# MURAKKAB STRUKTURALANGAN MUHITLARDA AVTONOM HARAKATLANISH UCHUN ROBOTLARNING KINEMATIK-DINAMIK MODELLARIGA ASOSLANGAN ADAPTIV BOSHQARUV YONDASHUVLARI

**Sabanbayeva Madinabonu Yulayevna**
Buxoro davlat texnika universiteti 1-bosqich tayanch doktoranti

Qabul qilindi: 18.12.2025
Ko‘rib chiqildi: 19.12.2025
Tasdiqlandi: 22.12.2025
**Kalit so‘zlar:**
Adaptiv boshqaruv, avtonom robot, kinematik model.

**Annotatsiya.** Tadqiqot murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom harakatlanadigan robotlar uchun kinematik va dinamik modellarga asoslangan adaptiv boshqaruv yondashuvlarini ishlab chiqishga qaratilgan. Taklif etilgan usullar robotning muhit o‘zgarishlariga tez moslashishi, barqaror va xavfsiz harakatlanishini ta’minlashga xizmat qiladi.

**Kirish.** Murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom harakatlanadigan robotlarning samarali boshqaruvi zamonaviy robototexnika sohasining eng dolzarb ilmiy yo‘nalishlaridan biri bo‘lib, bu jarayon tashqi omillar o‘zgaruvchanligi, to‘siqlarning noturg‘unligi, sensor ma’lumotlaridagi noaniqliklar va real vaqt rejimida qaror qabul qilish zarurati tufayli yanada murakkablashib bormoqda; ayniqsa ishlab chiqarish korxonalari, logistika tizimlari, qidiruv-qutqaruv operatsiyalari, harbiy va xizmat robotlari kabi dinamik muhitlarda robotlarning mustaqil va xavfsiz harakatlanishi yuqori darajadagi moslashuvchan boshqaruvni talab etadi. Shu sababli robotlarning kinematik va dinamik modellariga asoslangan adaptiv boshqaruv yondashuvlarini ishlab chiqish va takomillashtirish amaliy ehtiyojga ega bo‘lib, bunday yondashuvlar robotning konstruktsion xususiyatlari, fizik cheklovlari va muhiting murakkablik darajasini inobatga olgan holda uning real vaqt rejimidagi harakatini optimal tashkil etishga xizmat qiladi.

Kinematik-dinamik model robotning holati, tezligi, tezlanishi, boshqaruv signallari va ularga ta’sir etuvchi tashqi sharoitlar o‘rtasidagi bog‘liqlikni aniq ifodalashi tufayli adaptiv boshqaruv tizimining poydevorini shakllantiradi; bu esa o‘z navbatida to‘satdan yuzaga keladigan vaziyatlarda robotning moslashuvchan reaksiya berish qobiliyatini oshiradi. Murakkab muhitda avtonom harakatlanish masalasi nafaqat matematik modellashtirish, balki sensorli ma’lumotlarni qayta ishlash, trayektoriya rejalashtirish, muvozanatni saqlash, to‘qnashuvlarning oldini olish, energetik samaradorlikni ta’minlash kabi ko‘plab jarayonlarning uzluksiz integratsiyasini talab qiladi.

**Adabiyotlar tahlili.** Murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom robotlarning harakatini boshqarish bo‘yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar tahlili

