

Convex Hull-Based Pattern Analysis for Evaluating Dynamic Stability of Ballistic Movements Using a Single Video: Focusing on the One-Arm Kettlebell Swing

Jun-Hyeok Yun*, Il-Ju Ko**, Dong-Hyun Nam***

*Graduate Student, Dept. of Media, Soongsil University, Seoul, Korea

**Professor, Global School of Media, Soongsil University, Seoul, Korea

***Graduate Student, Dept. of Metaverse and Cultural Contents, Soongsil University, Seoul, Korea

[Abstract]

This study proposed and validated a cycle-specific pattern analysis method of Convex Hull centroid trajectories to diagnose the dynamic stability of the one-arm kettlebell swing using only a single video. Joint estimation errors occurring in uncontrolled recording environments were buffered through preprocessing and normalization steps such as outlier removal and smoothing, after which the trajectories of the full body, upper body, and lower body were constructed on a per-cycle basis. Stability was defined as the inter-cycle reproducibility of the patterns, and suitability was evaluated against the expert reference distribution. As a result of analyzing 12 expert videos with 96 valid cycles and 24 layperson videos with 161 valid cycles, the lower body across all layperson cycles was judged as unsuitable. This confirmed that the reproducibility of pelvic propulsion is a key indicator for distinguishing proficiency. The full body showed a suitability rate of 8.1 percent, while the upper body showed 23.6 percent. Consequently, by clearly distinguishing between fixed and unstable pattern states through internal reproducibility analysis, this study provides a practical basis for on-site sports coaching.

▶ **Key words:** One-Arm Kettlebell Swing, Convex Hull, Dynamic Stability, Pose Estimation, Cycle Reproducibility, Pattern Analysis

[요 약]

본 논문은 단일 영상만으로 원핸드 케틀벨 스윙의 동적 안정성을 진단하기 위해 컨벡스 헐 중심점 궤적의 주기별 패턴 분석법을 제안하고 검증하였다. 비통제 촬영 환경에서 발생하는 관절점 추정 오류를 이상치 제거와 스무딩 등의 전처리 및 정규화 과정으로 완충한 뒤 전신, 상체, 하체의 궤적을 주기 단위로 구성하였다. 안정성은 패턴의 주기 간 재현성으로 정의하고 숙련자 분포를 기준으로 적합성을 판정하였다. 숙련자 영상 12개의 유효 96주기와 일반인 영상 24개의 유효 161주기를 분석한 결과, 일반인 하체는 전원 부적합 판정되어 골반 추진 재현성이 숙련도 구分的 핵심 지표로 확인되었으며 상체는 23.6%, 전신은 8.1%의 적합률을 보였다. 결과적으로 자체 재현성 분석을 통해 패턴이 고착된 상태와 불안정한 상태를 명확히 구분함으로써 실제 스포츠 현장 지도에 실용적 근거를 제공한다.

▶ **주제어:** 원핸드 케틀벨 스윙, 컨벡스 헐, 동적 안정성, 포즈 추정, 주기 재현성, 패턴 분석

- First Author: Jun-Hyeok Yun, Corresponding Author: Il-Ju Ko
- *Jun-Hyeok Yun (sceneyun@naver.com), Dept. of Media, Soongsil University
- **Il-Ju Ko (andy@ssu.ac.kr), Global School of Media, Soongsil University
- ***Dong-Hyun Nam (dhnamsu@gmail.com), Dept. of Metaverse and Cultural Contents, Soongsil University
- Received: 2026. 03. 27, Revised: 2026. 04. 17, Accepted: 2026. 04. 20.

I. Introduction

원핸드 케틀벨 스윙은 생활 체육 현장에서 널리 수행되는 동작으로, 골반 기반의 하체 추진으로 케틀벨을 가속해 들어 올리는 대표적인 탄도성 운동이며 추진과 감속, 전환이 짧은 시간 내 연속적으로 나타난다. 생활 체육 현장에서는 단순히 따라 하는 수준을 넘어, 반복 수행 과정에서 안정적으로 구현되는지를 기준으로 제대로 학습되고 있는지 확인할 필요가 있다. 이에 본 논문은 생활 체육 현장에서 촬영된 단일 영상만으로 원핸드 케틀벨 스윙의 동적 안정성을 진단하기 위해 컨벡스 헐(Convex Hull) 기반 패턴 분석을 제안한다. 또한 숙련자 수행 패턴을 참조 기준으로 설정하여 일반인의 수행과 비교 및 적합·비적합 판정이 가능하도록 구성한다.

기존 연구들은 탄도성 동적 운동의 안정성 특징을 정량적으로 확인하기 위해 모션캡처, 근전도, 관성 센서와 같은 전문 계측을 활용해 왔다. 이러한 접근은 전문 스포츠 환경에서 동작을 세밀하게 분해하고 정량화할 수 있다는 장점이 있으나, 장비 구축과 운용 절차, 데이터 처리와 해석에 대한 전문성이 전제되므로 생활 체육 현장에 적용하는 데 한계가 있다. 현실적인 대안으로 일반적인 카메라로 촬영한 영상을 활용할 수 있지만, 생활 체육 환경의 동작 영상에서는 빠른 동작 전환에 따른 가림(Occlusion) 현상, 다수 인원의 등장, 조명 변화 등으로 관절점 소실과 오검출이 빈번하여 전문 환경의 정밀 분석을 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 이러한 좌표 불확실성 조건에서도 스윙의 동적 안정성이 시간적 흐름 속에서 어떻게 나타나는지를 확인할 수 있는 진단 지표가 필요하다.

이에 본 논문은 일반 촬영 영상의 불확실성에도 강건한 안정성 패턴 표현을 제시하기 위해, 컨벡스 헐 기반의 기하학적 요약 지표를 구성한다. 이를 위해 단일 촬영 영상에서 추정되는 스켈레톤 관절점을 기반으로 컨벡스 헐을 구성하고, 그 중심점 궤적을 주기 단위로 분할하여 주기 간 재현성을 동적 안정성의 판정 기준으로 정의한다. 제시한 안정성 판정 지표는 전신뿐 아니라 상체와 하체로 구분한 컨벡스 헐에서도 산출하여 상·하체 간 상대적 변화 양상과 연계 관계를 함께 관찰할 수 있도록 한다. 이를 통해 숙련자 수행 데이터에서 관찰되는 주기별 패턴 분포를 참조 기준으로 구축한 뒤, 대상 수행의 패턴이 그 분포 내에 포함되는지를 기준으로 적합·비적합을 판정한다.

본 논문은 생활 체육 영역에서 속도가 빠른 탄도성 운동의 안정성 판단 기준을 영상 기반으로 제시한다는 점에 의미가 있다. 제시한 판단 기준의 유효성을 검증하기 위해

숙련자와 일반인 데이터를 비교하고, 제안한 패턴이 생활 체육 환경에서도 안정성 판정에 유효함을 확인한다.

본 논문의 주요 기여점은 다음과 같다.

- 전문 계측 장비와 전문가 해석에 의존하던 탄도성 반복 운동의 동적 안정성 진단을, 생활 체육 현장에서 단일 촬영 영상만으로 수행할 수 있는 현장 접근성 확보
- 비통제 촬영 환경의 단일 영상이라는 제약 조건에서, 관절점 추정 오류를 완충하기 위한 전처리 설계와 컨벡스 헐의 기하학적 강건성을 결합하여, 좌표 불확실성이 존재하더라도 주기 간 재현성 기반 판정이 유효하게 작동할 수 있는 영상-데이터 처리 방법론 제시
- 이 방법론을 운동 수행 평가의 도구로 활용하여, 숙련자와 일반인의 동적 안정성 차이를 전신·상체·하체 분절별로 정량적으로 확인하고, 하체 추진이 핵심인 케틀벨 스윙에서 재현성이 부족한 부위를 특정할 수 있는 운동학적 해석의 가능성 제시

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 원핸드 케틀벨 스윙의 동작 특성과 평가 맥락을 정리하고, 단일 영상 기반 포즈 추정의 특성과 컨벡스 헐 패턴 접근의 근거를 제시한다. 3장에서는 전처리와 스켈레톤 개선으로 입력 불확실성을 완충한 뒤, 컨벡스 헐 기반 중심점 궤적 패턴을 주기 단위로 구성하고, 숙련자 패턴 분포를 참조 기준으로 설정하여 적합·비적합을 판정하는 절차를 제시한다. 4장에서는 생활 체육 환경에서 수집한 데이터로 제안 기준의 유효성을 검증하고 결과를 해석한다. 5장에서는 연구의 의의와 현장 적용 시사점 및 향후 과제를 논의한다.

II. Related Works

1. One-Arm Kettlebell Swing and Dynamic Stability

탄도성 운동이란 수행자가 외부 물체에 초기 가속을 부여한 뒤, 이후 물체의 궤적이 주로 관성과 중력에 의해 결정되는 운동을 말한다. 케틀벨 스윙은 이러한 탄도성 운동의 대표적인 사례로, 골반 신전(Extension)으로 생성된 힘이 케틀벨을 진자 궤도로 가속시키고 이후 상승과 하강은 관성과 중력에 따라 진행된다. 이때 추진-상승-전환-하강-후방스윙이 하나의 주기를 이루고 동일한 주기가 연속 반복되면서, 매 주기마다 가속과 감속, 방향 전환이 짧은 시간 내에 교대하는 탄도성 반복 운동의 특성을 보인다. 케틀벨 스윙은 케틀벨 스포츠에 그 근원을 두고 있으며, 10분간 최대 반복 수를 기록하는 경기 구조에서 매 주기마다 힘의 효율을 극대화하고 추진과 감속의 전환을 정교하게

제어하며 일정한 리듬을 유지해야 하므로, 반복 재현성과 리듬 유지가 동작의 태생적 특성으로 내재되어 있다.

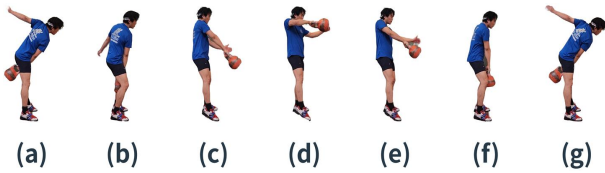


Fig. 1. Representative postures by phase within one cycle of the one-arm kettlebell swing.

Fig. 1은 원핸드 케틀벨 스윙 한 주기 내 구간별 동작 자세를 시간순으로 나열한 그림이다. Fig. 1의 (a)는 골반이 폭발적으로 신전 되어 케틀벨이 전방으로 가속되는 추진 직후 자세이며, (b)는 추진이 진행되며 하체에서 생성된 힘이 코어를 거쳐 팔로 전달되는 가속 구간 자세이다. 이때 팔은 연결 역할만 한다. (c)는 전달된 관성으로 케틀벨이 전방에서 상방으로 상승하는 스윙 구간으로, 몸통은 척추 중립을 유지한 채 코어 근육의 동시 수축으로 요추 안정성을 확보한다. (d)는 케틀벨이 최고점에 도달하고 속도가 감소하며 방향이 전환되는 종말 스윙 구간이다. (e)는 중력에 의해 케틀벨이 하강하는 복귀 구간의 자세이고, (f)는 하강이 진행되어 케틀벨이 다시 다리 사이로 접근하는 하단 전환 직전의 자세이다. (g)는 골반을 후방으로 밀며 케틀벨이 다리 사이 후방까지 이동하여 다음 추진 직전으로 되돌아온 사전 스윙 구간의 자세로, 이후 다시 (a) 추진으로 연결되면서 동일 주기가 반복된다[1].

