

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

**SANOAT SOHASIDA SUN'IY INTELLEKT: TIBBIY REABILITATSIYADA
IMU ASOSIDAGI AQLLI MONITORING TIZIMLARI**

Khujayev Otabek Kadamjonovich,

PHD, Kompyuter injiniring kafedrası mudiri, UrDU.

+99897-513-27-86

otabek.hujayev@gmail.com

Yusupova Farog'at Yakubboy qizi,

Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti tayanch doktoranti

+99897-457-02-26

f.yusupova@tsue.uz

Annotatsiya

Ushbu maqolada sun'iy intellekt (SI), Internet of Things (IoT) va wearable sensor texnologiyalarining tibbiy reabilitatsiyadagi qo'llanilishi sanoatdagi aqlli monitoring tizimlari konsepsiyasi bilan o'zaro bog'liqlikda tahlil qilinadi. Xususan, Inertial Measurement Unit (IMU) asosidagi sensorlar yordamida bemorlarning harakatlarini real vaqt rejimida kuzatish, biomekanik parametrlarni ob'ektiv baholash, sun'iy intellekt algoritmlari yordamida harakatlarni avtomatik aniqlash va klassifikatsiya qilish hamda reabilitatsiya jarayonining dinamikasini baholash imkoniyatlari ko'rib chiqiladi. IMU sensorlaridan olinadigan akselerometr va giroskop signallarini qayta ishlash, signal shovqinlarini kamaytirish, sensor fusion texnologiyalaridan foydalanish va AI modellariga tayyor ma'lumotlarni shakllantirish masalalariga alohida e'tibor qaratiladi. Shuningdek, Convolutional Neural Network (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Transformer va klassik Machine Learning algoritmlarining harakatlarni tanish, patologik harakatlarni aniqlash, reabilitatsiya mashqlarining bajarilish sifatini baholash va tiklanish dinamikasini prognozlashdagi imkoniyatlari tahlil qilinadi. IMU sensorlarini elektromiografiya (EMG), plantar pressure va boshqa fiziologik sensorlar bilan integratsiyalash orqali multimodal sun'iy intellekt tizimlarini yaratish imkoniyatlari ko'rib chiqiladi. Sensor-edge-cloud arxitekturasida IoT texnologiyalarining tele-reabilitatsiyadagi o'rni tahlil qilinib, bunday tizimlarning sanoatdagi real vaqt monitoringi, anomaly detection, predictive analytics va intelligent decision support konsepsiyalariga o'xshashligi ko'rsatiladi.

Kalit so'zlar: sun'iy intellekt, Internet of Things, IMU sensorlar, aqlli monitoring, tibbiy reabilitatsiya, wearable texnologiyalar, machine learning, deep

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

learning, CNN, LSTM, Transformer, sensor fusion, tele-reabilitatsiya, edge computing.

Kirish

So'nggi yillarda sun'iy intellekt, Internet of Things va raqamli sensor texnologiyalarining jadal rivojlanishi sanoat korxonalarida ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish, real vaqt rejimida monitoring qilish, texnik nosozliklarni oldindan aniqlash va qaror qabul qilish jarayonlarini takomillashtirish imkonini bermoqda. Sanoatdagi bunday yondashuvlar ko'pincha Industrial Internet of Things, predictive maintenance, anomaly detection va intelligent monitoring konsepsiyalari bilan bog'liq.

Mazkur texnologik yondashuvlar faqat ishlab chiqarish sohasi bilan cheklanib qolmay, sog'liqni saqlash va tibbiy reabilitatsiyada ham keng qo'llanila boshladi. Ayniqsa, wearable sensorlar va mashinaviy o'rganish algoritmlarining integratsiyasi bemorning funksional holatini uzluksiz va ob'ektiv baholash uchun yangi imkoniyatlarni yaratmoqda. Wearable sensorlar yordamida harakat, mushak va boshqa fiziologik ma'lumotlarni yig'ish hamda ularni machine learning algoritmlari yordamida tahlil qilish zamonaviy aqlli reabilitatsiyaning muhim yo'nalishlaridan biriga aylanmoqda [1].

