JKSCI

한국컴퓨터정보학회논문지
Journal of The Korea Society of Computer and Information
Vol. 31 No. 10, pp. 183-192, October 2026
https://doi.org/10.9708/jksci.2026.31.10.183

A Bolt-Tightening Assurance Software Architecture Based on a Digital Twin and Dual Verification Using Torque and Vision

Hee-Rak Lee*, Jae-Woong Kim**, Won-Young Jeon***

*Student, Dept. of Computer Engineering, Kongju National University, Cheonan, Korea
**Professor, Dept. of Software, Kongju National University, Cheonan, Korea
***Lecturer, Dept. of Software, Kongju National University, Cheonan, Korea

[Abstract]

Human errors such as position and sequence errors, incorrect torque, and missed fastening can occur in bolt fastening processes in manufacturing environments. This study designs and implements a bolt fastening assurance system that integrates a CAD-based 3D digital twin with dual torque and vision verification. The proposed system performs CAD-based process management, torque verification using a digital torque wrench, and vision verification based on ROI comparison of pre- and post-fastening images. An interlock allows transition to the next process only when both verification results are normal. Repeated tests in a virtual environment using scenarios including torque errors, missed fastening, and sequence errors confirmed the feasibility of the proposed system for fastening error verification and management. This study verifies the functional feasibility of a CAD-based fastening assurance architecture prior to integration with physical hardware.

▸ **Key words**: Bolt Tightening, Error-Proofing, Computer Vision, Digital Twin, Digital Torque Wrench, Human Error

[요 약]

제조 현장의 볼트 체결 공정에서는 위치·순서 오류, 토크 오류, 체결 누락 등의 휴먼 에러가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이를 방지하기 위해 CAD 기반 3D 디지털 트윈과 토크·비전 이중 검증을 결합한 볼트 체결 보증 시스템을 설계·구현하였다. 제안 시스템은 CAD 기반 공정 관리, 디지털 토크 렌치의 토크 검증, 작업 전·후 이미지의 ROI 비교를 수행하며, 두 검증 결과가 모두 정상인 경우에만 다음 공정으로 전이하도록 인터록을 구성하였다. 가상 환경에서 토크 오류, 체결 누락, 순서 오류 등의 시나리오를 반복 검증한 결과, 제안 시스템의 체결 오류 검증 및 관리 가능성을 확인하였다. 본 연구는 실제 하드웨어 연동에 앞서 CAD 기반 체결 보증 아키텍처의 기능적 실현 가능성을 검증하였다.

▸ **주제어**: 볼트 체결, 오류 방지(error-proofing), 컴퓨터 비전, 디지털 트윈, 디지털 토크 렌치, 인적 오류

• First Author: Hee-Rak Lee, Co-author : Won-Young Jeon, Corresponding Author: Jae-Woong Kim
*Hee-Rak Lee (formlife2@naver.com), Dept. of Computer Engineering, Kongju National University
**Jae-Woong Kim (jykim@kongju.ac.kr), Dept. of Software, Kongju National University
***Won-Young Jeon (jun1young@kongju.ac.kr), Dept. of Software, Kongju National University
• Received: 2026. 08. 31, Revised: 2026. 09. 17, Accepted: 2026. 09. 29.

Copyright © 2026 The Korea Society of Computer and Information
http://www.ksci.re.kr pISSN:1598-849X | eISSN:2383-9945
www.kci.go.kr

I. Introduction

제조 현장에서 볼트 체결 공정은 작업자의 체결 위치 및 순서 오류, 과·소 토크, 체결 누락 등의 인적 오류가 발생할 수 있으며, 이는 제품의 품질과 조립 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다[1]. 이러한 오류를 예방하기 위해 체결 결과를 관리하고 작업 오류를 검출하는 에러 프루핑(Error-Proofing) 기술이 필요하다[2]. 기존의 체결 관리 시스템은 주로 2D 작업 지시와 디지털 토크 렌치의 측정값을 기반으로 작업 순서와 체결 결과를 관리한다. 그러나 2D 화면과 실제 제품의 위치를 작업자가 대응시키는 과정에서 위치 및 순서 오류가 발생할 수 있으며, 토크 값만으로 체결 결과를 판단할 경우 지정되지 않은 위치의 볼트 체결이나 부품 누락과 같은 오류를 독립적으로 검증하기 어렵다. 또한, 고정식 비전 시스템은 제품 형상이나 설치 환경에 따라 검사 사각지대가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 개선하기 위해 CAD 기반 3D 디지털 트윈과 토크·비전 이중 검증을 결합한 볼트 체결 보증 시스템을 설계하고 구현하였다. CAD 데이터로부터 체결 위치와 공정 정보를 구성하고 이를 3D 가상공간에 표현하여 작업 대상과 공정 상태를 관리한다. 또한 디지털 토크 렌치의 체결 결과를 이용한 토크 기반 검증과 작업 전·후 이미지의 위치 변화에 기반한 비전 검증을 수행하고, 두 검증 결과가 모두 정상인 경우에만 다음 공정으로 전이하도록 인터록을 구성하였다.

