

홀드 탐지 및 자세 분석 기반 클라이밍 문제 풀이 영상 검색 시스템

이상원⁰, 박상근

경희대학교 소프트웨어융합대학

l23520916@khu.ac.kr, sk.park@khu.ac.kr

Hold Detection and Pose Analysis-Based Climbing Problem Solution Video Retrieval System

Sangwon Lee⁰, Sangkeun Park

College of Software, Kyung Hee University

요약

본 연구에서는 사용자가 촬영한 클라이밍 문제 이미지와 유사한 실제 등반 해법 영상을 추천하는 시스템을 제안한다. 시스템은 인스타그램 기반으로 수집한 등반 영상에서 객체 탐지와 포즈 추정을 통해 홀드 및 관절 정보를 추출하고, 실제 사용된 홀드만을 식별하여 해법 데이터베이스를 구축한다. 이후 사용자가 업로드한 문제 이미지와 데이터베이스 내 영상의 홀드 색상 및 공간 분포를 비교하여 유사도를 계산하고, 가장 유사한 영상을 추천한다. 성능 평가 결과, Top-1 Accuracy 85.0%, Top-5 Accuracy 95.0%, MRR 0.88을 기록하여 높은 추천 성능을 확인하였다. 제안 시스템은 실제 클라이머의 등반 영상을 기반으로 현실적인 루트 파인딩 정보를 제공할 수 있다.

1. 서론*

실내 클라이밍은 인공 암벽에 설치된 홀드를 활용하여 목표 지점에 도달하는 스포츠로, 2020년 도쿄 올림픽 정식 종목 채택 이후 전 세계적인 인기를 얻고 있다. 2024년 기준 글로벌 클라이밍 체육관 시장 규모는 약 30억 달러에 달하며, 전 세계적으로 3,700개 이상의 전용 시설이 운영되는 등 가파른 성장세를 보이고 있다 [1, 2].

실내 클라이밍의 핵심은 출발점에서 도착 지점까지의 최적 경로를 찾는 '루트 파인딩(Route Finding)'이다. 이는 등반자의 신체 조건과 숙련도에 따라 다양한 해법이 존재한다. 따라서 등반자는 특정 문제 해결을 위해 타인의 등반 방식을 참고하거나 더욱 효율적인 전략을 탐색하고자 하는 강한 동기를 가진다.

클라이밍에서의 머신러닝을 활용한 루트 파인딩 연구가 다양하게 수행되었다. 홀드 좌표를 기반으로 다음 홀드를 예측하거나 [3], 주어진 홀드를 기반으로 인간에게 자연스러운

동작을 생성하는 연구 [4, 5, 6] 등이 있다. 또한 영상 내에서의 2D 포즈와 홀드 정보를 결합해서 등반 과정을 분석하기 위한 시도들도 있다 [7, 8]. 하지만 기존 연구들은 사람이 현실적으로 수행하기 어려운 풀이 방법을 제시하거나, 영상 분석 과정에서 사람의 손이나 발 등의 신체로 홀드가 가려지는 문제로 인해 분석의 정확도가 떨어질 수 있다는 한계를 지닌다.

본 연구에서는 사용자가 특정 클라이밍 문제를 촬영하여 입력하면 해당 문제와 유사한 문제를 다른 사람이 등반한 영상을 소셜미디어에서 찾아주는 클라이밍 풀이 영상 추천 시스템을 제안한다. 이를 통해 사용자는 이론적으로 생성된 경로가 아닌, 실제 클라이머가 수행한 검증 가능한 등반 해법 영상을 참고하여 루트 파인딩 정보를 획득할 수 있다.

