JESK J Ergon Soc Korea 2024; 43(1): 41-60
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2024.43.1.41
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

# A Review on Ergonomic Requirements of the Industrial Robots

**Beom Su Kim, Alivia Kirana Hartono Putri, Krishna Sahithi Karur, Geun Ryeong Choi, Sang Ho Kim**

Kumoh National Institute of Technology, Department of Industrial Engineering, Gumi, 39177

# 산업용 로봇에 관한 인간공학적 요구사항 고찰

**김범수, Alivia Kirana Hartono Putri, Krishna Sahithi Karur, 최근령, 김상호**

금오공과대학교 산업공학부

**Corresponding Author**
Sang Ho Kim
Kumoh National Institute of Technology,
Department of Industrial Engineering,
Gumi, 39177
Email : kimsh@kumoh.ac.kr

Received : October 25, 2023
Revised : January 28, 2024
Accepted : February 05, 2024

Copyright@2024 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

**Objective:** This study identifies the critical ergonomic requirements and their hierarchical structures that need to be addressed during the evolution from traditional industrial robots to collaborative robots. It also delves into how the relative importance of each user requirement changes with the evolution of technology.

**Background:** User-centered design is becoming increasingly crucial as technological advancements enable industrial robot systems to perform diverse and complex interactions. Therefore, it is necessary to identify how the characteristics of user needs change as technology advances.

**Method:** We conducted a systematic literature review, selecting 30 articles using the PRISMA method to identify ergonomic requirements. We then mapped the user requirements to quality characteristics and found the frequencies. Subsequently, we carried out Chi-square tests to determine if there were significant differences in the frequency of occurrences for the user requirements over time.

**Results:** The literature review identified 17 user requirements. Our findings revealed that the frequency of quality characteristics mentioned related to usability and enjoyment increases with the advancement of robotics technology. However, all the hypotheses we formulated to show the relationship between the evolving importance of each user requirement and technology maturity were found to be invalid statistically.

**Conclusion:** As the level of collaboration of industrial robots evolves, the importance of user requirements is changing. In the past, factors like functionality, performance, and safety were the primary focus, but as technology advances, user requirements related to usability and enjoyment gain greater importance. Therefore, these attributes should be integrated into the development phase for a user-centered design approach in the future of collaborative robot systems.

**Application:** Our work provides insight to developers into the user requirements that should be considered for effective interactions between humans and collaborative robots. Through this study, we hope to see collaborative robots developed with a direction of improving the user experience and increasing overall user acceptance.

**Keywords:** Collaborative robot, Industrial robot, Ergonomic requirements, QoE, Human-robot interaction

## 1. Introduction

산업혁명은 인간의 삶에 큰 변화를 불러왔다(Muljani and Ellitan, 2019; Ellitan, 2020). Industry 4.0 시대가 도래하면서 인공지능 등 관련 기술의 도움으로 제품 또는 시스템의 지식 기반 행위가 가능해짐에 따라 인간과 유연하고 다양한 방식으로 상호작용하는 신기술이 등장하고 있다(Dragicevic et al., 2019). 이러한 신기술의 개발과 경영전략의 성공 여부는 사용자에게 기존 기술에 비해 차별화된 경험을 제공함으로써 해당 기술을 수용하고 사용하도록 하는 것에 달려 있다(Walsh et al., 2002).

최근 산업 현장에서는 스마트 공장의 구축을 통해 생산성과 효율성을 향상시킬 목적으로 Industry 4.0의 핵심 기술인 디지털화 및 자동화 시스템의 중요성이 강조되고 있다(Tarasov, 2018; Frank et al., 2019; Thames and Schaefer, 2016; Rüßmann et al., 2015; Dalenogare et al., 2018; Črešnar et al., 2023). 일각에서는 Industry 4.0이 완전 자동화된 로봇뿐 아니라 인간과 협업이 가능한 협동 로봇의 활용도 중시한다고 언급한다(Gorecky et al., 2014). 하지만, 해당 기술의 개발과 평가 과정에서는 여전히 사용자 중심의 설계보다는 기술 중심적 관점에서 기능과 성능을 향상하는데 주안을 두고 있다(Heydaryan et al., 2018). 협동 로봇 시스템의 도입 과정에서 새롭고 복잡한 상호작용 방식으로 인해 개발자의 의도와 사용자의 사용 의도 사이에서 괴리가 발생한다면 사용 과정에서 예상치 못한 위협 혹은 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 인간의 특성과 요구사항을 고려하는 인간공학적 원리에 기반하여 사용자 중심 설계가 이루어져야 하지만(Reiman et al., 2021) 협동 로봇 시스템에 관한 국제표준에서도 시스템 중심적이고 기술적인 측면만을 품질의 지표로 산정하고 있는 실정이다(Heo et al., 2023).

기술의 수용성은 사용자 경험과 이를 기반으로 하는 사용자 중심 설계에 크게 의존한다. 그러므로, 협동 로봇과 같은 신기술을 개발하고 도입하는 기업과 연구기관은 사용자 중심의 설계와 평가를 강조해야 한다. 기술에 대한 사용자의 전반적인 만족도를 평가하는 척도로 경험품질(Quality of Experience, QoE)이라는 개념이 언급되고 있다(Brunnström et al., 2013). 경험품질 평가는 사용자들의 요구사항과 기대를 충족시키는 것을 목표로 하며 사용자의 사용성, 만족도 등을 포함한 다양한 요소를 평가하여 기술 개발 단계에서부터 개선점을 찾고 제시할 수 있다.

협동 로봇 시스템의 경험품질을 평가하는 체계를 개발하기 위해서는 사용자 요구사항의 특성을 이해하여야 한다. 사용자 중심 설계 측면에서 사용자의 의견이 반영되어 있는 사용자 요구사항을 수집 및 분석하여 우선순위를 도출하고 이를 토대로 설계하는 과정이 중요하기 때문이다(Shin et al., 2020; Lee and Ham, 2015). 그러나, 기존의 연구에서는 사용자 요구사항의 동적 특성을 반영하지 않고 요구사항 간의 상대적 중요도가 동일하다는 가정하에 품질을 평가한다(Kokotinis et al., 2023). 일반적으로 사용자 요구사항의 중요도는 고정되어 있지 않고 기술 성숙, 경제적 요인 및 사회적 동향에 따라 변화하므로 이러한 특성을 평가지표에 반영하여야 한다(Silberer et al., 2023).

따라서, 본 연구에서는 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 관련 선행연구를 검토하여 사용자 요구사항을 수집하고 빈도 분석을 통해 기술 발전에 따른 사용자 요구사항의 상대적 중요도 변화 및 발현 양상을 확인하고자 한다. 또한, 자동화를 목적으로 발전한 기존 산업용 로봇과 인간과의 유연한 협업을 목적으로 출발한 협동 로봇 간 초기 요구사항 발현 양상에 차이가 있는지를 확인해보고자 한다.

다만, 협동 로봇과 같은 신기술은 아직 대중화된 상태가 아니기 때문에 실사용자를 대상으로 인터뷰나 설문조사와 같은 직접적인 방식의 요구사항 도출은 어려웠다. 이러한 이유로 선행연구와 관련된 문헌검토 결과를 통해 연구를 진행하였으며 기술 개발자의 입장과 대비하여 사용자 관점에서 기술 개발 과정을 고찰하는 인간공학적 접근 방식을 강조하고자 '사용자 요구사항'이라는 용어를 사용하였다.

기술의 성숙 정도에 따른 사용자 요구사항들의 중요도 변화 양상 및 초기 양상 차이를 확인함으로써 현재 또는 미래에 발현할 사용자의 핵심 요구사항에 대한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 이러한 정보는 기업의 개발자, 연구자 및 의사결정자들이 기술 개발 과정에서 기술경영 전략 수립을 위해 활용할 수 있다.

## 2. Background

본 장에서는 산업용 로봇의 발전 및 개발 역사와 사용자 요구사항의 변화를 확인하기 위한 이론적 배경을 설명한다. 산업용 로봇은 극 좌표형 로봇, 원통 좌표형 로봇과 같은 기존 산업용 로봇으로부터 출발하여 다양하고 복잡한 수준의 인간-로봇 협업이 가능한 협동 로봇으로 진화하고 있다. 일반적으로 인간-로봇 협업은 No-Coexistence, Coexistence, Cooperation, Collaboration의 4개 수준으로 분류할 수 있으며(Aaltonen et al., 2018) 인간과 로봇이 각자의 작업 공간에서 어떻게 상호작용하는 지와 관련이 있다(Arents et al., 2021). 본 연구에서는 Figure 1과 같이 인간-로봇 협업 방식의 진화 수준을 분류하였다.

로봇의 개념이 처음 등장한 1960년대부터 2000년대 초까지 제조업 분야에 산업용 로봇이 본격적으로 도입되기 시작했다(Strange and Zucchella, 2017). 당시 산업용 로봇은 효율성 및 생산성 향상을 목표로 단순하고 반복적인 위험한 작업을 수행하도록 프로그래밍 되었다(Wallén, 2008). No-Coexistence 수준에서는 외부 감지 기능이 없고 펜스를 통해 인간과 분리되어 작업을 수행하였다(Thrun, 2004; Malik and Bilberg, 2019). 이 시기에는 주로 로봇이 작업을 더 정확하고 효율적으로 수행할 수 있도록 기능과 성능을 개선하는 데 초점을 두고 있었다(Singh et al., 2013).