본 연구에서는 모사한 토크 입력과 디지털 트윈 이미지를 이용하여 체결 오류 시나리오에 대한 판정 및 공정 차단 기능을 검증하였다. 이를 통해 CAD 기반 디지털 트윈, 토크 검증, 이미지 기반 검증 및 공정 인터록을 통합한 아키텍처의 기능적 실현 가능성을 검토하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 디지털 트윈, 제조 공정 에러 프루핑 및 비전 기반 품질 검사와 관련된 선행 연구를 고찰한다. 3장에서는 제안하는 볼트 체결 보증 아키텍처와 시스템 설계를 기술한다. 4장에서는 시스템 구현 및 체결 검증 방법을 설명한다. 5장에서는 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 검증 결과를 분석하고, 6장에서는 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. Preliminaries

2.1. CAD and Digital Twin-Based Manufacturing Process Visualization

디지털 트윈은 물리적 대상 또는 제조 시스템의 상태와 정보를 디지털 공간에 표현하고, 이를 기반으로 제조 공정의 모니터링, 분석 및 시뮬레이션을 수행하기 위한 기술로 활용되고 있다[3-5]. 특히 CAD 기반 3차원 모델은 제품 형상과 부품의 공간적 배치를 가상공간에서 표현할 수 있어 조립 작업의 위치와 공정 상태를 직관적으로 제공할 수 있다. 작업자가 3D 모델을 회전하거나 확대·축소하여 작업 대상을 확인할 수 있도록 구성하면 2차원 작업 지시에서 발생할 수 있는 실제 작업 대상과 화면 정보 간의 공간적 대응 문제를 완화할 수 있다[4,5]. 그러나 기존 디지털 트윈 연구는 주로 설비 상태 모니터링, 생산 시스템 시뮬레이션 및 공정 최적화에 초점을 두고 있으며, CAD 기반 위치 정보와 실제 볼트 체결 결과를 연계하여 개별 체결 공정을 검증하는 연구는 상대적으로 제한적이다. 본 연구에서는 CAD에서 추출한 체결 정보를 3D 디지털 트윈에 표현하고 체결 대상과 공정 상태를 관리하는 데 활용한다.

2.2. Manufacturing Error-Proofing and Smart Torque Management

제조 공정에서 작업자의 인적 오류를 예방하기 위한 에러 프루핑 또는 Poka-Yoke는 제품 품질과 공정 신뢰성을 확보하기 위한 방법으로 활용되어 왔다[6]. 특히 작업 순서, 작업 대상, 공구 및 공정 조건을 관리하고 기준을 만족하지 못한 경우 다음 공정으로의 진행을 제한하는 방식이 적용되고 있다. 볼트 체결 공정에서는 디지털 토크 렌치를 이용하여 체결 토크 및 회전각을 측정하고, 측정 결과를 상위 시스템으로 전달하여 체결 결과와 작업 이력을 관리할 수 있다[5]. 이러한 방식은 목표 토크 대비 실제 체결 토크를 확인할 수 있다는 장점이 있다. 또한 볼트 체결에서는 체결 순서에 따라 체결부의 하중 분포가 달라질 수 있어 Cross-pattern 또는 Star-pattern 등의 체결 방식이 활용되고 있으며[7,8], 체결 순서에 따른 품질 영향을 분석하거나 순서를 결정하기 위한 연구도 수행되어 왔다[9,10]. 그러나 본 연구에서는 체결 순서 자체의 구조적 최적화보다는 CAD 기반 체결 위치 정보를 이용하여 작업 순서를 관리하고 작업 누락 및 순서 오류를 방지하는 데 초점을 둔다. 토크 데이터만을 이용한 검증은 목표 토크의 적합성을 판단하는 데에는 효과적이지만, 실제 작업 위치가 올바른지 또는 해당 위치에서 체결 작업이 수행되었는

www.kci.go.kr

지를 독립적으로 판단하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 토크 기반 검증과 이미지 기반 검증을 결합하는 구조를 적용한다.

2.3. Computer Vision-Based Tightening Verification

컴퓨터 비전은 제조 현장에서 부품의 존재 여부, 위치 및 조립 상태를 자동으로 검사하기 위한 기술로 활용되고 있으며, 조립 전후의 이미지 변화를 이용하여 작업 결과를 판정하는 방법도 연구되고 있다[11]. 볼트 체결부에서도 이미지 정보를 이용한 볼트 풀림 검출 방법이 연구되었다[10]. 그러나 고정식 카메라를 사용하는 경우 제품 형상이나 설치 환경에 따라 시야가 제한될 수 있으며, 작업 위치에 따라 검사 영역이 가려지는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 로봇 말단에 카메라를 장착하여 검사 대상에 접근하는 Eye-in-Hand 방식의 비전 시스템이 활용되고 있다[12]. 본 연구에서는 이동형 비전 구조와의 연계를 고려하여 로봇과 카메라의 위치 정보를 디지털 트윈 환경에서 구성하고, 본 논문의 평가에서는 가상공간에서 생성한 작업 전·후 이미지를 사용하였다. 작업 전·후 이미지의 비교를 위해서는 촬영 위치나 제품 자세에 따른 이미지 간 차이를 보정할 필요가 있다. Evangelidis 와 Psarakis는 두 이미지의 상관계수를 이용하여 기하학적 변환을 추정하는 Enhanced Correlation Coefficient (ECC) 기반 이미지 정합 방법을 제안하였다[13].

본 연구에서는 ECC 기반 이미지 정합을 이용하여 작업 전·후 이미지를 정렬한 후, CAD 데이터에서 정의된 볼트 위치를 Region of Interest (ROI)로 설정하여 해당 영역의 변화를 분석한다. 이를 통해 이미지 기반 체결 검증 결과를 도출하고 토크 렌치의 체결 결과와 결합하여 체결 상태를 판단한다.

2.4. Research Gap and Contribution

기존 연구는 디지털 트윈을 이용한 제조공정의 가상화 및 모니터링, 에러 프루핑을 이용한 작업 오류 방지, 디지털 토크 렌치를 이용한 체결 결과 관리, 그리고 컴퓨터 비전을 이용한 조립 상태 검사 등 각각의 기술 영역에서 발전되어 왔다[3,13]. 그러나 이러한 기술을 CAD 기반 체결 정보, 토크 데이터 및 작업 전·후 이미지 정보를 하나의 체결 공정 관리 구조로 통합하고, 복수의 검증 결과를 이용하여 다음 공정의 진행 여부를 제어하는 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 CAD 데이터에서 체결 위치 및 공정 정보를 구성하고 3D 디지털 트윈에서 관리하고, 토크 데이터의 허용 범위 검증과 작업 전·후 이미지의 정합 및 ROI 비교 결과를 결합한다. 또한 토크 및 비전 검증 결과가 모두 만족되는 경우에만 체결 완료로 판정하고 다음 공정으로 전이하도록 구성한다. 이를 통해 본 연구는 개별적인 체결 데이터 관리가 아닌 CAD 기반 디지털 트윈, 토크 검증, 비전 검증 및 공정 인터록을 통합한 체결 보증 구조를 제시한다.