2. 관련 연구

2.1 클라이밍 루트 파인딩 및 동작 생성 연구

스포츠 클라이밍에서 등반 전 경로를 설계하는 루트

* "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2026년도 SW중심대학사업의 결과로 수행되었음"(2023-0-00042)

파인딩은 불필요한 동작을 최소화하고 운동 역학적 효율성을 높이는 데 핵심적인 역할을 수행한다 [9]. 이를 자동화하기 위한 머신러닝 기반 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 예를 들어, 홀드의 좌표값이 주어졌을 때 다음에 잡아야 할 홀드를 예측하는 연구가 있었으며 [3, 10], 주어진 홀드들을 기반으로 인간에게 자연스러운 동작을 생성하는 방법을 탐구한 연구들도 수행되었다 [4, 5, 6].

그러나 기존 연구의 루트 예측 모델들은 주로 관절의 위치와 홀드 간의 기하학적 거리 조건을 만족할 경우 이를 유효한 동작으로 간주했다. 이는 실제 등반 환경에서의 벽면 경사도나 홀드의 형상에 따른 파지력의 차이 등 물리적 제약 요소를 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다.

2.2 영상 분석 기반 등반 포즈 추정 및 홀드 감지

등반 과정에서의 자세를 분석하고 사용한 홀드를 식별하기 위한 영상 기반 연구들도 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, 2D 포즈(Pose) 추정과 홀드 위치 정보를 결합하여 영상 내에서 사용된 홀드의 위치, 순서 및 시간 정보를 식별한 연구 [7], 스마트폰으로 촬영된 영상에 객체 탐지 모델인 YOLOv4와 자세 추정 모델인 OpenPose¹를 적용하여 등반가의 포즈와 홀드 사용 상태를 분석한 연구 등이 있다 [8].

하지만 이러한 영상 기반 분석 방식은 등반자의 신체나 움직임에 의해 홀드가 가려지는 자기 폐쇄(Self-occlusion) 문제에 취약하다는 결점이 있다. 특정 프레임에서 발생하는 정보 유실은 홀드 탐지 및 사용 여부 판별의 정확도를 저해하며, 결과적으로 전체 시스템의 분석 성능과 검색 정밀도에 부정적인 영향을 미친다.

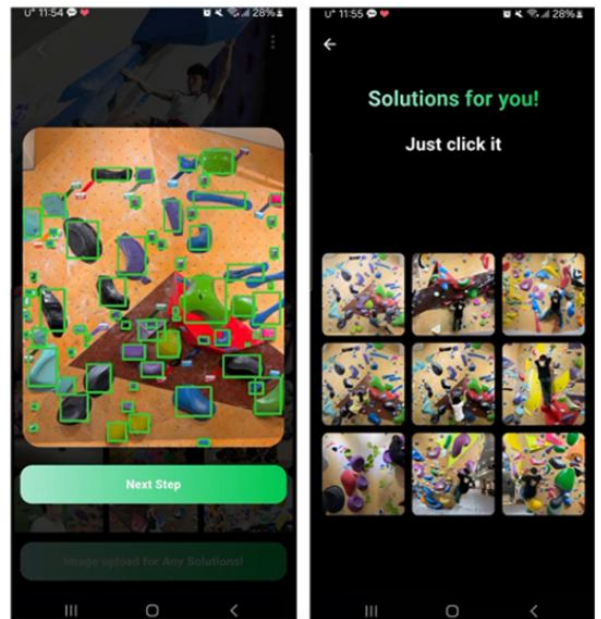
3. 시스템 구현

3.1 등반 해법 영상 데이터베이스 구축

Selenium²을 활용하여 인스타그램의 클라이밍장 계정에 공개로 업로드된 등반 인증 게시물의 영상을 다운로드하였다. 이렇게 확보된 영상 데이터로 해법 데이터베이스를 구축했다. 수집된 해법 영상에서 클라이밍 홀드와 등반자의 관절 정보를 추출하기 위해 객체 탐지 및 포즈 추정 모델을 결합하여 활용하였다. YOLO³ 기반 홀드 탐지 모델을 사용하여 각 프레임에서 클라이밍 홀드의 위치를 바운딩 박스 형태로 검출하였다. 이때 폐쇄(Self-occlusion)로 인해 특정 프레임에서 일부 홀드가 등반자의 신체에 가려지는 문제를 완화하기 위해 하나의 영상에서 5개의 멀티 프레임을 활용하였다. 서로 다른 시점의 프레임을 함께 활용함으로써 단일 프레임에서는 사람의 신체로 인해 가려져서 탐지되지

