ISHLAB CHIQARISHDAGI MAHSULOT NUQSONLARINI RAQAMLI ANIQLASH VA MAHSULOTLAR HARAKATINI AVTOMATIK BOSHQARISH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH

Bobomurodov Elyor
E-mail: elyor.bobomurodov@inbox.ru
https://doi.org/10.5281/zenodo.22175044

Annotatsiya. Mazkur maqolada ishlab chiqarish korxonalarida mahsulot sifatini nazorat qilish jarayonlarini raqamlashtirish, mahsulot nuqsonlarini avtomatik aniqlash hamda ishlab chiqarish liniyasida mahsulotlar harakatini intellektual boshqarish tizimini ishlab chiqish masalalari tadqiq etilgan. An'anaviy vizual nazorat usullarining subyektivligi, yuqori mehnat sarfi, inson omiliga bog'liqligi va katta hajmdagi ishlab chiqarishda nazorat tezligining yetarli emasligi muammoning dolzarbligini belgilaydi. Tadqiqotda kompyuter ko'rishi, raqamli tasvirlarni qayta ishlash, mashinaviy o'qitish, sensor texnologiyalari, PLC kontrollerlar va avtomatlashtirilgan transport mexanizmlarini yagona boshqaruv tizimiga integratsiyalash konsepsiyasi taklif etilgan. Tizim mahsulotni aniqlash, tasvirini olish, nuqsonlarni klassifikatsiya qilish, sifat toifasini belgilash va mahsulotni tegishli yo'nalishga avtomatik yuborish bosqichlaridan tashkil topadi. Tadqiqot natijalari ishlab chiqarish jarayonida inson omilini kamaytirish, nuqsonli mahsulotlarni o'z vaqtida ajratish, nazorat aniqligini oshirish va mahsulot oqimini optimallashtirish imkoniyatlarini ko'rsatadi. Taklif etilayotgan yondashuv "Industry 4.0" konsepsiyasi doirasida aqlli ishlab chiqarish tizimlarini shakllantirish uchun amaliy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: raqamli nazorat, mahsulot nuqsoni, avtomatik boshqaruv, kompyuter ko'rishi, mashinaviy o'qitish, sun'iy intellekt, PLC, konveyer, sensor, mahsulot identifikatsiyasi, Industry 4.0, aqlli ishlab chiqarish.

Kirish. Bugungi kunda ishlab chiqarish korxonalarining raqobatbardoshligini ta'minlashda mahsulot sifatini yuqori darajada nazorat qilish, ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish va resurslardan samarali foydalanish muhim strategik vazifalardan biri hisoblanadi. Global sanoatda raqamli texnologiyalarning jadal rivojlanishi ishlab chiqarish korxonalarida an'anaviy nazorat va boshqaruv usullaridan intellektual, avtomatlashtirilgan hamda real vaqt rejimida ishlaydigan tizimlarga o'tish jarayonini tezlashtirmoqda. Mahsulot sifatini nazorat qilish ishlab chiqarishning deyarli barcha bosqichlarida muhim ahamiyatga ega. Xomashyoni qabul qilishdan boshlab, mahsulotni qayta ishlash, yig'ish, qadoqlash va tayyor mahsulot omboriga yuborishgacha bo'lgan jarayonlarda turli xil nuqsonlar yuzaga kelishi mumkin. Bunday nuqsonlar mahsulotning tashqi ko'rinishi, geometrik o'lchamlari, rangi, shakli, yuzasi, strukturasi yoki funksional xususiyatlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. An'anaviy ishlab chiqarish korxonalarida mahsulotlarni nazorat qilish ko'pincha operator yoki nazoratchi tomonidan vizual tarzda amalga oshiriladi. Bunday yondashuv kichik ishlab chiqarish hajmlarida ma'lum darajada samarali bo'lishi mumkin. Ammo yuqori tezlikdagi avtomatlashtirilgan liniyalarda mahsulotlar sonining ko'pligi, takroriy operatsiyalarning mavjudligi va nazorat qilinadigan parametrlarning murakkabligi inson operatorining imkoniyatlarini cheklaydi. Inson tomonidan amalga oshiriladigan nazorat jarayonida