전문 스포츠 역학 분야에서는 정밀 계측을 통해 이러한 주기의 역학적 구조가 세분화되어 있다. 근전도와 측면(시상면, Sagittal Plane) 운동학 분석을 통해 이러한 주기는 사전 스윙, 가속, 스윙, 종말 스윙, 복귀의 다섯 구간으로 정의된 바 있으며, 정밀 모션 캡처와 근전도를 활용한 연구에서 각 구간의 관절 가동 범위와 근활성 순서 등 역학적 기준이 확인되었다[1][2]. 가속 구간에서는 골반 신전이 주도적으로 케틀벨을 가속해야 하고 복귀 구간에서는 골반 굴곡(Flexion) 타이밍이 적절해야 한다. 가속 구간에서 무릎 굴곡이 과도하면 스쿼트 형태가 나타나고, 골반보다 팔이 먼저 개입하면 상체로 케틀벨을 드는 형태가 나타난다. 상승 구간에서는 상체 회전 없이 팔로 당기면 어깨와 팔꿈치 부하가 증가하며, 복귀 구간에서 골반 굴곡이 늦으면 상체가 과도하게 숙여지며 요추가 굴곡될 수 있다.

반복 동작에서 주기 간 수행 패턴 일관성은 운동 학습과 수행 능력을 평가하는 핵심 지표이며[3][4], 숙련자는 주기마다 유사한 관절 궤적을 재현하는 반면 일반인은 주기 간

변동이 크다[3]. 초보자의 케틀벨 스윙 학습 과정을 운동학적으로 분석한 연구에서, 초기에 수행 일관성이 향상되고 이후 운동학적 패턴 자체가 조정되는 학습 경로가 보고되었다[5]. 이러한 주기 간 재현성은 원핸드 케틀벨 스윙처럼 빠른 구간 전환과 고중량을 동반하는 탄도성 운동에서 안정적 수행 능력을 반영하는 핵심 요소지만, 빠른 동작 특성상 육안으로 주기 간 차이를 식별하기 어려워 현장에서는 정량적 기준 없이 주관적 판단에 의존하는 실정이다.

생체역학에서 안정성은 외부 작용에 대한 역학적 복원력(Mechanical Stability), 지지 기저면 대비 무게중심 위치 관계에 기반한 자세 안정성(Postural Stability), 반복 수행 시 운동학적 패턴의 일관성으로 평가되는 수행 안정성(Performance Consistency) 등 여러 관점에서 정의된다. 이 중 역학적 안정성과 자세 안정성은 모션 캡처, 힘판 등 전문 계측 장비를 전제로 하여, 단일 영상을 입력으로 하는 본 논문의 조건에서는 산출이 불가능하다. 반면 단일 영상에서 관찰 가능한 것은 반복 수행 시 동일한 형태가 재현되는지의 여부이며, 운동 학습 분야에서 숙련자는 수행 핵심 변수의 변동성을 줄이는 반면 비숙련자는 주기 간 변동이 크다는 것이 보고되어 왔다[3][4].

이에 본 논문은 원핸드 케틀벨 스윙의 동적 안정성을 수행 안정성의 관점에서 반복 수행 시 주기 간 패턴 재현성으로 정의하고, 생활 체육 현장에서 주관적 피드백을 보완할 수 있는 정량적 진단 기준을 제시하고자 한다.

2. Vision-Based Pose Estimation Techniques

동적 운동의 역학적 특징을 정량적으로 분석하기 위해서는 수행자의 관절 위치를 시간에 따라 추적하는 것이 기본 전제가 된다. 전문 스포츠 역학 분야에서는 마커 기반의 3차원 모션 캡처, 힘판, 근전도와 같은 정밀 계측 장비 또는 다수의 동기화 카메라를 활용한 마커리스 모션 캡처 시스템을 통해 관절 운동학과 부하 특징을 해석해 왔다. 그러나 이러한 접근은 고가의 장비 구축과 복잡한 보정 절차, 엄격한 실험 환경 통제가 전제되므로 생활 체육 현장에 적용하기에는 진입 장벽이 존재한다.

이보다 접근성이 높은 방법으로 단일 카메라 영상에서 2차원 관절 좌표를 추정하는 기술이 있다. 오픈포즈(OpenPose)는 PAFs(Part Affinity Fields)를 활용하여 영상 내 다수 인원의 2차원 관절 좌표를 실시간으로 추정하며, 인원 수에 관계없이 일정한 처리 속도를 유지한다[6]. 오픈포즈의 바디-25(Body-25) 모델은 머리부터 발끝까지 25개 키포인트를 추출하며, 골반 중심점을 포함하여 상·하체를 골반 기준으로 분리할 수 있는 구조를 제공한다. 관

런 연구에서 다중 시점 오픈포즈 스켈레톤으로부터 3차원 좌표를 재구성한 결과, 하체 관절에 대해 6.6~21.3mm 수준의 표준편차가 보고되어[7] 2차원 키포인트가 3차원 포즈 추정과도 높은 상관성을 가짐이 확인되었다.

다만 단일 카메라로 촬영된 영상에서 추출된 관절 좌표에는 모션 블러, 가림(Occlusion) 현상, 조명 변화 등에 의한 관측 불확실성이 수반되므로, 일반적으로 이상치 제거, 보간, 스무딩, 정규화 등의 전처리 과정을 거쳐 입력을 안정화한다. 관련 연구에서는 신체 분절 길이의 물리적 항상성을 활용하여 비정상적 프레임은 탐지하고 보간하는 전처리 파이프라인이 제시된 바 있다[10]. 그러나 이러한 전처리를 거치더라도 역학적으로 가장 중요한 시점의 원본 시각 정보가 소실되었다면, 전문 역학 분석 방식은 관절 좌표의 시간 미분에 의존하므로 미세한 좌표 오차조차 기하급수적으로 증폭되어 전혀 다른 결과로 이어질 수 있다. 최근에는 스마트폰 영상만으로 3차원 운동학을 추정하는 연구[8]나, 단일 카메라 마커리스 방식으로 운동 수행을 정량화하는 연구[9]도 보고되어, 영상 기반 동작 분석의 접근성이 확대되고 있다.

이러한 한계는 생활 스포츠 영상 조건에서 개별 관절의 순간적 좌표값에 의존하는 프레임 단위 분석과는 근본적으로 다른 접근이 필요함을 보여준다. 본 논문은 오픈포즈 바디-25를 단일 영상 기반 입력으로 채택하되, 추출된 좌표를 프레임 단위의 정밀 역학 수치가 아닌 전역 형태 지표의 시계열 패턴으로 변환하여 분석하는 접근을 취한다. 다음 절에서는 이러한 변환에 활용하는 컨벡스 헐 기법과 관련 연구 흐름을 고찰한다.

3. Previous Studies on Convex Hull

컨벡스 헐은 주어진 점 집합을 모두 포함하는 가장 작은 볼록 다각형을 구성하는 기하학적 알고리즘이다[11]. 2차원 평면에서 여러 점이 흩어져 있을 때 가장 바깥쪽에 위치한 점들을 연결하여 내부의 모든 점을 감싸는 볼록 다각형을 형성하며, 내부 점의 미세한 위치 변동이나 일부 누락이 발생하더라도 외곽을 결정하는 점들의 배치가 크게 달라지지 않는 한 전체 형상이 비교적 일관되게 유지되지는 수학적 성질을 지닌다.

비전 기반 동작 분석 분야에서 컨벡스 헐은 인체의 외곽 형상을 요약하고 움직임을 분류하는 도구로 활용되어 왔다. 관련 연구에서는 실루엣 기반 컨벡스 헐의 형상 특징을 시계열로 분석하여 걷기, 달리기 등 서로 다른 동작을 분류한 결과, 컨벡스 헐의 형상 변화가 동작 유형을 구별하는 유효한 표현임이 입증되었다[12].

전신 자세 안정성 분석에서도 컨벡스 헐은 인체 움직임 을 정량화하는 도구로 활용되어 왔다. 서 있는 자세에서 몸이 얼마나 흔들리는지를 객관적으로 평가하기 위해, 힘 판으로 측정된 압력 중심 궤적의 동요 영역을 컨벡스 헐 면적으로 산출하고 기존 통계적 방법과 비교하여 높은 상관관계를 확인한 연구[13]와, 소뇌 질환 환자의 균형 조절 능력 저하를 정량적으로 식별하기 위해 기립 자세에서 체간 궤적의 컨벡스 헐 체적을 산출하여 건강인 대비 최대 80배의 차이를 확인한 연구[14]가 보고되었다.

컨벡스 헐의 기하학적 중심점과 물리적 무게중심의 관계를 명확히 할 필요가 있다. 운동역학에서 기하학적 중심점(Centroid)은 물체의 밀도가 균일할 때 무게중심(Center of Mass)과 일치하며, 밀도가 불균일할 경우 두 점 사이에 편차가 발생한다[11]. 인체는 부위마다 질량이 다르므로 관절점으로 구성된 컨벡스 헐의 기하학적 중심점은 질량 가중 무게중심과 정확히 일치하지 않는다. 그러나 질량 가중치를 사용하지 않는 단순화된 기하학적 대표점도 무게중심 궤적의 변화 경향을 유효하게 추적할 수 있음이 보고된 바 있다. 걷기 동작에서 질량 가중치 없이 골반 뒤쪽에 부착한 단일 마커의 궤적과 질량 가중 무게중심 궤적을 비교한 결과, 두 궤적 간 상관계수가 $R>0.97$ 로 나타나 높은 방향적 일치가 확인되었다[15]. 이는 질량 가중치를 적용하지 않은 기하학적 대표점이라 하더라도 신체 배치 변화의 전역적 경향을 반영할 수 있음을 시사한다. 해당 연구는 걷기와 같은 비교적 완만한 동작을 대상으로 하였으므로, 케틀벨 스윙과 같은 탄도성 동작에서의 대응 관계는 향후 검증이 필요하다.

이처럼 컨벡스 헐은 관측 노이즈에 강건한 전역 형태 요약 도구이며, 중심점 궤적이 신체 배치 변화를 안정적으로 추적할 수 있는 유효한 지표로 확인된다. 본 논문은 이러한 근거에 기반하여, 오픈포즈 바디-25의 골반 중심점을 기준으로 전신을 상반신과 하반신으로 구조화한 뒤, 각각의 관절점 집합에 컨벡스 헐을 적용하여 중심점 궤적을 산출한다. 2.2절에서 확인한 바와 같이 비통제 환경에서 추출된 스켈레톤 좌표는 필연적인 미세 오차를 동반하므로, 이를 프레임 단위의 정밀 역학 수치로 직접 해석하는 대신 컨벡스 헐 기반의 전역 형태 요약으로 변환하여 주기 단위의 시계열 패턴으로 구성하고, 이를 동적 안정성 평가의 지표로 활용한다.

III. Convex Hull Pattern Analysis

1. Analysis Process for Dynamic Stability Evaluation

논문에서 동적 안정성은 반복 수행 시 중심점 궤적 패턴의 주기 간 재현성으로 정의한다. 원핸드 케틀벨 스윙은 빠른 구간 전환과 고중량을 동반하므로, 동작의 주기적 일관성은 안정적 수행 능력의 유효한 대리 지표로 활용될 수 있으며, 이는 관련 연구에서 안정성의 주요 요인으로 보고된 바와도 부합한다[3]. 따라서 본 논문은 동적 안정성을 패턴 재현성을 중심으로 살펴본다.

