

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Մինաս Ասլանյան

**ՄԱՐԴՈՒ ՇԱՐԺՈՂԱԿԱՆ ՎԱՐՔԱԳԾԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ**

Ե.13.04 «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և ցանցերի մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

INSTITUTE OF INFORMATICS AND AUTOMATION PROBLEMS OF NAS RA

Minas Aslanyan

**DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ENVIRONMENT FOR THE AUTOMATED ANALYSIS OF
HUMAN MOTOR BEHAVIOR**

SYNOPSIS

For obtaining a candidate's degree in the field of technical sciences 05.13.04 "Mathematical and software support of computers, complexes, systems and networks".

YEREVAN – 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր. Լ. Հ. Ասլանյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տեխ. գիտ. դոկտոր Ս.Ս. Սարգսյան
ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու Վ.Գ. Սարգսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Պետական Համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը կկայանա 2026թ. հուլիսի 9-ին, ժ. 13:00-ին ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գործող 037 «Ինֆորմատիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում հետևյալ հասցեով՝ Երևան, 0014, Պ. Սևակի 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱՊԻ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. հունիսի 8-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական

քարտուղար ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր՝



Մ. Ե. Հարությունյան

The topic of the dissertation was approved at the Institute of Informatics and Automation Problems of NAS RA.

Scientific supervisor: L.H. Aslanyan, D. Ph. M. S.

Official opponents: Dr. Tech. Sci. S. S. Sargsyan
Cand. Phys.-Math. Sci. V. G. Sargsyan

Leading organization: Yerevan State University

The defense will take place on July 9, 2026, at 13:00, at the Specialized Council 037 “Informatics” at the Institute of Informatics and Automation Problems of NAS RA.

Address: Yerevan, 0014, P. Sevak 1.

The Dissertation is available at the library of IIAP NAS RA.

The synopsis is delivered on 8th of June 2026.

Scientific Secretary of the Specialized Council, Dr. P.-M. Sci.



M. E. Haroutunian

Relevance of the subject

The relevance of this dissertation is determined by the growing need for accessible, intelligent, and objective technologies for supporting physical activity, exercise training, and rehabilitation outside traditional clinical and laboratory environments. In recent years, mobile devices, computer vision methods, and artificial intelligence technologies have created new opportunities for analyzing human movement in real time without expensive motion-capture systems or constant specialist supervision.

Physical activity plays an important role in maintaining health, preventing musculoskeletal disorders, improving functional mobility, and supporting rehabilitation. However, the effectiveness of physical exercise strongly depends on correct execution technique, appropriate movement control, and regular feedback. In unsupervised or home-based training conditions, users often perform exercises with incorrect posture, limited range of motion, asymmetry, or compensatory movement patterns. These errors may reduce the effectiveness of training and, in some cases, increase the risk of overload or injury.

Traditional rehabilitation and fitness programs usually rely on verbal instructions, images, or pre-recorded video demonstrations. Although these tools are useful, they do not provide individualized real-time assessment of the user's actual movement. In clinical settings, specialists can visually evaluate posture and movement quality, but continuous professional supervision is not always available due to cost, time, distance, and limited access to rehabilitation services. Therefore, there is a clear need for automated systems that can observe, analyze, and provide feedback on human movement in a practical and scalable way.

Modern pose estimation technologies make it possible to detect key points of the human body using ordinary smartphone cameras. Combined with machine learning, action recognition, biomechanical feature extraction, and intelligent feedback generation, these methods can be used to evaluate exercise performance, recognize movement patterns, count repetitions, detect errors, and support personalized training. Such systems are especially relevant for mobile health, remote rehabilitation, sports training, preventive healthcare, and digital wellness applications.

The subject is also relevant from a scientific and technical perspective. Accurate human motion analysis in real-world conditions remains a challenging problem because of variations in body shape, camera position, lighting, clothing, occlusion, movement speed, and exercise complexity. Developing robust methods for mobile pose estimation, action recognition, and motion quality assessment can contribute to the improvement of intelligent human-computer interaction systems and practical AI-based health technologies.

Thus, the selected subject is relevant both scientifically and practically. It addresses an important interdisciplinary problem at the intersection of artificial intelligence, computer vision,

biomechanics, mobile computing, physical activity training, and rehabilitation. The development of intelligent mobile systems for human motion analysis can improve accessibility, personalization, and effectiveness of exercise-based interventions, while also contributing to the advancement of modern digital health technologies.

Objectives of the Work Are

- **Develop an AI-Driven Physical Activity and Rehabilitation Mobile Environment**
 - Design and implement a front-camera-based mobile app capable of capturing users' movements in real time.
 - Integrate optimized 3D pose-estimation models that run efficiently on typical smartphones (quantized CNN backbones, lightweight geometric modules).
 - Ensure robustness under variable lighting, backgrounds, and occlusions typical of at-home environments.
- **Build an Accurate Real-Time 3D Pose-Estimation Pipeline**
 - Combine markerless single-view methods with geometric reasoning to reconstruct joint positions in three dimensions.
 - Incorporate error-correction strategies for temporary pose dropouts or jitter.
 - Validate positional accuracy against IMU-based ground truth captured from wearable sensors.
- **Implement Temporal Motion Analysis for Error Detection**
 - Segment continuous exercise streams into individual repetitions using dynamic time warping based auto-correlation and constrained optimization.
 - Quantify biomechanical parameters (joint angles, velocities) and flag deviations from ideal movement patterns.
 - Generate an "error rate" metric for each rep to inform user feedback.
- **Integrate an Interactive 3D Virtual Trainer**
 - Create a reusable, animated 3D character driven by prerecorded motion-capture data from IMUs.
 - Provide real-time visual demonstrations synchronized to the user's own camera feed.
 - Embed a TTS engine for dynamic verbal guidance, adjusting prompts based on detected form errors.
- **Optimize for On-Device Performance**
 - Apply model quantization and pruning to minimize inference latency (<100 ms per frame).

