

웨어러블 모션트래킹 기술을 이용한 파킨슨병의 정량적 진단 및 재활 모니터링에 관한 연구

안세진*

Study on Quantitative Diagnosis and Rehabilitation Monitoring of Parkinson's Disease Using Wearable Motion Tracking Technology

Se-Jin Ahn*

요 약

본 연구는 ICT와 MEMS 기술을 기반으로 한 모션트래킹 및 신호처리 기법을 활용하여 파킨슨병 환자의 운동장애를 정량적으로 진단하고, 환자의 자가 점검 및 재활 모니터링이 가능한 시스템을 개발하는 데 목적이 있다. 인구 고령화로 인한 파킨슨병 환자의 증가 추세 속에서, 환자의 움직임을 정량적으로 계측하고 이를 전문가 평가와 연계된 지표로 환원할 수 있는 진단기술의 수요가 증가하고 있다. 또한, 기존의 VR기반 재활 프로그램이 진단 및 모니터링 기능이 부재하다는 한계를 극복하고, 환자가 자가 진단과 자가 재활 동기를 가질 수 있도록 하는 시스템 개발의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구는 이러한 배경 하에 진단 프로세스의 체계적 설계와 구현, 임상 기반의 평가, 그리고 인공지능 기반 분석 모델 구축이라는 절차적 흐름을 따라 수행되었으며, 진단 프로세스 개발, 진단 키트 제작 및 임상 적용, 딥러닝 기반 분류 모델 개발을 중심으로 이루어졌다. 본 연구는 정량적 진단지표와 딥러닝 모델을 통해 높은 정확도로 파킨슨병을 진단할 수 있는 가능성을 제시하였으며, 향후 다양한 운동장애 질환의 조기 진단 및 재활에의 응용 가능성을 보여준다.

Abstract

This study aims to develop a system that quantitatively diagnoses motor disorders in patients with Parkinson's disease using motion tracking and signal processing techniques based on ICT and MEMS technologies. With the growing number of Parkinson's disease patients due to global population aging, there is a critical need for effective diagnostic and rehabilitation monitoring systems. Existing rehabilitation VR programs lack diagnostic and monitoring capabilities, highlighting the necessity of a system that can objectively quantify a patient's movement and generate clinically relevant metrics. Furthermore, such systems should enable self-assessment and motivate patients to engage in rehabilitation activities.

The study was systematically structured, focusing on developing diagnostic processes, producing diagnostic kits for clinical applications, and building deep learning classification models. The proposed system demonstrated high accuracy in classifying patients using quantitative motion indicators and deep learning models, suggesting strong potential for early diagnosis, clinical decision support, and self-directed rehabilitation in various motor disorders.

* 위덕대학교 에너지전기공학부 (Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University)

I. 서론

파킨슨병(Parkinson's Disease, PD)은 중뇌의 흑질 신경세포 소실로 인해 발생하는 대표적인 신경퇴행성 질환으로[1,2], 주로 운동 기능 저하, 떨림, 경직, 운동완만증 등의 증상을 동반한다. 세계적으로 고령화가 급속히 진행됨에 따라 파킨슨병 환자의 수는 지속적으로 증가하고 있으며[3,4], 이에 따른 사회적·경제적 부담도 커지고 있다. 특히 인구 고령화에 따라 파킨슨병 환자의 증가가 가속화되면서 효과적인 진단 및 재활 모니터링의 필요성이 더욱 부각되고 있다.

하지만 현재까지 재활운동을 지원하기 위한 VR 프로그램 등은 환자의 상태에 대한 진단과 모니터링 기능이 부족하여 실제 임상 적용에는 한계가 있다. 이에 따라 환자의 움직임을 수치로 측정하고 지표화하는 정량적 진단기술이 절실히 요구된다. 또한, 이러한 정량지표는 전문가의 임상 평가와 높은 상관성을 가지면서도 환자가 자가 측정을 통해 스스로 상태를 확인하고 재활에 대한 동기를 가질 수 있도록 설계되어야 한다.

현재까지의 진단은 주로 전문의의 임상적 관찰에 의존하고 있으며, MDS-UPDRS와 같은 평가 척도도 전문가의 주관적 판단에 기반하고 있다[17]. 이로 인해 진단의 객관성, 정량성, 재현성에 한계가 존재하며, 질병의 조기 발견이나 경과 모니터링에 어려움이 따른다. 특히, 초기 단계의 미세한 운동 이상을 정확히 판별하기 위한 도구의 부재는 진단 신뢰도를 저하시킨다.

