DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

TEXNOLOGIK MODUL TARKIBIDA SANOAT ROBOTINING KINEMATIK TENGLAMASI

Siddiqov R.O., *PhD, dotsent,*
Muhandislik texnologiyalari kafedrasi,
E-mail: rasuljonsiddiqov@gmail.com,
Qo‘qon davlat universiteti

Annotatsiya*. Maqolada texnologik modul tarkibidagi sanoat robotining kinetik xususiyatlari tahlil qilinadi. Sanoat roboti zvenolari uzluksiz zanjir sifatida ko‘rib chiqilib, uning fazoviy harakati kuch va momentlarni hisobga olmasdan ifodalanadi.Kinematikaning to‘g‘ri va teskari masalalari ochib beriladi hamda ularni yechishda matritsali algebra usullari qo‘llanilishi asoslab beriladi. Birjinsli koordinatalar va o‘tish matritsalari yordamida robot ishchi qo‘lining holati va yo‘nalishi aniqlanadi. Robotning kinematik tenglamasi, tezlik va tezlanish formulalari keltiriladi.*

Аннотация*. В статье анализируются кинематические характеристики промышленного робота в составе технологического модуля. Звенья промышленного робота рассматриваются как непрерывная цепь, а его пространственное движение описывается без учёта сил и моментов. Раскрываются прямая и обратная задачи кинематики, обосновывается применение методов матричной алгебры для их решения. С помощью однородных координат и матриц перехода определяется положение и ориентация рабочего органа робота. Приводятся кинематическое уравнение робота, а также формулы скорости и ускорения.*

Abstract*. The article analyzes the kinematic characteristics of an industrial robot within a technological module. The links of the industrial robot are considered as a continuous chain, and its spatial motion is described without taking into account forces and moments. The direct and inverse kinematics problems are revealed, and the application of matrix algebra methods for their solution is substantiated. Using homogeneous coordinates and transformation matrices, the position and orientation of the robot’s end-effector are determined. The kinematic equation of the robot, as well as the formulas for velocity and acceleration, are presented.*

Kalit so‘zlar: *Sanoat roboti, kinematik tenglama, to‘g‘ri kinematika, teskari kinematika, birjinsli matritsa, o‘tish matritsasi, ishchi organ.*

Ключевые слова*: Промышленный робот, кинематическое уравнение, прямая кинематика, обратная кинематика, однородная матрица, матрица перехода, рабочий орган.*

Keywords: *Industrial robot, kinematic equation, forward kinematics, inverse kinematics, homogeneous matrix, transformation matrix, end-effector.*

Kirish. Mashinasozlikning eng quyi tashkiliy-texnologik bosqichi sifatida texnologik modul (TM) olinib, bu modul tarkibida komponentlari ichidan sanoat roboti (SR) ustida ko‘plab ilmiy tadqiqotlar ishlari olib borilgan. SR birqancha zvenolar to‘plamidan tashkil topgan bo‘lib, bu zvenolar uning uzluksiz zanjirini ifodalaydi. SRga bog‘liq bo‘lgan ikki xususiyat, ya’ni uning kinematik va dinamik xususiyatlari mavjud. Robotlarning kimnematikasi va dinamikasi uchun alohida-alohida boshqaruv modellari zarur bo‘lishini hisobga olib faqat sanoat robotining kinematikasi qarab chiqiladi.

SR kinematikasi – berilgan absolyut koordinatalar tizimiga nisbatan uning fazoviy harakatida momentlar va kuchlarni hisobga olmasdan analitik yozilishidir. SR kinematikasi ikkita asosiy masalaga bo‘linadi: birinchisi kinematikaning to‘g‘ri masalasi, ikkinchisi esa kinematikaning teskari masalasi deyiladi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

Kinematikaning to‘g‘ri masalasida aniq bir SR uchun ma’lum umumlashgan burchak, ya’ni umumlapgan koordinatalar $q(t)=(q_1(t),q_2(t),...,q_n(t))$ vektori va zvenolarning berilgan geometrik parametrlari bo‘yicha absolyut koordinatalar tizimiga nisbatan SR ushlash qurilmasining yo‘nalishi va holati aniqlanadi. Kinematikaning teskari masalasida esa zvenolarni barcha geometrik parametrlarida absolyut koordinatalar tizimiga nisbatan ushlash qurilmasining berilgan yo‘nalishi va holatini ta’minlovchi SRning umumlashgan burchaklari, ya’ni umumlashgan koordinatalar $q(t)=(q_1(t),q_2(t),...,q_n(t))$ vektorining barcha imkoniyatlari topiladi.