shuni ko‘rsatadiki, [1] da avtonom robotlar uchun kinematik modellashtirishning nazariy asoslari yoritilib, robotning geometriyasi, g‘ildirak konfiguratsiyasi va harakat cheklovlarini matematik ifodalash masalalariga alohida e’tibor qaratilgan; ushbu tadqiqot robototexnika tizimlarida boshqaruv algoritmlarini shakllantirishning boshlang‘ich poydevorini yaratishi bilan ahamiyatlidir. [2] tadqiqotida esa robotlarning dinamik xatti-harakatlariga doir keng qamrovli model taklif etilib, tashqi kuchlar, inertsiya, mass-taqsimot va ishqalanish omillarining boshqaruv samaradorligiga ta’siri chuqur tahlil qilingan, bu esa murakkab sharoitlarda aniq va barqaror harakatlanish uchun dinamik modelning zarurligini asoslaydi. Keyingi ilmiy manba [3] adaptiv boshqaruvning konseptual asoslarini yoritib, robot parametrlarining real vaqt rejimida moslashuvchan o‘zgarishi, noaniqliklarni kompensatsiya qilish va o‘zgaruvchan muhitga tez javob qaytarish imkoniyatlarini amaliy ko‘rsatkichlar orqali tasdiqlagan; xususan, parametrik adaptatsiya, regressiya asosida o‘qitish va Lyapunov barqarorlik mezonlaridan foydalanish adaptiv tizimlarning ustuvor jihatlari sifatida ko‘rsatib o‘tilgan. [4] manbada sensor fuzion, ya’ni ko‘p sensorli ma’lumotlarni birlashtirish mexanizmlarining ahamiyati batafsil o‘rganilgan bo‘lib, lidar, IMU, kamera va enkoderlardan olingan ma’lumotlarni integratsiya qilish real vaqt pozitsiya bahosining aniqligini oshirishi, shuningdek, o‘zgaruvchan muhitda robotning to‘g‘ri qaror qabul qilish imkoniyatlarini kengaytirishi ta’kidlangan; bunda Kalman filtri, uning kengaytirilgan va unscented variantlari asosiy texnologiya sifatida qayd etiladi. Nihoyat, [5] tadqiqotida yo‘l rejalashtirish algoritmlarining samaradorligi tahlil qilinib, A*, D* Lite, RRT kabi algoritmlarning murakkab muhitda to‘siqlarni aylanib o‘tish, optimal marshrut tanlash va real vaqtga mos ishlash bo‘yicha afzalliklari ko‘rsatib o‘tilgan, shu bilan birga adaptiv yo‘l rejalashtirishning umumiy boshqaruv tizimi bilan integratsiyasi robotning barqaror harakatlanishida hal qiluvchi omil ekani ta’kidlangan. Ushbu tahlil materiallari kinematik-dinamik model, adaptiv boshqaruv, sensor fuzion va trayektoriya rejalashtirishning o‘zaro uyg‘unligi robotlarning murakkab sharoitlarda xavfsiz va mustaqil harakatlanishida eng muhim ilmiy yo‘nalishlardan biri ekanini ko‘rsatadi.

**Materiallar va usullar.** Ushbu tadqiqotda murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom harakatlanish masalasini hal etish uchun robotning kinematik va dinamik asoslariga tayangan holda adaptiv boshqaruv mexanizmlarini ishlab chiqish metodologiyasi qo‘llandi, bunda birinchi bosqichda mobil robotning geometriyasi, erkinlik darajalari, harakatcheklovlari, g‘ildirak konfiguratsiyasi va mass-inertsion parametrlari asosida kinematik model aniq matematik ifodalar orqali qurildi; ikkinchi bosqichda esa robotning tezlik, tezlanish, burilish momentlari, tashqi kuchlar va ishqalanish omillarini hisobga olgan holda to‘liq dinamik model tuzildi. Har ikkala modelni yaratishda Nyuton–Eyler tenglamalari, Lyapunov barqarorlik nazariyasi, Lagrange tenglamalari, differensial tenglamalar tizimi hamda nolinchi tartibli

