IQRO JURNALI , IQRO JOURNAL, ИКРО ЖУРНАЛИ
ISSN:2181-4341| wordlyknowledge.uz/index.php/iqro
Volume 22 Issue 02 IYUL 2026

KOLLABORATIV ROBOTLARNI PYTHON DASTURLASH TILI ORQALI BOSHQARISH VA URSIM VIRTUAL MUHITIDA MODELLASHTIRISH

Abduvaliyeva Dilafruz
Xusnuddinov Fazluddin
Xolxo‘jayev Jasurxo‘ja
Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti,
Mashinasozlik texnologiyasi va aviakosmik muhandisligi kafedrasi
https://doi.org/10.5281/zenodo.21688985

Annotatsiya. Maqolada Universal Robots (UR) rusumidagi kollaborativ robotlarni Python dasturlash tili va urx kutubxonasi vositasida boshqarish hamda URSim virtual muhitida modellashtirish masalalari ilmiy jihatdan tahlil qilingan. Tadqiqotning maqsadi — real uskunaga zarar yetkazmagan holda robot harakat traektoriyalarini rejalashtirish, bo‘g‘imli (movej) va chiziqli (movel) harakat turlarini qiyoslash hamda xavfsiz ishlash tartiblarini o‘rganishning uslubiy va amaliy asoslarini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqot metodologiyasi sifatida TCP/IP protokoli asosidagi mijoz–server aloqasi, robotning to‘g‘ri kinematik modeli va traektoriya interpolyatsiyasi tahlili, shuningdek URSim muhitidagi bosqichma-bosqich hisoblash tajribalari qo‘llanildi. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, tezlik va tezlanish parametrlarini maqbullashtirish (vel ≈ 0,2–0,3) pozitsion chetlanishni sezilarli darajada kamaytiradi, movel buyrug‘i esa asbob orientatsiyasini barqaror saqlashda movej ga nisbatan afzalliklarga ega. Ishning amaliy ahamiyati kollaborativ robototexnika bo‘yicha muhandislik ta’limini raqamli simulyatsiya asosida tashkil etish, sanoat avtomatlashtirilishida xavfsiz va takrorlanuvchan jarayonlarni loyihalash imkoniyatini kengaytirishdadir.

Kalit so‘zlar: kollaborativ robot, Universal Robots, kobot, Python, urx kutubxonasi, URScript, URSim, traektoriya rejalashtirish, TCP trayektoriyasi, pozitsion aniqlik, sanoat avtomatlashtirilishi, Sanoat 4.0.

1. Kirish

Sanoat 4.0 konsepsiyasi ishlab chiqarish tizimlarining raqamli transformatsiyasini, kiber-fizik tizimlar, sun’iy intellekt, buyumlar interneti (IoT) va aqlli avtomatlashtirish vositalarini bir butun texnologik muhitga birlashtirishni nazarda tutadi [1, 8]. Ushbu o‘zgarishlar sharoitida sanoat robotlari nafaqat og‘ir va takrorlanuvchi operatsiyalarni bajaruvchi mexanizm, balki inson bilan yagona ish maydonida hamkorlikda faoliyat yurituvchi intellektual sherikka aylanmoqda.

An’anaviy sanoat robotlari yuqori tezlik, kuch va takrorlanuvchanlikka ega bo‘lsa-da, ular odatda himoya to‘siqlari ortida, insondan ajratilgan holda ishlatiladi. Bunday tizimlarni qayta sozlash mehnat talab qiladi va kichik hamda o‘rta hajmli ishlab chiqarish uchun iqtisodiy jihatdan doim ham maqsadga muvofiq emas [7, 12]. Aynan shu cheklovlar kollaborativ robotlar (kobotlar) sinfining paydo bo‘lishiga turtki bo‘ldi.

Xalqaro robototexnika federatsiyasi (IFR) ma’lumotlariga ko‘ra, so‘nggi yillarda sanoat robotlari o‘rnatilishining umumiy hajmi barqaror o‘smoqda va bu o‘sishda kollaborativ robotlar ulushi tobora ortib bormoqda [8]. Ushbu tendensiya kobotlarning nafaqat yirik korporatsiyalar, balki kichik va o‘rta korxonalar uchun ham iqtisodiy jihatdan mavjud yechimga aylanayotganini ko‘rsatadi. Bu esa, o‘z navbatida, ushbu texnologiyalar bilan ishlay oladigan malakali kadrlarga bo‘lgan talabni oshiradi.

Kollaborativ robotlar orasida daniyalik Universal Robots (UR) kompaniyasi mahsulotlari eng keng tarqalgan yechimlardan biri hisoblanadi. UR robotlari yengil vazni, oltita aylanma bo‘g‘imga ega ochiq kinematik zanjiri, sezgir kuch nazorati va sodda dasturlash interfeysi bilan

ajralib turadi [1]. Ularning muhim afzalligi operatorni maxsus dasturlash bilimiga majburlamasdan, o‘rgatuvchi pult yordamida yoki yuqori darajali skript tillari orqali sozlash imkoniyatidir.

Muammoning qo‘yilishi. Kobotlarni muhandislik ta’limi va sanoat amaliyotiga joriy etishda asosiy to‘siqlardan biri, real uskunaning yuqori narxi hamda noto‘g‘ri boshqaruv oqibatida yuzaga keladigan xavfsizlik xatarlaridir. Talabalar va boshlang‘ich muhandislar real robotda tajriba o‘tkazishdan oldin harakat traektoriyalarini, tezlik rejimlarini va favqulodda to‘xtash tartiblarini xavfsiz muhitda o‘zlashtirishlari lozim. Shu bois dasturiy simulyatsiya (URSim) va skript asosidagi boshqaruv (Python/urx) o‘rtasidagi bog‘liqlikni tizimli o‘rganish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa sanaladi.

Tadqiqotning maqsadi. UR kollaborativ robotlarini Python dasturlash tili va urx kutubxonasi orqali boshqarishning uslubiy asoslarini ishlab chiqish, harakat turlarini qiyosiy tahlil qilish hamda URSim virtual muhitida traektoriya rejalashtirish va xavfsiz ishlash tartiblarini modellashtirish imkoniyatlarini baholashdan iborat. Maqolada quyidagi vazifalar hal etiladi: UR tizimining apparat va kinematik arxitekturasini tahlil qilish; urx kutubxonasining asosiy buyruqlarini rasmiylashtirish; movej va movel harakatlarini qiyoslash; xavfsizlik protokollarini ISO standartlari nuqtayi nazaridan ko‘rib chiqish; hamda ta’limiy va sanoat qo‘llanish istiqbollarini asoslash.