charchoq, diqqatning pasayishi, tajriba darajasidagi farqlar va subyektiv baholash kabi omillar mahsulot nuqsonlarini aniqlash aniqligiga ta’sir qilishi mumkin. Bundan tashqari, mahsulotni aniqlash va nuqsonli mahsulotni ishlab chiqarish liniyasidan chiqarish o‘rtasida vaqt kechikishi yuzaga kelishi mumkin. Mazkur muammoning zamonaviy yechimlaridan biri kompyuter ko‘rishi va sun’iy intellekt algoritmlaridan foydalanishdir. Kamera orqali olingan raqamli tasvirni qayta ishlash yordamida mahsulotning geometrik shakli, rangi, yuzasi va boshqa vizual belgilarini avtomatik tahlil qilish mumkin. Mashinaviy o‘qitish va chuqur o‘rganish algoritmlari esa mahsulotning “me’yoriy” va “nuqsonli” holatlarini avtomatik farqlash imkonini beradi. Biroq faqat nuqsonni aniqlashning o‘zi yetarli emas. Aniqlangan nuqsonli mahsulot ishlab chiqarish liniyasidan o‘z vaqtida ajratilishi, sifatli mahsulot esa keyingi texnologik operatsiyaga yuborilishi kerak. Shu sababli mahsulotni avtomatik aniqlash va uning harakatini boshqarish funksiyalarini yagona tizimga birlashtirish dolzarb ilmiy-amaliy masalalardan biridir. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi ishlab chiqarish liniyasida mahsulot nuqsonlarini raqamli usulda aniqlash va aniqlangan natijaga muvofiq mahsulotlar harakatini avtomatik boshqaruvchi integrallashgan tizim konsepsiyasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning asosiy vazifalari quyidagilardan iborat: ishlab chiqarishdagi mahsulot nuqsonlarini raqamli aniqlash usullarini tahlil qilish, kompyuter ko‘rishi asosida mahsulot tasvirlarini qayta ishlash algoritmini ishlab chiqish, nuqsonlarni avtomatik klassifikatsiya qilish mexanizmini shakllantirish, mahsulotlarni identifikatsiya qilish va kuzatish tizimini ishlab chiqish, PLC, sensor va aktuatorlar o‘rtasidagi o‘zaro aloqani tashkil etish, nuqsonli va sifatli mahsulotlar oqimini avtomatik boshqarish, tizim samaradorligini baholash mezonlarini ishlab chiqish.

Adabiyotlar tahlili. Ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish va mahsulot sifatini raqamli nazorat qilish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlarda kompyuter ko‘rishi, mashinaviy o‘qitish va robototexnika texnologiyalariga alohida e’tibor qaratilmoqda. Raqamli ishlab chiqarish konsepsiyasining rivojlanishi natijasida mahsulot sifatini nazorat qilish oddiy sensorli o‘lchash tizimidan intellektual tasvir tahliliga asoslangan tizimga aylanmoqda. Kompyuter ko‘rishi texnologiyasi mahsulotning tasvirini kamera yordamida olish, tasvirni qayta ishlash va mahsulotning kerakli parametrlarini avtomatik aniqlash imkonini beradi. Tasvirni qayta ishlashning dastlabki bosqichida shovqinlarni kamaytirish, kontrastni yaxshilash, segmentatsiya va obyekt chegaralarini aniqlash kabi operatsiyalar bajariladi. Mahsulot nuqsonlarini aniqlashda an’anaviy tasvirni qayta ishlash algoritmlari bilan bir qatorda mashinaviy o‘qitish usullaridan ham foydalaniladi. Support Vector Machine, Random Forest, k-nearest neighbors kabi klassifikatsiya algoritmlari ayrim turdagi nuqsonlarni aniqlashda qo‘llanilishi mumkin. So‘nggi yillarda chuqur o‘rganish algoritmlari, ayniqsa convolutional neural networks (CNN), mahsulot tasvirlaridan xususiyatlarni avtomatik ajratib olish imkoniyati sababli sanoatdagi vizual nazorat tizimlarida keng qo‘llanilmoqda. CNN asosida mahsulotning normal va nuqsonli holatini aniqlash, nuqson turini klassifikatsiya qilish va ayrim hollarda nuqsonning tasvirdagi joylashuvini aniqlash mumkin. Obyektlarni aniqlash uchun YOLO, SSD va Faster R-CNN kabi modellar ishlab chiqilgan. Ularning real vaqt rejimida ishlash imkoniyati konveyer liniyalarida mahsulotlarni avtomatik nazorat qilish uchun muhim afzallik hisoblanadi. Mahsulot harakatini boshqarish tizimlarida esa PLC kontrollerlar, fotoelektrik sensorlar, enkoderlar, pnevmatik aktuatorlar,