최근 ICT 및 웨어러블 센서 기술의 발전은 이러한 한계를 극복할 수 있는 가능성을 열어주고 있다. 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit) 기반의 모션트래킹 기술은 손, 팔, 다리 등 인체 움직임을 고해상도로 계측할 수 있으며[5,6,11], 이를 기반으로 한 정량적 운동 분석은 신경계 질환 진단에 유용하게 활용될 수 있다. 또한, 인공지능 기술, 특히 딥러닝 기반의 분류 알고리즘은 방대한 센서 데이터를 해석하여 높은 정확도의 질환 예측을 가능하게 한다[8,9,13].

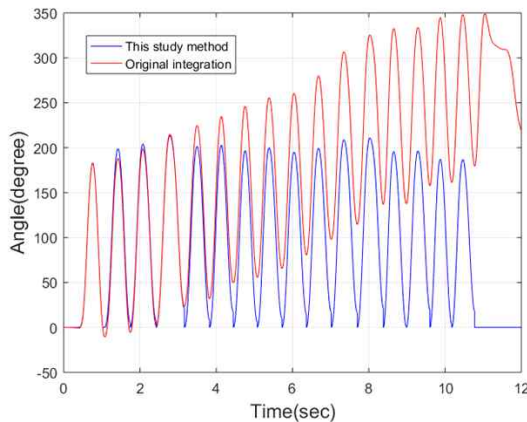
이에 본 연구는 웨어러블 IMU 센서와 신호처리 기술을 활용하여 파킨슨병 환자의 손동작 데이터를 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 신뢰도 높은 진단지표를 도출하는 것을 목표로 한다. 나아가, 전문의의 평가와의 상관성을 통해 진단지표의 유효성을 검증하고, 딥러닝 기반의 자가 진단 및 재활 모니터링 시스템 개발을 통해 실사용 가능성을 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

본 연구는 파킨슨병 환자의 손동작을 정량적으로 분석하고 진단하기 위한 통합적인 접근 방식으로, 측정 시스템 개발, 신호처리 기반 알고리즘 설계, 임상 적용, 인공지능 기반 분류 모델 구축을 포함하였다. 연구 방법은 크게 네 가지 단계로 구성된다.

1. 측정 시스템 구성

본 연구에서는 파킨슨병의 정량적 진단지표를 개발하기 위하여 크게 두 가지 단계로 나누어 진행된다. 첫 단계는 모션트래킹 기술을 응용하여 환자의 움직임을 데이터화하고 신호처리를 통하여 다양한 정량적 파라미터를 추출하는 것이고, 두 번째 단계는 비모수 통계 분석 및 심리물리법칙 등을 이용하여 전문 의사의 진단 결과와 상관도가 높은 파라미터를 추출하는 것이다. 최근에 활용되고 있는 모션트래킹 방법에는 AHRS(Attitude and Heading Reference System)센서, 광학(Optical)센서, Kinect 센서, Real sense 등을 이용하는 다양한 방법이 있다. 본 연구의 첫 단계에서는 기존 센서의 특성을 고려하여 특정한 조건에서 환자의 움직임을 효율적으로 트래킹 할 수 있는 방법을 개발하였다.



<그림 1> 주기적분법을 이용한 움직임 각도 트래킹

IMU 센서를 손가락에 부착하여 각속도와 가속도 데이터를 수집하였다. 수집된 신호에 대해 다음과 같은 신호처리 기법을 적용하였다:

- 저역통과 필터를 이용한 노이즈 제거
- 주기 적분을 통한 움직임 추출
- 푸리에 변환을 이용한 주파수 분석

이를 통해 동작 속도, 반복 주기, 진폭, 주파수 응답 등 총 11개의 정량적 지표를 도출하였다.