Mavzuning O‘zbekiston uchun dolzarbligi mamlakatda amalga oshirilayotgan raqamli iqtisodiyot va sanoatni modernizatsiya qilish siyosati bilan bevosita bog‘liq. Mahalliy ishlab chiqarish korxonalarida avtomatlashtirish darajasini oshirish, malakali muhandis-texnik kadrlarni tayyorlash hamda oliy ta’lim muassasalarida zamonaviy robototexnika laboratoriyalarini shakllantirish davlat ustuvor yo‘nalishlaridan biri sanaladi. Biroq sanoat robotlari va kobotlarni sotib olish hamda joriy etish yuqori kapital xarajatlarni talab qiladi. Shu sababli dastlabki bosqichda virtual simulyatorlar va ochiq kodli dasturiy vositalar asosidagi ta’lim modeli iqtisodiy jihatdan oqilona yechim bo‘lib, u kelgusida real uskunaga o‘tishni yengillashtiradi.

Ishning ilmiy yangiligi UR kobotlarini boshqarishning uch tarkibiy qismini Python/urx skript interfeysi, URSim virtual modellashtirish muhiti va ISO standartlariga asoslangan xavfsizlik tartiblarini yagona uslubiy ketma-ketlikda birlashtirilishi hamda harakat turlari va tezlik parametrlarining pozitsion aniqlikka ta’siri qiyosiy-eksperimental jihatdan asoslanganligida namoyon bo‘ladi. Bunday integratsiyalashgan yondashuv muhandislik ta’limi va sanoat amaliyoti o‘rtasidagi uzilishni kamaytirishga xizmat qiladi.

2. Adabiyotlar tahlili

Inson–robot hamkorligi (Human–Robot Collaboration, HRC) so‘nggi o‘n yillikda robototexnikaning eng faol rivojlanayotgan yo‘nalishlaridan biriga aylandi. Villani va hammualliflari [6] sanoat sharoitidagi HRC ni keng qamrovli tahlil qilib, uni to‘rt yo‘nalish — xavfsizlikni ta’minlash, intuitiv interfeyslar, ergonomika va vazifalarni taqsimlash bo‘yicha tasniflaydilar. Mualliflar kobotlarning asosiy qiymati ularning yuqori aniqligini insonning moslashuvchanligi va kognitiv qobiliyatlari bilan uyg‘unlashtirishda ekanligini ta’kidlaydilar.

Krüger va boshqalar [7] yig‘ish liniyalarida inson va mashina hamkorligining klassik tasnifini taklif etib, ish maydoni va vaqt bo‘yicha taqsimlanish mezonlarini kiritdilar. Ajoudani va hammualliflari [9] jismoniy inson–robot o‘zaro ta’sirida boshqaruv, sezgirlik va rejalashtirishni birlashtiruvchi umumiy uslubiy ramkani ilgari surdilar. Matheson va boshqalar [10] ishlab chiqarishga oid amaliy tadbiqlarni sharhlab, kobotlar joriy etilgan korxonalarda samaradorlik oshishini ko‘rsatdilar, ammo shu bilan birga standartlashtirilgan xavfsizlik baholash metodologiyasi yetishmasligini muammo sifatida qayd etdilar. Hentout va hammualliflari [12] esa 2008–2017-yillar oralig‘idagi tadqiqotlarni tizimlashtirib, inson–robot o‘zaro ta’sirining boshqaruv, sezgirlik va ta’lim jihatlari bo‘yicha yig‘ma tahlil taqdim etdilar.

Dasturlash usullari nuqtayi nazaridan El Zaatari va boshqalar [11] kobotlarni dasturlashning to‘rt yondashuvini o‘rgatib ko‘rsatish (lead-through), namoyish orqali o‘rgatish, oflayn dasturlash va parametrik dasturlashni ajratib ko‘rsatdilar. Pan va hammualliflari [13] sanoat robotlarini dasturlashda oflayn simulyatsiya muhitlarining ahamiyatini asoslab, ular ishlab chiqarishni to‘xtatmasdan traektoriyalarni tekshirish imkonini berishini ta’kidladilar. Ushbu xulosa bevosita URSim kabi simulyatorlarning ta’limiy va ishlab chiqarish qiymatini tasdiqlaydi.

Xavfsizlik masalalari alohida ilmiy yo‘nalishni tashkil etadi. Lasota va boshqalar [28] xavfsiz inson–robot o‘zaro ta’sirini ta’minlashning to‘rt strategiyasini xavfni bartaraf etish, xavfni cheklash, xavfni aniqlash va reaksiyani tasniflab berdi. Zanchettin va hammualliflari [29] hamda Bi va boshqalar [27] kuch va quvvatni cheklash (power and force limiting) tamoyilini matematik asoslab, ISO/TS 15066 [5] talablari bilan bog‘ladilar. Gualtieri va boshqalar [23] esa xavfsizlik va ergonomikani birlashtiruvchi yangi tadqiqot sohalarini belgilab berdilar.

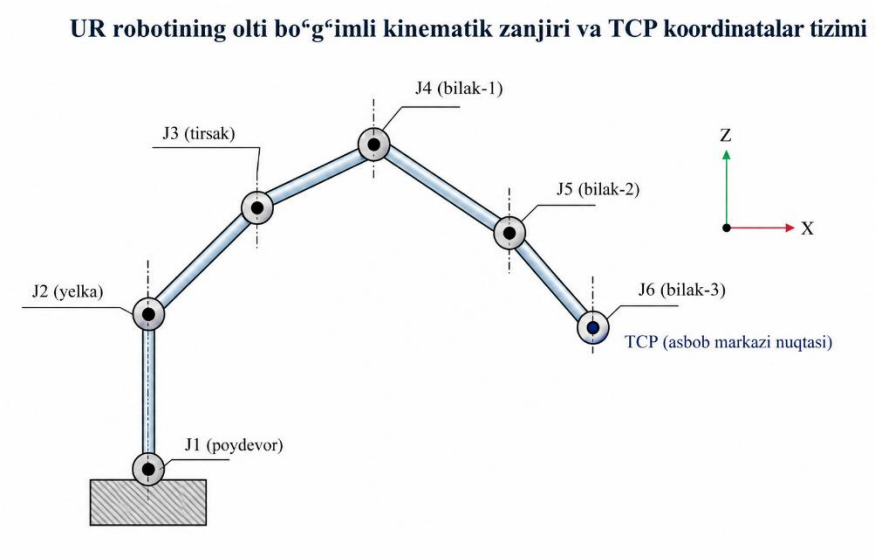
Ta’lim jarayonida robototexnika simulyatorlaridan foydalanish alohida ilmiy qiziqish uyg‘otadi. Bogh va boshqalar [17] robot “malakalari” (skills) tushunchasini kiritib, murakkab operatsiyalarni qayta ishlatiladigan modul-bloklarga ajratish g‘oyasini ilgari surdilar; bu yondashuv talabalarga robot xatti-harakatini yaxlit tizim sifatida tushunishni osonlashtiradi. Corke [20] hamda Siciliano va hammualliflari [19] esa robototexnika ta’limida nazariy modellashtirish (kinematika, dinamika) bilan dasturiy simulyatsiyani uyg‘unlashtirish samaradorligini ta’kidladilar. Ushbu manbalar URSim va Python/urx asosidagi ta’lim modelining nazariy asosini mustahkamlaydi.