Cho와 Lim[2]은 딥러닝 기반 객체 탐지를 이용하여 체결 부품의 누락 및 오류를 검출한 반면, 본 연구는 CAD 기반 작업 대상 관리와 토크·ROI 비교 결과를 공정 인터록에 연결하는 통합 구조에 초점을 둔다. 이러한 차이는 시스템 구성과 검증 방식의 차이이며, 본 연구의 결과만으로 선행연구 대비 검출 성능의 우수성을 주장하지 않는다.

III. The Proposed System Architecture

3.1. System Overview

본 연구에서는 볼트 체결 공정에서 발생할 수 있는 체결 위치 및 순서 오류, 토크 오류, 체결 누락을 방지하기 위해 CAD 기반 3D 디지털 트윈과 토크·비전 이중 검증을 결합한 체결 보증 아키텍처를 제안한다. 제안 시스템은 크게 CAD 데이터 처리부, 디지털 트윈 기반 작업 관리부, 체결 데이터 수집부, 비전 검증부 및 공정 제어부로 구성된다.

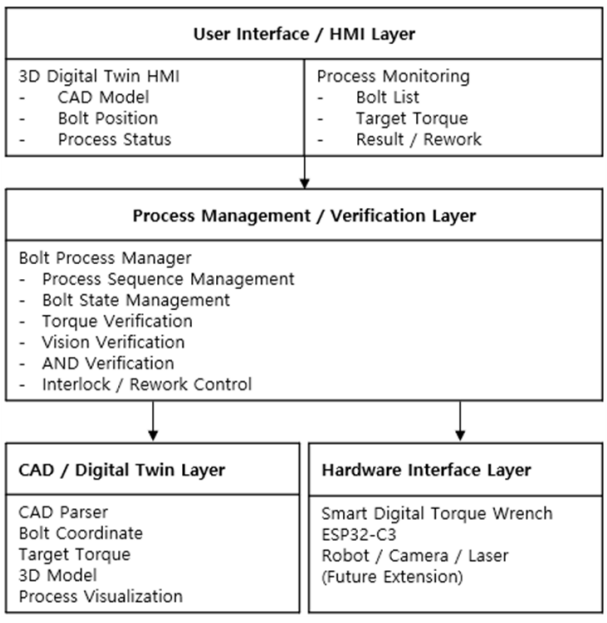


Fig. 1. Proposed System Architecture

CAD 데이터로부터 체결 위치와 목표 토크 등의 공정 정보를 생성하고, 이를 디지털 트윈 환경에서 체결 대상

www.kci.go.kr

위치로 표현한다. 체결 과정에서는 디지털 토크 렌치로부터 작업 결과를 수집하고, 작업 전·후 이미지 정보를 이용하여 체결 상태를 검증한다. 각 검증 결과는 공정 제어부에서 통합하여 관리하며, 설정된 검증 조건을 만족한 경우에만 다음 체결 공정으로 진행하도록 구성하였다. 검증에 실패한 경우에는 해당 체결 위치를 오류 상태로 표시하고 재작업이 가능하도록 공정을 제어한다. 제안 시스템은 크게 CAD 및 디지털 트윈 계층, 공정 관리 및 검증 계층, 장치 연계 계층 및 사용자 인터페이스 계층으로 구성된다. Fig. 1은 제안 시스템의 계층 구조를 보여준다.

3.2. CAD-Based Process Information

CAD 파일은 제안 시스템에서 체결 공정을 구성하기 위한 기본 입력 데이터로 사용된다. CAD 데이터에서 제품 형상과 함께 체결 대상의 위치 정보를 추출하고, 각 체결 위치에 필요한 공정 정보를 구성한다. 생성된 체결 정보는 체결 위치, 목표 토크, 공정 순서 및 체결 상태 등이 포함되며, 디지털 트윈의 볼트 객체와 연결된다. 이를 통해 실제 제품의 체결 대상과 가상공간의 체결 대상 사이에 대응 관계를 구성한다. 체결 순서는 CAD에서 추출된 볼트 위치 정보를 기반으로 생성하며, 생성된 순서는 작업 화면에서 작업자에게 제공된다. 필요한 경우 작업자가 공정 특성에 따라 순서를 조정할 수 있도록 구성하였다.

3.3. Digital Twin-Based Process Management

디지털 트윈은 CAD로부터 구성된 제품과 체결 정보를 3차원 가상공간에 표현하고 체결 공정의 진행 상태를 관리한다. 가상공간에는 제품 본체와 체결 대상 볼트가 표시되며, 작업 상태에 따라 각 볼트의 상태를 체결 전, 작업 대상, 체결 오류 및 체결 완료로 구분한다. 또한 작업 대상의 위치를 시각적으로 표시하여 작업자가 현재 수행해야 할 체결 위치를 확인할 수 있도록 구성하였다.

