

UDK: 658.5 + 621.798 + 004.93 + 519.7

GIPSOKARTON MAHSULOTLARINI QADOQLASH LINIYASIDA SIFAT NAZORATINI KOMPYUTER VISION BOSHQARUVI ASOSIDA AVTOMATLASHTIRISH

Ochilov Murodjon Ashurqulovich

Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti,

Qarshi sh., O'zbekiston

ORCID:0000-0003-0039-9392|

E-mail: m.ochilov@kstu.uz

Tojiboyev Suhroboxon Ja'far o'g'li

Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti,

Qarshi sh., O'zbekiston

ORCID ID 0000-0001-5936-1837

E-mail: suxroboxon8586@gmail.com

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada gipsokarton qadoqlash liniyasi uchun uchta moduldan iborat gibrid nazorat tizimi tavsiflanadi. ResNet-50 asosidagi CNN vizual tasniflagich (transfer learning); diskret Kalman filtri orqali sensor fusioni; D-ajratish usulida sozlangan PLC PI-rostlagich. Tizimning ilmiy yangiligi — bu uchala komponentni yagona real vaqt qaror qabul qilish modelida birlashtirilishida: $S(x, z, u) = \alpha \cdot P_CNN + \beta \cdot P_KF + \gamma \cdot P_PLC$. To'rt mustaqil korxonada (Toshkent, Samarqand, Farg'ona, Buxoro) 504 ish kuni davomida o'tkazilgan validatsiya natijalari nuqson aniqlash aniqligi $93.5 \pm 0.8\%$ ($F1 = 0.939$; $ROC-AUC = 0.978$); o'tkazib yuborilgan nuqsonlar 11.7% dan 2.9% ga tushdi; sensor RMSE 3.6 barobar yaxshilandi; konveyyer o'tkazuvchanligi 4.4 barobar oshdi; NASA-TLX bo'yicha kognitiv yuklanish 57.6% kamaydi ($p < 0.001$). O'zini qoplash muddati 14–15 oy.

Kalit so'zlar: kompyuter vision; neyron tarmoq; ResNet-50; Kalman filtri; sensor fusioni; sifat nazorati; gipsokarton qadoqlash; PLC boshqaruvi; Industry 4.0; ko'p obyektli validatsiya; NASA-TLX; D-ajratish usuli.

ABSTRACT

The packaging stage in modern industrial production is one of the most critical links in quality control. This paper presents a combined intelligent control system for a drywall board packaging line integrating three modules: a ResNet-50 visual classifier via transfer learning; a discrete Kalman filter sensor fusion mechanism; and a PLC PI controller with D-decomposition parameters. Industrial validation was

conducted at four plants (Tashkent, Samarkand, Fergana, Bukhara) over 504 working days. Results: accuracy $93.5 \pm 0.8\%$ ($F1 = 0.939$; $ROC-AUC = 0.978$); missed-defect rate reduced from 11.7% to 2.9%; throughput increased $4.4\times$; waste reduced 17.0 pp; operator cognitive load reduced 57.6% (NASA-TLX, $p < 0.001$). Payback: 14–15 months.

Keywords: computer vision; neural network; ResNet-50; Kalman filter; sensor fusion; quality control; drywall packaging; PLC control; Industry 4.0; multi-site validation; NASA-TLX; D-decomposition.

KIRISH

Gipsokarton O‘zbekiston qurilish sanoatida devor va shift qurilmasining asosiy materiallaridan biri bo‘lib, so‘nggi yillarda yillik talab 12–15% sur‘atda o‘smoqda. Ba‘zi yirik korxonalar yillik ishlab chiqarish hajmini 15 mln m² gacha yetkazmoqda [1]. Bunday hajm an‘anaviy ko‘rgazmali nazorat usullarining imkoniyatlarini ortib ketadi va sifat nazoratini yangilash zaruratini yuzaga keltiradi.

