SANOAT ROBOTLARINI KALIBRLASH USULLARINING QIYOSIY TAHLILI VA XATOLIK MODELLARINING TASNIFI

Ibragimov Umid Shuxratovich
Termiz shaharidagi "Zvezda Vostoka" xususiy maktabi matematika fani o'qituvchisi
e-mail: *shuhratovich2204@gmail.com*

Annotatsiya. Maqolada sanoat robotlarining mutlaq pozitsiyalash aniqligini oshirishga qaratilgan kalibrlash usullari tizimli tahlil qilingan. Xatolik manbalari geometrik va geometrik bo'lmagan sinflarga ajratilib, kompensatsiyalanish imkoniyati bo'yicha qiyoslangan. Kinematik modellashtirish konvensiyalari to'liqlik, parametrik uzluksizlik va minimallik mezonlari bo'yicha baholangan. Identifikatsiya usullari, o'lchov konfiguratsiyalarini tanlash masalasi va kuzatuvchanlik indekslari ko'rib chiqilgan. Tahlil natijasida uchta hal etilmagan muammo ajratilgan: birlashtirilgan xatolik modelining identifikatsiyalanuvchanligini tekshirish, o'lchov tajribasini rejalashtirishdagi mezon nomuvofiqligi va kalibrlash natijasining vaqt bo'yicha barqarorligi.

Kalit so'zlar: sanoat roboti, kalibrlash, mutlaq pozitsiyalash aniqligi, kinematik xatolik modeli, identifikatsiyalanuvchanlik, kuzatuvchanlik indeksi, o'lchov konfiguratsiyasi, elastostatik deformatsiya, issiqlik dreyfi, ISO 9283.

Аннотация. В статье выполнен систематический анализ методов калибровки, направленных на повышение абсолютной точности позиционирования промышленных роботов. Источники погрешностей разделены на геометрические и негеометрические классы и сопоставлены по возможности компенсации. Конвенции кинематического моделирования

оценены по критериям полноты, параметрической непрерывности и минимальности; рассмотрены методы идентификации параметров и индексы наблюдаемости. Выделены три нерешённые проблемы: проверка идентифицируемости объединённой модели погрешностей, несоответствие критериев при планировании измерительного эксперимента и устойчивость результата калибровки во времени.

Ключевые слова: промышленный робот, калибровка, абсолютная точность позиционирования, кинематическая модель погрешностей, идентифицируемость, индекс наблюдаемости, измерительная конфигурация, упругие деформации, тепловой дрейф, ISO 9283.

Abstract. The paper presents a systematic analysis of calibration methods aimed at improving the absolute positioning accuracy of industrial robots. Error sources are divided into geometric and non-geometric classes and compared with respect to their compensability. Kinematic modelling conventions are assessed against the criteria of completeness, parametric continuity and minimality; parameter identification techniques and observability indices are reviewed. Three unresolved issues are identified: verification of the identifiability of a combined error model, the mismatch of criteria in calibration experiment design, and the temporal stability of the calibration result.

Keywords: industrial robot, calibration, absolute positioning accuracy, kinematic error model, identifiability, observability index, measurement configuration, elastostatic deflection, thermal drift, ISO 9283.

Kirish

Zamonaviy mashinasozlikda sanoat robotlari payvandlash, yig‘ish, bo‘yash va mexanik ishlov berish operatsiyalarining asosiy ijrochisiga aylandi. Biroq ularning metrologik tavsiflarida jiddiy nomutanosiblik saqlanib qolmoqda: takrorlash aniqligi odatda 0,02–0,1 mm oralig‘ida bo‘lsa-da, mutlaq pozitsiyalash aniqligi

ko‘pincha 0,5–3,0 mm ni tashkil etadi. Buning amaliy oqibati shundaki, robotni CAD modeli asosida oflayn dasturlash imkonsiz bo‘lib qoladi va operator har bir texnologik nuqtani qo‘lda o‘rgatishga majbur bo‘ladi. Bu kichik seriyali ishlab chiqarishda robotdan foydalanishni iqtisodiy jihatdan samarasiz qiladi.