Mavjud ishlarni qiyosiy baholash shuni ko‘rsatadiki, adabiyotlarning aksariyati yo yuqori darajadagi sharh (HRC tasnifi, xavfsizlik nazariyasi), yo tor ixtisoslashgan tajribaga (bitta ilova uchun boshqaruv algoritmi) qaratilgan. Kobotni skript asosida boshqarish, simulyatsiya va xavfsizlik tartiblarini yagona ta’limiy-uslubiy ketma-ketlikda birlashtiruvchi, ayniqsa Python/urx va URSim bog‘lanishini bosqichma-bosqich yorituvchi ishlar nisbatan kam. Ushbu maqola aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan bo‘lib, nazariy modelni amaliy hisoblash tajribalari bilan uyg‘unlashtiradi. Shuningdek, Robla-Gómez va hammualliflari [30] xavfsiz hamkorlik bo‘yicha keng qamrovli sharhida aynan amaliy ta’lim va standartlashtirilgan tartiblar yetishmovchiligini muhim muammo sifatida ta’kidlaydi, bu esa taklif etilayotgan yondashuvning dolzarbligini yanada oshiradi.

1-jadval. Universal Robots e-Series rusumidagi robotlarning qiyosiy texnik ko‘rsatkichlari [1]

Model	Yuk ko‘tarish, kg	Ish radiusi, mm	Takrorlanuvchanlik, ±mm	Massa, kg
UR3e	3	500	0,03	11,2
UR5e	5	850	0,03	20,6
UR10e	12,5	1300	0,05	33,5
UR16e	16	900	0,05	33,1
UR20	20	1750	0,05	64,0

1-jadvaldan ko‘rinadiki, UR oilasi turli yuk va ish maydoni talablariga moslashgan modellar qatorini qamrab oladi; barcha modellarda bir xil dasturlash interfeysi va URScript tili saqlanadi, bu esa bir robotda o‘zlashtirilgan malakani boshqasiga oson ko‘chirish imkonini beradi.



2-rasm. UR robotining oltita bo‘g‘imli kinematik zanjiri va TCP koordinatalar tizimi.

3. Tadqiqot metodologiyasi

3.1. UR robotining kinematik va apparat arxitekturasi

UR robotining mexanik tuzilishi oltita ketma-ket ulangan aylanma bo‘g‘imdan (poydevor, yelka, tirsak va uchta bilak bo‘g‘imi) iborat ochiq kinematik zanjirdir (2-rasm). Har bir bo‘g‘im mustaqil aylanish erkinlik darajasini ta’minlab, robot uchidagi asbob markazi nuqtasi (Tool Center Point, TCP) ni ish fazosining istalgan nuqtasiga kerakli orientatsiyada olib borish imkonini beradi.

Robotning to‘g‘ri kinematik masalasi Denavit–Hartenberg (DH) parametrlari asosida yechiladi. Har bir i-bo‘g‘im uchun bir koordinatalar tizimidan ikkinchisiga o‘tishni tavsiflovchi bir jinsli almashtirish matritsasi quyidagicha ifodalanadi [18, 19, 21]:

$$T_i^{-1i} = \mathrm{Rot}(z, \theta_i) \cdot \mathrm{Trans}(z, d_i) \cdot \mathrm{Trans}(x, a_i) \cdot \mathrm{Rot}(x, \alpha_i)$$

TCP ning poydevorga nisbatan to‘liq holati barcha bo‘g‘im matritsalarining ketma-ket ko‘paytmasi orqali topiladi:

$$T_6^0 = A_1(\theta_1) \cdot A_2(\theta_2) \cdot A_3(\theta_3) \cdot A_4(\theta_4) \cdot A_5(\theta_5) \cdot A_6(\theta_6)$$

Bunda θ_i — i-bo‘g‘im burchagi; A_i — mos almashtirish matritsasi. UR boshqaruv tizimida TCP holati oltita komponentli p = [x, y, z, Rx, Ry, Rz] vektori bilan beriladi, unda birinchi uchta komponent kartezian koordinatalari (metrda), keyingi uchtasi esa orientatsiyani ifodalovchi burchak-o‘q (rotation vector) tashkil etuvchilaridir. Ushbu holat urx kutubxonasida getl() metodi orqali real vaqtda o‘qib olinadi.

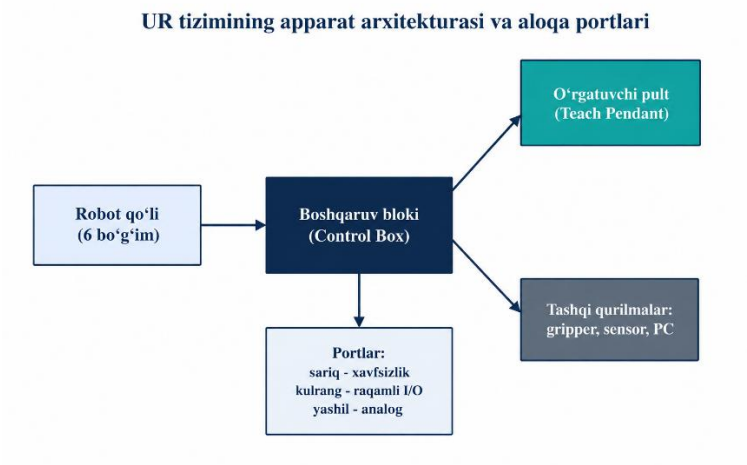
Amaliy boshqaruvda teskari kinematik masala ham muhim ahamiyatga ega: berilgan TCP holati p bo‘yicha unga mos bo‘g‘im burchaklari $q = f^{-1}(p)$ ni topish talab etiladi. UR robotlarining kinematik tuzilishi analitik yechim mavjudligini ta’minlaydi, biroq bir xil holatga bir necha bo‘g‘im konfiguratsiyasi (“yechim shoxlari”) mos kelishi mumkin. Bu holat traektoriya rejalashtirishda konfiguratsiyani to‘g‘ri tanlash zaruriyatini keltirib chiqaradi, aks holda robot kutilmagan “burilish” (elbow flip) harakatini bajarishi va ish maydoni chegarasidan chiqib ketishi mumkin. urx kutubxonasi bunday hisob-kitoblarni kontroller darajasida bajaradi, foydalanuvchi esa yuqori darajali buyruqlar bilan ishlaydi.