2000년대 초, Keller und Knappich Augsburg (KUKA)에서는 Light Weight Robot 3 (LBR 3)을 출시했다. 2005년에는 덴마크 남부대학교 연구진의 노력 끝에 유연하고, 사용자 친화적인 협동 로봇 개발을 목적으로 Universal Robot (UR)이 설립되었다(Universal Robots, 2017). 이후로도 많은 제조사에서 기술적으로 개선된 협동 로봇을 출시했다. 이러한 발전은 협동 로봇의 가용 범위를 넓혔고 인간과 로봇이 같은 작업 공간에서 동시에 다른 작업을 수행하는 Coexistence 수준의 협업이 고려되기 시작했다(Arents et al., 2021; Henrich and Kuhn, 2006). 이 시기에는 No-Coexistence 수준과 달리 인간과 로봇 간의 작업 공간이 공유됨에 따라 로봇 주변의 잠재적 위험으로부터 인간의 안전을 보장하는 데에 중점을 두었다(Murashov et al., 2016).

2010년대 중반, 인공지능과 센서 기술의 발전으로 협동 로봇이 인간과 함께 더욱 안전하고 복잡한 작업을 수행할 수 있게 되었다(Arents and Greitans, 2022). 따라서, 인간과 로봇이 같은 작업 공간에서 같은 목적의 작업을 부분적으로 협업하는 Cooperation 및 전체적으로 협업하는 Collaboration 수준(Arents et al., 2021; Hietanen et al., 2020)까지 도달했다. 실제로 2010년대 중반부터 Cooperation, Collaboration 수준의 연구가 큰 폭으로 증가했으며 2016년 협동 로봇에 적용 가능한 국제표준 ISO/TS 15066도 제정되었다. 이 수준에서는 각자의 목표를 달성하기 위해 로봇과 인간 간의 효율적인 상호작용에 좀 더 초점이 주어졌다(Hietanen et al., 2020).

이러한 맥락에서 협동 로봇의 기술 진보는 Aarron Walter가 제시한 사용자 욕구 위계와 공진화 한다고 볼 수 있다(Heo et al., 2023). UX 디자이너 Aarron Walter는 Maslow의 욕구 위계이론에서 출발하여 인터페이스 디자인 시 고려해야 할 사용자 욕구를 선별하여 위계를 제시했다. 사용자 욕구 위계는 기능성, 신뢰성, 사용성, 즐거움의 4단계로 구성되어 있다. 기능성은 기본적 기능을 통해 사용자가

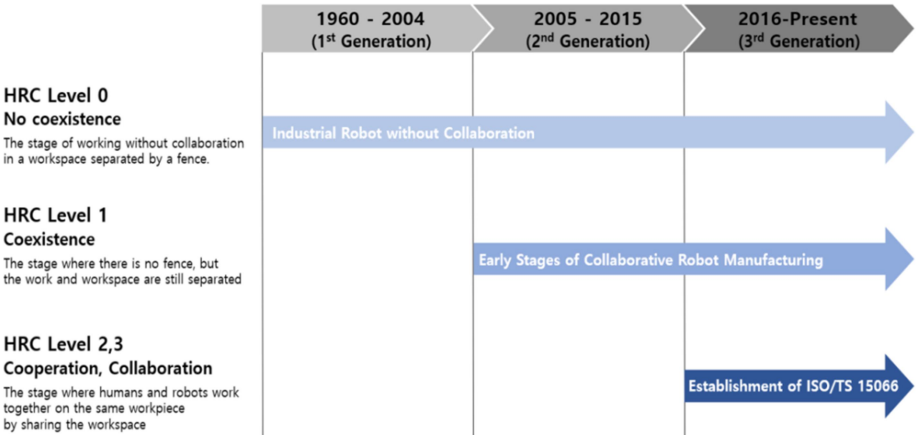


**Figure 1.** Evolutionary stages of human-robot collaboration

원하는 일을 달성하는 것과 관련 있는 위계이다. 신뢰성은 사용 시 결함이나 오류가 없는 것과 같은 위계이다. 사용성은 상호작용과 관련 있는 욕구로 쉽게 사용하고 배우는 것과 관련 있으며 최상위 위계인 즐거움은 사용자의 즐거움, 만족과 같은 감정을 자아내는 것이다(Walter, 2011). 본 연구에서는 사용자 욕구 위계에 기반하여 산업용 로봇의 기술 성숙에 따라 사용자 요구사항의 중요도가 변화할 것으로 보고 이를 확인하고자 하였다.

## 3. Method

### 3.1 Research hypothesis and procedure

본 연구는 사용자 중심 설계 측면에서 설계부터 개선 및 평가까지의 전 과정에서 고려할 수 있는 사용자 요구사항을 관련 선행연구로부터 식별하고 사용자 욕구 위계에 따라 세분화된 품질 특성과 매핑하고자 한다. 그 후 기술 발전과 사용자 요구사항 사이 관계성을 확인하기 위해 매핑된 빈도를 토대로 사용자 요구사항의 중요도 변화 및 발현 양상을 확인하고자 한다. 본 연구에서 기존 산업용 로봇은 Figure 1에서 분류한 HRC 수준에서 인간과 협업이 없는 No-Coexistence 수준의 로봇을 의미하고 협동 로봇은 기존 산업용 로봇에서 발전한 Coexistence, Cooperation, Collaboration 수준과 같이 인간과 협업하는 로봇을 뜻한다. 이와 같은 과정을 거쳐 인간-로봇 협업이 성숙해짐에 따라 사용자 요구사항 역시 기능적인 측면에서 사용성과 같은 높은 수준으로 진화하는 양상을 보일 것으로 가정하였다. 또한, 협동 로봇은 기존 산업용 로봇을 기반으로 일정 수준 발전된 기술이기 때문에 두 기술의 초기 기술 성숙도에 따른 사용자 요구사항 발현 양상의 차이가 있을 것이라 예상하였다. 산업용 로봇의 기술 성숙도에 따른 사용자 요구사항의 변화 및 초기 발현 양상 차이를 파악하고자 아래 2가지 연구가설을 설정하였다.

$H_1$: 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 관련 기술이 진화함에 따라 사용자가 보다 중시하는 요구사항에도 변화가 있을 것이다.
$H_2$: 기존 산업용 로봇과 협동 로봇은 기술 성숙도의 차이로 인해 도입 초기 사용자 요구사항 발현 양상에 차이가 있을 것이다.

기존 산업용 로봇에서 협동 로봇으로의 발전과 함께 나타나는 사용자 요구사항의 변화 양상을 확인하고 연구가설을 검증하기 위한 절차는 다음과 같다. 산업용 로봇의 기술 발전 과정에서 HRC 수준을 한 시점으로 특정하는 것이 불가능하므로 기존 산업용 로봇이 주를 이루던 No-Coexistence 수준의 1960년~2004년까지를 1세대, 본격적으로 여러 제조사에서 협동 로봇이 개발되기 시작하여 Coexistence 수준의 협업이 고려된 2005년~2015년까지를 2세대로 구분하였다. 마지막으로 센서와 인공지능 같은 제반 기술의 발전과 더불어 국제표준의 제정으로 한층 더 발전된 Cooperation, Collaboration 수준의 협업이 가능하게 된 2016년 이후를 3세대로 구분하였다. 그 후 PRISMA 과정을 거쳐 최종 선정된 선행연구들의 출판 연도를 기준으로 해당하는 세대별로 분류하였다. 사용자 요구사항의 변화 양상을 가시적으로 확인하기 위해 사용자 욕구 위계에 따라 요구사항을 수집하였다. 선행연구 내에서 상세한 사용자 요구사항 수집을 위해 국제표준 및 사용성 관련 연구에서 자주 언급되는 품질 특성들을 Aarron Walter의 사용자 욕구 위계를 기반으로 세분화하였다. 마지막으로 선행 연구에서 식별한 요구사항과 품질 특성 간 매핑을 통해 빈도를 측정한 후 가설검정을 수행하였다.

### 3.2 Systematic literature review

산업용 로봇의 인간공학적 요구사항 도출 및 가설검정을 위해 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA)를 활용하여 문헌을 선정하고 체계적 문헌 검토를 진행하였다(Moher et al., 2010). PRISMA는 관련 연구를 식별, 선택, 평가, 검토하는 체계적인 방법론으로 많은 분야에서 문헌 검토를 통해 결과를 도출할 때 주로 사용되고 있다(Pati and Lorusso, 2018; Lee, 2020). 본 연구는 Google Scholar에서 영어로 작성된 문헌으로 한정하여 2023년 5월에 문헌검색을 수행하였다. 검색 키워드는 Table 1과 같은 형식으로 체계화하였으며 검색 키워드들의 위치는 본문 전체를 대상으로 설정하였다.

요구사항 도출을 위해 4개의 키워드 그룹을 구성하였다. 먼저, User Requirements, User Needs, User Reviews, User Opinions와 같이 사용자 요구사항과 관련 있는 키워드 그룹을 구성하였다. 두 번째는 기존 산업용 로봇에서 협동 로봇으로 발전하는 모든 과정에서의 요구사항을 도출하기 위해 Table 1의 Robot technology keyword group과 같이 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 문헌은 각각의 키워드 그룹을 사용하였고 다른 키워드 그룹은 동일하게 설정하였다. 세 번째는 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 분야를 특정하는 Industrial Robot, Industry, Manufacturing과 같은 키워드 그룹을 구성했고 마지막으로 사용자와 관련 키워드인 Worker, Operator로 키워드 그

룹을 구성하여 검색 및 문헌수집을 수행하였다.