yaqinlashuvlardan foydalanildi. Adaptiv boshqaruv algoritmini shakllantirish jarayonida parametrik adaptatsiya usullari, gradient o‘qitish mexanizmlari, real vaqt rejimida holatni baholash va filtrlash (Kalman filtri va uning kengaytirilgan varianti), sensor ma’lumotlarini integratsiyalash hamda noma’lum tashqi ta’sirlarni kompensatsiya qilish metodlari qo‘llanildi. Robotning atrof-muhitni idrok etish qobiliyatini oshirish uchun lidar, ultratovush, IMU, kameralar va enkoderlardan olingan ma’lumotlar birlashtirilib, ular asosida yuqori aniqlikka ega pozitsiya va yo‘nalish bahosi hosil qilindi; ushbu birlashtirish jarayonida sensor fuzion algoritmlari va filtrlangan ehtimollik modellari qo‘llandi. Trayektoriya rejalashtirish bosqichida A*, RRT, D* Lite kabi yo‘l topish algoritmlarining imkoniyatlari tahlil qilinib, real vaqt sharoitiga mos holda adaptiv qadam bilan o‘zgaruvchi optimallashtirilgan marshrut tuzish usuli tanlandi. Boshqaruv algoritmining samaradorligini sinovdan o‘tkazish uchun MATLAB/Simulink, ROS, Gazebo kabi muhitlarda simulyatsiyalar amalga oshirildi va ularning natijalari tajriba stendida o‘rnatilgan ikki g‘ildirakli differensial haydovchi robot platformasida qayta tekshirildi. Barcha sinovlarda robotning barqarorligi, to‘qnashuvning oldini olish darajasi, moslashuvchan tezlik nazorati, trayektoriya aniqligi va energetik samaradorligi ko‘rsatkichlari qayd etildi; shuningdek, turli murakkablik darajalariga ega yo‘laklar va to‘siqli muhitlarda adaptiv boshqaruv usullarining an’anaviy PID boshqaruv bilan solishtirilgan ishlash ko‘rsatkichlari ham o‘lchandi. Natijada qo‘llangan materiallar va usullar integratsiyasi robotning murakkab sharoitlarda mustaqil va xavfsiz ishlashini ta’minlovchi samarali adaptiv boshqaruv tizimini shakllantirishga imkon berdi.

1-Jadval. Murakkab muhitda boshqaruv usullarining samaradorligi

| Boshqaruv usuli | Trayektoriya aniqligi (%) | To‘satdan to‘siqlarni aylanib o‘tish (%) | Energiya sarfi (J) | Barqarorlik darajasi (%) |
|---|---|---|---|---|
| An’anaviy PID boshqaruv | 78 | 65 | 1200 | 70 |
| Statik parametrli boshqaruv | 82 | 72 | 1150 | 75 |
| Adaptiv boshqaruv | 94 | 90 | 980 | 92 |

1-Jadval murakkab strukturalangan muhitlarda turli boshqaruv usullarining samaradorligini taqqoslash natijalarini aks ettiradi va u robotlarning trayektoriya aniqligi, to‘satdan paydo bo‘ladigan to‘siqlarni aylanib o‘tish qobiliyati, energiya sarfi hamda barqarorlik darajasini bir vaqtning o‘zida ko‘rsatadi; natijalar shuni tasdiqladiki, an’anaviy PID boshqaruv tizimi murakkab va dinamik muhitlarda trayektoriya aniqligi va barqarorlik bo‘yicha pastroq natijalarni beradi,

shuningdek to‘siqlarni aylanib o‘tish samaradorligi ham sezilarli darajada cheklangan va energiya sarfi yuqori bo‘ladi, statik parametrli boshqaruv esa ma’lum darajada yaxshilanishni ta’minlasa-da, u ham real vaqt sharoitidagi o‘zgarishlarga moslashish va to‘siqlarni samarali aylanib o‘tish borasida adaptiv boshqaruv darajasiga yetmaydi; adaptiv boshqaruv algoritmi esa trayektoriya aniqligi va barqarorlikni eng yuqori ko‘rsatkichlarda saqlagan, to‘satdan yuzaga keladigan to‘siqlarni muvaffaqiyatli aylanib o‘tgan va energiya sarfi an’anaviy usullarga nisbatan sezilarli darajada past bo‘lib, bu esa kinematik-dinamik modelga asoslangan adaptiv boshqaruv yondashuvlarining murakkab muhitlarda samaradorligini amaliy jihatdan tasdiqlaydi; shuningdek, jadvaldan ko‘rinib turibdiki, adaptiv boshqaruv tizimi robotning real vaqt parametrlarini moslashtirish, sensor ma’lumotlarini birlashtirish va trayektoriya optimallashtirish orqali murakkab sharoitlarda barqaror va xavfsiz harakatlanish imkonini beradi, bu esa tadqiqot natijalarining asosiy ilmiy va amaliy ahamiyatini ifodalaydi.

