

А.К. Кереев¹, К.П. Аман¹, З.К. Калкабаева¹, С.М. Мұхтар¹, Е.А. Оспанов^{2*}

¹Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,
030000, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қ., Ә. Молдағұлова д., 34

²Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ НЕГІЗІНДЕ ЖАТТЫҒУЛАРДЫ ТАҢУ ЖӘНЕ ОРЫНДАУ ТЕХНИКАСЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа: Қазіргі таңда спорт пен дене шынықтыру саласында жаттығу процесінің тиімділігін арттыру, жарақат алу қаупін төмендету және оқыту мен жаттықтыруды жекелендіру мәселелері өзекті болып отыр. Осыған байланысты жасанды интеллект (ЖИ) пен компьютерлік көру технологияларын қолдану негізінде физикалық жаттығуларды автоматтандырылған түрде талдау және бағалау бағытындағы зерттеулер қарқынды дамуда. Аталған технологиялар адамның қозғалысын нақты уақыт режимінде қадағалап, биомеханикалық параметрлерді дәл анықтауға мүмкіндік береді.

Бұл жұмыста физикалық белсенділікті тануға, жаттығуларды орындау техникасын талдауға және пайдаланушыларға жедел кері байланыс ұсынуға арналған компьютерлік көруге негізделген интеллектуалды фитнес көмекшісін әзірлеу қарастырылады. Ұсынылған жүйе терең оқыту әдістеріне сүйене отырып, Ultralytics YOLO архитектурасын және OpenCV кітапханасын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Жүйе дененің негізгі нүктелері мен буындарын анықтап, олардың кеңістіктік орналасуын талдау арқылы жаттығулардың орындалу дұрыстығын бағалайды, қайталау санын есептейді және тиімділік көрсеткіштерін анықтайды.

Зерттеу барысында әртүрлі жаттығу қозғалыстарын қамтитын бейне деректер жиыны жиналып, алдын ала өңделді және аннотацияланды. Терең нейрондық желі модельдері оқытылып, олардың дәлдігі мен өнімділігі бағаланды. Сонымен қатар, биомеханикалық модель негізінде дене бөліктеріне түсетін жүктемелер есептеліп, қозғалыс сапасын жақсартуға арналған түзету ұсыныстары қалыптастырылды.

Эксперименттік нәтижелер ұсынылған жүйенің жаттығуларды тану дәлдігі жоғары екенін және нақты уақыт режимінде тиімді жұмыс істейтінін көрсетті. Әзірленген бағдарламалық шешім үйде жаттығу жасаушы адамдарға, спортшыларға, жаттықтырушыларға және дене шынықтыру саласындағы мамандарға жаттығу процесін бақылау мен оңтайландыруда қосымша құрал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері жасанды интеллект пен компьютерлік көру технологияларын фитнес және спорт саласында кеңінен қолданудың перспективасы екендігін дәлелдейді.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, компьютерлік көру, терең оқыту, YOLO архитектурасы, биомеханикалық талдау, жаттығуларды мониторингтеу, жекелендірілген жаттығу.

Кіріспе

Спорт саласындағы жасанды интеллект (ЖИ) – бұл жаттығу бағдарламаларын құрудан бастап матч жеңімпазын болжауға дейінгі әртүрлі міндеттерді шешетін құралдар жиынтығы.

Спортта жетістік көбінесе ұсақ-түйек детальдарға байланысты болады: мысалы, теннистегі соққы беру кезінде қолдың еңкею бұрышы, жүгірушінің қадамының симметриясы немесе отырып-тұру жаттығуы кезінде тізенің тұрақтылығы. Жаттықтырушы көп нәрсені байқай алады, бірақ ең тәжірибелі маманның өзі қозғалыстың әрбір бұрышын нақты уақыт режимінде талдай алмайды.

Міне, дәл осы жерде компьютерлік көру (Computer Vision, CV) технологиясы іске қосылады – бұл машиналарға адам қозғалысын зертханалық жағдайларға жақын дәлдікпен көруге, қадағалауға және талдауға мүмкіндік беретін технология. Бұл жай ғана қателерді анықтайтын құрал емес, камерасы бар кез келген құрылғыда қолжетімді биомеханикалық талдау құралы.

Жасанды интеллект пен компьютерлік көрудің үйлесімі арқасында спортшылар, жаттықтырушылар және физиотерапевтер бұрын қымбат биомеханикалық зертханаларды қажет еткен қозғалыстардың жүйелі, объективті және жан-жақты көрінісін ала алады.

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты – физикалық белсенділікті тануға және пайдаланушыларға жекелендірілген жаттығу жоспарларын, позаны талдауды және нақты уақыттағы түзетулерді ұсынуға қабілетті жасанды интеллекттің компьютерлік көру технологиясына негізделген фитнес көмекшісін әзірлеу. Бұл жүйе динамикалық, интеллектуалды және пайдаланушыға бағытталған платформаны қамтамасыз ету арқылы қолданыстағы фитнес шешімдерінің кемшіліктерін жоюға бағытталған.

Нақтырақ айтсақ, жүйе терең оқытуға негізделген объектілерді анықтауды қолдана отырып, жаттығу түрлерін дәл жіктеуге арналған. Жүйенің басты ерекшелігі-дұрыс емес қалыптарды анықтау және жарақат алу қаупін азайту және қозғалыс сапасын жақсарту үшін түзету ұсыныстарын ұсыну мүмкіндігі.

Зерттеудің мақсаты: физикалық жаттығуларды орындау техникасын автоматты түрде талдау және бағалау үшін компьютерлік көру мен терең оқыту әдістеріне негізделген интеллектуалды жүйені әзірлеу.

Зерттеу объектісі: адамның физикалық жаттығуларды орындау кезіндегі қозғалыстары мен дене бөліктерінің кеңістіктік орналасуы.

Зерттеу пәні: компьютерлік көру және терең нейрондық желілер негізінде биомеханикалық параметрлерді анықтау және талдау әдістері.

Ғылыми жаңалығы:

- жаттығуларды тану мен бағалауды біріктіретін кешенді тәсіл ұсынылды;
- YOLO архитектурасы негізінде нақты уақыттағы позаны бағалау әдісі жетілдірілді;
- Биомеханикалық модель арқылы дене бөліктеріне түсетін жүктемені есептеу және түзету ұсыныстарын генерациялау жүзеге асырылды.