**Table 1.** Keywords used for systematic searching

| Keyword group | Keywords |
|---|---|
| User requirements keyword group | "User Requirements" OR "User Needs" OR "User Reviews" OR "User Opinions" |
| Robot technology keyword group | "Cobot" OR "Collaborative Robot" |
| | "Manipulator" OR "Robot Arm" |
| Application field keyword group | "Industrial Robot" OR "Industry" OR "Manufacturing" |
| Technical user keyword group | "Worker" OR "Operator" |

PRISMA는 Figure 2와 같은 흐름으로 진행하였다. 기존 산업용 로봇에서 1,040개, 협동 로봇에서 208개의 문헌이 검색되었고 관련 키워드를 모두 포함하는 중복 문헌 140개를 제외한 1,108개를 검토 대상으로 선정하였다. 제목과 초록을 기준으로 1차 검토를 진행하면서 기존 산업용 로봇, 협동 로봇에 대한 구체적 사용자 요구사항과 관련이 없는 문헌 894개를 제외하고 214개 문헌을 선별하였다. 1차 선별된 문헌에서 도서, 학위 문헌에 해당하는 문헌과 로봇 설계 및 제어 방법론 관련 문헌을 제외하고 남은 최종 30개 문헌에 대해 검토 및 분석을 진행하였다.

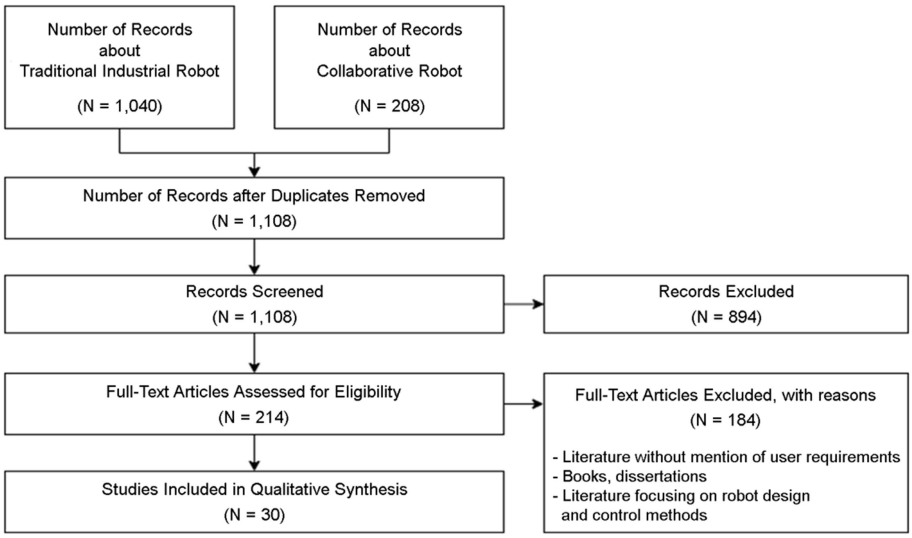


**Figure 2.** PRISMA flow for systematic literature review

## 4. Result

### 4.1 Hierarchy of user needs based on quality characteristics classification

앞서 PRISMA 과정에 의해 최종 선정된 30개의 문헌에서 사용자 요구사항을 도출하기 위해 사용성 평가 관련 선행연구(Hancock et al., 2005; Alonso-Ríos et al., 2009; Preece et al., 2015) 및 ISO 표준(ISO/IEC 25010, 2011)에서의 품질 특성들을 고려하여 Aarron Walter의 사용자 욕구 위계별 정의를 기반으로 세분화하였다.

Hancock은 만족과 같은 사항이 간과되는 이유로 객관적 측정 사양 및 지침의 부족을 원인으로 언급하며 기술과의 상호작용에서 즐거움과 만족의 증진을 위해 쾌락적 욕구 위계를 제시했다. 이는 Maslow의 욕구 위계이론을 기반으로 하며 안전성, 기능성, 유용성의 위계를 충족시킨 후 최종적인 만족은 개인화를 통해 달성된다고 언급하고 있다.

Alonso-Ríos는 사용성의 개념이 모호하고 연구자마다 사용하는 용어의 합의가 이루어지지 않은 점을 지적하고 있다. 이러한 문제의식 하에 사용성에 관한 여러 선행연구와 표준에서 고려한 속성에서 중복, 혼용되는 속성들을 파악하고 새로운 속성을 추가하는 과정을 진행했다. 최종적으로 6가지 속성 및 하위속성들을 도출하고 각 속성에 대한 명확한 정의를 제시하고 있다.

Preece는 사용자 관점에서 대화형 제품의 학습이 쉽고 효과적이며 즐길 수 있도록 함과 동시에 제품과의 상호작용을 최적화하는 것을 사용성으로 정의하고 있다. 구체적으로 사용성의 목표가 6가지로 나누어진다고 주장하고 있다.

ISO/IEC 25010은 사용자 요구사항을 충족하는 데 중점을 둔 기존 ISO/IEC 9126의 발전된 표준이다. 제시하는 품질 특성은 8개의 주 특성인 기능성, 신뢰성, 사용성, 호환성, 효율성, 보안성, 유지 보수성, 이식성으로 구성되어 있고 각 주 특성마다 구체적 평가를 위한 부 특성들로 구성되어 있다. 상기 검토한 품질 특성들을 사용자 욕구 위계를 기반으로 세분화한 결과 및 정의는 Table 2와 같다.

**Table 2.** Classification of quality characteristics based on the hierarchy of user needs

| Hierarchy of user needs | Quality characteristic | Definition | Reference |
|---|---|---|---|
| Pleasurable | Individuation | The extent to which people can tailor their tools to enhance the pleasure and effectiveness of their personal interactions that varies among individuals. | Hancock et al., 2005<br>Alonso-Ríos et al., 2009 |
| | Subjective satisfaction | The system's ability to attract and maintain the user's attention, as well as the degree to which users find the system satisfying in terms of sensory experiences. | Hancock et al., 2005<br>Alonso-Ríos et al., 2009<br>ISO/IEC 25010, 2011 |
| Usable | Ease of use | The degree to which the system is clear and easy to use | Hancock et al., 2005<br>Alonso-Ríos et al., 2009 |
| | Efficiency | The system's ability to yield suitable outcomes in exchange for the resources invested. | Alonso-Ríos et al., 2009<br>Preece et al., 2015 |
| | Flexibility | The system's ability to carry out appropriate functions based on the context. | Alonso-Ríos et al., 2009 |
| | Learnability | The extent to which the system is easy to learn to use. | Hancock et al., 2005<br>Alonso-Ríos et al., 2009<br>ISO/IEC 25010, 2011<br>Preece et al., 2015 |
| Reliable | Maturity | The extent to which a system, product, or component fulfills the requirements for reliability during regular operation. | ISO/IEC 25010, 2011 |
| | Robustness | The system's ability to resist errors and adverse conditions. | Alonso-Ríos et al., 2009 |
| | Safety | The ability to mitigate or prevent risks and potential harm resulting from the system's usage. | Hancock et al., 2005<br>Alonso-Ríos et al., 2009<br>ISO/IEC 25010, 2011<br>Preece et al., 2015 |
| Functional | Appropriateness | The extent to which the functions support the user to achieve the defined tasks and objectives. | Hancock et al., 2005<br>ISO/IEC 25010, 2011 |

**Table 2.** Classification of quality characteristics based on the hierarchy of user needs (Continued)

| Hierarchy of user needs | Quality characteristic | Definition | Reference |
|---|---|---|---|
| Functional | Completeness | The extent to which the set of functions encompasses all the designated tasks and user objectives. | Alonso-Ríos et al., 2009<br>ISO/IEC 25010, 2011 |
| | Correctness | The extent to which a product or system delivers accurate results with the required level of precision. | ISO/IEC 25010, 2011 |

## 4.2 Ergonomic user requirements

30개의 문헌에서 실제 기존 산업용 로봇 및 협동 로봇 사용과 관련하여 언급된 사용자 요구사항과 사용성 평가 및 사용자 경험 관련 선행연구에서 도출한 품질 특성을 결부 지은 결과는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Derived ergonomic requirements

| Quality characteristic | User requirement | Reference |
|---|---|---|
| Individuation | Worker adaptability | [17] Tahriri et al., 2015; [19] Dean-Leon et al., 2017, [30] Psarakis et al., 2022 |
| Subjective satisfaction | User friendly interaction | [5] Pires, 2005; [8] Jen et al., 2008; [9] Norberto Pires et al., 2009; [14] Pedersen et al., 2014; [15] Zhou et al., 2014; [17] Tahriri et al., 2015; [20] Bedaka and Lin, 2018; [22] Michalos et al., 2018; [26] Dianatfar et al., 2020; [28] Prati et al., 2021; [29] Reyes-Uquillas and Hsiao, 2021 |
| Ease of use | Sufficient information | [9] Norberto Pires et al., 2009; [12] Sun et al., 2011; [28] Prati et al., 2021 |
| | Straightforward programming | [8] Jen et al., 2008; [10] Chong et al., 2009; [19] Dean-Leon et al., 2017; [25] Chacko et al., 2020 |
| | Easy to execute | [4] Sales et al., 2004; [7] Bernhardt et al., 2008; [9] Norberto Pires et al., 2009; [10] Chong et al., 2009; [13] Soh et al., 2012; [14] Pedersen et al., 2014; [15] Zhou et al., 2014; [16] Madsen et al., 2015; [17] Tahriri et al., 2015; [19] Dean-Leon et al., 2017; [20] Bedaka and Lin, 2018; [23] Annem et al., 2019; [27] Solanes et al., 2020 |
| Efficiency | Cost efficiency | [2] Seliger, 1988; [3] Ranky, 2003; [5] Pires, 2005; [7] Bernhardt et al., 2008; [19] Dean-Leon et al., 2017; [20] Bedaka and Lin, 2018; [25] Chacko et al., 2020 |
| | Time efficiency | [3] Ranky, 2003; [5] Pires, 2005; [13] Soh et al., 2012; [16] Madsen et al., 2015; [17] Tahriri et al., 2015; [20] Bedaka and Lin, 2018; [22] Michalos et al., 2018; [23] Annem et al., 2019; [27] Solanes et al., 2020 |
| Flexibility | Suitable function | [3] Ranky, 2003; [6] de Oliveira et al., 2008; [7] Bernhardt et al., 2008; [10] Chong et al., 2009; [12] Sun et al., 2011; [13] Soh et al., 2012; [14] Pedersen et al., 2014; [16] Madsen et al., 2015; [19] Dean-Leon et al., 2017; [21] Copot et al., 2018; [22] Michalos et al., 2018; [24] Fletcher et al., 2020; [25] Chacko et al., 2020; [28] Prati et al., 2021; [30] Psarakis et al., 2022 |
| Learnability | Easily understandable | [7] Bernhardt et al., 2008; [14] Pedersen et al., 2014; [27] Solanes et al., 2020 |

