

웹캠 기반 실시간 캘리브레이션 추적 알고리즘 기법에 관한 연구

정민욱, 윤수연*

국민대학교, *국민대학교

alsdnr5000@gmail.com, *1104py@kookmin.ac.kr

A Study on a Webcam-Based Real-Time Calibration and Tracking Algorithm

Jung Min Uk, Yoon Soo Yeon*

Kookmin Univ., *Kookmin Univ.

요약

2025년 AI 디지털 교과서가 도입되었으나, 현장 적용 과정에서 낮은 채택률과 활용률, 그리고 디지털 기기 사용에 따른 학습 집중도 저하 문제가 동시에 제기되고 있다. 기존 연구에 따르면 디지털 학습 환경에서는 학습자의 주의 분산이 심화되며, 이는 디지털 교과서의 교육적 효과를 저해하는 주요 요인으로 작용한다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 시선 추적(Eye Tracking) 기술을 활용하여 학습자의 집중 상태를 객관적으로 측정하고, 디지털 교과서 환경에서 실시간 피드백이 가능한 저비용 시선 추적 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 일반 웹캠 기반으로 동작하며, 디스플레이 환경과 개인별 시선 편향을 고려한 2단계 캘리브레이션 알고리즘을 적용하였다. ETH-XGaze 데이터셋으로 사전 학습된 모델을 활용하여 다양한 머리 자세에서도 안정적인 시선 추적이 가능하도록 설계하였으며, 눈 깜빡임 검출과 칼만 필터를 적용하여 시선 좌표의 급격한 변화를 완화하였다. 또한 시선 이동 경로와 시선 체류 시간을 실시간으로 시각화하여 학습자의 주의 분포와 읽기 패턴을 직관적으로 분석할 수 있도록 하였다. 실험 결과, 제안된 시스템은 실제 디바이스 환경에서 안정적인 시선 이동 추적과 시선 고정 맵을 생성할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

디지털 교육 환경의 급속한 발전 속에서 2025년 AI 디지털 교과서가 도입되었으나, 현장의 준비 부족과 정책 추진 과정의 문제로 심각한 혼란을 겪고 있다. 당초 교육부는 2025년 3월부터 초등학교 3~4 학년과 중,고등학교 일부 학년을 대상으로 수학, 영어, 정보 교과에 AI 기반 디지털 교과서를 전면 도입할 계획이었으나, 실제 채택률은 전국 평균 32.4%에 그쳤고 [1], 최근 감사원의 조사 결과에 따르면, 막대한 예산 투입에도 불구하고 실제 교육 현장에서의 활용 빈도는 10% 미만으로 극히 저조한 실정이다 [2]. 이러한 저조한 도입률은 디지털 기기를 통한 학습 환경에서 학습자의 집중도 저하와 관련된 구조적 문제에서 기인한다. 스웨덴 카롤린스카 의과대학의 연구 결과, 디지털 기기를 활용한 학습 과정에서 학생들이 전체 수업시간의 최대 40%는 학습과 무관한 활동에 사용한다는 연구 결과가 보고되었다[3]. 이는 디지털 환경에서 학생들이 SNS, 게임, 동영상 등 다양한 유혹에 노출되어 학습에 집중하기 어렵다는 구조적 문제를 보여준다. 본 연구는 시선 추적(Eye tracking) 기술을 활용하여 학습자의 집중상태를 객관적으로 측정하고 실시간 피드백을 제공함으로써 디지털 교과서의 집중도 저하 문제를 기술적으로 해결하고자 한다. 시선 고정 횟수, 지속시간, 도약 패턴 등의 안구 운동 지표는 학습자의 집중도 및 인지적 노력과 직접적인 상관관계를 가지므로 [4][5] 이를 활용한 저비용 시선 추적 시스템 개발을 목표로 한다.