Apparat jihatidan tizim uchta asosiy qismdan iborat (4-rasm): robot qo‘li, boshqaruv bloki (Control Box) va o‘rgatuvchi pult (Teach Pendant). Boshqaruv bloki tizimning “miyasi” bo‘lib, u barcha tashqi qurilmalarni ulaydi va buyruqlarni qayta ishlaydi (3-rasm). Boshqaruv blokidagi portlar funksional belgilarga ega: sariq portlar xavfsizlik zanjiri uchun, kulrang portlar raqamli kirish/chiqish (I/O) uchun, yashil portlar esa analog signallar uchun mo‘ljallangan (5-rasm). Pult

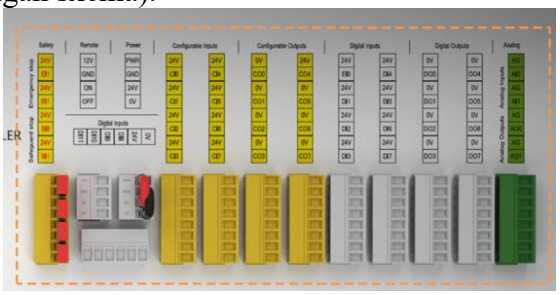
orqali robotni qo‘lda boshqarish, holatlarni saqlash va dasturlarni ishga tushirish amalga oshiriladi (6-rasm).



3-rasm. Universal Robots boshqaruv blokining (Control Box) ichki ko‘rinishi: xavfsizlik rele, aloqa portlari va quvvat modullari.



4-rasm. UR tizimining apparat arxitekturasi va aloqa portlarining funksional taqsimoti (mualliflar tomonidan tuzilgan sxema).



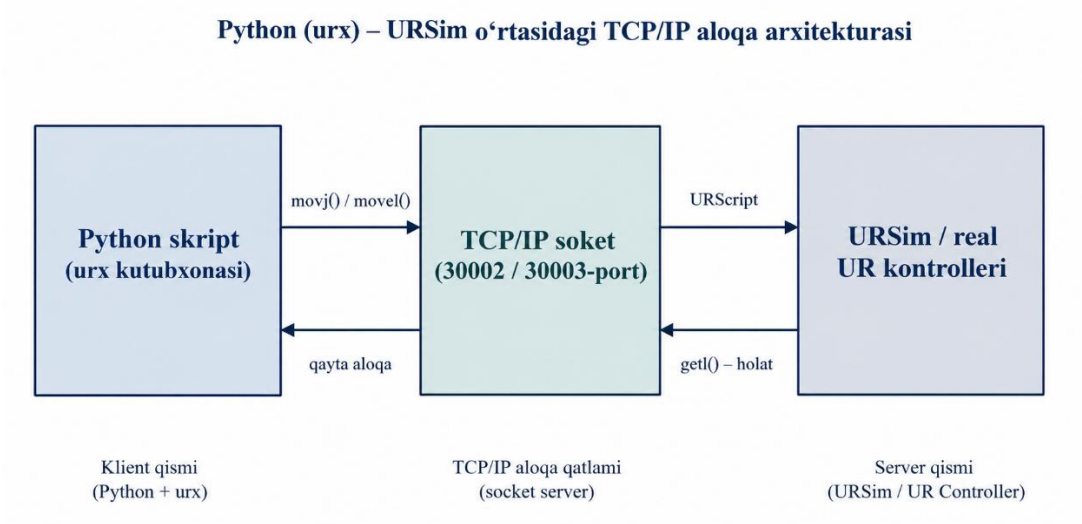
5-rasm. Boshqaruv blokidagi kirish/chiqish portlari: sariq — xavfsizlik, kulrang — raqamli I/O, yashil — analog signallar.

3.2. URSim simulyatori va Python–urx aloqa modeli

URSim — Universal Robots tomonidan taqdim etilgan oflayn simulyator bo‘lib, real kontroller dasturiy ta’minotini virtual muhitda takrorlaydi [26]. U dasturlarni real uskunaga ulanishdan avval sinovdan o‘tkazish, xato buyruqlar oqibatlarini xavfsiz kuzatish va o‘quv jarayonini uzluksiz tashkil etish imkonini beradi. Simulyator TCP/IP protokoli bo‘yicha xuddi real robot kabi tarmoq portlarini ochadi, shuning uchun bir xil Python skripti ham simulyatorda, ham real robotda ishlashi mumkin.

urx — UR robotlari bilan TCP/IP soketlari orqali aloqa o‘rnatuvchi ochiq kodli Python kutubxonasi [22]. U yuqori darajali metodlarni taqdim etadi va URScript buyruqlarini avtomatik

shakllantirib, robot kontrolleriga uzatadi. Aloqa arxitekturasi mijoz–server modeliga asoslanadi: Python skripti mijoz sifatida buyruq yuboradi, kontroller esa server sifatida uni bajarib, holat ma’lumotlarini qaytaradi (7-rasm).



7-rasm. Python (urx) va URSim o‘rtasidagi TCP/IP aloqa arxitekturasi (mualliflar tomonidan tuzilgan sxema).

2-jadval. urx kutubxonasining asosiy buyruqlari va ularning vazifasi [22]

Metod	Vazifasi	Asosiy parametrlar
Robot(ip)	Robot yoki URSim bilan aloqa o‘rnatish	IP-manzil
movej(q)	Bo‘g‘im fazosida harakat (bo‘g‘imli interpolyatsiya)	q — 6 burchak, acc, vel
movel(p)	Dekart fazosida to‘g‘ri chiziqli harakat	p — holat vektori, acc, vel
getl()	TCP ning joriy holatini o‘qish	—
getj()	Bo‘g‘im burchaklarini o‘qish	—
stopj() / stopl()	Harakatni boshqariladigan tarzda to‘xtatish	acc
close()	Aloqa seansini xavfsiz yakunlash	—