An'anaviy reabilitatsiya jarayonida bemorning funksional holatini baholash ko'pincha klinik kuzatuv, funksional testlar va mutaxassisning ekspert bahosiga asoslanadi. Ushbu yondashuv klinik amaliyotda muhim ahamiyatga ega bo'lsa-da, bemorning kundalik hayotdagi harakatlarini uzoq vaqt davomida uzluksiz kuzatish imkoniyati cheklangan.

Wearable sensorlar ushbu muammoni qisman bartaraf etib, bemorning tabiiy muhitdagi harakatlarini uzoq vaqt davomida qayd etish imkonini beradi. Bunday ma'lumotlarni IoT infratuzilmasi orqali masofaviy platformaga uzatish esa tele-reabilitatsiya tizimlarini shakllantirishga xizmat qiladi [2].

IMU sensorlari ushbu maqsad uchun istiqbolli texnologiyalardan biri hisoblanadi. Ularning kichik o'lchami, portativligi va nisbatan kam energiya sarfi inson tanasining turli segmentlariga o'rnatish imkonini beradi. IMU ma'lumotlari yordamida yurish, muvozanat, tana holati, bo'g'im harakati va boshqa funksional parametrlarni aniqlash mumkin.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Shu nuqtai nazardan, tibbiy reabilitatsiyada IMU asosidagi monitoring tizimini sanoatdagi aqlli monitoring tizimining analogi sifatida ko'rish mumkin. Sanoat tizimida sensor ishlab chiqarish uskunasi holatini o'lchasa, IoT ma'lumotlarni uzatsa va AI algoritmlari ularni tahlil qilsa, reabilitatsiya tizimida IMU bemorning harakatlarini o'lchaydi, IoT ma'lumotlarni uzatadi va sun'iy intellekt bemorning funksional holatini baholaydi.

Natijada sensor → ma'lumotlarni qayta ishlash → AI tahlili → holatni baholash → anomaliyani aniqlash → prognoz → klinik qarorni qo'llab-quvvatlash zanjiri shakllanadi.

IMU asosidagi aqlli monitoring tizimi

Inertial Measurement Unit — IMU — inson yoki obyekt harakatini o'lchash uchun ishlatiladigan inertial sensorlar majmuasidir. Odatda IMU tarkibida akselerometr va giroskop mavjud bo'ladi. Ayrim qurilmalarda magnetometr ham qo'shiladi.

Akselerometr chiziqli tezlanishlarni, giroskop esa burchak tezligini o'lchaydi. Ushbu sensorlardan olinadigan ma'lumotlar signalni qayta ishlash va sensor fusion algoritmlari orqali tana segmentlarining harakati va orientatsiyasini baholashga imkon beradi.

IMU asosidagi tizimlarda sensorning joylashuvi muhim ahamiyatga ega. Yurish monitoringida sensor oyoq yoki boldir sohasiga, postural monitoringda esa bel yoki trunk sohasiga joylashtirilishi mumkin. Bo'g'im harakatlarini baholashda esa sensorlarni tegishli tana segmentlariga joylashtirish orqali ularning nisbiy harakatini aniqlash mumkin.

IMU texnologiyasining muhim afzalligi uning laboratoriya sharoitidan tashqarida ham ishlash imkoniyatidir. Wearable inertial sensorlarning yurish parametrlarini baholashdagi validity va reliability ko'rsatkichlari bo'yicha olib borilgan tizimli tadqiqotlar IMU texnologiyasining ayrim spatio-temporal va biomekanik parametrlarni aniqlashda istiqbolli ekanligini ko'rsatadi [3].

Shu bilan birga, IMU ma'lumotlarining aniqligi sensorning joylashuvi, orientatsiyasi, signalni qayta ishlash algoritmi va bajarilayotgan harakat turiga bog'liq.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Shuning uchun bunday tizimlarni klinik yoki laboratoriya reference tizimlari bilan validatsiya qilish zarur.

IMU signallarini qayta ishlash va sun'iy intellektga tayyorlash

IMU sensorlaridan olinadigan ma'lumotlar odatda katta hajmdagi vaqt qatorlaridan iborat bo'ladi. Ushbu ma'lumotlarda o'lchov shovqini, bias, drift va turli harakat artefaktlari mavjud bo'lishi mumkin.

