KONVEYER YIG'UV LINIYASI UCHUN YELIM SURTUVCHI ROBOTLI MANIPULYATORNING KINEMATIK SXEMASINI TANLASH VA ISHCHI ZONASINI ASOSLASH

Bozorov Rustam Rasulovich
Buxoro davlat texnika universiteti, stajyor-tadqiqotchi

Annotatsiya. Maqolada harakatlanayotgan konveyerdagi detallarga yelim surtish operatsiyasini avtomatlashtirish uchun robotli manipulyatorning kinematik sxemasini tanlash va ishchi zonasini asoslash masalalari ko'rib chiqilgan. Dekart (portal), SCARA, olti erkinlik darajali bo'g'inli va parallel (delta) sxemalar ko'p mezonli usulda taqqoslangan. To'rt erkinlik darajali SCARA sxemasi konveyerni kuzatish rejimi bilan birgalikda maqbul ekani ko'rsatilgan. Manipulyatorning Denavit–Hartenberg parametrlari, to'g'ri va teskari kinematika tenglamalari keltirilgan. Konveyer tezligi, chok uzunligi va manipulyator zvenolari uzunliklari o'rtasidagi bog'lanish olingan.

Kalit so'zlar: robotli manipulyator, yelim surtish, konveyer yig'uv liniyasi, SCARA, Denavit–Hartenberg parametrlari, ishchi zona, konveyerni kuzatish.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы выбора кинематической схемы и обоснования рабочей зоны роботизированного манипулятора для автоматизации нанесения клея на детали, перемещающиеся по конвейеру. Декартова (портальная), SCARA, шестистепенная шарнирная и параллельная (дельта) схемы сопоставлены многокритериальным методом. Показано, что рациональной является четырёхстепенная схема SCARA в сочетании с режимом слежения за конвейером. Приведены параметры Денавита–Хартенберга, уравнения прямой и обратной кинематики манипулятора. Получена зависимость между скоростью конвейера, длиной шва и длинами звеньев манипулятора.

Ключевые слова: роботизированный манипулятор, нанесение клея, конвейерная сборочная линия, SCARA, параметры Денавита–Хартенберга, рабочая зона, слежение за конвейером.

Abstract. The paper deals with selecting the kinematic structure and substantiating the workspace of a robotic manipulator for adhesive dispensing on parts moving along a conveyor assembly line. Cartesian (gantry), SCARA, 6-DOF articulated and parallel (delta) structures are compared using a weighted multi-criteria method. A 4-DOF SCARA manipulator operating in conveyor-tracking mode is shown to be the most rational option. Denavit–Hartenberg parameters and closed-form forward and inverse kinematics are presented, and a relationship between conveyor speed, bead length and link lengths is derived.

Keywords: robotic manipulator, adhesive dispensing, conveyor assembly line, SCARA, Denavit–Hartenberg parameters, workspace, conveyor tracking.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Kirish

Sanoat robotlari zamonaviy ishlab chiqarishni avtomatlashtirishning asosiy vositasiga aylandi. Xalqaro robototexnika federatsiyasi (IFR) ma'lumotiga ko'ra, 2025-yilda dunyoda 603 mingdan ortiq sanoat roboti o'rnatilgan, bu 2024-yilga nisbatan 11 % ko'p; ishlayotgan robotlarning umumiy soni esa 5 million donaga yetgan [1]. IFR 2026-yilda o'rnatishlar soni 655 ming donagacha o'sishini kutmoqda [1].

O'zbekistonda 2022–2026-yillarga mo'ljallangan Taraqqiyot strategiyasida sanoatni modernizatsiya qilish va yuqori qo'shilgan qiymatli mahsulotlar ishlab chiqarishni kengaytirish ustuvor vazifa sifatida belgilangan [2]. Avtomobilsozlik, maishiy texnika, elektrotexnika va mebel ishlab chiqarishda ko'plab yig'uv operatsiyalari yelim bilan biriktirishga asoslanadi: oynalarni o'rnatish, korpuslarni germetiklash, panellarni yopishtirish va boshqalar.

Qo'lda yelim surtishda chok kengligi va balandligining barqarorligini ta'minlash qiyin, yelim ortiqcha sarflanadi, operator esa zararli bug'lar ta'sirida ishlaydi. Konveyer to'xtamasdan harakatlanganda masala yanada murakkablashadi: manipulyator bir vaqtning o'zida detal bilan sinxron harakatlanishi va chok trayektoriyasini bajarishi lozim. Bunday sharoitda manipulyatorning kinematik sxemasi va zvenolar uzunliklari liniya unumdorligini bevosita cheklaydi.