동적 안정성 판정은 동일 관측 조건에서 수집된 숙련자 수행 패턴을 기준선으로 삼는다. 이 기준선은 전신·상체·하체로 분해한 컨벡스 헐(Convex Hull) 중심점 궤적으로 구성되며, 대상 수행의 주기별 패턴이 이 숙련자 패턴 분포 내에 포함되는지를 적합·비적합 판정의 기준으로 활용한다. 이 판정 논리를 실제 영상 데이터에 적용하기 위한 컨벡스 헐 패턴 분석의 전체 처리 과정은 Fig. 2와 같다.

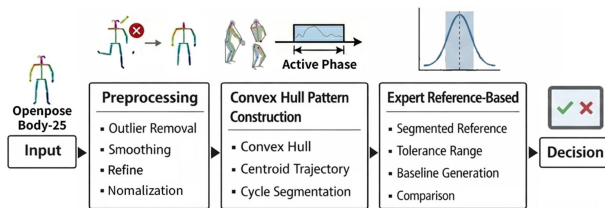


Fig. 2. Convex Hull pattern analysis process for establishing dynamic stability evaluation criteria.

이 과정은 입력, 전처리, 컨벡스 헐 패턴 구성, 숙련자 기준 기반 분석, 판정의 다섯 단계로 구성된다. 입력 단계에서는 운동 수행 모습의 측면(Sagittal Plane)을 카메라로 촬영한 단일 영상에서 오픈포즈(OpenPose) 바디-25(Body-25)를 통해 2차원 키포인트 시계열을 추출한다. 전처리 단계에서는 단일 영상에서 모션 블러와 가림(Occlusion)으로 인한 관절점의 누락과 오검출을 완충하기 위해, 이상치 제거, 스무딩, 스케레톤 개선, 정규화를 순차적으로 적용하여 입력을 안정화한다.

컨벡스 헐 패턴 구성 단계에서는 안정화된 스케레톤을 전신 및 상체·하체의 컨벡스 헐로 변환하고, 이들 각각의 중심점 궤적을 산출한 뒤, 주기 분할과 시간 정규화를 통해 주기 단위의 비교 가능한 패턴을 구성한다. 이러한 변환은 관절점의 미세 오차에 민감한 프레임 단위 역학 분석 대신, 일부 관절점에 오차나 누락이 있어도 신체 전체의 형태 변화를 안정적으로 포착할 수 있는 방식으로 동작 패

턴을 표현하기 위함이다.

숙련자 기준 기반 분석 단계에서는 대상 수행의 적합 여부를 판별할 기준을 확보하기 위해, 숙련자의 분절별 기준 패턴으로부터 허용 범위와 기준선을 생성한다. 이는 생활 체육 현장에서는 관측 불확실성으로 인해 절대적 역학 수치의 신뢰성이 제한될 뿐 아니라, 전문 역학 연구의 표준화된 수행 기준을 그대로 적용하기 어렵기 때문이다. 이에 숙련자가 시범하는 동작 패턴에 얼마나 부합하는지를 상대적 기준으로 활용하며, 기준선 분포 내 재현은 반복 수행의 안정적 재현으로, 분포 이탈은 일관성이 저하된 수행으로 해석한다. 마지막으로 판정 단계에서는 대상 수행의 주기별 패턴을 숙련자 기준선과 대조하여 주기별 편차와 반복 양상을 해석하여 원핸드 케틀벨 스윙의 동적 안정성에 대한 적합·비적합을 판정한다. 각 단계의 구체적 방법은 이후 절에서 처리 흐름에 따라 순차적으로 기술한다.

2. Skeleton Input and Preprocessing

생활 체육 환경과 같은 비통제 촬영 조건에서는 인원 등장이나 조명 변화에 의한 다중 검출 및 고스트 현상이 발생할 수 있다. 또한 원핸드 케틀벨 스윙을 측면에서 촬영하면 시점으로 인해 반대쪽 신체 부위가 지속적으로 가림 현상이 나타난다. 그리고 원핸드 케틀벨 스윙 동작의 특징으로 후방 스윙 구간에서는 팔이 다리 사이를 지나가면서 가림 현상이 추가되고, 추진 구간에서는 골반 신전(Extension)에 의한 빠른 동작 이동으로 모션 블러가 나타난다. 이러한 검출 오류는 실제 동작 변동과 구별되어야 하므로, 입력 단계와 전처리 단계를 거쳐 이를 완충한다. 이때 관절의 정밀한 운동학적 위치를 복원하는 것이 아니라, 검출 오류가 판정에 직접 반영되는 것을 억제하고 수행 과정에서 나타나는 실제 변동과 구분 가능한 정규화된 관절 좌표를 산출하고자 한다.

입력 단계에서는 영상에서 오픈포즈 바디-25를 통해 분석 대상의 관절 좌표를 추출하고, 단일 검출을 통해 분석 대상을 확정한다. 이는 생활 체육 환경의 비통제 촬영 조건에서 다중 검출 및 고스트 현상이 발생할 수 있어 분석 대상을 명확히 확정해야 하기 때문이다. 바디-25의 선택은 2장에서 정리한 관련 연구에서 3D 포즈 추정과 높은 상관계수를 보여 단일 영상 기반 입력으로서 타당성이 확인되었을 뿐 아니라, 원핸드 케틀벨 스윙이 골반 중심으로 수행되는 동작이므로 이후 컨벡스 헐 패턴 구성에서 상·하체를 골반 기준으로 분해하여 해석하기 위해 골반 추적이 가능한 입력이 필요하기 때문이다. 단일 검출에서는 초기 프레임에서 관절 신뢰도 총합이 가장 높은 대상을 주 피험

자로 지정하고, 이후 프레임에서는 골반 또는 목 좌표를 기준으로 이전 프레임과의 거리가 가장 가까운 대상을 동일 인물로 매칭하여 단일 피험자를 추적한다. 그 외 검출은 배제하며, 이를 통해 단일 분석 대상이 확정되고 해당 대상의 프레임별 관절 좌표 시계열 데이터가 구성된다.

앞서 구성된 관절 좌표 시계열에 대해 전처리 단계에서는 이상치 제거, 스무딩, 스켈레톤 개선, 정규화를 순차적으로 적용한다. 이상치 제거에서는 관절 좌표 시계열에서 검출 오류에 해당하는 비정상적 변동을 식별하여 제거하고 보간한다. 이는 후방 스윙 구간에서 발생하는 가림으로 관절점이 실제 위치에서 급격히 이탈할 수 있으며, 보정하지 않으면 이후 분석에서 실제 동작 변동으로 오인될 수 있기 때문이다. 관련 연구에서 신체 분절 길이의 물리적 항상성을 활용한 이상치 탐지 방법이 보고된 바 있으며 [10], 이를 적용하여 프레임별 분절 길이가 비정상적으로 변동하는 구간을 이상치로 판별한다. 이상치 탐지에는 신체 분절 길이의 물리적 항상성에 기반한 방법을 채택하였다. 오픈포즈의 Confidence Score는 비통제 환경에서 좌표 정확도와 반드시 일치하지 않아 단독 기준으로 활용하지 않았으며, 향후 보조 지표로의 결합을 검토할 필요가 있다. 이상치 구간의 보간에는 선형 보간을 적용하였다. 본 논문에서 이상치가 발생하는 가림 구간은 전후 좌표 자체에도 불확실성이 존재하므로, 전후 두 점만을 기준으로 최단 경로로 연결하는 선형 보간이 불확실한 좌표의 영향을 최소 범위로 한정할 수 있어 적절하다고 판단하였다.

스무딩에서는 고주파 노이즈를 완화하여 신호의 경향성을 안정화한다. 이는 추진 구간에서 골반 신전에 의한 빠른 동작 이동으로 발생하는 모션 블러와 조명 변화 등으로 관절 좌표에 미세한 진동이 포함되어, 이후 패턴 분석에서 주기 간 변동이 과대 추정될 수 있기 때문이다. 이때 반복 수행의 고유한 패턴 특징이 왜곡되지 않는 범위 내에서 신호를 부드럽게 유지하도록 한다.

측면 촬영 영상에서는 반대쪽 신체 부위의 지속적인 가림 현상으로 좌표 누락에 의한 형상 붕괴가 발생할 수 있다. 이에 본 논문은 형상을 요약 표현하는 목적에 맞게 신체 구조와 운동 특성을 반영하여 관절 좌표를 재정의하는 스켈레톤 개선을 수행한다. Fig. 3은 개선 전후의 스켈레톤 형태 변화와 해당 시점의 실제 영상 장면을 보여준다.

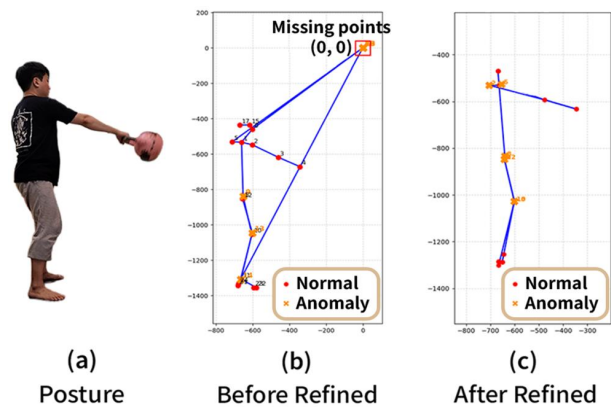


Fig. 3. Comparison of skeleton refinement effects.

Fig. 3의 (a)의 실제 운동 자세를 보면 왼팔이 몸통에 가려져 보이지 않는 자세이다. 개선 전 스켈레톤인 Fig. 3의 (b)에서는 가려진 왼쪽 팔의 좌표가 오픈포즈 특성상 소실된 포인트는 (0,0)으로 실제 위치와 무관하게 나타나고, 얼굴과 발의 좌표 또한 불안정하게 흔들려 가려진 경우와 마찬가지로 (0,0)에 표시되어 있다. 반면 개선 후인 Fig. 3의 (c)에서는 왼쪽 팔이 몸통 인근으로 치환되고, 얼굴과 발의 좌표가 목과 발목으로 통합되어 실제 동작에 부합하는 형상으로 안정화된 것을 확인할 수 있다. 이는 측면 촬영에서 좌우 신체가 시각적으로 중첩된다는 전제하에, 가려진 부위의 좌표를 대응하는 반대쪽 부위의 좌표로 치환한 결과이다. 아울러 떨림이 잦은 관절점은 인접한 안정적 관절로 통합하여 형상 일관성을 확보한다. 이처럼 스켈레톤 개선을 거친 데이터는 가림 구간에서도 컨벡스 형태 형상이 과도하게 변형되는 것을 억제하여, 이후 패턴 형태를 안정적으로 유지하는 기반이 된다.

마지막 단계에서는 정규화를 진행하여 관측 대상의 신체 조건과 카메라 거리에 따른 차이를 최소화한다. 이는 수행자의 신체 크기와 촬영 위치 조건이 서로 달라 좌표계 상에서 단순 비교가 어렵기 때문이다. 이에 모든 프레임에서 골반 중심을 좌표계의 원점으로 이동시키는 정렬을 선행하고, 이어서 몸통 길이와 같은 신체 비율을 기준으로 전체 좌표의 크기를 조절하는 스케일링을 수행한다. 결과적으로 정규화된 데이터는 체격 및 촬영 조건의 영향이 완화된 표준 좌표 시계열로 변환되며, 이를 통해 동작 패턴의 형상에 대한 일관성을 정량적으로 비교할 수 있다.