Shu sababli xom sensor ma'lumotlarini bevosita AI modeliga uzatishdan oldin ularni dastlabki qayta ishlash talab etiladi.

Umumiy jarayon IMU ma'lumotlarini yig'ish, filtrlash, sensor fusion, signalni segmentatsiya qilish, muhim xususiyatlarni ajratish va AI modeliga uzatish bosqichlaridan tashkil topishi mumkin.

Signalni dastlabki qayta ishlashda low-pass filter, moving average, complementary filter va Kalman filter kabi usullardan foydalanish mumkin. Ayniqsa, akselerometr va giroskop ma'lumotlarini birlashtirish orqali tana segmentining orientatsiyasini barqarorroq aniqlash mumkin.

IMU asosidagi orientatsiya monitoringida complementary filter va boshqa sensor fusion algoritmlaridan foydalanish sensor shovqini va drift ta'sirini kamaytirishda muhim rol o'ynaydi [4].

Ushbu bosqichning asosiy maqsadi AI modeliga sifatli, barqaror va standartlashtirilgan ma'lumotlarni taqdim etishdan iborat. AI tizimining samaradorligi faqat tanlangan modelga emas, balki modelga berilayotgan ma'lumotlarning sifatiga ham bog'liq.

Sun'iy intellekt asosida harakatlarni tahlil qilish

IMU sensorlaridan olinadigan ma'lumotlar vaqt bo'yicha ketma-ketlikdan tashkil topganligi sababli ularni sun'iy intellekt yordamida tahlil qilish katta imkoniyatlarga ega.

AI asosidagi tizimlar inson faoliyatini avtomatik aniqlash, yurish va boshqa harakatlarni klassifikatsiya qilish, rehabilitatsiya mashqlarini tanib olish, mashqning to'g'ri yoki noto'g'ri bajarilishini aniqlash, patologik harakatlarni aniqlash, funksional

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

holatni baholash va rehabilitatsiya dinamikasini kuzatish kabi vazifalarni bajarishi mumkin.

Klassik Machine Learning algoritmlariga k-NN, Decision Tree, Random Forest va Support Vector Machine kabi usullar kiradi. Bunday algoritmlarda signalning statistik, vaqt va chastota sohasidagi xususiyatlari ajratib olinib, modelga kirish ma'lumotlari sifatida beriladi.

Biroq katta hajmdagi sensor ma'lumotlari bilan ishlashda Deep Learning yondashuvlari yanada katta imkoniyatlarni taqdim etadi. Wearable sensorlar asosidagi Human Activity Recognition tizimlarida Deep Learning algoritmlarining rivojlanishi vaqt qatorlaridan murakkab xususiyatlarni avtomatik o'rganish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirdi [5].

Deep Learning asosida aqlli rehabilitatsiya

Deep Learning algoritmlari katta hajmdagi sensor ma'lumotlaridan murakkab xususiyatlarni avtomatik o'rganish imkonini beradi. Bu esa IMU asosidagi monitoring tizimlarida qo'lda feature engineering jarayonini kamaytirishi mumkin.

Convolutional Neural Network modellari IMU signallaridagi lokal vaqt xususiyatlarini aniqlash va harakatlarni klassifikatsiya qilish uchun ishlatilishi mumkin. CNN yordamida yurish turi, mashq turi, harakat bosqichi va normal yoki patologik harakatlarni avtomatik aniqlash imkoniyati mavjud.

Long Short-Term Memory tarmoqlari vaqt bo'yicha uzoq muddatli bog'liqliklarni modellashtirish imkoniyatiga ega. Shu sababli LSTM yurish sikllari, mashqlar ketma-ketligi va bemorning vaqt davomida o'zgarib boruvchi harakatlarini tahlil qilish uchun qo'llanilishi mumkin.

Transformer arxitekturalari esa attention mexanizmi yordamida vaqt qatorlaridagi uzoq muddatli bog'liqliklarni modellashtirish imkonini beradi. Ushbu yondashuv uzoq muddatli rehabilitatsiya monitoringida bemorning harakatlaridagi o'zgarishlarni aniqlash uchun istiqbolli hisoblanadi.