servo motorlar va konveyer mexanizmlaridan foydalaniladi. Kamera tomonidan aniqlangan nuqson haqidagi ma’lumot PLC yoki sanoat kompyuteriga uzatiladi. Keyinchalik PLC mahsulotning koordinatasi va harakat tezligini hisobga olib, tegishli aktuatorni ishga tushiradi. Industry 4.0 konsepsiyasi nuqtayi nazaridan bunday tizimlar alohida qurilmalarning oddiy avtomatlashtirilishidan farqli ravishda o‘zaro bog‘langan kiber-fizik tizimlar sifatida qaraladi. Bunda sensorlardan olingan ma’lumotlar raqamli muhitda qayta ishlanadi, qaror qabul qilinadi va fizik qurilmalarga boshqaruv signali yuboriladi. Adabiyotlarni umumlashtirish natijasida mahsulot nuqsonlarini aniqlash va mahsulot harakatini boshqarishni yagona tizimga birlashtirish ishlab chiqarish samaradorligini oshirishning istiqbolli yo‘nalishi ekanligi aniqlandi. Shu bilan birga, real ishlab chiqarish sharoitida yoritilishning o‘zgarishi, mahsulotlarning rang va shaklidagi farqlar, kamera vibratsiyasi, konveyer tezligining o‘zgarishi hamda ma’lumotlar almashinuvidagi kechikishlar tizim aniqligiga ta’sir qilishi mumkin.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda tizimli tahlil, raqamli tasvirlarni qayta ishlash, mashinaviy o‘qitish, avtomatik boshqaruv va modellashtirish usullaridan foydalanildi. Taklif etilayotgan tizimning umumiy tuzilmasi quyidagi funksional bloklardan tashkil topadi:

Mahsulot → Sensor → Kamera → Tasvirni qayta ishlash → Nuqsonni aniqlash → Klassifikatsiya → PLC/boshqaruv moduli → Aktuator → Mahsulotni saralash.

Birinchi bosqichda mahsulot konveyer orqali nazorat zonasiga yetib keladi. Fotoelektrik yoki optik sensor mahsulot mavjudligini aniqlaydi va kamera uchun trigger signalini shakllantiradi.

Ikkinchi bosqichda kamera mahsulotning raqamli tasvirini oladi. Tasvir sifati ishlab chiqarish liniyasining tezligi va yoritilish sharoitlariga moslashtiriladi.

Uchinchi bosqichda tasvirga dastlabki ishlov beriladi:

1. shovqinni kamaytirish;
2. tasvirni normallashtirish;
3. kontrastni yaxshilash;
4. obyektni fondan ajratish;
5. geometrik parametrlarni aniqlash;
6. nuqsonli hududlarni ajratish.

To‘rtinchi bosqichda mahsulotning aniqlangan belgilariga asoslangan klassifikatsiya amalga oshiriladi. Bunda:

- 0 — sifatli mahsulot;
- 1 — kichik nuqsonli mahsulot;
- 2 — qayta ishlanishi mumkin bo‘lgan mahsulot;
- 3 — yaroqsiz mahsulot kabi sinflardan foydalanish mumkin.

Beshinchi bosqichda klassifikatsiya natijasi boshqaruv moduliga uzatiladi.