기존 연구에서 컨벡스 형이 적용된 걷기나 기립 자세와 같은 동작에서는 관절점 검출이 비교적 안정적이어서, 추출된 스켈레톤을 별도의 해석 없이 그대로 컨벡스 형의 입력으로 사용할 수 있었다[13][14]. 반면 원핸드 케틀벨 스윙은 골반 신전에 의한 폭발적 추진과 짧은 시간 내의 방

향 전환이 반복되는 빠른 탄도성 운동이며, 비통제 촬영 환경에서는 이에 따른 모션 블러, 가림, 관절점 소실이 빈번하게 발생하여 추출된 스켈레톤을 그대로 사용하기 어렵다. 본 절에서 기술한 전처리 과정은 단순한 노이즈 제거를 넘어, 원핸드 케틀벨 스윙의 운동학적 특성에 기반하여 스켈레톤을 개선하는 과정이다. 시상면 촬영에서의 좌우 신체 중첩을 전제로 가려진 부위를 반대쪽 부위로 치환하고, 빠른 동작 전환 구간에서 불안정한 관절점을 인접 안정 관절로 통합함으로써, 원핸드 케틀벨 스윙의 동작 구조가 반영된 운동학적 스켈레톤을 구성한다. 이를 통해 이후 구성되는 컨벡스 헐이 검출 오류에 의한 형상 왜곡이 아닌 실제 동작의 형태 변화를 반영할 수 있는 기반이 마련된다. 다만 전처리를 거치더라도 잔존하는 미세 오차가 이후 단계로 전파될 가능성은 존재하며, 이에 대해서는 3.3절에서 컨벡스 헐의 기하학적 강건성과 3.4절에서 주기 간 상대적 비교 방식을 통해 추가적으로 완충한다.

3. Convex Hull-Based Pattern Construction

본 절은 3.2절에서 구성된 운동학적 스켈레톤을 컨벡스 헐 기반의 기하학적 영역으로 변환하고, 중심점 궤적 패턴을 주기 단위 분석이 가능하도록 구성한다. 2.3절에서 정리한 바와 같이, 기존 연구에서 컨벡스 헐은 걷기와 같이 비교적 느리고 예측 가능한 동작의 유형 분류나, 기립 자세에서의 정적 동요 정량화에 활용되어 왔다. 이러한 조건에서는 동작의 변화 폭이 크지 않고 관절점 검출이 안정적이므로, 추출된 스켈레톤으로부터 컨벡스 헐을 직접 구성하는 것만으로도 충분하였다. 그러나 원핸드 케틀벨 스윙과 같이 추진과 감속, 방향 전환이 짧은 시간 내에 교대하는 빠른 탄도성 운동을 비통제 촬영 환경에서 촬영한 경우, 빈번한 관절점 소실과 오검출로 인해 스켈레톤을 그대로 사용하면 컨벡스 헐 형상이 실제 동작과 무관하게 왜곡될 수 있다. 본 논문은 3.2절에서 원핸드 케틀벨 스윙의 운동학적 특성에 기반하여 재구성한 스켈레톤으로부터 컨벡스 헐을 구성함으로써, 기존 연구가 적용되기 어려웠던 빠른 탄도성 운동의 비통제 촬영 조건에서도 컨벡스 헐 중심점 궤적이 실제 동작의 형태 변화를 안정적으로 반영할 수 있도록 하였다. 이를 기반으로 중심점 궤적을 주기 단위의 시계열 패턴으로 구성하고, 그 주기 간 재현성을 동적 안정성의 판정 기준으로 정의한다. 이에 따라 패턴 구성은 컨벡스 헐 및 중심점 산출, 주기 분할과 시간 정규화의 순서로 진행된다. 컨벡스 헐은 외관점에 의해 형상이 결정되므로, 내부 관절점의 미세한 위치 변동이 전체 형상에 미치는 영향이 제한적이다. 이러한 성질은 3.2절의 전처리

이후에도 잔존할 수 있는 관절점 오차가 중심점 궤적 패턴에 과도하게 반영되는 것을 억제하는 역할을 한다. 다만 외관점 자체에 오차가 발생하는 경우에는 형상이 변형될 수 있으므로, 3.2절의 스켈레톤 개선을 통해 외관점의 안정성을 사전에 확보하는 것이 전제가 된다.

3.1 Convex Hull and Centroid Calculation

먼저 컨벡스 헐 및 중심점 산출을 설명한다. Fig. 4는 전신 및 상체·하체 관절점 집합으로부터 컨벡스 헐을 구성하고, 중심점 궤적 패턴의 정의 과정을 보여준다.

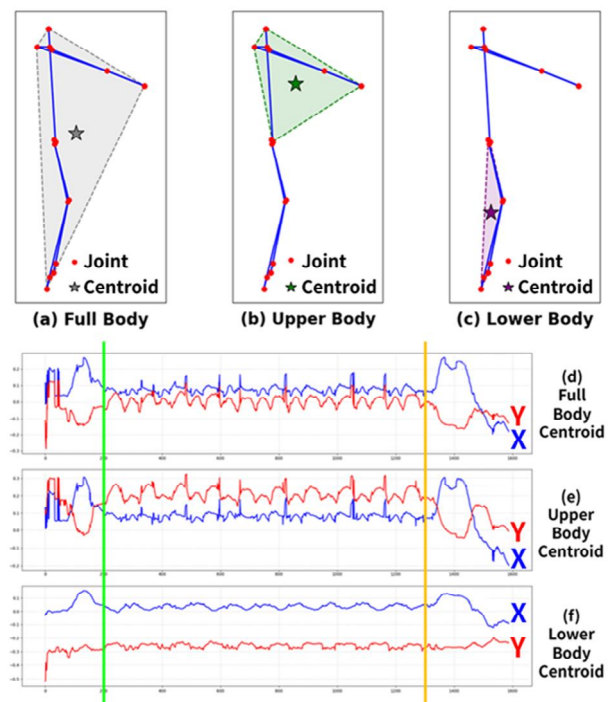


Fig. 4. Configuration of the Convex Hull and centroid trajectory patterns.

컨벡스 헐 형성을 위해서 전신은 전체 관절점, 상체는 골반 중심 상부 관절군, 하체는 골반 중심 하부 관절군으로 구분한다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 각각 전신·상체·하체의 구분된 관절점에 대해 컨벡스 헐을 구성하고 중심점을 산출한 결과를 나타내며, 전신은 회색 도형, 상체는 녹색 도형, 하체는 붉은 도형으로 컨벡스 헐 영역을 표시하고, 각 컨벡스 헐의 중심점을 별 모양 점으로 표기한다. Fig. 4의 (d)에서 (f)는 이렇게 산출된 전신·상체·하체 중심점을 시간 순서대로 연결한 궤적 그래프로, x 좌표(파란 선)는 좌우 움직임을, y 좌표(빨간 선)는 상하 움직임을 나타낸다. 궤적을 살펴보면, 녹색 선으로 표시된 약 0~200프레임 구간은 동작 도입부에 해당하여 뚜렷한 반복 패턴이 나타나지 않고, 이후 중간 구간에서는 주기적으로 반복되는 궤

적 패턴이 관찰되며, 노란 선으로 표시된 1,300프레임 이후 구간은 동작을 마무리하는 단계로서 다시 규칙적인 패턴이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 정의된 중심점 궤적은 반복 수행에서 주기별 재현성을 비교하기 위한 기초 패턴 표현으로 사용된다.

3.2 Cycle Segmentation and Time Normalization

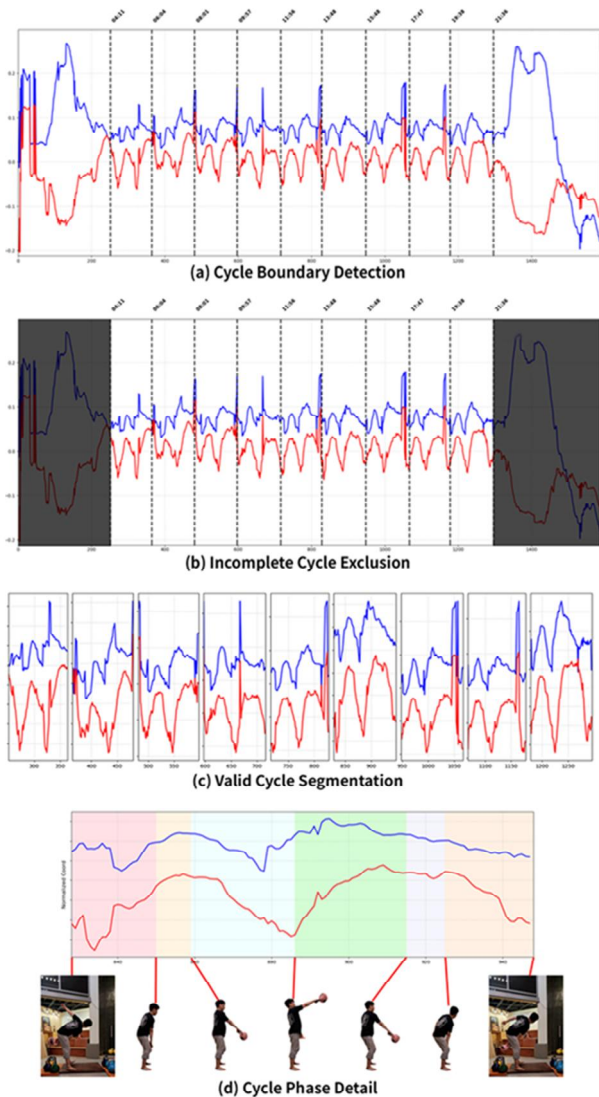


Fig. 5. Cycle segmentation process.

다음으로 반복 수행을 주기 단위로 분할하고, 각 주기에서 나타나는 중심점 궤적을 하나의 분석 데이터로 구성하는 과정을 설명한다. 본 논문에서 1주기는 한 번의 스윙 수행에 해당하며, 10회를 반복 수행하면 주기별로 10개의 패턴 데이터가 생성된다. 주기 경계는 실험자가 중심점 궤적의 시계열 그래프와 원본 영상을 대조하여, 백스윙에서 추진으로 전환되는 시점을 프레임 단위로 식별하는 방식

으로 설정하였다. Fig. 5는 주기 경계 설정, 비유효 주기 제외, 유효 주기 분할, 대표 주기의 세부 단계로 주기 분할 과정을 나타낸다.

Fig. 5의 (a)는 전체 궤적에서 전환 시점을 점선으로 표시한 주기 경계를 나타낸다. 원핸드 케틀벨 스윙은 동일한 동작이 반복되므로 주기 간 프레임 수의 차이가 크지 않는 점에서, 분할된 전체 주기의 프레임 수 분포에서 평균 $\pm 2\sigma$ 를 벗어나는 주기는 불안정하거나 비정상적인 구간으로 간주하여 제외한다. Fig. 5의 (b)는 이렇게 판별된 비유효 주기를 제외 대상으로 표시한 결과이다. Fig. 5의 (c)는 제외 후 남은 연속된 경계 사이 구간을 각각 하나의 유효 주기로 분할한 결과를 나타내며, (d)는 분할된 주기 중 하나를 확대하고 실제 스윙 동작 이미지를 대응시켜, 앞서 정의한 시작점과 주기 내 각 구간이 어떤 동작 단계에 해당하는지를 나타낸다.