**Table 3.** Derived ergonomic requirements (Continued)

| Quality characteristic | User requirement | Reference |
|---|---|---|
| Maturity | Stability | [1] Sweet and Good, 1984; [2] Seliger, 1988; [3] Ranky, 2003; [5] Pires, 2005; [6] de Oliveira et al., 2008; [7] Bernhardt et al., 2008; [8] Jen et al., 2008; [10] Chong et al., 2009; [11] Naumann et al., 2010; [13] Soh et al., 2012; [14] Pedersen et al., 2014; [19] Dean-Leon et al., 2017; [20] Bedaka and Lin, 2018 |
| Robustness | Fast recovery | [11] Naumann et al., 2010 |
| | Fault tolerance | [9] Norberto Pires et al., 2009; [15] Zhou et al., 2014; [16] Madsen et al., 2015; [21] Copot et al., 2018 |
| Safety | Human safety | [7] Bernhardt et al., 2008; [8] Jen et al., 2008; [10] Chong et al., 2009; [11] Naumann et al., 2010; [13] Soh et al., 2012; [15] Zhou et al., 2014; [16] Madsen et al., 2015; [18] Kuts et al., 2017; [22] Michalos et al., 2018; [26] Dianatfar et al., 2020; [29] Reyes-Uquillas and Hsiao, 2021 |
| Appropriateness | Functional extension | [1] Sweet and Good, 1984; [2] Seliger, 1988; [3] Ranky, 2003; [4] Sales et al., 2004; [6] de Oliveira et al., 2008; [7] Bernhardt et al., 2008; [9] Norberto Pires et al., 2009; [10] Chong et al., 2009; [12] Sun et al., 2011; [20] Bedaka and Lin, 2018; [23] Annem et al., 2019; [27] Solanes et al., 2020; [29] Reyes-Uquillas and Hsiao, 2021 |
| Completeness | Optimizing robot trajectory | [1] Sweet and Good, 1984; [8] Jen et al., 2008; [10] Chong et al., 2009; [12] Sun et al., 2011; [23] Annem et al., 2019 |
| | Sensing capability | [1] Sweet and Good, 1984; [2] Seliger, 1988; [3] Ranky, 2003; [6] de Oliveira et al., 2008; [7] Bernhardt et al., 2008; [8] Jen et al., 2008; [11] Naumann et al., 2010; [13] Soh et al., 2012; [15] Zhou et al., 2014; [18] Kuts et al., 2017; [19] Dean-Leon et al., 2017; [22] Michalos et al., 2018; [23] Annem et al., 2019 |
| Correctness | Robot precision | [1] Sweet and Good, 1984; [2] Seliger, 1988; [7] Bernhardt et al., 2008; [9] Norberto Pires et al., 2009; [10] Chong et al., 2009; [12] Sun et al., 2011; [13] Soh et al., 2012; [15] Zhou et al., 2014; [21] Copot et al., 2018; [23] Annem et al., 2019; [25] Chacko et al., 2020; [29] Reyes-Uquillas and Hsiao, 2021 |

최하위 욕구 위계인 기능성에 관한 요구사항으로는 Functional Extension, Optimizing Robot Trajectory, Sensing Capability, Robot Precision이 식별되었다. Functional Extension은 로봇이 다양한 기능을 수행할 수 있는 능력을 비롯해 기능을 확장할 수 있고 새로운 기능을 추가할 수 있는 것에 관한 능력이다. Optimizing Robot Trajectory는 로봇 궤적 최적화를 통해 최적의 동적 경로에 대한 사양을 충족하여 충돌을 피하거나 신속한 작업수행을 달성하는 것과 관계가 있다. Sensing Capability는 여러 센서를 통해 충돌 및 근접과 같이 불규칙한 상황을 감지하는 것과 관련이 있으며 인간-로봇 협업 시 중요한 기능 중 하나이다. Robot Precision은 정밀 작업, 검사, 모션제어 등 로봇의 정밀함과 관련된 사양 및 작업 능력과 같은 요소이다. 이렇듯, 기능성 위계의 사용자 요구사항은 주로 로봇의 작업수행 능력과 관련된 요소들로 이루어져 있다.

신뢰성은 주로 안전 관련 요구사항이나 정상 작업을 유지하는 것과 관련이 있다. Stability는 오류 방지 및 최소화와 더불어 정상 가동 상황에서 신뢰도 요구를 충족시키는 것에 관한 사항이다. Fast Recovery는 오류나 불규칙적 상황 발생 시 빠르게 회복하여 정상적인 작업을 수행할 수 있도록 하는 요소이다. Fault Tolerance는 오류 및 결함이 존재해도 저항해 내거나 이를 수정하는 것과 관련 있다. Human Safety는 사용자의 안전을 도모하는 것과 관련된 것으로 물체를 안전하게 잡거나 시스템이 위험 가능성을 인식하고 힘과 속도를 조절하는 등 안전한 작업을 위한 총체적 사항이다. 특히, 안전에 관한 요구사항은 최근까지도 중요시 여겨지고 있는 요구사항이다(Sun et al., 2023; Wang et al., 2024).

사용성 관련 요구사항은 주로 쉽고, 간편하고, 효율적인 수행 측면과 관련이 있는 것으로 여러 선행연구 및 표준에서 언급되고 있다. Easy to Execute는 일을 쉽고 단순하게 하는 것과 관련된 요구사항이다. Straightforward Programming은 로봇 프로그래밍을 쉽고 간편하게 수행할 수 있는 것과 관련 있는 요소이다. Sufficient Information은 사용자에게 충분한 정보를 제공하는 것으로 이를 통해 일을 쉽고 효율적으로 할 수 있다. Cost Efficiency와 Time Efficiency는 로봇을 활용하여 각각 비용적 효율, 시간적 효율을 달성하는 것과 관련이 있다. Suitable Function은 상황에 맞춰서 유연하게 기능하는 것과 관련이 있는데 모듈형 로봇이 대표적인 사례라고 할 수 있다. Easily Understandable은 로봇 사용법을 학습하는 데 있어 쉽고 빠르게 이해하고 사용하는 것과 관련된 요소이다. 인간-로봇 상호작용의 유형과 복잡성의 증대로 인해 사용하기 쉽고 유연한 시스템의 필요성을 인지하고 이를 구축하기 위한 연구가 증가하고 있는 추세이다(Aaltonen and Salmi, 2019; Dömel et al., 2017).

최상위 위계인 즐거움에 해당하는 사용자 요구사항은 사용자 친화적인 상호작용과 사용 맥락에 따른 사용자 맞춤형 기능처럼 사용자의 긍정적인 감정을 극대화하고 부정적인 감정을 최소화하여 전반적인 만족도를 높이는 것과 관련이 있다(Khalid, 2006). Worker Adaptability는 사용자의 행동을 예측하거나 사용자가 자신의 선호에 맞게 기능을 조정할 수 있게끔 하는 요소이다. User Friendly Interaction는 여러 감각적 요소를 활용한 인터페이스 혹은 실제 사람과 상호작용을 하는 것과 같은 요소이다.

최종 선정된 문헌에서 도출한 사용자 요구사항과 품질 특성 간 매핑을 진행한 결과는 Figure 3과 같고 여기서 짙은 회색으로 표시한 열은 협동 로봇에 대한 문헌을 표시한 것이다.

