

가속도 센서를 이용한 CNN 기반의 스마트폰 터치 에러 감소 기법 개발

김은호^o 박상근

경희대학교 소프트웨어융합대학

taemin4u@khu.ac.kr, sk.park@khu.ac.kr

Development of a CNN-Based Smartphone Touch Error Reduction Technique Utilizing Acceleration Sensor

Eunnho Kim^o Sangkeun Park

Software Convergence, Kyung Hee University

요 약

스마트폰의 보급률이 높아지면서 사람들은 일상생활에서 여러 모바일 서비스를 편리하게 이용할 수 있게 되었다. 스마트폰 사용자는 정지된 상황뿐 아니라 이동 중에도 한 손으로 스마트폰을 조작하며 모바일 서비스를 이용하기도 한다. 이동 중에 스마트폰을 사용하면 사용자의 신체 흔들림 등으로 사용자의 한 손 터치 정확도가 떨어지는 불편함이 있다. 본 논문에서는 가속도 센서를 통해 측정되는 스마트폰의 기울어진 정도를 기반으로 사용자가 터치하려는 버튼을 예측하는 CNN 모델을 개발했다. 또한 예측된 버튼의 터치 허용 영역을 유연하게 확장하는 터치 에러 감소 기법을 제시하고 실험을 통해 그 유용성에 대하여 검증했다.

1. 서론

2022 년 기준 스마트폰 사용률이 97%를 기록할 정도로 많은 사람이 스마트폰을 사용하고 있다[1]. 스마트폰은 한 손으로도 간편하게 소지하고 다닐 수 있으므로, 출퇴근 등 이동 중에도 스마트폰을 사용하는 사람을 쉽게 찾아볼 수 있다.

스마트폰을 사용할 때는 버튼 클릭 등의 다양한 인터랙션이 필요하다. 이동 중에 스마트폰을 사용할 때는 신체의 흔들림이 발생하므로, 제자리에 멈춰서 스마트폰을 사용하는 것에 비해 원하는 부분을 정확하게 터치하지 못하는 상황이 생기기도 한다. 특히, 이동 중 스마트폰을 조작할 때 한 손으로 기기를 조작하는 경우가 많다. Karlson [2]은 모바일 기기 사용자 50 명의 사용 패턴을 조사한 결과, 74%가 한 손으로 기기를 주로 조작하고 그중 54%는 이동 중에 조작한다는 사실을 밝혀냈다.

이러한 한 손 조작은 스마트폰 터치 정확도에 부정적인 영향을 미친다[3]. 한 손으로 스마트폰을 다룰 때는 스마트폰을 안정적으로 잡기 위해 엄지손가락을 제외한 네 손가락으로 기기 뒷면을 받친 상태에서 엄지로 조작하는 경우가 많다. 그러나 한 손으로 스마트폰을 쥐고 있는 상태에서는 자유로운 손가락 움직임에 제약이 있어 터치 정확도가 떨어지게 된다. 오른손잡이를 기준으로, 스마트폰을 터치할 때 오른쪽 하단 모서리와 거리가 먼 곳일수록 터치하는데 소요되는 시간은 증가하고 터치 정확도는 떨어진다[4]. 심지어, 한 손 스마트폰 인터랙션 과정에서는 스마트폰을 떨어트릴 수 있는 위험성도 존재한다[5].

낮은 터치 정확도에도 불구하고 많은 사용자들이 한 손으로 모바일 기기를 사용하므로, 한 손으로 기기를 조작할 때의 터치 정확도를 향상하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 예를 들어, 모바일 기기 사용 시 버튼의 위치 및 크기와 터치 정확도의 관계 연구[6], 가속도 센서를 활용해 스마트폰 키보드 타이핑 속도와 정확도를 올리기 위한 연구[7] 등이 수행되었다. 그러나 정지 상태에서의 스마트폰 터치가 아닌 이동 중 한 손 스마트폰 사용에서의 터치 정확도에 대한 연구는 크게 주목받지 못했다.