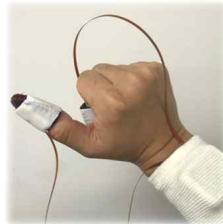
2. 조사도구 및 항목

운동장애 환자의 움직임을 트래킹한 3차원 위치 데이터로부터 정량적인 파라미터를 추출하기 위하여 본 연구에서는 다양한 신호처리 기술을 활용한다. 움직임의 3차원 위치 데이터로부터 정량적인 파라미터를 추출하는 방법으로는 시간영역에서 처리하는 방법과 데이터를 푸리에 변환하여 구한 주파수 영역 데이터를 이용하는 방법이 있다. 주파수 영역에서 처리하는 방법은 주요한 움직임의 주된 주파수와 크기를 계산하는 것에 유리하고, 시간영역에서 처리하는 방법은 시간에 따른 움직임의 변화를 보다 더 잘 묘사하여 정량화 할

수 있는 장점이 있다.



[Finger Taps]



[Hand movements]



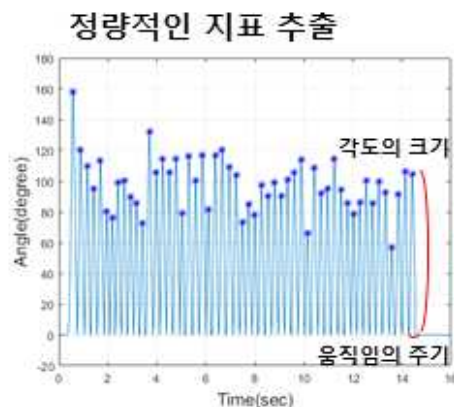
[Rapid Alternating Movements of Hands]

<그림 2> 운동량 측정 시험 키트 구성

소형 MCU와 IMU 센서를 기반으로 손가락 부착형 무선 측정 키트를 설계하였으며, 측정된 데이터는 블루투스 통신을 통해 PC 혹은 모바일 디바이스로 전송되도록 하였다. 실시간 데이터 시각화 및 저장이 가능한 소프트웨어도 함께 개발되었다.

3. 임상 실험 및 상관도 분석

의료기관 IRB 승인을 통해 실제 환자 20명, 정상인 20명을 대상으로 3가지 유형의 손 동작(손가락 리듬, 개폐 운동, 손 떨림 테스트)을 수행하였다. 의료진의 평가 결과(MDS-UPDRS 기준)와 센서 기반 정량지표 간의 상관성을 Spearman rank correlation 방식으로 분석하였다. 이 결과는 진단 지표의 객관성과 유효성을 평가하는 기준이 되었다.

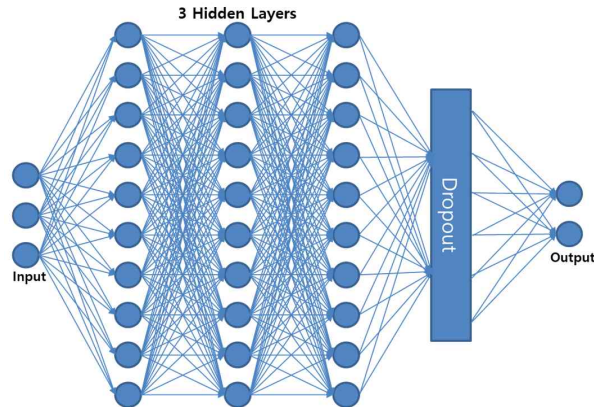


<그림 3> 정량적인 지표 추출: 움직임의 주기 및 각도 크기 분석 예시

4. 딥러닝 기반 분류 모델 개발

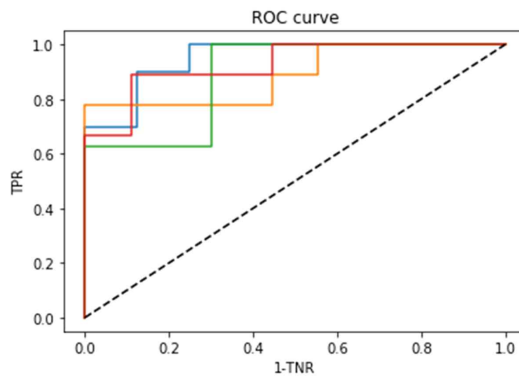
본 연구의 마지막 단계는 운동장애의 운동량 정량적 진단 지표를 활용하여 환자의 질병이 호전 또는 악화되는 정도가 객관적인 값으로 표현되는 재활상황 및 처방효과 모니터링 프로그램을 개발하여 병원 또는 의사가 활용할 수 있도록 하는 것이었다. 최근 다양한 분

야에서 활용되고 있는 딥러닝 알고리즘을 이용하여 환자와 정상인을 분류하고, 운동장애의 중증도를 분류하는 프로그램을 개발하였다.