Kinematikaning to‘g‘ri masalasida ko‘proq matritsaviy algebra usullaridan foydalanilsa, teskari masalada esa ko‘proq matritsaviy algebra, iteratsiya va geometrik yondashuvlardan foydaniladi. [3]

Metodologiya. Ma’lumki, SR uch o‘lchovli fazoda harakat qiladi, lekin uch o‘lchovli matritsa SR kinematikasida zvenolarni ko‘chishlari haqida ma’lumot bera olmaydi. Shuning uchun uch o‘lchovli matritsaga to‘rtinchi koordinata qo‘shiladi. Va, natijada uch o‘lchovli fazoda birjinsli to‘rt koordinatadan iborat vektor hosil bo‘ladi. Agar SR harakati $Oxyz$ Dekart koordinatalar tizimida berilgan bo‘lsa, u holda birjinsli koordinata (x_1,x_2,x_3,x_4) ga teng bo‘ladi. Bu birjinsli koordinataning hamma qiymatlari bir paytda nolga teng bo‘la olmaydi va x,y,z lar quyidagicha bog‘langan bo‘ladi[1]:

$$x_1=\frac{x}{x_4},\qquad x_2=\frac{y}{x_4},\qquad x_3=\frac{z}{x_4}.$$

Agar $x_4=1$ bo‘lsa, u holda birjinsli koordinata SR holat vektorini ifodalaydi:

$$r^0=(x_1,x_2,x_3,1)^T.$$

Agar SR ishchi qo‘li silindrik koordinatalar tizimida berilgan bo‘lsa, ya’ni zvenolar ham aylanuvchan, ham chiziqli ko‘chish xususiyatiga ega bo‘lsa, u holda birjinsli koordinatalar yordamida ularning harakat matritsalari quyidagiga teng:

$$A_\alpha=\begin{bmatrix} & \alpha & & 0\\ & & & 0\\ & & & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\qquad A_r=\begin{bmatrix} & E & & r\\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$A=A_\alpha\cdot A_r=\begin{bmatrix} & \alpha & & \alpha\cdot r\\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

bu yerda $\alpha=\begin{bmatrix}\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23}\\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33}\end{bmatrix}$ SR asosidagi mos koordinata o‘qlariga nisbatan qaralayotgan zvenoning koordinata o‘qlarini yo‘naltiruvchi kosinuslari;

$r-$SR holat vektori; $E-$birlik matritsa.

$A-$matritsa harakatni bir zvenodan ikkinchi zvenoga ko‘chishini bildiradi.

Agar harakatdagi zvenolar soni $n-$ bo‘lsa, u holda SR ishchi qo‘lining oxirgi zvenosi,

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

ya'ni ushlash qurilmasini o'tish matritsalari orqali ifodasida birqancha zvenolarning harakat matritsalarini ketma-ket ko'paytirishdan hosil bo'ladi.

$$A_{\text{хол.мат.}} = A_1 \cdot A_2 \cdot \ldots \cdot A_n$$

bu yerda, $A_{\text{хол.мат.}}$ – matritsa SR ishchi qo'li ushlash qurilmasining holatini bildiradi. Bu harakat matritsalarning ko'paytmasi bir-biri bilan o'rin almashtirmasligi lozim. Chunki, matritsalar ko'paytmasi kommutativ emas.

SR ishchi qo'lining zvenolarini aylanuvchi yoki chiziqli ko'chishlari soniga qarab, uning harakatini dekart, silindrik, sferik va aylanuvchan yoki sharnirli koordinatalar tizimida berish mumkin. Bu koordinatalar tizimini bir-biridan farqi, dekart koordinatalar tizimida faqat chiziqli ko'chishga mo'ljallangan zvenolar harakatini, silindrik koordinatalar tizimida aylanuvchiga nisbatan chiziqli ko'chishlar soni ko'p bo'lgan zvenolar harakati, sferik koordinatalar tizimida chiziqli ko'chishga nisbatan aylanuvchi birikmalar soni ko'p bo'lgan zvenolarning harakati, aylanuvchan yoki sharnirli koordinatalar tizimida esa faqat aylanuvchan birikmali zvenolarning harakatlarini berish qulaydir.