이동 중에 한 손으로 스마트폰을 사용하게 되면, 터치하려는 대상(예: 버튼)을 정확하게 터치하지 못하고 인접한 영역을 터치하게 되는 경우가 자주 발생할 수 있다. 이때, 사용자가 터치하려는 대상을 예측할 수 있다면, 사용자가 정확하게 해당 대상을 터치하지 못하더라도 터치가 예상되는 대상의 터치 허용 영역을 유연하게 확장하여 터치 정확도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 스마트폰에 내장된 가속도 센서를 활용해 사용자의 이동 중 터치 경향을 학습하고, 이를 기반으로 터치 대상을 예측하는 개인화 모델을 개발한다. 그리고 이 모델을 활용하여 터치 에러를 개선할 수 있는 터치 영역 확장 기법을 개발하고 실험을 통해 그 효과를 검증한다.

2. 관련 연구

대표적인 스마트폰 제조사인 삼성과 애플은 한 손으로 기기를 편하게 조작할 수 있는 한 손 모드 기능을 탑재하고 있다. 아이폰은 화면 상단 부분을 터치하기 쉽도록 화면을

아래로 옮길 수 있는 기능을 제공하며, 갤럭시 시리즈는 전체적인 화면을 축소하여 사용자가 한 손으로 쉽게 상호작용할 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 또한, 두 제조사의 스마트폰은 자판을 오른쪽 또는 왼쪽으로 쏠리게 하여 한 손으로 원활하게 타이핑할 수 있도록 하는 방식도 제공하고 있다. 이렇게 한 손으로 기기 조작을 쉽게 하도록 하는 기능들은 엄지로 쉽게 도달할 수 없는 영역을 터치할 수 있게 해주지만 전체적인 사용자 인터페이스를 변경시킨다는 한계가 존재한다. 예를 들어, 전체 화면 크기가 축소되면 사용자의 스크롤 활동이 많아지게 되므로, 한 손으로 스마트폰을 조작하다가 스마트폰을 떨어뜨릴 우려가 있다[5].

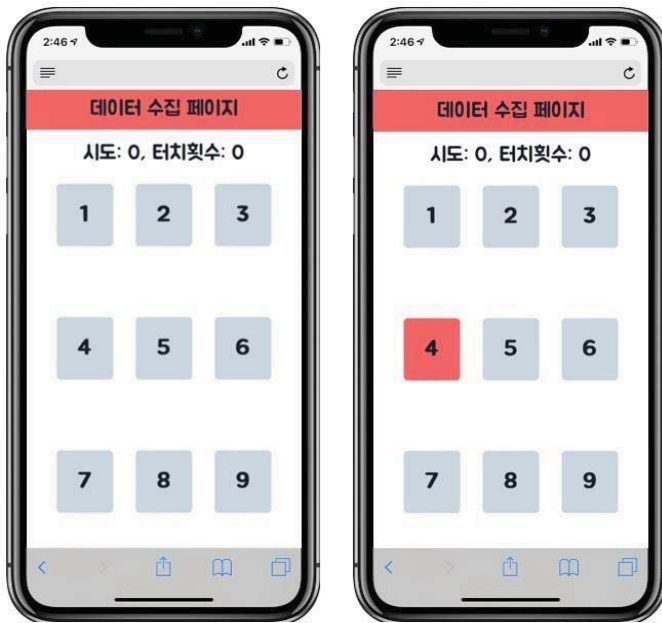


그림 1. 데이터 수집을 위한 웹 애플리케이션
(클릭해야 하는 버튼을 1 초 동안 빨간색으로 표시)

한 손으로 스마트폰을 사용할 때, 터치 정확도를 올리기 위한 다양한 연구도 수행되었다. Park and Han[6]은 한 손 엄지손가락으로 터치할 때 버튼 크기와 위치에 따른 정확도의 차이를 밝혔다. 그 결과로, HP iPAQ rz1717 기기에서 최적의 버튼 크기는 10mm 이고 중앙에 버튼을 배치할 때 정확도가 가장 높음을 밝혔다. Weir et al.[8]는 사용자의 터치 행동을 반영하여 정확도를 향상하려는 연구를 수행했다. 사용자별 터치 정확도를 향상하기 위해 사용자의 터치 위치를 학습시키는 기계 학습 접근 방식을 제시하였으며, 실험을 통해 최대 23.47%만큼의 터치 정확도가 상승했음을 보였다. 그러나 [8]는 이동 중인 상황은 고려하지 않았다는 점에서 한계가 존재한다.

