INSON VA KOLLABORATIV ROBOT (HRC) O‘RTASIDAGI HAMKORLIGIGA ASOSLANGAN YIG‘ISHNING DASTLABKI BOSQICHIDA SIFAT VA YIG‘ISH VAQTI NUQTAYI NAZARIDAN TAQQOSLASH

Jasurxo‘ja Xolxo‘jayev[1], Fazluddin Xusnuddinov[2], Ikrom Kambarov[3], Jamshid Inoyatxodjayev[4]

[1,2,3,4] Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti, Mashinasozlik texnologiyasi va aviakosmik muhandisligi kafedrasi

https://doi.org/10.5281/zenodo.15041049

Anotatsiya. *Ushbu maqola inson va kollaborativ robot (HRC) hamkorligiga asoslangan yig‘ish jarayonining dastlabki bosqichida vaqt va sifat ko‘rsatkichlarini o‘rganishda qilingan tajribalar yoritilgan. Sanoat 4.0 va 5.0 konsepsiyalari doirasida kobotlar (kollaborativ robotlar) takrorlanuvchi, bir xil turdagi yig‘ish vazifalarini kechayu-kunduz, xato qilish darajasi juda past va xavfisiz bajarishi mumkinligi sababli, ishlab chiqarish jarayonida sezilarli samaradorlik va moslashuvchanlik taqdim etadi. Maqolada LEGO Mindstorm detallaridan foydalanib, besh xil murakkablik darajasiga ega bo‘lgan yig‘ish amaliyotlari o‘tkazildi. Har bir darajaga mos detallar soni, ulardagi qismlarning murakkablik ko‘rsatkichlari, bog‘lanishlar va topologik murakkablik hisoblandi.*

Tajriba natijalari shuni ko‘rsatadiki, yig‘ish jarayonining vaqt talabligi yig‘ish murakkabligiga super-chiziqli bog‘liq holda ortadi: murakkablik darajasi oshgani sayin, jarayon uzoqroq vaqt va ko‘proq e’tibor talab qiladi. Shuningdek, jarayonda yo‘l qo‘yiladigan xatolar soni ham murakkablikka nisbatan oshib boradi va bunday xatolar paydo bo‘lishi chiziqli emas, balki murakkabroq (non-linear) ko‘rinishga ega. Turli xildagi elektronik va mexatronik mahsulotlarni tez-tez o‘zgartirib ishlab chiqarish zarur bo‘lgan sharoitlarda dolzarb bo‘lgan vaqt va sifat samaradorligini oshirish imkoniyatini mazkur natijalar orqali anglash mumkin.

Kelgusida ushbu tajribalar uch xil ko‘rinishda — inson tomonidan mustaqil, inson va kobot hamkorligida hamda inson, kobot va kamera (sun’iy intellekt) birgalikda, ya’nada ham kengaytirilishi rejalashtirilgan. Ushbu yondashuv ishlab chiqarish jarayonidagi xatolarni minimallashtirish, xavfsizlikni oshirish va mablag‘ni tejash imkonini berishi mumkin.

Kalit so‘zlar: *Sanoat 4.0/5.0, Sun’iy intellekt, kollaborativ robot (HRC) , mexatronik tizim, raqamli egizak*

Abstract. *This article describes experiments conducted to study the time and quality indicators in the initial stage of the assembly process based on human-collaborative robot (HRC) cooperation. Within the framework of the concepts of Industry 4.0 and 5.0, cobots (collaborative robots) offer significant efficiency and flexibility in the production process, as they can perform repetitive, identical assembly tasks around the clock, with a very low error rate and without risk. In the article, assembly operations with five different levels of complexity were carried out using LEGO Mindstorm parts. The number of parts corresponding to each level, the complexity indicators of the parts in them, connections and topological complexity were calculated.*

The experimental results show that the time requirement of the assembly process increases in a super-linear relationship with the complexity of the assembly: as the complexity level increases, the process requires longer time and more attention. Also, the number of errors in the process increases with complexity, and the occurrence of such errors is not linear, but rather non-linear. These results can be used to understand the possibility of increasing time and quality efficiency, which is relevant in conditions where it is necessary to produce various electronic and mechatronic products with frequent changes.