주기 분할 이후에는 주기별 중심점 궤적의 형태를 동일한 상태 시간축에서 직접 대조하기 위해, 각 주기의 중심점 궤적을 시간 정규화한다. 즉, 주기마다 서로 다른 프레임 수를 100개의 균등한 시간 구간으로 나누어 정렬함으로써, 각 주기의 같은 시점에서 중심점이 어떤 위치에 있는지를 일대일로 대응하여 비교할 수 있도록 한다. 이 과정을 통해 전신·상체·하체 각각에 대해 한 주기에서 나타나는 패턴이 동일한 기준 축에서 정의되며, 이후 절에서 속련자 기준선 분포와의 대조를 통해 주기별 편차를 해석할 수 있는 입력이 완성된다.

이상의 과정을 통해, 관절점의 미세 오차에 민감한 프레임 단위 해석 대신 외곽 형상 요약으로 관측 불확실성을 완충한 중심점 궤적 패턴이 주기별 비교 단위로 구성된다. 구성된 주기별 패턴은 다음 절에서 속련자 기준선 분포와 대조하여 동적 안정성을 판정하는 입력으로 사용된다.

4. Expert Group Baseline-Based Analysis and Stability Evaluation

본 절은 구성된 주기별 중심점 궤적 패턴을 입력으로 하여, 속련자 수행에서 형성되는 기준선과의 대조를 통해 동적 안정성의 적합·비적합을 판정하는 절차를 정의한다. 3.1절에서 동적 안정성을 반복 수행의 일관성으로 정의한 바와 같이, 판정은 한 주기에서 관측되는 패턴이 기준선에서 얼마나 벗어나는지를 주기별로 산출하고, 그 반복 양상을 종합하는 방식으로 수행된다. 본 논문의 판정은 중심점 궤적의 절대적 위치가 아닌 주기 간 상대적 재현성에 기반한다. 따라서 전처리와 컨벡스 힐 구성 과정에서 발생하는 체계적 편향은 모든 주기에 동일하게 작용하여, 주기 간

패턴 비교에 미치는 영향이 제한적이다. 이에 따라 기준선과 허용 범위의 구성, 주기별 편차 산출, 그리고 판정 규칙과 수행 단위 요약 지표를 순서대로 정의한다.

4.1 Baseline and Tolerance Range Construction

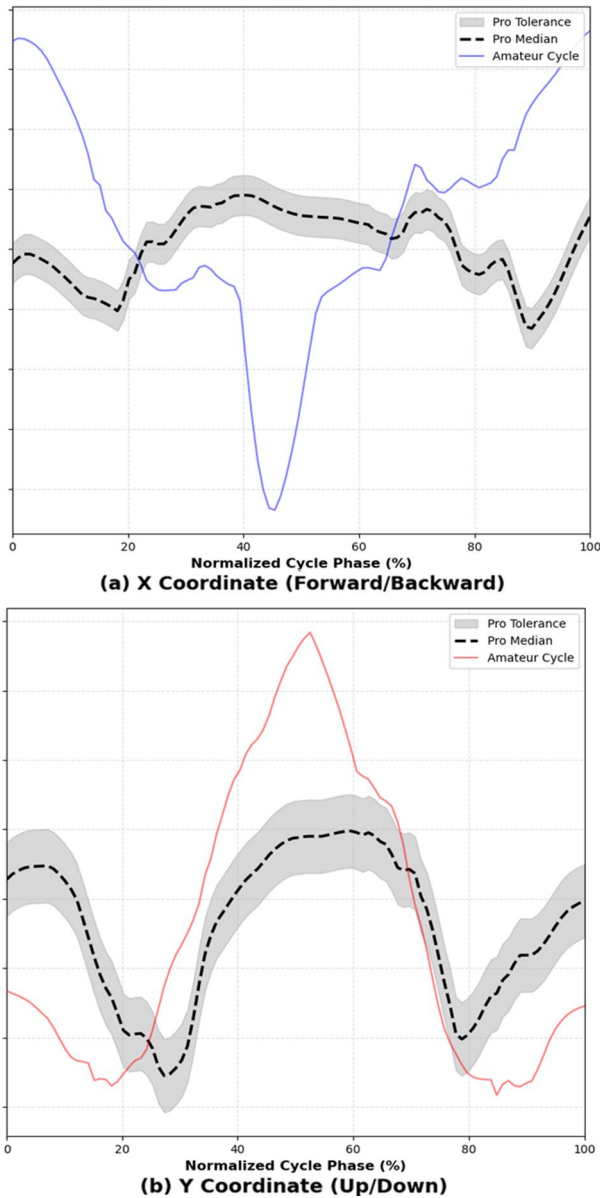


Fig. 6. Visualization of the expert distribution-based reference trajectory, tolerance range, and target cycle trajectory deviation.

먼저 기준선과 허용 범위의 구성 과정을 설명한다. 숙련자 기준선은 동일 관측 조건에서 수집된 숙련자 수행 데이터로부터 추출된 주기별 패턴의 분포로 정의하며, 전신·상체·하체 중심점 궤적 각각에 대해 기준선을 구성한다. 중심점 궤적에 대해 시간 정규화된 숙련자 주기 궤적을 동일한 상대 시간축에서 정렬한 뒤, 기준선의 대표값과 변동

폭을 산출한다. 숙련자 분포를 기준으로 대상 수행의 이탈 여부를 판별하는 본 논문의 접근은, 기준 집단의 분포로부터 허용 범위를 설정하고 새로운 관측이 그 범위에 포함되는지를 판별하는 분포 기반 이상치 탐지와 동일한 원리에 해당한다[16][17]. 이에 따라 대표값과 변동 폭을 각각 중앙값과 IQR 기반으로 산출한다. 구체적으로 숙련자 주기 집합의 중앙값에서 대표 궤적 $m(t)$ 을, IQR에서 허용 변동 폭 $r(t)$ 을 추정하고, 허용 범위의 경계를 조절하는 허용 계수 α 를 정의한다. 이들을 결합하여 기준 궤적을 중심으로 $m(t) \pm \alpha r(t)$ 의 허용 범위를 설정하며, α 는 소수의 이상 주기에 의해 허용 영역이 과도하게 확대되는 것을 방지하기 위해 숙련자 유효 주기의 98%가 포함되는 최소값으로 결정한다. 기준선과 허용 범위는 전신·상체·하체 각각의 X 좌표와 Y 좌표에 대해 독립적으로 구성하여 총 6개의 축별 허용 영역을 설정하며, 허용 계수 α 또한 각 축에 대해 독립적으로 산출한다. Fig. 6은 이 과정에 따른 판정이 어떻게 이루어지는지를 보여주는 시각화 예시이다.

Fig. 6에서 (a)는 X 좌표, (b)는 Y 좌표에 대한 기준선 구성과 판정의 예시를 보여준다. 두 그래프 모두 숙련자 주기 분포로부터 산출된 대표 궤적 $m(t)$ 이 검은색 점선으로, 허용 범위 $m(t) \pm \alpha r(t)$ 이 회색 음영으로 표시되며, 비숙련자의 주기 궤적이 (a)에서는 파란 선으로, (b)에서는 빨간 선으로 나타난다. 이 예시에서는 두 좌표 모두에서 비숙련자의 궤적이 허용 범위를 벗어나고 있으며, 이러한 경우 해당 주기는 비적합으로 판정된다.

4.2 Decision Rules

적합 판정은 대상 수행의 포함률을 기준으로 수행한다. 포함률은 한 주기에서 시간 정규화된 100개 시간 포인트 중 허용 범위 내에 위치하는 비율로 정의하며, 6개 축에 대해 독립적으로 산출한다. 판정 임계값은 숙련자 데이터를 영상 단위로 두 그룹으로 균등 분할하여 교차 검증을 수행한 뒤, 양쪽 검증 결과에서 산출된 주기별 포함률을 통합한 분포의 평균에서 2배의 표준편차를 차감한 값으로 설정한다. 이는 통계적 품질 관리에서 활용되는 분포 기반 하한 경계 설정 방식에 따른 것으로[18], 정규분포 가정하에서 약 97.7%를 포함하는 하한 경계에 해당한다. 이 교차 검증에서 각 주기는 자신이 포함되지 않은 기준선으로 평가되므로, 산출된 포함률 분포는 숙련자가 독립적 기준에 대해 보이는 현실적 재현 수준을 나타낸다. 한 분절에서 X 좌표와 Y 좌표의 포함률이 모두 해당 임계값 이상이면 그 분절을 적합으로, 하나라도 미달이면 비적합으로 판

정한다. 전신·상체·하체 세 분절이 모두 적합이면 동적 안정성에 부합하는 것으로 판정한다.

전체 수행의 안정성은 분절별 판정 결과를 종합하여 요약된다. 전신·상체·하체 각각에 대해 적합·비적합을 산출함으로써, 신체 구간별 재현성을 구분하여 해석할 수 있다. 구체적인 산출 결과와 분포 양상은 4장에서 제시한다.

IV. Experiments and Result Analysis

본 장에서는 3장에서 설계한 컨벡스 헐(Convex Hull) 기반 동적 안정성 판정 방법을 실제 영상 데이터에 적용한 결과를 제시한다. 먼저 실험 환경과 데이터 수집 조건을 기술하고, 주기 분할을 통해 확보된 유효 데이터 현황과 기준선 설정 결과를 보고한다. 이어서 일반인 집단에 대한 판정 결과를 전신·상체·하체 분절별로 제시하고, 판정 결과를 동작 특징과 대응하여 해석한다.

1. Experimental Environment and Data Collection

본 실험의 영상 데이터는 생활 체육 환경인 케틀벨 스포츠를 교육하는 운동 센터에서 수집하였다. 촬영은 60fps로 설정된 카메라를 수행자의 측면에 고정 배치하여 수행한다. 관절점 추출에는 오픈포즈(OpenPose) v1.7.0의 바디-25(Body-25) 사전 학습 모델을 기본 설정으로 적용하였다. 추출 단계에서는 신뢰도 임계값을 적용하지 않고 원시 데이터를 모두 저장하였으며, 이후 3.2절에서 기술한 전처리 과정을 거쳐 스케레톤을 개선한 뒤 분석 데이터로 사용하였다. 모든 수행은 오른손 원핸드 케틀벨 스윙으로 통일하였고, 각 영상은 10회 연속 스윙을 포함한다.

본 실험에는 성인 총 16명이 참여하였으며, 케틀벨 스윙 훈련 경력에 따라 숙련자 집단 3명과 일반인 집단 13명으로 분류하였다. 숙련자 집단은 프로 랭크 등록자 1명을 포함한 케틀벨 운동 센터의 코치 3명(남성)으로, 평균 6~7년의 코칭 경험을 보유하고 있다. 일반인 집단은 훈련 경력 3년 이하의 참여자로, 남성 8명과 여성 5명으로 구성되었다. 실험에 사용된 케틀벨의 무게는 피험자가 정확한 자세를 유지할 수 있는 범위 내에서 개별적으로 선택하였으며, 숙련자 집단은 28~36kg, 일반인 남성은 12~20kg, 일반인 여성은 8~10kg 범위에서 수행하였다. Table 1은 피험자의 신체 정보를 나타낸다.

Table 1. Physical characteristics of participants.