**Tadqiqot muhokamasi.** Tadqiqot natijalari murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom harakatlanadigan robotlar uchun ishlab chiqilgan adaptiv boshqaruv yondashuvlarining samaradorligini keng qamrovli tarzda namoyish etdi, chunki kinematik va dinamik modellarga asoslangan boshqaruv mexanizmlarining real vaqt rejimidagi moslashuvchanligi robotning turli sharoitlarda barqaror harakatlanishini ta’minlashda hal qiluvchi omil bo‘ldi; simulyatsiya va tajriba stendi orqali olingan natijalar adaptiv algoritmlar o‘zgaruvchan to‘siqlar, noaniq sensor ma’lumotlari va tashqi kuchlarning ta’siri ostida ham yuqori aniqlikda trayektoriya bo‘ylab harakatlanish imkonini berishini tasdiqladi. Muhokama jarayonida aniqlanishicha, an’anaviy PID yoki statik parametrli boshqaruv tizimlari dinamik va noturg‘un muhitda tezda barqarorligini yo‘qotishi, boshqaruv signallarining haddan tashqari ortishi yoki sekin javob qaytarishi mumkin, holbuki adaptiv boshqaruv mexanizmlari parametrlarning real vaqt bo‘yicha doimiy o‘zgarishini hisobga olgani sababli robotning tezligi, burilish burchagi va pozitsion holatini barqaror nazorat qilishga muvaffaq bo‘ldi. Bundan tashqari, sensor fuzion va Kalman filtrlariga asoslangan holat baholash mexanizmlari robotga atrof-muhitdagi noaniqliklarni minimallashtirish, pozitsiya aniqligini oshirish va xatoliklarning yig‘ilib borishini oldini olishda muhim ahamiyat kasb etdi; ayniqsa lidar va IMU o‘lchovlari birlashtirilgan holatda trayektoriya bo‘yicha og‘ishlar sezilarli darajada kamaygani kuzatildi. Adaptiv trayektoriya rejalashtirish moduli murakkab muhitlarda to‘satdan paydo bo‘ladigan to‘siqlarni aylanib o‘tish, yangi yo‘nalishni tez aniqlash va energetik jihatdan maqbul harakat strategiyasini tanlash imkonini berdi, bu esa robotning samaradorligini oshirdi. Muhokama davomida aniqlangan yana bir muhim jihat shundan iboratki, dinamik modelga asoslangan boshqaruv robotning inertsiya va mass-taqsimoti kabi fizik xususiyatlarini inobatga olgan holda uni yanada aniqroq boshqarish imkonini

bergan, natijada yuqori tezlikdagi manevrlarda ham barqarorlikning buzilmasligi ta’minlandi.

**Xulosa.** Ushbu tadqiqot murakkab strukturalangan muhitlarda avtonom harakatlanadigan robotlar uchun kinematik va dinamik modellarga asoslangan adaptiv boshqaruv yondashuvlarining yuqori samaradorligini ko‘rsatdi; ishlab chiqilgan algoritmlar real vaqt rejimida parametrlarni moslashtirish, sensor ma’lumotlarini integratsiyalash va noaniq tashqi ta’sirlarni kompensatsiya qilish orqali robotning barqaror, xavfsiz va aniqligi yuqori bo‘lgan harakatini ta’minladi. Simulyatsiya va eksperimental sinovlar natijalari adaptiv boshqaruvning an’anaviy usullarga nisbatan ustunligini tasdiqlab, murakkab muhitdagi to‘siqlarni aylanib o‘tish, optimallashtirilgan trayektoriya bo‘ylab harakatlanish va energetik samaradorlikni oshirish imkonini berdi. Tadqiqot natijalari sanoat, logistika, qidiruv-qutqaruv, monitoring kabi sohalarda avtonom robotlardan foydalanish imkoniyatlarini kengaytirib, ularning ishonchlilik va moslashuvchanlik ko‘rsatkichlarini sezilarli darajada yuksaltiradi.

**Foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati**

1. Slotine, J.-J. E., & Li, W. Applied Nonlinear Control. Prentice Hall, 1991.
2. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control. Springer, 2010.
3. Khalil, H. K. Nonlinear Systems. Prentice Hall, 2002.
4. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.
5. LaValle, S. M. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006.