Практикалық маңыздылығы: ұсынылған жүйе фитнес, спорт және дене шынықтыру саласында жаттығу техникасын бақылау, жарақаттың алдын алу және жекелендірілген ұсыныстар беру үшін қолданылуы мүмкін.

Зерттеу міндеттері:

- жаттығуларға арналған деректер жиынын жинау және аннотациялау;
- жаттығуларды тану моделін әзірлеу және оқыту;
- позаны бағалау алгоритмін іске асыру;
- биомеханикалық параметрлерді есептеу әдісін құру;
- жүйенің дәлдігін эксперименттік бағалау.

Гипотеза: компьютерлік көру мен терең оқыту әдістерін біріктіру жаттығу техникасын дәстүрлі әдістерге қарағанда дәлірек және жедел бағалауға мүмкіндік береді.

Әдебиеттерге шолу

Спортта компьютерлік көруді қолдануға деген қызығушылық он бес жыл бұрын пайда болған. Осы тақырыптағы алғашқы жан-жақты басылымдардың бірі – 2014 жылы жарық көрген T. B. Moeslund, G. Thomas және A. Hilton редакциялаған "Computer Vision in Sports" кітабы болды [1]. Бұл еңбек спортта компьютерлік көруді қолданудың кең спектрін қамтиды, соның ішінде допты бақылау, ойыншылардың орналасқан жері мен қалпын анықтау және түрлерін тану нақты оқиғалар мен спорт түрлері. Кітап халықаралық сарапшылардың жаңа идеяларын ұсына отырып және спорттық іс-шараның бүкіл өмірлік циклінде компьютерлік көруді қолданудың негізгі мәселелері мен әдістерін қарастыра отырып, осы саланың дамуына маңызды үлес қосты.

B.T. Naik-тің соавторлармен бірлесіп, жүргізген зерттеуі спортта компьютерлік көруді қолданудың кең спектрін көрсетеді [2]. Авторлар нысандарды анықтау және қадағалау, траекторияларды болжау және стратегияларды тану тапсырмаларын талдау арқылы

ойыншыларға және допқа бағытталған спорт түрлерін жіктейді. Зерттеу іске асырудың техникалық қиындықтарын, жасанды интеллект пен GPU платформаларын пайдалануды қарастырады және қол жетімді деректер жиынтығын талдайды. Шолу спорттағы визуалды тану саласындағы болашақ даму бағыттары мен ықтимал проблемаларды көрсетеді.

J. Smith және M. Johnson спорт индустриясында компьютерлік көруді қолданудың заманауи тенденциялары көптеген мүмкіндіктерді көрсетеді деп санайды [3]. Авторлар бұл технологияның жанкүйерлердің белсенділігін арттыру, төреші жұмыстарын автоматтандыру және оқу/жаттығу процесін оңтайландыру үшін пайдалануда мүмкіндіктерін атап өтеді. Оқу/жаттығу процесінде компьютерлік көру алгоритмдері спортшылардың қозғалысын талдау, техниканы оңтайландыру және жарақат алу қаупін азайту үшін қолданылады.

K. Lakshmi Joshitha және соавторлары үйдегі жаттығулар кезінде пайдаланушыларды бағыттау үшін ЖИ-ге негізделген визуалды кері байланысты пайдалана отырып, позаны түзету жүйесін әзірледі. Дегенмен, олардың үлгісінде модульдік масштабтау мүмкіндігі болмады [4].

Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, and Kapil Madan өз жұмыстарында негізгі кері байланысты қамтамасыз ету үшін OpenCV және MediaPipe пайдаланатын виртуалды жаттықтырушыны ұсынды, дегенмен жүйе жас немесе салмақ сияқты пайдаланушының жеке параметрлеріне бейімделмеген [5].

Nuno Mateus ЖИ-тің спорт ғылымындағы жаттығу жүктемесін тиімділеудегі және жарақат алу қаупін азайтудағы, әсіресе кәсіби спортшылар арасындағы рөлін зерттеді. Түсінікті болғанымен, олардың жұмысы пайдаланушы бетін өңдеу жүйелеріне қарағанда өнімділікті талдауға көбірек көңіл бөлді [6].

R. Babitha Lincy физиологиялық деректерді пайдалана отырып, жаттығу залының өнімділігін болжауға арналған машиналық оқыту үлгісін ұсынды, бірақ жұмыста жаттығуларды тану және интерактивті нұсқаулық функционалдығы жетіспейді [7].

Н.И. Вельможко мен А.А. Бойко физикалық жаттығуларды тану техно-логияларының дамуына маңызды үлес қосты [8]. Өз зерттеулерінде олар нейрондық желілерді және Microsoft Kinect V. 2.0 3D бейне контроллерін пайдалана отырып, жаттығуларды тану алгоритмін әзірледі. Зерттеушілер тізе мен жамбас буындарындағы бұрыштарды талдау арқылы аяқтар үшін таңдалған алты жаттығуды тануға бағытталған бағдарлама әзірледі. Компьютерлік технологияларды қолдану жаттығуларды танудың өте жоғары дәлдігін анықтады, бұл физикалық жаттығуларды орындау техникасының дұрыстығын бағалауда осы технологияны одан әрі қолдану перспективаларын ашады. Бұл зерттеу адам қозғалысын талдауда компьютерлік көру мен машиналық оқытуды қолдану әлеуетін көрсетеді, бұл спорттық дайындықта да, оңалту бағдарламаларында да қолданылуы мүмкін.

Спортта компьютерлік көруді қолдану барған сайын әртүрлі болып келеді және спорттық іс-әрекеттің әртүрлі аспектілерін қамтиды. К.В. Герман, Т.В. Красноперова және А.А. Германова атап өткендей [9], спортта компьютерлік көруді қолдану негізінен үш бағытқа әсер етеді: жаттығу және бәсекелестік процестер, теледидарлық хабарлар және төрешілік. Оқу процесінде Бұл технологиялар спортшының техникалық шеберлігін, сондай-ақ кейбір түрлері мен тактикалық әрекеттерін бағалауға, қарсыластың стратегиясын талдауға мүмкіндік береді. Теледидарлық хабарларда компьютерлік көру ойыншылардың позициясын немесе доптың траекториясын көрсету үшін қолданылады, бұл комментаторларға ойынды талдауға көмектеседі. Төрешілікте бұл технологиялар қабылданған шешімдердің дәлдігін арттыру үшін қолданылады, мысалы, футболдағы «ойыннан тыс» позицияны анықтау немесе допты теннисте соққыға жығу.