3.4. Dual Verification and Process Interlock

제안 시스템은 토크 기반 검증과 비전 기반 검증을 각각 수행한 후 그 결과를 통합한다. 토크 기반 검증에서는 입력된 토크 데이터를 이용하여 해당 작업 대상의 허용 범위 만족 여부를 판단한다. 비전 기반 검증에서는 작업 전·후 이미지를 비교하여 체결 대상 위치의 상태 변화를 분석한다. 두 검증 결과가 모두 정상인 경우 해당 볼트를 체결 완료 상태로 변경하고 다음 공정으로 전이한다. 반대로 하나의 검증이라도 실패하면 해당 공정을 완료하지 않고 오류 상태를 유지하며 재작업을 수행한다. 이 구조는 토크 조건과 ROI 변화 조건을 동시에 만족해야 다음 공정으로 진행하도록 설계한 것이다.

3.5. System Operation Sequence

제안 시스템은 CAD 데이터 입력, 체결 정보 생성, 디지털 트윈 구성, 체결 대상 안내, 토크 렌치를 이용한 체결 작업, 토크 검증, 비전 검증, 검증 결과의 통합 판정 및 디지 털 트윈 상태 갱신의 순서로 동작한다. 통합 판정 결과가 정상인 경우에는 해당 볼트를 체결 완료 상태로 변경하고 다음 공정으로 전이하며, 검증에 실패하거나 체결이 누락된 경우에는 재작업을 수행한 후 검증 절차를 반복한다.

IV. Implementation and Verification

4.1. System Implementation Environment

본 연구에서 제안한 체결 보증 아키텍처의 기능을 검증하기 위해 CAD 기반 3D 디지털 트윈과 디지털 토크 렌치 연동 환경을 구현하였다. 시스템은 체결 공정 정보 관리, 3D 가상공간 기반 작업 안내, 디지털 토크 렌치 통신, 이미지 기반 체결 검증 및 공정 인터록 기능으로 구성된다. 소프트웨어는 C#과 Windows Presentation Foundation (WPF)를 기반으로 구현하였으며, 체결 공정 및 작업 이력 데이터의 저장에는 SQLite DBMS를 사용하였다. 작업자는 터치스크린 기반 HMI를 통해 공정을 선택하고 3D 디지털 트윈을 조작할 수 있으며, 현재 작업 대상, 목표 토크, 측정 토크 및 검증 결과를 확인할 수 있도록 구성하였다. 디지털 토크 렌치와 ESP32-C3 기반 통신 모듈은 Bluetooth로 연결하였다.

본 논문의 평가 범위는 토크 렌치의 연결 확인과 모사 입력을 이용한 소프트웨어 검증이며, 비전 검증에서는 디지털 트윈에서 생성한 작업 전·후 이미지를 사용하였다.

4.2. 3D Digital Twin and HMI Implementation

구현된 HMI는 공정 목록, 3D 디지털 트윈 기반 작업 영역 및 체결 결과 정보 영역으로 구성하였다. 중앙 영역에는 CAD 데이터로부터 구성된 제품의 3D 모델과 체결 대상 볼트를 표시하였다. 작업자는 모델을 회전하거나 확대·축소하여 다양한 방향에서 체결 대상의 위치를 확인할 수 있다. 체결 대상 볼트는 공정 상태에 따라 구분하여 표시하였다. 현재 작업 대상, 체결 완료 및 검증 실패 상태를 서로 다른 상태로 관리하여 작업자가 현재 공정과 재작업 대상을 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

www.kci.go.kr

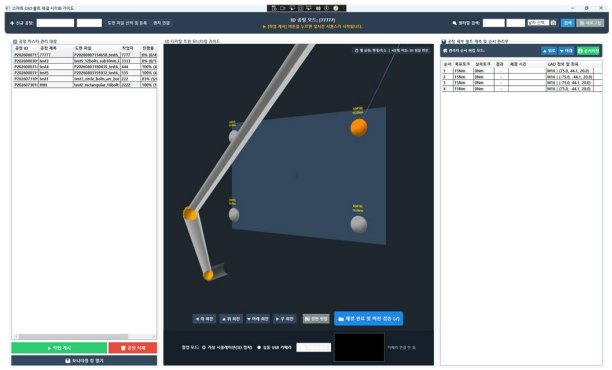


Fig. 2. Main HMI of the Proposed System

Fig. 2는 구현된 메인 HMI 화면을 보여준다. 중앙 영역에서는 CAD 데이터로 구성된 제품 형상과 체결 대상 볼트를 3D 공간에서 확인할 수 있으며, 우측 영역에서는 각 볼트의 목표 토크, 측정 토크, 위치 및 검증 결과를 확인할 수 있다. 체결 작업이 완료되면 디지털 토크 렌치에서 수신된 토크 값을 검증한 후 해당 체결 위치와 연결하여 디지털 트윈에 표시한다.

4.3. Digital Torque Wrench Interface and Verification

디지털 토크 렌치와 ESP32-C3 기반 통신 모듈의 Bluetooth 연결을 확인하였으며, 통신 오류 등에 의해서 토크 데이터 미수신이 발생하는 경우, 작업자가 화면에서 해당 볼트를 다시 선택하는 행위로 재작업을 진행할 수 있도록 하였다. 본 논문의 토크 검증에는 정상 및 오류 조건을 모사한 입력값을 사용하였다. 입력값은 현재 작업 대상의 목표 토크 및 허용 범위와 비교하여 판정하였고, 실제 렌치로 측정한 토크·회전각 데이터의 수신 및 검증 성능은 평가하지 않았다. 토크 데이터는 1초 이내로 결과를 수신하였고, 검증 시간은 약 1.5초 정상 조건을 만족하는 경우 1차 검증 결과를 OK, 그렇지 않은 경우 NOK로 저장한다. 토크 검증 결과는 이후 비전 검증 결과와 결합하여 최종 체결 결과를 결정한다. Fig. 3은 토크 렌치 작업 후 결과를 검증하는 프로세스를 보여준다.

