

공간음향 피드백 기반 전방머리자세 교정 시스템*

이민재^o, 박상근

경희대학교 소프트웨어융합학과

2alswo7@khu.ac.kr, sk.park@khu.ac.kr

A Forward Head Posture Correction System Based On Spatial Audio Feedback

Minjae Lee^o, Sangkeun Park

Department of Software Convergence, Kyung Hee University

요약

본 연구는 무선 이어폰의 IMU 센서와 공간 음향 기술을 결합하여 노트북 사용자의 전방머리자세를 자연스럽게 교정하는 피드백 시스템을 제안한다. 기존의 탐지 기술 중심 연구에서 벗어나, 주변적 상호작용(Ambient Interaction)을 통해 작업 몰입을 방해하지 않는 행동 변화 유도에 초점을 맞췄다. 에어팟의 헤드 트래킹 데이터로 자세 이탈을 실시간 감지하고, 음원의 방향과 거리감을 왜곡하여 사용자의 정자세 회귀를 유도한다. 사용자 6명을 대상으로 한 사용성 테스트 결과, 참가자들은 공간음향 및 시각 피드백을 직관적인 자세 이탈 신호로 인지하고 스스로 자세를 교정함을 확인하였다. 본 연구는 일상적인 기기를 활용해 자세 관리의 범위를 감지 기술에서 행동 유도 UX로 확장했다는 데 그 의의가 있다.

1. 서론

현대 사회에서 디지털 기기를 활용한 작업이 일상화됨에 따라 컴퓨터 및 노트북 사용 시간은 지속적으로 증가하고 있다. 특히 노트북은 뛰어난 휴대성으로 장소의 제약 없이 사용할 수 있는 대표적인 작업 도구로 자리 잡았다. 그러나 노트북은 화면과 키보드가 일체형으로 결합된 구조적 특성으로 인해 사용자가 인체공학적으로 불안정한 자세를 취하게 만든다[1].

이러한 부적절한 자세의 지속은 전방머리자세(Forward Head Posture), 이른바 '거북목 증후군'을 유발하는 핵심 원인이 된다. 전방머리자세는 목과 어깨 주변 근육의 피로도를 급격히 높일 뿐만 아니라 경추 구조에 과도한 하중을 부여하여 만성 통증과 경추 변형의 위험을 초래한다[2, 3]. 더욱이 이는 근골격계 질환을 넘어 신경계 스트레스와도 직결되어, 휴식 시에도 뇌 신경계의 피로도를 가중시키는 것으로 알려져 있다[4].

전방머리자세 문제를 해결하기 위해 비전 기반이나 웨어러블 센서를 활용한 다양한 탐지 기술이 연구되어 왔다[5, 6, 7, 8]. 최근에는 무선 이어폰의 IMU 센서를 활용하여 별도의 장비 없이도 정밀하게 자세를 측정하는 수준까지 발전하였다[9, 10]. 그러나 기존 연구들은 대부분 자세를 얼마나 정확하게 탐지하느냐에 집중해 왔으며, 탐지 이후 사용자의 실질적인 바른 자세 유도를 어떻게 이끌어내고 유지할 것인가에 대한 논의는 상대적으로 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 공간 음향과 헤드 트래킹 기술을 결합하여 사용자가 자연스럽게 본인의 전방머리자세를 인식하고 자세를 교정하도록 유도하는 시스템을 제안한다. 사용자의 머리 위치에 따라 소리의 방향, 거리, 왜곡 정도를 실시간으로 변화시킴으로써, 사용자는 알림 등의 인지 부하가 큰 피드백 없이도 자신의 자세 이상을 직관적으로 인지하게 한다. 본 연구는 전방머리자세 교정 문제를 단순한 탐지 기술의 영역에서 자연스러운 행동 변화를 유도하는 UX 중심으로 확장하고, 일상적인 기기를 활용해 실생활 적용 가능성을 높였다는 데 그 의의가 있다.

