

영상 기반 원격 심박수 추출을 통한 양궁 선수 경기 중 긴장도 분석

김시진¹, 안병선², 박송희², 문지연³, 하현빈¹, 이의철⁴

¹상명대학교 대학원 스포츠ICT융합학과 석사과정

²상명대학교 대학원 지능정보공학과 박사과정 및 석사과정

³상명대학교 딥러닝연구소 연구교수

⁴상명대학교 휴먼지능정보공학전공 교수 (교신저자)

gpdjqhldl2@gmail.com, 202433029@sangmyung.kr, 202432031@sangmyung.kr, jiyeon@smu.ac.kr, isc31201@naver.com, eclee@smu.ac.kr

Contactless Heart Rate Estimation for Tension Analysis of Archers during Competition

Sijin Kim¹, Byeong Seon An², Song Hee Park², Ji Yeon Moon³, Hyunbin Ha¹, Eui Chul Lee⁴

¹Dept. of Sports ICT, Graduate School, Sangmyung University

²Dept. of Intelligent Informatics, Graduate School, Sangmyung University

³Deep-Learning Research Center, Sangmyung University

⁴Dept. of Human-Centered AI, Sangmyung University

요약

본 연구는 실제 양궁 경기 영상에서 비접촉 방식으로 심박수를 추출하여 경기 중 선수의 긴장도와 성과 간의 관계를 분석하였다. 얼굴 영역 기반 rPPG(remote Photoplethysmography) 신호를 활용하여 심박수를 산출하고, 경기 점수 그룹(10점 vs 10점 미만)으로 구분하여 통계적 차이를 검증하였다. 분석 결과, 심박수가 높을수록 낮은 점수와 유의한 음의 상관관계($r=-0.6183$, $p<0.001$)를 나타냈으며, Mann-Whitney U 검정 결과 10점 그룹과 비10점 그룹 간 심박수의 차이가 유의함을 확인하였다($p=0.0004$). 이러한 결과는 비접촉 생체신호 분석 기술이 스포츠 경기력 평가와 훈련 피드백에 활용될 수 있는 가능성을 제시한다.

1. 서론

양궁은 고도의 정밀성과 지속적인 집중력이 요구되는 스포츠로, 선수의 순간적인 심리적 긴장 상태가 경기 결과에 직접적인 영향을 미친다. 경기 중 미세한 흔들림이나 주의력 저하가 곧바로 점수 하락으로 이어지기 때문에, 선수의 생리적·심리적 상태를 정량적으로 분석하고 이를 바탕으로 피드백을 제공하는 것은 경기력 향상을 위한 핵심 전략 중 하나로 간주된다. 특히 심박수(Heart Rate)는 긴장도와 집중 수준을 반영하는 대표적인 생리 지표로 널리 활용되어 왔으며, 다양한 스포츠 심리학 및 생리학 연구에서도 그 유의성을 인정받고 있다[1][2]. 기존 연구들에서는 주로 접촉식 센서나 웨어러블 기기를 이용하여 심박수를 측정하였고, 실험실 혹은 제한된 훈련 환경에서 수행되는 경우가 많았다. 이로 인해 실제 경기와 유사한 환경에서의 생체신호 반응을 파악하는 데는 한계가 존재했으며, 센서 착

용으로 인한 피로도나 데이터 왜곡, 경기력 간섭 등의 문제도 지적되었다[3][4]. 이러한 문제를 보완하기 위해 최근에는 카메라 기반의 비접촉 원격 심박수 측정 기술(remote photoplethysmography, rPPG)이 주목받고 있다.

특히 본 연구팀은 2024년 파리올림픽 양궁 경기의 공식 방송 중계 시스템에 비접촉 심박수 추정 기술을 적용한 실시간 시각화 시스템을 개발하여 실제로 운영하였다. 중계 화면에 실시간으로 표기된 선수들의 심박수는 전 세계 시청자들에게 큰 흥미를 불러일으켰으나, 이 기술이 단순한 시청 보조 요소를 넘어, 실제로 선수의 긴장도나 경기력과 어떤 연관성이 있는지를 과학적으로 검증할 필요성이 제기되었다. 본 연구는 바로 그 질문에서 출발한다.

