
Global Report

건축물 조립시공을 위한 자동화 및 로봇기술의 종합적 검토

1. 개요
2. 소개
3. 설계 및 관리
4. 로봇 시공 및 검사
5. 자율 운송
6. 자동 조립 및 시공
7. 결론

1. 개요

건축물의 건설은 원시 도구의 사용에서부터 기계의 사용으로 발전해 왔으며 자동화하는 경향으로 변하고 있다. 프로세스의 자동화와 로봇틱스는 건설의 효율성, 정확성 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 반면에 건설공사에서 구조물의 조립화는 생산성을 높이고 기존 건설 프로세스의 환경 영향을 완화하기 위해 전 세계적으로 점점 더 많이 채택되고 있다. 따라서 자동화 및 조립식 기술의 결합과 적용은 건설 산업에 새로운 발전을 가져올 수 있다. 본 논문에서는 이와 관련하여 최신 개발사례, 도전과제 및 미래 동향을 포함하여 건축 구조물의 조립화 시공을 위한 자동화 기술의 적용에 관한 종합적 검토 결과를 제공코자 한다. 건설 순서에 따라 다음과 같은 5가지 단계에 대해 다루고자 한다. 즉, 설계, 공사관리, 로봇 제조, 자율 운송 및 건축 구조물 자동화 조립이 그것이다. 본 논문에서는 건축 구조물의 조립시공에 비해 광범위한 자동화 기술의 사용이 선호되며, 연결 혁신을 통해 도입된 로봇 건설을 위한 설계가 복잡한 작업을 피하고 로봇조립 프로세스의 효율성을 향상시키는 수단으로 유용할 수 있다는 결론을 내리게 되었다.

2. 소개

로봇은 현재 산업용, 의료분야 수술용, 군사 및 농업용 등을 포함하여 많은 분야에 사용되고 있다. 이러한 기술은 특히 일부 건설 활동이 상대적으로 위험하고 반복적이며 기술이 덜 요구된다는 점을 고려할 때 비용, 시간 및 리스크를 줄이기 위해 건설용으로 선호될 가능성이 있다. 또한 컴퓨터 지원 및 자동화 기술을 사용하여 건설의 정확성을 향상시키고 로봇 건설을 위한 정보를 디지털화 할 수 있다. 보다 구체적이고 관련 적용 사례로는 1985년 Warszawski and Sangrey가 본문 참고문서 [6]에서 처음 제안한 바와 같이 건축물 건설에 로봇 기술을 사용하는 것이고 이렇게 하면 누락, 실수, 게으름 및 부상과 같은 건설 부문에서의 사람이 만드는 여러 실패 요인들을 제거하게 된다. 이러한 요인들은 장기적으로 기존의 건설 방법보다 더 경제적이고 신뢰성이 있는 로봇 기술에 대한 선호로도 이어질 수 있다. 로봇 기술 사용은 또한 사고와 소송의 리스크도 제거할 수 있다. 결과적으로 로봇 건설의 큰 흐름이 다가올 것을 예측할 수 있다.

3. 설계 및 관리

3.1 건축설계

건축설계는 모든 건설 프로젝트의 최초의 작업이다. 건축가는 건물의 형태, 기능, 일광, 배관시스템 및 전기시스템에 대한 방안을 구체화시킨다. AutoCAD, Autodesk Revit, Grasshopper 또는 Rhino3D와 같은 CAD 소프트웨어는 후속 시뮬레이션 및 분석을 위한 디지털 3D 모델을 만드는데 사용된다. 건물의 일광은 3D 모델과 일광 분석 도구(Radiance and DAYSIM)를 사용하여 분석할 수 있다. 또한 배관 형상을 기반으로 충돌 감지를 위해 배관의 레이아웃을 시뮬레이션 할 수 있으며 건축가들이 공기조화설비 설계, 건물의 에너지 절약 설계 및 시각화 작업을 하는데 추가적인 건축설계 소프트웨어를 사용하면 도움이 된다. 건축설계 작업은 설계 소프트웨어를 사용하여 자동으로 분석, 최적화 및 완료될 수 있다. 끝으로 실내 탐색 및 기타 로봇 작업과 같은 추가적인 관리 및 로봇 애플리케이션을 위해 설계를 BIM 시스템에 입력할 수 있다.