- Implement multi-threaded pipelines and hardware acceleration (e.g., NNAPI, Metal) where available.

Practical Significance

This mobile AI workout system delivers immediate, real-world advantages across safety, accessibility, personalization, cost-efficiency, and scalability:

- **Enhanced Safety:** Real-time error detection and feedback reduce injury risk during unsupervised workouts at home.
- **Wider Accessibility:** A standalone mobile solution removes the need for expensive equipment or studio memberships.
- **Personalized Coaching:** Dynamic, data-driven insights and virtual trainer guidance adapt to each user's performance and progress.
- **Cost Efficiency:** Leverages existing smartphone hardware, minimizing additional expenses for users and developers.
- **Scalable Deployment:** Optimized on-device models ensure broad compatibility across a range of consumer smartphones.

The methods of research

This research followed a mixed-method engineering workflow that began with a critical survey of state-of-the-art 3D human-pose estimation and exercise-analysis literature to frame the problem and requirements. We then built a two-stage vision pipeline that detects 2D keypoints on mobile devices and lifts them to 3D with lightweight CNN and transformer modules, selecting architectures through comparative experiments on the Human3.6M benchmark and on-device latency tests. To generate high-fidelity ground-truth motions for a virtual trainer and to validate the vision models, we captured 180 exercise sequences with a portable 19-sensor IMU suit, cleaned the data in Rokoko Studio, and retargeted the trajectories to Unity avatars. Real-time activity recognition inside the app combines dynamic-time-warping + k-nearest-neighbour matching for rapid template while a rule-based engine converts joint-angle thresholds into spoken form and correction advice. Repetition counting is handled by a noise-robust sliding-window zero-crossing finite-state machine that optionally verifies bilateral joints to suppress false positives during compound lifts. Finally, we embedded the models in a Flutter/Unity mobile application, conducted benchmark tests on mid-tier smartphones, and ran a small user study that measured pose-estimation accuracy, feedback latency and perceived engagement, the results of which are summarised in Chapter 6.

Structure and scope of work

The dissertation **consists of 7 chapters and a list of used literature.**

It is written on **140 pages**, cites **73 literature sources**, and includes **30 figures and 2 tables.**

The work is organized as follows:

Scientific novelty

This research introduces several key innovations that advance the field of AI-driven human motor behaviour analysis:

- **Real-Time Biomechanical Error Metric:** Proposes a new “Error Rate” metric combining temporal alignment (via DTW autocorrelation) with per-joint angular deviation analysis, enabling fine-grained quantification of form faults on a rep-by-rep basis.
- **On-Device Model Optimization for Mobile Environments:** Develops a compression and pruning strategy that tailors a convolutional-geometric pose network to mobile CPUs/NPUs without sacrificing sub-100 ms frame-rate performance.
- **Interactive Multimodal Feedback Loop:** Integrate a 3D virtual trainer agent: synthesized from IMU-captured motion clips-with a context-aware Text-to-Speech (TTS) system.
- **Robustness Across Uncontrolled Home Settings:** Demonstrates robustness to real-world challenges (environmental changes, background clutter, clothing variation) by embedding a lightweight semantic segmentation stage that adaptively masks the subject from complex scenes.
- **Empirical Validation:** Establishing the practical efficacy of the proposed ecosystem through rigorous experimental validation, specifically focusing on movement quality enhancement and error reduction.

The novelty of the proposed approach lies not in a single algorithmic improvement, but in a unified, end-to-end framework that combines real-time 3D pose estimation, temporal motion understanding, biomechanical error quantification, and interactive coaching into a portable, on-device solution.

The structure and volume of the work. Material results of this work which includes 140 pages, 13 tables and also 34 figures. The main results of the work were published in four scientific

publications: IEEE EDUCON 2024, Pattern Recognition and Image Analysis in 2024 and 2026, and CSIT 2023, and were reported at IIAP NAS RA and CSITseminars.

Contents of Research

Chapter 1. Introduction

The first chapter substantiates the relevance of the research topic and formulates the main scientific problem. It shows that the growth of home workouts, remote rehabilitation, and app-guided physical activity has created demand for intelligent systems capable of objective movement assessment outside laboratory settings. Traditional video-guided training is accessible, but it lacks the real-time supervision needed to prevent incorrect movement execution, especially in exercises where trunk posture, joint alignment, and timing are critical.

1.1. Research motivation and technical challenges

The chapter identifies the core technical challenges addressed by the dissertation: accurate 3D pose estimation under uncontrolled mobile conditions; temporal segmentation of continuous motion into repetitions and phases; interpretable biomechanical error detection; creation of a high-quality reference exercise library; real-time synchronization of visual and verbal feedback; and optimization of the analytical pipeline for resource-constrained mobile devices. This chapter also introduces the scientific novelty of the work, which lies in combining pose estimation, temporal movement analysis, IMU-based reference motion capture, a 3D virtual trainer, and mobile on-device feedback into a single end-to-end system.