In the future, it is planned to expand these experiments in three different ways - independently by a human, in cooperation with a human and a cobot, and in combination with a human, a cobot and a camera (artificial intelligence). This approach can minimize errors in the production process, increase safety and save money.

***Keywords**: Industry 4.0/5.0, Artificial intelligence, collaborative robot (HRC), mechatronic system, digital twin*

***Абстракт.** В данной статье описываются эксперименты, проведенные для изучения показателей времени и качества на начальном этапе процесса сборки на основе взаимодействия человека и коллаборативного робота (HRC). В рамках концепций Индустрии 4.0 и 5.0 коботы (коллаборативные роботы) предлагают значительную эффективность и гибкость в производственном процессе, поскольку они могут выполнять повторяющиеся, идентичные задачи по сборке круглосуточно, с очень низким уровнем ошибок и без риска. В статье были выполнены сборочные операции с пятью различными уровнями сложности с использованием деталей LEGO Mindstorm. Рассчитано количество деталей, соответствующих каждому уровню, показатели сложности деталей в них, соединения и топологическая сложность. Результаты эксперимента показывают, что временные требования процесса сборки увеличиваются в сверхлинейной зависимости от сложности сборки: с ростом уровня сложности процесс требует больше времени и больше внимания. Также количество ошибок в процессе увеличивается с ростом сложности, и возникновение таких ошибок носит не линейный, а скорее нелинейный характер. Эти результаты могут быть использованы для понимания возможности повышения эффективности времени и качества, что актуально в условиях, когда необходимо производить различные электронные и мехатронные изделия с частыми изменениями.*

В дальнейшем планируется расширить эти эксперименты тремя различными способами - самостоятельно человеком, в сотрудничестве с человеком и коботом, а также в сочетании с человеком, коботом и камерой (искусственный интеллект). Такой подход позволяет минимизировать ошибки в процессе производства, повысить безопасность и сэкономить деньги.

***Ключевые слова:** Индустрия 4.0/5.0, Искусственный интеллект, коллаборативный робот (HRC), мехатронная система, цифровой двойник*

1. Kirish Inson va kollaborativ robot (HRC) o‘rtasidagi hamkorligi Sanoat 4.0 va Sanoat 5.0ning asosiy fundament elementlaridan biri bo‘lgan holda raqamli texnologiyalarni ishlab chiqarish jarayoniga integratsiyalashga qaratilgan yo‘nalishlaridan biridir [1]. Hozirgi zamonda ushbu yangi sanoat paradigmalari ishlab chiqarish jarayoniga tezda moslashuvchanlik va tezkor ishlab chiqarish talabini ilgari surmoqda. Bugungi kunda shiddat bilan rivojlayotgan bozorda qisqa muddat ichida turli xil mahsulotlarni ishlab chiqarishga talab ortib bormoqda. Bu mijozlarning

o‘zi uchun individual hohish istaklarining talabi ortishi bilan bog‘liq bo‘lib, bu bir turdagi mahsulotlarning turli xil toifa va variantlari sonini ko‘payishiga olib keladi [2]. Bu jarayon ommaviy moslashtirish deb atalgan holda, ushbu yondashuv orqali mijozlarning o‘ziga xos ehtiyojlari, afzalliklari va talablariga tez va tejamkorlik bilan moslasha oladigan moslashuvchan ishlab chiqarish jarayonlaridan foydalanishni o‘z ichiga oladi [3]. Kolloborativ robotlar ushbu ehtiyojlarga juda mos keladi. Chunki ular keng ko‘lamli vazifalarni bajarish uchun osongina dasturlash taminotiga ega holda va shu bilan bir qatorda qayta konfiguratsiyasi qilish imkoniyatiga ega. Kollaborativ robotning bu parametrlari umumiy samaradorlik va mahsuldorlikni oshirish afzalliklarini beradi. Bundan tashqari, kobot robotlar ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish va mahsulot sifatini yaxshilash uchun ishlatilishi mumkin bo‘lgan ma’lumotlarni real vaqtda boshqaruv bo‘limiga taqdim etishi mumkin. Real vaqtda ma’lumotlarni to‘plash qobiliyati kolloborativ robotlarni butun ishlab chiqarish tizimining raqamli egizakiga integratsiyalash imkonini beradi[4], bu ishlab chiqarish jarayonlarini doimiy monitoring qilish va mashina diagnostikasi uchun zarurdir.