3.2 구조 설계

구조 설계는 기계적 분석 결과 및 관련 규정에 따라 부재의 특성, 위치 및 규격 구조체에 맞게 사용될

수 있는 재료를 결정하는 프로세스이다. 건축설계 및 해석에 맞게 구조 엔지니어를 지원하기 위한 STAAD, Etabs, SAP 등과 같은 구조 해석 및 설계 소프트웨어가 개발되어 있다. 이 소프트웨어는 건축물 건설에 사용될 수 있는 기계적 특성과 더불어 방대한 재료 정보를 제공한다. 다양한 하중 요건에 따른 건물의 탄성 및 소성 반응을 계산할 수 있다. 구조 엔지니어에게 부재 및 보강재에 대한 규격이 제안되지만 일반적으로 많은 구조 설계 도구들은 대표적인 설계하중에 따른 반응값만을 제공한다. 추가 분석작업을 위해 Marc, Abaqus, Ansys 및 기타와 같은 유한요소 방법(FEM) 소프트웨어가 구조체의 기계적 성능과 동적 반응, 부재 또는 구조체에 열 전달 등을 분석하는데 사용될 수 있다. 극한하중 조건(지진, 화재 및 충격하중)에서 구조체의 붕괴 매커니즘도 FE 접근방식을 사용하여 분석할 수 있다. 이 소프트웨어를 사용하면 시공 전에 다양한 하중 시나리오에 따른 구조 성능을 평가할 수 있다. 또한 부재 및 보강재의 규격을 최적화 한 다음 로봇 제조 및 조립을 위해 BIM 시스템으로 그 정보를 보낼 수 있다. 예를 들어, 본문 참고문서 [32]에서 Eversmann씨 등은 목구조 부재의 단면을 최적화하기 위해 FEM을 사용하였다. 최적화 작업으로 나온 부재 데이터를 집계하고 절단, 천공 및 부재 운반과 같은 로봇 작업을 제어하기 위해 Python script가 작성되었다.

3.3 건설 관리

BIM은 CAD의 방법론일 뿐만 아니라 사실상 건설 계획수립, 프로세스 모니터링, 데이터 교환 및 기타 잠재적인 목적을 포함하여 건설관리를 위한 하나의 저장소에 더 가깝다. 원래 BIM 개념은 1970년대로 거슬러 올라갈 수 있지만 1992년에 Van Nederveen과 Tolman[37]에 의해 추가적인 개념인 건축정보모델링(architectural information modelling)이 제안되었다. 이 개념의 적용은 더 많은 관심을 끌었으며 큰 진전을 이루었다. BIM의 목표는 전통적인 건설 정보(청사진 및 공사진행 보고서)를 디지털화하고 건설 관리 접근을 강화하는 것이다. 건설 프로젝트가 로봇화됨에 따라 BIM은 로봇을 직접적으로 관리하고 소통하는 가장 효율적인 방법이 될 수 있을 것이다.

4. 로봇 시공 및 검사

4.1 로봇 제조

조립식 구조체 및 비구조용 부재는 보다 친환경적인 해법으로 품질을 향상시키기 위해 디지털 청사진을 통해 제조될 수 있다. 이런 방식으로 건축 부재 제조 절차는 시간적, 안전적 및 비용적 측면에서 보다 효과적이 된다. 이러한 조립식 부재는 목재, 콘크리트, 강재, 점토 및 플라스틱과 같은 다양한 재료를 사용하여 제작될 수 있다[32, 45, 46].

CNC(Computer Numerical Control - 컴퓨터 수치제어) 기술은 제조시 구성부재의 품질(치수 정밀도 및 품질 일관성)을 제어하는데 주로 사용되며 로봇 시스템과의 상호 작용을 위한 플랫폼으로도 사용될 수 있다. CNC를 사용하여 제조 흐름을 자동화할 수 있다. 이 플랫폼을 사용하면 맞춤형 설계에 따라 특히 목재, 금속 및 플라스틱의 경우 대체 형태의 부재를 제작할 수 있다. 예를 들어 재료 이송 속도, 제작 치수 및 각 로봇 작업의 순서가 공장에서 CNC를 사용하여 관리될 수 있다. 다양한 건축 부재의 제작에 사용되는 로봇은 정확성을 향상시키고 실수를 방지하도록 설계되어 왔다. 또한 로봇은 조종하고 지속적으로 작업할 수 있어서 생산성이 높아지고 작업중단이 줄어들게 된다.