이동 중 스마트폰을 사용할 때 터치 정확도를 올리기 위한 선행 연구도 존재한다. Goel et al.[7]은 이동하면서 스마트폰을 사용하는 사람들의 키보드 타이핑 정확도를 향상하기 위해 가속도 센서의 값으로 정확도를 보정하는 모델을 제시하였다. 그러나 양손을 사용할 때를 기준으로 연구가 수행되었다는 한계가 존재한다.

이에 본 논문에서는 사용자가 이동 중 한 손으로 조작할 때 발생하는 시계열 가속도 센서 데이터 패턴을 학습하고, 이를 기반으로 사용자가 이동 중에 터치하려는 대상을 예측하는 개인화 모델을 구축한다. 그리고 이 모델을 활용해서 이동 중 터치 정확도 향상을 위한 터치 영역 확장 기법을 개발한다.

3. 터치 영역 예측을 위한 학습 데이터 수집

본 절에서는 사용자가 터치하려는 버튼을 예측하기 위해 학습 데이터 수집을 목적으로 한 실험에 대해 설명하고, 그 실험 결과를 시각화하여 이동 중 터치 정확도 향상 모델에 대한 필요성을 확인한다.

3.1 데이터 수집을 위한 모바일 웹 애플리케이션 개발

사용자의 터치 영역 예측에 사용하기 위한 학습 데이터를 수집하기 위해, 사용자의 스마트폰 터치 좌표와 가속도 센서값을 수집할 수 있는 모바일 웹 애플리케이션을 개발했다 [그림 1]. 애플리케이션을 처음 실행하면 9 개의 회색 버튼이 3x3 형태로 배치되어 있다. 9 개의 버튼이 정상적으로 로드되고 나면 9 개의 버튼 중 무작위로 선정된 버튼 하나의 색깔이 1 초 동안 빨간색으로 바뀐다. 이때 사용자가 빨간색 버튼을 터치하면 해당 버튼의 번호, 터치된 좌표, 터치 직전 0.2 초 동안의 가속도 센서 시계열 데이터가 데이터베이스에 저장된다. 이제 다시 남은 버튼 중 하나가 무작위로 빨간색으로 변하게 되고, 데이터가 저장되는 과정이 반복된다. 9 개의 모든 버튼이 모두 한 번씩 선정되면 데이터 수집 세션이 종료된다.

3.2 실험 방법

스마트폰을 5 년 이상 사용한 20 대 오른손잡이 남성 3 명을 모집했다. 참가자는 오른손으로 스마트폰을 쥐고, 엄지손가락만 사용하여 앞서 설명한 모바일 웹 애플리케이션을 통해 무작위 버튼 터치 미션을 수행하도록 했다. 단, 버튼 터치 정확도에 영향을 끼칠 수 있는 스마트폰의 크기, 무게 등의 외적 요인을 제거하기 위해 모든 참여자는 미리 준비된 스마트폰(아이폰 12, 71.5X146.7X7.4mm)으로 해당 모바일 웹 애플리케이션을 사용했다.

실험은 1) 의자에 앉은 상황(정지 모드)과 2) 복도에서 걷고 있는 상황(걷기 모드) 두 가지 모드로 진행되었다. 참가자는 각 모드에서 모바일 웹 애플리케이션에 대해 50 회의 세션을 수행하였다. 따라서 각 참가자는 총 900 회의 터치 미션을 수행하였다(1 세션(9 번 터치) X 50 회 X 2 개 모드). 단, 빨간색 버튼을 제시 시간에 터치하지 못한 경우도 있으며, 반대로 한 번에 2 회 이상 연속으로 터치한 경우도 있기 때문에, 참가자별 실제 기록된 터치 횟수는 900 회 보다 조금 더 많았다. 실험에는 참가자마다 약 30 분의 시간이 소요되었다.