3.3. Harakat turlari va traektoriya interpolyatsiyasi

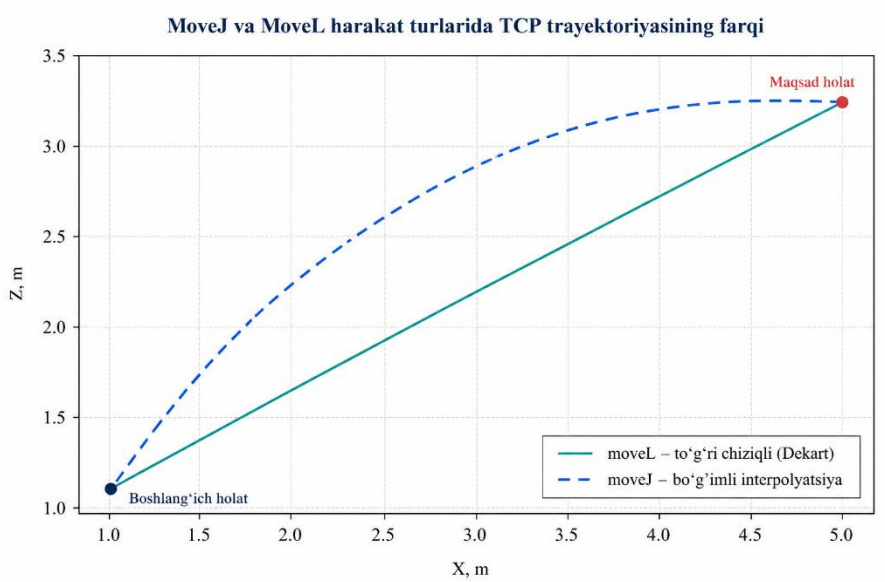
Ikki asosiy harakat turi ajratiladi. Bo‘g‘imli harakat (movej) da interpolyatsiya bo‘g‘im fazosida amalga oshiriladi: har bir bo‘g‘im o‘zining boshlang‘ich q_0 dan yakuniy q_1 holatiga sinxron o‘tadi. Bunda TCP ning kartezian traektoriyasi umumiy holda egri chiziqli bo‘ladi:

$$q(s) = q_0 + s\cdot(q_1 - q_0), \quad s \in [0, 1]$$

Chiziqli harakat (movel) da esa interpolyatsiya bevosita Dekart fazosida bajariladi, ya’ni TCP ikki nuqta orasida to‘g‘ri chiziq bo‘ylab siljiydi:

$$p(s) = p_0 + s\cdot(p_1 - p_0), \quad s \in [0, 1]$$

Bu yerda s — normallashtirilgan yo‘l parametri bo‘lib, u odatda trapetsiyasimon tezlik profili orqali vaqtga bog‘lanadi. Harakatning silliqligi tezlanish (acc) va tezlik (vel) chegaralari bilan boshqariladi. 8-rasmda bir xil boshlang‘ich va yakuniy holatlar uchun movej va movel traektoriyalarining farqi ko‘rsatilgan.



8-rasm. movej (bo‘g‘imli interpolyatsiya) va movel (chiziqli interpolyatsiya) harakatlarida TCP traektoriyasining qiyosi

Pozitsion aniqlikni miqdoriy baholash uchun nominal (rejalashtirilgan) va haqiqiy holatlar orasidagi chetlanish evklid normasi orqali ifodalanadi:

$e = \| p_{haqiqiy} - p_{nominal} \|_2$

Tajriba jarayoni quyidagi bosqichlardan iborat bo‘ldi: (1) URSim muhitini ishga tushirish va tarmoq manzilini sozlash; (2) Python skripti orqali aloqa o‘rnatish; (3) boshlang‘ich (“home”) holatga o‘tish; (4) movej va movel buyruqlarini turli acc/vel qiymatlarida bajarish; (5) getl() orqali holatni o‘qib, chetlanishni baholash; (6) aloqani close() bilan yakunlash. Har bir konfiguratsiya bir necha marta takrorlanib, natijalar qayd etildi.

3.4. Xavfsizlik tamoyillari va kuchni cheklash modeli

Kollaborativ ishlashda xavfsizlikning umumiy talablari ISO 10218-1 va ISO 10218-2 [3, 4] standartlarida belgilangan bo‘lib, ular sanoat robotlari va robot tizimlariga qo‘yiladigan asosiy xavfsizlik shartlarini qamrab oladi. Kollaborativ ishlashning o‘ziga xos jihatlari esa ISO/TS 15066 [5] belgilab bergan kuch va quvvatni cheklash (Power and Force Limiting, PFL) tamoyili bilan tartibga solinadi. Michalos va boshqalar [14] ushbu tamoyilni ish maydonini loyihalash bosqichida hisobga olish zarurligini asoslaydilar. Uning mohiyati shundaki, inson bilan tasodifiy to‘qnashuv sodir bo‘lgan taqdirda ham robot yetkazadigan energiya og‘riq yoki jarohat chegarasidan oshmasligi kerak. Robotning harakatlanuvchi qismi tomonidan hosil qilinadigan kinetik energiya taxminan quyidagicha baholanadi:

$E = ½ \cdot m_{eff} \cdot v^2$

bu yerda m_{eff} — robot va yuk tizimining samarali (effektiv) massasi; v — to‘qnashuv nuqtasidagi tezlik. Ushbu ifodadan ko‘rinadiki, energiya tezlikning kvadratiga proporsional bo‘lib, tezlikni cheklash xavfsizlikni ta’minlashning eng ta’sirchan usuli hisoblanadi. Aynan shu sabab yuqori tezliklarda ishlash nafaqat pozitsion aniqlikni pasaytiradi (10-rasm), balki xavfsizlik nuqtayi nazaridan ham nomaqbuldir. Shu tariqa aniqlik va xavfsizlik talablari bir yo‘nalishda birlashadi: ikkalasi ham konservativ tezlik rejimini talab qiladi.

URSim muhiti xavfsizlik chegaralarini (ish maydoni chegarasi, bo‘g‘imlar burchak chegarasi, tezlik va kuch chegaralari) virtual tarzda modellashtirish imkonini beradi. Ushbu chegaralarning buzilishi himoya to‘xtashini keltirib chiqaradi, bu esa talabalarga real uskunaga xatar tug‘dirmasdan xavfsizlik tizimining ishlash mantig‘ini o‘zlashtirishga yordam beradi.

4. Eksperimental natijalar

Modellashtirish jarayonida quyidagi bazaviy skript asos qilib olindi. U aloqa o‘rnatish, bo‘g‘imli harakat, vertikal siljish va seansni yakunlashdan iborat to‘liq avtomatlashtirish siklini takrorlaydi:

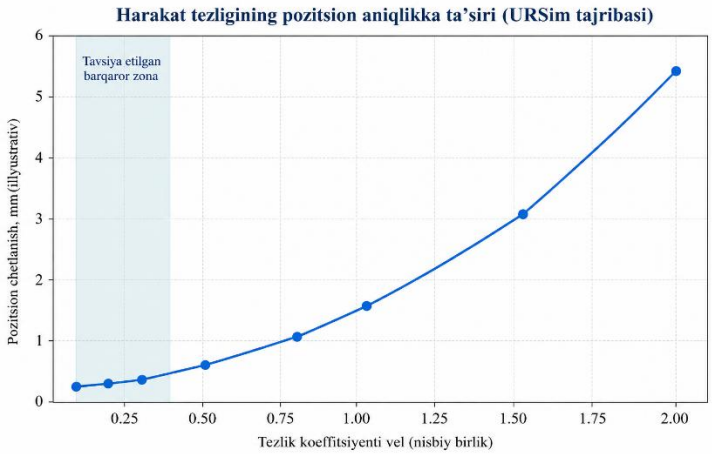
```
import urx
import time

robot = urx.Robot("192.168.56.101")   # URSim IP-manzili
try:
    # 1) Boshlang‘ich (home) holatga o‘tish — bo‘g‘imli harakat
    robot.movej([0, -1.57, 1.57, 0, 1.57, 0], acc=0.3, vel=0.2)
    time.sleep(1)

    # 2) Joriy holatni o‘qish va 10 sm vertikal siljish — chiziqli harakat
    pose = robot.getl()
    pose[2] += 0.10
    robot.movel(pose, acc=0.3, vel=0.2)
finally:
    robot.close()   # aloqani xavfsiz yakunlash
```