4.2 품질 검사

구조재 조립의 탁월한 장점이 있음에도 불구하고 조립제품의 품질을 적절히 확인하거나 관리하지 못하는 경우 그 효과는 부정적일 수 있다. 최종적으로 조립 부재는 국제 표준화기구 및 PC/PSC 콘크리트 학회의 기준과 같은 관련 지침에 따라 평가되어야만 한다.

전통적으로 도구 기반의 평가는 오류가 발생하기 쉽고 시간이 많이 걸리며 상당한 경험을 필요로 하는 프로세스인 수작업으로 이루어진다. 지난 10년 동안 이미지 기반의 기술은 조립제품의 균열 및 공극을 탐지하는데 사용되어 왔다. 그러나 조명 여건 측면에서 이러한 제조과정의 기술에 대한 정확도와 평판은 한계를 느끼게 만든다. 조명 여건으로 인한 오류를 방지하기 위하여 본문참고문서 [65]에서 김모씨 등은, 조립 제품의 품질을 확인하기 위해 지상파 레이저 스캐너(TLS)를 사용하는 완전히 자동화된 비접촉 측정 방법을 제안하였다. TLS 기반의 평가방식 결과는 조명 여건에 영향을 받지 않았으며 이미지 기반의 평가보다 더 정확하였다. 레이저 스캐닝 기술은 프리캐스트 콘크리트에서 철근의 위치를 추정하는 데에도 사용되었다. 레이저 스캐닝 기술과 BIM의 조합을 활용하여 조립식 부재의 품질과 수량을 확인함으로써 부재의 불일치 및 치수부족 등으로 인한 지연을 막을 수 있었다.

5. 자율 운송

공장에서 건설현장으로 조립식 부재를 운송하고 건설현장에서 하역 및 양중작업은 구조체의 조립과 시공에 필수적인 요소이다. 운전자 부족은 자주 전체 운송 계획을 망쳐버리고 재정보된 계획을 다른 사람들에게 제대로 설명하는데 많은 시간이 소요된다. 운송부문에서 이러한 사람에 의한 문제들은 BIM과 자율운송의 통합을 통해서 제거될 수 있다.

5.1 물류

조립식 구조 부재는 대부분 제조공장에서 생산되어 건설 현장으로 철도, 선박 또는 도로 운송수단에 의해 운반된다. 장거리 물류의 경우 철도 운송 및 선박 운송이 선호되는 옵션이다. 철도 운송은 1970년대에 처음으로 자동화되었다. 오늘날 ATO(Automatic Train Operation - 자동열차운전장치)는 많은 국가들의 철도 시스템에 통합되었다. 자동화의 등급에는 5가지(GoA ~ 4)가 있는데 GoA 4는 완전자동화 된 것을 의미한다. 2016년까지만 해도 전 세계 10개국 이상에서 여객열차에만 이러한 GoA 4가 적용되었다. 자율 속도 제어 시스템, 기관차 정밀 궤적추적 시스템 등과 같은 관련 기술이 고가이기 때문에 화물 운송에 널리 사용될 수 없었다. 그러나 2019년에는 세계 최초로 화물열차 자동화 네트워크(투자비용이 9억4천만 달러에 공기는 10년 이상 소요)가 서호주 필바라의 철광석 운송을 위해 운행되기 시작하였다. 철도 운송 시스템과 달리 선박 운송은 가시적인 경로를 사용하지 않는다. 선박은 네비게이션 시스템(GPS, Loran 및 전자해도 표시 및 정보 시스템)과 충돌 방지 시스템을 사용하여 운항한다. 이러한 기술을 통해 선박은 해상 경로를 따라 운항하고 비교적 자동화된 상태로 보다 안전하게 목적지에 도달한다.

5.2 현장 운송

건설 현장에서 자재와 흙을 운반하고 현장의 폐기물을 제거하는 것은 일반적으로 사람이 운전하여 이루어지고 있다. 그러나 이러한 작업은 반복적이고 지루하며 지치게 만들고 먼지가 발생한다. 이러한 현장 운송 작업은 기존 운반 형태의 진행 상황을 추적하고 관리하기가 어렵다. 대표적인 건설 사고로 2009년 발생한 건설중이었던 상하이 소재 13층 아파트 붕괴 사고로 근로자와 현장소장의 과실에 의한 것이었다. 현장에서 발생한 흙이 적절한 지대로 운반되지 않았고 제때에 현장에서 치워지지 않았기 때문이다. 따라서 비극이 발생하기 이전에 실수를 줄이기 위해 건설 관리상 거의 실시간으로 작업을 추적하는 것이 요구된다. 2016년에 Autonomous Solutions라고 하는 회사에서 생산성이 뛰어난 자율 운반 시스템에 연계될 수 있는 로봇 굴착기, 도저 및 트럭을 포함하여 여러 가지 관련 차량들을 출시하였다. 이 시스템을 통해 건설현장에서 차량의 위치와 운행이 효율적으로 추적되고 제어될 수 있다.