Kalibrlash – robotning haqiqiy geometriyasini va yuklanish ostidagi xulq-atvorini aks ettiruvchi aniqlashtirilgan matematik modelni tuzish, uning parametrlarini o‘lchovlar bo‘yicha identifikatsiyalash va natijani boshqaruv tizimiga joriy etish jarayonidir. Yo‘nalishning nazariy asoslari 1980–1990-yillarda shakllangan: Karan va Vukobratović manipulyatsion robot modellarining aniqligi bo‘yicha umumlashtiruvchi tahlilni [1], Hollerbach va Wampler esa kalibrlash usullarining taksonomiyasini taklif etgan [2]. So‘nggi o‘n yillikda tadqiqotlar markazi sof geometrik modellashtirishdan geometrik bo‘lmagan effektlarni hisobga olishga va kalibrlash tajribasining o‘zini optimallashtirishga ko‘chdi [3, 4]. Shunga qaramay, usullarning ishlab chiqarishga joriy etilish sur’ati past bo‘lib qolmoqda; sabablari ko‘pincha texnik emas, balki iqtisodiy: o‘lchov jihozining qimmatligi, liniyaning to‘xtab turishi va erishilgan aniqlikning vaqt o‘tishi bilan yo‘qolishi.

Maqolaning maqsadi – sanoat robotlarini kalibrlash usullarini xatolik manbalari, kinematik model konvensiyalari, identifikatsiya usullari va o‘lchov tajribasini rejalashtirish kesimida tizimlashtirish hamda qiyosiy baholash asosida hal etilmagan muammolarni asoslashdan iborat.

Tadqiqot metodologiyasi

Manbalar IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink va MDPI bazalaridan 1985–2025-yillar oralig‘ida «robot calibration», «kinematic error model», «observability index», «measurement pose selection», «elastostatic calibration» va «thermal drift compensation» kalit so‘zlari bo‘yicha tanlandi. Tanlash mezonlari: (i) retsenziyalanadigan nashrda chop etilganlik; (ii) xatolik modeli yoki identifikatsiya protsedurasining oshkor bayoni; (iii) natijaning sonli yoki eksperimental tasdig‘i.

Qiyosiy baholash to‘rtta kesimda olib borildi: xatolik manbai; kinematik modelning to‘liqligi, parametrik uzluksizligi va minimalligi; identifikatsiya usulining hisoblash xususiyatlari; o‘lchov konfiguratsiyalarini tanlash mezoni.

Tahlil va natijalar

1. Xatolik manbalarining tasnifi. Ishchi organdagi natijaviy xatolik bir necha manbaning superpozitsiyasidir. Adabiyotdagi keng tarqalgan baholarga ko‘ra, mutlaq xatolikning asosiy ulushi geometrik parametrlarning nominal qiymatlardan og‘ishiga to‘g‘ri keladi [1, 3]. Ammo qolgan ulush ham texnologik jihatdan ahamiyatli: aviatsiya va avtomobilsozlikdagi ishlov berish operatsiyalari uchun 0,1 mm darajasidagi xatolik ham qabul qilib bo‘lmas hisoblanadi. Manbalarning tasnifi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Sanoat robotlari pozitsiyalash xatoligi manbalarining tasnifi

Xatolik manbai	Tabiati	Tipik miqyosi	Kompensatsiyalanishi
Geometrik: zveno uzunliklari, o‘qlar og‘ishi, nol nuqta siljishi	Doimiy, konfiguratsiyaga bog‘liq	Umumiy xatolikning asosiy ulushi	Model orqali to‘liq
Elastostatik: bo‘g‘in va zveno bikrligi, og‘irlik va texnologik kuch	Yuklama va konfiguratsiyaga bog‘liq	Og‘ir robotlarda 0,1–1,0 mm	Bikrlik modeli orqali
Issiqlik dreyfi: o‘z-o‘zidan qizish, muhit harorati	Vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan	1,5 mm gacha [5]	Harorat modeli orqali qisman
Uzatmadagi lyuft, ishqalanish, gisterezis	Yo‘nalishga bog‘liq	O‘nlab mikrometr	Qisman, murakkab

Xatolik manbai	Tabiati	Tipik miqyosi	Kompensatsiyalanishi
Datchik diskretligi va o‘lchov shovqini	Tasodifiy	Takrorlash aniqligi chegarasi	Kompensatsiyalanmaydi

Vocetka va hammualliflar harorat datchiklari bilan jihozlangan ABB IRB1200 robotida dreyf ta’sirini 89,9 % gacha kamaytirishga erishgan [6]; shu bilan birga, uchala manbani yagona modelda birlashtirish urinishlari hali tizimli tus olmagan.