2. Tadqiqot Metodologiyasi

2.1. Ma’lumotlar to‘plami Ishlab chiqarilishi kerak bo‘lgan mahsulot turi, xususan, uni yig‘ishning murakkabligi ishlab chiqarish jarayonida kuzatilishi kerak bo‘lgan faktorlardan biri hisoblanadi va operator yig‘ish jarayonidagi samaradorligiga ta’sir ko‘rsatadi [5]. Strukturaviy murakkablik paradigmasidan foydalanilgan holda, har bir mahsulot yig‘ilishi jarayoniga murakkablik darajasi berildi [5]. Ushbu tuzilmaviy murakkablik paradigmasi dastlab qo‘lda yig‘ish jarayoni uchun mo‘ljallangan, keyinchalik inson-robot (HRC) yig‘ish jarayonlariga bir nechta tuzatishlar bilan qo‘llanilishi mumkin, bu erda kobot asosan tashkiliy va logistika vazifalarini bajaradi, masalan, ma’lum bir tartibda yig‘iladigan komponentlarni tanlash va ularni operatorlari yetkazib berish vazifasini bajaradi.

Verna et al. [5] ga ko‘ra, yig‘ishning murakkabligi C bilan aniqlanadi:

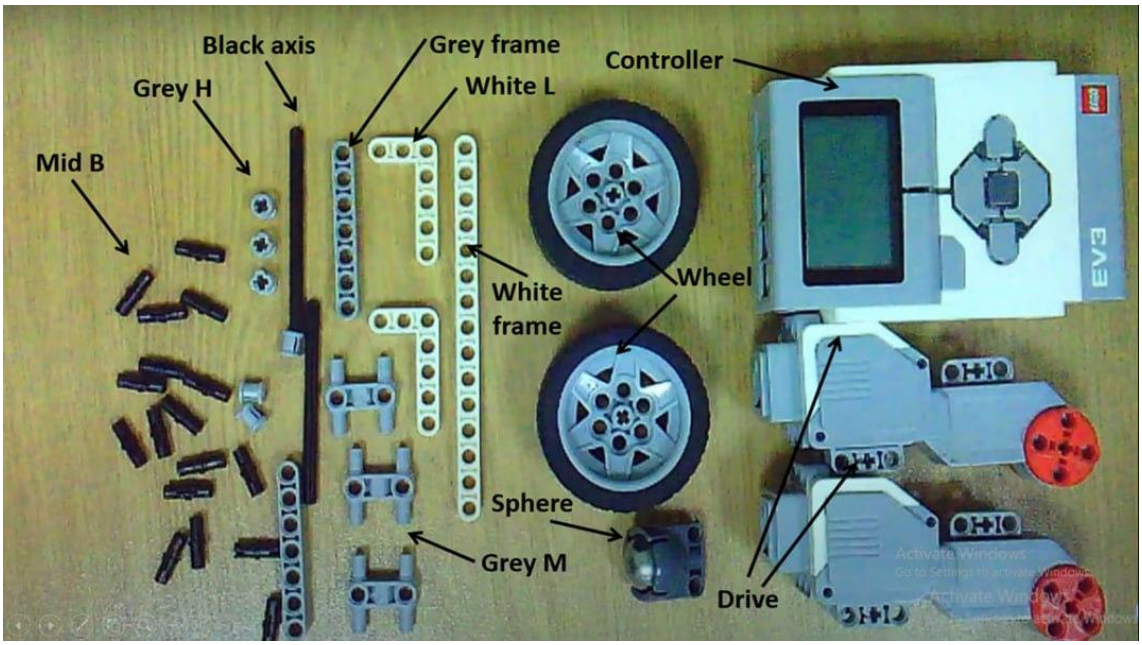
$$C = C_1 + C_2 * C_3$$

bu yerda C_1 , C_2 va C_3 mos ravishda qismlarni, ulanishlarni va topologik murakkablikni ifodalaydi.