않는 홀드까지 보완적으로 검출할 수 있으며, 이를 통해 영상 전체에 등장하는 홀드를 보다 완전하게 탐지하였다.

이후 MediaPipe Pose⁴ 모델을 활용하여 등반자의 손목과 발목 좌표를 추출하였다. 마지막으로 영상의 각 프레임에서 추출된 클라이머의 손·발 관절 좌표와 홀드의 위치 정보를 비교하여, 관절 좌표가 홀드 영역과 겹치는지를 분석하였다. 이러한 접촉 정보를 기반으로 영상마다 등반에 사용된 홀드(영상 내 등반자의 손목과 발목이 거쳐간 홀드) 목록을 구성하였다. 이를 통해 영상에 존재하는 다수의 홀드 중 실제 문제 풀이 과정에서 활용된 홀드만을 추출했다.



(a) 문제 입력 화면 (b) 해법 영상 제공 화면
그림 1. 시스템 화면

3.2 해법 영상 추출 알고리즘

해법 영상 추출 알고리즘은 사용자의 입력 이미지를 기반으로 데이터베이스 내 최적의 영상을 탐색하기 위해 색상 필터링과 공간 유사도 계산의 2단계 파이프라인으로 구성된다. 먼저, 사용자가 클라이밍 벽면 이미지를 업로드하면 시스템은 YOLO 모델을 통해 홀드를 바운딩 박스 형태로 자동 탐지한다 [그림 1(a)]. 사용자는 탐지된 결과 중 본인이 등반하고자 하는 특정 색상의 홀드만을 선택하여 검색 쿼리를 생성한다. 1차적으로 시스템은 구축된 해법 영상 데이터베이스 내에서 사용자가 선택한 색상과 일치하는 홀드를 포함한 영상만을 필터링함으로써 검색 대상 후보군을 축소한다.

2차 단계에서는 필터링된 후보 영상들을 대상으로 공간적 유사도를 계산한다 [그림 2]. 본 연구에서는 각 홀드 집단의 평균 중심 좌표를 추출하고, 이를 기반으로 쿼리 이미지와

¹ <https://github.com/cmu-perceptual-computing-lab/openpose>

² <https://selenium-python.readthedocs.io>

³ <https://docs.ultralytics.com/ko/>

⁴ <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe>

해법 영상 간의 유클리드 거리를 산출한다. 평균 중심 좌표 간의 거리가 가까울수록 두 홀드 배치의 공간적 분포가 유사한 것으로 판단한다. 예를 들어, [그림 2]에서 사용자의 퀴리 (a)와 해법 영상 (b)는 중심 좌표 간 거리가 최소화되어 가장 높은 유사도를 나타낸다. 최종적으로 시스템은 산출된 유사도 점수를 바탕으로 상위 9개의 영상을 추출하여 사용자에게 추천 결과로 제공한다 [그림 1(b)].