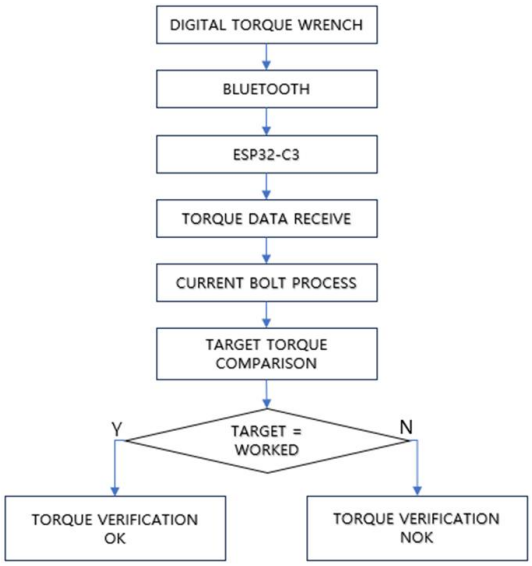


Fig. 3. Digital Torque Wrench Verification Process

4.4. Tightening Sequence and Process Management

CAD 데이터에서 추출된 체결 위치를 기반으로 체결 대상 목록과 기본적인 작업 순서를 구성하였다. 체결 순서는 볼트의 공간적 배치를 고려하여 생성하며, 생성된 순서는 HMI를 통해 확인하고 필요한 경우 작업자가 수정할 수 있도록 구현하였다. 공정 관리 모듈은 현재 작업 대상의 상태를 관리하고, 해당 대상의 검증이 완료되지 않은 경우 임의로 다음 작업 대상으로 전이할 수 없도록 구성하였다.

4.5. Vision Verification Implementation

비전 기반 체결 검증은 작업 전·후 이미지의 변화를 분석하여 체결 여부를 판정하도록 구현하였다. 현재 시스템에서는 실제 카메라가 연결되지 않았으므로 디지털 트윈의 상태를 이용하여 카메라 입력을 모사하였다. Fig. 4와 같이 체결 전 상태의 디지털 트윈 화면을 캡처하여 Before Image로 저장하고, 토크 렌치 작업 결과를 수신하면 토크 검증 후 해당 볼트의 상태를 디지털 트윈에 반영하고 동일한 위치에서 화면을 다시 캡처하여 After Image로 저장한다. 두 이미지의 비교에 앞서 이미지 간 위치 차이를 보정하기 위해 ECC(Enhanced Correlation Coefficient) 기반 이미지 정합을 수행하였다. 정합 된 이미지에서는 CAD 데이터로부터 얻은 체결 위치를 기준으로 ROI를 설정하고 해당 영역의 작업 전·후 변화를 분석하였다. 변화량이 설정된 판단 기준을 만족하면 체결 변화가 발생한 것으로 판정한다.

www.kci.go.kr

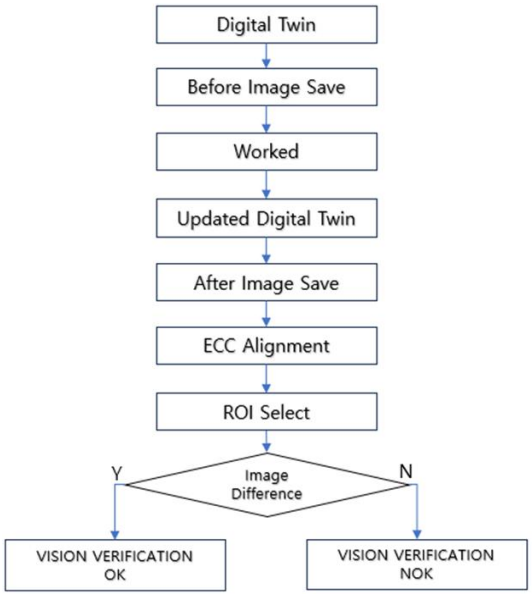


Fig. 4. Vision Verification Process

검증 결과는 OK 또는 NOK로 저장하며, 체결 전·후 영상에서 변화가 검출된 ROI 영역은 결과 이미지에 표시하여 별도의 작업 결과 파일로 저장할 수 있도록 구현하였다. 검증 결과는 식(1)과 같이 정의하였다. 체결 여부는 ROI 내 변화 픽셀 수를 기반으로 판단하며, 두 ROI 영상 간 변화량 D가 임곗값 τ 이상인 경우 체결 상태를 OK로 판정하고, τ 미만인 경우 NOK로 판정하였다. 임곗값 τ는 체결 전·후 영상에 대한 반복 실험을 수행하여 정상 체결과 오류 상황에서 나타나는 ROI 변화량의 분포를 비교하고, 두 조건을 구분할 수 있도록 결정하였다. 반복 실험은 동일한 체결 조건에서 정상 체결 30회, 미체결 상태 30회를 각각 반복해서 변화량을 측정하였다. 측정 결과, 임계값이 너무 작으면 미체결을 체결로 판단하는 횟수가 증가하고, 임계 값이 너무 크면 정상 체결을 미체결로 판단하는 횟수가 증가하였다. 미체결 상태의 변화량 최댓값과 실제 부품이 체결된 정상 상태의 변화량 최솟값 사이 격차가 생겨, 임곗값 설정 과정에서는 초기 기준값을 120으로 설정한 뒤, 정상 체결과 미체결 상태를 가장 정확히 분리하기 위해 임곗값을 10씩 순차적으로 하향 조정하며 판정 결과를 교차 검증하였다. 그 결과, 두 상태를 오검출 없이 완벽하게 분리할 수 있는 최적의 경계 값인 60을 최종 임곗값(τ=60)으로 선정하여 적용하였다.

$$V_V = \begin{cases} OK, & D(I_{before}, I_{after}) \geq \tau \\ NOK, & D(I_{before}, I_{after}) < \tau \end{cases} \quad \text{식(1)}$$

4.6. Dual Verification and Interlock Implementation

토크 검증과 비전 검증을 수행한 후 최종 검증 모듈에서 논리곱(AND)으로 결합하였다. 최종 검증 결과 V_{Final}은 $V_{Final} = V_T \wedge V_V$로 정의하였으며, V_T와 V_V는 각각 토크 검증 결과와 비전 검증 결과를 나타낸다.