6. 자동 조립 및 시공

건축 부재가 건설현장에서 설치 장소로 운반될 때에 조립 로봇은 중앙관리 주체에 의해 공유되는 디지털 청사진에 따라 로봇의 작업을 시작한다. 건설현장에서 로봇에 의해 시공될 수 있는 벽돌쌓기, 구조재 설치, 도장작업 및 창문 설치와 같은 시간이 많이 소요되고, 반복적이며 고위험인 일들이 많이 있다. 조립 로봇은 그 기능에 따라 조적조 시공, 구조물 시공 및 인테리어 건축용으로 설계된 로봇과 같이 여러 부문으로 나눌 수 있다.

6.1 조적조

벽돌 쌓기 로봇은 로봇 건설에 사용되는 비교적 완성도 높은 기술의 결정체이다. 1990년대 초에 Pritschow씨 등은 최초로 벽돌 쌓기 로봇의 개념을 발표하였으며 후에 Andres씨는 최초의 조적 로봇 시스템을 개발하였다. 이후 연구원들은 벽돌 쌓기 로봇 시스템의 추적시스템, 조적쌓기 패턴과 인간-기계 상호작용(man-machine interaction) 기능을 최적화 시켰다. 최근에는 Hadrian X (로봇 팔을 가진 트럭) [110]과 SAM100 (로봇 팔과 내비게이션 로봇을 통합)[111]과 같은 벽돌 쌓기 로봇들이 건설 분야에 사용이 늘어나고 있다. 모바일 벽돌 쌓기 로봇은 정확한 수량의 벽돌을 가지고 디지털 3D 모델을 사용하여 작업하며 항상 계획을 따르므로 기존 작업 방법에 비하여 낭비가 적다. 벽돌 구조체의 시공에 로봇 팔을 사용하는 것 외에 Bruckmann씨 등은 조적 공사에 사용하기 위해 BIM을 통해 유도되는 케이블 병렬 구동방식의 로봇을 설계 하였다.

6.2 골격(Frame structures)

조립식 구조체는 인상적인 성능과 편리한 시공으로 인해 엔지니어들의 관심을 점점 더 많이 끌게 되었다. 조립식 부재의 품질은 앞서 언급한 고도로 자동화된 제어 및 검사 프로세스를 사용하여 공장 생산 단계에서도 보장될 수 있으며 건설현장에서 골격을 만들기 위해 필요한 것은 부재만 조립하면 된다. 전통적으로 조립식 부재는 크레인으로 제 위치까지 양중한 이후 부재와 부재의 연결은 작업자에 의해 수동으로 이루어진다. 작업자들이 단순한 보호 조치만으로 지상에서 이러한 현장의 과업을 완성해 나가는 것은 위험하다. 고도의 위험, 정확성 부족과 시간 낭비와 더불어 엄청난 탑재 하중과 부재의 크기로 인한 잠재적 문제점을 줄이기 위해 골격의 설치와 연결을 포함한 구조재의 조립은 부분적으로 로봇작업화 되어왔다. 와이어 연결 위치확인 시스템(wire-suspended positioning system)과 크레인은 본문 그림 3과 같이 강재 구조재 설치작업에 작업자를 지원하는데 사용된다. 예를 들어, 하나의 부재가 대략적인 위치로 양중되면 양중된 부재의 돌리기 및 자리잡기 작업은 모션 제어장치에 연결된 4개의 장력 와이어에 의해 이루어질 수 있다. 부재의 수평상태를 확인하기 위해 양중 부재위에 경사계가 설치되며 작업자가 원격으로 정확한 위치에 부재를 돌리고 자리잡게 하는 각도 등을 조정 가능하게 한다. 이상적으로는 조립 시스템이 관리 시스템에 연결될 때에 부재의 위치는 더 빠르고 정확하게 자동으로 조정될 수 있을 것이다.