Manipulyatorlar kinematikasi va boshqaruvi nazariyasi [3–7] asarlarda chuqur ishlab chiqilgan. Biroq harakatlanuvchi obyektga yelim surtishda kinematik sxemani va ishchi zona o'lchamlarini konveyer tezligi bilan bog'liq holda tanlash masalasi yetarlicha yoritilmagan.

Tadqiqot maqsadi — konveyer yig'uv liniyasi uchun yelim surtuvchi robotli manipulyatorning maqbul kinematik sxemasini tanlash va ishchi zonasi parametrlarini konveyer tezligi bilan bog'liq holda asoslash.

Tadqiqot obyekti va usullari

Tadqiqot obyekti — uzluksiz harakatlanuvchi lentali konveyerdagi tekis yoki kam egrilikka ega detallarning perimetri bo'ylab yelim choki surtuvchi robotli manipulyator. Loyihalash uchun qabul qilingan dastlabki ma'lumotlar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Texnologik jarayonning dastlabki ma'lumotlari

Parametr	**Belgi**	**Qiymat**
Konveyer tezligi	v_k	0,03–0,08 m/s (2–5 m/min)
Detal o'lchamlari (konveyer bo'ylab × ko'ndalang)	a×b	500 × 300 mm
Chok uzunligi (perimetr bo'ylab)	L_{ch}	1,6 m
Soplaning detalga nisbatan tezligi	v_s	0,25 m/s
Soplo yaqinlashishi, ochilishi va yopilishi vaqti	t_q	0,6 s
Detallar orasidagi qadam	p	0,8 m
Takroriy joylashuv aniqligi	RP	≤ 0,1 mm
Foydali yuk (dozator kallagi bilan)	m	3 kg gacha

Tadqiqotda mashinalar va mexanizmlar nazariyasi, robotlar kinematikasi (Denavit–Hartenberg usuli [3, 4]), ko'p mezonli qarorlar qabul qilish va kompyuter modellashtirish usullaridan foydalanildi. Takroriy aniqlik talabi ISO 9283 standarti asosida belgilandi [8].

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Kinematik sxemalar besh mezon bo'yicha vaznli yig'indi usulida taqqoslandi:

$$S_j=\sum_{i=1}^{5} w_i\ r_{ij}, \qquad \sum_{i=1}^{5} w_i=1, \qquad (1)$$

bu yerda r_{ij} — j-sxemaning i-mezon bo'yicha ekspert bahosi (1–5 ball); w_i — mezonning vazn koeffitsiyenti. Mezonlar: K1 — ishchi zonaning konveyer bo'ylab uzunligi (w = 0,25); K2 — takroriy aniqlik (0,20); K3 — tezkorlik va dinamik xususiyatlar (0,20); K4 — teskari kinematika va boshqarishning soddaligi (0,15); K5 — narx va xizmat ko'rsatish (0,20).

Natijalar va muhokama

Taqqoslash natijalari 2-jadvalda keltirilgan. SCARA sxemasi eng yuqori umumiy ballni oldi: u gorizontal tekislikdagi yuqori tezkorlik va bikrlikni vertikal o'q bo'ylab oddiy chiziqli harakat bilan uyg'unlashtiradi. Portal sxema katta o'lchamli detallar uchun muqobil variant bo'lib qoladi.

2-jadval

Kinematik sxemalarni ko'p mezonli baholash

Sxema	**K 1**	**K 2**	**K 3**	**K 4**	**K 5**	S_j
SCARA (4 e.d.)	4	5	5	4	4	**4,40**
Dekart, portal (4 e.d.)	5	4	3	5	4	4,20
Delta, parallel (4 e.d.)	2	4	5	3	3	3,35
Bo'g'inli (6 e.d.)	4	4	4	2	2	3,30

Izoh: e.d. — erkinlik darajasi.

Tanlangan RRPR tipidagi SCARA manipulyatorining Denavit–Hartenberg parametrlari 3-jadvalda keltirilgan [3].

3-jadval

SCARA manipulyatorining Denavit–Hartenberg parametrlari

Zveno	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	H	l_1	0
2	θ_2^*	0	l_2	π
3	0	d_3^*	0	0
4	θ_4^*	d_t	0	0

Izoh: * — umumlashgan koordinata; H — asos balandligi; d_t — dozator kallagi uzunligi.