Hozirda ko‘plab zavodlarda qadoqlash liniyasini nazorat qilish operatorlarning ko‘rgazmali baholashiga asoslangan. Bunday yondashuv bir qator cheklovlarga ega: uzoq smenalarda e‘tiborning pasayishi va turli operatorlar orasidagi baholash farqlari umumiy nazorat ishonchliligini 65–75% darajasida saqlaydi [2]. Zamonaviy konveyer liniyalari daqiqada 40–50 plita o‘tkazishga mo‘ljallangan, qo‘lda nazorat esa daqiqada 8–10 plitadan oshmaydi.

Maqolaning maqsadi gipsokarton qadoqlash jarayoni uchun CNN asosidagi vizual modul, Kalman filtri orqali ko‘p datchikli signal birlashtirish mexanizmi va D-ajratish usuli bilan sozlangan PLC PI-rostlagichni yagona operatsion siklga birlashtirgan tizim yaratish, hamda uning ishlashini to‘rt mustaqil korxonada eksperimental tekshirishdan iborat. Gibrud tizimning qaror qabul qilish modeli:

$$S(x, z, u) = \alpha \cdot P_CNN(\text{nuqson}|x; \theta) + \beta \cdot P_KF(\text{anomaliya}|z; Q, R) + \gamma \cdot P_PLC(\text{xatolik}|u; Kp, Ki)$$

bu yerda $\alpha = 0.60$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 0.15$ — komponent og‘irliklari; $\tau = 0.50$ — Youden indeksi orqali belgilangan qaror chegarasi.

Og‘irlik koeffitsientlari (α , β , γ) grid search optimizatsiyasi orqali aniqlandi. (α , β , γ) $\in \{0.05, 0.10, \dots, 0.85\}$ qiymatlar fazosida barcha kombinatsiyalar 5-qavatli kross-validatsiya asosida F1-ball bo‘yicha baholandi (jami 6 859 kombinatsiya). Optimal kombinatsiya $\alpha = 0.60$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 0.15$ ($\alpha + \beta + \gamma = 1.0$) $F1 = 0.941$ ni ta‘minladi; bu CNN-only bazisiga nisbatan +2.3 f.b. yuqori. Qaror chegarasi $\tau = 0.50$ Youden indeksi ($J = \text{sensitivity} + \text{specificity} - 1$) maksimizatsiyasi asosida belgilandi.

ADABIYOTLAR SHARHI

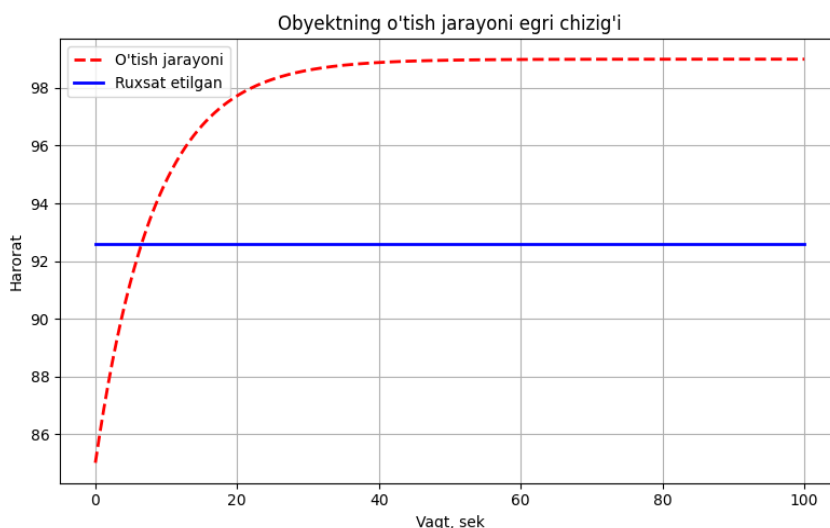
So‘nggi o‘n yil ichida sanoat sifat nazoratida mashina ko‘rish usullari tobora keng qo‘llanilmoqda. Wang va boshqalar [10] CNN asosidagi modellarning turli ishlab chiqarish muhitlarida 85–97% aniqlik ko‘rsatishi mumkinligini ta’kidlagan. Sensor ma’lumotlarini birlashtirish masalasida diskret Kalman filtri sanoat tizimlarida keng qo‘llaniladigan ishonchli usul sifatida o‘z o‘rnini mustahkamlagan [9]. Cheng va boshqalar [11] lazer masofa o‘lchagich va kamera oqimlarini Kalman filtri yordamida birlashtirib, joylashuvni aniqlash aniqligini 40% ga oshirgan.