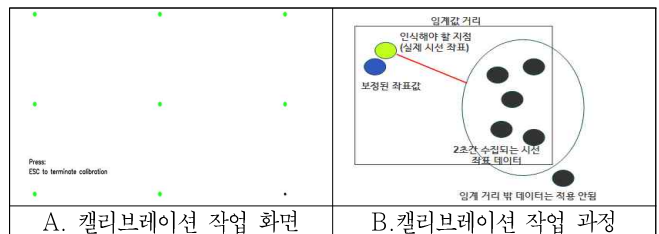
II. 본론

2.1 캘리브레이션 알고리즘 기법

시선 추적 시스템의 정확도는 개인별 안구 특성과 디스플레이 환경에 큰

영향을 받는다. 본 연구에서는 이러한 특성을 감안하여 다양한 디스플레이 환경에서도 적용 가능한 캘리브레이션 알고리즘을 제안한다. 적용된 캘리브레이션 알고리즘은 두 단계로 구성되며, 첫 단계에서는 디스플레이 매핑 단계로, 화면 네 모서리에 포인트를 배치하여 학습자로부터 포인트를 응시하도록 유도한다. 학습자가 바라보는 포인트 좌표값을 통하여 디스플레이의 대각선 길이를 계산하고, 가로세로 비율을 통해 학습자의 시선 범위와 디스플레이 환경의 물리적 크기를 매핑한다. 다음 단계는 시선 정밀 보정 단계로 화면 끝 네 모서리와 화면 중앙 총 5개의 기준점을 각 2초간 주시하여 개인별 시선 편향(Gaze Bias)을 보정한다. 이를 통해 수집된 시선 좌표값과 실제 캘리브레이션 포인트가 위치한 좌표값 간의 차이를 파악하여 개인별 매핑 함수를 생성한다. 이 과정에서 오차를 최소화하기 위하여 각 포인트 당 일정 거리의 임계값을 둔 뒤 시선 좌표 포인트가 임계값의 범위를 벗어나게 되면 이상치라고 판단하여 캘리브레이션 작업을 중단한다.

[표 1] 캘리브레이션 작업 과정



2.2 실시간 시선추적의 필요성

실시간 시선 추적 기술은 단순히 학생들의 집중 여부를 파악하는 것을 넘어, 디지털 교과서의 개선 및 지속적 업데이트를 제공 할 수 있다. 우선 학습자들의 시선 이동 경로와 시선이 머무는 위치 등을 통하여 학습 콘텐츠 레이아웃 배치 최적화가 가능하다. 시선이 자주 머무는 영역과 건너뛰는 영역 등을 분석하여 중요한 정보나 학생들이 몰입할 수 있는 부분을 파악하여 레이아웃을 배치 할 수 있다. 이는 디지털 교과서 도입률을 높이기 위한 방법으로 매우 중요한 요소가 될 것이며 실제로 문제와 그림을 시선 패턴에 맞게 배치만 하여도 문제 이해도가 23% 향상된다는 연구 결과도 있다[8]. 또한 개인화된 학습 지원이 가능하다. 시선 고정 시간(Dwell Time), 시선 역행(Regression) 빈도, 읽기 속도 등의 지표를 실시간으로 수집하여 학습자가 어려움을 겪는 구간을 자동 탐지할 수 있다. 시선이 특정 단어나 문장에서 반복적으로 멈추거나 역행하는 패턴은 이해 곤란을 의미하므로[6], 해당 부분에 대한 추가 설명이나 쉬운 표현으로의 대체를 즉시 제공할 수 있다. 이러한 부분을 통해 학습자별 맞춤형 피드백도 가능하게 된다.

III. 실험 설계

3.1 데이터셋 구성

본 연구에서는 ETH-XGaze[7] 데이터를 기반으로 학습이 이루어진 모델을 활용하였다. 이 데이터셋은 다양한 머리 자세와 시선 방향에서 수집된 110만개 이상의 고해상도 이미지로 구성되어 있기 때문에 극단적인 머리 자세에서도 안정적인 시선 추적이 가능하다.