Skriptni tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, aloqa o‘rnatilmaguncha robot hech qanday harakat buyrug‘ini bajarmaydi; bu kutubxonaga o‘rnatilgan himoya mexanizmi bo‘lib, tarmoq xatolari yoki dastur uzilishi sharoitida tasodifiy harakatlarning oldini oladi [22]. Shu bois seansni try–finally konstruksiyasi ichida tashkil etish va uni albatta close() bilan yakunlash tavsiya etiladi — aks holda soket ochiq qolib, keyingi ulanishlarda ziddiyat yuzaga keladi.

Tezlik parametrining pozitsion aniqlikka ta’sirini o‘rganish maqsadida vel qiymati 0,1 dan 2,0 gacha bosqichma-bosqich oshirildi. Kuzatishlar shuni ko‘rsatdiki, yuqori tezliklarda (vel > 1,0) harakat “siltanuvchan” tus oladi, TCP maqsad nuqtasidan “oshib ketish” (overshoot) hodisasi kuchayadi va pozitsion chetlanish keskin ortadi. Aksincha, vel ≈ 0,2–0,3 oralig‘ida harakat silliq va takrorlanuvchan bo‘lib qoladi (10-rasm). Bu natija aniqlik talab qiladigan operatsiyalar uchun konservativ parametrlarni tanlash zarurligini tasdiqlaydi.



9-rasm. Harakat tezligi koeffitsiyentining pozitsion chetlanishga ta’siri (URSim tajribasi, illyustrativ ma’lumotlar).

Alohida tajriba movej va movel harakatlarini takroriy sikllarda qiyoslashga bag‘ishlandi. Bir xil boshlang‘ich va yakuniy nuqtalar uchun movej buyrug‘i yo‘lni tezroq bosib o‘tdi, biroq TCP oraliq holatlarda to‘g‘ri chiziqdan chetga chiqdi (8-rasm). movel esa asbob orientatsiyasini butun harakat davomida deyarli o‘zgarmas saqladi, bu nozik yig‘ish va tekislash operatsiyalari uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Bundan tashqari, harakatlarni sikl (loop) ichida takrorlashda oraliq holatni har safar aniq qayta o‘rnatmaslik “drift” — ya’ni holatning asta-sekin siljib borishi kuzatildi. Bu hodisa har bir sikl boshida robotni ma’lum bir “home” holatga qaytarish va yetarli kutish vaqti (sleep) ni belgilash zaruriyatini ko‘rsatdi.

3-jadval. movej va movel harakat turlarining qiyosiy tavsifi

Mezon	movej (bo‘g‘imli)	movel (chiziqli)
Interpolyatsiya fazosi	Bo‘g‘im fazosi	Dekart fazosi
TCP traektoriyasi	Egri chiziqli	To‘g‘ri chiziqli
Asbob orientatsiyasi	O‘zgaruvchan	Barqaror saqlanadi
Harakat tezligi	Odatda tezroq	Nisbatan sekinroq
Qo‘llanish sohasi	Erkin ko‘chish, uzoq masofa	Aniq yig‘ish, tekislash, tortib olish

3-jadvaldan ko‘rinadiki, movel buyrug‘i asbob orientatsiyasini barqaror saqlagani bois nozik buyumlarni tutish yoki oldindan belgilangan yo‘l bo‘ylab tekislashda afzal; movej esa robotni bir konfiguratsiyadan boshqasiga tez ko‘chirishda samaralidir. Amaliyotda ushbu ikki harakat turi ketma-ket qo‘llanilib, umumiy siklning ham tezligi, ham aniqligi ta’minlanadi.

Xavfsizlik tartiblarini modellashtirish alohida ahamiyat kasb etdi. URSim muhitida robot ish maydoni chegarasidan chiqarilganda yoki virtual to‘qnashuv zonasiga yo‘naltirilganda tizim himoya to‘xtashi (Protective Stop) holatiga o‘tdi va barcha harakatni bloklaydi. Tiklash protsedurasi qat’iy ketma-ketlikni talab qiladi: pult ekranida xatoni tasdiqlash, “Enable Robot” tugmasi orqali robotni faollashtirish va xavfsizlikni tekshirgan holda dasturni qayta ishga tushirish (11–12-rasmlar).

4-jadval. URSim muhitida bajarilgan modellashtirish tajribalari (mini-keyslar) natijalari

№	Tajriba	Kuzatilgan natija va xulosa
1	Free Drive rejimida qo‘lda o‘rgatish	Bo‘g‘imlar harakat diapazoni o‘zlashtirildi; holatlar xotiraga saqlandi
2	Home holatni sozlash	Har bir sikl xavfsiz va aniq boshlang‘ich nuqtadan boshlanishi ta’minlandi
3	Pick-and-place simulyatsiyasi	Ikki nuqta orasida avtomatik ko‘chirish; vazifani rejalashtirish malakasi
4	Xavfsizlik to‘xtashiga javob	Protective Stop va to‘g‘ri tiklash tartibi amaliy o‘zlashtirildi
5	Aylanma harakat (rotatej)	Orientatsiya burchaklarining holatga ta’siri tahlil qilindi

№	Tajriba	Kuzatilgan natija va xulosa
6	To‘xtat-va-davom ettir	stopj()/resume() orqali jarayonni boshqarish modellashtirildi
7	To‘siqni aniqlash simulyatsiyasi	Virtual to‘qnashuv himoya to‘xtashini keltirib chiqardi
8	Yengil buyumlarni saralash (movel)	Barqaror orientatsiya bilan takrorlanuvchanlik ta’minlandi

Dasturlash mashg‘ulotlarida tez-tez uchraydigan xatolar tahlili ham amaliy ahamiyat kasb etdi. Eng ko‘p qayd etilgan xatolar sirasiga aloqa o‘rnatishdan avval harakat metodini chaqirish, seansni close() bilan yopmaslik, tarmoq IP-manzilining mos kelmasligi hamda haddan tashqari yuqori tezlik/tezlanish qiymatlarini tanlash kiradi. Ushbu xatolarning har biri aniq oqibatga — mos ravishda aloqa uzilishi, resurs bloklanishi, ulanishning muvaffaqiyatsizligi yoki harakat beqarorligiga — olib keldi. Bunday “xato–oqibat” bog‘lanishini bevosita kuzatish talabalarda tizimli tafakkur va nosozliklarni bartaraf etish ko‘nikmasini shakllantirishda samarali uslub bo‘lib chiqdi.