2. Kinematik modellashtirish konvensiyalari. Kalibrlashning birinchi bosqichi – xatolik parametrlari kiritiladigan kinematik modelni tanlash. Denavit va Hartenberg taklif etgan klassik konvensiya minimal parametrlar soniga ega [7], biroq ketma-ket o‘qlar parallel yoki parallelga yaqin bo‘lganda singulyar holatga tushadi: kichik burchak og‘ishi d parametrining juda katta qiymatiga olib keladi va identifikatsiya matritsasi yomon shartlangan bo‘lib qoladi. Hayati va Mirmirani bu kamchilikni d parametrini qo‘shimcha β burchagi bilan almashtirish orqali bartaraf etgan [8]; Barker shunga yaqin modifikatsiyani mustaqil asoslagan [9]. Zhuang, Roth va Hamano esa barcha holatlarda parametrik uzluksizlikni ta’minlovchi CPC va MCPC modellarini ishlab chiqqan [10, 11]. Qiyosiy tavsif 2-jadvalda berilgan.

2-jadval. Kinematik modellashtirish konvensiyalarining qiyosiy tavsifi

Konvensiya	Parametrlar soni	To‘liqlik	Parametrik uzluksizlik	Asosiy cheklov
DH [7]	Zvenoga 4 ta	To‘liq emas	Yo‘q	Parallel o‘qlarda singulyarlik
Hayati–Mirmirani [8]	Parallel zvenoga 5 ta	To‘liq	Parallel holat uchun	Perpendikulyar o‘qlarga qo‘llanmaydi

Konvensiya	Parametrlar soni	To‘liqlik	Parametrik uzluksizlik	Asosiy cheklov
Barker modeli [9]	DH bilan bir xil	To‘liq emas	Qisman	Aralash modellash zarur
CPC / MCPC [10, 11]	Zvenoga 6 ta (CPC)	To‘liq	To‘liq	Parametrlar soni ortiqcha
Eksponensiallar ko‘paytmasi	Zvenoga 6 ta vint parametri	To‘liq	To‘liq	Minimal emas, qisqartirish zarur

Amalda ko‘pincha aralash yondashuv qo‘llanadi: umumiy holatdagi bo‘g‘inlar uchun DH, parallel o‘qli bo‘g‘inlar uchun Hayati–Mirmirani konvensiyasi. Bunda model to‘liq bo‘ladi, biroq parametrlar to‘plami ortiqcha bo‘lib qolishi va ularning bir qismi o‘lchov tizimi orqali ajratilmasligi mumkin – aynan shu holat identifikatsiyalanuvchanlik muammosini keltirib chiqaradi.

3. Geometrik bo‘lmagan xatoliklar va o‘lchov vositalari. Geometrik kalibrlash qoldiq xatolikni odatda 0,2–0,5 mm darajasigacha tushiradi; undan keyingi yaxshilanish faqat geometrik bo‘lmagan effektlarni hisobga olish hisobiga erishiladi. Nubiola va Bonev ABB IRB 1600 roboti uchun 34 ta parametrli modeldan foydalangan: unga tayyorlash xatoliklari bilan bir qatorda ikkita o‘q uchun bikrlik parametrlari va oltinchi o‘qning chiziqsiz xulq-atvorini tavsiflovchi Furye qatori koeffitsiyentlari kiritilgan, natija ISO 9283 standarti bo‘yicha tekshirilgan [12]. Klimchik, Pashkevich va hammualliflar og‘ir robotlarning elastostatik parametrlarini identifikatsiyalashda o‘lchov aniqligining anizotropligini hisobga oluvchi vaznli eng kichik kvadratlar usulini qo‘llagan [4, 13]. Issiqlik dreyfi alohida muammo bo‘lib qolmoqda: Mohnke va hammualliflar uzoq davom etuvchi jarayonlarda ishchi organ og‘ishi 1,5 mm gacha yetishini ko‘rsatgan [5], Li va Zhao esa harorat modeli asosida qoldiq xatolikni 0,1 mm dan past darajaga tushirgan [14].

Kalibrlash sifatining yuqori chegarasi o‘lchov tizimi bilan belgilanadi. Lazer treker amalda etalon hisoblanadi [15], biroq narxi ko‘pgina korxonalar uchun jiddiy to‘siq; koordinata-o‘lchash mashinasi va ballbar qamrov hajmi bilan cheklangan; fotogrammetriya arzon, ammo aniqligi 0,05–0,3 mm darajasida. Shu sababli qisman poza o‘lchovlariga asoslangan yondashuvlar rivojlanmoqda: pozaning barcha olti komponentini emas, bir qismini o‘lchash va yetishmovchilikni o‘lchovlar sonini oshirish hisobiga qoplash [13] – bu jihoz talabini pasaytiradi, ammo kalibrlash vaqtini uzaytiradi.

