

BIM 기반 토목 기초 철근 자동 배근 및 로봇 제작 데이터 변환을 통한 디지털 트윈 동기화 기법 연구

윤종규, 박민호*

인공지능 IT 융합학과, 숭실대학교

jgyun@soongsil.ac.kr, *mhp@ssu.ac.kr

Integrating BIM-based Automatic Rebar Placement and Digital Twin Synchronization for Civil Foundations via Robotic Fabrication Data Conversion

Jong-Kyu Yun, Min-Ho Park*

Dept. of Artificial Intelligence IT Convergence, Soongsil Univ.

요약

토목 기초 공사는 구조물의 안정성과 시공 품질을 좌우하는 핵심 공정으로, 철근 배근의 정확성이 특히 중요하다. 그러나 현장의 철근 배근 작업은 여전히 도면을 기반으로 한 인력 중심 방식에 의존하고 있으며, 이는 품질 편차와 작업 효율 저하로 이어지고 있다. 최근 로봇을 활용한 건설 자동화 기술이 주목받고 있으나, 철근 배근 공정에 로봇을 적용하기 위해서는 사람이 도면을 해석하듯 작업하는 기준 방식에서 벗어나, 로봇이 직접 해석하고 실행할 수 있는 데이터 구조로의 전환이 요구된다. 본 논문은 토목 기초 철근 배근 작업의 로봇 자동화를 목표로, 구조 설계 결과로부터 로봇이 직접 실행 가능한 철근 배근 데이터를 생성하고 이를 디지털 트윈 환경과 연계하는 데이터 중심 접근 방법을 제안한다. 제안 기법은 철근 배근 문제를 로봇 기준 그리드 상의 이산 배치 문제로 재정의하고, 피복 두께, 철근 간격, 기둥 수직철근과의 간섭 조건을 명시적인 규칙과 좌표 제약으로 정형화한 자동 배근 알고리즘을 포함한다. 또한 제안된 알고리즘을 Python 기반 프로그램과 의사코드 형태로 제시함으로써 실제 구현 가능성과 재현성을 확보하였다. 아울러 자동 배근 및 로봇 시뮬레이션을 통해 검증된 철근 배근 결과를 웹 기반 디지털 트윈 환경과 동기화하여, 설계-제작-시공-검증 단계 간 데이터 정합성을 유지하는 폐루프(Closed-loop) 프로세스를 제안한다. 이를 통해 기존의 단방향 시공 프로세스를 개선하고, 로봇 시공 결과를 다시 설계 및 관리 단계로 연계하여 활용할 수 있는 기반을 마련하였다. 본 연구는 토목 기초 철근 배근을 로봇 자동화와 디지털 트윈을 연결하는 핵심 시공 데이터로 재정의하였다는 점에서 의의를 가지며, 향후 실제 로봇 시공 환경을 포함한 건설 자동화 기술 확장의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

토목 기초 공사는 구조물 전체 하중을 지지하는 핵심 공정으로, 철근 배근의 정확성과 시공 품질이 구조적 안전성에 직접적인 영향을 미친다. 이에 따라 철근 배근의 합리화와 시공 품질 향상을 위한 다양한 자동화 및 디지털화 연구가 지속적으로 수행되어 왔다.[1] 그러나 실제 현장의 철근 배근 작업은 여전히 도면을 기반으로 한 인력 의존적 방식으로 수행되고 있으며, 숙련도에 따른 품질 편차와 작업 효율 저하 문제가 반복적으로 지적되고 있다.[5] 최근 건설 산업 전반에서는 로봇을 활용한 시공 자동화 기술이 주목받고 있으며, 특히 철근 케이지 제작이나 배근 작업을 대상으로 한 로봇 적용 연구가 활발히 진행되고 있다.[3] 일부 연구에서는 철근 설치 순서 최적화나 협동 로봇을 활용한 배근 가능성을 제시하였으나, 주로 제작 공정이나 단위 작업 자동화에 초점을 두고 있어 설계 단계와의 통합에는 한계가 존재한다.[2][7]