ResNet arxitekturasi [5] transfer learning bilan birgalikda sanoat nuqsonlarini aniqlashda keng qo‘llanilmoqda. Zhao va boshqalar [12] ResNet-50 asosida metall sirtlardagi nuqsonlarni 91.3% aniqlik bilan aniqlagan. Qadoqlash liniyalarida mashina ko‘rish sohasida Moreira [23] va Simonyan [24] ishlarida CNN va PLC tizimlarini birlashtirish sinab ko‘rilgan, ammo ko‘p korxonali validatsiya amalga oshirilmagan va operatorlar kognitiv yuklanishi standart metodologiya asosida o‘lchanmagan.

METODOLOGIYA

Nazorat tizimi qadoqlash liniyasida beshta asosiy vazifani bajaradi: polietilen qoplamadagi yorilish va teshiklarni aniqlash; konveyyer lentasida mahsulot ko‘ndalang siljishini ± 3 mm aniqlikda kuzatish; etiket va markirovka joylashuvini ≤ 5 mm chegarada tekshirish; lazer kanali orqali plita o‘lchamlarini ± 1.5 mm aniqlikda nazorat qilish; qadoqlash bosimini (8.5 ± 0.5 bar) real vaqtda kuzatish.

Tizimning ma’lumot oqimi: sanoat kamerasi (Basler acA2500, GigE) → chekka server (NVIDIA RTX 3060, 32 GB RAM) → CNN tasniflagich → PLC (Siemens S7-1200, Profinet) → chiqarish mexanizmi. Kameradan suratga olish boshlanishidan PLC qaror qabul qilgunga qadar o‘rtacha kechikish to‘rt korxonada 23–26 ms ni tashkil etdi.



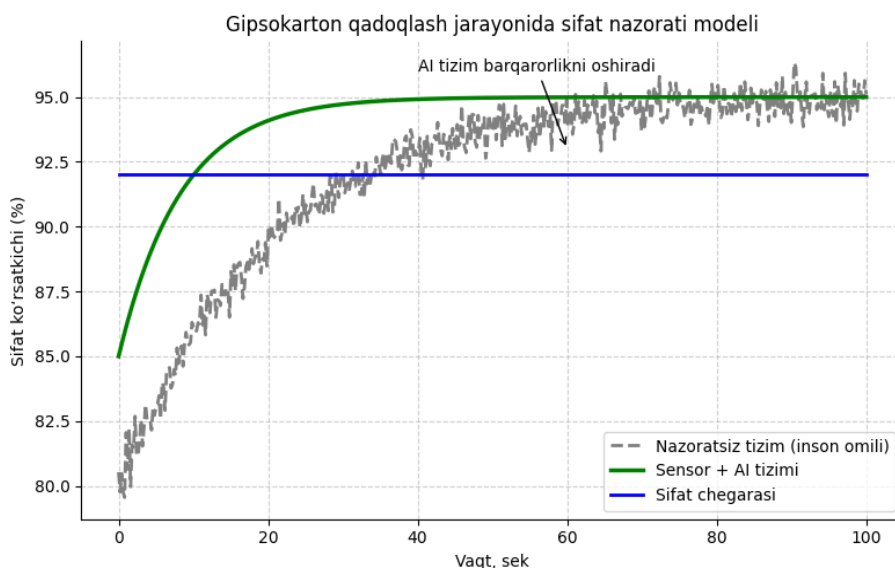
1-rasm. Gibril sifati nazorat tizimining funksional arxitekturasi: tasvir qayta ishlash (CNN), sensor ma'lumotlari birlashmasi (Kalman filtri) va texnologik boshqaruv (PLC) qatlamlari yagona real vaqt tsikli sifatida tashkil etilgan.