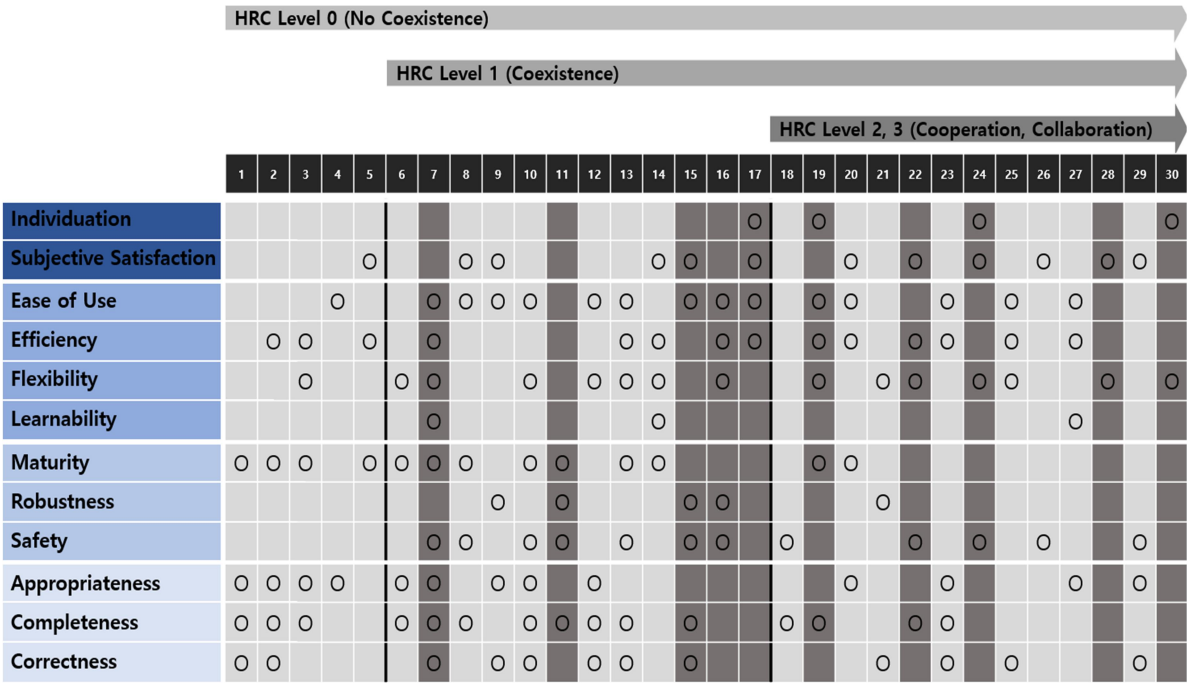


**Figure 3.** Correlation matrix

## 4.3 Frequency analysis

사용자 욕구 위계를 기준으로 기존 산업용 로봇과 협동 로봇의 세대별 요구사항 발현 비율을 나타낸 그래프는 Figure 4와 같다. 기존 산업용 로봇의 경우 1세대에서 3세대로 발전하면서 기능성에 해당하는 요구사항 비율의 변화는 47.37%, 34.21%, 34.48%, 신뢰성 관련 요구사항의 경우에는 21.05%, 23.68%, 17.24%로 변화하였다. 즉, 기술이 발전하여 사용자 요구사항이 높은 수준의 위계로 이동하여

도 하위 수준의 요구사항은 없어지는 게 아니라 줄어들면서 일정 수준 유지되는 양상을 띤다. 반면, 사용성 관련 요구사항은 26.32%, 34.21%, 37.93%, 즐거움에 해당하는 요구사항은 5.26%, 7.90%, 10.35%로 기술이 발전함과 동시에 증가하는 양상을 보였다. 협동 로봇도 마찬가지로 기능성과 신뢰성에 해당하는 요구사항의 비율은 감소했으나 사용성, 즐거움과 관련된 요구사항 비율은 증가하였다.

또한, 기존 산업용 로봇과 협동 로봇의 초기 시점에서의 사용자 요구사항 분포를 살펴보면 주로 기능성 혹은 사용성에 관한 요구사항임을 알 수 있다. 기존 산업용 로봇은 기능성 관련 요구사항이 47.37%, 사용성 관련 요구사항이 26.32%로 기능성 관련 요구사항이 주를 이루는 반면에 기존 산업용 로봇으로부터 발전해온 협동 로봇의 경우에는 기능성 관련 요구사항이 21.43%, 사용성 관련 요구사항이 35.72%로 초기 시점부터 사용성에 관한 사용자 요구사항이 높은 비율로 발현되고 있다.

정리하면 비율상으로 볼 때 특정 시점마다 중요시되는 사용자 요구사항에는 차이가 있으며 유사한 기술이라도 도입 시점에서 선행 기술의 존재 여부, 발전 정도에 따라 사용자 요구사항에 차이가 있음을 알 수 있다.

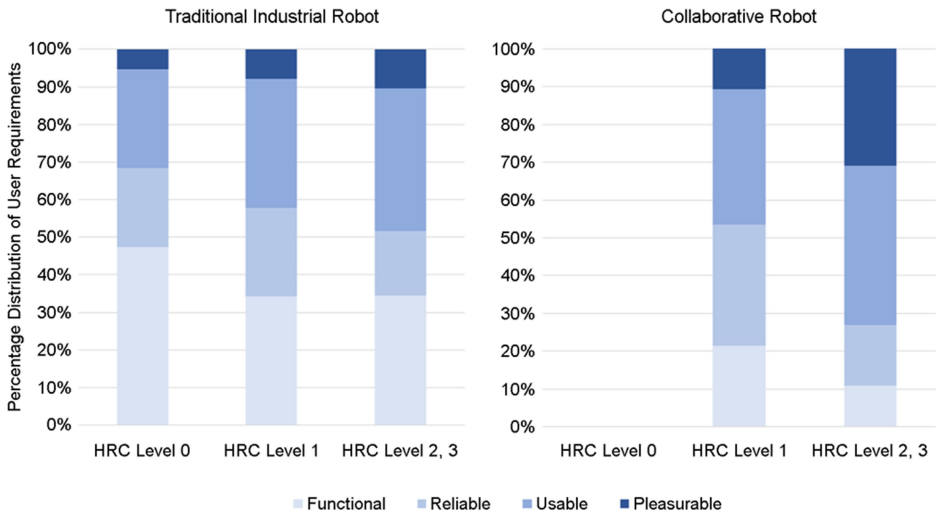


**Figure 4.** Distribution of requirements by human-robot collaboration levels

이러한 경향 하에 도출한 요구사항 및 빈도를 기반으로 중요도 변화를 구체적으로 파악하기 위해 카이제곱 검정을 통해 가설검정을 수행하였다. 첫 번째 가설을 검증하기 위해 기존 산업용 로봇과 협동 로봇이 세대를 거쳐 발전해 오면서 사용자 요구사항 발현 양상이 달라졌는지 확인하였다. 기존 산업용 로봇은 Table 4와 같이 1세대와 2세대, Table 5의 1세대와 3세대, Table 6의 2세대와 3세대를 각각 비교하였다. 하지만, 카이제곱 검정 결과 $p$-value 값은 1세대와 2세대는 0.806, 1세대와 3세대는 0.708, 2세대와 3세대는 0.919로 통계적으로는 모두 유의하지 않은 것으로 나타났다.

**Table 4.** Chi-square analysis between 1st and 2nd generations of traditional industrial robots of user requirements

| Traditional industrial robot | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 1st Generation | 9 (47.37%) | 4 (21.05%) | 5 (26.32%) | 1 (5.26%) | 19 | 0.982 (0.806) |
| 2nd Generation | 13 (34.21%) | 9 (23.68%) | 13 (34.21%) | 3 (7.90%) | 38 | |
| Total | 22 | 13 | 18 | 4 | 57 | |

**Table 5.** Chi-square analysis between 1st and 3rd generations of traditional industrial robots of user requirements

| Traditional industrial robot | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 1st Generation | 9 (47.37%) | 4 (21.05%) | 5 (26.32%) | 1 (5.26%) | 19 | 1.391 (0.708) |
| 3rd Generation | 10 (34.48%) | 5 (17.24%) | 11 (37.93%) | 3 (10.35%) | 29 | |
| Total | 19 | 9 | 16 | 4 | 48 | |

**Table 6.** Chi-square analysis between 2nd and 3rd generations of traditional industrial robots of user requirements

| Traditional industrial robot | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 2nd Generation | 13 (34.21%) | 9 (23.68%) | 13 (34.21%) | 3 (7.90%) | 38 | 0.501 (0.919) |
| 3rd Generation | 10 (34.48%) | 5 (17.24%) | 11 (37.93%) | 3 (10.35%) | 29 | |
| Total | 23 | 14 | 24 | 6 | 67 | |

협동 로봇의 경우 결과를 정리한 Table 7을 살펴보면 세대와 관계없이 사용성에 관한 요구사항이 각각 10건(35.72%), 8건(42.11%)으로 가장 많이 나타나고 있다. 즐거움 관련 요구사항 역시 초기부터 기존 산업용 로봇 대비 높은 비율로 나타나고 있다. 반면 기능성 관련 요구사항의 경우 각각 6건(21.43%), 2건(10.53%)으로 기존 산업용 로봇 대비 적게 발현되고 있다. 도출한 빈도를 토대로 카이제곱 검정을 수행한 결과 $p$-value가 0.198로 통계적으로는 유의하지 않음을 확인했다.

**Table 7.** Chi-square analysis between 2nd and 3rd generations of collaborative robots of user requirements

| Collaborative robot | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 2nd Generation | 6 (21.43%) | 9 (32.14%) | 10 (35.72%) | 3 (10.71%) | 28 | 4.670 (0.198) |
| 3rd Generation | 2 (10.53%) | 3 (15.79%) | 8 (42.11%) | 6 (31.58%) | 19 | |
| Total | 8 | 12 | 18 | 9 | 47 | |

두 번째 가설은 기존 산업용 로봇과 협동 로봇의 기술 도입 시점에서 사용자 요구사항 발현 양상의 차이가 있는지 알아보고자 수립했으며 Table 8에서 각 기술 별 도입 시기에서의 빈도 및 가설검정 결과를 정리했다. 기존 산업용 로봇의 경우 도입 시점에 기능성 관련 요구사항의 빈도가 가장 높게 나타나고 있다. 반면, 협동 로봇의 경우 도입 시점부터 사용성에 해당하는 요구사항의 빈도가 가

**Table 8.** Chi-square analysis in the early stages between traditional industrial robots and collaborative robots

| | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 1st Generation (Early traditional industrial robot) | 9 (47.37%) | 4 (21.05%) | 5 (26.32%) | 1 (5.26%) | 19 | 3.598 (0.308) |

**Table 8.** Chi-square analysis in the early stages between traditional industrial robots and collaborative robots (Continued)

| | Hierarchy of user needs | | | | Total | $\chi^2$ ($p$-value) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Functional | Reliable | Usable | Pleasurable | | |
| 2nd Generation (Early collaborative robot) | 6 (21.43%) | 9 (32.14%) | 10 (35.72%) | 3 (10.71%) | 28 | 3.598 (0.308) |
| Total | 15 | 13 | 15 | 4 | 47 | |

장 높게 나타나고 있으며 특히 Ease of Use에 해당하는 요구사항이 가장 많이 나타났다. 신뢰성 관련 요구사항 역시 기존 산업용 로봇의 초기 양상과는 차이가 있다. 기존 산업용 로봇은 Maturity에 집중되는 경향이 있으나 협동 로봇은 초기부터 Safety를 중시하고 있다. 하지만, 카이제곱 검정 결과 $p$-value가 0.308로 해당 가설 역시 통계적으로 유의하지는 않았다.