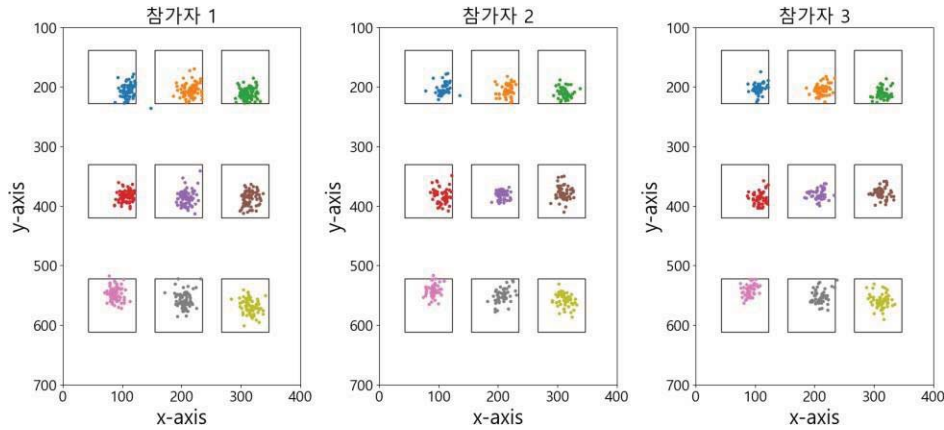


그림 2. 정지 모드 터치 좌표 분포

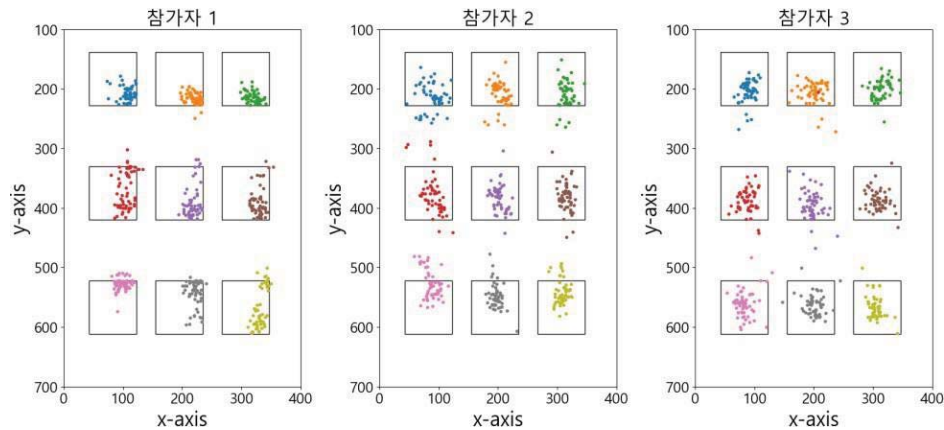


그림 3. 걷기 모드 터치 좌표 분포

표 1. 정지 모드 터치 에러 비율

	버튼1	버튼2	버튼3	버튼4	버튼5	버튼6	버튼7	버튼8	버튼9	Error
참가자 1	1/75	0/76	0/76	0/76	0/77	0/75	1/77	0/77	0/76	0.29%
참가자 2	1/48	0/47	0/51	0/51	0/50	0/51	1/49	0/50	0/51	0.45%
참가자 3	0/50	0/50	0/49	0/50	0/50	0/50	0/51	1/51	0/51	0.22%

표 2. 걷기 모드 터치 에러 비율

	버튼1	버튼2	버튼3	버튼4	버튼5	버튼6	버튼7	버튼8	버튼9	Error
참가자 1	0/53	2/57	0/55	5/56	3/55	2/55	8/57	2/56	6/56	5.60%
참가자 2	11/52	5/50	4/48	7/52	2/52	3/51	15/51	5/52	9/54	13.20%
참가자 3	4/56	3/53	1/51	2/55	3/55	2/53	2/56	3/54	1/53	4.32%