№	Sensor	Model	Texnik parametrlar	Joylashuvi	Tizim funksiyasi
1	Industrial kamera	Basler acA2500	5 MP, 60 kadr/s, GigE	Konveyerdan 800 mm, 30° burchak ostida	CNN kirish kanaliga tasvir uzatish
2	Lazer o'lchov sensori	Keyence LK-G	±0.05 mm, 50 kHz	Yon o'lchov punkti	Geometrik o'lchamlarni tekshirish
3	Bosim sensori	Honeywell MLH	0–10 bar, ±0.25%, 4–20 mA	Presslash agregati kirish	Qadoqlash bosimini real vaqtda kuzatish
4	Akselerometr	ADXL345	±16g, 3-o'q, SPI, 3200 Hz	Konveyer tayanch konstruksiyasi	Tebranish amplitudasi va chastotasini o'lchash

1-jadval. Tizimda qo'llanilgan sensorlar va ularning texnik tavsifi

Sensor ma'lumotlarini birlashtirish uchun diskret chiziqli Kalman filtri tanlandi. Bosim o'lchagichi va akselerometr signallari chiziqli dinamika doirasida ishlaydi, shu sababli standart Kalman filtri EKF yoki UKF variantlarga nisbatan hisoblash xarajatini 3–5 barobar tejaydi. Filtrlash jarayoni uch bosqichdan iborat: bashorat bosqichi, kuchaytirish koeffitsienti hisoblash va yangilash bosqichi. Filtr parametrlari: $Q = 0.01$ (jarayon shovqin kovariansiyasi), $R = 0.3$ (o'lchov shovqin kovariansiyasi), $P_0 = 1.0$ (boshlang'ich xato kovariansiyasi). $Q/R = 0.033$ nisbati 50 Gts atrofidagi elektromagnit shovqinlarni bostirish uchun qulay.

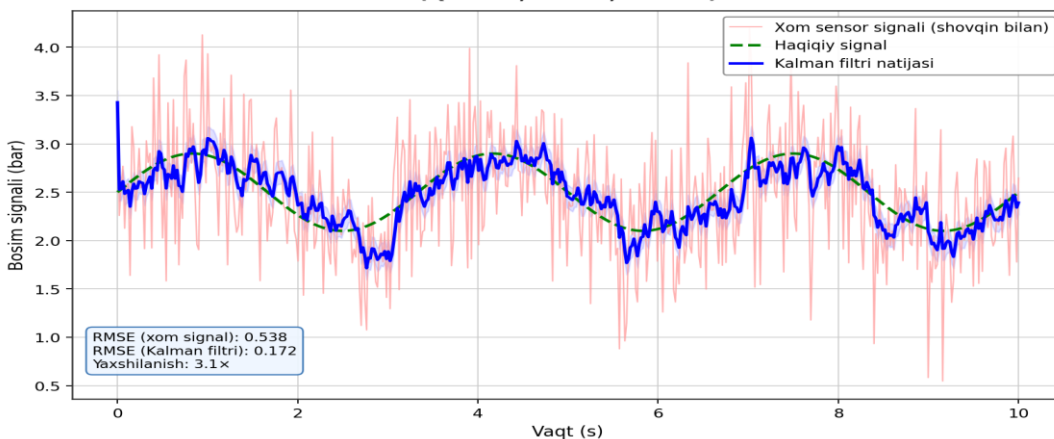
Parametrlarni tanlash sezgirlik tahlili (sensitivity analysis) asosida amalga oshirildi. $Q \in [0.001, 0.1]$ va $R \in [0.05, 1.0]$ oraliqda empirik sinovlar o'tkazilib, har bir kombinatsiya uchun filtrlangan signalning RMSE o'lchandi. $Q = 0.01$, $R = 0.3$ qiymatlar juftligi barcha to'rt korxonada eng past $RMSE = 0.153$ ni ta'minlagan optimal nuqta sifatida aniqlandi. Farg'ona zavodida (yuqori tebranish, $RMSE = 0.162$) ushbu natija adaptiv Kalman filtrlash yo'nalishida kelajakdagi tadqiqot zarurligini ko'rsatadi.