4. Parametrlarni identifikatsiyalash usullari. Chiziqlashtirilgan xatolik modeli uchun klassik yechim – eng kichik kvadratlar usuli va uning vaznli modifikatsiyasi [4]; chiziqsiz qo‘yilishda Levenberg–Marquardt va Nelder–Mead usullari keng qo‘llanadi [12]. So‘nggi yillarda metaevristik algoritmlarga qiziqish ortdi: Ahmadieh Khanesar va hammualliflar differensial evolyutsiya, zarrachalar to‘dasi, sun’iy asalarilar koloniyasi va gravitatsion qidiruv algoritmlarini lazer treker ma’lumotlari asosida qiyoslagan [15]. Parallel ravishda ma’lumotlarga asoslangan parametrik bo‘lmagan kalibrlash yo‘nalishi shakllandi [3].

Shu bilan birga, metaevristik yondashuvlarni qo‘llashda ikkita uslubiy kamchilik tizimli ravishda takrorlanmoqda. **Birinchidan**, taqqoslash ko‘pincha metaevristikalar o‘rtasida olib boriladi; yaxshi sozlangan Levenberg–Marquardt usuli bilan bir xil hisoblash byudjetidagi qiyoslash keltirilmaydi, bu gibridlashtirishning asoslanganligini tekshirishga imkon bermaydi. **Ikkinchidan**, identifikatsiyalanuvchanlik tahlili o‘tkazilmagan holda qoldiq xatolikning kamayishi modelning yaxshilanishi sifatida talqin qilinadi, holbuki u o‘lchov shovqinining qayta tiklanishi natijasi ham bo‘lishi mumkin. Bu farqni ajratish uchun kalibrlashda qo‘llanilmagan mustaqil tekshirish pozalarida baholash zarur.

5. O‘lchov konfiguratsiyalarini tanlash va kuzatuvchanlik indekslari. Kalibrlash natijasining shovqinga bardoshliligi o‘lchov olinadigan pozalar

to‘plamiga keskin bog‘liq. Pozalarni tanlash identifikatsiya yakobiani singulyar qiymatlari asosida qurilgan kuzatuvchanlik indeksini maksimallashtirish masalasiga keltiriladi (3-jadval).

3-jadval. Kuzatuvchanlik indekslari va ularning tajriba rejalashtirishdagi mosligi

Indeks	Qurilishi (σ – yakobian singulyar qiymatlari)	Tajriba rejalashtirishdagi ekvivalenti	Manba
O_1	Singulyar qiymatlar ko‘paytmasining o‘rta geometrigi	D-optimallik	Borm va Menq [16]
O_2	Shartlanganlik sonining teskarisi, σmin/σmax	Shartlanganlik mezoni	Driels va Pathre [17]
O_3	Minimal singulyar qiymat σmin	E-optimallik	Nahvi va Hollerbach [18]
O_4	Shovqinni kuchaytirish indeksi, $\sigma min^2/\sigma max$	Mustaqil mezon	Nahvi va Hollerbach [18]
O_5	Singulyar qiymatlar teskarilari yig‘indisiga asoslangan indeks	A-optimallik	Sun va Hollerbach [19]

Sun va Hollerbach beshala indeksni tajriba rejalashtirish nazariyasidagi «alifbo optimalliklari» bilan bog‘lab, ular o‘zaro yuqori va quyi chegara ekanligini ko‘rsatgan. Muhim xulosa shundan iboratki, mezon tanlovi maqsadga bog‘liq: parametrlar dispersiyasini kamaytirish uchun D-optimallik, ishchi organ pozasi noaniqligini kamaytirish uchun E-optimallik afzal [19]. Tanlash masalasining o‘zi kombinator xususiyatga ega – N ta nomzod pozadan k tasini ajratishda to‘liq saralash amaliy jihatdan imkonsiz, shu sababli imitatsion qotirish, tabu-qidiruv va genetik

algoritmlar qo‘llanadi [2]. Sun va Hollerbach indeksni rekurrent yangilash orqali faol tanlash algoritmini taklif etib, 27 ta noma’lum parametrli robot uchun hisoblash samaradorligini bir necha tartibga oshirgan [20]; Xiang va hammualliflar O_1 va O_3 kombinatsiyasidan iborat gibrid indeksni asoslab, Staubli TX60 robotida pozitsiya bo‘yicha o‘rtacha xatolikni 89 %, orientatsiya bo‘yicha 49 % ga kamaytirgan [21].

