문에서는 뇌-기계 인터페이스의 필수 기술인, 뇌파 신호로부터 행동 의도를 분류하는 신경망 기반 분류기를 설계하고자 한다. 먼저, 인간과 같은 영장류인 원숭이의 ECoG 뇌파 신호를 시각화하기 위해, wavelet 변환을 적용하여 스펙트로그램 시퀀스 이미지를 획득한다. 다음으로, 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지를 입력으로 하여 행동 의도 분류를 수행하는 신경망 기반 네트워크를 학습한다. 최종적으로, 학습된 신경망 기반 분류기를 통해 ECoG 뇌파 신호로부터 행동 시퀀스를 획득하고, 로보틱 시스템을 통해 행동들을 재현한다.

2. ECoG 신호 기반 행동 의도 분류

2.1 Wavelet 변환을 통한 뇌파 신호 시각화

그림 1은 행동 의도 분류기에 입력되는 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지의 획득 과정을 보여준다. 먼저, 뇌파 신호로부터 더 많은 feature가 담긴 학습 데이터셋을 생성하기 위해, 뇌파 신호를 시각화하였다. 본 논문에서는 푸리에 변환 대신 wavelet 변환을 적용하여 event-related potential이 뚜렷하게 나타나는 스펙트로그램 이미지를 생성하였다.

Wavelet 변환을 통해 뇌파 신호에 따른 스펙트로그램 이미지를 생성한 후, 현재 타임 스텝(t)를 기준으로, 이

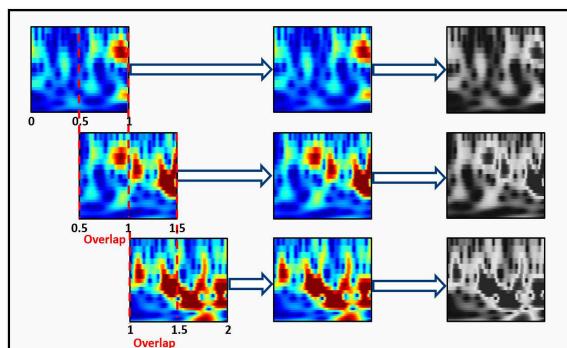


그림 1. 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지 얻는 과정

감사의 글: 이 성과는 정부(산업통상자원부)의 지원으로 한국산업기술기획평가원의 알키미스트 프로젝트 프로그램 (No. RS-2024-00423702) 및 소재부품기술개발사업 (No. RS-2024-00418941) 지원에 의해 수행되었습니다.
연구비 지원에 감사드립니다.

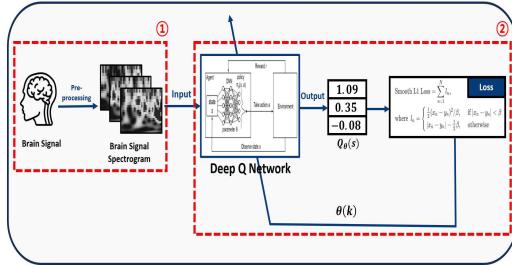


그림 2. DQN을 통한 행동 의도 분류 과정

전 타임 스텝(t-1)과 이후 타임 스텝(t+1) 스펙트로그램 이미지를 포함한 하나의 학습 데이터셋을 생성하기 위해, 각 스펙트로그램 이미지를 gray scale로 변환 후, 50%씩 오버랩하여 3장의 스펙트로그램 이미지로 학습 데이터셋을 구성하였다.

2.2 DQN을 통한 행동 의도 분류

그림 2는 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지를 입력받아, 행동 의도 분류를 수행하는 신경망 기반 분류기의 전체적인 구조를 보여준다. 본 논문에서 제안하는 행동 의도 분류기는 DQN으로, state는 각 타임 스텝에서의 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지이고, action은 state와 동일한 타임 스텝에서의 행동이다. Reward 함수는 DQN이 state를 입력받아 출력한 action이 실제 행동과 동일하면 +1, 틀리면 -1으로 정의하였다. DQN은 에피소드마다 한 state를 입력받아, action을 출력하고, reward를 얻는다. State, action, reward, terminate state가 포함된 transition이 사전에 정의한 배치 사이즈 만큼 누적되면, 정해진 업데이트 루프마다 네트워크를 학습하게 된다. 학습에서 사용한 loss function은

$$\text{Smooth L1 Loss} = \sum_{n=1}^N l_n,$$

$$\text{where } l_n = \begin{cases} \frac{1}{2}(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a))^2 / \beta, & \text{if } |r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)| < \beta \\ |r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)| - \frac{1}{2}\beta, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