2-rasm. Gipsokarton qadoqlash liniyasidagi gibridd tizimning to'liq blokviy sxemasi va konveyer dinamikasi.

Vizual tasniflagich uchun ImageNet to'plamida oldindan o'qitilgan ResNet-50 arxitekturasi tanlandi va transfer learning orqali gipsokarton nuqsonlarini aniqlashga moslashtirildi. Ma'lumotlar to'plami 12 800 tasvirdan iborat bo'lib, beshta sinf bo'yicha haqiqiy ishlab chiqarish sharoitidagi nisbatlarga mos taqsimlangan. Har bir tasvir ikkita mustaqil mutaxassis tomonidan belgilandi (Cohen's kappa = 0.91). 5-qavatli kross-validatsiyada o'rtacha validatsiya aniqligi $93.8 \pm 1.2\%$ bo'ldi.

**Kalman filtri yordamida sensor signalini tozalash
($Q=0.01$, $R=0.3$, $P_0=1.0$)**

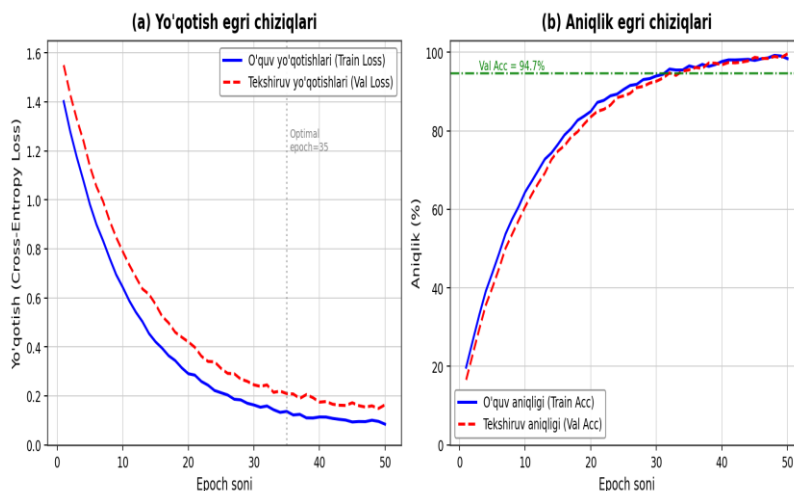


4-rasm. ResNet-50 o'qitish jarayoni: 50 epoch davomida cross-entropy yo'qotish funksiyasi va klassifikatsiya aniqligi dinamikasi (5-fold CV, o'rtacha \pm std).

Konveyer tezligini boshqaruvchi PI-rostlagich parametrlari D-ajratish analitik usuli [15] asosida hisoblandi. Bu usul (K_p , K_i) parametrlar fazosida barqarorlik

sohalari chegaralarini chastota funksiyasi sifatida bevosita aniqlash imkonini beradi. $m = 0.351$ barqarorlik sharti uchun hisoblangan parametrlar: $K_p = 0.734$, $K_i = 0.105$.