Chapter 2. CNN-Based Pose Estimation with BlazePose

This chapter describes the CNN-based pose-estimation module used as the practical backbone of the proposed workout-analysis system. Instead of a heavy multi-stage transformer pipeline, the mobile implementation relies on BlazePose, a compact detector-tracker architecture designed for realtime inference on smartphones. The method is particularly suitable for fitness analysis because it keeps the subject centered, estimates full-body landmarks, and preserves low latency during continuous exercise execution.

2.1. Core BlazePose Design

BlazePose is designed for real-time, single-person body tracking on mobile devices. Its core idea is to avoid running a heavy body detector on every frame. Instead, the system uses a detector-tracker setup: the detector initializes the person region, and the tracker predicts

landmarks and a refined region of interest for subsequent frames. The detector is invoked again only when tracking confidence falls.

The method reconstructs a 33-keypoint body topology that includes the face contour anchors, shoulders, elbows, wrists, hips, knees, ankles, heels, and foot tips. This denser topology is valuable for exercise analysis because it provides more detailed lower-limb and upper-body geometry than a minimal 17-keypoint scheme.

2.2. Key design choices for mobile fitness analysis

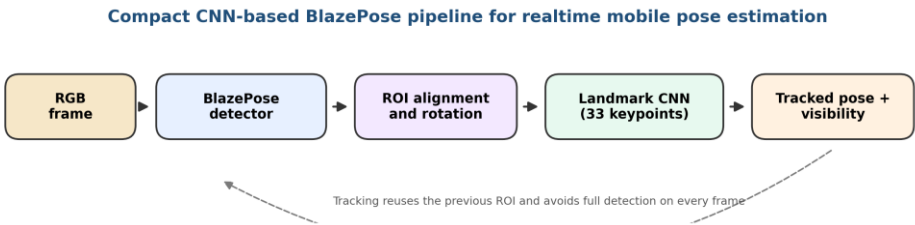


Figure 2.1. Compact BlazePose pipeline for detector-guided mobile landmark regression.

Component	Role in the system
Detector + ROI alignment	Normalizes body position, scale, and rotation before landmark inference.
33-keypoint landmark model	Captures limbs, trunk, feet, and face-related anchors required for exercise analysis.
Tracker reuse	Avoids costly redetection on every frame and preserves realtime feedback.
Visibility / presence output	Supports occlusion handling and decides when the system should relocalize the subject.

2.3. Landmark topology and mathematical formulation

The formulas summarize the operations that make BlazePose efficient in practice: nonlinear feature extraction, body-centered cropping, rotation-normalized tracking, compact landmark regression, and geometric evaluation through MPJPE. In the context of this dissertation, BlazePose is preferable to larger CNN or transformer alternatives because it preserves enough anatomical detail for exercise analysis while still operating at interactive speed on mobile devices. This makes it a practical front-end for repetition detection, rule-based movement assessment, and virtual trainer feedback.

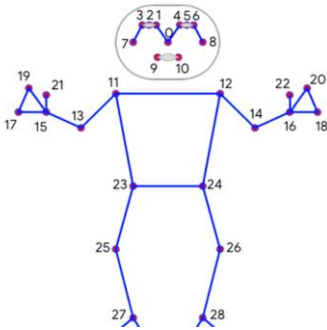


Figure 2.2. BlazePose 33-keypoint topology used for full-body motion capture.

Essential formulas

ReLU activation: $f(x) = \max(0, x)$

ROI center from hip landmarks: $c = \frac{h_l + h_r}{2}$

Body-axis rotation for alignment: $\alpha = \angle(m_s - m_h, e_y)$

Landmark output representation: $\hat{\mathbf{P}} = \{(x_i, y_i, z_i, v_i)\}_{i=1}^{33}$

Pose accuracy metric: $MPJPE = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \|\hat{\mathbf{p}}_j - \mathbf{p}_j\|_2$

Chapter 3. Exercise Recording with Hardware-Based Motion Capture Techniques

The third chapter is devoted to the acquisition of accurate reference motions for the virtual trainer. It compares depth-based, optical marker-based, and inertial motion capture techniques and demonstrates why hardware-based capture remains essential when highly accurate exercise demonstrations are required. While monocular computer vision is practical for online feedback, the trainer’s motion library must be based on reference movements with higher kinematic fidelity.

3.1. Reference motion acquisition

The chapter shows that IMU-based motion capture provides the most balanced solution for the dissertation’s objectives. Optical systems offer the highest precision but are expensive and require a controlled capture volume. Kinect-like systems are accessible but less robust under occlusion.

Wearable IMUs, in contrast, provide high portability, stable segment orientation estimates, and a practical workflow for recording exercise libraries that can later be cleaned, retargeted, and mapped onto a 3D avatar. This makes them suitable for generating the virtual trainer’s exercise set.

$$\hat{q}_t = f(q_{t-1}, \omega_t, a_t, m_t)$$

In this context, the orientation of a body segment is estimated through sensor fusion of gyroscope, accelerometer, and magnetometer measurements. This enables accurate retargeting of captured motion to the trainer skeleton while preserving temporal consistency.

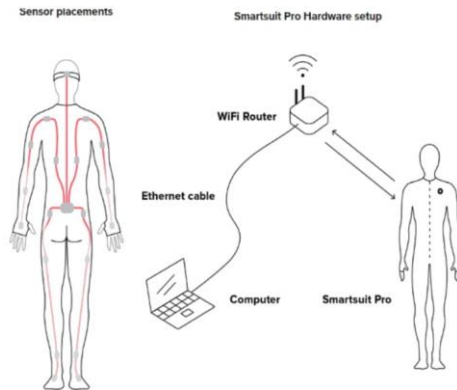


Figure 3.1. Sensor placement and hardware setup for IMU-based motion capture of reference exercises.