두 결과가 모두 OK인 경우 최종 체결 결과를 PASS로 판정하고 현재 볼트를 완료 상태로 변경한 후 다음 체결 대상으로 전이한다. 반대로 하나 이상의 검증 결과가 NOK인 경우 현재 공정을 완료하지 않고 재작업 상태로 유지한다. 또한 CAD에서 정의된 전체 체결 대상 수와 완료된 체결 대상 수를 비교하여 체결 누락 여부를 확인한다. 전체 체결 대상이 완료되지 않은 상태에서는 새로운 공정으로의 전이를 제한하고 작업자에게 미완료 상태를 알리도록 구현하였다. 이를 통해 제안 시스템은 단순히 체결 결과를 기록하는 것이 아니라 검증되지 않은 체결 작업이 다음 공정으로 진행되는 것을 소프트웨어 수준에서 제한하는 공정 인터록을 구현하였다.

4.7. Rework and Result Management

체결 검증에서 오류가 발생한 경우 해당 볼트를 재작업 대상으로 지정한다. HMI에서는 오류가 발생한 볼트의 상태를 표시하고 작업자가 해당 위치와 검증 결과를 확인할 수 있도록 구성하였다. 재작업이 수행되면 해당 볼트에 대해 토크 검증과 비전 검증을 다시 수행하며, 두 검증 결과가 모두 정상인 경우에만 완료 상태로 변경한다.

각 체결 작업의 결과는 SQLite 데이터베이스에 저장하여 개별 볼트의 체결 결과와 공정 전체의 작업 이력을 관리하도록 구현하였다. 저장된 결과는 모니터링 기능을 통해 확인할 수 있도록 구성하였다.

V. Experimental Results and Analysis

5.1. Evaluation Environment and Method

본 연구에서는 제안한 CAD 기반 3D 디지털 트윈 체결 보증 시스템의 기능적 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션 기반 검증을 수행하였다. 검증 환경에서는 CAD 데이터로 구성된 3D 디지털 트윈을 이용하여 체결 대상 볼트와 공정 상태를 표현하고, 디지털 토크 렌치에서 수신된 체결 결과와 디지털 트윈에서 생성된 작업 전·후 이미지를 이용하여 체결 검증을 수행하였다. 토크 기반 검증에는 Bluetooth로 연결된 디지털 토크 렌치와 ESP32-C3 통신

www.kci.go.kr

모듈을 통해 실제로 수신된 작업 결과 데이터를 사용하였다. 반면 비전 기반 검증은 현재 실제 카메라가 연동되지 않은 상태이므로 디지털 트윈의 작업 전·후 상태를 각각 캡처하여 카메라 입력을 모사하는 방식으로 수행하였다.

검증 항목은 토크 렌치 작업 결과를 이용한 토크 기반 체결 검증, 작업 전·후 디지털 트윈 이미지의 ROI 비교를 이용한 비전 검증, 두 결과를 결합한 통합 체결 판정 및 공정 인터록 검증으로 구성하였다. 이를 통해 개별 검증 기능뿐만 아니라 체결 오류가 발생한 경우 해당 작업을 차단하고 정상적으로 검증된 경우에만 다음 공정으로 전이하는지를 확인하였다.

5.2. Vision Verification Simulation

비전 검증은 디지털 트윈에서 생성된 작업 전·후 이미지를 대상으로 수행하였다. 먼저 체결 전 상태의 디지털 트윈 화면을 Before Image로 저장하고, 체결 대상 볼트의 상태를 변경한 후 동일한 조건에서 After Image를 생성하였다. 이후 두 이미지의 위치 차이를 보정하기 위해 ECC 기반 이미지 정합을 수행하고, CAD 데이터에서 정의된 볼트 위치를 기준으로 ROI를 설정하였다. 정렬된 이미지의 ROI 영역에 대해 작업 전·후의 변화를 비교하여 체결 여부를 판정하였다.

Table 1. Vision-Based Tightening Verification

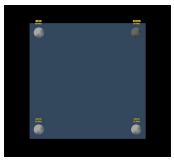
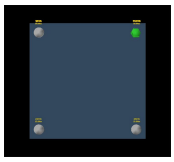
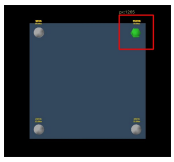
Before	After	Result
		

Table 1에서 'Before'는 체결 작업 이전의 이미지이며, 'After'는 체결 상태를 디지털 트윈에 반영한 이후의 이미지이다. 'Result'는 두 이미지의 ROI를 비교한 결과로, 변화가 검출된 영역을 표시하여 작업자가 검증 결과를 확인할 수 있도록 하였다. 이를 통해 디지털 트윈에서 생성된 작업 전·후 이미지와 CAD 기반 ROI 정보를 이용하여 체결 위치의 상태 변화를 검출할 수 있음을 확인하였다. 다만 본 결과는 실제 카메라 이미지를 통한 검증 결과가 아니라 디지털 트윈 이미지를 이용한 기능 검증 결과이다.

따라서 조명, 촬영 각도, 실제 제품 표면의 변화 등 물리적 환경에서 발생할 수 있는 이미지 변동에 대한 검증은 향후 연구에서 수행할 필요가 있다.