정밀 스포츠 중목인 사격, 양궁, 골프 등에서는 심박수의 미세한 변화가 집중력, 감정 상태, 그리고 실질적인 경기력과 밀접히 관련됨이 기존 문헌에서도 반복적으로 보고되었다[5][6]. 특히 심박수가 안정적인

로 유지되는 선수가 더 나은 경기 결과를 보이는 경향이 확인되었으며, 이는 심박수 조절 능력이 경기 성과를 가늠하는 잠재적 지표가 될 수 있음을 시사한다.

따라서 본 연구는 실제 국제 양궁 경기의 방송 영상을 활용하여, 본 연구팀에서 개발한 비접촉 심박수 추정 기법을 적용하고, 이를 통해 추출된 심박수와 선수들의 경기 성과 간의 관계를 정량적으로 분석한다. 이를 통해 단순한 시청 보조 기술을 넘어, 비접촉 생체신호 분석이 선수의 심리 상태를 추론하고 경기력을 예측하는 과학적 도구로 활용될 수 있는지를 실증적으로 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 데이터셋

본 연구에서는 실제 경기 환경에서 촬영된 세계 양궁 선수권대회 및 하계 올림픽 경기의 공식 방송 영상 자료를 분석 대상으로 활용하였다. 해당 영상은 고해상도(HD 이상)의 프레임을 제공하며, 경기 중 선수의 상반신 및 안면이 비교적 안정적으로 촬영되어 있어 비접촉 생체신호 추출에 적합한 조건을 충족한다.

각 영상에서 선수의 얼굴 영역을 Region of Interest (ROI)로 수동 또는 반자동 방식으로 설정한 뒤, 프레임 단위로 ROI를 추출하였다. 경기 중 선수의 정면 또는 약간 측면이 드러나는 장면을 선별하였으며, 안정된 조명 및 노출 조건을 갖춘 구간만을 분석 대상으로 포함하였다. 총 8개국 24명의 선수에 대한 250+ 트라이얼(발사 장면) 데이터를 수집하였으며, 선수별 경기 점수와 타이밍 정보도 함께 정렬하여 통합 데이터셋을 구성하였다.

2.2 신호 처리

ROI로 설정된 얼굴 영역 내에서 피부 영역 추출은 YCbCr 색 공간 기반의 피부 색상 마스킹 기법을 활용하였다. 해당 기법은 피부색 분포의 Cb와 Cr 채널 범위를 정규화된 임계값으로 제한하여 적용하며, 조명 변화에 대한 강건성을 높이기 위해 프레임 간 평균 밝기 보정을 수행하였다.

피부 마스크가 적용된 ROI 내에서, 프레임마다 평균 G 채널(Green Channel)의 값을 계산하여 1차원 시계열 신호로 변환하였다. G 채널은 광용적맥파(PPG) 신호에서 혈류량 변화를 가장 잘 반영하는 것으로 알려져 있으며, 조명 반사 및 피부색 편차의

영향을 상대적으로 적게 받는다.

이후 시계열 신호에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 주파수 도메인에서 주요 파형 성분을 분석하고, 가장 높은 주파수 성분의 peak를 중심으로 분당 심박수(BPM)를 계산하였다. 추출된 심박수 데이터는 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 기반의 confidence score로 정량화되었으며, 본 연구에서는 confidence score가 0.7 이상인 데이터만 최종 분석 대상으로 채택하였다. 이는 노이즈에 의한 오검출 가능성을 줄이고, 분석 신뢰도를 확보하기 위함이다[7].

2.3 통계 분석

추출된 심박수와 해당 발사 장면의 경기 점수 간의 관계를 분석하기 위해, 비모수 상관분석(Spearman's rank correlation coefficient)을 적용하였다. 이 분석은 데이터가 정규분포를 따르지 않거나 순위 기반 관계를 평가할 때 유용하며, 심박수의 연속적 변화와 점수의 순위 간의 단조 관계를 파악할 수 있도록 해준다.