AI algoritmlarini rehabilitatsiya vazifalari bo'yicha quyidagicha guruhlash mumkin:

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Vazifa	AI yondashuvi	Natija
Harakatni aniqlash	k-NN, SVM, Random Forest	Harakat turi
Faoliyatni tanish	CNN, LSTM	Activity class
Patologik harakatni aniqlash	ML/DL	Normal yoki patologik
Harakat segmentatsiyasi	CNN/LSTM	Harakat bosqichlari
Mashq sifatini baholash	CNN/LSTM	To'g'ri yoki noto'g'ri
Funksional holatni baholash	Regression/DL	Funksional ko'rsatkich
Reabilitatsiya dinamikasi	LSTM/Transformer	Tiklanish tendensiyasi
Anomaliyani aniqlash	Autoencoder/DL	Noodatiy harakat

1-jadval. Patologik harakatlarni sun'iy intellekt yordamida aniqlash

Tibbiy reabilitatsiyadagi muhim vazifalardan biri normal va patologik harakatlarni farqlashdir.

Masalan, bemorda yurish tezligining pasayishi, qadamlar orasidagi asimetriya, tana holatining o'zgarishi yoki ma'lum bir bo'g'im harakatining cheklanishi reabilitatsiya jarayonidagi muhim klinik belgilar bo'lishi mumkin.

AI modeli ushbu parametrlarni alohida emas, balki vaqt davomida shakllangan harakat namunasi sifatida tahlil qilishi mumkin.

Bu yerda anomaly detection konsepsiyasi muhim ahamiyatga ega. Sanoatdagi predictive maintenance tizimida AI uskunaning normal ishlash profilini o'rganib, undan sezilarli og'ishni aniqlaydi. Xuddi shunday, tibbiy reabilitatsiya tizimida AI bemorning individual normal harakat profilini o'rganib, undan sezilarli og'ishlarni aniqlashi mumkin.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Wearable sensorlar asosidagi real-time gait detection bo'yicha tadqiqotlar IMU sensorlarining yurish hodisalarini aniqlashda keng qo'llanilayotganini ko'rsatadi. Biroq klinik qo'llash uchun algoritmlarni patologik harakatlarga ega bemorlarda ham alohida validatsiya qilish zarur [6].

Multimodal sensorlar va sensor fusion

Faqat IMU sensorlaridan foydalanish ayrim klinik vazifalar uchun yetarli bo'lmashligi mumkin.

IMU tana segmentining harakati haqida ma'lumot beradi, biroq mushaklarning elektr faolligi yoki oyoqning tayanch yuzasi bilan o'zaro ta'sir kuchini to'g'ridan-to'g'ri o'lchamaydi.

Shu sababli IMU quyidagi sensorlar bilan integratsiya qilinishi mumkin:

- EMG sensorlari;
- plantar pressure sensorlar;
- force sensorlar;
- yurak urish tezligi sensorlari;
- SpO₂ sensorlari;
- boshqa fiziologik sensorlar.

Multimodal tizimning afzalligi bemor holatini bir nechta manbadan bir vaqtning o'zida baholash imkoniyatidir.

Masalan, IMU yordamida tizza bo'g'imining harakati aniqlansa, EMG mushaklarning faolligi haqida ma'lumot beradi. Pressure sensor esa oyoqning tayanch yuzasi bilan o'zaro ta'sirini ko'rsatishi mumkin.

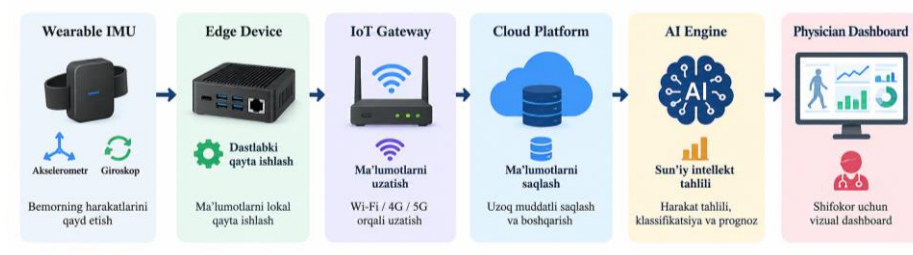
Natijada AI tizimi harakat, mushak faolligi, tayanch va fiziologik holat haqidagi ma'lumotlarni birgalikda tahlil qilishi mumkin.