[그림 3] ETH-XGaze Data Set

3.2 실시간 캘리브레이션 아키텍처

캘리브레이션 작업 이후 본격적으로 시선 추적 시스템이 작동하는데, 동공을 통한 시선 추적 방식은 눈 깜빡임 등 다양한 변수사항들이 시선 추적에 악영향을 주는 것이 판단됨으로 Dlib[8] 라이브러리를 활용하여 눈이 깜빡이는 순간을 검출하고, 눈 깜빡임 발생 시 칼만필터(Kalman Filter)[9]를 적용함으로써 이전 시선 좌표값과 현재 예측 좌표 간의 부드러운 전이(smooth transition)를 구현하여 시선 좌표값의 급격한 변화를 방지하였다. 이는 단순 이전 좌표 유지 방식에 비해 자연스러운 시선 궤적을 생성하며, 급격한 시선 점프 현상을 효과적으로 억제한다. 또한 2초 이상 지속되는 눈 감긴 상태를 파악하면 시선 추적을 일시적으로 중단함으로써 잘못된 데이터 수집을 방지하였다. 개발된 시스템은 시선의 이동 경로를 실시간으로 시각화 하는 기능을 제공하며, 해당 기능은 프로세스가 종료되는 시점에 matplotlib 라이브러리를 통해 제공된다. 시선 포인터가 이동한 시선 이동 궤적은 연속적인 선분으로 표현하여 이동 방향을 시각화 하였으며, 시선이 머무는 위치, 즉 시선 체류시간에 비례하여 포인터 크기를 동적으로 조절함으로써 주시 강도(fixation intensity)를 직관적으로 표현하였다. 이러한 시각화는 학습자의 읽기 패턴, 관심 영역, 시선 역행 빈도 등 주요 지표를 즉각적으로 파악할 수 있도록 지원한다.

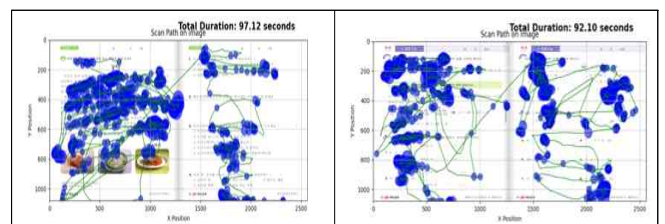
[표 2] 시선 패턴 연구 (출처 : 리더스아이 [10])

| 유창하게 읽은 시선 패턴 | 미숙하게 읽은 시선 패턴 |
|--|--|
| <p>어느 여름날, 부지런한 게미가 높고 있던 배방이에게 격정스러운 목소리로 말하였습니다.</p> <p>"배방이야, 하루 종일 놀기만 하면 어떡해? 그렇게 일도 안 하고 놀기만 하다가는 추운 겨울에 따뜻한 게 집을 속과 먹을 음식이 하나도 없을지도 몰라."</p> <p>그러나 그 말을 들은 배방이는 오히려 큰웃음을 치면서 게미에게 이렇게 말하였습니다.</p> <p>"흠, 난와 일에 상관하지 마. 너처럼 일만 하면 무슨 재미로 사니? 나는 매일매일 즐겁게 살 거야."</p> <p>시간이 흘러, 숲고 바람이 쉼 없는 겨울이 되었습니다. 배방이는 먹을거리 하나 없이 주위에 걸터서 눈으로 달인 슬픔을 해마다 증언하였습니다.</p> <p>"아이고, 너무너무 춥고 배고프네. 여름에 게미가 해준 말을 듣고 열심히 일해서, 먹을거리를 충분히 모아 두었다면 얼마나 좋았을까?"</p> | <p>어느 여름날, 부지런한 게미가 높고 있던 배방이에게 격정스러운 목소리로 말하였습니다.</p> <p>"배방이야, 하루 종일 놀기만 하면 어떡해? 그렇게 일도 안 하고 놀기만 하다가는 추운 겨울에 따뜻한 게 집을 속과 먹을 음식이 하나도 없을지도 몰라."</p> <p>그러나 그 말을 들은 배방이는 오히려 큰웃음을 치면서 게미에게 이렇게 말하였습니다.</p> <p>"흠, 난와 일에 상관하지 마. 너처럼 일만 하면 무슨 재미로 사니? 나는 매일매일 즐겁게 살 거야."</p> <p>시간이 흘러, 숲고 바람이 쉼 없는 겨울이 되었습니다. 배방이는 먹을거리 하나 없이 주위에 걸터서 눈으로 달인 슬픔을 해마다 증언하였습니다.</p> <p>"아이고, 너무너무 춥고 배고프네. 여름에 게미가 해준 말을 듣고 열심히 일해서, 먹을거리를 충분히 모아 두었다면 얼마나 좋았을까?"</p> |
| 유창한 읽기는 응시(파란 원)의 크기가 작고 간격이 넓으며 일정한 순서로 이어짐. | 미숙한 읽기는 응시의 크기가 크고 불규칙적이며, 간격이 좁고 이동이 산만하게 연결됨. |