Table 2. Comparative characteristics of the main motion capture technologies

Motion Capture Modality	Positional Error (Unified Metric)	Measurement Accuracy	Portability	Operational Complexity
Optical marker-based (Vicon)	0.77 mm	Sub-millimetre (gold standard)	Low	High
Depth-sensor-based (Kinect v2)	~60–136 mm	Limited	Moderate	Moderate
IMU-based	~6.4 mm	High (sub-centimetre)	High	Moderate

Chapter 4. Skeleton-Based Human Activity Recognition and Analysis

The fourth chapter introduces the temporal intelligence of the system. It converts sequences of reconstructed landmarks into exercise labels, repetition boundaries, and interpretable corrective

feedback. The chapter bridges low-level pose tracking and high-level coaching by treating motion as a structured time-dependent process rather than an isolated set of frames.

4.1. Classification, repetition detection, and corrective guidance

The chapter combines three essential analytical components. First, exercise classification is performed by comparing motion sequences to reference templates. Second, continuous motion is segmented into repetitions using temporal smoothing, thresholding, and finite-state logic. Third, form quality is assessed through geometric measurements such as joint angles and relative distances, which are translated into rule-based feedback messages. This produces repetition-level, exercise-specific, and human-interpretable guidance.

$$DTW(X, Y) = \min_w \sum d(w_k)$$

$$\bar{p}_t = (1/N) \sum_{(i=t-N+1)}^t p_i$$

$$\theta = \arccos((u \cdot v) / (||u|| ||v||))$$

Dynamic Time Warping aligns exercise sequences performed at different speeds; moving-average smoothing reduces landmark noise; and joint-angle computation makes it possible to evaluate squat depth, trunk inclination, knee flexion, and similar biomechanical characteristics. The result is a rule-based guidance mechanism that can produce targeted messages such as adjusting depth, improving symmetry, or correcting excessive forward lean.

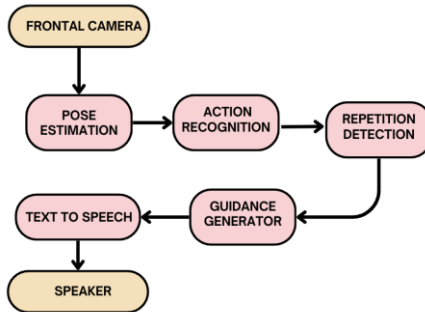


Figure 5. Core analytical feedback loop: pose estimation, action recognition, repetition detection, guidance generation, and text-to-speech.

Chapter 5. Implementation

The fifth chapter describes the practical realization of the proposed system as a mobile application. Flutter and Dart are used for the mobile interface and application logic, Unity is used for the 3D trainer environment, MediaPipe is used for real-time landmark extraction, and text-

to-speech modules provide verbal feedback. The implementation chapter demonstrates how the theoretical pipeline is translated into a working interactive product.

Chapter 6. Experimental Results and Evaluation

The sixth chapter provides quantitative validation of the developed system. It evaluates pose estimation accuracy, segmentation quality, error-detection reliability, system responsiveness, fidelity of IMU-based trainer motions, and user-level performance changes over time. The reported results confirm that the system achieves real-time operation while maintaining sufficient accuracy for practical biomechanical guidance.

6.1. Main quantitative findings

The central metric for 3D pose reconstruction is the Mean Per Joint Position Error, which measures the average Euclidean distance between predicted and reference joints. The chapter further evaluates temporal overlap for repetition segmentation, precision and recall for posture-error detection, latency of the virtual trainer and speech pipeline, and kinematic fidelity of IMU-based motion capture.

$$MPJPE = (1/J)\Sigma ||\hat{p}_j - p_j||^2$$

Table 3. Summary of the principal experimental results

Module / scenario	Metric	Result
3D pose estimation - controlled conditions	MPJPE	28.5 ± 4.3 mm
3D pose estimation - mobile with partial occlusion	MPJPE	36.8 ± 5.7 mm
3D pose estimation - low illumination	MPJPE	42.1 ± 6.2 mm
Realtime inference	Per-frame latency	42 ± 8 ms (>23 fps)
Repetition segmentation	Temporal accuracy	94.7%
Squat error detection	Precision / recall	0.91 / 0.89
Yoga error detection	Precision / recall	0.88 / 0.85
Virtual trainer rendering	Update latency	58 ms

IMU motion capture	Orientation error	2.9°
IMU motion capture	Joint-angle RMSE	4.7°
User study - amateur cohort	Reduction in deviation events	21.3%

The experimental results show that the proposed environment is not merely a conceptual prototype. It operates within interactive latency limits, maintains acceptable reconstruction accuracy in realistic mobile settings, and produces feedback that users perceive as understandable and helpful. The longitudinal study further indicates a measurable reduction in technique deviations, suggesting that the system can contribute to safer and more consistent exercise execution.

Implementation of Results

The practical results of the research were implemented in the developed mobile application designed for movement analysis, exercise guidance, and support of home-based physical rehabilitation. The application was experimentally validated among 20 users with herniated disc injuries, allowing the assessment of its applicability in real rehabilitation-oriented conditions.