3.3 실험 결과

[그림 2]와 [그림 3]은 각각 참가자들이 앉아있는 상태(정지 모드)에서 실험을 진행했을 때의 좌표와 복도를 걷는 상태(걷기 모드)에서 실험을 진행했을 때의 터치 좌표 분포를 나타낸다. [표 1]은 정지 모드일 때, [표 2]는 걷기 모드일 때의 참가자별 버튼 터치 에러의 개수와 전체 에러 비율을 나타낸다. 정지 모드일 때는 터치 좌표의 분포가 균일하고 터치 에러의 비율도 매우 작지만, 걷기 모드일 때의 터치 좌표의 분포는 상대적으로 산발적이며 터치 에러의 비율도 더 높은 것을 확인할 수 있다.

4. 터치 에러 감소 기법 개발 및 유용성 검증

본 절에서는 실험에서 수집한 데이터를 기반으로 터치 버튼 예측 모델을 개발하고, 이를 활용해 터치 에러를 감소시킬 수 있는 방법에 대해 알아본다.

4.1 CNN 기반 터치 에러 감소 모델 및 기법 개발

본 논문의 목적은 이동 중 한 손 터치 정확도를 향상하는 모델을 개발하는 것이므로, 걷기 모드의 실험에서 수집된 버튼 번호, 터치 좌표, 버튼이 터치되기 직전부터 버튼이

터치될 때까지 0.2 초 동안의 시계열 가속도 센서 데이터를 사용해 개인화된 터치 버튼 예측 모델을 개발했다. 수집한 시계열 데이터 시간 간격이 매우 짧은 점을 고려하여 PyTorch로 1D-CNN 모델을 구성하였다. 합성곱 계층의 입력으로는 배치(batch) 크기가 8인 가속도 센서 세 축의 시계열 데이터를 사용하였다(채널 수 3, time step 15). 이때 합성곱 계층과 풀링 계층의 커널의 크기는 2로 두었으며, 합성곱 계층의 연산 결과로 출력되는 데이터의 크기는 $8 \times 128 \times 3$ 으로 설정했다(채널 수 128, time step 3). 각 출력층의 마지막 활성화 함수로 SoftMax를 사용하여 버튼별 터치 확률을 구하였다. 참가자마다 개인화된 모델의 정확도를 확인하기 위해 예측 확률이 가장 높은 버튼의 번호와 터치된 실제 버튼 번호의 일치 여부를 계산한 결과, 참가자 1, 2, 3에 대한 모델의 평균 정확도는 66.8%로 확인되었다.