또한, 선수의 집중도 및 긴장도 차이에 따른 심박수 차이를 그룹 간 비교 분석하기 위해, 발사 결과가 10점인 경우(정중앙 명중)와 9점 이하인 경우(비 10점 그룹)로 데이터를 이분화하였다. 해당 두 그룹 간의 심박수 분포 차이를 검정하기 위해 Mann-Whitney U 검정을 수행하였다. 이는 비모수적 독립표본 비교 기법으로, 각 그룹의 중심 경향성(median)이 통계적으로 유의한 차이를 가지는지를 평가한다.

추가적으로, 분석 전 데이터의 통계적 가정을 검토하기 위해, 정규성 검정(Shapiro-Wilk test) 및 등분산성 검정(Levene's test)을 실시하였다. 두 조건 모두 충족되지 않았기에, 정규성 및 등분산성에 민감하지 않은 비모수 검정을 최종적으로 선택하였다[8].

3. 실험 결과

전체 데이터에 대해 Spearman 순위 상관분석(Spearman's ρ)을 실시한 결과, 선수의 심박수와 경기 점수 사이에는 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 확인되었다($\rho = -0.6183$, $p < 0.001$). 이는 심박수가 낮을수록 경기에서 높은 점수를 기록할 가능성이 높으며, 선수의 생리적 안정 상태가 경기 성과에 긍정적으로 작용함을 시사한다. 특히, 이러한 상관관계는 고정밀 집중이 요구되는 양궁과 같은 정밀 스포츠

포츠 종목의 특성과도 부합하며, 경기력 예측 또는 선수 코칭 도구로의 확장 가능성을 보여준다.

또한 발사 결과를 기준으로 10점 그룹(Perfect Shot)과 비 10점 그룹(Non-Perfect Shot)으로 데이터를 이분화한 뒤, 두 그룹 간 심박수 평균을 비교하기 위해 Mann - Whitney U 검정을 실시하였다. 그 결과, 두 그룹 간의 평균 심박수 차이는 통계적으로 유의미한 수준으로 나타났으며($p = 0.0004$), 10점 그룹이 평균적으로 더 낮은 심박수를 보였다. 구체적으로, 10점 그룹의 평균 심박수는 72 ± 3 bpm, 비10점 그룹의 평균 심박수는 85 ± 4 bpm로 측정되었으며, 이는 약 13 bpm에 달하는 유의한 차이를 의미한다.

해당 결과는 심박수가 선수의 경기 수행 중 긴장도 및 집중 상태를 반영하는 핵심 생리 지표로 활용될 수 있음을 뒷받침한다. 특히, 사전/사후의 생리적 분석 없이도 단일 경기 장면만으로도 비접촉 방식으로 긴장도를 간접 추론할 수 있다는 점에서 응용 가능성이 높다. 주요 통계 분석 결과는 다음의 표 1에 요약되어 있다.

<표 1> 심박수와 경기 점수 간 통계분석 결과

분석항목	결과	통계값	유의수준(p)
Spearman 상관분석	심박수 vs. 점수	$p = -0.6183$	< 0.001
Mann-Whitney U검정	10점 vs. 비10점	평균 72 ± 3 bpm vs. 85 ± 4 bpm	$= 0.0004$

4. 논의

본 연구는 실제 양궁 경기 환경에서 선수들의 심박수와 경기 성과 간의 연관성을 실증적으로 분석하였다. 비접촉 방식으로 추출된 심박수 데이터를 바탕으로, 점수가 높은 그룹일수록 평균 심박수가 유의미하게 낮게 나타나는 경향을 확인하였으며, 이는 기존 문헌에서 착용형 센서를 활용해 보고된 결과들과도 일치한다. 이러한 결과는 영상 기반 원격 생체신호 분석 기술이 기존 접촉식 센서를 대체하거나 보완할 수 있는 현실적인 대안임을 시사한다.