Bir jinsli o'zgartirish matritsalarini ko'paytirish ($T=A_1A_2A_3A_4$) natijasida soplo uchining holati va yo'nalishi uchun to'g'ri kinematika tenglamalari olinadi:

$$x=l_1\cos\theta_1+l_2\cos(\theta_1+\theta_2),$$
$$y=l_1\sin\theta_1+l_2\sin(\theta_1+\theta_2), \qquad (2)$$
$$z=H-d_3-d_t, \qquad \varphi=\theta_1+\theta_2-\theta_4.$$

Teskari kinematika masalasi analitik yechimga ega, bu kontrollerda real vaqt hisoblashlarini soddalashtiradi:

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

$$\theta_2=\operatorname{atan2}\left(\pm\sqrt{1-D^2},\ D\right),\qquad D=\frac{x^2+y^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2},$$
$$\theta_1=\operatorname{atan2}(y,x)-\operatorname{atan2}\left(l_2\sin\theta_2,\ l_1+l_2\cos\theta_2\right), \tag{3}$$
$$d_3=H-d_t-z,\qquad \theta_4=\theta_1+\theta_2-\varphi.$$

Gorizontal tekislikdagi tezliklar Yakobian matritsasi orqali bog'lanadi, uning determinanti $\det J=l_1l_2\sin\theta_2$ ga teng. Demak, $\theta_2=0$ va $\theta_2=\pi$ bo'lganda manipulyator maxsus (singular) holatga tushadi. Shu sababli ishlash oralig'i $\theta_2\in[\theta_{2,\min};\ \pi-\theta_{2,\min}]$ bilan cheklanadi, ishchi zona esa radiuslari quyidagicha bo'lgan halqa shaklini oladi:

$$r_{\max}=\sqrt{l_1^2+l_2^2+2l_1l_2\cos\theta_{2,\min}},\qquad r_{\min}=\sqrt{l_1^2+l_2^2-2l_1l_2\cos\theta_{2,\min}}. \tag{4}$$

Konveyerni kuzatish rejimida detal holati konveyer enkoderi signali bo'yicha aniqlanadi, soplo uchining manipulyator asosiga nisbatan trayektoriyasi esa quyidagicha yoziladi [5, 6]:

$$\mathbf{p}_s(t)=\mathbf{p}_d(t)+\mathbf{R}(\psi)\,\mathbf{s}(\sigma),\qquad \mathbf{p}_d(t)=\begin{bmatrix}x_0+\Delta_e\,[N(t)-N_0]\\ y_0\end{bmatrix},\qquad \dot\sigma=v_s, \tag{5}$$

bu yerda $\mathbf{s}(\sigma)$ — detal koordinatalar tizimida berilgan chok trayektoriyasi; σ — trayektoriya bo'ylab yoy uzunligi; (x_0,y_0,ψ) — detalning kamera yordamida aniqlangan boshlang'ich holati; $N(t)$ — enkoder impulslari soni; Δ_e — bir impulsga to'g'ri keladigan siljish. Enkoder bo'yicha kuzatish konveyer tezligining tebranishlarini avtomatik hisobga oladi.

Chok surtilayotganda detal konveyer bo'ylab siljiydi. Chok surtish davomiyligi

$$T_s=\frac{L_{ch}}{v_s}+t_q. \tag{6}$$

Eni b bo'lgan detal $y_0\le y\le y_0+b$ oralig'ida harakatlanganda ishchi zonaning konveyer bo'ylab mavjud uzunligi zarur uzunlikdan kam bo'lmasligi kerak (1-rasm):

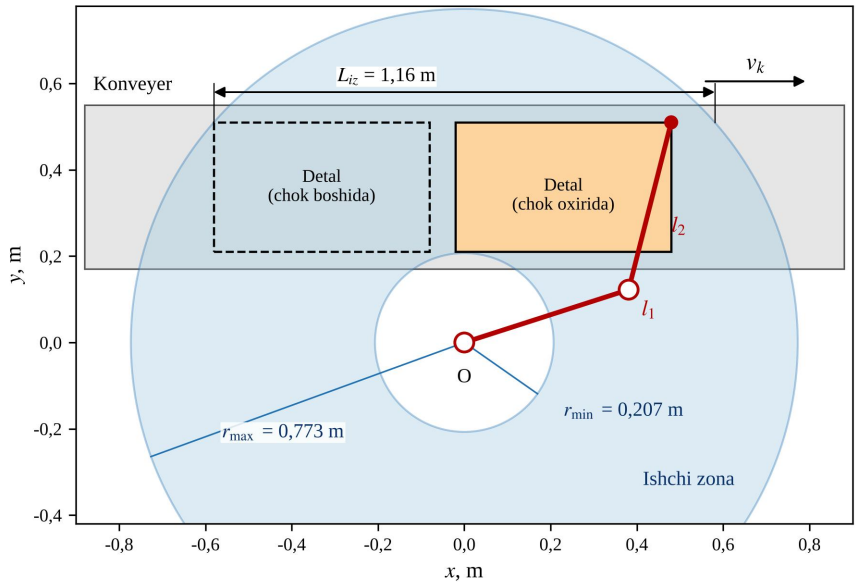
$$y_0\ge r_{\min},\qquad L_{iz}=2\sqrt{r_{\max}^2-(y_0+b)^2}\ \ge\ a+v_kT_s. \tag{7}$$