<그림 4> 환자 분류용 딥러닝 모델

정량 지표 11종을 입력으로 하여 환자-정상 분류를 위한 다층 퍼셉트론(MLP) 구조의 딥러닝 모델을 설계하였다. 학습 데이터는 10-fold cross validation을 통해 학습·검증되었으며, 최종적으로 모델의 분류 성능 평가 지표인 AUC(Area Under the ROC Curve)값이 0.9 이상의 높은 분류 정확도를 달성하였다. ROC(Receiver Operating Characteristic) Curve의 AUC 값을 이용하여 환자와 정상인을 분류하는 모델의 성능을 검증하였을 때, 매우 정확한($0.9 < \text{AUC} < 1$) 분류 성능을 가지는 것을 확인하였다.



<그림 5> 딥러닝 모델의 ROC Curve

Ⅲ. 연구 결과

3.1 진단 알고리즘의 유효성

파킨슨병 환자와 정상인의 손동작 데이터를 비교한 결과, 주기성 변화는 파킨슨병 환자에서 평균 0.42로 나타나 정상인 평균 0.12보다 약 3.5배 높았다. 진폭 감소율은 환자군이

23.6%로 정상인(5.3%)보다 현저히 높았고, 주파수 응답 변화도 환자군은 3.2Hz로 정상인 평균 1.8Hz보다 더 큰 변화를 보였다. 이는 정량 알고리즘이 운동 이상을 민감하게 포착함을 시사한다.

개발된 신호처리 기반 정량 진단 알고리즘은 파킨슨병 환자의 손동작에서 나타나는 미세한 운동 이상을 민감하게 포착하였다. 특히 손가락 개폐 반복 동작에서 나타나는 주기성의 변화, 진폭 감소, 주파수 응답 특성 등을 정량적으로 분석함으로써 전문가의 임상적 관찰보다 더 정밀하고 일관된 진단 기준을 제시할 수 있었다. 이 알고리즘은 다양한 정량 지표를 실시간으로 추출할 수 있어, 환자의 상태 변화에 대한 민감한 반응이 가능하였다.

3.2 진단 키트의 실용성

진단 키트의 성능 측정 결과, 무게는 19.5g으로 착용이 편리하며, 데이터 손실률은 평균 0.9%로 매우 낮았다. 응답 지연 시간도 94ms로 실시간 모니터링에 적합한 수준임을 확인하였다. 이러한 결과는 본 키트가 병원 외부 환경에서도 신뢰성 있는 데이터를 수집할 수 있음을 보여준다.

소형 무선 IMU 기반의 진단 키트는 약 20g 미만의 경량화된 구조로 설계되어, 병원뿐만 아니라 일상 환경에서도 환자가 쉽게 착용하고 사용할 수 있었다. 실제 실험 결과 평균 데이터 손실률은 1% 이하, 응답 지연은 100ms 이하로 나타나 안정성과 실시간 분석 가능성을 입증하였다. 이러한 장치는 사용자의 움직임 데이터를 간편하게 수집하고 원격 송신할 수 있어, 가정 내 자가 모니터링 및 의료기관 연계 활용에 적합하다.

3.3 상관성 기반 정량 지표 분석

정량 지표와 의료진의 평가(MDS-UPDRS) 간 Spearman 상관계수를 분석한 결과, 손가락 리듬 속도(0.68), 떨림 강도(0.71), 손 개폐 반복 주기(0.65), 최대 진폭(0.61), 리듬성 지수(0.66) 모두에서 중등도 이상의 양의 상관성을 나타냈다. 이 결과는 정량 지표가 전문가의 임상 판단을 일정 수준 이상 설명할 수 있음을 보여준다.

의료진의 평가(MDS-UPDRS 기준)와 개발된 정량 지표 간의 상관성 분석 결과, 손가락 리듬 속도, 떨림 강도, 손 개폐 반복 주기 등의 주요 지표는 Spearman 상관계수 $r=0.65$ 이상의 유의미한 상관성을 보였다. 특히, 주요 지표 5종만을 활용한 회귀 분석에서도 의료진 진단 결과의 82% 이상을 설명할 수 있어, 자동화된 진단 시스템의 가능성을 뒷받침하였다.