6.3 건물 인테리어

벽체 도장, 내벽 판넬 설치, 창문 설치 및 표면 코팅과 같은 일을 포함하여 건물 인테리어 작업도 로봇이 지원할 수 있다. 내비게이션 시스템은 이러한 로봇이 지원하는 실내 공사형태의 핵심이다. 본문 [135]의 참고문서에서 Wei 와 Akinci 씨는 세 가지 실내 위치결정 절차를 연구하였다. 그것은 모션 기반의 방법, 신호 기반의 방법과 시각 기반의 방법이다. BIM과 실내 내비게이션의 통합으로 많은 실내 모바일 로봇이 자가 작동 자동화 로봇으로 발전되어왔다. 박모씨 등은 로봇 제어장치, ultra-wideband(UWB) 시스템, 추측항법시스템(deadreckoning system)과 모션 센서를 BIM 기반 경로 플래너와 통합하여 실내 내비게이션 시스템을 개발하였다. 이 통합 시스템은 BIM 모델에서 지도정보를

효율적으로 추출하고 모바일 로봇의 최단 경로를 계산하는 한편, 그 지도는 모션 센서의 데이터에 의해 조정 및 개선되기도 한다.

7. 결론

CAD/CAM 소프트웨어, BIM, 자동 또는 반자동 차량 및 로봇 장치와 같이 건설의 조립, 시공 분야에 자동화 기술을 적용하면 보다 빠르고 안전한 제조, 보다 나은 준공 시기의 예측, 현장의 품질 향상과 노동력 감소를 이룰 수 있다. 또한 로봇 및 관리 시스템으로 건설 공정을 추적 및 관리할 수 있다. 이 논문에서는 조립 및 시공 분야에서 이러한 기술(그리고 그 기술들의 통합)의 이점, 과제와 잠재력을 제시하였다.

설계 및 관리 부문에서 CAD/CAM 소프트웨어는 건축설계, 구조 설계 및 건설 공정을 최적화하기 위해 건축 프로젝트, 기계적 분석 및 건설관리에 사용되어 왔다. 또한 디지털 건설 정보를 제조공장의 자동화 장비, 건설현장의 자율주행 차량 및 로봇에 전송함으로써 설계 및 시공의 통합을 달성할 수 있다. 그러나 대부분의 로봇은 BIM 또는 관리시스템을 통해 네트워크에 연결되어 있지 않고 특정 작업은 여전히 사람이 작동하여 제어되고 있기 때문에 사전 제작 방법은 아직 완전 자동화된 건설 프로세스에 적용되고 있지 않다. 따라서 이러한 발전을 위한 디지털 건설 정보 모델의 형식은 표준화될 가능성이 있다.

제조과정에서 조립식 구조물의 부재들은 CNC 시스템을 사용하여 디지털 3D 모델에 따라 모양을 지정하고 주문 제작될 수 있다. 생산성을 향상시키고 조립식 부재의 품질을 감지하기 위해 다양한 종류의 로봇이 제조공정에 사용될 수도 있다. 이러한 로봇기술과 BIM의 통합으로 구성 부재의 불일치 및 부족함 등으로 인한 건설 공정의 지연은 해소될 가능성이 있다.

운송부문에서 자율주행 차량은 노동력 감소와 운전자 실수를 줄이는데 사용될 수 있다. 또한 건설 현장의 자재 및 폐기물 위치를 명확하게 보여주는 자율 운반 시스템을 통해 각 차량의 실시간 위치와 작동상태는 추적되고 제어될 수 있다. 그러나 ATO 기술은 아직까지 제한된 곳에서만 적용되고 있으며 자율 기술은 널리 보급되지 있지 않은 상태이다. 반면에 UAV 기술은 페이로드 문제(payload issue)만 해결되면 더 많은 발전 가능성이 엿보인다.

건축 구조 부재 조립의 경우 부재의 엄청난 중량과 비교적 건설현장의 비 친환경적인 것으로 인해 로봇은 반복적이고 위험하며 벽돌쌓기, 구조부재의 설치 및 벽체 도장작업과 같은 높은 수준의 정밀도가 요하는 많은 일에 작업자를 지원하기 위해 사용되어 왔다. 한편 로봇은 아직 복잡한 조립작업을 처리할 수 없는 상태이다. 따라서 건설용 로봇의 효율성과 적용 가능성을 향상시키기 위해 로봇 친화적인 구조, 조인트 및 엔드 이펙터(end effectors)의 설계를 포함한 로봇 건설을 위한 설계에 초점을 맞출 필요가 있다.

<원문제목> An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction

<원문출처> Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, VIC 3800, Australia