IV. 실험 결과

개발된 시선 추적 시스템을 검증하기 위해 실제 디바이스 환경에서 시선 이동 경로를 시각화 하였다. 시스템은 실시간으로 학습자의 시선 좌표를 추적하여 matplotlib 라이브러리를 통해 다양한 형태로 시각화 하였다. 시선 이동 궤적을 연속적인 선분으로 표현하여 학습자가 화면의 어느 영역을 어떤 순서로 탐색하였는지 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다. 그리고 시선 체류 시간에 비례하여 포인터 크기를 동적으로 조정하여 시선 고정 맵을 생성하였다. 오래 응시한 영역일수록 큰 원으로 표시되며, 이를 통하여 학습자가 집중적으로 본 영역을 즉각적으로 파악할 수 있다. 시선 이동 경로와 시선 고정 맵을 파악하면 그림이나, 문제, 텍스트 영역에 다양하게 시선이 분포 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

[표 3] 시선 추적 결과물



V. 결론

본 논문에서는 일반 웹캠 기반의 실시간 시선 추적 시스템을 구현하고, 개인별 시선 편향과 디스플레이의 물리적 환경을 고려한 캘리브레이션 알고리즘을 통해 다양한 디바이스 환경에서도 안정적인 시선 이동 경로 분석이 가능함을 확인하였다. 이러한 분석 결과는 학습자의 실제 학습 행동에 기반하여 디지털 교과서 콘텐츠를 지속적으로 개편·업데이트할 수 있는 기술적 근거를 제공하며, 학습자 개개인에 최적화된 맞춤형 교육 콘텐츠 설계를 가능하게 한다. 또한 본 연구에서 제안한 시스템은 상용 시선 추적 솔루션 대비 저비용으로 구현 가능하다는 점에서 디지털 교과서의 현장 적용성과 대중적 보급 가능성을 높인다. 나아가 학습자 시선 데이터를 기반으로 한 개인화된 피드백 제공은 AI 시대에 부합하는 데이터 기반 교육 방법론으로 확장될 수 있다. 궁극적으로 본 연구는 시선 추적 기술을 활용한 디지털 교과서의 지속적 개선과 고도화를 통해 학생 개개인에게 최적화된 맞춤형 교육 서비스를 제공하고, 미래 교육 환경 발전에 기여할 수 있는 가능성을 제시한다.

ACKNOWLEDGMENT

Put sponsor acknowledgments.

참 고 문 헌

- [1] 백승아. (2025.3.19). "AI 디지털교과서 채택률 30% 미만... 고교 채택률 '최저'." 위키트리. <https://www.wikitree.co.kr/articles/1034627>
- [2] 감사원. (2025.12.17). "구독료 매년 1조 넘는데... AI 교과서 활용률은 8%뿐." 서울신문. <https://www.seoul.co.kr/news/society/education-news/2025/12/18/20251218009005>
- [3] 오효석. (2024.10.20.). "김문수 의원, 디지털기기로 학습시, 학습시간 40%는 판짓, 정답률은 30% 낮아." 경기IN뉴스. <https://gipress.com/417710>
- [4] Duchowski, A. T. (2017). Eye tracking methodology: Theory and practice (3rd ed.). Springer.
- [5] Lai, M. L., et al. (2013). "A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012." Educational Research Review, 10, 90-115.
- [6] Kraflka, K., et al. (2016). "Eye tracking for everyone." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2176-2184.
- [7] Zhang, X., et al. (2020). "ETH-XGaze: A large scale dataset for gaze estimation under extreme head pose and gaze variation." European Conference on Computer Vision, pp. 365-381.
- [8] King, D. E. (2009). "Dlib-ml: A machine learning toolkit." Journal of Machine Learning Research, 10, 1755-1758.
- [9] Kalman, R. E. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems." Journal of Basic Engineering, 82(1), 35-45.
- [10] 리더스아이, 시선 추적 시스템 기술 브로슈어 (v8).