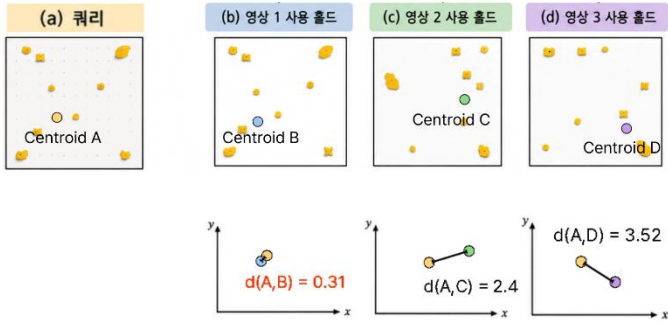


그림 2. 중심 좌표 기반 유사도 계산

4. 해법 영상 추천 정확도 평가

Metric	Value
Top-1 Accuracy (%)	85.00
Top-5 Accuracy (%)	95.00
Mean Reciprocal Rank (MRR)	0.88

표 1. 평가 결과

본 연구에서 제안하는 유사도 기반 추천 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 실제 클라이밍 문제와 해법 영상 간의 매칭 실험을 설계하였다. 실험을 위해 총 20개의 서로 다른 등반 문제 사진을 퀴리 이미지로 선정하였다. 각 문제에 대응하는 실제 해법 영상은 인스타그램에서 문제당 5개씩, 총 100개를 수집하여 데이터베이스를 구축하였다. 또한 시스템의 변별력을 검증하기 위해, 테스트 문제와 관련이 없는 무작위 등반 영상 50개를 노이즈 데이터로 추가하였다. 결과적으로 총 150개의 후보 영상으로 구성된 검색 풀(pool) 내에서 주어진 퀴리에 대한 최적의 영상을 탐색하도록 실험을 구성하였다.

성능 검증을 위해 [표 1]과 같이 Top-1 Accuracy, Top-5 Accuracy, MRR의 세 가지 지표를 사용하였다. Top-1 Accuracy는 추천 결과 1위 영상이 실제 정답과 일치하는 비율, Top-5 Accuracy는 상위 5개 후보 내 정답 포함 비율을 의미하며, MRR은 정답 영상이 검색 결과에서 얼마나 상위에 위치하는지를 평가하는 순위 기반 지표이다. 실험 결과, Top-1 Accuracy 85%, Top-5 Accuracy 95%, MRR 0.88을 기록하여 정답 영상을 높은 정확도로 탐색할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 클라이밍 문제 이미지와 유사한 실제 등반 해법 영상을 추천하는 시스템을 제안하였다. 객체 탐지와 포즈 추정을 활용하여 영상 내 사용 홀드를 추출하고, 홀드의 색상 및 공간 분포 기반 유사도 계산을 통해 문제와 유사한 영상을 추천하였다. 실험 결과 높은 추천 정확도를 확인하였으며, 사용자가 실제 등반 사례를 참고하여 루트 파인딩 전략을 수립할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Market Reports World. "Rock Climbing Gym Market Report". Market Reports World, 2024.
- [2] Global Market Insights. "Climbing Gym Market Analysis". Global Market Insights, 2024.
- [3] Seunghyun Noh and Seongah Chin. "Development of a Lead Climbing Route-Finding Simulation Using Inverse Kinematics and Reinforcement Learning". KoreaScience, 2024.
- [4] Kourosh et al. "A Reinforcement Learning Approach To Synthesizing Climbing Movements". IEEE, 2019.
- [5] Kyungwon Kang and Taesoo Kwan. "A Reinforcement Learning Approach To Synthesizing Climbing Movements". Journal of Korea Computer Graphics Society.
- [6] Kevin et al. "ClimBEiT: Vision Transformer-Based Limb Movement Prediction for Automated Rock Climbing Guidance for People with Visual Impairments". IEEE, 2025.
- [7] Anna Maschek and David C. Schedl. "The Way Up: A Dataset for Hold Usage Detection in Climbing". CVPR Workshops, 2025.
- [8] Sarah et al. "Computer Vision Based Indoor Rock Climbing Analysis". University of California San Diego (UCSD), 2022.
- [9] Ludovic Seifert et al. "Role of route previewing strategies on climbing fluency and exploratory movements". PLOS ONE, 2017.
- [10] Kourosh et al. "Discovering and synthesizing humanoid climbing movements". ACM Digital Library, 2017.