IoT va AI asosidagi tele-reabilitatsiya

IMU va AI texnologiyalarining imkoniyatlarini IoT infratuzilmasi bilan birlashtirish orqali bemorning reabilitatsiya jarayonini masofadan kuzatish imkoniyati paydo bo'ladi.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQRARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Tizimning umumiy arxitekturasini quyidagicha tashkil qilinishi mumkin:



Wearable IMU sensors record patient movements. Edge devices accept data from sensors, perform local processing, and can also perform AI algorithms locally in some cases.

Cloud platforms store data for long-term storage, build patient profiles, and use complex AI models for analysis and prediction.

IoT technologies enable seamless data exchange between patients, sensors, mobile devices, cloud platforms, and medical professionals [7].

Sanoatdagi aqlli monitoring bilan analogiya

IMU + AI + IoT based rehabilitation system architecture is conceptually very close to industrial intelligent monitoring.

Sanoatdagi aqlli tizim	Tibbiy rehabilitatsiya
Industrial sensor	IMU/wearable sensor
Uskuna holati	Bemorning funksional holati
IoT Gateway	Edge qurilma
SCADA/Cloud	Tele-rehabilitation platform
Anomaly detection	Patologik harakatni aniqlash
Predictive maintenance	Recovery prediction

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Sanoatdagi aqlli tizim	Tibbiy rehabilitatsiya
Operator dashboard	Physician dashboard
Real-time monitoring	Real-time patient monitoring

Ushbu analogiya tibbiy rehabilitatsiyani Healthcare Industry 4.0 konsepsiyasi doirasida ko'rib chiqish imkonini beradi.

Muhokama

IMU, IoT va sun'iy intellekt texnologiyalarining integratsiyasi tibbiy rehabilitatsiyani an'anaviy davriy klinik baholashdan uzluksiz raqamli monitoring modeliga o'tkazish imkonini beradi.

Wearable IMU sensorlari bemorning harakatlarini real muhitda qayd etadi, IoT texnologiyalari ma'lumotlarni masofaviy platformaga yetkazadi, AI algoritmlari esa katta hajmdagi sensor ma'lumotlarini avtomatik tahlil qiladi.

Bunday tizimning asosiy afzalligi shifokor uchun oddiy sensor ma'lumotlarini emas, balki yuqori darajadagi klinik axborotni shakllantirishdir.

AI tizimi bemor mashqni bajargan yoki bajarmaganini, mashqning bajarilish sifatini, harakat dinamikasini va noodatiy harakatlarni aniqlashda yordam berishi mumkin.

IMU sensorlarining gait analysisdagi imkoniyatlari bo'yicha tizimli sharhlar ularning ayrim yurish parametrlarini an'anaviy tizimlar bilan yaxshi darajada taqqoslash mumkinligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, sensor joylashuvi, baholash protokoli va algoritmik yondashuv natijalarga sezilarli ta'sir ko'rsatadi [8].

Shuning uchun AI modelining yuqori classification accuracy ko'rsatishi uning avtomatik ravishda klinik jihatdan ishonchli ekanligini anglatmaydi. Model turli yosh, tana tuzilishi, harakat qobiliyati va patologiyaga ega bemorlarda validatsiya qilinishi kerak.

Bundan tashqari, AI tizimlari klinik qarorni to'liq almashtirish emas, balki shifokorning qaror qabul qilish jarayonini qo'llab-quvvatlash vositasi sifatida ko'rilishi maqsadga muvofiq.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Tizimning asosiy cheklovlari

IMU va AI asosidagi aqlli monitoring tizimlarini amaliyotga joriy qilishda bir qator muammolar mavjud.

Birinchidan, sensor drift muammosi mavjud. Girooskop ma'lumotlaridagi kichik xatoliklarning vaqt davomida to'planishi orientatsiya bahosida drift hosil qilishi mumkin.