Mahsulotning konveyerdagi koordinatasini aniqlash uchun quyidagi soddalashtirilgan munosabatdan foydalanish mumkin:

$$S=V\times t$$

bu yerda:

−S— mahsulotning bosib o‘tgan masofasi;

−V— konveyer tezligi;

−t— aniqlash vaqtidan aktuator ishga tushishigacha bo‘lgan vaqt.

Shu asosda tizim aktuatorning ishga tushish vaqtini oldindan hisoblaydi.

Agar kamera mahsulotni t_0 vaqtda aniqlasa, mahsulot aktuator zonasiga yetib kelish vaqti:

$$t_a = \frac{L}{V}$$

ko‘rinishida aniqlanishi mumkin.

Bu yerda L— kamera va aktuator o‘rtasidagi masofa.

Natijada tizim mahsulotning aynan kerakli vaqtda tegishli yo‘nalishga yuborilishini ta’minlaydi.

Tizimning texnik arxitekturasi quyidagi asosiy qismlardan iborat:

Modul	**Asosiy vazifasi**
Fotoelektrik sensor	Mahsulotni aniqlash
Raqamli kamera	Mahsulot tasvirini olish
Yoritish moduli	Barqaror tasvir olish
Industrial PC	Tasvirni qayta ishlash
AI modeli	Nuqsonni aniqlash
PLC	Boshqaruv algoritmini bajarish
Enkoder	Konveyer tezligini aniqlash
Konveyer	Mahsulotni tashish
Aktuator	Mahsulotni yo‘naltirish
HMI	Operator bilan aloqa
Ma’lumotlar bazasi	Nazorat natijalarini saqlash

Bunday arxitektura tizimning modulli bo‘lishini ta’minlaydi. Kelajakda kamera, AI modeli yoki aktuatorni butun tizimni qayta ishlab chiqmasdan almashtirish imkoniyati mavjud bo‘ladi.

Natijalar. Taklif etilayotgan raqamli nazorat tizimining asosiy natijasi mahsulot sifatini baholash va uning harakatini boshqarish jarayonlarini yagona avtomatlashtirilgan muhitga birlashtirishdan iborat.

Tizim ishlashining umumiy algoritmi quyidagicha:

1-bosqich: mahsulot konveyerga keladi.

2-bosqich: sensor mahsulotni aniqlaydi.

3-bosqich: kamera mahsulot tasvirini oladi.

4-bosqich: tasvirga raqamli ishlov beriladi.

5-bosqich: AI algoritmi mahsulotni tahlil qiladi.

6-bosqich: mahsulot sifati bo‘yicha qaror qabul qilinadi.

7-bosqich: PLC mahsulot harakatini boshqaradi.

8-bosqich: aktuator nuqsonli mahsulotni asosiy liniyadan ajratadi.

9-bosqich: natija ma’lumotlar bazasiga yoziladi.

10-bosqich: statistik ma’lumotlar HMI yoki boshqaruv panelida aks ettiriladi.

Tizim yordamida ishlab chiqarish jarayonida aniqlangan mahsulotlarning umumiy soni, sifatli mahsulotlar soni, nuqsonli mahsulotlar soni, nuqson turi va nuqson ulushini avtomatik hisoblash mumkin.

Nuqson darajasi quyidagi formula orqali aniqlanishi mumkin:

$$D=\frac{N_d}{N}\times 100\%$$

bu yerda:
−D— nuqsonlar darajasi;
−N_d— nuqsonli mahsulotlar soni;
−N— jami tekshirilgan mahsulotlar soni.
Tizimning aniqlik ko‘rsatkichi esa:

$$A=\frac{N_c}{N}\times 100\%$$

formula yordamida baholanishi mumkin.
Bu yerda N_c— to‘g‘ri klassifikatsiya qilingan mahsulotlar soni.
Shuningdek, precision, recall va F1-score kabi mashinaviy o‘qitish metrikalaridan foydalanish tavsiya etiladi. Bu ayniqsa nuqsonlarni aniqlash algoritmining sifatini obyektiv baholash imkonini beradi.