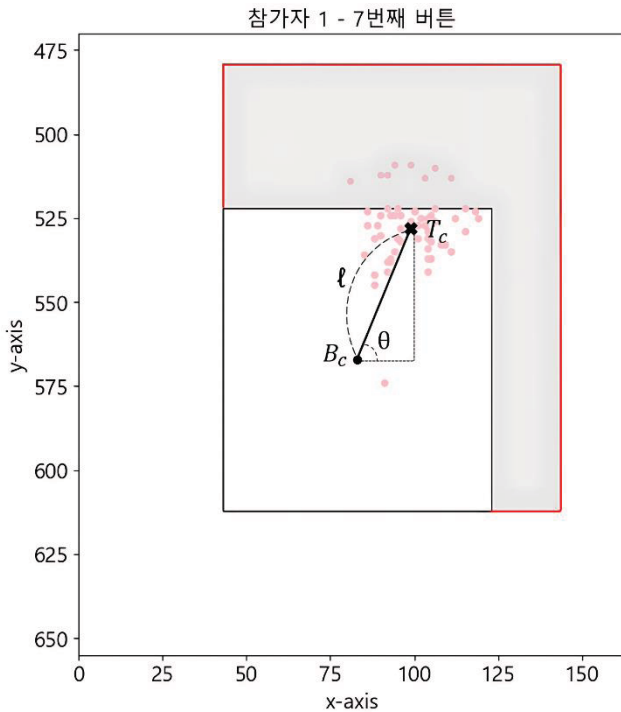


그림 4. 터치 에러 감소 기법

사용자마다 각 버튼에 대한 터치 경향이 모두 다르고, 한 손 엄지손가락으로 버튼을 터치할 때 필연적으로 기기를 기울이게 되므로 사용자가 기기를 기울이는 정도에 따라 각 버튼이 터치될 확률도 모두 다르다. 따라서 터치 에러를 줄이기 위해 터치 영역을 확장할 때 사용자의 터치 경향을 고려해야 한다.

본 연구에서 제안하는 터치 에러 감소 기법은 다음과 같다. 먼저 각 버튼의 중심점 B_c 와 실험 3에서 수집한 걸기 모드의 버튼별 터치 좌표의 중심점(centroid) T_c 를 찾고, 이들 사이의 거리 l 과 B_c 를 원점으로 두고 x 축, y 축을 설정하였을 때 B_c 와 T_c 가 이루는 각도 θ 를 계산한다. 그 후 B_c 와 T_c 의 가로 길이의 크기인 $l|\cos\theta|$ 와 세로 길이의 크기인 $l|\sin\theta|$ 를 구한다.

터치 허용 영역의 확장 방향을 결정하기 위해 B_c 를 기준으로 하여 버튼을 사사분면으로 나눈다(오른쪽 위, 왼쪽 위, 왼쪽 아래, 오른쪽 아래). T_c 는 사용자가 그 버튼을

터치하기 위해 시도한 좌표 분포의 중심이므로 T_c 가 위치한 사분면 방향으로 터치 허용 영역을 확장한다.

터치 허용 영역의 확장 크기를 결정하기 위해, 버튼별 터치 확률을 활용한다. 각 버튼의 터치 확률을 $l|\cos\theta|$ 와 $l|\sin\theta|$ 에 곱한 뒤, 그 값만큼 버튼의 기존 터치 허용 영역을 확장한다. 단, 터치 확률이 10% 이하인 버튼은 터치 허용 영역을 확장하지 않았다.

[그림 4]는 걸기 모드에서 참가자 1의 7번째 버튼에 대한 터치 좌표 분포와 그 중심점을 나타낸다. 터치 좌표의 중심점 T_c 가 1 사분면에 위치하므로, 버튼을 터치할 확률이 p 일 때 터치 영역의 가로 방향에 대해서는 오른쪽으로 $p l|\cos\theta|$ 만큼 기존 터치 영역에서 더 확장하고, 세로 방향에 대해서는 위쪽으로 $p l|\sin\theta|$ 만큼 더 확장하여 그 방향이 1 사분면이 되도록 한다.



그림 5. 추가 실험을 위한 웹 애플리케이션 화면

4.2. 터치 에러 감소 기법 평가

CNN 기반의 모델 및 터치 에러 감소 기법의 성능을 평가하기 위해 사용자가 터치하려는 버튼을 예측하고 해당 버튼의 터치 허용 영역(빨간색 영역)을 순간적으로 확장하는 모바일 웹 애플리케이션을 개발했다[그림 5].

[그림 5]의 왼쪽 사진은 학습된 해당 사용자의 터치 패턴에 기반하여 현재 스마트폰의 기울임 정도가 7번 버튼을 터치할 확률이 가장 높고, 8번 버튼을 터치할 확률이 두 번째로 높은 순간임을 보여준다. 그리고 기존의 학습된 7번 버튼 터치 좌표 분포에 따라, 해당 방향으로 7번 버튼의 터치 허용 영역이 가장 많이 확장되었다. 8번 버튼의 터치 허용 영역도 해당 버튼의 터치 확률에 비례하여 조금 확장되었다. [그림 5]의 오른쪽 사진은 해당 사용자가 1번 버튼을 터치할 확률이 가장 높은 상황임을 모델이 예측하고, 1번 버튼의 터치 영역을 순간적으로 확장한 상황이다.