5.3. Torque Verification Results

토크 기반 체결 검증은 Bluetooth로 연결된 디지털 토크 렌치로부터 실제 수신된 작업 결과 데이터를 이용하여 수행하였다. 수신된 토크 값은 현재 작업 대상의 목표 토크 및 허용 범위와 비교하여 정상 여부를 판정하였다. 또한 토크 렌치에서 제공되는 작업 결과 정보를 함께 이용하여 체결 결과를 판단하였다. 토크 검증 결과는 해당 볼트의 공정 정보와 연결하여 디지털 트윈 및 HMI에 표시하고, 이후 통합 검증의 입력값으로 사용하였다. 토크 검증은 측정 토크 $T_{measured}$가 해당 볼트의 허용 토크 구간 $[T_{\min}, T_{\max}]$에 포함되는지를 기준으로 수행하였다. 여기서 $T_{\min}$과 $T_{\max}$는 각각 허용 토크의 하한과 상한을 나타낸다. $T_{\min} \le T_{measured} \le T_{\max}$를 만족하면 검증 결과를 OK로, 그렇지 않으면 NOK로 판정하였다. 이를 통해 측정된 토크 값을 단순히 기록하는 것이 아니라 현재 작업 대상과 해당 볼트의 목표 토크 정보를 연계하여 체결 결과를 판정할 수 있음을 확인하였다.

5.4. Integrated Verification and Interlock Results

본 연구에서는 토크 검증과 비전 검증을 각각 수행한 후 두 결과를 AND 조건으로 결합하였다. 최종 체결 판정에는 4.6절에서 정의한 $V_{Final} = V_T \wedge V_V$ 조건을 적용하였다. 두 검증 결과가 모두 OK인 경우에만 최종 결과를 PASS로 판정하고 다음 공정으로의 전이를 허용하였으며, 세부 판정 조건은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Integrated Verification Conditions

Torque	Vision	Final Result	Next Process
OK	OK	PASS	Allowed
OK	NOK	FAIL	Blocked
NOK	OK	FAIL	Blocked
NOK	NOK	FAIL	Blocked

반면 토크 검증이 정상이어도 비전 검증이 실패하거나, 비전 검증이 정상이어도 토크 검증이 실패하는 경우에는 최종 결과를 FAIL로 판정하고 다음 공정으로의 전이를 제한하였다. 이 결과는 제안 시스템이 단일 검증 결과만으로 체결 완료를 판단하지 않고, 토크 정보와 체결 위치의 이미지 정보를 함께 이용하여 체결 결과를 판정할 수 있음을 보여준다.

5.5. Error Scenario Simulation

제안 시스템의 공정 인터록 기능을 검증하기 위해 주요 작업 오류를 디지털 트윈 환경에서 의도적으로 발생시켜

www.kci.go.kr

시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 볼트 개수가 4개인 기구물을 대상으로 토크 오류, 체결 누락, 순서 오류에 대한 각각의 시나리오별로 100회 반복 수행하였다. 토크 오류 조건으로는 목표 토크 15IN-LB, 허용 범위 14~16.5IN-LB, 오류 토크 16.5IN-LB 초과로 설정하였고 순서 오류 조건으로는 정상 순서가 [1,2,3,4]이고 오류 순서를 [1,3,2,4] 순으로 진행하였다. 체결 누락은 4개의 볼트 중 1개를 미체결하는 방법으로 시뮬레이션하였다.

5.5.1. Normal Tightening

정상적인 체결 조건에서는 목표 토크 범위를 만족하는 토크 데이터와 체결 위치의 정상적인 이미지 변화가 모두 발생하도록 설정하였다. 토크 검증과 비전 검증 결과가 모두 OK로 판정되고, 최종 체결 상태가 PASS로 변경되었다. 이후 해당 볼트가 완료 상태로 변경되고 다음 체결 대상으로 전이되는 것을 확인하였다. Fig. 5는 목표 토크, 토크 값 및 검증 상태를 표시하는 UI의 일부이다.

Fig. 5. UI of the Tightening Result Display

5.5.2. Torque Error

목표 토크 범위를 만족하지 않는 토크 데이터를 입력하여 토크 오류 상황을 구성하였다. 시스템은 수신된 토크 결과를 NOK로 판정하고 해당 볼트를 미완료 상태로 유지하였다. 또한 다음 볼트로의 자동 전이를 제한하고 작업자에게 재작업이 필요함을 HMI에 표시하였다. 이를 통해 목표 토크를 만족하지 않는 작업이 정상 체결로 처리되지 않는 것을 확인하였다.

5.5.3. Tightening Omission

체결 누락 시나리오에서는 전체 체결 대상 중 일부 볼트가 완료되지 않은 상태에서 공정 완료를 요청하였다.

시스템은 CAD에서 등록된 전체 체결 대상 수와 완료된 체결 대상 수를 비교하여 두 값이 일치하지 않는 경우 공정 완료를 제한하였다. 이를 통해 개별 볼트의 검증 결과뿐만 아니라 전체 체결 대상의 완료 여부를 이용하여 체결 누락을 검출할 수 있음을 확인하였다.

5.5.4. Vision Verification Error

비전 검증 오류 시나리오에서는 토크 검증은 OK로 처리되지만 비전 검증 결과가 NOK가 되도록 오류 상황을 의도적으로 구성하였다. 이 경우 최종 AND 검증 결과는 FAIL로 판정되며, 토크 값이 정상적으로 측정되었더라도 해당 체결 작업을 완료 상태로 변경하지 않고 다음 공정으로의 전이를 제한하였다. 이를 통해 의도적으로 구성한 입력 조건에서 두 검증 결과가 모두 OK여야 공정을 통과하는 논리의 동작을 확인하였다.

디지털 트윈 기반 가상 검증을 통해 체결 순서 오류, 토크 오류 및 체결 누락 상황에서 제안 시스템의 오류 검출 및 공정 차단 기능을 Table 3과 같이 확인하였다.