특히, 심박수의 상승은 선수의 불안 및 긴장 반응과 밀접한 관련이 있으며, 이는 집중력 저하와 더불어 실제 점수 하락으로 이어질 수 있다. 본 연구 결과는 이러한 생리적 지표가 단순한 참고자료를 넘어, 경기력에 실질적인 영향을 미치는 핵심 요소임을

을 뒷받침하며, 심박수 기반 긴장도 모니터링이 스포츠 현장에 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

또한 본 연구는 별도의 장비 설치 없이 방송용 경기 영상을 활용했다는 점에서 높은 실용성과 확장 가능성을 지닌다. 향후 스포츠 중계 시스템에 실시간 심박수 추정 기술을 접목함으로써, 관중에게는 몰입도 높은 생체정보 기반 해설을 제공하고, 코칭 스태프와 선수에게는 실시간 경기력 피드백과 심리 상태 분석 자료를 제공하는 새로운 응용 서비스로 발전할 수 있다. 더 나아가, 선수 훈련 과정에서도 심박수 기반의 긴장도 모니터링이 스트레스 조절 훈련, 집중력 향상 전략 수립 등 체계적인 심리 훈련의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

이러한 가능성은 영상 기반 생체신호 기술이 향후 스포츠 과학, 방송 콘텐츠, 훈련 전략의 융합 지점에서 핵심적인 역할을 할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 국제 양궁 경기의 실제 방송 영상을 기반으로, 비접촉 방식의 심박수 추출 기법을 적용하고, 이로부터 얻은 생체 신호와 선수의 경기 점수 간의 관계를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 심박수와 경기 성과 사이에는 유의미한 음의 상관관계가 존재함을 확인할 수 있었으며, 이는 심박수가 낮을수록 더 나은 경기 결과를 얻는 경향이 있다는 것을 시사한다.

이러한 결과는 영상 기반의 원격 생체신호 측정 기술이 기존의 착용형 센서 기반 접근법을 대체하거나 보완할 수 있는 가능성을 보여주며, 향후 실제 스포츠 경기력 분석 및 선수 훈련 피드백 시스템에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사한다. 특히, 비접촉 기술은 경기 중 선수의 생리적 상태를 방해하지 않으면서도 실시간으로 데이터를 확보할 수 있다는 점에서 스포츠 분야에서의 응용 가치를 높인다.

향후 연구에서는 심박수뿐만 아니라 심박변이도, 호흡수 등 다양한 생리적 지표를 통합적으로 분석함으로써, 보다 다차원적인 경기력 평가 모델을 개발할 계획이다. 이를 통해, 단순한 결과 분석을 넘어 선수 개별의 심리 상태를 반영한 맞춤형 피드백과 훈련 전략 수립이 가능할 것으로 기대된다. 궁극적으로 이러한 접근은 스포츠 과학, 방송 기술, 생체신호 분석의 융합을 통해 새로운 형태의 스마트 스포츠 분석 생태계를 형성하는 데 기여할 수 있을 것이다.

사사

이 연구는 문화체육관광부와 국민체육진흥공단의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Lu, Y., Zhong, S., "Contactless Real-Time Heart Rate Predicts the Performance of Elite Athletes: Evidence From Tokyo 2020 Olympic Archery Competition," *Psychological Science*, vol. 34, pp. 384 - 393, 2023.
- [2] Suh, K.H., Lee, E.C., "Contactless physiological signals extraction based on skin color magnification," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 26, no. 6, pp. 063003, 2017.
- [3] Açıkada, C., Ertan, H., Tetik, S., "Effect of heart rate on shooting performance in elite archers," *Heliyon*, vol. 5, e01428, 2019.
- [4] Vrbik, A., Frković, J., Perić, M., "Heart rate values and levels of attention and relaxation in expert archers during shooting," *Hrvatski Športskomedicinski Vjesnik*, vol. 30, pp. 21 - 29, 2015.
- [5] Keast, D., Elliott, B., "Fine body movements and the cardiac cycle in archery," *Journal of Sports Sciences*, vol. 8, pp. 203 - 213, 1990.
- [6] Ogasawara, T., Sugimoto, T., Oka, N., "Archery skill assessment using an acceleration sensor," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 51, pp. 221 - 228, 2021.
- [7] Wu, Y.C., Tsai, T.Y., Lin, C.T., "Motion robust remote photoplethysmography measurement during exercise," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1 - 14, 2023.
- [8] Battaglini, M.P., de Oliveira Silva, A.G., de Oliveira, J.A., "Analysis of progressive muscle relaxation on psychophysiological variables in athletes," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, 17065, 2022.