6. Hal etilmagan muammolar. O‘tkazilgan tahlil quyidagi uchta muammoni ajratishga imkon berdi.

Birinchidan, birlashtirilgan xatolik modelining identifikatsiyalanuvchanligi. Geometrik, elastostatik va issiqlik komponentlarini yagona modelda birlashtirish parametrlar sonini keskin oshiradi va regressor matritsasi rangining to‘liq bo‘lmay qolish ehtimolini kuchaytiradi. Bunday holatda parametrlarning bir qismi mavjud o‘lchov tizimi orqali prinsipial ajratilmaydi, biroq optimallashtirish algoritmi ularga baribir aniq sonli qiymat beradi. Ko‘rib chiqilgan manbalarning aksariyatida rang tahlili yoki QR-dekompozitsiya orqali minimal bazaviy parametrlar to‘plamini ajratish bosqichi oshkor bayon etilmagan.

Ikkinchidan, o‘lchov tajribasini rejalashtirishdagi mezon nomuvofiqligi. Kuzatuvchanlik indeksi bilvosita mezon bo‘lib, pozalar to‘plamining xususiyatini tavsiflaydi, lekin texnologik vazifa nuqtai nazaridan ahamiyatli bo‘lgan qoldiq xatolikni bevosita baholamaydi; uning maksimumi qoldiq xatolik minimumiga har doim ham mos kelmaydi. Bundan tashqari, pozalar sonini asoslash masalasi deyarli tadqiq etilmagan – «kalibrlash vaqti – qoldiq xatolik» bog‘liqligining miqdoriy ko‘rinishi adabiyotda umumlashtirilgan holda keltirilmagan.

Uchinchidan, kalibrlash natijasining vaqt bo‘yicha barqarorligi. Ko‘pchilik ishlarda aniqlik kalibrlashdan so‘ng darhol va termik barqaror sharoitda o‘lchanadi; issiqlik dreyfi, yeyilish va yuklama rejimining o‘zgarishi natijasida erishilgan aniqlikning qanchalik tez yo‘qolishi va qayta kalibrlash davriyligi mezonlari tizimli o‘rganilmagan.

Umumiy uslubiy cheklovni ham qayd etish lozim: turli ishlarning sonli natijalari bevosita qiyoslanmaydi, chunki ular turli robotlarda, turli o‘lchov tizimlari va tekshirish protokollari bo‘yicha olingan; ISO 9283 standarti barcha nashrlarda qo‘llanilmaydi [22], tekshirish pozalarining soni va joylashuvi esa odatda asoslanmaydi. Bu yo‘nalishda yagona taqqoslash bazasini shakllantirish zaruratini ko‘rsatadi.

Xulosa

1. Sanoat robotlarining mutlaq pozitsiyalash aniqligi takrorlash aniqligidan bir-ikki tartibga past bo‘lib qolmoqda va aynan shu nomutanosiblik oflayn dasturlashni joriy etishga to‘sqinlik qiladi; kalibrlash bu farqni bartaraf etishning asosiy vositasidir.

2. Xatolik manbalari kompensatsiyalanish darajasi bo‘yicha keskin farqlanadi: geometrik xatoliklar model orqali to‘liq qoplanadi, elastostatik deformatsiyalar bikrlik modelini talab qiladi, issiqlik dreyfi esa faqat qo‘shimcha harorat o‘lchovlari mavjud bo‘lgandagina qisman kompensatsiyalanadi.

3. Kinematik model tanlovi to‘liqlik va parametrik uzluksizlik o‘rtasidagi murosaga olib keladi; amalda qo‘llanadigan aralash konvensiyalar parametrlar to‘plamining ortiqchaligini va identifikatsiyalanuvchanlikni tekshirish zaruratini keltirib chiqaradi. O‘lchov konfiguratsiyalarini tanlash esa kombinator optimallashtirish masalasi bo‘lib, mezon tanlovi kalibrlashning yakuniy maqsadidan kelib chiqib asoslanishi lozim.