Ikkinchidan, sensor placement muammosi mavjud. Sensorning tanaga noto'g'ri yoki har safar turlicha joylashtirilishi AI modelining natijalariga ta'sir qilishi mumkin.

Uchinchidan, Deep Learning modellarini samarali o'qitish uchun katta va sifatli datasetlar talab qilinadi.

To'rtinchidan, AI modelining generalizatsiyasi muhim masala hisoblanadi. Bir guruh bemorlarda yaxshi ishlagan model boshqa guruhda xuddi shunday natija bermasligi mumkin.

Beshinchidan, Explainable AI tibbiy tizimlar uchun muhim talabdir. AI faqat "normal" yoki "patologik" natijani berishi emas, balki ushbu qarorga olib kelgan asosiy belgilarni ham shifokorga tushunarli shaklda ko'rsatishi kerak.

Sun'iy intellektning reabilitatsiyadagi zamonaviy tadqiqotlari aynan dataset bias, tashqi validatsiyaning yetishmasligi va model natijalarining tushuntiriluvchanligi kabi masalalarni klinik amaliyotga joriy etishdagi muhim to'siqlar sifatida ko'rsatmoqda [9].

Multimodal AI tizimlarining istiqbollari

IMU sensorlarini EMG, pressure va boshqa fiziologik sensorlar bilan birlashtirish reabilitatsiya monitoringining informatsion imkoniyatlarini kengaytirishi mumkin.

Masalan, IMU bo'g'im harakatini qayd etsa, EMG mushaklarning elektr faolligi haqida ma'lumot beradi. Bunday yondashuv ayniqsa yuqori oyoq-qo'l funksiyasini monitoring qilishda istiqbolli hisoblanadi. IMU va EMG integratsiyasiga asoslangan wearable qurilmalarning kundalik faoliyatdagi harakatlarni monitoring qilish uchun

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

validatsiyasi bunday multimodal yondashuvning amaliy imkoniyatlarini ko'rsatadi [10].

Multimodal AI tizimida turli sensorlardan keladigan ma'lumotlar yagona model tomonidan tahlil qilinadi. Natijada bemorning faqat harakatini emas, balki ushbu harakatning mushak faolligi va boshqa fiziologik ko'rsatkichlar bilan bog'liqligini ham baholash imkoniyati paydo bo'ladi.

Bo'g'im harakatlarini AI yordamida baholash

Reabilitatsiyada bo'g'imlarning harakat amplitudasini va harakat trayektoriyasini aniqlash muhim vazifalardan biridir.

IMU sensorlari yordamida yuqori oyoq-qo'l bo'g'imlarining harakatini baholash bo'yicha tadqiqotlar turli computational yondashuvlar qo'llanilishini ko'rsatadi. Bunda IMU ma'lumotlarini joint angle qiymatlariga aylantirishda sensor konfiguratsiyasi, orientatsiyani baholash va algoritm tanlovi muhim rol o'ynaydi [11].

Bu yo'nalish AI asosidagi reabilitatsiya tizimlari uchun ham muhimdir. Chunki AI modeli bemorning harakatini shunchaki "bajarildi" yoki "bajarilmadi" sifatida emas, balki harakatning sifati, amplitudasi va vaqt bo'yicha o'zgarishi asosida baholashi mumkin.

Tele-reabilitatsiya va masofaviy monitoring

Tele-reabilitatsiya bemorga klinik muassasaga doimiy tashrif buyurmasdan reabilitatsiya xizmatlarini olish imkonini beruvchi texnologik yondashuvdir.

Zamonaviy tele-reabilitatsiya tizimlarida wearable sensorlar, computer vision, pressure sensing va sun'iy intellekt texnologiyalaridan foydalanilmoqda. Bunday tizimlar bo'g'im burchaklarini aniqlash, mashqlarni tanish va harakatlarni avtomatik baholash imkoniyatlarini taqdim etadi [12].

IMU asosidagi tele-reabilitatsiya tizimida bemor uy sharoitida mashqlarni bajarishi, wearable sensorlar harakatlarni qayd etishi, edge qurilma ma'lumotlarni dastlabki qayta ishlashi va AI modeli mashqning bajarilish sifatini baholashi mumkin.