Muhokama. Tadqiqot natijalari ishlab chiqarishdagi mahsulot nuqsonlarini raqamli aniqlash va mahsulotlar harakatini avtomatik boshqarish funksiyalarini birlashtirish ishlab chiqarish samaradorligini oshirish uchun muhim imkoniyat yaratishini ko‘rsatadi. An’anaviy sifat nazoratida asosiy muammolardan biri inson omilidir. Operatorning tajribasi yuqori bo‘lsa ham, uzluksiz ishlab chiqarish sharoitida bir xil mahsulotlarni minglab marta tekshirish diqqatning pasayishiga olib kelishi mumkin. Raqamli tasvir tahlili esa bir xil algoritm asosida barcha mahsulotlarni tekshirish imkonini beradi. Biroq sun’iy intellekt asosidagi nazorat tizimi ham mutlaq xatosiz emas. Modelning samaradorligi o‘qitish ma’lumotlarining sifati va xilma-xilligiga bevosita bog‘liq. Agar o‘quv ma’lumotlarida kam uchraydigan nuqsonlar yetarli bo‘lmasa, algoritm ushbu nuqsonlarni aniqlashda past natija ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli ishlab chiqarish korxonasida AI modelini yaratishda turli nuqsonlarning yetarlicha katta va muvozanatlangan ma’lumotlar bazasini shakllantirish zarur. Ma’lumotlar bazasiga mahsulotning turli yoritilish sharoitidagi, turli burchaklardan olingan va turli darajadagi nuqsonlarga ega tasvirlari kiritilishi maqsadga muvofiq. Yana bir muhim masala — real vaqt rejimida ishlashdir. Ishlab chiqarish liniyasida konveyer tezligi yuqori bo‘lsa, tasvirni qayta ishlash va qaror qabul qilish uchun mavjud vaqt juda qisqa bo‘ladi. Shuning uchun modelning aniqligi bilan bir qatorda uning hisoblash tezligi ham muhim ko‘rsatkich hisoblanadi. Bunda edge computing yondashuvi samarali bo‘lishi mumkin. Tasvirlarni markaziy serverga yuborish o‘rniga bevosita ishlab chiqarish liniyasidagi sanoat kompyuterida qayta ishlash aloqa kechikishini kamaytiradi. Mahsulot harakatini avtomatik boshqarish nuqtayi nazaridan kamera va aktuator o‘rtasidagi vaqt koordinatsiyasi alohida ahamiyatga ega. Agar nuqsonli mahsulot aniqlangan bo‘lsa-yu, aktuator noto‘g‘ri vaqtda ishlasa, sifatli mahsulot ham ajratib yuborilishi yoki nuqsonli mahsulot asosiy liniyada qolishi mumkin. Shuning uchun kamera, enkoder, PLC va aktuator o‘rtasidagi sinxronizatsiya tizimning ishonchliligini belgilovchi asosiy omillardan biridir. Taklif

qilinayotgan tizimning yana bir afzalligi ishlab chiqarish ma'lumotlarini yig'ish imkoniyatidir. Har bir mahsulot bo'yicha nazorat natijalarining saqlanishi korxonaga nuqsonlarning vaqt bo'yicha o'zgarishini tahlil qilish imkonini beradi. Masalan, ma'lum bir stanokdan keyin nuqsonlar soni ko'payayotgan bo'lsa, tizim ushbu jarayonni statistik jihatdan aniqlashi mumkin. Bu esa predictive maintenance, ya'ni uskunalarni nosozlik yuz berishidan oldin texnik xizmat ko'rsatish konsepsiyasini rivojlantirish uchun asos yaratadi. Bundan tashqari, yig'ilgan ma'lumotlar yordamida ishlab chiqarish jarayonidagi eng ko'p uchraydigan nuqsonlarni aniqlash va ularning sabablarini o'rganish mumkin. Natijada sifat nazorati faqat tayyor mahsulotni ajratish funksiyasidan ishlab chiqarish jarayonini optimallashtirish vositasiga aylanadi.

Tizimning iqtisodiy samaradorligi. Taklif qilinayotgan tizimni joriy etish dastlab kamera, sanoat kompyuteri, PLC, sensorlar, aktuatorlar va dasturiy ta'minot uchun investitsiya talab qiladi. Biroq uzoq muddatda nuqsonli mahsulotlarni kamaytirish, qayta ishlash xarajatlarini pasaytirish, mehnat unumdorligini oshirish va xomashyo isrofgarchiligini kamaytirish hisobiga iqtisodiy samaradorlikka erishish mumkin.