Bundan konveyer tezligining chegaraviy qiymati kelib chiqadi:

$$v_{k,\max}=\frac{2\sqrt{r_{\max}^2-(y_0+b)^2}-a}{T_s}. \tag{8}$$

1-jadval ma'lumotlari uchun T_s = 1,6/0,25 + 0,6 = 7,0 s; v_k = 0,08 m/s bo'lganda zarur uzunlik L_{iz} = 1,06 m. Zvenolar teng ($l_1=l_2=l$) bo'lganda $r_{\max}=2l\cos(\theta_{2,\min}/2)$, $r_{\min}=2l\sin(\theta_{2,\min}/2)$. $\theta_{2,\min}$ = 30° qabul qilindi, ya'ni Yakobian determinanti maksimal qiymatining kamida 50 % ini tashkil etadi. y_0 = 0,21 m da (7) shartdan $l\ge$ 0,381 m kelib chiqadi; $l_1=l_2$ = 400 mm qabul qilindi.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.



1-rasm. SCARA manipulyatorining ishchi zonasi va detalning konveyerdagi holatlari (l_1=l_2 = 400 mm, $\theta_2 \in [30°; 150°]$)

Bunda r_{max} = 0,773 m, r_{min} = 0,207 m, mavjud uzunlik L_{iz} = 1,16 m, konveyer tezligining chegaraviy qiymati esa $v_{k,max} \approx$ 0,094 m/s ni tashkil etadi. Bu talab qilingan 0,08 m/s ga nisbatan taxminan 18 % zaxira beradi. Soplo uchining asosga nisbatan maksimal tezligi v_k+v_s = 0,33 m/s bo'lib, SCARA robotlarining tezlik imkoniyatlaridan ancha past.

Sikl sharti ham bajariladi: detallar orasidagi vaqt p/v_k = 0,8/0,08 = 10 s chok surtish (7,0 s) va boshlang'ich holatga qaytish (taxminan 1 s) vaqtlari yig'indisidan katta. Bunda liniya unumdorligi 360 dona/soatni tashkil etadi.

Xulosa

1. Ko'p mezonli baholash natijasida harakatlanuvchi konveyerda yelim surtish uchun to'rt erkinlik darajali SCARA sxemasi maqbul deb topildi (S = 4,40). Katta o'lchamli detallar uchun portal sxema muqobil variant hisoblanadi (S = 4,20).

2. Manipulyatorning Denavit–Hartenberg parametrlari, to'g'ri va teskari kinematikaning analitik tenglamalari olindi. Ular konveyerni kuzatish rejimida trayektoriyani real vaqtda hisoblash imkonini beradi.

3. Ishchi zona uzunligi, konveyer tezligi, chok uzunligi va zvenolar uzunliklari o'rtasidagi bog'lanish olindi. Qabul qilingan dastlabki ma'lumotlar uchun l_1=l_2 = 400 mm zvenolar $v_k \leq$ 0,094 m/s gacha ishlashni ta'minlaydi, bunda $\theta_2 \in [30°; 150°]$ sharti saqlanadi.

4. Keyingi bosqichda manipulyatorning dinamik modeli tuziladi hamda yelim dozalash parametrlari harakat qonuni bilan muvofiqlashtiriladi.

1. Foydalanilgan adabiyotlar

2. 1. Müller C. World Robotics 2026 – Industrial Robots. – Frankfurt am Main: IFR Statistical Department, VDMA Services GmbH, 2026. URL: https://ifr.org/ifr-press-releases/five-million-robots-now-operate-in-factories-globally

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

3. 2. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi Farmoni.
4. 3. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. 2nd ed. – Hoboken: Wiley, 2020.
5. 4. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. – Pearson, 2018.
6. 5. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. – London: Springer, 2009.
7. 6. Lynch K.M., Park F.C. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
8. 7. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
9. 8. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots — Performance criteria and related test methods.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.