SR ushlash qo'rilmasini yo'nalish(mo'ljal) va holatini turli koordinatalar tizimida turlicha berish mumkin (1.1-jadval) [1]:

1.1-jadval

SR ushlash qurilmasini yo'nalish va holatini turli usullar bilan yozilishi

SR ushlash qurilmasini holati	**SR ushlash qurilmasini yo'nalishi**
Dekart koordinatalar tizimida $(p_x, p_y, p_z)^T$	Dekart koordinatalar tizimida $[n, s, a]$
Silindrik koordinatalar tizimida $(rC\alpha, rS\alpha, d)^T$	Eyler burchaklari (φ, θ, ψ)
Sferik koordinatalar tizimida $(rC\alpha S\beta, rS\alpha S\beta, rC\beta)^T$	Kren, tangaj, рыскане

$$A_{\text{холат}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{\text{бурилиш}} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ [n,s,a] & \text{ёки} & R_{\varphi,\theta,\psi} & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{\text{уш.кур.}} = A_{\text{холат}} \cdot A_{\text{бурилиш}}$$

Bu zvenolar ichidan ixtiyoriy ikkitasi o'zaro bir-biri bilan quyidagi oltita birikma orqali ulangan bo'ladi. Bular, aylanuvchi, chiziqli (prizmali), silindrik, sferik, vintli va tekis. SRning zvenolari o'zaro bir-biri bilan ko'pchilik hollarda chiziqli va aylanuvchi birikmalar orqali ulangan bo'ladi. Ushbu zvenolar quyidagi to'rtta parametrga uzviy bog'langan bo'ladi [3].

d_i - birikish o'qi bo'ylab hisoblaganda, ixtiyoriy ikkita qo'shni zveno orasidagi masofa;

θ_i - o'zaro birikkan ikkita qo'shni zveno orasidagi burchak;

a_i –z_{i-1} o'q bilan z_i o'q orasidagi eng qisqa masofa;

α_i - qo'shni ikkita birikish o'qlari orasidagi burchak;

Bu to'rtta parametr SR ixtiyoriy zvenosining kinematik sxemasini ifodalash uchun yetarlidir.

Keltirilgan parametrlarni, (a_i, α_i) parametrlarni zvenolar konstruksiyasini xarakterlovchi, (d_i, θ_i) birikish parametrlarini esa qo'shni zvenolar holatini xarakterlovchi juftliklarga ajratish

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

mumkin.

SR ishchi qo‘lining harakatini o‘rganishda asosidagi koordinatalar tizimini o‘zi yetarli emas. Shuning uchun, har bir zvenoga mos bo‘lgan koordinatalar tizimi bilan to‘ldirish kerak. har bir zvenoni xarakterlovchi koordinata tizimi quyidagi uchta qoidaga asosan shakllanadi. [4]

1. z_{i-1} o‘q -birikish o‘qi bo‘ylab yo‘naltirilgan;
2. x_i o‘q z_{i-1} o‘qqa perpendikuyar;
3. y_i o‘q x_i, z_i o‘qlarni Dekart koordinatalar tizimigacha to‘ldiruvchi o‘q;

Faraz qilaylik, SRning zvenolari soni n-ta bo‘lsin. Demak, bu zvenolarni har biriga mos koordinatalar tizimi mavjud. n – zvenoni xarakterlovchi $O_nx_ny_nz_n$ koordinatalar tizimida, z_n bu zvenoning yo‘nalishi bilan ustma-ust tushadi.

harakat doimo bir zvenodan ikkinchi bir zvenoga ko‘chib yurganligi sababli, harakatni $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ koordinatalar tizimidan $O_nx_ny_nz_n$ koordinatalar tizimiga ko‘chishi quyidagi operatsiyalarni ketma-ket bajarish orqali o‘tiladi:

- x_{i-1} o‘qni z_{i-1} o‘q atrofida x_i o‘q bilan parallel bo‘lgunga qadar θ_i burchakka buriladi;
- x_{i-1} o‘qni x_i o‘q bilan bir chiziqqa kelgunga qadar d_i kattalikka suriladi;
- O_{i-1} koordinatalar tizimining boshini x_i o‘q bo‘ylab, O_i koordinatalar tizimi boshigacha a_i kattalikka surish;
- $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ koordinatalar tizimini x_i o‘q atrofida koordinatalar tizimining barcha mos o‘qlari parallel bo‘lgunga qadar α_i burchakka burish;

Bu to‘rtta operatsiyaning har birini bir jinsli matritsalar orqali yozish mumkin [2]. Olingan to‘rtta matritsani bir-biriga ko‘paytmasi $(i$-1) - koordinatalar tizimidan i -koordinatalar tizimiga o‘tish matritsasini ifodalaydi.

$$A_i = T_{z,d}T_{z,\theta}T_{x,a}T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & -\cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & -\cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

A_i matritsaga teskari $[A_i]^{-1}$ matritsa $i-$esa tizimidan $(i-1)-$ koordinatalar tizimiga o‘tish matritsasini ifodalaydi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

$$[A_i]^{-1} = A_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & -a_i \\ -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & -d_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & -d_i \cos\alpha_i \\ 0 \quad 0 & 0 & & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

bu yerda α_i, a_i, d_i - o‘zgarmas, θ_i – agar qaralayotgan birikma aylanuvchi bo‘lsa, u holda o‘zgaruvchi bo‘ladi.