2. 관련연구

2.1. 신체 탐지 및 자세 검출 기술의 발전

사용자의 전방머리자세 탐지 연구는 크게 비전 기반과 센서 기반으로 분류된다. 카메라를 통해 관절 좌표를 추출하고 자세를 분류하는 연구[5, 6]나, 목걸이 형태의 웨어러블 센서를 활용한 연구[7]가 대표적이다. 나아가 비전과 가속도 센서를 결합한 하이브리드 방식이 연구되기도 했다[8]. 그러나 이러한 방식은 카메라 촬영에 따른 심리적 압박감과 프라이버시 문제를 야기하거나, 전용 센서를 매번 착용해야 하는 번거로움이 있다. 최근에는 이를 해결하고자 무선 이어폰 내장 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서를 활용해 전방머리자세를 탐지하는 연구가 수행되고 있다[9, 10]. 다만, 기존 연구는 대부분 탐지 정확도 향상에 치중하고 있으며, 탐지 이후 사용자의 바른 자세 유지를 어떻게 지속적으로 이끌어낼 것인지에 대한 논의는 부족한 실정이다.

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

2.2. 피드백 방식과 행동 변화 유도 전략

효과적인 자세 교정은 단순 탐지를 넘어 실질적인 행동 변화로 이어져야 한다. Fogg의 행동 모델[11]과 디지털 넛지 이론[12]에 따르면, 알림 등의 명시적 경고보다 인지 자원 소모가 적은 방식이 행동 변화 유도에 효과적이다. 특히 스스로의 상태를 인식하도록 돕는 자기 모니터링과 주변적 상호작용(Ambient Interaction)은 사용자의 업무 수행을 방해하지 않으면서도 자세를 인지하도록 하는데 효과적이다. 이는 기존의 반복적 알림이 주는 피로도를 줄이고, 작업 흐름을 유지하며 장기적인 교정 효과를 유도할 수 있다는 장점이 있다[13].

2.3. 기존 연구와의 차이점 및 독창성

기존 연구가 전방머리자세의 탐지 기술 자체에 집중했다면, 본 연구는 이를 바탕으로 한 지속적인 행동 변화 유도에 초점을 맞춘 공간 음향 피드백 기반 전방머리자세 교정 시스템을 제안한다. 본 시스템에서는 작업 맥락을 저해하는 시각적 팝업이나 단순 비프음 대신, 주변적 상호작용 기반의 공간 음향 기술을 활용해 자세 변화에 따른 소리의 방향과 거리감을 직관적으로 전달한다. 이는 사용자의 작업 방해를 최소화하는 동시에 인지적 반사를 유도하여 무의식 중에도 정자세를 유지하는데 효과적일 수 있다.

3. 시스템 개발

본 연구에서는 에어팟의 내장 IMU 센서를 활용해 머리 자세를 실시간으로 추정하고, 이를 기반으로 전방머리자세를 탐지하여 공간 음향 피드백을 전달하는 시스템을 개발하였다¹. 시스템 실행 시 사용자가 취한 초기 3초간의 자세를 개인별 정자세 기준점 및 공간 음향 기준 좌표로 설정한다. 이후 실시간으로 산출되는 자세 불량도와 머리의 기울임 방향에 따라 청취 중인 음원의 공간 음향을 왜곡시킴으로써, 사용자가 무의식중에 자세를 회복하도록 유도한다.

3.1. 자세 인식 알고리즘

사용자의 자세 인식을 위해 Apple의 하드웨어 센서 제어 프레임워크인 CoreMotion²를 활용한다. 사용자가 착용한 에어팟 내장 IMU 센서로부터 머리의 미세한 움직임을 25Hz에서 50Hz 빈도로 실시간 수집할 수 있다. 수집하는 데이터는 다음과 같은 3차원 회전축 기준으로 변환되어 분석에 활용된다.

- Pitch: 좌우 귀를 잇는 X 축을 중심으로 한 회전으로, 고개의 앞뒤 숙임 정도를 의미
- Yaw: 정수리에서 목으로 내려오는 Y 축을 중심으로 한 회전으로, 고개의 좌우 회전 정도를 의미
- Roll: 코에서 뒷통수를 관통하는 Z 축을 중심으로 한 회전으로, 고개의 측면 기울임 정도를 의미





이 데이터를 기반으로 경추에 가해지는 물리적 하중 변화를 근거로 자세 불량도를 산출할 수 있다. 선행 연구에 따르면, 성인의 머리

무게는 중립 자세에서 경추에 정상적인 하중을 주지만, 고개를 숙이는 각도가 커질수록 하중은 급격히 증가한다[3, 14]. 전방머리자세와 직접 연관된 Pitch를 핵심 지표로 삼고, 고개 회전(Yaw) 및 기울임(Roll)에 가중치를 부여하여 고개 숙임뿐 아니라 비대칭적 좌우, 측면 기울임까지 반영할 수 있도록 '자세 불량도'를 산출했다.