## 5. Discussion

본 연구는 인간 중심적 패러다임 하에서 협동 로봇의 중요성이 커질 것으로 기대되는바 기존 산업용 로봇에서 협동 로봇으로 발전하는 과정별 인간공학적 요구사항을 파악하고 사용자 욕구 위계 및 이를 기반으로 하는 품질 특성과 결부하여 해당 요구사항들의 중요도 변화 및 발현 양상을 파악하고자 했다.

기존 산업용 로봇과 협동 로봇은 즐거움 관련 요구사항 측면에서 차이가 있었는데 협동 로봇은 전반적으로 즐거움에 관련된 사용자 요구사항의 비율이 높게 나타나고 있다. 실제로 협업을 개선하기 위해 사용자가 원하는 작업속도에 적응하거나 사용자 요구사항에 따라 구성을 조정하는 것과 같이 기존 산업용 로봇으로는 충족할 수 없는 Worker Adaptability 측면이 강조되고 있다(El Makrini et al., 2018; Kopp et al., 2021). 즉, Worker Adaptability는 기존 산업용 로봇과 구분되는 협동 로봇의 고유한 사용자 요구사항이며 최근 연구에서 언급이 많이 되는 추세이므로 주목할 필요가 있는 요소이다. 사용성에 해당하는 요구사항 중 특히 Easy to Execute, Cost Efficiency, Time Efficiency, Suitable Function은 기존 산업용 로봇과 협동 로봇에서 모두 나타나고 있고 전 세대에 걸쳐 고르게 분포하고 있는 점으로 미루어 볼 때 사용성에 관한 요구사항은 도입 초기부터 어느 정도 중요하게 인식되었으며 여전히 중요하게 여겨지고 있다. 신뢰성과 기능성 관련 요구사항은 비율이 줄어들고 있지만 요구사항이 완전히 충족되어 사라진 것이 아닐뿐더러 제대로 충족되지 않으면 사용자의 부상, 생산량 감소와 같은 근본적인 문제로 이어질 수 있으므로 지속적인 관리가 필요하다. 다양한 요구사항들은 기술 성숙도를 포함한 여러 원인에 의해 우선순위나 중요도가 바뀌는 동적인 특성이 있다.

요구사항의 동적 특성과 결부하여 첫 번째 가설로 기존 산업용 로봇과 협동 로봇이 발전을 거듭함에 따라 요구사항 발현 양상에 변화가 있는지 파악했다. 가설검정 결과 통계적으로는 유의하지 않았으나 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 모두 시간이 흐를수록 기능성, 신뢰성에 관한 요구사항의 비중은 감소한 후 일정 수준을 유지하는 양상을 띠는 반면에 사용성, 즐거움에 해당하는 상위 위계의 요구사항은 비중이 증가하는 양상을 보였다. 특히, 협동 로봇은 이러한 양상이 더욱 자명하게 드러나는데 Figure 4에서 알 수 있듯이 기존 산업용 로봇 대비 사용성, 즐거움 관련 요구사항이 차지하는 비율 및 증가 폭도 크다. 이는 협동 로봇이 기존 산업용 로봇에 비해 인간과 로봇 간 상호작용을 더욱 많이 필요로 하기 때문인 것으로 생각한다. 즐거움에 해당하는 요구사항의 경우 현재 산업용 로봇 분야에서 주류는 아니지만 꾸준히 증가하는 추세이며 사용자 경험 측면에서도 긍정적인 감정을 극대화하여 감성적 만족을 자아내는데 있어 궁극적인 목표라고 할 수 있다. 따라서, 인간-로봇 상호작용 측면에서 산업용 로봇의 개선 방향은 사용자의 안전과 사용 용이성을 확보하는 신뢰성, 사용성 위주의 기존 인간공학적 요소를 넘어서 즐거움 수준의 요구사항까지 고려 할 필요가 있다(Oron-Gilad and Hancock, 2017; Capy et al., 2022).

두 번째 가설은 기존 산업용 로봇 도입 시점과 기존 산업용 로봇을 기반으로 일정 수준 성숙한 기술인 협동 로봇 도입 시점 간 요구사항 발현 양상 차이를 확인하기 위한 것이었다. 해당 가설 역시 통계적으로는 유의하지 않았지만 기존 산업용 로봇은 도입 시점에서 기능성 관련 요구사항이 강조된 반면 협동 로봇은 사용성, 즐거움에 해당하는 요구사항 비율이 높게 나타났다. 상기 결과로 도입 시

점의 기술 성숙도 차이에 따라 중요시 여겨지는 요구사항 수준의 차이가 있음을 유추할 수 있다. 기술과 사용자 요구사항은 공진화하는 경향이 있는데(Walker et al., 2009) 기존 기술로부터 발전한 신기술과 해당 기존 기술 간 사용자 요구사항 수준 차이는 이러한 공진화와 관련이 있다고 생각한다. 정보화 시대에서 기술과 사용자 요구사항의 공진화 속도는 더 빨라지는 만큼 이러한 변화를 수용하지 못한다면 만족스럽지 못한 개선으로 이어질 수 있다(Ravichandar et al., 2007). 따라서, 기술 설계 및 개발 시 기술 성숙도를 통해 요구사항 수준을 정확히 파악하고 이해관계자를 참여시키는 등의 방법을 통해 사용자가 진정으로 요구하는 것을 반영할 필요가 있다(Spinuzzi, 2005; Lima et al., 2023).

본 연구의 주요 한계점은 설정한 2가지 가설이 모두 통계적으로 유의하지 않다고 밝혀진 점이다. 이러한 결과가 나타난 원인을 검토한 결과는 다음과 같다. 첫 번째로 사용자로부터 직접적으로 요구사항을 도출하거나 중요도를 평정한 것이 아니라 문헌 검토 결과 언급되는 요구사항의 빈도로 사용자 요구사항의 중요도를 추정하였기에 실제와 차이가 있을 가능성이 있다. 문헌을 통해 도출한 사용자 요구사항 별 빈도가 전체적으로 충분하지 않았던 점도 가설검정 결과에 영향을 미쳤을 것이다. 두 번째로 문헌 출판 연도 기준으로 식별한 요구사항들이 문헌을 분류하기 위해 세대를 구분한 Figure 1과 정확하게 일치하지는 않았을 것으로 판단한다. 마지막으로 기술 발전 과정에서 하위 위계의 요구사항을 완벽하게 충족하고 상위 위계로 이동하는 것이 아니라 하위 위계에서 발현한 요구사항이 존재하는 동시에 상위 위계의 요구사항 비율이 증가하는 식으로 요구사항이 발현되면서 세대별 차이가 선명하게 구분되지 못한 점도 가설을 통계적으로 입증하지 못한 원인일 것으로 생각한다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구는 기술이 성숙해짐에 따라 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 모두 하위 위계의 요구사항들은 비율이 감소하는 반면 상위 위계의 요구사항들은 비율이 증가하는 양상을 띠는 점과 기술 도입 초기에 요구사항의 중요도 차이가 존재함을 확인했다. 현재 기존 산업용 로봇과 협동 로봇 분야에서 사용자 요구사항과 관련해서 개별 요구사항 요소에 대한 평가, 영향 검토와 같은 연구가 주로 진행되고 있지만 다양한 요구사항을 도출하고 기존 산업용 로봇에서 협동 로봇으로 진화하기까지의 변화 양상을 체계적으로 분석한 연구는 거의 진행되지 않았다. 특히, 협동 로봇은 비교적 신기술에 속하기 때문에 기존 산업용 로봇보다 절대적인 연구도 적은 실정이다. 본 연구에서는 사용자 요구사항을 반영하는 사용자 중심 설계라는 인간공학적 접근법이 협동 로봇을 포함한 신기술 영역에서도 적용되어야 함을 강조하였다. 또한, 산업용 로봇 선행연구 전반에 걸쳐 공통적으로 언급되고 있는 사용자 요구사항을 도출하고 체계적인 분류 및 요구사항의 동적 특성을 확인했다. 이러한 결과는 인간-로봇 협업 제고를 위한 기술 설계 및 개선 과정에서 기술 중심적 관점 위주인 현재 상황에서 사용자 중심 설계를 수행하기 위한 가이드라인의 역할과 더불어 사용자의 경험품질 평가를 위한 평가체계 구축 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. Conclusion

본 연구에서는 산업용 로봇 시스템의 사용자 중심 설계를 위해 인간공학적 요구사항을 도출하고 기술 성숙에 따른 사용자 요구사항의 동적 특성을 검토하였다. 기존 산업용 로봇과 협동 로봇의 기술 발전 과정과 사용자 욕구 위계를 기반으로 체계적인 문헌 검토를 통해 최종 선정한 30개의 문헌으로부터 17개 사용자 요구사항을 도출하였다. 그 후, 품질 특성과 매핑을 통해 빈도를 측정하여 가설검정을 수행하였다. 비록, 수립한 두 가지 연구가설 모두 통계적으로 유의미한 차이를 보이지는 않았지만 경험품질에 대한 주요 속성의 언급 빈도가 변화하는 양상을 보였다. 이는 과거에는 기능, 성능 및 안전성과 관련된 요인을 주요 핵심 가치로 여겼지만 기술이 성숙함에 따라 점점 사용성과 즐거움과 관련된 사용자 요구사항이 발현되고 있다는 방증이다. 따라서, 향후 협동 로봇의 개발 과정에서는 로봇 자체의 기능과 성능을 중심으로 한 기술 개발 전략을 넘어서 사용성과 사용 과정에서의 즐거움과 관련된 사용자 요구를 충족시키기 위한 전략으로의 보다 발전적 전환이 필요하다. 또한, 협동 로봇의 QoE를 평가하는 과정에서도 이런 상위 사용자 요구사항의 충족 정도를 평가하고 평정하기 위한 표준화된 프레임워크를 개발해야 할 필요성이 크다.