Agar birikish chiziqli bo‘lsa, u holda d_i o‘zgaruvchi qolgan barcha parametrlar o‘zgarmas bo‘ladi.

Ushbu hol uchun A_i matritsani ko‘rinishi,

$$A_i = T_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Bu matritsaga teskari matritsa esa,

$$[A_i]^{-1} = A_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 \\ -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & -d_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & -d_i \cos\alpha_i \\ 0 \quad 0 & 0 & & 1 \end{bmatrix}$$

Birjinsli matritsalardan foydalanib, ixtiyoriy nuqtaning fazoviy holatini aniqlasa bo‘ladi.

Faraz qilaylik, $r_i = (x_i, y_i, z_i, 1)$ SRni $i-$koordinatalar tizimida fiksirlangan nuqtaning radius-vektori bo‘lsin $(i = 1,2,...,n)$. $(i-1)-$koordinatalar tizimida r_{i-1} radius-vektorni r_i orqali quyidagicha ifodalash mumkin [2]:

$$r_{i-1} = A_i r_i \quad (1.4)$$

$$r_0 = A_1 A_2 ... A_i r_i = P_i r_i \quad (1.5)$$

(1.5) tenglama SRni kinematik tenglamasi deyiladi.

$i-$koordinatalar tizimida fiksirlangan nuqtani qo‘zg‘almas deb olib, quyidagi kattaliklar kiritiladi: v_i – nuqtaning chiziqli tezligi; ω_i – nuqtaning chiziqli tezlanishi; $\eta_i - i-$zvenoning burchak tezligi; $\varepsilon_i - i-$zvenoning burchak tezlanishi. Bu olingan kattaliklar quyidagi formulalar asosida hisoblanadi:

$$v_i = \sum_{j=1}^{n} P_i^j \dot{q}_j r_i, \quad (1.6)$$

Agar fiksirlangan nuqta $i-$kinematik juftlikni markazi bilan ustma-ust tushsa, u holda $r_i = \theta_4 = (0,0,0,1)$ bo‘lib, tezlik va tezlanishlar quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

$$v_{i0} = \sum_{j=1}^{i}(P_i^i\theta_4)\dot{q}_j,$$

$$\omega_i = \sum_{j=1}^{i}(P_i^i r_i)\ddot{q}_j + \sum_{j,k=1}^{i}(P_i^{ik} r_i)\dot{q}_j\dot{q}_k, \quad (1.7)$$

$$\eta_i = \sum_{j=1}^{i}(P_j\bar{\theta}_j)\dot{q}_j, \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{i}(P_j\bar{\theta}_j)\ddot{q}_j + \sum_{i\geq k=1}^{i}(P_j^k\bar{\theta}_j)\dot{q}_j\dot{q}_k, \quad (1.9)$$

bu yerda,

$$\bar{\theta}_j = \begin{cases} \theta_1 = (1,0,0,0), \text{ агар } x_j \text{ ук - айланувчан булса,} \\ \theta_2 = (0,1,0,0), \text{ агар y}_j \text{ ук - айланувчан булса,} \\ \theta_3 = (0,0,1,0), \text{ агар z}_j \text{ ук - айланувчан булса,} \\ \theta_4 = (0,0,0,1), \text{ агар j - бирлик ттелескопк булса.} \end{cases}$$

Agar fiksirlangan nuqta $i-$kinematik juftlikni markazi bilan ustma-ust tushsa, u holda $r_i = \theta_4 = (0,0,0,1)$ bo‘lib, tezlik va tezlanishlar quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$v_{i0} = \sum_{j=1}^{i}(P_i^i\theta_4)\dot{q}_j,$$

$$\omega_{i0} = \sum_{j=1}^{i}(P_i^i\theta_4)\ddot{q}_j + \sum_{j,k=1}^{i}(P_i^{ik}\theta_4)\dot{q}_j\dot{q}_k.$$