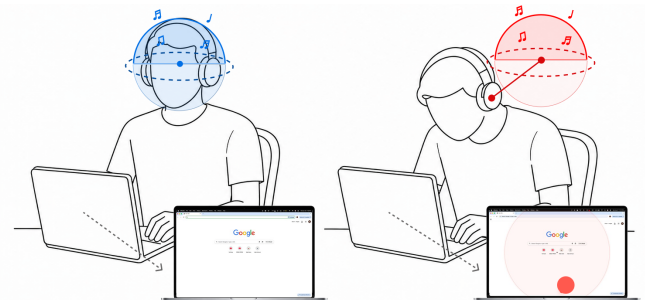
$$\text{자세 불량도} = \max(\text{Pitch}, 0) + |\text{Yaw}| \times 0.5 + |\text{Roll}| \times 0.8$$

산출된 '자세 불량도'가 초기 정자세 기준점으로부터 15°이상 이탈한 경우, 자세 이탈 상태로 판단하고 공간음향 피드백을 적용한다. [표 1]은 사용자의 자세에 따른 Pitch, Yaw, Roll, 자세 불량도 수치값 예시를 나타낸다.

[표 1] 자세 불량도 기반 전방머리자세 분류

				
Pitch	0°	15°	30°	10°
Yaw	0°	0°	0°	10°
Roll	0°	0°	0°	20°
자세 불량도	0°	15°	30°	31°

3.2. 공간 음향 피드백



[그림 1] 자세 이탈에 따른 공간음향 및 시각 피드백

본 연구에서는 사용자가 에어팟으로 음악을 들으며 주업무에 집중하는 상태에서 전방머리자세가 탐지되면 소리의 방향감과 거리감 변화를 통해 자신의 자세 이상 수준을 직관적으로 인지하도록 돕기 위한 공간 음향 피드백 기법을 제안한다. 이를 위해, Apple의 오디오 처리 프레임워크인 AVFoundation³을 활용하여, 사용자의 머리를 중심으로 하는 3차원 가상 음향 공간을 구축한다 [그림 1].

시스템은 먼저 사용자가 취한 정자세 상태의 머리 위치 좌표를 음향이 가장 선명하고 균형 있게 들리는 오디오 기준점으로 정의한다. 정자세 유지 시에는 가상의 음원이 사용자의 머리 중심에 위치하게 되어 소리가 평소와 다를없이 명확하게 전달되는 상태를 유지한다.

그러나 사용자의 자세가 흐트러져 머리 위치가 음향 중심 영역을

¹ 데모영상: <https://www.youtube.com/shorts/r-g8HafYU68>

² Apple Inc. "Core Motion," Apple Developer Documentation. <https://developer.apple.com/documentation/coremotion>

³ Apple Inc. "AVFoundation," Apple Developer Documentation. <https://developer.apple.com/documentation/avfoundation>

벗어나게 되면 실시간으로 공간 음향 변형이 발생한다. 고개가 숙여지거나 회전된 특정 방향으로 음원의 공간 방향성을 전이시켜 소리가 한쪽으로 치우쳐 들리게 함으로써 자세의 이탈 방향을 인지시키는 방식이다. 이와 동시에 자세 이탈 정도가 심화될수록 음원과의 가상 거리가 더 멀어지도록 설정하여 소리의 선명도를 낮추고 청각적 소외감을 유발하여 사용자로 하여금 교정의 필요성을 느끼도록 한다.

이러한 청각 피드백을 보조하기 위해 화면 오버레이 기반의 시각 피드백을 함께 제공한다. 사용자 머리의 움직임 편차를 실시간 위치 및 색상 변화로 노트북 화면 상에 시각화하여 사용자가 방향 정보를 더욱 직관적으로 인지하도록 지원한다. 이를 통해 사용자는 청각과 시각 정보를 통합적으로 인지하여, 자신의 자세가 어느 방향으로 얼마나 이탈했는지 정밀하게 파악할 수 있다. 이러한 다중 감각 피드백은 소리가 다시 가깝고 선명하게 들리는 영역으로 회귀하려는 사용자의 본능적인 반응을 이끌어냄으로써 고개와 상체를 정자세로 자연스럽게 조정하도록 유도한다.