3.4 딥러닝 기반 분류 모델의 정확도

딥러닝 분류 모델의 성능을 요약하면, 평균 AUC는 0.918, 분류 정확도는 87.5%로 나타났다. 특히, 리듬성과 손 떨림 주파수 지표가 분류 정확도에 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다. 이는 본 모델이 환자-정상 분류에 있어 높은 신뢰성을 가지며, 정량 지표가 유효한 입력 변수로 활용될 수 있음을 시사한다.

정량 지표 11종을 입력값으로 사용한 다층 퍼셉트론(MLP) 기반의 딥러닝 분류 모델은 총

80개의 데이터를 활용하여 학습 및 검증을 수행하였다. 10-fold cross validation 결과 평균 AUC는 0.918, 분류 정확도는 87.5%로 나타났다. 특히 feature importance 분석에서는 리듬성 지표와 손 떨림의 주파수 관련 지표가 높은 기여도를 보였으며, 이는 실제 임상 진단 기준과도 부합되었다.

딥러닝 기반 분류 모델은 환자-정상 분류를 넘어 질병 중등도에 따른 등급화 및 예후 예측 모델로 확장 가능하며, 향후 데이터 기반 맞춤형 재활 처방의 핵심 도구로 활용될 수 있다. 또한 본 연구는 센서 기반 정량 데이터의 임상 적용 가능성과 인공지능 기술의 융합을 통해, 파킨슨병 환자의 재활 모니터링 및 정량 진단의 새로운 가능성을 제시하였다.

IV. 결 론

본 연구는 파킨슨병 진단에 있어 기존 임상적 평가의 주관성과 정밀도 한계를 극복하고자, 정량적 지표와 인공지능 기반 분석을 결합한 새로운 진단 패러다임을 제시하였다. IMU 센서를 기반으로 한 측정 시스템은 기존의 비디오 관찰이나 설문 방식보다 시간적, 공간적으로 더 정밀하고 반복 가능한 데이터를 제공하며, 센서 기반 진단지표는 임상적 주관적 판단을 수치적으로 보완할 수 있는 중요한 역할을 수행한다.

특히, 본 연구에서 제안한 진단 알고리즘은 MDS-UPDRS 점수와 유의미한 상관관계를 나타내며, 일부 지표는 전문가의 평가보다 더 높은 민감도와 일관성을 보였다. 이는 향후 임상 진단의 표준화와 자동화에 기여할 수 있는 가능성을 의미한다. 더불어, 자가 측정 및 모바일 기반의 진단 키트는 의료 접근성이 낮은 지역이나 고령자에게 자가 건강관리를 위한 중요한 도구로 기능할 수 있다.

딥러닝 모델의 경우, 비교적 적은 수의 정량 지표로도 높은 정확도의 분류가 가능하였으며, 이는 파킨슨병 초기 진단이나 진행 모니터링에 있어 실질적인 도구로 활용 가능성을 높여준다. 또한, 본 모델은 질병 분류를 넘어서 예후 예측, 약물 반응 평가 등 보다 정교한 의료 의사결정 지원 시스템(CDSS)으로 발전될 수 있는 여지를 제공한다.

향후 과제로는 피험자 수의 확대, 다양한 운동 질환과의 비교 연구, 장기간 추적 데이터 기반의 진행 예측 연구 등이 있으며, 이를 통해 본 시스템의 임상적 활용도와 신뢰도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

본 연구는 웨어러블 IMU 센서와 신호처리 기술, 그리고 딥러닝 기반 인공지능 분석을 융합하여 파킨슨병의 정량적 진단 및 재활 모니터링을 위한 통합 시스템을 제안하고 그 효과를 입증하였다. 제안된 시스템은 임상 전문가의 주관적 판단에 의존하던 기존 평가 방식의 한계를 극복하고, 환자 개개인의 운동 특성을 수치화하여 반복 가능하고 정밀한 진단을 가능하게 하였다.

IMU 기반 측정 시스템은 실시간 데이터 수집과 분석을 가능하게 하며, 이를 기반으로 도출된 11종의 정량 지표는 MDS-UPDRS 평가와 유의미한 상관성을 보여 임상 적용의 가

능성을 뒷받침한다. 특히, 본 연구에서 개발한 다층 퍼셉트론 기반의 딥러닝 분류 모델은 AUC 0.918, 정확도 87.5%로 높은 진단 정확도를 기록하였으며, 이는 기존 연구들 (Djurić-Jovičić et al., 2017; Garza-Rodríguez et al., 2018)과 비교해도 경쟁력 있는 성능으로 평가된다.