Table 3. Verification of Process Error Detection and Blocking Performance under Virtual Scenarios

Metric	Torque Error	Tightening Omission	Sequence Error
Error Condition	Exceeds Allowable Torque	Shortage of Bolted Connections	Out-of-Sequence Execution
Total Trials	100	100	100
Detected Cases	100	100	100
Missed Cases	0	0	0
Functional Correctness Check	Y	Y	Y

VI. Conclusions

본 연구에서는 제조 현장에서 발생할 수 있는 볼트 체결 위치 및 순서 오류, 토크 오류, 체결 누락을 방지하기 위해 CAD 기반 3D 디지털 트윈과 토크·비전 이중 검증을 결합한 볼트 체결 보증 시스템을 설계하고 구현하였다. 제안 시스템은 CAD 데이터로부터 체결 대상의 위치 및 공정 정보를 구성하고, 3D 가상공간과 터치스크린 기반 HMI를 통해 체결 대상과 공정 상태를 관리할 수 있도록 하였다.

체결 검증을 위해 입력 토크의 허용 범위를 확인하는 토크 기반 검증과 작업 전·후 이미지의 ROI 비교를 이용한 비전 검증을 구현하였다. 두 검증 결과를 AND 조건으로 결합하여 모든 조건이 만족되는 경우에만 체결 완료로 판정하고 다음 공정으로 전이하도록 인터록을 구성하였다. 또한 체결 누락 및 공정 미완료 상태에서는 다음 공정으로의 전이를 제한하도록 구성하였다.

www.kci.go.kr

본 연구에서는 CAD 기반 디지털 트윈 환경에서 디지털 토크렌치 및 소프트웨어 인터록을 연계하여 체결 오류 상황에 대한 검증을 수행하였다. 다만 현재 단계에서는 실제 제조공정의 카메라, 로봇 팔 및 레이저 포인터가 시스템에 직접 연동된 상태에서의 실증 검증은 수행하지 않았다. 또한, 검증 대상을 볼트 4개로 한정해 체결 위치 수 증가에 따른 확장성을 입증하지는 못하였다. ROI 수와 필요한 시점이 증가하면 비교·정합 처리량이 늘어날 수 있으며, 복잡한 형상에서는 가려짐을 해소하기 위한 다중 시점 또는 추가 카메라 구성을 검토해야 한다.

향후 연구에서는 실제 작업환경에서 조명, 촬영 각도·거리, 제품 표면 상태 및 위치 오차에 따른 D와 임곗값의 민감도를 확인하고, 단독 검증과 이중 검증의 오검출·미검출 결과를 비교하는 데 초점을 두고자 한다. 이를 통해 본 논문에서 확인한 기능적 동작과 실제 제조 환경에서의 성능을 구분하여 평가할 수 있다.

REFERENCES

[1] A. Fau, M. Ghobrial, P. Seitier, P. Lagarrigue, M. Galaup, A. Daidie, and P. Gilles, “Enhancing Performance in Bolt Torque Tightening Using a Connected Torque Wrench and Augmented Reality,” Materials Research Proceedings, Vol. 54, pp. 1982–1991, 2025. DOI: 10.21741/9781644903599-213

[2] S. Shingo, Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System, Productivity Press, Cambridge, MA, 1986.

[3] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

[4] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, “Digital Twin-driven product design, manufacturing and service with big data,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94, pp. 3563–3576, 2018. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

[5] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, “Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, 101837, 2020, DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

[6] S. Shingo, Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System, Productivity Press, 1986.

[7] ASME, ASME PCC-1-2022: Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly, American Society of Mechanical Engineers, 2022.

[8] L. Zhu, A.-H. Bouzid, and J. Hong, “A Novel Methodology to Optimize the Tightening Sequence in Bolted Flange Joints,” Proceedings of the ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2019-93062, 2019.

[9] I. Coria, M. Abasolo, I. Olaskoaga, A. Etxezarreta, and J. Aguirrebeitia, “A new methodology for the optimization of bolt tightening sequences for ring type joints,” Ocean Engineering, vol. 129, pp. 441–450, 2017. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.10.049.

[10] C. Wang, N. Wang, S.-C. Ho, X. Chen, and G. Song, “Design of a New Vision-Based Method for the Bolts Looseness Detection in Flange Connections,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 2, pp. 1366–1375, 2020. DOI: 10.1109/TIE.2019.2899555.

[11] A. J. Rajan, K. Jayakrishna, T. Vignesh, J. Chandradass, and T. T. M. Kannan, “Development of computer vision for inspection of bolt using convolutional neural network,” Materials Today: Proceedings, vol. 45, Part 7, pp. 6931–6935, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.372.

[12] W.-C. Chang, “Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 50, pp. 102–113, 2018.

[13] G. D. Evangelidis and E. Z. Psarakis, “Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 30, no. 10, pp. 1858–1865, 2008.

www.kci.go.kr

Authors

Hee-Rak Lee received an M.S. degree in Software Engineering from Kongju National University, Korea, in 2003 and completed his Ph.D. coursework in 2013. He is interested in software engineering, Torque Guarantee and computer Vision.

Jae-Woong Kim received the B.S. degree in Electronic Computer Science from Chung-Ang University, Korea, in 1983, the M.S. degree in Computer Engineering from Chung-Ang University, Korea, in 1988, and the Ph.D. degree in Computer Engineering from Daejeon University, Korea, in 2000. Dr. Kim joined the faculty of the Department of Software at Kongju National University, Korea, in February 1992. He is currently a Professor in the Department of Software at Kongju National University. He is interested in software engineering, big data, and multimedia engineering.

Won-young Jeon received the B.S. degree in Health Science from Dongnam Health University, Korea, in 2019, and the Ph.D. degree from Kongju National University, Korea, in 2026. Dr. Jeon joined the faculty of the Department of Software at Kongju National University, Korea, in March 2026. She is currently a faculty member in the Department of Software at Kongju National University. She is interested in artificial intelligence, big data, LLM, and image processing.

www.kci.go.kr