해당 터치 에러 감소 기법의 효과를 확인하기 위해, 이전 실험에 참여했던 동일한 실험 참가자 1, 2, 3을 대상으로 이전의 실험과 동일한 방법으로 실험을 한 번 더 진행했다.

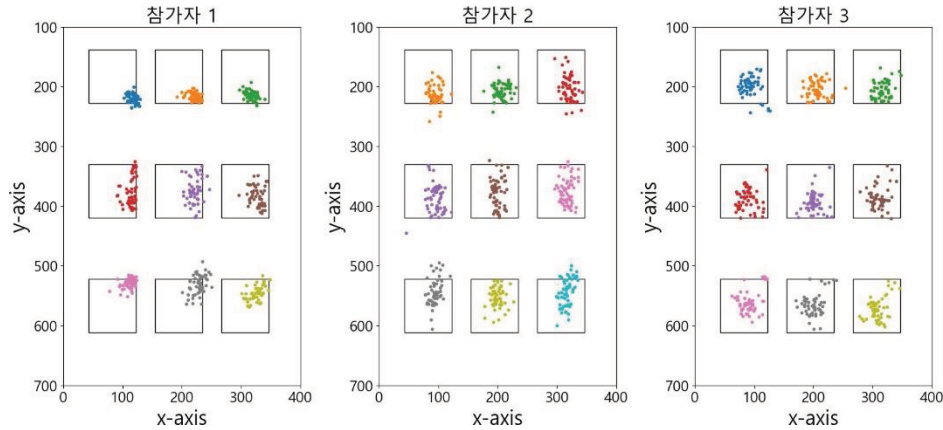


그림 6. 추가 실험 결과 터치 좌표 분포

표 3. 모델 적용을 하지 않았을 때의 터치 에러

	버튼1	버튼2	버튼3	버튼4	버튼5	버튼6	버튼7	버튼8	버튼9	Error
참가자 1	15/52	0/52	0/52	2/52	3/52	0/51	8/52	21/52	2/51	10.94%
참가자 2	3/52	1/53	3/53	1/55	1/56	1/58	9/54	0/53	13/56	6.04%
참가자 3	7/55	1/51	1/53	0/55	0/55	0/53	2/53	1/53	0/53	2.52%

표 4. 실제 터치 에러 비율

	버튼1	버튼2	버튼3	버튼4	버튼5	버튼6	버튼7	버튼8	버튼9	Error
참가자 1	4/52	0/52	0/52	1/52	1/52	0/51	3/52	2/52	2/51	2.79%
참가자 2	2/52	1/53	1/53	1/55	1/56	1/58	5/54	0/53	1/56	2.64%
참가자 3	1/55	1/51	0/53	0/55	0/55	0/53	0/53	1/53	0/53	0.63%

단, 정지 모드에서는 이미 터치 정확도가 매우 높음을 확인했으므로 이번에는 걷기 모드에서만 실험을 진행하였다. 그리고 사용자가 터치 영역이 확장된 것을 눈치채지 못하도록 [그림 5]에 보이는 확장된 터치 영역(빨간색 영역)은 보여주지 않았으며, 참가자에게도 터치 확장 영역에 대해 언급하지 않았다.

추가로 수행한 실험에서 참가자들의 버튼 터치 좌표 분포를 나타내면 [그림 6]과 같다. [그림 3]과 비슷한 패턴으로 터치 에러가 발생한 것을 확인할 수 있다. [표 3]은 터치 에러 감소 기법을 적용하지 않았을 때 고정된 버튼의 영역에 대한 터치 에러 개수 및 터치 에러의 비율을 나타내며 [표 4]는 터치 에러 감소 기법을 적용하여 터치 영역이 확장된 것을 감안한 터치 에러 개수 및 터치 에러의 비율을 나타낸다. 참가자 1, 2, 3에 대해서 각각 8.15%, 3.4%, 1.89%만큼 터치 에러가 감소하였으며(평균 4.48%), 맥니마 검정 결과 모든 참가자에게서 유의미하게 터치 에러가 줄어들었음을 확인했다($p < .05$). 이를 통해 본 연구에서 제안한 터치 에러 감소 기법이 이동 중 발생하는 터치 에러를 감소시키는 데 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 직접 개발한 버튼 터치 기록 모바일 웹 애플리케이션을 활용해서 정지 상태와 이동 중일 때의 터치 좌표를 수집/분석하여 이동 중에 터치 에러가 더 많이 발생한다는 것을 확인했다. 이 문제를 해결하기 위해, 이동