Group	N	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)
Expert (M)	3	37.3±0.6	177.7±3.8	80.0±4.4
General (M)	8	34.3±3.5	176.3±3.7	77.1±4.2
General (F)	5	28.0±6.3	163.4±2.1	50.8±3.1

숙련자 집단에서 12개, 일반인 집단에서 24개의 영상을 수집하여 총 36개 영상을 확보하였다. 이 중 숙련자 데이터는 이후 기준선 설정의 기반이 된다.

2. Analysis Data Construction and Baseline Establishment

본 절에서는 3장에서 기술한 분석 절차를 실제 데이터에 적용하는 과정에서, 데이터의 규모와 기준선 설정 등 실험적으로 확인이 필요한 사항을 기술한다.

수집된 36개 영상에 대해 전처리, 컨벡스 헐 중심점 추적 구성, 주기 분할, 시간 정규화를 순차적으로 적용하였다. 주기 분할 과정에서는 3.3절에서 정의한 프레임 수 기반 제외 기준을 적용하여, 영상 시작·종료 부분의 불완전한 주기와 비정상적으로 짧거나 긴 주기를 제외하였다. 전체 360주기 중 103주기가 제외되어 숙련자 96주기와 일반인 161주기를 포함한 총 257주기가 유효 데이터로 확보되었다. 일반인 집단의 제외 비율이 숙련자에 비해 높은 것은, 동작 시작과 종료 구간에서 수행이 불안정하여 불완전한 주기가 더 빈번하게 발생하였기 때문으로 해석된다.

숙련자 전체 유효 96주기로부터 3.4절에서 정의한 방식에 따라, 전신·상체·하체 각각의 X 좌표와 Y 좌표에 대해 중앙값 기반 기준 궤적과 IQR 기반 허용 범위를 설정하였다. Table 2는 6개 축별 산출된 허용 계수 α 값이며, Fig. 7은 확정된 기준선과 허용 영역의 시각화 결과이다.

Fig. 7의 (a)~(c)는 각각 전신, 상체, 하체에 대해 X 좌표와 Y 좌표의 기준선과 허용 영역을 나타낸다. 각 그래프에서 붉은 점선은 숙련자 중앙값 궤적, 음영 영역은 허용 범위이며, 배경의 희미한 선들은 숙련자 개별 주기의 실제 궤적 패턴이다. 숙련자 주기 궤적이 허용 영역 내에 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 분절 간 허용 영역의 폭 차이는 Table 2의 α 값 차이를 반영한다. Table 2에서 α 값은 분절과 축에 따라 1.69~1.93의 범위를 보인다. 상체의 α 가 상대적으로 낮게 산출된 것은 숙련자 집단 내에서 상체 궤적의 주기 간 변동이 전신이나 하체에 비해 좁은 범위에 집중되어 있음을 나타낸다. 반면 하체는 골반 신전

(Extension)에 의한 추진의 역동성으로 숙련자 간에도 넓은 변동 폭이 관찰되어 α 가 높게 산출되었다.

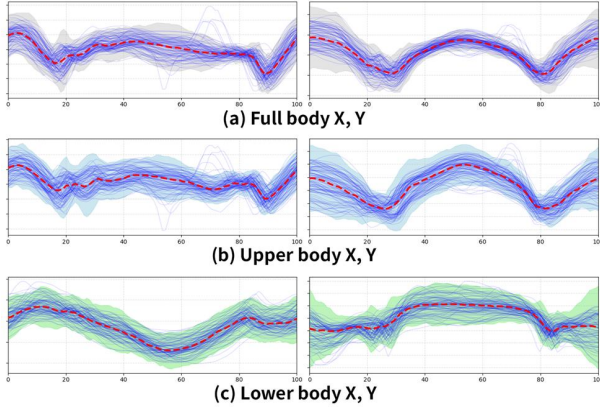


Fig. 7. Expert baseline and tolerance range.

Table 2. Expert group baseline construction results: Tolerance coefficient α by axis.

Segment	X-axis α	Y-axis α
Full Body	1.78	1.90
Upper Body	1.73	1.69
Lower Body	1.89	1.93

이어서 3.4절에서 정의한 판정 임계값을 도출하기 위해, 숙련자 데이터를 두 그룹으로 분할하여 교차 검증을 수행하였다. 각 분할에서 한쪽으로 기준선과 허용 범위를 구성한 뒤, 나머지 주기별 포함률을 산출하였다. 양쪽 검증에서 산출된 주기별 포함률을 통합하고, 그 분포의 평균에서 2배의 표준편차를 차감한 값을 축별 판정 임계값으로 결정하였다. Table 3은 통합 포함률 분포와 임계값이다.

Table 3에서 축별 포함률 분포를 살펴보면, 하체 X 좌표가 숙련자 간 재현성이 가장 안정적인 축으로 나타나 골반 추진의 전후 궤적이 숙련자 집단에서 가장 일관되게 유지됨을 확인할 수 있다.

Table 3. Distribution of integrated coverage rates and decision thresholds in cross-validation.

Axis	Average	σ	Threshold
Full Body X	88.50%	10.71%	67.09%
Full Body Y	92.93%	7.03%	78.88%
Upper Body X	83.31%	13.68%	56.46%
Upper Body Y	79.80%	17.08%	45.64%
Lower Body X	96.02%	7.99%	80.05%
Lower Body Y	89.28%	11.74%	65.81%

반면 상체 Y 좌표는 가장 낮은 임계값이 산출되었는데, 이는 상단 전환 구간에서 케틀벨 높이와 몸통 자세가 숙련

자마다 다를 수 있음을 시사한다. 전반적으로 Y 좌표가 X 좌표보다 넓은 변동을 보이는데, 이는 스윙의 상하 진폭이 전후 변위보다 개인차에 민감하기 때문으로 해석된다.

3. Evaluation Results

4.2절에서 확정된 기준선, 허용 영역, 판정 임계값을 기준으로 일반인 집단의 유효 161주기에 대해 동적 안정성 판정을 수행하였다. 각 주기에서 전신·상체·하체의 X 좌표와 Y 좌표 포함률이 모두 임계값 이상이면 해당 분절을 적합으로, 하나라도 미달이면 부적합으로 판정하며, 세 분절이 모두 적합이면 종합 적합으로 판정하였다. Table 4는 일반인 집단의 분절별 적합 현황을 요약한 결과이다.

Table 4. Summary of dynamic stability evaluation results for the general group.

Condition	Acceptable	Acceptance Rate
Full Body	13/161	8.1%
Upper Body	38/161	23.6%
Lower Body	0/161	0.0%
Overall	0/161	0.0%

일반인 집단의 유효 161주기에 대해 판정을 수행한 결과, 전신·상체·하체 세 분절이 모두 적합이어야 동적 안정성이 인정되는 기준에서 하체가 161주기 전체 부적합으로 판정되어 동적 안정성에 부합하는 주기는 존재하지 않았다. 이는 일반인 집단의 어떤 주기에서도 숙련자 수준의 하체 추진 재현성이 달성되지 않았음을 의미한다. 개별 분절별로 살펴보면, 상체는 23.6%의 적합률로 세 분절 중 가장 높았으나 적합 주기는 일부 피험자에 편중되었으며, 전신은 8.1%의 적합률을 보였다.

판정 임계값 선택에 따른 결과의 민감도를 확인하기 위해, 임계값 배수를 변경하여 일반인 집단의 분절별 적합률 변화를 분석하였다. Table 5는 평균에서 차감하는 표준편차 배수를 1.0에서 3.0까지 변경했을 때의 분절별 적합률을 나타낸다.

Table 5. Sensitivity of acceptance rates to threshold selection for the general group.

Threshold	Full Body	Upper Body	Lower Body
1.0 σ	1.2%	9.9%	0.0%
1.5 σ	4.3%	13.7%	0.0%
2.0 σ	8.1%	23.6%	0.0%
2.5 σ	11.2%	35.4%	1.2%
3.0 σ	14.9%	47.8%	2.5%

하체는 임계값을 3.0σ 까지 완화하여도 적합률이 2.5%에 불과하여, 하체 추진 재현성 부족이 임계값 설정에 민감하지 않은 구조적 차이임을 확인할 수 있다. 반면 상체는 임계값 완화에 따라 적합률이 9.9%에서 47.8%까지 상승하여, 상체 재현성은 숙련자 기준에 근접하되 임계값 엄격도에 따라 판정이 달라지는 경계 영역에 위치함을 나타낸다. 본 논문에서 채택한 2.0σ 는 통계적 품질 관리에서 약 97.7%를 포함하는 하한 경계에 해당하며[18], 숙련자 교차 검증에서 대부분 주기가 적합으로 유지되면서 일반인과 변별이 가능한 균형점으로 확인되었다.

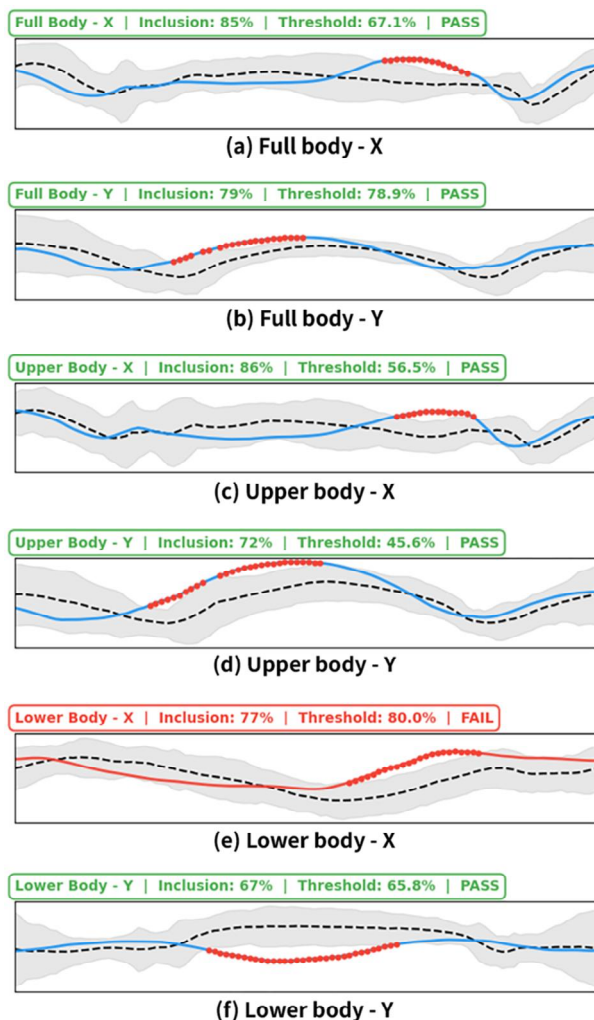


Fig. 8. Comparison of the representative performance trajectory of the general population and the baseline tolerance region.

Fig. 8은 일반인 중 가장 많은 적합 주기를 보인 피험자 9 대표 주기를 숙련자 기준선 허용 영역 위에 겹쳐 나타낸 결과이다. Fig. 8의 (a)~(f)는 각각 전신 X, 전신 Y, 상체 X, 상체 Y, 하체 X, 하체 Y에 대한 궤적 대조이다. 각 그

래프에서 검은 점선은 숙련자 중앙값 궤적, 회색 영역은 허용 영역이며, 일반인의 수행 궤적은 적합 판정을 받은 축에서는 파란 선으로, 비적합 판정을 받은 축에서는 붉은 선으로 표시된다. 궤적 위의 붉은 점은 허용 영역 이탈 시간 포인트를 나타낸다. 이 주기는 6개 축 중 5개에서 적합 판정을 받았으나, 하체 X 좌표에서 포함률이 임계값에 미달하여 하체가 비적합으로 판정되었다.