본 연구에서 고려한 사용자 요구사항은 사용자 경험과 관련된 선행연구에서 도출했기 때문에 실제 사용자 요구사항과는 약간의 괴리가 존재할 수 있고 발전 수준에 대응하는 시기를 선행연구가 출판된 연도를 기준으로 추정했기 때문에 시간적 차이가 존재할 가능성도 배제하기 어렵다. 보다 양질의 사용자 요구사항을 식별하고 시점을 명확히 파악하기 위해서는 사용자가 적극적으로 의견과 경험을 남기는 리뷰 데이터를 분석하는 텍스트 마이닝과 같은 기법이 요구된다(Gaikwad et al., 2014; Zhou et al., 2019). 또한, 빈도 분석을 통해 사용자 요구사항의 중요도 변화 양상을 확인하였을 뿐 사회적 맥락, 기술 진보에 따른 사용자 요구사항의 상대적 중요도를 정량적으로 산정하지 않았다. 향후 연구로 기술 성숙도에 따른 사용자 요구사항의 중요도가 변화하는 동적 특성을 보다 정량적으로

산정하기 위한 방법론을 도출할 계획이다. 추가적으로 사용자 요구사항의 상대적 중요도는 기술 성숙뿐만 아니라 인적 요인, 사용 맥락 요인과 같은 여러 변수의 영향을 받기 때문에 중요도를 변화시키는 주요 조절 변수를 식별하는 연구도 진행하고자 한다.

## Acknowledgement

This research was supported by Kumoh National Institute of Technology (2022).

## References

Aaltonen, I., Salmi, T. and Marstio, I., Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. *Procedia CIRP*, 72, 93-98, 2018.

Aaltonen, I. and Salmi, T., Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: Barriers and development needs. *Procedia Manufacturing*, 38, 1151-1158, 2019.

Alonso-Ríos, D., Vázquez-García, A., Mosqueira-Rey, E. and Moret-Bonillo, V., Usability: a critical analysis and a taxonomy. *International Journal of Human-computer Interaction*, 26(1), 53-74, 2009.

Annem, V., Rajendran, P., Thakar, S. and Gupta, S.K., Towards remote teleoperation of a semi-autonomous mobile manipulator system in machine tending tasks. *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 58745, p. V001T02A027). American Society of Mechanical Engineers, 2019.

Arents, J., Abolins, V., Judvaitis, J., Vismanis, O., Oraby, A. and Ozols, K., Human-robot collaboration trends and safety aspects: A systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 10(3), 48, 2021.

Arents, J. and Greitans, M., Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing. *Applied Sciences*, 12(2), 937, 2022.

Bedaka, A.K. and Lin, C.Y., CAD-based robot path planning and simulation using OPEN CASCADE. *Procedia Computer Science*, 133, 779-785, 2018.

Bernhardt, R., Surdilovic, D., Katschinski, V., Schreck, G. and Schröer, K., Next generation of flexible assembly systems. *International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems* (pp. 279-288). Boston, MA: Springer US, 2008.

Brunnström, K., Beker, S.A., De Moor, K., Dooms, A., Egger, S., Garcia, M.N., Hoßfeld, T., Jumisko-Pyykkö, S., Keimel, C., Larabi, C., Lawlor, B., Le Callet, P., Möller, S., Pereira, F., Pereira, M., Perkis, A., Pibernik, J., Pinheiro, A., Pibernik, J., Raake, A., Reichl, P., Reiter, U., Schatz, R., Schelkens, P., Skorin-Kapov, L., Strohmeier, D., Timmerer, C., Varela, M., Wechsung, I., You, J.Y. and Zgank, A., Qualinet white paper on definitions of quality of experience, *European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Service (COST Action IC 1003)*, 2013.

Capy, S., Rincon, L., Coronado, E., Hagane, S., Yamaguchi, S., Leve, V., Kawasumi, Y., Kudou, Y. and Venture, G., Expanding the Frontiers of Industrial Robots beyond Factories: Design and in the Wild Validation. *Machines*, 10(12), 1179, 2022.

Chacko, S.M., Granado, A. and Kapila, V., An augmented reality framework for robotic tool-path teaching. *Procedia CIRP*, 93, 1218-1223, 2020.

Chong, J.W.S., Ong, S., Nee, A.Y. and Youcef-Youmi, K.B., Robot programming using augmented reality: An interactive method for planning collision-free paths. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3), 689-701, 2009.

Copot, C., Muresan, C., Ionescu, C.M., Vanlanduit, S. and De Keyser, R., Calibration of UR10 robot controller through simple auto-tuning approach. *Robotics*, 7(3), 35, 2018.

Črešnar, R., Dabić, M., Stojčić, N. and Nedelko, Z., It takes two to tango: technological and non-technological factors of Industry 4.0 implementation in manufacturing firms. *Review of Managerial Science*, 17(3), 827-853, 2023.

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F. and Frank, A.G., The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394, 2018.

de Oliveira, A.S., De Pieri, E.R., Martins, D. and Moreno, U.F., A five-layers open-architecture robot controller applied to interaction tasks. In *2008 IEEE Latin American Robotic Symposium* (pp. 184-189). IEEE, 2008.

Dean-Leon, E., Ramirez-Amaro, K., Bergner, F., Dianov, I. and Cheng, G., Integration of robotic technologies for rapidly deployable robots. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1691-1700, 2017.

Dianatfar, M., Latokartano, J. and Lanz, M., Concept for virtual safety training system for human-robot collaboration. *Procedia Manufacturing*, 51, 54-60, 2020.

Dömel, A., Kriegel, S., Kaßecker, M., Brucker, M., Bodenmüller, T. and Suppa, M., Toward fully autonomous mobile manipulation for industrial environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(4), 1729881417718588, 2017.

Dragicevic, N., Ullrich, A., Tsui, E. and Gronau, N., A conceptual model of knowledge dynamics in the industry 4.0 smart grid scenario. *Knowledge Management Research & Practice*, 2019.

Ellitan, L., Competing in the era of industrial revolution 4.0 and society 5.0. *Jurnal Maksipreneur: Manajemen, Koperasi, dan Entrepreneurship*, 10(1), 1-12, 2020.

El Makrini, I., Elprama, S.A., Van den Bergh, J., Vanderborght, B., Knevels, A.J., Jewell, C.I., Stals, F., De Coppel, G., Ravyse, I., Potargent, J., Berte, J., Diericx, B., Waegeman, T. and Jacobs, A., Working with walt: How a cobot was developed and inserted on an auto assembly line. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 25(2), 51-58, 2018.

Fletcher, S.R., Johnson, T., Adlon, T., Larreina, J., Casla, P., Parigot, L., Alfaro, P.J. and del Mar Otero, M., Adaptive automation assembly: Identifying system requirements for technical efficiency and worker satisfaction. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105772, 2020.

Frank, A.G., Dalenogare, L.S. and Ayala, N.F., Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26, 2019.

Gaikwad, S.V., Chaugule, A. and Patil, P., Text mining methods and techniques. *International Journal of Computer Applications*, 85(17), 2014.

Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. and Zühlke, D., Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In *2014 12th IEEE*

*International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 289-294). IEEE, 2014.

Hancock, P.A., Pepe, A.A. and Murphy, L.L., Hedonomics: The power of positive and pleasurable ergonomics. *Ergonomics in Design*, 13(1), 8-14, 2005.

Henrich, D. and Kuhn, S., Modeling intuitive behavior for safe human/robot coexistence cooperation. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006* (pp. 3929-3934). IEEE, 2006.

Heo, I.S., Putri, A.K., Kim, B.S., Kwon, M.S. and Kim, S.H., Analysis of quality standards for industrial collaborative robots based on user-centered design framework. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2023.

Heydaryan, S., Suaza Bedolla, J. and Belingardi, G., Safety design and development of a human-robot collaboration assembly process in the automotive industry. *Applied Sciences*, 8(3), 344, 2018.

Hietanen, A., Pieters, R., Lanz, M., Latokartano, J. and Kämäräinen, J.K., AR-based interaction for human-robot collaborative manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, 101891, 2020.

ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models, ISO, Geneva, 2011.

Jen, Y.H., Taha, Z. and Vui, L.J., Vr-based robot programming and simulation system for an industrial robot. *International Journal of Industrial Engineering*, 15(3), 314-322, 2008.

Khalid, H.M., Embracing diversity in user needs for affective design. *Applied Ergonomics*, 37(4), 409-418, 2006.