In addition, the developed application has been released on the Apple App Store, where it is publicly available to users. The application has achieved more than 20,000 downloads and has received positive user feedback, demonstrating its practical demand, usability, and potential for broader implementation in digital health, rehabilitation, and preventive physical activity support.

Main results of the work

The dissertation resulted in the design and implementation of an intelligent AI-based mobile environment for automated analysis of physical performance and human motor behavior. The main results are summarized below.

1. **Real-time 3-D pose estimation on smartphones:** A mobile pipeline for monocular 3D pose estimation was developed and validated under practical conditions, including lighting variation, background clutter, partial occlusion, and body-scale differences. The system achieved 28.5–42.1 mm MPJPE and operated at 42 ± 8 ms per frame, corresponding to more than 23 fps. Related publications: [2], [4]
2. **Repetition-based temporal movement analysis:** A method was developed for segmenting continuous exercise streams into repetitions and local movement phases. This allowed the system to evaluate user performance repetition by repetition. The repetition segmentation module achieved 94.7% accuracy. Related publications: [1], [2]

3. **Interpretable biomechanical error detection:** The dissertation proposed a movement-quality assessment approach based on joint angles and geometric relations between body segments. The system detects errors such as insufficient squat depth, incorrect trunk inclination, and knee misalignment. The error-detection module achieved 0.91 precision and 0.89 recall. [1], [2]
4. **Motion-captured 3D virtual trainer:** A reference-motion subsystem was developed using inertial measurement units. Correctly executed exercises were captured, processed, and retargeted to a humanoid virtual trainer for demonstration and comparison. The system achieved approximately 2.9° orientation error and 4.7° joint-angle RMSE. [3]
5. **Integrated mobile rehabilitation environment:** Pose estimation, repetition analysis, biomechanical reasoning, 3-D visualization, and speech feedback were integrated into a single mobile application. The system achieved **end-to-end feedback latency below 200 ms** and a speech feedback. [1], [4]
6. **User-level injury improvement:** Experimental use of the system showed measurable improvement in movement quality over time. Biomechanical deviation events decreased by **21.3%**, indicating the practical effectiveness of the corrective feedback loop. [1]

LIST OF PUBLICATIONS

1. M. Aslanyan, “Development of Intelligent Workout Environment for VR Devices” *2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Kos Island, Greece, 2024, pp. 1-5.
2. M. Aslanyan, “On Mobile Pose Estimation and Action Recognition Design and Implementation.” *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 34, 2024, pp. 126–136.
3. M. Aslanyan, “Comparative Evaluation of Inertial Measurement Unit Versus Vision Based Motion Capture” *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 35, pp. 953-964, 2025.
4. M. Aslanyan “On Mobile Pose Estimation Design and Implementation.” *in Proceedings of the 14th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, pp. 124–128, 2023.

Սեղմագիր

Մինաս Ասլանյան

Մարդու շարժողական վարքագծի ավտոմատացված վերլուծության բանականային միջավայրի մշակում

Հետազոտության համառոտ ամփոփում

Այս հետազոտությունը նվիրված է հենաշարժողական ապարատի (MSK) վնասվածքներից ապաքինվող բուժառուների շարժողական գործունեության վերլուծության համար նախատեսված բարձր տեխնոլոգիական ինտելեկտուալ միջավայրի մշակմանը: Ժամանակակից աշխարհում տնային պայմաններում վերականգնողական թերապիայի պահանջարկի աճին զուգահեռ՝ առաջանում է կրկնակի վնասվածքների կամ բարդությունների մեծ ռիսկ՝ կլինիկական անմիջական վերահսկողության բացակայության պատճառով: Տեսանյութերով ուղղորդվող վերականգնողական ավանդական կուրսերն ունեն էական սահմանափակումներ, քանի որ միակնյա տեսախցիկները թույլ չեն տալիս ճշգրտորեն ընկալել հոդերի եռաչափ կոնֆիգուրացիաները, ինչի հետևանքով հիվանդների մոտ կարող են պահպանվել կամ խորանալ սխալ և բիոմեխանիկորեն վնասակար շարժումները: Աշխատանքը լուծում է այս խնդիրը՝ միավորելով համակարգչային տեսողության (Computer Vision), մեքենայական ուսուցման (Machine Learning) և բիոմեխանիկական վերլուծության մեթոդները: Հետազոտության ընթացքում մշակվել է համակարգ, որն ընդունակ է սմարթֆոնի տեսախցիկի միջոցով իրական ժամանակում վերակառուցել հիվանդի մարմնի 3D մոդելը (Pose Estimation): Ի տարբերություն ավանդական մեթոդների, որոնք պահանջում են թանկարժեք կլինիկական սարքավորումներ, այս աշխատանքում կիրառվել են օպտիմալացված նեյրոնային ցանցեր, որոնք ապահովում են բարձր ճշգրտություն նույնիսկ մեկ տեսախցիկի պարագայում: Համակարգը ոչ միայն հետևում է պացիենտի շարժմանը, այլև վերլուծում է թերապևտիկ վարժությունների բիոմեխանիկական ճշտությունը՝ համեմատելով այն էտալոնային (MoCap) տվյալների հետ և տրամադրելով ակնթարթային բժշկական-բիոմեխանիկական հետադարձ կապ:

Գլուխների համառոտագիր

- Գլուխ 1. Խնդրի դրվածքը և ոլորտի ժամանակակից լուծումների վերլուծությունը:
- Գլուխ 2. Միակնյա տեսախցիկով 3D դիրքի գնահատման նորարարական մեթոդների մշակումը:
- Գլուխ 3. Շարժման գրանցումը (MoCap) և տվյալների բազաների ստեղծումը IMU