4. 사용성 평가

본 연구에서 제안한 시스템의 사용성 및 효과를 검증하기 위해 대학생 6 명(남성 2 명, 여성 4 명)을 대상으로 파일럿 테스트를 수행했다. 참가자들은 본 연구에서 제안한 시스템에 대한 설명없이 기능을 활성화하지 않은 환경에서 30 분간 에어팟으로 음악을 들으며 각자 원하는 작업을 수행했다. 그 결과, 모든 참여자가 5 분 내로 전방머리자세를 취했으며 그 자세를 유지한 채 작업을 지속하는 양상이 관찰되었다. 반면, 본 시스템에 대한 안내 후 활성화 시킨 후에는 음원의 왜곡과 거리감 변화로 인해 본인의 자세 불량을 인지하고 자세를 즉각 고쳐잡는 반응을 보였다. 특히 소리가 머리 중심에서 멀어지는 청각적 변화를 감지한 참가자들이 소리가 다시 선명하게 들리는 기준점으로 회귀하기 위해 고개와 상체를 능동적으로 조정하는 행동이 공통적으로 관찰되었다.

실험 종료 이후, 시스템의 전반적인 사용성을 측정하기 위해 SUS(System Usability Scale)[15] 평가를 진행한 결과, 평균 77.5 점(SD=19.7)으로 우수한 사용성을 확인할 수 있었다[16]. 이는 본 시스템이 초기 프로토타입 단계임에도 불구하고 전반적인 사용성 측면에서 긍정적으로 평가받았음을 시사한다. 이를 통해 공간 음향 기반의 피드백이 사용자의 작업 몰입을 저해하지 않으면서도 인지적 반사를 통해 자연스러운 행동 변화를 유도할 수 있음을 확인했다.

5. 결론

본 연구는 무선 이어폰의 IMU 센서와 공간 음향 기술을 결합하여 사용자의 작업 몰입을 저해하지 않으면서도 자연스러운 자세 교정을 유도하는 행동 변화 중심의 시스템을 제안하였다. 사용자 테스트를 통해 공간 음향 피드백이 추가적인 인지 부하 없이 실질적인 교정 행동을 이끌어내는 데 효과적임을 확인하였으며, 일상적인 기기를 활용해 실생활 적용 가능성을 높였다는 점에서 연구의 의의가 있다. 향후에는 보다 대규모의 실험군을 대상으로 자세 개선 효과를 정량적으로 분석하여 시스템의 완성도를 더욱 높여 나갈 계획이다.

참고문헌

- [1] Straker et al. "A comparison of the postures assumed when using laptop computers and desktop computers", Applied Ergonomics, 1997
- [2] Guo et al. "Effects of Laptop Screen Height on Neck and Shoulder Muscle Fatigue and Spine Loading for Office Workers," WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation, 2024
- [3] Hansraj, K. K. "Assessment of Stresses in the Cervical Spine Caused by Posture and Position of the Head," Surgical Technology International, 2014
- [4] Jung et al. "Effect of Forward Head Posture on Resting State Brain Function," Healthcare, 2024
- [5] Lee et al. "Recognition of Forward Head Posture Through 3D Human Pose Estimation With a Graph Convolutional Network: Development and Feasibility Study," JMIR Formative Research, 2024
- [6] Park and Jung, "Real-Time Forward Head Posture Detection and Correction System Utilizing an Inertial Measurement Unit Sensor," Applied Sciences, 2024
- [7] Chung et al, "Design and Implementation of a Novel System for Correcting Posture Through the Use of a Wearable Necklace Sensor," JMIR mHealth and uHealth, 2019
- [8] Vorapojsit et al. "Quantifying Sitting Posture: A Pilot Feasibility Study of Computer Vision and Wearable Sensors (Posture Lab) Using a Manikin Model," Wearable Technologies, 2025
- [9] Radhakrishnan et al. "Applying 'Earable' Inertial Sensing for Real-time Head Posture Detection," PerCom Workshops, 2021
- [10] Chhaglani and Seefeldt, "NeckCare: Preventing Tech Neck using Hearable-based Multimodal Sensing," arXiv preprint, 2024
- [11] Fogg, B. J. "A Behavior Model for Persuasive Design," Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology, 2009
- [12] Weinmann et al. "Digital Nudging," Business & Information Systems Engineering, 2016
- [13] Consolvo et al. "Activity Sensing in the Wild: A Field Trial of UbiFit Garden," Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2008.
- [14] 질병관리청 국가건강정보포털, "일자목(거북목)증후군", 질병관리청, 2025.
- [15] Brooke. "SUS - A Quick and Dirty Usability Scale," Usability Evaluation in Industry, 1996.
- [16] Bangor et al. "An Empirical Evaluation of the System Usability Scale," International Journal of Human-Computer Interaction, 2008.