А.Д. Терехиннің баскетболдағы қашықтықтан лақтыру техникасын талдауға бағытталған авторлармен жүргізген зерттеуінде компьютерлік технологиялар зерттелетін ойын техникасының фазаларын автоматты түрде тануға және оның дұрыс орындалуын талдауға мүмкіндік беретіндігі атап өтілді [10]. Ю.В. Киселев және оның соавторларының бейне деректерге негізделген гимнасттардың қозғалмалы элементтерінің орындалуын бағалауға және талдауға арналған, ал бағдарламаны пайдалану техникалық қателерді анықтауға ықпал етеді [11].

И.В. Сивцов спорттық туризмнің тиімділігін, қауіпсіздігін және жекелендіруін арттырудағы жасанды интеллекттің рөлін қарастырады [12]. Автор тек компьютерлік көруге ғана назар аудармаса да, ол қозғалыстарды талдау, туристердің физикалық жағдайын

бағалау және маршруттарды тиімділеу үшін озық технологияларды қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Бұл зерттеу жасанды интеллект технологияларын, соның ішінде компьютерлік көруді спорттық іс-әрекеттің жаңа салаларында қолдану әлеуетін көрсетеді.

П.С. Коберник спорт саласында ЖИ-технологияларды қолдану мүмкіндіктерін қарастырады, фитнес - қосымшаларда жекелендірілген жаттығу жоспарларын жасау үшін ЖИ пайдалануға ерекше назар аударады [13].

П.А. Кулаков пен А.С. Еремин Unity 3D ортасында компьютерлік оқыту тренажерлерін әзірлеу ерекшеліктерін қарастырады [14]. Авторлар тиімді тренажерлерді жасау үшін физикалық қозғалтқыштар мен бейнелеу құралдарын және басқа да заманауи технологияларды қолданудың маңыздылығын атап көрсетеді. Компьютерлік тренажерлардың артықшылықтарына ерекше назар аударылады. Зерттеу Компьютерлік көруді тікелей қолдануға бағытталмағанымен, ол дене шынықтыру және спорт саласында да қолдануға болатын тиімді оқу/жаттығу жүйелерін құру үшін әртүрлі технологияларды біріктіріп қолдану әлеуетін көрсетеді.

Е.В. Медникова, Е.С. Котляров және М.В. Попова онлайн жаттығулардың танымалдылығының артуын атап өтіп, дене шынықтыруда ЖИ қолдану перспективаларын қарастырады [15]. Олар жаттығуларды бақылау үшін компьютерлік көруді қолданатын «Fittonic» қосымшасын сипаттайды. Авторлар оқытушының жүктемесін азайту және оқытуды жекелендіру сияқты қосымшалардың артықшылықтарын атап көрсетеді, сонымен қатар оқытушылардың қатысу қажеттілігі мен техникалық қателіктер қаупін атап көрсетті және жасанды интеллектті оқытуға сәтті енгізу үшін бағдарламашылар мен жаттықтырушылардың бірлескен жұмысы қажет деп санайды.

Бейне деректері арқылы адамның физикалық белсенділігін тану үшін терең нейрондық желілерді қолданудың қызықты мысалы а.в. пятаеваның бірлескен авторлармен [16]. Зерттеушілер DenseNet121 және MobileNetV2 үлгілеріне негізделген физикалық белсенділік түрін анықтау алгоритмін әзірледі, содан кейін терең нейрондық желі үлгісін өздігінен құрастырды. Авторлар uc50 деректер жинағын пайдаланды, онда 50 түрлі адам әрекеттері, сондай-ақ сынақ жинағының қайта көрсетілуін арттыру үшін YouTube сайтынан толық бейне тізбектері бар. Эксперименттік зерттеулер визуалды деректер бойынша физикалық белсенділік түрлерін жіктеу мәселесін шешу үшін ұсынылған тәсілдің тиімділігін растады. Әзірленген модель жоғары тану дәлдігін сақтай отырып, алдын ала дайындалған желілермен салыстырғанда аз есептеу ресурстарын қажет ететіні ерекше маңызды.

Шрайнер Б.А., Жомин К.М. әзірлеген «CV-Тренер» бағдарламасы дене шынықтыруда компьютерлік көрудің практикалық қолданылуын көрсетеді [17]. Бұл бағдарлама OpenCV және MediaPipe кітапханаларын қолдана отырып, білім алушылардың дене типін автоматты түрде анықтау, дене мүшелерінің ұзындығын және жаттығуларды орындау кезінде буындардағы бұрыштарды есептеу үшін фотосуреттер мен бейнелерді талдайды. Авторлар дене шынықтыруды оңтайландыру және тиімді ету, сондай-ақ дене шынықтыру сабақтарында білім алушылардың дене тәрбиесінің тиімділігі мен даралануын арттыру үшін осындай шешімдердің әлеуетін атап өтеді.

Е.А. Конопко және М.Г. Сидин спорттық жаттығуларда биометриялық деректерді талдауда жасанды интеллектті қолданудың перспективалары мен этикалық аспектілерін қарастырады [18]. Авторлар жасанды интеллект спортшының жағдайын бағалау, нәтижелерді болжау, жаттығуларды тиімділеу және олардың қауіпсіздігін арттыру үшін қолданылуы мүмкін екенін атап өтті. Дегенмен, олар сонымен қатар деректердің құпиялылығы, кемсітпеушілік және ЖИ жүйелерін пайдаланудағы ашықтық сияқты этикалық аспектілерді ескерудің маңыздылығын атап көрсетеді. Зерттеушілер биометриялық деректерді жинау мен өңдеудің неғұрлым тиімді әдістерін әзірлеу, оларды талдау үшін неғұрлым сенімді және дәл ЖИ жүйелерін құру, сондай-ақ спортшылар мен жаттықтырушылар үшін неғұрлым түсінікті және ашық ЖИ жүйелерін әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

Материалдар мен әдістер

Жасанды интеллектке негізделіп құрылған «Motion Trainer» бағдарламасы компьютерлік көру әдістерін, терең оқыту алгоритмдерін және пайдаланушыға бағытталған өзара әрекеттесу модульдерін біріктіру арқылы әзірленді. Осы зерттеуде қабылданған

әдістеме деректерді жинаудан басталып, нақты уақыт режимінде кері байланыс берумен және өнімділікті бақылаумен аяқталатын көп сатылы процесті қамтиды.