սենսորների միջոցով:

- Գլուխ 4. Գործողությունների ճանաչման և կրկնությունների հաշվարկման ալգորիթմների նախագծումը:
- Գլուխ 5. Ծրագրային ճարտարապետության իրականացումը և օպտիմալացման ռազմավարությունները:
- Գլուխ 6. Էմպիրիկ հետազոտությունների և թեստավորման արդյունքների վերլուծությունը:
- Գլուխ 7. Եզրակացություններ և հետագա զարգացման ուղիները:

Ատենախոսության թեմայի արդիականությունը

Վերջին տարիներին սմարթֆոնների և շարժական այլ տեխնոլոգիաների լայն տարածմանը զուգընթաց, կտրուկ աճել է տնային պայմաններում ֆիզիկական ակտիվության և հեռավար վերականգնողական ծրագրերի պահանջարկը: Այս մոտեցումները մեծացնում են խնամքի հասանելիությունը և նվազեցնում կախվածությունը մասնագիտացված կենտրոններից, սակայն ի հայտ են բերում լուրջ ռիսկեր՝ կապված անմիջական վերահսկողության բացակայության հետ: Ինքնուրույն մարզումների ժամանակ շարժումների տեխնիկապես սխալ կատարումը ոչ միայն նվազեցնում է պարապմունքների արդյունավետությունը, այլև մեծացնում է հենաշարժիչ ապարատի, մասնավորապես ողնաշարի և հոդերի գերժանրաբեռնվածության ու վնասվածքների հավանականությունը: Շարժման վերահսկման և կեցվածքի ճիշտ պահպանման բացը պահանջում է խելացի համակարգերի ներդրում, որոնք ունակ են իրական ժամանակում վերլուծել մարդու շարժումները, հայտնաբերել սխալները և տրամադրել ակնթաթային, շտկող հետադարձ կապ:

Միևնույն ժամանակ, համակարգչային տեսողության (computer vision) և արհեստական բանականության, մասնավորապես՝ մարդու դիրքի գնահատման (human pose estimation) ալգորիթմների զարգացումը նոր հնարավորություններ է ստեղծում բիոմեխանիկական ավտոմատացված վերլուծությունների համար: Չնայած գիտական նվաճումներին, գոյություն ունեցող համակարգերի մեծ մասը դեռևս պահանջում է վերահսկվող միջավայր, հատուկ սարքավորումներ, սենսորներ կամ բարձր հաշվողական ռեսուրսներ, ինչը խիստ սահմանափակում է դրանց կիրառելիությունը սովորական կենցաղային պայմաններում: Շարժական սարքերի (սմարթֆոնների) միջոցով մարդու դիրքի ճշգրիտ և արագ գնահատումը շարունակում է մնալ բարդ տեխնոլոգիական մարտահրավեր՝ պայմանավորված տեսախցիկի սահմանափակ դիտանկյունով, լուսավորության անկայունությամբ և հաշվողական սահմանափակումներով:

Այս համատեքստում, ատենախոսության թեման խիստ արդիական է, քանի որ այն նպատակաուղղված է լուծելու բժշկական վերականգնման և անվտանգ ֆիզիկական ակտիվության ապահովման գործնական խնդիրը՝ մշակելով արհեստական բանականության վրա հիմնված շարժական համակարգ: Համատեղելով իրական ժամանակում աշխատող դիրքի գնահատման մեթոդները, շարժման սխալների քանակական գնահատումը և եռաչափ վիրտուալ մարզչի միջոցով ինտերակտիվ վիզուալիզացիան՝ այս աշխատանքը կամրջում է ժամանակակից շարժման վերլուծության և տնային պայմաններում հասանելի վերականգնողական պրակտիկայի միջև առկա տեխնոլոգիական բացը: Այս գիտական մոտեցումը հնարավորություն է տալիս սովորական սմարթֆոնը վերածել տեխնիկայի գնահատման և ուղղորդման հզոր գործիքի՝ ուղակիորեն արձագանքելով առողջապահական տեխնոլոգիաների և վերականգնողական բժշկության ոլորտում առկա արդի պահանջներին:

Գիտական նորույթը

Ատենախոսության գիտական նորույթը կայանում է հենաշարժողական ապարատի վնասվածքների վերականգնման և տնային թերապիայի ավտոմատացված գնահատման համար մեկ միասնական, վերջնական (end-to-end) համակարգի ստեղծման մեջ, որը միավորում է իրական ժամանակում 3D դիրքի գնահատումը, շարժումների ժամանակային ընկալումը, բիոմեխանիկական սխալների քանակականացումն ու ինտերակտիվ բժշկական ուղղորդումը բջջային սարքի վրա:

Հետազոտության ընթացքում ստացված առանցքային նորարարական արդյունքներն են.