2.2. Model arxitekturasi Alohida holatlarda mahsulot qismlarini boshqarish va ular bilan o‘zaro ta’sir qilishning texnologik muammosi qismlarning murakkabligi yig‘indisi bilan ifodalanadi, ya’ni C_1. Yig‘ish jarayoni uchun dizayn (YJUD) metodologiyasi qismlarning murakkabligini baholash va normallashtirilgan ishlov berish indeksini olish uchun ishlatiladi [6]. Ushbu qiymatni yaratish uchun o‘lcham, vazn, ishlov berish qiyinchiliklari va orientatsiyaning jismoniy xususiyatlari (alfa va beta simmetriya) ishlatiladi. Mahsulot tarkibida topilgan juft bog‘lanishlar murakkabliklari yig‘indisi bog‘lanishlarning murakkabligi, ya’ni C_2. Lukas usuli [7] yordamida hisoblangan normallashtirilgan moslama indeksi ulanishlarning murakkabligini o‘lchash uchun ishlatilishi mumkin. Juftlash qiyinligiga ta’sir etuvchi jismoniy xususiyatlarni (masalan, qismlarni joylashtirish, qismlarni biriktirish, juftlash yo‘nalishi, ko‘rinish, tekislash va joylashtirishga qarshilik) jazolash orqali moslama indeksi yig‘ilishni ulashning qiyinligini taxmin qiladi. Tizim topologiyasi markazlashgan arxitekturadan taqsimlangan arxitekturaga o‘tgan sari mahsulotning qo‘shnilik matritsasidagi yagona qiymatlarning o‘rtachasi, ya’ni tayyor mahsulot arxitektura qolipining topologik murakkabligini o‘lchaydigan C_3 ortadi. Yig‘ishning murakkabligini aniqlashning ushbu usuli keng ko‘lamli yig‘ish murakkabligini o‘z ichiga olgan

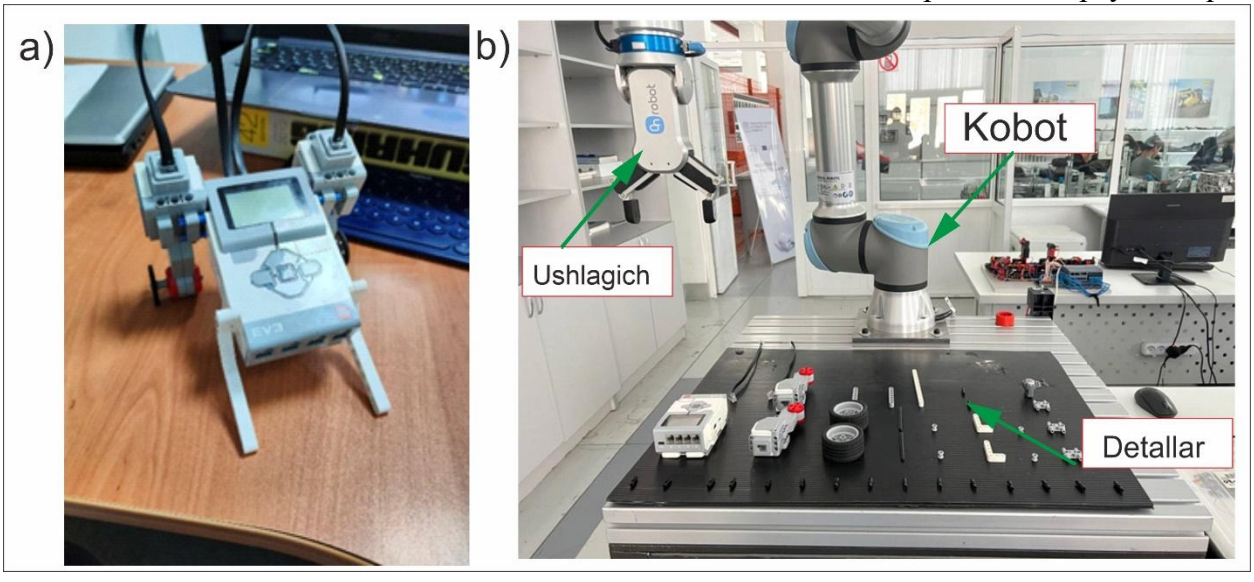
mahsulotlarni tanlashga harakat qilib, amaliy tadqiqotlar uchun eng mos elektron taxtalarni aniqlash uchun ishlatilgan.