Natijalar mobil ilova yoki shifokor dashboardi orqali taqdim etiladi.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

Kelajakdagi rivojlanish yo'nalishlari

IMU va sun'iy intellektga asoslangan reabilitatsiya tizimlarining keyingi rivojlanishi bir nechta asosiy yo'nalishlarda amalga oshirilishi mumkin.

Edge AI — AI modellarini wearable yoki edge qurilmalarida bajarish orqali real vaqt rejimida tezkor javob olish.

Personalized AI — har bir bemorning individual harakat profilini hisobga oluvchi shaxsiylashtirilgan AI modellarini ishlab chiqish.

Real-time anomaly detection — patologik yoki noodatiy harakatlarni mashq bajarilishi vaqtida aniqlash.

Multimodal AI — IMU, EMG, pressure va fiziologik sensorlar ma'lumotlarini yagona AI modelida birlashtirish.

Long-term prediction — bemorning haftalar va oylar davomida to'plangan ma'lumotlari asosida reabilitatsiya dinamikasini prognozlash.

Explainable AI — AI qarorlarini shifokor uchun tushunarli shaklda izohlash.

Digital rehabilitation platform — wearable sensorlar, mobil ilova, IoT gateway, cloud, AI engine va physician dashboard komponentlarini yagona raqamli platformaga birlashtirish.

Kelajakdagi tizim quyidagi arxitektura asosida shakllanishi mumkin:

Wearable Sensors → Edge AI → IoT Network → Cloud → AI Analytics → Clinical Dashboard → Clinical Decision Support

Xulosa

Ushbu tadqiqotda sanoatdagi sun'iy intellekt va aqlli monitoring konsepsiyalarining tibbiy reabilitatsiyada, xususan IMU asosidagi wearable sensor tizimlari orqali qo'llanish imkoniyatlari tahlil qilindi.

Tahlil natijalari IMU sensorlari yordamida bemorning yurish, tana holati, muvozanati, bo'g'im harakati va boshqa funksional parametrlarini raqamli shaklda kuzatish mumkinligini ko'rsatadi. Biroq sensor joylashuvi, signal sifati, drift va harakat

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

turiga bog'liq xatoliklarni hisobga olish hamda tizimni reference usullar bilan validatsiya qilish zarur.

Sun'iy intellekt texnologiyalarining integratsiyasi IMU asosidagi monitoring tizimlarining imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi. Machine Learning va Deep Learning algoritmlari yordamida harakatlarni avtomatik klassifikatsiya qilish, reabilitatsiya mashqlarini aniqlash, patologik harakatlarni aniqlash, funksional holatni baholash va tiklanish dinamikasini prognozlash imkoniyati mavjud.

CNN, LSTM va Transformer kabi modellar IMU vaqt qatori ma'lumotlarini chuqur tahlil qilish uchun istiqbolli yondashuvlarni taqdim etadi. Ayniqsa, uzoq muddatli reabilitatsiya monitoringida vaqt bo'yicha o'zgarishlarni hisobga oluvchi AI modellaridan foydalanish bemorning individual tiklanish profilini shakllantirish imkonini berishi mumkin.

IMU sensorlarini EMG, pressure va boshqa fiziologik sensorlar bilan birlashtirish esa multimodal AI tizimlarini yaratish imkoniyatini kengaytiradi. Bunday tizimlar bemorning harakatini, mushak faolligini, tayanch xususiyatlarini va fiziologik holatini kompleks ravishda baholashi mumkin.

IoT, Edge AI va cloud texnologiyalarining integratsiyasi esa tele-reabilitatsiya uchun uzluksiz monitoring infratuzilmasini shakllantiradi. Natijada wearable sensor → edge processing → IoT → cloud → AI analytics → clinical decision support modeli yuzaga keladi.