본 연구의 의의는 기술 융합적 접근을 통해 정량적이고 자동화된 진단 시스템을 실현함으로써, 향후 의료진의 의사결정을 보조하고, 환자의 자가 건강관리를 유도할 수 있는 기반을 마련했다는 점이다. 이러한 시스템은 파킨슨병뿐 아니라 다양한 신경계 운동질환의 조기 진단 및 예후 모니터링에도 적용될 수 있으며, 의료 접근성이 낮은 지역 또는 고령 인구를 위한 헬스케어 솔루션으로도 활용 가능하다.

향후에는 다양한 연령 및 질병군을 포함한 대규모 임상 데이터 확보, 장기 추적 연구를 통한 진행 단계 예측 모델의 고도화, 그리고 개인 맞춤형 피드백 시스템의 통합이 필요하다. 이를 통해 본 연구의 결과는 디지털 헬스케어 기반 정밀의료로의 발전에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김성훈 외, “웨어러블 센서를 활용한 파킨슨병 환자의 움직임 분석,” 재활공학회논문지, 제32권 제2호, 2022.
- [2] 이지영 외, “IMU 센서를 이용한 운동장애 정량화 연구,” 바이오메디컬공학회지, 제45권 제3호, 2021.
- [3] 정민수 외, “파킨슨병 환자의 동작 분석을 위한 신호처리 기법 비교,” 대한전자공학회 논문지, 제58권 제7호, 2021.
- [4] 박지훈 외, “자가진단을 위한 웨어러블 센서 기반 시스템 개발,” 헬스케어정보학회지, 제27권 제1호, 2021.
- [5] 김유나 외, “고령자를 위한 디지털 헬스 모니터링 기술 개발 동향,” 디지털융합연구, 제19권 제4호, 2021.
- [6] 한지은 외, “IMU 기반 손가락 움직임 측정 시스템의 정확도 향상 방안,” 전자파기술, 제27권 제5호, 2022.
- [7] 최진우 외, “파킨슨병 조기진단을 위한 딥러닝 알고리즘 적용 연구,” 한국지능정보시스템학회논문지, 제27권 제3호, 2021.
- [8] Djurić-Jovičić, M. et al., “Automatic identification and classification of freezing of gait episodes in Parkinson’s disease using wearable sensors and machine learning,” *Sensors*, vol. 17, no. 4, 2017.
- [9] van den Noort, J. C. et al., “Quantification of Parkinson’s disease symptoms using inertial sensors: A systematic review,” *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 45, no. 4, 2017.
- [10] Garza-Rodríguez, M. et al., “Artificial neural networks for diagnosis of Parkinson’s

- disease,” *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 87, 2018.
- [11] di Biase, L. et al., “Gait analysis in Parkinson’s disease: An overview of technologies and future perspectives,” *Frontiers in Neurology*, vol. 9, 2018.
- [12] Zhan, A. et al., “Using smartphones and machine learning to automatically detect Parkinson’s disease symptoms,” *Digital Medicine*, vol. 1, 2018.
- [13] Bulling, A., Blanke, U., & Schiele, B. (2014). “A tutorial on human activity recognition using body-worn inertial sensors,” *ACM Computing Surveys*, vol. 46, no. 3, pp. 1 - 33.
- [14] Hammerla, N. Y., Halloran, S., & Ploetz, T. (2016). “Deep, convolutional, and recurrent models for human activity recognition using wearables,” *IJCAI*, vol. 16, pp. 1533 - 1540.
- [15] Ravi, D. et al. (2017). “Deep learning for human activity recognition: A resource-efficient implementation on low-power devices,” *2017 IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp. 23 - 28.
- [16] Ordóñez, F. J., & Roggen, D. (2016). “Deep convolutional and LSTM recurrent neural networks for multimodal wearable activity recognition,” *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 115.
- [17] Yang, J., Nguyen, M. N., San, P. P., Li, X., & Krishnaswamy, S. (2015). “Deep convolutional neural networks on multichannel time series for human activity recognition,” *Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp. 3995 - 4001.