Бастапқы кезең әртүрлі жаттығулар қалыптары мен қозғалыстар тізбегін қамтитын деректер жиынын жинауды және алдын ала өңдеуді қамтыды. Суреттер мен бейнелер тазартылды, аннотацияланды, оқыту сапасын жақсарту және үлгілер бойынша консистенцияны қамтамасыз ету үшін өлшемі өзгертілді. Бұл қадам шуды азайту және модельдің оқу мүмкіндіктерін жақсарту үшін өте маңызды болды.

Кейіннен терең оқыту моделі YOLOv11 конволюциялық нейрондық желі архитектурасын қолдана отырып оқытылды. Бұл модель объектілерді дәл анықтау мүмкіндіктері мен жоғары дәлдігі үшін таңдалды.

Оқыту процесі негізгі аргументтерді дәл баптауды, пакеттік өлшемдер, оқыту жылдамдығы және эпоха саны сияқты алдын ала өңдеуді қамтыды, бұл модельге түрлі жаттығу әрекеттерін тиімді тануға мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында 1200 бейне және 5000-нан аса кадр қамтитын деректер жиыны пайдаланылды. Деректер жиыны отырып-тұру (squat), тартылу (pull-up), жатқан қалыптан тұрғаны көтеру (push-up), пресс (sit-up) жаттығуларын қамтиды. Әр жаттығу әртүрлі пайдаланушылар, ракурстар және жарық жағдайларында түсірілді.

Аннотациялау үшін LabelImg / CVAT / Roboflow құралдары пайдаланылды және дененің негізгі нүктелері (keypoints) белгіленіп, буындар координаттары анықталды, жаттығу түрлері бойынша класстарға бөлінді

Модель келесі параметрлермен оқытылды:

- архитектура: YOLOv11
- эпоха саны: 100
- batch size: 16
- learning rate: 0.001
- optimizer: Adam

Модель тиімділігі келесі метрикалар бойынша бағаланды:

- Accuracy
- Precision
- Recall
- F1-score
- mAP (mean Average Precision)

Нақты уақыттағы өнімділік:

- FPS (frames per second)
- kіdіpic (latency)

Технологиялық стекке келетін болсақ, жүйе терең оқытуға негізделген жаттығуларды тану үшін YOLOv11 және қозғалысты бақылау және бейнені өңдеу үшін OpenCV пайдаланады.

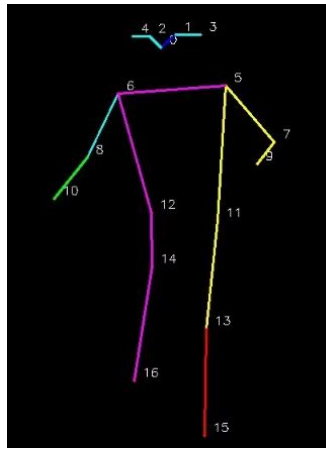
Нәтижелер және талқылау

Жасанды интеллектке негізделген ұсынылған жүйесі жаттығуларды тану дәлдігі, қорытынды жасау жылдамдығы және белгілі бір пайдаланушы атрибуттарына бейімделу тұрғысынан қолданыстағы әдістермен салыстырғанда айтарлықтай жақсартуларды көрсетеді. Бұл жетілдірілген өнімділікке ықпал еткен негізгі фактор – дәлдік үшін де, кескінді тану үшін де тиімді YOLOv11 мен CNN комбинациясы.

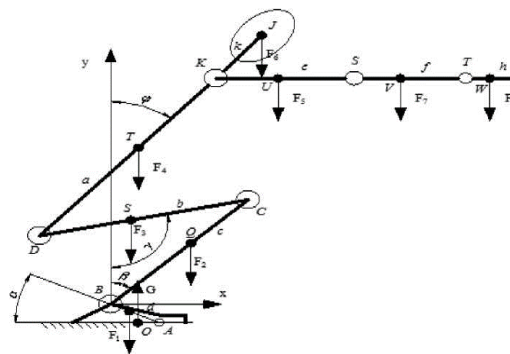
Жүктемелерді есептеу үшін біз биомеханикада кеңінен қабылданған дене салмағының оның жеке бөліктеріне таралу пропорцияларын қолданамыз. Бұл жағдайда жұптасқан мүшелер (қолдар, аяқтар) бүйірлік проекцияда жиынтық болып саналады.

Зерттеу объектісі денесінің жеке геометриялық сипаттамаларын анықтау үшін тиісті дене мүшелерінің ауырлық орталықтарының нүктелерінде қолданылатын салмақ жүктемелерін көрсететін құрылымдық диаграмма жасаймыз (Сурет 1, 2).

Биомеханиканың қабылданған нормаларына сәйкес, бой мен дене салмағының белгілі мәндерінде компьютерлік бағдарлама аяқ-қолдардың ұзындықтары мен массаларын есептеуге және соның нәтижесінде жеке буынның ауырлық центрін (АЦ), сондай-ақ бүкіл дененің жалпы ауырлық центрін анықтауға мүмкіндік береді.