2.3. Eksperiment shartlari Ushbu tadqiqotda davomida Lego Mindstrom boshlang‘ich to‘plamlari (LEGO®) yordamida qiyinlik darajasi besh xil bo‘lgan detallar to‘plami (Level 1 – Level 5) yig‘ildi. Tajriba davomda lego detallarini yig‘ish jarayoni amalga oshirildi, chunki to‘plamlarning tarkibiy qismlari turli darajadagi murakkablikdagi moslashtirilgan mahsulotlarni yaratish uchun ishlatilishi mumkin. Bundan tashqari, ushbu detallar yig‘ilganidan so‘ng real vaqt rejimida unga dasturiy ta’monotni yuklagan holda, yig‘ish jarayonini to‘g‘ri yoki noto‘g‘ri ekanligini tekshirish imkonini beradi. Tanlangan boshlang‘ich to‘plami mikrokontrollerni va komponentlarni (masalan, simlar, tugmalar, motor va boshqalar) o‘z ichiga oladi (Rasm 1).



Rasm 1 - Lego Mindstorm detallari

Mikrokontrollerda maxsus portlar bo‘lib, ularga sim ulagichlar orqali kerakli sensorlar va motor yuritgichlar ulanadi bu esa payvandlash zaruriyatini yo‘q qiladi. Haqiqatan ham, Lego Mindstrom mikrokontrollerini "choksiz" deb ta’riflanadi, chunki komponentlarni payvand qilish



shart emas, balki oddiygina teshiklarga kiritish kerak, 2(a)-rasmda yig‘ilgan Lego Detallari namunasi ko‘rsatilgan (Level-4).

3. Natijalar va Tahlil Har bir tanlangan 5ta qiyinlik darajadagi yeg‘ish jarayonida, Lego mikrokontroliga turli xil komponentlar ulangan, bu esa yuqorida aytib o‘tilganidek [8], yig‘ish murakkabligining keng diapazonini qamrab olish uchun.

Rasm 2 - Kobot va LegoMindstorm detallariga mo`ljallangan

Har biri yeg‘ish jarayonida ishlatish uchun kerak bo‘lgan komponentlar turi va soni jadval 1-da keltirilgan. Murakkablik yuqorida qayd etib o‘tilgan Sinha topish mezonlar asosida hisoblandi.

Jadval 1 - Yig‘ish jarayonlarida ishlatilgan detallar

Qiyinlik Daraja	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Yeg'ish jarayonida ishlatilgan detallar	Controller Drive blueC1 blueC2 greyH connB Wheel Small greyAxis	Controller Drive1 Drive2 blueC1 blueC2 blueC3 blueC4 greyH1 greyH2 connB1 connB2 WheelS1 WheelS2 greyAxis1 greyAxis2	Controller Wheel Drive Rectangle yellowC1 yellowC2 blackF1 blackF2 blackC1 blackC2 blackC3 blackC4 blackAxis greyC1 greyC2 connB	Controller Drive1 Drive2 blueC1 blueC2 blueC3 blueC4 greyH1 greyH2 connB1 connB2 rightA1 rightA2 midB1 midB2 midB3 midB4 WheelS1 WheelS2 greyAxis1 greyAxis2	Controller Drive1 Drive2 blueC1 blueC2 blueC3 blueC4 greyH1 greyH2 greyH3 greyH4 greyH5 greyH6 connB1 connB2 GreyM1 GreyM2 GreyM3 WheelS1 WheelS2 BlackAxis1 BlackAxis2 WhiteL1 WhiteL2 Sphere1 WhiteF1

					GreyF1 GreyF2
Detallar soni	8	15	16	21	28
$C1$	1.54	2.84	3.26	4.38	9.74
$C2$	0.196	4.26	5.44	6.87	9.83
$C3$	1.0225	1.06	1.145	1.09	0.9038
C	1.74041	7.3556	9.4888	11.8683	18.624354