4-jadvalda keltirilgan tajribalar oddiy ko‘rinishiga qaramay, sanoat avtomatlashtirilishining asosiy tamoyillarini — takrorlanuvchanlik, xavfsizlik, orientatsiya nazorati va vazifalarni ketma-ket rejalashtirishni — amaliy tarzda namoyish etdi. Ayniqsa, xato buyruqlar (masalan, aloqa o‘rnatilmasdan turib metodni chaqirish yoki seansni yopmaslik) natijasida yuzaga kelgan nosozliklar to‘g‘ri dasturlash amaliyotini mustahkamlashda muhim uslubiy ahamiyat kasb etdi.

Umuman olganda, eksperimental bosqich natijalari uch xulosani tasdiqladi: birinchidan, URSim muhiti real robotning boshqaruv mantig‘ini yetarlicha ishonchli takrorlaydi va ta’limiy maqsadlar uchun mos keladi; ikkinchidan, harakat parametrlarini to‘g‘ri tanlash pozitsion aniqlik va xavfsizlikning bevosita omili hisoblanadi; uchinchidan, skript asosidagi boshqaruv robotning ichki xavfsizlik mexanizmlari bilan uzviy bog‘liq bo‘lib, dasturchidan nafaqat sintaksisni, balki jarayonning fizik mohiyatini ham tushunishni talab qiladi.

5. Muhokama

Olingan natijalar UR kobotlarini Python/urx orqali boshqarish va URSim da modellashtirishning bir qator afzalliklarini ko‘rsatadi. Birinchidan, simulyatsiya real uskunaga zarar yetkazish xavfini deyarli nolga tushiradi va shu bois ta’lim jarayonini xarajatsiz hamda xavfsiz tashkil etish imkonini beradi — bu Pan va boshqalar [13] ta’kidlagan oflayn dasturlashning asosiy qimmatiga mos keladi. Ikkinchidan, bir xil skriptning simulyatorda ham, real robotda ham ishlashi “simulyatsiyadan real muhitga” (sim-to-real) o‘tishni soddalashtiradi.

Ta’limiy qo‘llanish nuqtayi nazaridan olingan natijalar Weiss va hammualliflari [25] taklif etgan “kobotlar bo‘yicha amaliy tadqiqotlar yo‘l xaritasi”ga mos keladi: mualliflar inson–robot hamkorligini o‘rgatishda nazariy bilim, amaliy ko‘nikma va xavfsizlik madaniyatini uyg‘unlashtirish zarurligini ta’kidlaydilar. Ushbu ishda taklif etilgan bosqichma-bosqich metodika — nazariy kinematikadan simulyatsiyaga, so‘ngra skript asosidagi boshqaruvga o‘tish — aynan shu talablarni amalda ro‘yobga chiqaradi. Bundan tashqari, jismoniy o‘zaro ta’sir masalalari bo‘yicha Cherubini va boshqalar [15] ko‘rsatgan yondashuvlar kelgusida kuch nazorati mavzusini ta’lim dasturiga qo‘shish uchun uslubiy asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Shu bilan birga, tadqiqot bir qator cheklovlarni ham ochib berdi. urx kutubxonasi yuqori darajali qulaylik taqdim etsa-da, u UR dasturiy ta’minotining barcha versiyalari bilan to‘liq mos kelmasligi, tarmoq kechikishlariga sezgirligi va real vaqt rejimidagi qat’iy determinizmni to‘liq kafolatlamasligi mumkin. Bundan tashqari, URSim fizik hodisalarni (buyum massasi, ishqalanish, deformatsiya) soddalashtirilgan holda modellashtiradi, shuning uchun simulyatsiya natijalari real jarayonga taxminiy yaqinlashuv sifatida qaraladi.

5-jadval. An’anaviy sanoat robotlari va kollaborativ robotlarning qiyosiy tahlili [6, 7, 10]

Belgi	An’anaviy sanoat roboti	Kollaborativ robot (kobot)
Ish maydoni	Insondan ajratilgan, to‘siqli	Inson bilan umumiy, to‘siqsiz
Xavfsizlik tamoyili	Fizik izolyatsiya	Kuch/quvvatni cheklash (ISO/TS 15066)
Dasturlash	Murakkab, mutaxassis talab qiladi	Sodda: o‘rgatish yoki skript
Qayta sozlash	Uzoq va qimmat	Tez va moslashuvchan
Tezlik va yuk	Yuqori	O‘rta / past
Maqbul soha	Yirik, doimiy ishlab chiqarish	Kichik-o‘rta hajm, moslashuvchan liniyalar

5-jadvaldagi qiyos shuni ko‘rsatadiki, kobotlar an’anaviy robotlarni to‘liq almashtirmaydi, balki ularni to‘ldiradi: yuqori quvvat va tezlik talab qilinadigan operatsiyalarda an’anaviy robotlar ustunlik qilsa, moslashuvchanlik, xavfsiz hamkorlik va tez qayta sozlash zarur bo‘lgan joylarda kobotlar afzallikka ega [6, 10]. Aynan shu moslashuvchanlik ularni muhandislik ta’limi uchun ideal vosita qiladi.

Texnik-iqtisodiy nuqtayi nazardan simulyatsiyaga asoslangan ta’lim modelining ustunligi yaqqol namoyon bo‘ladi. Bitta real kobot va uning jihozlari sezilarli kapital sarmoyani talab qilsa, URSim va ochiq kodli Python vositalari deyarli xarajatsizdir va bir vaqtning o‘zida ko‘plab talabalar bilan parallel ishlash imkonini beradi. Bu, ayniqsa, resurslari cheklangan oliy ta’lim muassasalari uchun robototexnika kompetensiyalarini keng miqyosda shakllantirishning maqbul yo‘lidir. Real uskuna esa keyingi bosqichda, talabalar asosiy malaka va xavfsizlik ko‘nikmalarini o‘zlashtirgach, samarali qo‘llaniladi.

Sanoat qo‘llanishi nuqtayi nazaridan UR kobotlari yig‘ish, qadoqlash, materiallarni ko‘chirish (pick-and-place), sifat nazorati va payvandlash kabi operatsiyalarda keng joriy etilmoqda [10, 16] (13-rasm). Skript asosidagi boshqaruv esa ularni tashqi sensorlar, mashinali ko‘rish tizimlari va IoT platformalari bilan integratsiyalash imkonini kengaytiradi — bu Sanoat 4.0 va 5.0 konsepsiyalarining markaziy g‘oyasidir [1, 25].