Сурет 1 – Кілттік нүктелер картасы



Сурет 2 – Жаттығуды тігінен орындау кезінде адамның құрылымдық сызбасы

Сызбада:

O – жалпы массалар центрі G-нің әсер ету нүктесі;

d – табанның ұзындығы;

c – сирақтың ұзындығы;

b – санның ұзындығы;

a – тұлғаның ұзындығы;

k – бастың ауырлық центріне дейінгі қашықтық;

e – иықтың ұзындығы;

f – білек ұзындығы;

v – алақан ұзындығы;

u – y тік осінен O нүктесіне дейінгі қашықтық;

$F_1 = 0.04 \cdot G$ – табандардың салмағы;

$F_2 = 0.1 \cdot G$ – сирақтардың салмағы;

$F_3 = 0.24 \cdot G$ – сандардың салмағы;

$F_4 = 0.43 \cdot G$ – тұлғаның салмағы;

$F_5 = 0.06 \cdot G$ – иықтардың жиынтық салмағы;

$F_6 = 0.07 \cdot G$ – бастың салмағы;

$F_7 = 0.04 \cdot G$ – білектердің салмағы;

$F_8 = 0.02 \cdot G$ – алақандардың салмағы.

Жаттығуды орындау барысында дене бөліктерінің қалпының өзгеруі α , β , γ және ϕ бұрыштарымен анықталады. Осы бұрыштардың мәндеріне мүмкін болатын шектеулер енгізейік.

α бұрышы аяқ ұшымен тіреліп көтерілу кезінде табиғи 25° мәндерінен артуы мүмкін. Ал табан толықтай тірек бетіне жанасып орындалатын жаттығуларда оның мәнін шамамен 25° деп қабылдауға болады.

β бұрышы тобық буынының қозғалғыштығының шектеулілігіне байланысты 0-ден 40° -қа дейін өзгеруі мүмкін және тәуелсіз аргумент ретінде қабылдануы мүмкін. Алайда, отырып-


```

w, h, fps = (int(cap.get(x)) for x in (cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,
cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, cv2.CAP_PROP_FPS))

gym = solutions.AIGym(
    line_width=2,
    show=True,
    kpts=[6, 8, 10],
)

while cap.isOpened():
    success, im0 = cap.read()
    if not success:
        print("Video frame is empty or processing is complete.")
        break
    results = gym(im0)

cv2.destroyAllWindows()

```

Бағдарлама жаттығуларды мониторингтеу үшін пайдалану бірқатар негізгі артықшылықтарды қамтамасыз етеді:

- Өнімділік: Мониторинг деректеріне сүйене отырып жаттығуларды бейімдеу арқылы жоғары нәтижелерге қол жеткізуге болады.
- Мақсаттарға жету: Айқын прогреске жету үшін фитнес мақсаттарды оңай бақылап, түзетуге мүмкіндік береді.
- Дербестік: Жеке деректеріңізге негізделген жеке жаттығу жоспарларын құрып, максималды тиімділікке қол жеткізесіз.
- Денсаулық туралы хабардарлық: Денсаулыққа қатысты ықтимал мәселелерді немесе артық жаттығу белгілерін ерте анықтау.
- Негізделген шешімдер: Режимді түзету және шынайы мақсаттар қою үшін деректерге негізделген шешімдер қабылдау.

Бағдарламан компьютерлік көру мүмкіндіктерінің арқасында жаттығуларды анықтау мен қадағалауда жоғары дәлдікке ие. Ол дененің негізгі нүктелері мен буындарын дәл бақылап, жаттығу техникасы мен тиімділік көрсеткіштері бойынша нақты уақыт режимінде кері байланыс ұсынады. Алдын ала бапталған модель салмақтары мен мықты архитектурасы жоғары дәлдік пен сенімділікті қамтамасыз етеді. Нақты өмірдегі мысалдар құжаттаманың практикалық қолдану бөлігінде келтірілген, онда отжимание мен подтягивание жаттығуларының санын есептеу көрсетілген.

Жаттығу мониторингі нәтижелерін сақтау үшін кодты өзгертіп, өңделген кадрларды сақтайтын бейнежазба функциясын қосуға болады. Төменде соған арналған код келтірілген:

```

import cv2
from ultralytics import solutions

cap = cv2.VideoCapture("path/to/video.mp4")
assert cap.isOpened(), "Error reading video file"
w, h, fps = (int(cap.get(x)) for x in (cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,
cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, cv2.CAP_PROP_FPS))

video_writer = cv2.VideoWriter("workouts.avi", cv2.VideoWriter_fourcc(*"mp4v"), fps, (w, h))

gym = solutions.AIGym(
    line_width=2,
    show=True,
    kpts=[6, 8, 10],
)

while cap.isOpened():
    success, im0 = cap.read()
    if not success:

```

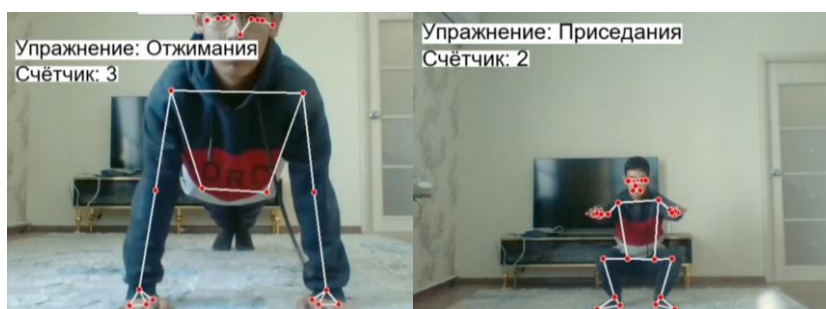
```

print("Video frame is empty or processing is complete.")
break
results = gym(im0)
video_writer.write(results.plot_im)

cap.release()
video_writer.release()
cv2.destroyAllWindows()

```

Бұл код қадағаланған бейнені шығыс файлға жазып, жаттығу нәтижелерін кейін қарап шығуға немесе қосымша талдау алу үшін жаттықтырушылармен бөлісуге мүмкіндік береді (Сурет 4).



Сурет 4 – Бағдарламаның қолданысы

Қорытынды

Жасанды интеллекттің жаттықтыру саласында болашағы зор екені сөзсіз. Ол жаттығулардың тиімділігін арттыруға, жарақат алу қаупін азайтуға және жаттықтыру қызметтерін көпшілікке қолжетімді етуге қабілетті. Алайда, ол тірі жаттықтырушыны толықтай алмастыра алмайды. Негізгі мәселе – технология мен адам факторының арасындағы тепе-теңдікті табу, сонда ғана пайдаланушы ең жоғары көрсеткішке қол жеткізе алады.