Umuman olganda, IMU, IoT va sun'iy intellektning integratsiyasi tibbiy reabilitatsiyani oddiy ma'lumot yig'uvchi tizimdan intellektual, prognozlovchi va shaxsiylashtirilgan monitoring tizimiga aylantirish uchun muhim texnologik asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Bunda sanoatdagi real-time monitoring, anomaly detection, predictive analytics va intelligent decision support tamoyillarini tibbiy reabilitatsiyaga moslashtirish Healthcare Industry 4.0 konsepsiyasining istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida qaralishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

1. Wei, S., & Wu, Z. The Application of Wearable Sensors and Machine Learning Algorithms in Rehabilitation Training: A Systematic Review. *Sensors*, 2023, 23(18), 7667. DOI: 10.3390/s23187667.
2. Gradim, L. C. C., Jose, M. A., & Cruz, D. M. C. IoT Services and Applications in Rehabilitation: An Interdisciplinary and Meta-Analysis Review. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2020, 28(9), 2043–2052. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3005616.
3. Prisco, G., Pirozzi, M. A., Santone, A., Esposito, F., Cesarelli, M., Amato, F., & Donisi, L. Validity of Wearable Inertial Sensors for Gait Analysis: A Systematic Review. *Diagnostics*, 2024, 15(1), 36. DOI: 10.3390/diagnostics15010036.
4. Yi, C., Ma, J., Guo, H., Han, J., Gao, H., Jiang, F., & Yang, C. Estimating Three-Dimensional Body Orientation Based on an Improved Complementary Filter for Human Motion Tracking. *Sensors*, 2018, 18(11), 3765. DOI: 10.3390/s18113765.
5. Zhang, S., Li, Y., Zhang, S., Shahabi, F., Xia, S., Deng, Y., & Alshurafa, N. Deep Learning in Human Activity Recognition with Wearable Sensors: A Review on Advances. *Sensors*, 2022, 22(4), 1476. DOI: 10.3390/s22041476.
6. Prasanth, H., Caban, M., Keller, U., Courtine, G., Ijspeert, A., Vallery, H., & von Zitzewitz, J. Wearable Sensor-Based Real-Time Gait Detection: A Systematic Review. *Sensors*, 2021, 21(8), 2727. DOI: 10.3390/s21082727.
7. Kobsar, D., Charlton, J. M., Tse, C. T. F., Esculier, J.-F., Graffos, A., Krowchuk, N. M., Thatcher, D., & Hunt, M. A. Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: a systematic review and meta-analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2020, 17, 62. DOI: 10.1186/s12984-020-00685-3.
8. Petraglia, F., Scarcella, L., Pedrazzi, G., Brancato, L., Puers, R., & Costantino, C. Inertial sensors versus standard systems in gait analysis: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2019, 55(2), 265–280. DOI: 10.23736/S1973-9087.18.05306-6.
9. Morone, G., et al. Artificial intelligence in rehabilitation: a living systematic mapping review – first release. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2025, 61(5), 694–708. DOI: 10.23736/S1973-9087.25.09331-1.
10. Santos, P., Marquês, F., Quintão, C., & Quaresma, C. Validation of a Multimodal Wearable Device Integrating EMG and IMU Sensors for Monitoring Upper Limb Function During Tooth Brushing Activities of Daily Living. *Sensors*, 2026, 26(2), 510. DOI: 10.3390/s26020510.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-09**

11. Fang, Z., Woodford, S., Senanayake, D., & Ackland, D. Conversion of Upper-Limb Inertial Measurement Unit Data to Joint Angles: A Systematic Review. *Sensors*, 2023, 23(14), 6535. DOI: 10.3390/s23146535.
12. Ettefagh, A., & Roshan Fekr, A. Technological advances in lower-limb tele-rehabilitation: A review of literature. *Digital Health*, 2024, 10. DOI: 10.1177/20556683241259256.
13. Yin, L., Xu, X., Wang, R., et al. Validity and reliability of inertial measurement units on gait, static balance and functional mobility performance among community-dwelling older adults: a systematic review and meta-analysis. *EFORT Open Reviews*, 2025, 10(4), 172–185. DOI: 10.1530/EOR-2024-0088.
14. Abdel-Salam, R., Mostafa, R., & Hadhood, M. Human Activity Recognition using Wearable Sensors: Review, Challenges, Evaluation Benchmark. 2021.