Keltirilgan formulalar SR asosi qo‘zg‘almas bo‘lgan hol uchun edi. Agar SR asosi qo‘zg‘aluvchan bo‘lsa, u holda keltirilgan formulalar ko‘rinishi o‘zgaradi. (1.5) tenglama ko‘rinishi:

$$r = A_0P_ir_i = P_{0i}r_i, \ P_{0i} = A_0P_i, i = 1,2,\ldots,n.$$

(1.6) tenglama ko‘rinishi esa

$$v_i = \frac{dr}{dt} = \frac{d(A_0P_ir_i)}{dt} = \sum_{j=-5}^{n}(P_{0i}^j r)\dot{q}_j,$$

bu yerda,

$$P_{0i}^j = \frac{\partial(P_{0i})}{\partial q_j}, \qquad -5 \leq j \leq n.$$

SRning burilishini asosan aylanuvchi birikmalar ta’minlaydi. Dekart koordinatalar tizimiga nisbatan, uning burilishini birjinsli matritsalar orqali tasvirlanishi, koordinata o‘qlariga nisbatan bajariluvchi elementar burilishlar ko‘paytmasidan iborat bo‘ladi. Lekin bu elementar burilishlar matritsalari kommutativ emas. [4]

Masalan, OX o‘q atrofida α burchakka, OZ o‘q atrofida β burchakka va OY o‘q atrofida γ burchakka burilsin. U holda, umumiy SR burilish matritsasi quyidagicha xarakterlanadi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.67

$$F = F_{y,\gamma} F_{z,\beta} F_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x$$

$$x \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} cos\gamma\cos\beta & \sin\gamma\sin\alpha - \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha & \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha + \sin\gamma\cos\alpha\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta\cos\alpha & -\cos\beta\sin\alpha \\ \sin\gamma\cos\beta & \cos\gamma\cos\beta\cos\alpha + \cos\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\cos\alpha - \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha \end{bmatrix}$$

Endi, yuqoridagi elementar operatsiyalarini quyidagicha, dastlab, Oy o‘q atrofida γ burchakka, Oz o‘q atrofida β burchakka va Ox o‘q atrofida α burchakka burilsin. U holda,

$$F^1 = F_{x,\alpha} F_{z,\beta} F_{y,\gamma} =$$

$$= \begin{bmatrix} cos\gamma\cos\beta & \sin\beta & \sin\gamma\cos\beta \\ \sin\gamma\sin\alpha - \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha & \cos\beta\cos\alpha & \cos\gamma\cos\beta\cos\alpha + \cos\gamma\cos\alpha \\ \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha + \sin\gamma\cos\alpha\sin\beta & -\cos\beta\sin\alpha & \cos\gamma\cos\alpha - \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Ko‘rinib turibdiki, (2.0) matritsa (2.1) matritsaga teng emas.

Xulosa. Texnologik modul tarkibida sanoat robotining kinematik tenglamasi manipulyator ishchi organining fazodagi holatini bo’g’in koordinatalari orqali matematik ifodalash imkonini beradi. Natijada ishchi organning pozitsiyasi va orientatsiyasi yagona matritsa orqali aniqlanadi. Teskari kinematik masala berilgan holat bo’yicha bo’g’in koordinatalarini topishni talab qiladi va u umumiy holda nochiziqli hamda ko’p qiymatli bo’ladi. Kinematik tenglamalar ishchi zonani, traektoriyani va pozitsiyalash aniqligini ilmiy asoslash uchun asosiy hisoblash apparati hisoblanadi. Ular manipulyator tuzilmasini optimal tanlash va boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqishning dastlabki bazasini shakllantiradi. Shu sababli kinematik tahlil robototexnik tizimlarni loyihalash va ishlab chiqarishga integratsiyalashning ajralmas ilmiy asosi bo’lib xizmat qiladi.

Adabiyotlar

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. Пер. с англ. -М.: Мир. 1989. - 624 с.

2. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И. Технологик модул таркибида саноат роботини мақбул ҳаракат траекториясини танлаш // ”Кибернетика муаммолари”. Тошкент. 2005. №91 б

3. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И. Технологик модул таркибида саноат роботи ҳаракатини турғунликка текшириш//ТАТУнинг республика илмий -амалий конференцияси маърузалари. Тошкент. 2005 й. 27-30 сентябр.

4. R. Siddiqov., Asosi harakatlanadigan sanoat robotlarining optimal boshqaruv modeli // Namangan davlat texnika universiteti. Qurilish va ta’lim ilmiy jurnali.2025 yil 3-son 258-bet