Технологиялар жаттықтырушының қолындағы қуатты құралға айнала алады, бірақ оның кәсіби тәжірибесі мен адами көзқарасын алмастыра алмайды. Мәселе – жаттықтырушыны ЖИ алмастыра ма дегенде емес, ЖИ-ді жаттықтыру жұмысының сапасын арттыру үшін қалай тиімді пайдалану керектігінде

Ғылыми-зерттеу жұмысы аясында Ultralytics YOLO26, OpenCV және т.б. кітапханаларды пайдалана отырып, Python тілінде компьютерлік көруге негізделген бағдарлама жасалды. Бағдарлама көмегімен бейне арқылы жаттығулар кезіндегі әрекеттің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

ULTRALYTICS YOLO26 көмегімен позаны бағалау арқылы жаттығуларды бақылау нақты уақыт режимінде негізгі дене бағдарлары мен буындарды дәл бақылау арқылы жаттығуларды бағалауды жақсартады. Бұл технология жаттығу формасы туралы жедел кері байланыс береді, жаттығу режимін бақылайды және тиімділік көрсеткіштерін өлшейді, пайдаланушылар мен жаттықтырушылар үшін жаттығуларды тиімділейді.

Әдебиеттер тізімі

1. Moeslund T.B., Thomas G., Hilton A. Computer Vision in Sports. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-09396-3#bibliographic-information> (date of access: 17.04.2024).
2. Naik B.T. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues / B.T. Naik, M.F. Hashmi, N.D. Bokde // Future Trends and Research Directions. Applied Sciences. – 2022. – vol. 12, issue 9. <https://doi.org/10.3390/app12094429>.
3. Smith J., Johnson M. Exploring the applications of computer vision in sports. <https://www.ultralytics.com/blog/exploring-the-applications-of-computer-vision-in-sports> (date of access: 17.01.2026).
4. AI-FIT COACH – Revolutionizing Personal Fitness with Pose Detection, Correction and Smart Guidance / K. Lakshmi Joshitha et al. // International Conference on Communication, Computing and Internet of Things, Chennai, India. – 2024. – P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IC3IoT60841.2024.10550400>.

5. Lakshay Gupta Virtual Fitness Trainer using Artificial Intelligence / Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, Kapil Madan // *Proceedings of the 2024 Sixteenth International Conference on Contemporary Computing*. – 2024. – P. 226-233. <https://doi.org/10.1145/3675888.3676056>.
6. Empowering the Sports Scientist with Artificial Intelligence in Training, Performance, and Health Management / Nuno Mateus et al. // *Sensors*. – 2025. – vol. 25, № 1. – P. 1-12. <https://doi.org/10.3390/s25010139>.
7. Enhanced Gym Performance Prediction using Machine Learning: A Comprehensive Model for Personalized Fitness / R. Babitha Lincy et al. // *3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems*, Pudukkottai, India. – 2024. – P. 1396-1400. <https://doi.org/10.1109/ICACRS62842.2024.10841763>.
8. Вельможко Н.И. Разработка алгоритма распознавания физических упражнений / Н.И. Вельможко, А.А. Бойко // *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: труды XIV Международной научной конференции*. Кн. 2. – Владимир, 2020. – С. 94-99.
9. Германов К.В. Анализ применения компьютерного зрения в спорте / К.В. Германов, Т.В. Красноперева, А.А. Германова // *Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта*. – 2023. – № 9 (223). – С. 100–105.
10. Терехин А.Д. Система оценивания спортивных упражнений по нейросетевому анализу видеоряда / А.Д. Терехин, О.Р. Ильялов, А.В. Степанов // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2022. – № 1. – С. 75-86.
11. Анализ подходов, методов и решений для детектирования позы человека. Выбор инструмента для задачи определения эмоционального состояния человека по его позе / Ю.В. Киселев и др. // *Современные наукоемкие технологии*. – 2023. – № 6. – С. 41-47.
12. Сивцов И.В. Революция искусственного интеллекта в спортивном туризме: эффективность, безопасность и персонализация / И.В. Сивцов // *Проблемы и перспективы развития спортивного ориентирования и активных видов туризма: материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Смоленск: Изд-во СГУС, 2024. – С. 222-224.
13. Коберник П.С. Использование искусственного интеллекта в сфере спорта для оптимизации работы фитнес-приложений / П.С. Коберник // *Молодой ученый*. – 2024. – № 15(514). – С. 453-454.
14. Кулаков П.А. Особенности разработки компьютерных обучающих тренажеров в Unity 3D / П.А. Кулаков, А.С. Еремин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2024. – № 1. – С. 177-181.
15. Медникова Е.В. Перспективы применения приложений с искусственным интеллектом в физической культуре / Е.В. Медникова, Е.С. Котляров, М.В. Попова // *Студенческий спорт: инновации, технологии и цифровая трансформация: материалы I Всероссийской научно-практической конференции (Калининград, 30-31 марта 2023 г.)*. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2023. – С. 153-156.
16. Распознавание активности человека по видеоданным / А.В. Пятаева и др. // *International Journal of Advanced Studies*. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 96-110.
17. Шрайнер Б.А. Инновационные подходы в организации занятий физической культурой с применением компьютерных технологий / Б.А. Шрайнер, К.М. Жомин // *Вестник педагогических инноваций*. – 2023. – № 4(72). – С. 77-85.
18. Конопко Е.А. Образование и искусственный интеллект: возможности, ограничения и перспективы / Е.А. Конопко, М.Г. Сидин // *Студенческая наука для развития информационного общества: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции с приглашением зарубежных ученых*. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2024. – С. 37-42.

References

1. Moeslund T.B., Thomas G., Hilton A. Computer Vision in Sports. *Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-09396-3#bibliographic-information> (date of access: 17.04.2024). (In English).
2. Naik B.T. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues / B.T. Naik, M.F. Hashmi, N.D. Bokde // *Future Trends and Research Directions. Applied Sciences*. – 2022. – vol. 12, issue 9. <https://doi.org/10.3390/app12094429>. (In English).