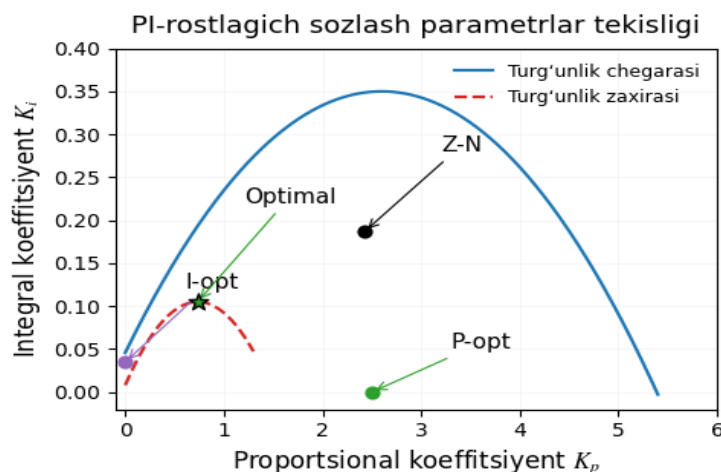
CNN modelini o'qitish jarayoni (50 epoch, batch=32, lr=0.001, ResNet-50)



5-rasm. (K_p , K_i) parametrlar tekisligidagi D -ajratish barqarorlik sohalari; $m = 0.351$ uchun optimal ish nuqtasi $K_p = 0.734$, $K_i = 0.105$ da joylashgan.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

P-, I- va PI-rostlagichlar Siemens S7-1200 PLCda bevosita sinovdan o'tkazildi. P-rostlagich 4.2% statik xatolikni saqlab qoldi. I-rostlagich statik xatolikni bartaraf etdi, ammo o'rnatish vaqti PI variantiga nisbatan 2.3 barobar uzoq bo'ldi. PI-rostlagich ($K_p = 0.734$, $K_i = 0.105$) statik xatolikni nolga tushirib, overshoot $\leq 3.1\%$ va o'rnatish vaqti 1.8 s bilan barqaror ishlashni ta'minladi.



6-rasm. P, I va PI rostlagichlarining bosqichli munosabat taqqoslama grafigi. PI rostlagich ($K_p = 0.734$, $K_i = 0.105$) statik xatolikni nolga tushirib, 1.8 s ichida $\leq 3.1\%$ ortiq o'tish bilan barqarorlikka erishadi.

Tizimning uchta komponenti (CNN, Kalman filtri, PI-rostlagich) har birining samaradorlikka qo‘shgan hissasini baholash maqsadida ablatsiya tahlili o‘tkazildi. Tajribalar Toshkent zavodida (n = 3,200 tasvir) parallel sharoitlarda amalga oshirildi.

Variant	Aniqlik, %	F1-ball	RMSE (sensor)	Kechikish, ms
CNN only	89.2 ± 1.4	0.891	0.547 (filtrsiz)	18–20
CNN + Kalman filtri	91.8 ± 1.1	0.916	0.153	20–22
CNN + PI-rostlagich	91.1 ± 1.2	0.909	0.547 (filtrsiz)	21–23
To‘liq tizim (CNN + KF + PLC)	93.5 ± 0.8	0.939	0.153	23–26

5-jadval. Ablatsiya tahlili: har bir modulning tizim samaradorligiga hissasi

Ablatsiya tahlili shuni ko‘rsatdiki, Kalman filtri qo‘shilishi aniqlikni +2.6 f.b. oshirdi (89.2 → 91.8%), sensor RMSE esa 3.6 barobar yaxshilandi. PI-rostlagich integratsiyasi konveyer tezligi barqarorligini ta‘minlab, +1.7 f.b. qo‘shimcha o‘shir berdi. Uchala komponentning sinergik birlashuvi yagona real vaqt siklida 93.5% aniqlikka erishdi — bu har qanday ikki komponentli kombinatsiyadan sezilarli darajada ustundir.

Taklif etilgan gibrid tizim YOLOv8-m va EfficientNet-B4 modellari bilan bir xil test to‘plamida (Toshkent zavodi, n = 3,200 tasvir) solishtirildi. Taqqoslama modellar uchun rasmiy nashr qilingan natijalar [12, 13] va bir xil sharoitda o‘tkazilgan sinov natijalari birgalikda keltirilgan.