Bu tadqiqotning maqsadi elektron jihozlardan tashkil topgan elektron detallarni yig‘ish murakkabligiga nisbatan yig‘ish vaqtini va jarayon xatolarining trendini o‘rganish edi. Kobot robotini yig‘ish jarayonlarida tatbiq qilish orqali, ular operatorlar bilan birga takrorlanuvchi vazifalarni to‘xtovsiz yoki charchashsiz bajarishga qodirligi sababli, ishlab chiqarish jarayonining samaradorligini oshiradi. Ular xavfsiz ish muhitini yaratishga yordam beradi, chunki ular ishchilarni xavf soluvchi xavfli vazifalarni o‘zlari mustaqil bajarishga qodirdir. Ushbu tajriba orqali robot bilan hamkorlikda yig‘ishning murakkabligining yig‘ish vaqtiga va jarayon xatolariga ta’sirini tekshirildi.

Xulosa. Tajriba amaliyoti davomia 5ta qiyinlik darajasi bo‘lgan detal yeg‘imlarni robot bilan yig‘ish jarayoni ishlari olib borildi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, Lego detallarni yeg‘ish uchun talab qilinadigan vaqt uning yig’ish murakkabligi bilan super-linear aloqaga ega. Yig‘ish murakkabligi oshgan sari jarayondagi xatolar ko‘proq yuzaga keldi, va bu aloqa non-linear shaklga ega.

Kelgusida bu tajribalarni 3 qismdan tashkil qilgan holda qayta tashkillashtirish reja qilindi. Birinchi holatda insonning o‘zi (operator) mustaqil ya’ni barcha yig‘ish jarayonida operatorning o‘zi qatnashadi, ikkinchi holatda operator va kobot robot hamkolikda birga bajaradi va uchinchi holatda operator, robot va kamera hamkorlikda yig‘ish jarayoni o‘tkazish reja qilingan. 3-holatdagi amaliyot uchun qo’shimcha suniy idrok (AI) ishlatish reja qilingan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. [1]J. Lindström *et al.*, “Towards intelligent and sustainable production systems with a zero-defect manufacturing approach in an Industry4.0 context,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 880–885, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2019.03.218.
2. [2]M. M. Van den Broeke, R. N. Boute, and J. A. Van Mieghem, “Platform flexibility strategies: R&D investment versus production customization tradeoff,” *Eur J Oper Res*, vol. 270, no. 2, pp. 475–486, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2018.03.032.
3. [3]H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi, “Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control over Mobile Networks: Application of Remote Surgery,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20235–20336, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2897018.
4. [4]E. Verna, S. Puttero, G. Genta, and M. Galetto, “A Novel Diagnostic Tool for Human-Centric Quality Monitoring in Human–Robot Collaboration Manufacturing,” *J Manuf Sci Eng*, vol. 145, no. 12, Sep. 2023, doi: 10.1115/1.4063284.
5. [5]R. Gervasi, M. Capponi, L. Mastrogiacomo, and F. Franceschini, “Manual assembly and Human–Robot Collaboration in repetitive assembly processes: a structured comparison based on human-centered performances,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 126, no. 3, pp. 1213–1231, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11197-4.

6. [6]S. Puttero, E. Verna, G. Genta, and M. Galetto, “Towards the modelling of defect generation in human-robot collaborative assembly,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2023, pp. 247–252. doi: 10.1016/j.procir.2023.06.043.
7. [7]E. Verna, S. Puttero, G. Genta, and M. Galetto, “Toward a concept of digital twin for monitoring assembly and disassembly processes,” *Qual Eng*, pp. 1–18, doi: 10.1080/08982112.2023.2234017.
8. [8]T. Steffen, “Optimierung des Nockenform-Schleifprozesses auf der Basis von Simulation und geometrischer Meßtechnik,” Aachen, 1995.
9. [9]E. Kiraci, P. Franciosa, G. A. Turley, A. Olifent, A. Attridge, and M. A. Williams, “Moving towards in-line metrology: evaluation of a Laser Radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 1–4, pp. 69–78, Jul. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9696-8.
10. [10] F. Zhao, X. Xu, and S. Q. Xie, “Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art,” *Comput Ind*, vol. 60, no. 7, pp. 453–466, Sep. 2009, doi: 10.1016/J.COMPIND.2009.02.002.