3. Smith J., Johnson M. Exploring the applications of computer vision in sports. <https://www.ultralytics.com/blog/exploring-the-applications-of-computer-vision-in-sports> (date of access: 17.01.2026). (In English).
4. AI-FIT COACH – Revolutionizing Personal Fitness with Pose Detection, Correction and Smart Guidance / K. Lakshmi Joshitha et al. // International Conference on Communication, Computing and Internet of Things, Chennai, India. – 2024. – R. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IC3IoT60841.2024.10550400>. (In English).
5. Lakshay Gupta Virtual Fitness Trainer using Artificial Intelligence / Lakshay Gupta, Shrey Gurbuxani, Kapil Madan // Proceedings of the 2024 Sixteenth International Conference on Contemporary Computing. – 2024. – R. 226-233. <https://doi.org/10.1145/3675888.3676056>. (In English).
6. Empowering the Sports Scientist with Artificial Intelligence in Training, Performance, and Health Management / Nuno Mateus et al. // Sensors. – 2025. – vol. 25, № 1. – R. 1-12. <https://doi.org/10.3390/s25010139>. (In English).
7. Enhanced Gym Performance Prediction using Machine Learning: A Comprehensive Model for Personalized Fitness / R. Babitha Lincy et al. // 3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, Pudukkottai, India. – 2024. – R. 1396-1400. <https://doi.org/10.1109/ICACRS62842.2024.10841763>. (In English).
8. Vel'mozhko N.I. Razrabotka algoritma raspoznavaniya fizicheskikh uprazhnenii / N.I. Vel'mozhko, A.A. Boiko // Fizika i radioelektronika v meditsine i ehkologii: trudy XIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Kn. 2. – Vladimir, 2020. – S. 94-99. (In Russian).
9. Germanov K.V. Analiz primeneniya komp'yuternogo zreniya v sporte / K.V. Germanov, T.V. Krasnoperova, A.A. Germanova // Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta. – 2023. – № 9 (223). – S. 100–105. (In Russian).
10. Terekhin A.D. Sistema otsenivaniya sportivnykh uprazhnenii po neirosetevomu analizu videoryada / A.D. Terekhin, O.R. Il'yalov, A.V. Stepanov // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya. – 2022. – № 1. – S. 75-86. (In Russian).
11. Analiz podkhodov, metodov i reshenii dlya detektirovaniya pozy cheloveka. Vybora instrumenta dlya zadachi opredeleniya ehmotSIONal'nogo sostoyaniya cheloveka po ego poze / Yu.V. Kiselev i dr. // Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. – 2023. – № 6. – S. 41-47. (In Russian).
12. Sivtsov I.V. Revolyutsiya iskusstvennogo intellekta v sportivnom turizme: ehffektivnost', bezopasnost' i personalizatsiya / I.V. Sivtsov // Problemy i perspektivy razvitiya sportivnogo orientirovaniya i aktivnykh vidov turizma: materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. – Smolensk: Izd-vo SGUS, 2024. – S. 222-224. (In Russian).
13. Kobernik P.S. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v sfere sporta dlya optimizatsii raboty fitnes-prilozhenii / P.S. Kobernik // Molodoi uchenyi. – 2024. – № 15(514). – S. 453-454. (In Russian).
14. Kulakov P.A. Osobennosti razrabotki komp'yuternykh obuchayushchikh trenazherov v Unity 3D / P.A. Kulakov, A.S. Eremin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 1. – S. 177-181. (In Russian).
15. Mednikova E.V. Perspektivy primeneniya prilozhenii s iskusstvennym intellektom v fizicheskoi kul'ture / E.V. Mednikova, E.S. Kotlyarov, M.V. Popova // Studencheskii sport: innovatsii, tekhnologii i tsifrovaya transformatsiya: materialy I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kaliningrad, 30-31 marta 2023 g.). – Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2023. – S. 153-156. (In Russian).
16. Raspoznavanie aktivnosti cheloveka po videodannym / A.V. Pyataeva i dr. // International Journal of Advanced Studies. – 2022. – T. 12, № 4. – S. 96-110. (In Russian).
17. Shrainer B.A. Innovatsionnye podkhody v organizatsii zanyatii fizicheskoi kul'turoi s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii / B.A. Shrainer, K.M. Zhomin // Vestnik pedagogicheskikh innovatsii. – 2023. – № 4(72). – S. 77-85. (In Russian).
18. Konopko E.A. Obrazovanie i iskusstvennyi intellekt: vozmozhnosti, ogranicheniya i perspektivy / E.A. Konopko, M.G. Sidin // Studencheskaya nauka dlya razvitiya informatsionnogo obshchestva: materialy KhV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s priglazheniem zarubezhnykh uchenykh. – Stavropol': Izd-vo SKFU, 2024. – S. 37-42. (In Russian).

А.К. Кереев¹, К.П. Аман¹, Л.Е. Капарова¹, С.М. Мухтар¹, Е.А. Оспанов^{2*}

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова
030000, Республика Казахстан, г. Актобе пр. А. Молдагуловой, д. 34

²Шәкәрім университет
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ОЦЕНКА БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

В настоящее время в сфере спорта и физической культуры актуальными являются задачи повышения эффективности тренировочного процесса, снижения риска травматизма, а также персонализации обучения и тренировок. В связи с этим активно развиваются исследования, направленные на автоматизированный анализ и оценку физических упражнений с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерного зрения. Указанные технологии позволяют отслеживать движения человека в режиме реального времени и с высокой точностью определять биомеханические параметры.

В данной работе рассматривается разработка интеллектуального фитнес-помощника на основе компьютерного зрения, предназначенного для распознавания физической активности, анализа техники выполнения упражнений и предоставления пользователям оперативной обратной связи. Предложенная система реализована с использованием методов глубокого обучения на базе архитектуры Ultralytics YOLO и библиотеки OpenCV. Система определяет ключевые точки тела и суставы, анализирует их пространственное положение, оценивает корректность выполнения упражнений, подсчитывает количество повторений и определяет показатели эффективности.

В ходе исследования был собран, предварительно обработан и аннотирован набор видеоданных, включающий различные двигательные упражнения. Были обучены модели глубоких нейронных сетей и проведена оценка их точности и производительности. Кроме того, на основе биомеханической модели выполнены расчёты нагрузок на отдельные части тела и сформированы корректирующие рекомендации, направленные на улучшение качества движений.