전신과 상체에서는 궤적이 허용 영역 내에서 안정적으로 유지되며, 하체에서도 유사한 수준의 이탈이 관찰되지만, 하체의 판정 임계값이 다른 분절에 비해 높게 설정되어 비적합으로 판정되었다. 이는 숙련자 집단에서 하체 추진의 재현성이 가장 높게 나타난 결과를 반영한 것으로, 하체 적합 판정이 그만큼 엄격한 일관성을 요구함을 나타낸다. 적합으로 판정된 주기의 구체적 양상을 살펴보기 위해, Table 6에 분절별 적합 주기의 실제 포함률을 제시한다. 각 축에서 임계값 이상인 경우를 음영 처리하였다.

Table 6에서 적합 주기의 양상을 살펴보면 몇 가지 특징이 관찰된다. 첫째, 전신과 상체에서 적합 판정을 받은 주기가 특정 피험자에 집중되어 있다. Table 6에서 파란 선으로 표시된 피험자 9는 5주기 중 4주기가 전신과 상체 모두에서 적합으로 판정되어, 상체의 관성 흐름 유지와 전신 정렬에서 숙련자 수준에 근접한 재현성을 보인다.

반면 붉은 선으로 표시된 피험자 2는 12주기에서 상체 적합이 나타나지만, 전신은 전 주기 비적합으로, 상체의 부분적 재현이 전신 수준의 안정성으로 이어지지 못하고 있다. 둘째, 전신 또는 상체에서 적합 판정을 받은 주기가 하더라도 하체 포함률은 임계값에 크게 미달하며, 특히 하체 Y 좌표가 43~67% 수준에 머물러 상하 방향의 추진 재현성이 일관되게 부족하다. 이는 해당 일반인이 상체의 관성 흐름 유지는 숙련자 수준에 근접하면서도 하체의 추진 재현성은 달성하지 못하고 있음을 보여준다.

4. Pattern Interpretation by Segment and Implications for Movement Feedback

4.1 Segment-Wise Pattern Interpretation and Movement Feedback

4.3절의 판정 결과에서 가장 두드러진 양상은 하체의 전일 비적합이다. 일반인 161주기 전체에서 하체 적합이 단 한 주기도 관찰되지 않았다는 것은, 골반 신전에 의한 추진의 재현성이 일반인 집단에서 가장 달성하기 어려운 요소임을 나타낸다.

이는 2.1절에서 설명한 바와 같이 추진 구간에서 골반 주도 추진이 약화되거나 무릎 굴곡(Flexion)이 과도해지는

Table 6. Detailed coverage rates by segment for acceptable cycles in the general group (Unit: %).

Subject	Video	Cycle	Full Body X	Full Body Y	Upper Body X	Upper Body Y	Lower Body X	Lower Body Y
1	1	Cycle 1	54	82	62	62	33	77
		Cycle 8	49	59	57	46	21	73
2	1	Cycle 4	44	64	73	67	40	98
		Cycle 7	47	67	64	54	50	94
		Cycle 9	35	59	64	48	49	92
		Cycle 10	39	59	64	58	49	90
	2	Cycle 3	63	49	66	49	37	52
		Cycle 5	54	48	57	47	35	54
		Cycle 8	53	54	65	46	47	47
	3	Cycle 3	48	41	66	53	25	55
		5	Cycle 2	61	44	61	55	42
	Cycle 7		60	43	67	54	54	31
5	1	Cycle 5	61	66	58	50	41	65
		Cycle 6	67	65	71	62	39	64
	2	Cycle 7	60	49	60	86	75	47
		Cycle 8	62	62	65	78	72	48
	3	Cycle 1	75	86	61	91	57	53
		Cycle 2	67	79	72	60	42	51
8	1	Cycle 1	67	79	62	53	34	51
		Cycle 2	58	79	62	53	34	51
		Cycle 3	75	91	89	76	53	53
		Cycle 5	68	90	78	98	64	54
		Cycle 6	70	87	80	93	44	53
		Cycle 7	63	79	67	78	47	52
9	1	Cycle 1	85	79	86	72	77	67
		Cycle 2	77	83	78	84	83	57
		Cycle 3	79	86	82	70	77	62
		Cycle 4	78	74	79	64	82	59
		Cycle 5	81	83	82	77	62	56
10	1	Cycle 1	67	93	73	96	55	56
		Cycle 2	65	93	74	95	69	54
		Cycle 3	81	76	73	81	38	50
		Cycle 5	73	70	76	78	56	43
		Cycle 6	84	84	85	87	75	43
		Cycle 7	84	84	85	87	75	43
11	1	Cycle 1	69	98	49	99	79	53
		Cycle 3	79	100	76	100	65	53
		Cycle 4	68	100	58	94	51	52
		Cycle 5	75	82	78	94	65	53
13	1	Cycle 4	60	71	67	58	50	47
		Cycle 5	61	72	69	50	51	49

형태와 연결되며, 하체 주도의 힘 생성이 주기 간에 안정적으로 재현되지 않음을 의미한다. 현장에서는 "골반의 움직임 타이밍이 일정하지 않다" 또는 "스쿼트 형태가 간헐적으로 나타난다"와 같은 피드백으로 연결될 수 있다.

상체는 세 분절 중 가장 높은 적합률을 보였으며, 일부 일반인에서는 과반수 이상의 주기가 적합으로 판정되었다. 이는 상체의 관성 흐름 유지가 하체의 추진 재현에 비해 상대적으로 달성 가능한 요소임을 시사한다. 그러나 여전히 대부분의 일반인은 상체에서도 비적합 비율이 높았으며, 이탈이 두드러지는 경우에는 상승 및 하강 구간에서 몸통 정렬의 일관성이 저하되는 양상이 나타났다. 이는 2.1절에서 기술한 상체 회전 없이 팔로 당기거나 상체로 케틀벨을 드는 형태, 또는 하강 시 상체가 과도하게 숙여

지며 요추가 굴곡되는 패턴에 대응하며, "팔 주도 스윙이 간헐적으로 나타난다" 또는 "상단 전환에서 상체 고정이 불안정하다"와 같은 피드백으로 연결될 수 있다.

전신 패턴에서의 이탈은 상체와 하체의 이탈이 복합적으로 작용한 결과이며, Table 6에서 확인된 바와 같이 분절 단위 판정을 함께 활용하면 전신 비적합의 원인이 상체에 있는지 하체에 있는지를 구분할 수 있다. 예를 들어 피험자 9처럼 전신 비적합이 1주기에 불과한 경우에도 하체는 전신 비적합이므로, 전신의 높은 적합률이 곧 동작 전반의 안정성을 의미하지는 않으며 하체 추진의 개선이 우선 과제임을 식별할 수 있다.

4.2 Self-Reproducibility Analysis

이러한 분절별 판정에 더하여, 일반인 집단의 비적합이 숙련자 패턴에 미달하면서 자체적으로도 일관성이 없는 것인지, 숙련자와는 다르지만 나름의 패턴을 안정적으로 반복하는 것인지를 추가로 확인하였다. 이를 위해 각 영상의 유효 주기만으로 자체 기준선을 구성하고 동일한 방식으로 허용 계수 k 를 산출하였다. 이 값은 해당 영상 내 주기 간 변동의 크기를 나타내며, 값이 작을수록 자체 재현성이 높다. 숙련자 집단의 자체 재현성 k 값은 평균 2.50, 표준편차 0.26으로 1.93~2.83의 좁은 범위에 분포하였다.

숙련자 집단 내 개인별 재현성을 확인하기 위해, 피험자별 자체 재현성 k 값을 산출하였다. Table 7은 피험자별 분절별 k 값의 평균을 나타낸다. 3명의 숙련자 간 6축 종합 평균 k 값은 2.29~2.63의 범위로, 프로와 코치 간 뚜렷한 수준 차이 없이 유사한 재현성을 보였다. 이는 프로와 코치가 경기 참여 여부에서는 차이가 있으나, 반복 수행의 재현성 측면에서 유사한 수준의 숙련도를 갖추고 있어 기준선으로서 일관된 집단임을 나타낸다.

Table 7. Self-reproducibility k values by segment for individual expert group members.

Subject	Video	Full Body k	Upper Body k	Lower Body k	6-axis Average k
1	5	2.61	2.65	2.63	2.63
2	2	2.20	2.23	2.44	2.29
3	5	2.54	2.46	2.71	2.57

일반인 집단은 평균 3.66, 표준편차 1.24로 영상 간 편차가 크게 나타났으나, 일부 영상에서는 숙련자 수준의 자체 재현성이 관찰되었다. 숙련자 분포의 상한인 3.03 이내에 해당하는 일반인 영상을 선별하였으며, Table 8은 이들의 분절별 k 값을 나타낸다. 분절별 k 값은 해당 분절 X축과 Y축의 평균으로 산출하였다.

Table 8. Self-reproducibility k values by segment for general group videos.

Subject	Video	Full Body k	Upper Body k	Lower Body k	6-axis Average k
13	1	1.92	1.93	1.94	1.93
5	3	2.51	2.42	1.98	2.30
12	1	2.42	2.62	2.65	2.56
4	1	2.56	2.40	3.34	2.77
7	1	3.03	2.58	2.92	2.84
8	1	2.61	3.32	2.80	2.91
2	1	3.00	2.80	3.12	2.98

Table 8에서 일반인 24개 영상 중 7개가 숙련자 수준의 자체 재현성을 보였다. 이들은 영상 내에서 주기 간 변동이 좁아 반복 수행의 일관성은 확보되어 있으나, 판정에서는 전원 비적합으로 나타났다. 이는 본인 나름의 패턴을 안정적으로 반복하고 있으나, 그 패턴 자체가 숙련자의 동작 구조와 다른 형태로 고착되어 있음을 의미한다. 반면 나머지 17개 영상은 자체 재현성도 불안정하여, 동작 패턴이 아직 안정화되지 않은 상태에서 주기마다 다른 형태로 수행되고 있음을 나타낸다. 이러한 구분은 현장에서 피험자의 학습 단계를 파악하고 지도 방향을 설정하는 데 유용한 근거를 제공하며, "안정적이지만 교정이 필요한 패턴"과 "패턴 안정화가 우선인 단계"를 식별할 수 있게 한다.

종합하면, 제안된 컨벡스 헐 기반 동적 안정성 판정은 숙련자와 일반인 간의 수행 차이를 전신-상체-하체 수준에서 정량적으로 변별할 수 있으며, 특히 하체 추진의 재현성이 숙련도를 구분하는 가장 민감한 지표임을 확인하였다. 민감도 분석에서도 하체의 비적합은 임계값 변경에 민감하지 않은 구조적 차이로 나타나, 이러한 변별력이 특정 임계값에 의존하지 않음을 확인하였다. 또한 숙련자 집단 내 개인별 재현성 비교에서 프로와 코치 간 뚜렷한 차이 없이 유사한 재현성을 보여, 기준선으로서 집단 일관성이 확인되었다. 분절별 판정 결과와 자체 재현성 분석은 동작의 어느 부위에서 일관성이 저하되는지를 식별하고, 피험자 학습 단계에 따른 지도 방향을 설정할 수 있는 근거를 제공한다. 이는 생활 스포츠 환경에서 정량적 기준에 기반한 동작 진단의 가능성을 보여주며, 기존 주관적 피드백 방식을 보완하는 수단으로서 활용 가능성을 시사한다.