와 같이 정의하였고, optimizer는 RMSProp을 사용하여 학습을 진행하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 구성 및 진행 프로토콜

원숭이의 ECoG 뇌파 데이터를 획득하기 위해, 원숭이 대뇌피질에 부착된 무선 ECoG 장비로부터 실시간으로 뇌파 신호를 받아 기록하였고, 동시에 움직임이 촬영된 영상을 토대로 실험을 진행하였다. 행동 의도 분류기를 통해 분류하고자 하는 행동은 가장 많이 반복 관찰된 행동인 먹기, 앉기, 걷기로 설정하였다. 재현하고자 하는 테스트 데이터셋으로부터 로보틱 시스템을 통해 행동을 재현하는 프로토콜은 다음과 같다:

- 1) 학습된 DQN에 재현하고자 하는 뇌파 스펙트로그램 시퀀스 이미지를 입력
- 2) DQN이 주어진 state에 따라 행동 의도 분류된 action을 출력
- 3) 출력된 행동 시퀀스들을 가상 환경 상에서 구현
- 4) 로보틱 시스템을 통한 행동 재현

로보틱 시스템을 통한 행동 재현에는 12-DoF 사족보행 로봇(D'Kitty, Google, Mountain View, CA, USA)을 사용하였다.

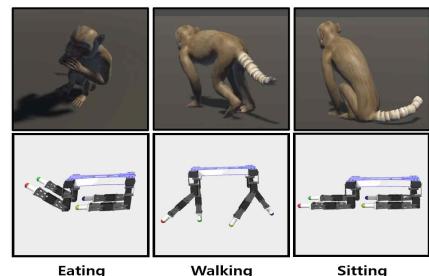


그림 3. (a) 가상환경에서 재현된 행동의 모습,
(b) 로보틱 시스템을 통해 재현된 행동의 모습

3.2 실험 결과: 행동 의도 분류 정확도 및 모델별 성능 비교

DQN은 각 행동 레이블마다 20개씩 구성된 테스트 데이터셋으로부터 행동을 분류한 결과, accuracy 0.87, precision 0.88, recall 0.87, f1-score 0.87이 기록되었다. DQN의 분류 성능을 다른 행동 의도 분류 모델들과 비교하기 위해, convolutional neural network(CNN)과 vision transformer(ViT)의 행동 의도 분류 결과를 아래 표 1에 같이 기록하였다. 표 1을 보고 알 수 있듯이, DQN이 모든 분류 성능 지표에서 가장 높게 기록되었다.

표 1. 행동 의도 분류기 간 분류 성능 비교.

Classifier	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
CNN	0.83	0.85	0.83	0.84
ViT	0.82	0.84	0.82	0.83
DQN	0.87	0.88	0.87	0.87

3.3 가상 환경과 로보틱 시스템을 통한 행동 재현

아래 그림 3-(a)에서 보이는 것과 같이, 학습된 분류기를 통해 분류된 행동들이 Unity 3D 가상 환경에서 재현된 모습을 확인할 수 있었다. 그림 3-(b)는 그림 3-(a)의 분류된 행동 시퀀스들이 로보틱 시스템을 통해 재현되는 것을 보여준다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문은 인공신경망 기반 분류기를 사용하여 원숭이의 뇌파 신호로부터 행동 의도 분류를 수행하였고, 로보틱 시스템 통해 행동을 재현하였다. 뇌파 신호를 전처리하기 위해 시각화 과정을 진행하였고, 행동 의도 분류기로 DQN을 사용하였다. DQN은 다른 인공신경망 기반 분류기와 비교하여, 분류 성능이 가장 높게 기록되었다. 최종적으로, 로보틱 시스템을 통해 재현된 행동들을 확인하였고, 이를 통해 뇌파 신호로부터 로보틱 시스템을 구동하는 인터페이스를 구성해 볼 수 있었다.

향후 연구로는 생성형 모델을 통해, 뇌파 신호로부터 kinematic joint trajectory를 예측하여, 더 정밀한 움직임을 재현하고자 한다. 이에 더하여, 실제 환경에서 로보틱 시스템을 통해 행동들을 재현해보고, 영상 속 움직임과 비교 분석을 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Metzger et al., “A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control”, *Nature* 620, pp. 1037–1046, 2023.
- [2] R. Zang et al., “NOIR: neural signal operated intelligent robots for everyday activities,” *Proceedings of the 7th International Conference on Robot Learning*, Atlanta, USA, November 6–9, 2023.