4. Istiqbolli yo‘nalish sifatida birlashtirilgan xatolik modelining minimal identifikatsiyalanuvchi parametrlar to‘plamini qat’iy ajratish va shu to‘plamga moslashtirilgan o‘lchov konfiguratsiyalarini gibrid diskret optimallashtirish usullari bilan tanlash masalasi asoslanadi – bu o‘lchovlar sonini, binobarin kalibrlash vaqtini kamaytirgan holda erishilgan aniqlikni saqlab qolish imkonini berishi kutiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Karan B., Vukobratović M. Calibration and accuracy of manipulation robot models – an overview // Mechanism and Machine Theory. – 1994. – Vol. 29, № 4. – P. 479–500. DOI: 10.1016/0094-114X(94)90130-9

2. Hollerbach J. M., Wampler C. W. The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods // The International Journal of Robotics Research. – 1996. – Vol. 15, № 6. – P. 573–591.

3. Chen T., Yang W., Li S., Luo X. Data-driven calibration of industrial robots: a comprehensive survey // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2025. – Vol. 12, № 8. – P. 1544–1567. DOI: 10.1109/JAS.2025.125237

4. Klimchik A., Wu Y., Caro S., Furet B., Pashkevich A. Geometric and elastostatic calibration of robotic manipulator using partial pose measurements // Advanced Robotics. – 2014. – Vol. 28, № 21. – P. 1419–1429.

5. Mohnke C., Reinkober S., Uhlmann E. Constructive methods to reduce thermal influences on the accuracy of industrial robots // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 33. – P. 17–24. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.004

6. Vocetka M., Bobovský Z., Babjak J., Suder J., Grushko S., Mlotek J., Krys V., Hagara M. Influence of drift on robot repeatability and its compensation // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 22. – Art. 10813. DOI: 10.3390/app112210813

7. Denavit J., Hartenberg R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Journal of Applied Mechanics. – 1955. – Vol. 22, № 2. – P. 215–221.

8. Hayati S., Mirmirani M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators // Journal of Robotic Systems. – 1985. – Vol. 2, № 4. – P. 397–413. DOI: 10.1002/rob.4620020406

9. Barker L. K. Modified Denavit–Hartenberg parameters for better location of joint axis systems in robot arms. – NASA Technical Paper 2585. – Hampton: NASA Langley Research Center, 1986.

10. Zhuang H., Roth Z. S., Hamano F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1992. – Vol. 8, № 4. – P. 451–463.

11. Zhuang H., Roth Z. S. Camera-aided robot calibration. – Boca Raton: CRC Press, 1996.

12. Nubiola A., Bonev I. A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 29, № 1. – P. 236–245.

13. Wu Y., Klimchik A., Caro S., Furet B., Pashkevich A. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2015. – Vol. 35. – P. 151–168.

14. Li R., Zhao Y. Thermal effect model analysis and dynamic error compensation of industrial robot // Infrared and Laser Engineering. – 2015. – Vol. 44, № 8. – P. 2382–2387.

15. Ahmadieh Khanesar M., Yan M., Isa M., Piano S., Branson D. T. Precision Denavit–Hartenberg parameter calibration for industrial robots using a laser tracker system and intelligent optimization approaches // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 12. – Art. 5368. DOI: 10.3390/s23125368

16. Borm J. H., Menq C. H. Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure // The International Journal of Robotics Research. – 1991. – Vol. 10, № 1. – P. 51–63. DOI: 10.1177/027836499101000106

17. Driels M. R., Pathre U. S. Significance of observation strategy on the design of robot calibration experiments // Journal of Robotic Systems. – 1990. – Vol. 7, № 2. – P. 197–223.

18. Nahvi A., Hollerbach J. M. The noise amplification index for optimal pose selection in robot calibration // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Minneapolis, 1996. – P. 647–654.

19. Sun Y., Hollerbach J. M. Observability index selection for robot calibration // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Pasadena, 2008. – P. 831–836. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543308

20. Sun Y., Hollerbach J. M. Active robot calibration algorithm // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Pasadena, 2008. – P. 1276–1281. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543379

21. Xiang T., Gao C., Du B., Qiao G., Zuo H. Pose selection based on a hybrid observation index for robotic accuracy improvement // Machines. – 2024. – Vol. 12, № 8. – Art. 501. DOI: 10.3390/machines12080501

22. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. – Geneva: ISO, 1998.