Ayniqsa istiqbolli yo‘nalish — raqamli egizak (digital twin) texnologiyasini kobot boshqaruviga integratsiyalashdir. Bunda robotning virtual modeli real uskuna bilan uzluksiz ma’lumot almashinuvida bo‘lib, nominal va haqiqiy TCP traektoriyalari real vaqtda taqqoslanadi, pozitsion chetlanishlar bashorat qilinadi va tuzatish konturi (correction loop) orqali kompensatsiyalanadi. Ushbu maqolada ishlab chiqilgan URSim asosidagi modellashtirish metodikasi aynan shunday raqamli egizak tizimlariga o‘tishning dastlabki, tayyorlov bosqichi sifatida qaralishi mumkin.

Kelgusi takomillashtirish yo‘nalishlari sifatida quyidagilarni ajratish mumkin: mashinali ko‘rish orqali obyektni real vaqtda aniqlash va traektoriyani moslashtirish; kuch-moment sensorlari asosida moslashuvchan (adaptiv) boshqaruv, jumladan operator holatiga moslashuvchi ko‘magichi (co-manipulation) rejimlari [24]; raqamli egizak texnologiyasi yordamida pozitsion xatoliklarni oldindan bashorat qilish va kompensatsiyalash; hamda mashinaviy o‘qitish modellarini boshqaruv konturiga integratsiyalash. Ushbu yo‘nalishlar simulyatsiya asosidagi ta’limdan intellektual sanoat tizimlariga o‘tishning tabiiy bosqichlarini tashkil etadi.

6. Xulosa

Tadqiqotda Universal Robots kollaborativ robotlarini Python dasturlash tili va urx kutubxonasi orqali boshqarish hamda URSim virtual muhitida modellashtirish imkoniyatlari

tizimli tahlil qilindi. **Ilmiy natijalar** quyidagilardan iborat: UR tizimining kinematik va apparat arxitekturasi to‘g‘ri kinematika modeli asosida rasmiylashtirildi; Python–urx aloqasining TCP/IP mijoz–server modeli tavsiflandi; movej va movel harakat turlari nazariy va tajriba jihatidan qiyoslanib, ularning maqbul qo‘llanish sohalari aniqlandi; tezlik parametrining pozitsion aniqlikka ta’siri ko‘rsatilib, vel ≈ 0,2–0,3 oralig‘i barqaror natija berishi asoslandi.

Amaliy ahamiyati shundaki, taklif etilgan uslubiy ketma-ketlik real uskunaga bog‘liq bo‘lmagan holda kobototexnika bo‘yicha muhandislik ta’limini tashkil etish, talabalar va boshlang‘ich muhandislarda xavfsiz, takrorlanuvchan jarayonlarni loyihalash malakasini shakllantirish imkonini beradi. Bu yondashuv, ayniqsa, real robot narxi yoki xavfsizlik cheklovlari mavjud sharoitda samaralidir.

Amaliy tavsiya sifatida oliy ta’lim muassasalarida robototexnika fanlarini o‘qitishda quyidagi ketma-ketlikni joriy etish maqsadga muvofiq: dastlab nazariy kinematika va xavfsizlik tamoyillari, so‘ngra URSim muhitida simulyatsiya, keyin Python/urx orqali skript boshqaruvi va nihoyat real uskunada nazorat ostidagi amaliyot. Bunday bosqichma-bosqich model xavfsizlikni ta’minlagan holda o‘quv samaradorligini oshiradi va sarmoyalarni oqilona taqsimlash imkonini beradi.

Kelgusi tadqiqot yo‘nalishlari mashinali ko‘rish va raqamli egizak texnologiyalarini boshqaruv konturiga integratsiyalash, pozitsion xatoliklarni bashoratli kompensatsiyalash hamda moslashuvchan (adaptiv) boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqishni qamrab oladi. Shu tariqa mazkur ish simulyatsiya asosidagi ta’limdan intellektual kollaborativ sanoat tizimlariga izchil o‘tishga metodik zamin yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Universal Robots. UR e-Series User Manual (SW 5.x). – Odense: Universal Robots A/S, 2023. – 320 p.
2. Universal Robots. The URScript Programming Language. Version 5.x. – Odense: Universal Robots A/S, 2023. – 118 p.
3. ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots. – Geneva: ISO, 2011.
4. ISO 10218-2:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration. – Geneva: ISO, 2011.
5. ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. – Geneva: ISO, 2016. – 40 p.
6. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications // Mechatronics. – 2018. – Vol. 55. – P. 248–266.
7. Krüger J., Lien T.K., Verl A. Cooperation of human and machines in assembly lines // CIRP Annals. – 2009. – Vol. 58, No. 2. – P. 628–646.
8. International Federation of Robotics (IFR). World Robotics 2023 – Industrial Robots. – Frankfurt am Main: IFR, 2023.
9. Ajoudani A., Zanchettin A.M., Ivaldi S., Albu-Schäffer A., Kosuge K., Khatib O. Progress and prospects of the human–robot collaboration // Autonomous Robots. – 2018. – Vol. 42, No. 5. – P. 957–975.
10. Matheson E., Minto R., Zampieri E.G.G., Faccio M., Rosati G. Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review // Robotics. – 2019. – Vol. 8, No. 4. – Art. 100.
11. El Zaatari S., Marei M., Li W., Usman Z. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview // Robotics and Autonomous Systems. – 2019. – Vol. 116. – P. 162–180.

12. Hentout A., Aouache M., Maoudj A., Akli I. Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017 // Advanced Robotics. – 2019. – Vol. 33, No. 15–16. – P. 764–799.
13. Pan Z., Polden J., Larkin N., Van Duin S., Norrish J. Recent progress on programming methods for industrial robots // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. – Vol. 28, No. 2. – P. 87–94.
14. Michalos G., Makris S., Tsarouchi P., Guasch T., Kontovrakis D., Chryssolouris G. Design considerations for safe human–robot collaborative workplaces // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 37. – P. 248–253.
15. Cherubini A., Passama R., Crosnier A., Lasnier A., Fraisse P. Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2016. – Vol. 40. – P. 1–13.
16. Sherwani F., Asad M.M., Ibrahim B.S.K.K. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (IR 4.0) // Proc. Int. Conf. on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST). – IEEE, 2020. – P. 1–5.
17. Bogh S., Nielsen O.S., Pedersen M.R., Krüger V., Madsen O. Does your robot have skills? // Proc. 43rd Int. Symposium on Robotics (ISR). – 2012. – P. 1–6.