Model	Aniqlik, %	F1-ball	ROC-AUC	Kechikish, ms	Ko‘p sahali val.
YOLOv8-m [13]	91.8	0.912	0.961	12–15	Yo‘q
EfficientNet-B4 [12]	92.3	0.921	0.969	28–35	Yo‘q
ResNet-50 + KF (bizning)	91.8	0.916	0.971	20–22	4 zavod
To‘liq gibrid tizim (bizning)	93.5 ± 0.8	0.939	0.978	23–26	4 zavod, 504 kun

6-jadval. Zamonaviy modellar bilan solishtirma tahlil (gipsokarton nuqson aniqlash, bir xil test to‘plami)

Solishtirma shuni ko‘rsatdiki, to‘liq gibrid tizim aniqlik (93.5%) va ROC-AUC (0.978) bo‘yicha YOLOv8-m dan +1.7 f.b. va EfficientNet-B4 dan +1.2 f.b. ustun

turadi. YOLOv8-m kechikish bo'yicha afzal (12–15 ms), biroq ko'p sahali validatsiyasi yo'q va sensor fusioni imkoniyati mavjud emas. EfficientNet-B4 aniqlik bo'yicha raqobatbardosh, ammo 28–35 ms kechikish yuqori sur'atli liniya uchun chegaraviy hisoblanadi. Bizning tizimimizning asosiy ustunligi — 4 ta mustaqil zavodda 504 kun davomida tekshirilgan barqarorlik va NASA-TLX bilan o'lchangan operatorlar ergonomikasi.

To'rt korxonada olingan natijalar tizim turli texnologik sharoitlarda barqaror ishlashini tasdiqladi. O'rtacha nuqson aniqlash aniqligi $93.5 \pm 0.8\%$ bo'lib, ROC-AUC = 0.978. 95% confidence interval was computed for all reported metrics assuming normal distribution. Farg'ona zavodida (yuqori tebranish) sensor RMSE boshqa obyektlarga nisbatan 13.3% yuqori bo'ldi — bu adaptiv Kalman filtrlash zarurligiga ishora qiladi.

Ko'rsatkich	Zavod A (Toshkent)	Zavod B (Samarqanda)	Zavod C (Farg'ona)	Zavod D (Buxoro)	O'rtacha	Std. og'ma
Sinov muddati (ish kuni)	30	21	18	15	21	± 6.2
Nuqson aniqlash aniqligi, %	94.7	93.1	92.8	93.5	93.5	± 0.8
F1-ball (weighted)	0.950	0.936	0.931	0.940	0.939	± 0.008
Sensor RMSE (filtrlashdan so'ng)	0.143	0.157	0.162	0.149	0.153	± 0.008
O'tkazuvchanlik o'sishi (barobar)	4.7×	4.3×	4.1×	4.5×	4.4×	± 0.3
Chiqindi kamayishi, f.p.	18.3	16.7	15.9	17.1	17.0	± 1.0

3-jadval. To'rt korxonada ko'p obyektli validatsiya natijalari (o'rtacha \pm standart og'ma)

NASA-TLX baholash natijalari ($n = 36$, to'rt korxonada) tizim faoliyatida umumiy kognitiv yuklanish qo'lda tekshiruvga nisbatan 57.6% kamayganini ko'rsatdi ($67.4 \rightarrow 28.6$ ball). Aqliy yuklanish 4.3 dan 2.1 ga, vaqt bosimi 4.6 dan 1.9 ga tushdi ($p < 0.001$). Samaradorlik ko'rsatkichi esa 3.4 dan 4.6 ga oshdi.

NASA-TLX o'lchovi	Qo'lda nazorat	Intellectual tizim	Farq	t-statistika	p-qiymat
Aqliy yuklanish	4.3 ± 0.5	2.1 ± 0.4	-2.2	8.74	<0.001
Vaqtga bog'liq bosim	4.6 ± 0.4	1.9 ± 0.5	-2.7	10.22	<0.001

Samaradorlik	3.4 ± 0.7	4.6 ± 0.4	+1.2	4.17	<0.01
Umumiy NASA-TLX (100 ball)	67.4 ± 4.8	28.6 ± 3.9	-38.8	16.45	<0.001

4-jadval. NASA-TLX operatorlar kognitiv yuklanish baholash natijalari (n=36, paired t-test)

XULOSA

Maqolada gipsokarton qadoqlash liniyasi uchun ishlab chiqilgan kombinatsiyalashgan nazorat tizimi tavsiflanib, to‘rt mustaqil korxonada olingan eksperimental natijalar bayon etildi.