Экспериментальные результаты показали, что предложенная система обладает высокой точностью распознавания упражнений и эффективно функционирует в режиме реального времени. Разработанное программное решение может быть использовано людьми, занимающимися физическими упражнениями в домашних условиях, спортсменами, тренерами и специалистами в области физической культуры в качестве дополнительного инструмента для мониторинга и оптимизации тренировочного процесса. Результаты исследования подтверждают перспективность широкого применения технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения в сфере фитнеса и спорта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, глубокое обучение, архитектура YOLO, биомеханический анализ, мониторинг упражнений, персонализированные тренировки

A.K. Kereyev¹, K.P. Aman¹, L.E. Kaparova¹, S.M. Mukhtar¹, E.A. Ospanov^{2*}

¹K. Zhubanov Aktobe Regional University,
030000, Republic of Kazakhstan, Aktobe, 34 A. Moldagulova Ave.

²Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ASSESSMENT OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF PHYSICAL EXERCISES BASED ON COMPUTER VISION

Currently, increasing the effectiveness of the training process, reducing the risk of injuries, and personalizing training and education are key challenges in the fields of sports and physical education. In this context, research focused on the automated analysis and evaluation of physical exercises using artificial intelligence (AI) and computer vision technologies is rapidly developing. These technologies enable real-time tracking of human movement and accurate determination of biomechanical parameters.

This paper presents the development of an intelligent computer vision – based fitness assistant designed to recognize physical activity, analyze exercise execution techniques, and provide users with real-time feedback. The proposed system is implemented using deep learning methods based on the Ultralytics YOLO architecture and the OpenCV library. The system detects key body landmarks and joints, analyzes their

spatial positions, evaluates the correctness of exercise execution, counts repetitions, and determines performance metrics.

During the study, a dataset of video recordings containing various exercise movements was collected, preprocessed, and annotated. Deep neural network models were trained, and their accuracy and performance were evaluated. In addition, biomechanical modeling was applied to calculate loads on individual body segments and to generate corrective recommendations aimed at improving movement quality.

Experimental results demonstrate that the proposed system achieves high accuracy in exercise recognition and operates efficiently in real time. The developed software solution can be used by individuals training at home, athletes, coaches, and physical education professionals as an additional tool for monitoring and optimizing the training process. The research findings confirm the promising potential for widespread application of artificial intelligence and computer vision technologies in the fields of fitness and sports.

Key words: artificial intelligence, computer vision, deep learning, YOLO architecture, biomechanical analysis, exercise monitoring, personalized training

Авторлар туралы мәліметтер

Адилжан Кутымович Кереев – PhD, информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: adiljan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Кульнар Панабековна Аман – т.ғ.к., информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Ләззат Есенғалиевна Капарова – магистр, информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының аға оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6106-9902>.

Сейткерей Мәлікұлы Мұхтар – п.ғ.к., информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3825-3025>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Сведения об авторах

Адилжан Кутымович Кереев – PhD, доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: adiljan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Кульнар Панабековна Аман – к.т.н., доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Зухра Кусайновна Калкабаева – PhD, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6106-9902>.

Сейткерей Маликулы Мухтар – к.п.н., доцент кафедры информатики и информационных технологий, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Республика Казахстан; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3825-3025>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, ассоциированный профессор, университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Information about the Authors

Adilzhan Kereyev – PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: adiljan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Kulnar Aman – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulnar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8283-5807>.

Zukhra Kalkabayeva – PhD, Senior Lecturer of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: lazzat_09@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6106-9902>.

Seitkerei Malikovich Mukhtar – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Republic of Kazakhstan; e-mail: Seitkerei_7676@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3825-3025>.

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-2](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-2)



MPHTI: 47.14.07, 81.93.29

И.А. Сенюшин¹, Н.С. Глазырина^{1*}, Р.Б. Ибраев¹, Е.К. Джилкибаев¹, А. Әділғазыұлы²

¹ТОО «TSARKA R&D»,

010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 51/1

²Назарбаев Университет,

010000, Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай Батыра, 53

*e-mail: glazirinan@yandex.ru

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ МАРШРУТ РАЗРАБОТКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ С ПЛИС-ВЕРИФИКАЦИЕЙ

Аннотация: В статье представлен и экспериментально апробирован формализованный маршрут разработки специализированного криптографического контроллера для аппаратной реализации алгоритмов электронной цифровой подписи. Разработанный маршрут охватывает полный цикл проектирования и включает этапы архитектурного синтеза, RTL-реализации, аппаратной верификации на ПЛИС и физической реализации в рамках MPW-потока. Архитектура контроллера построена по модульному принципу, при котором система представляет собой совокупность функционально независимых аппаратных блоков, разрабатываемых и верифицируемых как отдельные модули. Для каждого блока выполняются RTL-реализация, формирование программного интерфейса и аппаратная верификация на этапе ПЛИС-прототипирования, что обеспечивает раннее выявление функциональных и интерфейсных ошибок. Для критически важных компонентов дополнительно применяется физическая верификация в маршруте RTL-to-GDS с прохождением проектных проверок, включая DRC и LVS. После завершения модульной верификации выполняется интеграция блоков, формируется карта памяти и проводится системная аппаратная верификация. Экспериментальная апробация выполнена на демонстрационном вычислительном модуле на базе ядра TinyQV (RISC-V) с использованием платформ GOWIN Tang Primer 20K и TinyTapeout (PDK SkyWater SKY130). Полученные результаты подтверждают воспроизводимость предложенного маршрута и его практическую применимость для разработки специализированных криптографических контроллеров и защищённых встраиваемых систем.

Ключевые слова: криптографический контроллер, электронная цифровая подпись, ПЛИС прототипирование, аппаратная верификация, MPW прототипирование, информационная безопасность.

Введение

В современных государственных, финансовых и корпоративных информационных системах одной из ключевых задач является обеспечение защищённого электронного документооборота и выполнения электронных транзакций. Для решения данной задачи широко применяется электронная цифровая подпись (ЭЦП), обеспечивающая подлинность источника, целостность данных и неотказуемость авторства электронных документов [1-4]. В отличие от программной реализации, аппаратная реализация ЭЦП на базе специализированных криптографических контроллеров обеспечивает более высокий уровень защищённости за счёт изоляции ключевого материала и снижения зависимости от уязвимостей программного обеспечения [5-9].