- **Աղմուկների նկատմամբ կայուն 3D դիրքի գնահատում.** Սմարթֆոնների համար մշակել իրական ժամանակում աշխատող, արտաքին խանգարումների, կենցաղային ֆոնի աղմուկների, լուսավորության փոփոխությունների և մասնակի արգելափակումների (occlusions) նկատմամբ կայուն 3D դիրքի գնահատման (Pose Estimation) համակարգ՝ ապահովելով բարձր ճշգրտություն մեկ տեսախցիկի պարագայում:
- **Իրական ժամանակում բիոմեխանիկական սխալների գնահատման նոր չափիչ (Error Rate).** Առաջարկվել է ժամանակային հավասարեցման (DTW ավտոկորեկցիայի միջոցով) և ըստ առանձին հոդերի անկյունային շեղումների վերլուծության համակցված մեթոդաբանություն, որը թույլ է տալիս իրականացնել թերապևտիկ վարժությունների կրկնությունների բարձր ճշգրտության քանակական գնահատում: Մեթոդը վավերացվել է շարժման գրանցման

էտալոնային (MoCap) տվյալների հիման վրա՝ ցուցադրելով բարձր զգայունություն վնասվածքների առաջացման տեսանկյունից դիսկային կինեմատիկական շեղումների նկատմամբ:

- **Բջջային միջավայրի համար օպտիմալացված սարքային մոդելավորում.** Մշակվել է նեյրոնային ցանցերի սեղմման (compression) և պրունինգի (pruning) հատուկ ռազմավարություն, որը հարմարեցնում է կոնվոլյուցիոն-երկրաչափական դիրքի գնահատման ցանցը բջջային CPU/NPU պրոցեսորներին՝ ապահովելով կադրերի մշակման ցածր ուշացում (sub-100 ms): Ներդրվել է դինամիկ կառավարման համակարգ (adaptive runtime scheduler), որը հավասարակշռում է հաշվարկների ճշգրտությունն ու արագությունը՝ կախված սարքի ծանրաբեռնվածությունից և մարտկոցի վիճակից:
- **Ինտերակտիվ մուտքիմոդալ հետադարձ կապի կլինիկական ցիկլ.** Առաջին անգամ ինքնուրույն բջջային համակարգում ներդրվել է IMU սենսորների միջոցով ստացված էտալոնային շարժումներով սինթեզված 3D վիրտուալ օգնականի և կոնտեքստից կախված TTS (տեքստից ձայն) համակարգի համակցումը: Այն փոփոխում է հրահանգների բարդությունն ու ձայնային տոնայնությունը՝ հարմարվելով հիվանդի ընթացիկ առաջընթացին և մկանային հոգնածության մակարդակին՝ փակելով կապը շեղումների հայտնաբերման, վերլուծության և վերականգնողական ուղղորդման միջև:
- **Ոչ կլինիկական (տնային) միջավայրերում համակարգի կայունության ապահովում.** Մշակվել է թեթև քաշով սեմանտիկ սեգմենտավորման փուլ, որն ադապտիվ կերպով առանձնացնում է հիվանդի մարմինը բարդ կենցաղային ֆոներից, ինչը ապահովում է բարձր ճշգրտություն լուսավորության փոփոխությունների, հագուստի բազմազանության և տնային պայմաններում առկա այլ խանգարումների դեպքում:
- **Փորձարարական արդյունավետության հիմնավորում.** Էմպիրիկ հետազոտությունների միջոցով փորձարարական հիմնավորել մշակված համակարգի գործնական արդյունավետությունը՝ հիվանդների շարժումների որակի բարելավման, տեխնիկական շեղումների կրճատման և սխալների նվազեցման տեսանկյունից:

Հիմնական արդյունքներ

1. Մշակվել է սմարթֆոնների համար իրական ժամանակում աշխատող, աղմուկների և խանգարումների նկատմամբ կայուն 3D դիրքի գնահատման համակարգ:
2. Առաջարկվել է վարժությունների հոսքային կատարման բաժանում առանձին կրկնությունների և փուլերի՝ ավելի ճշգրիտ ժամանակային վերլուծության համար:
3. Մշակվել է մեկնաբանելի բիոմեխանիկական սխալների հայտնաբերման մեխանիզմ՝ հոդային անկյունների և կանոնահեն գնահատման հիման վրա:
4. Ստեղծվել է IMU սենսորների վրա հիմնված շարժումների գրանցման և 3D վիրտուալ մարզչի անհմացիոն վերարտադրման ենթահամակարգ:
5. Իրականացվել է մեկ միասնական բջջային միջավայր, որը միավորում է դիրքի գնահատումը, շարժման վերլուծությունը, 3D վիզուալիզացիան և ձայնային հետադարձ կապը:
6. Փորձարարական արդյունքներով հիմնավորվել է համակարգի գործնական արդյունավետությունը՝ շարժումների որակի բարելավման և սխալների նվազեցման տեսանկյունից:

Արդյունքների ներդրումը

Հետազոտության գործնական արդյունքները ներդրվել են մշակված բջջային հավելվածում, որը նախատեսված է շարժումների վերլուծության, վարժությունների կատարման վերահսկման և տնային պայմաններում ֆիզիկական վերականգնման գործընթացին աջակցելու համար: Հավելվածը փորձարարական կերպով վավերացվել է միջոդային սկավառակի ճողվածք ունեցող 20 օգտատերերի շրջանում, ինչը հնարավորություն է տվել գնահատել առաջարկվող մոտեցման կիրառելիությունը վերականգնողական գործընթացին մոտ պայմաններում: Վավերացման արդյունքները հաստատել են մշակված համակարգի գործնական նշանակությունը վարժությունների կատարման որակի մոնիթորինգի և օգտատիրոջն ուղղված հետադարձ կապի տրամադրման տեսանկյունից:

Բացի այդ, մշակված հավելվածը տեղադրվել է հասանելի է դարձել Apple App Store հարթակում: Հավելվածը ներբեռնվել է ավելի քան 20,000 անգամ և ստացել է դրական օգտատիրական արձագանքներ, ինչը վկայում է դրա գործնական պահանջարկի, կիրառելիության և թվային առողջապահության, վերականգնողական ու կանխարգելիչ ֆիզիկական ակտիվության ոլորտներում հետագա ներդրման հնարավորության մասին:

Заключение

Минас Асланян

Разработка интеллектуальной среды автоматизированного анализа моторного поведения человека

Актуальность темы и краткое резюме

Актуальность работы обусловлена пересечением повсеместного распространения мобильных технологий, искусственного интеллекта и необходимости безопасных и эффективных домашних тренировок. Традиционные видеотренировки ограничены: монокулярные камеры не позволяют точно воспринимать 3D-конфигурации суставов, а отсутствие экспертного контроля ведет к сохранению неправильных паттернов движения (например, сгибание поясницы в становой тяге), что повышает риск травм. Данное исследование решает эти проблемы путем создания системы, реконструирующей 3D-скелетную кинематику по монокулярному видео в реальном времени. Интеграция сверточных нейронных сетей с геометрическими моделями позволяет мобильным устройствам достигать высокой точности в обнаружении отклонений от идеальных траекторий суставов.

Цель и задачи исследования

Основная цель — создание комплексной мобильной системы, которая реконструирует 3D-позы пользователя в реальном времени, анализирует биомеханику упражнений, обнаруживает ошибки и предоставляет интерактивную обратную связь.

- Ключевые задачи:
- Разработка мобильного приложения на базе фронтальной камеры для захвата движений.
 - Интеграция оптимизированных 3D-моделей оценки поз (квантованные CNN, легковесные геометрические модули).
 - Реализация временного анализа движений (DTW-автокорреляция) для обнаружения ошибок.
 - Интеграция интерактивного 3D-виртуального тренера на основе MoCap-данных.
 - Оптимизация производительности для достижения задержки менее 100 мс на кадр.

Научная новизна

- Разработана новая метрика биомеханических ошибок («Error Rate»), объединяющая временное выравнивание (через DTW) с анализом угловых отклонений суставов.
- Предложена стратегия сжатия и прунинга нейронных сетей, адаптированная для мобильных CPU/NPU, обеспечивающая частоту кадров менее 100 мс.
- Создан интерактивный мультимодальный цикл обратной связи, объединяющий 3D-аватара (синтезированного из IMU-данных) и контекстно-зависимую систему синтеза речи (TTS).

- Продемонстрирована устойчивость системы к неконтролируемым домашним условиям (освещение, фон) благодаря этапу семантической сегментации.

Практическая значимость

- Повышение безопасности: Снижение риска травм при самостоятельных тренировках.
- Доступность: Устранение необходимости в дорогостоящем оборудовании.
- Персонализация: Адаптация инструкций виртуального тренера под прогресс пользователя.
- Экономическая эффективность: Использование существующих мощностей смартфонов.
- Масштабируемость: Широкая совместимость с потребительскими устройствами.

Методы исследования и реализация

Исследование следует смешанному инженерному циклу: от анализа литературы до создания двухэтапного конвейера зрения (обнаружение 2D-ключевых точек и их «подъем» в 3D). Для генерации эталонных движений использовался костюм с 19 IMU-сенсорами (Rokoko Smartsuit Pro). Приложение реализовано в среде Flutter + Unity, где Unity отвечает за рендеринг 3D-тренера, а Flutter — за логику и интерфейс. Распознавание активности сочетает DTW и k-NN, а подсчет повторений реализован через отказоустойчивый алгоритм Zero-Crossing.

Краткое содержание глав

- Глава 1: Введение и обоснование актуальности.
- Глава 2: Теоретические основы 3D-оценки поз по монокулярному видео (обзор CNN, трансформеров).
- Глава 3: Технологии захвата движений и создание базы эталонов с использованием IMU-сенсоров.
- Глава 4: Распознавание действий на основе скелетных данных и генерация вербальной обратной связи.
- Глава 5: Архитектура ПО и стратегии оптимизации под мобильные платформы.
- Глава 6: Результаты экспериментов и пользовательские тесты.
- Глава 7: Заключение и выводы.

Основные результаты работы

1. Разработана система оценки 3D-позы в реальном времени для смартфонов, устойчивая к шумам и внешним помехам.
2. Предложен метод разбиения непрерывного выполнения упражнений на отдельные повторения и фазы для более точного временного анализа.
3. Разработан интерпретируемый механизм обнаружения биомеханических ошибок на основе суставных углов и правил оценки.
4. Создана подсистема захвата движений на основе IMU-сенсоров и анимационного воспроизведения 3D виртуального тренера.
5. Реализована единая мобильная среда, объединяющая оценку позы, анализ движений, 3D-визуализацию и голосовую обратную связь.
6. Экспериментально подтверждена практическая эффективность системы с точки зрения повышения качества движений и снижения числа ошибок.

Внедрение результатов

Практические результаты исследования были внедрены в разработанное мобильное приложение, предназначенное для анализа движений, контроля выполнения упражнений и поддержки физической реабилитации в домашних условиях. Приложение было апробировано среди 20 пользователей с межпозвоночной грыжей, что подтвердило прикладную значимость предложенного подхода.

Разработанное приложение также доступно в Apple App Store, имеет более 20,000 загрузок и положительные отзывы пользователей, что свидетельствует о его практической востребованности и потенциале применения в области цифровой реабилитации и профилактической физической активности.