Kokotinis, G., Michalos, G., Arkouli, Z. and Makris, S., On the quantification of human-robot collaboration quality. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-18, 2023.

Kopp, T., Baumgartner, M. and Kinkel, S., Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: an empirically driven framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 685-704, 2021.

Kuts, V., Sarkans, M., Otto, T. and Tähemaa, T., COLLABORATIVE WORK BETWEEN HUMAN AND INDUSTRIAL ROBOT IN MANUFACTURING BY ADVANCED SAFETY MONITORING SYSTEM, *Annals of DAAAM & Proceedings*, 28, 2017.

Lee, J. and Ham, D.H., User-Centered Analysis of Functional Requirements of Navigation Systems Based on the Kano Model. *Journal of Integrated Design Research*, 14(3), 9-18, 2015.

Lee, S.C., A Systematic Review on Design Space of External Human-Machine Interface for Autonomous Vehicle. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 39(6), 549-559, 2020.

Lima, M.R., Horrocks, S., Daniels, S., Lamptey, M., Harrison, M. and Vaidyanathan, R., The Role of Conversational AI in Ageing and Dementia Care at Home: A Participatory Study. In *2023 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (pp. 571-578). IEEE, 2023.

Madsen, O., Bøgh, S., Schou, C., Andersen, R.S., Damgaard, J.S., Pedersen, M.R. and Krüger, V., Integration of mobile manipulators

in an industrial production. *Industrial Robot: An International Journal*, 42(1), 11-18, 2015.

Malik, A.A. and Bilberg, A., Developing a reference model for human-robot interaction. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13, 1541-1547, 2019.

Michalos, G., Kousi, N., Karagiannis, P., Gkournelos, C., Dimoulas, K., Koukas, S., Mparis, K., Papavasileiou, A. and Makris, S., Seamless human robot collaborative assembly–An automotive case study. *Mechatronics*, 55, 194-211, 2018.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G. and Prisma Group., Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, 8(5), 336-341, 2010.

Muljani, N. and Ellitan, L., Developing competitiveness in industrial revolution 4.0. *International Journal of Trend in Research and Development*, 6(1), 1-3, 2019.

Murashov, V., Hearl, F. and Howard, J., Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(3), D61-D71, 2016.

Naumann, M., Bengel, M. and Verl, A., Automatic generation of robot applications using a knowledge integration framework. In *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)* (pp. 1-8). VDE, 2010.

Norberto Pires, J., Veiga, G. and Araújo, R., Programming-by-demonstration in the coworker scenario for SMEs. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(1), 73-83, 2009.

Oron-Gilad, T. and Hancock, P.A., From ergonomics to hedonomics: Trends in human factors and technology—The role of hedonomics revisited. In *Emotions and Affect in Human Factors and Human-computer Interaction* (pp. 185-194). Academic Press, 2017.

Pati, D. and Lorusso, L.N., How to write a systematic review of the literature. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 11(1), 15-30, 2018.

Pedersen, M.R., Herzog, D.L. and Krüger, V., Intuitive skill-level programming of industrial handling tasks on a mobile manipulator. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 4523-4530). IEEE, 2014.

Pires, J.N., Robot-by-voice: experiments on commanding an industrial robot using the human voice. *Industrial Robot: An International Journal*, 32(6), 505-511, 2005.

Prati, E., Peruzzini, M., Pellicciari, M. and Raffaeli, R., How to include User eXperience in the design of Human-Robot Interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102072, 2021.

Preece, J., Sharp, H. and Rogers, Y., *Interaction design: beyond human-computer interaction*. John Wiley & Sons, 2015.

Psarakis, L., Nathanael, D. and Marmaras, N., Fostering short-term human anticipatory behavior in human-robot collaboration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 87, 103241, 2022.

Ranky, P.G., Reconfigurable robot tool designs and integration applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 30(4), 338-344, 2003.

Ravichandar, R., Arthur, J.D. and Bohner, S.A., Capabilities engineering: Constructing change-tolerant systems. In *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)* (pp. 278b-278b). IEEE, 2007.

Reiman, A., Kaivo-oja, J., Parviainen, E., Takala, E.P. and Lauraeus, T., Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context–A scoping review. *Technology in Society*, 65, 101572, 2021.

Reyes-Uquillas, D. and Hsiao, T., Safe and intuitive manual guidance of a robot manipulator using adaptive admittance control towards robot agility. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 70, 102127, 2021.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. and Harnisch, M., Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89, 2015.

Sales, J., Fernández, R., Jiménez, J.M., Marín, R. and Sanz, P.J., Telecontrol of an industrial robot arm by means of a multimodal user interface: a case study. In *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583)* (Vol. 1, pp. 76-81). IEEE, 2004.

Seliger, G., Rules for expanding robot applications. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 4(1-2), 187-196, 1988.

Shin, J.G., Jo, I.G., Lim, W.S. and Kim, S.H., A Few Critical Design Parameters Affecting User's Satisfaction in Interaction with Voice User Interface of AI-Infused Systems, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 39(1), 73-86, 2020.

Silberer, J., Astfalk, S., Planing, P. and Müller, P., User needs over time: the market and technology maturity model (MTMM). *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 12(1), 39, 2023.

Singh, B., Sellappan, N. and Kumaradhas, P., Evolution of industrial robots and their applications. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(5), 763-768, 2013.

Soh, A.C., Ahmad, S.A., Ishak, A.J. and Latif, K.A., Development of an adjustable gripper for robotic picking and placing operation. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 5(4), 1019-1043, 2012.

Solanes, J.E., Munoz, A., Gracia, L., Martí, A., Girbés-Juan, V. and Tornero, J., Teleoperation of industrial robot manipulators based on augmented reality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 1077-1097, 2020.

Spinuzzi, C., The methodology of participatory design. *Technical Communication*, 52(2), 163-174, 2005.

Strange, R. and Zucchella, A., Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*, 25(3), 174-184, 2017.

Sun, L., Xiang, F., Sun, X. and Li, S., Design of industrial robot controller based on system on programmable chip. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology* (Vol. 8, pp. 3877-3880). IEEE, 2011.

Sun, Y., Jeelani, I. and Gheisari, M., Safe human-robot collaboration in construction: A conceptual perspective. *Journal of Safety Research*, 2023.

Sweet, L.M. and Good, M.C., Re-definition of the robot motion control problem: Effects of plant dynamics, drive system constraints, and user requirements. In *The 23rd IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 724-732). IEEE, 1984.

Tahriri, F., Mousavi, M., Yap, H.J., Siti Zawiah, M.D. and Taha, Z., Optimizing the robot arm movement time using virtual reality robotic teaching system. *International Journal of Simulation Modelling*, 14(1), 28-38, 2015.

Tarasov, I.V., Industry 4.0: Technologies and their impact on productivity of industrial companies. *Strategic Decisions and Risk Management*, (2), 62-69, 2018.

Thames, L. and Schaefer, D., Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 52, 12-17, 2016.

Thrun, S., Toward a framework for human-robot interaction. *Human-Computer Interaction*, 19(1-2), 9-24, 2004.

*Universal Robots*., History of the Cobots - The Cobots from Universal Robot. About Universal Robots 2017. https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/the-history-behind-collaborative-robots-cobots/ (retrieved September 14, 2023).

Walker, G.H., Stanton, N.A., Jenkins, D.P. and Salmon, P.M., From telephones to iPhones: Applying systems thinking to networked, interoperable products. *Applied Ergonomics*, 40(2), 206-215, 2009.

Wallén, J., *The history of the industrial robot*. Linköping University Electronic Press, 2008.

Walsh, S.T., Kirchhoff, B.A. and Newbert, S., Differentiating market strategies for disruptive technologies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 49(4), 341-351, 2002.

Walter, A., *Designing for emotion* (Vol. 9). New York: A book apart, 2011.

Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H. and Wang, L., Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626, 2024.

Zhou, K., Ebenhofer, G., Eitzinger, C., Zimmermann, U., Walter, C., Saenz, J., Castaño, L.P., Hernández, M.A.F. and Oriol, J.N., Mobile manipulator is coming to aerospace manufacturing industry. In *2014 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE) Proceedings* (pp. 94-99). IEEE, 2014.

Zhou, S., Ng, S.T., Lee, S.H., Xu, F.J. and Yang, Y., A domain knowledge incorporated text mining approach for capturing user needs on BIM applications. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(2), 458-482, 2019.

## Author listings

**Beom Su Kim:** ergonomics.idea@gmail.com

**Highest degree:** Bachelor of Engineering, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Position title:** Master's Student, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Areas of interest:** User-Centered Design, Quality of Experience, Human-Robot Interaction, Data Science

**Alivia Kirana Hartono Putri:** alivia@kumoh.ac.kr
**Highest degree:** Bachelor of Engineering, Department of Industrial and Systems Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
**Position title:** Master's Student, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Areas of interest:** Usability Assessment, Human Computer Interaction, Quality of Experience

**Karur Krishna Sahithi:** k.krishnasahithi@gmail.com
**Highest degree:** Bachelor of Technology, Electronics and Communication Engineering, SASTRA Deemed to be University
**Position title:** Master's Student, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Areas of interest:** Quality of Experience, Emotional Engineering, Usability

**Geun Ryeong Choi:** marishouse0207@gmail.com
**Highest degree:** Undergrad. Student, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Position title:** Undergrad. Student, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Areas of interest:** Human-Robot Interaction, Usability Evaluation

**Sang Ho Kim:** kimsh@kumoh.ac.kr
**Highest degree:** Ph.D., Department of Industrial Engineering, POSTECH
**Position title:** Professor, Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Areas of interest:** Human-robot Interaction, Human Factors and Ergonomics, Occupational Safety and Health