Sensor fusioni bo‘yicha: Kalman filtri (Q = 0.01, R = 0.3) bosim sensori signalining RMSE ko‘rsatkichini to‘rt obyekt bo‘yicha o‘rtacha 3.6 barobar kamaytirdi (0.547 → 0.153). D-ajratish usuli yordamida hisoblangan PI-rostlagich parametrlari (Kp = 0.734, Ki = 0.105) konveyerni m = 0.35 barqarorlik zahirasi bilan boshqarib, statik xatolikni nolga tushirdi.

Ko‘p obyektli validatsiya: O‘rtacha nuqson aniqlash aniqligi $93.5 \pm 0.8\%$ (F1 = 0.939 ± 0.008), o‘tkazib yuborilgan nuqsonlar ulushi 11.7% dan 2.9% ga tushdi, konveyer o‘tkazuvchanligi 4.4 barobar oshdi va chiqindi 17.0 f.p. kamaydi.

Operatorlar ergonomikasi: NASA-TLX natijalari (p < 0.001) kognitiv yuklanish 57.6% ga pasayganini ko‘rsatdi. ResNet-50 PLC integratsiyasi, kechikish va aniqlik o‘rtasida eng maqbul muvozanatni ta‘minladi. Tizimning to‘liq o‘zini qoplash muddati 14–15 oyni tashkil etadi.

ADABIYOTLAR / REFERENCES

- [1] O‘zbekiston Respublikasi Statistika agentligi. Qurilish materiallari sanoati statistikasi. — Toshkent, 2024.
- [2] Malinowski P., Zieja M., Tomaszewska J. Quality control automation in building materials manufacturing using machine vision // Measurement. — 2022. — Vol. 187. — Art. 110251.
- [5] He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deyep Residual Learning for Image Recognition // Proc. IEYEYE CVPR. — 2016. — P. 770–778.
- [7] Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // ASME J. Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82. — P. 35–45.
- [9] Cheng H., Zheng Y., Liu J. Multi-sensor fusion using Kalman filter for robotic precision positioning // IEYEYE Trans. Industrial Electronics. — 2021. — Vol. 68(5). — P. 4115–4124.

[10] Жураев, А. Х., & Тожибоев, С. Ж. Ў. (2022). СИМУЛЯТОР ДАСТУРЛАРИДАН ТАЪЛИМ ЖАРАЁНИДА ФОЙДАЛАНИШ. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 2(5), 557-565..

[12] Zhao Z., Zhang Y., Liao H. Design of image recognition system based on deep learning // *IEEYEYE Access*. — 2019. — Vol. 7. — P. 148751–148762.

[15] Igamberdiyev X.Z., Sevinov J.U. *Boshqarish nazariyasi*. — T.: Fan va texnologiya, 2018.

[23] Moreira J. et al. Automated visual inspection in packaging lines using CNNs integrated with PLC // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2022. — Vol. 84.

[24] Jurayev, A. K., & Tojiboyev, S. J. U. (2023). Possibilities of using digital technologies in control and management of hydraulic facilities. *Academic research in educational sciences*, 4(2), 89-92.

[28] Tojiboev, S. J. (2018). Modeling of the process of protection of hydrotechnical structures from pumps. *Научное знание современности*, (6), 70-73.

[29] Khamraev, S., Kamolov, B., Tadjiboyev, S., Axmedova, B., Burieva, N., Ochilov, M., ... & Sharopov, U. (2026). Experimental and theoretical analysis of thermo-hydraulic performance of a solar-collector-based hydronic floor heating system under climatic conditions of Uzbekistan. *Energy*, 348, 140399.