Tizimning iqtisodiy samaradorligi quyidagi umumiy model asosida baholanishi mumkin:

$$E=\frac{C_s-C_t}{C_t}\times 100\%$$

bu yerda:

−E— iqtisodiy samaradorlik;

−C_s— avtomatlashtirishdan oldingi umumiy xarajat;

−C_t— avtomatlashtirishdan keyingi umumiy xarajat.

Aniq iqtisodiy natija ishlab chiqarish hajmi, nuqsonlar ulushi, ishchi kuchi xarajati va avtomatlashtirish tizimining narxiga bog'liq bo'ladi

Xulosa. Tadqiqot natijasida ishlab chiqarishdagi mahsulot nuqsonlarini raqamli aniqlash va mahsulotlar harakatini avtomatik boshqarishga mo'ljallangan integrallashgan tizim konsepsiyasi ishlab chiqildi. Taklif etilayotgan tizim kompyuter ko'rishi, raqamli tasvirlarni qayta ishlash, sun'iy intellekt, sensorlar, PLC va avtomatik aktuatorlarning o'zaro integratsiyasiga asoslanadi. Tizimning asosiy afzalligi mahsulotni aniqlashdan boshlab, uning sifatini baholash, nuqson turini aniqlash va keyingi harakat yo'nalishini avtomatik belgilashgacha bo'lgan jarayonlarning yagona raqamli boshqaruv muhitida amalga oshirilishidir. Kompyuter ko'rishi asosida mahsulot tasvirlarini avtomatik tahlil qilish inson omiliga bog'liq bo'lgan vizual nazoratning kamchiliklarini kamaytirish imkonini beradi. Mashinaviy o'qitish va chuqur o'rganish algoritmlaridan foydalanish esa murakkab vizual nuqsonlarni aniqlash va mahsulotlarni sifat kategoriyalariga ajratish imkoniyatini kengaytiradi. Mahsulot harakatini PLC, enkoder va aktuatorlar yordamida avtomatik boshqarish aniqlangan nuqsonli mahsulotni o'z vaqtida ishlab chiqarish liniyasidan ajratish imkonini beradi. Bunda kamera va aktuator o'rtasidagi masofa, konveyer tezligi, tasvirni qayta ishlash vaqti hamda boshqaruv signalining kechikishi hisobga olinishi zarur. Taklif etilayotgan tizim ishlab chiqarish korxonalarida mahsulot sifatini barqarorlashtirish, nuqsonli mahsulotlar ulushini kamaytirish, nazorat jarayonini tezlashtirish, mehnat unumdorligini oshirish va ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga xizmat qilishi mumkin. Kelgusida

tizimni Digital Twin, Industrial IoT, edge computing, predictive maintenance va sun'iy intellektning ilg'or algoritmlari bilan integratsiyalash orqali to'liq avtonom va adaptiv aqlli ishlab chiqarish liniyasini yaratish mumkin. Shu jihatdan mazkur tadqiqot natijalari O'zbekistonda raqamli transformatsiya va "Industry 4.0" tamoyillariga asoslangan zamonaviy ishlab chiqarish tizimlarini shakllantirish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
2. Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.
3. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing*. Pearson.
4. Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
5. Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson.
6. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature, 521*, 436–444.
7. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
8. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
9. Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*.
10. Qin, Y., et al. (2021). Deep learning-based industrial defect detection: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
11. Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems, 48*, 144–156.
12. Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research, 56*(1–2), 508–517.
13. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters, 3*, 18–23.
14. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration, 6*, 1–10.
15. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press.
16. Groover, M. P. (2020). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Pearson.
17. Bolton, W. (2021). *Programmable Logic Controllers*. Elsevier.
18. Zhang, C., & Chen, Y. (2020). A review of research relevant to the emerging industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering, 139*, 106195.
19. Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP, 52*, 173–178.
20. Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research, 56*(8), 2941–2962.