V. Conclusions

본 논문은 전문 계측 장비 없이 단일 촬영 영상만으로 원핸드 케틀벨 스윙의 동적 안정성을 진단하기 위해, 컨벡스 헐(Convex Hull) 기반 중심점 궤적의 주기별 패턴 분석 방법을 제안하고 그 유효성을 검증하였다. 개별 관절의 순간적 좌표값 대신 관절점 집합의 외곽을 캡슐화하는 컨벡스 헐의 기하학적 성질로 전역 형태 지표를 구성함으로써, 일반 촬영 영상에서 발생하는 관절점 소실과 오검출의 영향을 완화하였다. 이를 주기 단위 중심점 궤적 패턴으로 변환한 뒤, 숙련자의 궤적을 기준선으로 설정하여 각 주기의 재현성을 동적 안정성의 판정 기준으로 정의하였다.

숙련자 3명의 12개 영상에서 유효 96주기, 일반인 13명의 24개 영상에서 유효 161주기를 수집하여 분석한 결과,

숙련자와 일반인 간 수행 차이가 전신·상체·하체 수준에서 정량적으로 변별되었다. 특히 하체는 일반인 161주기 전체가 비적합으로 판정되었으며, 임계값을 3.0σ 까지 완화하여도 적합률이 2.5%에 불과하여 골반 신전(Extension)에 의한 추진의 주기별 재현성이 숙련도를 구분하는 가장 민감한 지표임이 확인되었다. 상체는 23.6% 적합률로 세 분절 중 가장 높았으나 특정 피험자에 편중되었으며, 전신은 8.1% 적합률을 보였다. 숙련자 집단 내에서 프로와 코치 간 자체 재현성이 유사한 수준으로 나타나 기준선으로서의 집단 일관성이 확인되었다. 아울러 자체 재현성 분석을 통해, 일반인 중 일부는 나름의 패턴을 안정적으로 반복하되 숙련자와는 다른 형태로 고착된 경우와, 동작 패턴 자체가 아직 안정화되지 않은 경우를 구분할 수 있었다.

본 논문의 현장 적용 시사점은 다음과 같다. 첫째, 분절별 판정 결과는 동작의 어느 부위에서 일관성이 저하되는지를 식별할 수 있게 하여, 기존의 주관적 피드백 방식을 보완하는 정량적 진단 근거를 제공한다. 둘째, 숙련자 기준 판정과 자체 재현성 분석의 교차 해석을 통해, 구조적 교정이 필요한 단계와 패턴 안정화가 우선인 단계를 구분하여 지도 방향을 설정할 수 있다. 셋째, 전문 계측 장비 없이 단일 카메라 영상만으로 분석이 가능하므로, 생활 체육 현장의 접근성 제약을 완화할 수 있다.

본 논문의 한계는 다음과 같다. 첫째, 동적 안정성을 수행 안정성 관점의 주기 간 재현성으로 정의하였으나, 역학적 안정성이나 자세 안정성과 같은 다른 관점의 안정성 개념과의 관계는 다루지 않았다. 둘째, 숙련자 3명, 일반인 13명의 데이터는 다양한 체형, 성별, 수행 스타일을 충분히 반영하지 못하며, 기준선이 특정 조건에 편향되어 있을 가능성이 있다. 셋째, 동일한 입력 조건과 평가 목적을 공유하는 기존 방법이 부재하여 직접적인 비교를 수행하지 못하였다. 넷째, 분석의 다섯 단계에서 각 단계의 내재적 오류가 전파될 가능성이 존재하며, 각 설계 선택이 판정에 미치는 영향을 정량적으로 검증하지 못하였다.

향후 과제로는 다음과 같은 방향의 연구가 필요하다. 첫째, 본 논문에서 정의한 수행 안정성 관점의 재현성 지표가 역학적 안정성이나 자세 안정성과 어떤 관계를 갖는지를 확인함으로써, 제안 지표의 해석 범위를 확장할 수 있다. 둘째, 다양한 체형과 수행 스타일을 포함하는 숙련자 데이터가 축적되면 기준선의 대표성이 강화되어 판정의 신뢰도를 높일 수 있으며, 이를 통해 검사-재검사 신뢰도 등 측정 도구로서의 타당성 검증도 가능해질 것으로 기대된다. 셋째, 동일 입력 조건에서 구현 가능한 대안적 판정 방법과의 비교를 통해 제안 방법의 상대적 유용성을 확인

하고, 분절별 판정의 변별력을 객관적으로 평가할 수 있다. 넷째, 각 처리 단계의 파라미터 변동에 따른 민감도 분석을 수행하면 설계 선택의 근거를 체계적으로 확보하고, 분석의 자동화를 통해 재현성과 객관성을 높일 수 있다.

본 논문의 성과를 바탕으로 향후 다음과 같은 방향으로 확장이 가능하다. 본 논문은 측면(Sagittal Plane) 단일 시점의 영상을 대상으로 하였으나, 컨벡스 힐 기반 형태 요약의 원리는 정면이나 다중 시점 영상에도 적용될 수 있으므로, 시점 확장을 통해 관측할 수 있는 동작 특성의 범위를 넓힐 수 있다. 현재의 적합·비적합 이분법적 판정 역시, 이탈의 정도와 구간별 위치를 세분화하면 보다 구체적인 동작 피드백 정보를 제공하는 방향으로 발전시킬 수 있다. 아울러 본 논문은 원핸드 케틀벨 스윙을 대상으로 하였으나, 제한한 컨벡스 힐 기반 패턴 분석의 설계 원리는 주기적 반복 구조를 갖는 다른 탄도성 운동에도 적용 가능성이 있으므로, 다양한 동작으로의 확장 연구가 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the virtual convergence support program to nurture the best talents (IITP-2026-IITP-2026-RS-2024-00430997) grant funded by the Korea government(MSIT)

REFERENCES

- [1] McGill, Stuart M., and Leigh W. Marshall., "Kettlebell swing, snatch, and bottoms-up carry: back and hip muscle activation, motion, and low back loads." *The Journal of Strength & Conditioning Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 16-27, January 2012. DOI: 10.1519/JSC.0b013e31823a4063
- [2] Van Gelder, L. H., Hoogenboom, B. J., Alonzo, B., Briggs, D., and Hatzel, B., "EMG analysis and sagittal plane kinematics of the two-handed and single-handed kettlebell swing: A descriptive study," *International Journal of Sports Physical Therapy*, Vol. 10, No. 6, pp. 811-826, November 2015. PMID: 26618061
- [3] Marineau E, Ducas J, Mathieu J, Rodriguez AP, Descarreaux M, Abboud J, "From Novice to Expert: How Expertise shapes motor variability in sports biomechanics-a scoping review," *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol. 34, No. 8, e14652, August 2024. DOI: 10.1111/sms.14706

- [4] Dhawale AK, Smith MA, Ölveczky BP., "The role of variability in motor learning," *Annual Review of Neuroscience*, Vol. 40, pp. 479-498, July 2017. DOI: 10.1146/annurev-neuro-072116-031548
- [5] Beerse, Matthew, Cian Callahan, and Joaquin Barrios, "Self-directed kinematic adjustments when learning the kettlebell swing in young adults," *Sports Biomechanics*, Vol. 24, No. 4, pp. 842-858, April 2025. DOI: 10.1080/14763141.2022.2161409
- [6] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S.-E. Wei and Y. Sheikh, "OpenPose: Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 43, No. 1, pp. 172-186, January 2021. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2929257
- [7] M. Slembrouck, H. Luong, J. Gerlo, K. Schutte, D. Van Cauwelaert, D. De Clercq, B. Vanwaseele, P. Veelaert, and W. Phillips, *Multiview 3D Markerless Human Pose Estimation from OpenPose Skeletons*, *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, pp. 166-178, Auckland, New Zealand, February 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-40605-9_15
- [8] Uhlrich SD, Falisse A, Kidziński Ł, Muccini J, Ko M, Chaudhari AS, Hicks JL, Delp SL., "OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos," *PLOS Computational Biology*, Vol. 19, No. 10, e1011462, October 2023. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1011462
- [9] Mercadal-Baudart, C., Liu, C. J., Farrell, G., Boyne, M., Escribano, J. G., Smolic, A., Simms, C., "Exercise quantification from single camera view markerless 3D pose estimation," *Heliyon*, Vol. 10, No. 6, e27596, March 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27596
- [10] D. Pagnon, M. Domalain, and L. Reveret, "Pose2Sim: An end-to-end workflow for 3D markerless kinematics—Part 2: Accuracy," *Sensors*, Vol. 22, No. 7, 2712, April 2022. DOI: 10.3390/s22072712
- [11] F. P. Preparata, and M. I. Shamos, "Computational Geometry: An Introduction," Springer-Verlag, pp. 95-149, 1985.
- [12] M. M. Youssef, and V. K. Asari, "Human action recognition using hull convexity defect features with multi-modality setups," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 34, No. 15, pp. 1971-1979, November 2013. DOI: 10.1016/j.patrec.2013.01.019
- [13] T. Wollseifen, "Different methods of calculating body sway area," *Pharmaceutical Programming*, Vol. 4, No. 1-2, pp. 91-106, December 2011. DOI: 10.1179/175709311X13166801334271
- [14] Kutilek, P., Cakrt, O., Socha, V., Hana, K., "Volume of convex hull: a technique for quantifying human postural stability," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, Vol. 16, No. 02, 1650013, March 2016. DOI: 10.1142/S0219519416500135
- [15] Yang F, Pai YC., "Can sacral marker approximate center of mass during gait and slip-fall recovery among community-dwelling older adults?," *Journal of biomechanics*, Vol. 47, No. 16, 3807-3812, October 2014. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.10.027
- [16] J. W. Tukey, "Exploratory Data Analysis," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 39-55, 1977.
- [17] H. P. Vinutha, B. Poornima, and B. M. Sagar, *Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset*, *Information and Decision Sciences*, pp. 511-518, Bhubaneswar, India, April 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-7563-6_53
- [18] D. C. Montgomery, "Introduction to Statistical Quality Control, 8th ed.," John Wiley & Sons, pp. 67-112, 2019.

Authors



Jun-Hyeok Yun received the B.S. degree in Global School of Media from Soongsil University, Korea, in 2012. He is currently a candidate in the integrated M.S. and Ph.D. program in the Department of Media at

Soongsil University, Korea. His research interests include image processing, sports IT, artificial intelligence, and data modeling.



Il-Ju Ko received the B.S. degree in Computer Science and the M.S. and Ph.D. degrees in Computing from Soongsil University, Korea, in 1992, 1994 and 1997, respectively.

Dr. Ko joined faculty of the Global School of Media at Soongsil University, Seoul, Korea, in 2003. He is currently a Professor in the Global School of Media at Soongsil University. He is interested in image processing, sports IT, artificial intelligence, and Somatics.



Dong-Hyun Nam received the B.S. degree in Deptment of English Language and Literature from Soongsil University, Korea, in 2022. He is currently pursuing an integrated M.S. and Ph.D. degree in the Department of Metaverse

and Cultural Contents at Soongsil University, Korea. His research interests include image processing, sports IT, artificial intelligence, and data modeling.