중에 한 손으로 스마트폰을 다룰 때 발생할 수 있는 터치 에러를 감소시키기 위한 기법을 개발했다. 스마트폰에 내장된 가속도 센서를 활용해 버튼별 터치 확률을 예측하는 1D-CNN 모델을 만들고, 이를 활용해 버튼별 터치 확률을 가중치로 둔 터치 영역 확장 기법을 개발했다. 해당 기법의 유용성을 검증하기 위한 실험을 진행한 결과, 이동 중 터치 에러가 평균 4.48% 감소했음을 보였고 통계적으로 유의미함을 검증하였다.

6. 향후 연구

본 논문은 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 첫째, 실험에 참여한 모든 사람에 대해 통계적으로 유의하게 터치 에러가 감소하였다는 것을 검증하였으나 그 피실험자의 수가 매우 작고, 에러 감소율이 낮아 그 결과가 객관적이라고 보기 힘들다. 둘째, 피실험자가 모두 20 대이고 남자인 점과 하나의 기기만으로 실험을 진행한 점을 고려하였을 때 본 연구의 결과를 일반화하기에 어려움이 있다.

향후 연구로 다양한 연령, 성별 및 기타 사용자 특징을 고려하여 참가자를 모집하고 다양한 모바일 기기로 실험을 진행하여 결과의 일반화 가능성을 높일 계획이다. 또한 스마트폰에 내장된 여러 센서를 결합하고 시계열 데이터를 처리할 수 있는 다른 모델에 대해 탐구하면 터치 에러 감소 모델을 개선할 수 있으며, 실제 이용 중에 발생하는 여러 상황(터치 손가락의 변경, 우천 중 상호작용 등)에 대응할 수 있는 기법에 대해 연구할 계획이다.

사사의 글

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2023년도 SW 중심대학사업의 결과로 수행되었음”(2023-0-00042)

참고 문헌

[1] 김동석. “2022 년 한국 성인 97% ‘스마트폰 사용한다’” 뉴스인, 2022

[2] Karlson, A. K., “Interface and Interaction Design for One-Handed Mobile Computing.” Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, 2007.

[3] Ng, A., Brewster, S. A., & Williamson, J. H. “Investigating the Effects of Encumbrance on One- and Two-Handed Interactions with Mobile Devices.” In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1981-1990, 2014

[4] Trudeau, M. B., Asakawa, D. S., Jindrich, D. L., & Dennerlein, J. T. “Two-Handed Grip on a Mobile Phone Affords Greater Thumb Motor Performance, Decreased Variability, and a More Extended Thumb Posture Than a One-Handed Grip.” Applied Ergonomics, 52, pp. 24-28, 2016

[5] Le, H. V., Bader, P., Kosch, T., & Henze, N. “Investigating Screen Shifting Techniques to Improve One-Handed Smartphone Usage.” In Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, pp. 1-10, 2016

[6] Park, Y. S., & Han, S. H. “Touch Key Design for One-Handed Thumb Interaction with a Mobile Phone: Effects of Touch Key Size and Touch Key Location.” International Journal of Industrial Ergonomics, 40(1), pp. 68-76, 2010

[7] Goel, M., Findlater, L., & Wobbrock, J. “Walktype: Using Accelerometer Data to Accomodate Situational Impairments in Mobile Touch Screen Text Entry.” In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2687-2696, 2012

[8] Weir, D., Rogers, S., Murray-Smith, R., & Löchtfeld, M. “A User-Specific Machine Learning Approach for Improving Touch Accuracy on Mobile Devices.” In Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 465-476, 2012