한편 BIM 을 기반으로 한 철근 모델링 및 관리 기법은 철근 정보의 디지털화를 가능하게 하였으며, OpenBIM 환경에서 철근 데이터를 전 생애주기로 관리하기 위한 프레임워크도 제안되고 있다.[4] 또한 BIM 과 디지털 트윈을 결합하여 철근 배근 상태를 실시간으로 모니터링하거나 시공 결과를 관리하려는 시도도 보고되고 있다.[9] 이러한 연구들은 철근 정보를 단순한 모델링 대상이 아닌 시공 및 관리 단계까지 확장 가능한 데이터로 활용하려는 방향성을 제시한다는 점에서 의미가 있다. 그러나 로봇을 활용한 철근 배근 자동화를 실현하기 위해서는, 사람이 도면을 해석하듯 작업하는 기준 방식에서 벗어나 로봇이 직접 해석하고 실행할 수 있는 데이터 구조로의 근본적인 전환이 요구된다. 기존 BIM 모델은 철근을 생략하거나 도면 참조 수준으로만 표현하는 경우가 많아, 로봇 제어 및 시공 시뮬레이션에 직접 활용하기에는 제약이 존재한다.[6] 또한 기존의 BIM 기반 배근 최적화 연구들은 연속 좌표 기반 접근이 주를 이루어, 로봇 작업 환경에서 요구되는 이산 좌표 및 시공 제약을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.[8]

본 연구는 이러한 문제의식을 바탕으로, 토목 기초 철근 배근을 로봇 자동화하기 위한 데이터 중심 접근을 제안한다. 구조 설계 결과로부터 철근 자동 배근을 수행하고, 이를 로봇 제어 및 시뮬레이션이 가능한 IFC 데이터로 변환하며, 검증 결과를 디지털 트윈 환경과 연계하는 통합적인 프레임워크를 구축하는 것을 연구의 목적으로 한다. 이를 통해 설계-제작-시공-검증 단계 간 데이터 정합성을 확보하고, 로봇 기반 철근 배근 자동화를 위한 실질적인 적용 가능성을 제시하고자 한다.

II. 제안 기법

본 연구는 토목 기초 철근 배근 작업의 로봇 자동화를 목표로, 구조 설계 결과로부터 로봇이 직접 실행 가능한 철근 배근 좌표와 시공 시퀀스를 자동으로 생성하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 철근 배근 결정을 규칙 기반 알고리즘으로 정형화하고, 이를 Python 기반 프로그램으로 구현하여 로봇 제어 및 시공 시뮬레이션에 활용하는 것을 핵심으로 한다. 본 절에서는 알고리즘의 핵심 개념은 수식으로 정의하되, 실제 동작 원리는 의사코드 형태로 상세히 기술한다.

토목 기초 구조물의 철근 배근은 콘크리트 피복 두께, 철근 간격, 정착 조건과 같은 구조 설계 규칙을 만족해야 하며, 동시에 기둥 수직철근과의 간섭, 시공 순서, 로봇 작업 공간과 같은 현실적인 제약 조건을 고려해야 한다. 특히 로봇 자동화를 전제로 할 경우, 이러한 조건들은 사람이 도면을 해석하며 판단하는 암묵적 지식이 아니라, 명확한 좌표, 간격 및 순서 정보로 정의된 데이터로 표현되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 철근 배근 문제를 로봇 기준 그리드 상의 이산 배치 문제로 재정의하였다.

자동 배근 알고리즘의 입력은 기초 폭 길이(L), 콘크리트 피복 두께(c), 사용자 정의 철근 간격(s), 기둥 폭 길이(P), 기둥 수직철근 개수(m_v), 철근 지름(d), 충돌 허용오차(e), 로봇 기준 그리드 간격(B), 배근 시작 최소 위치(x_{min})으로 구성된다. 이때 철근 배근 결과는 연속 좌표가 아닌, B 단위의 그리드 좌표로 제한된다.

기둥 수직철근은 기초 철근 과정에서 주요 충돌 요소로 작용하므로, 먼저 충돌 회피 영역을 정의한다. 기둥 내부 유효 길이를 $L_u = P - 2c$ 로 두고, 기둥 외곽을 따라 배치되는 수직철근의 중심 좌표 집합을 V 로 정의한다. 각 수직철근 중심점에 대해 충돌 허용오차 e 를 적용하여 충돌 금지 구간을 $(v-e, v+e)$ 로 정의하고, 이들의 합집합을 충돌 집합 C 로 구성한다. 이후 로봇 기준 그리드 좌표 중 충돌 집합에 포함되지 않는 좌표들의 집합을 허용 좌표 집합 S 로 정의한다.

허용 좌표 집합 S 를 기반으로 한 전체 배근 절차는 Algorithm 1에 요약되어 있다. Algorithm 1은 기초 좌측에서 우측 방향으로 철근을 순차적으로 배치하며, 간격 제약과 충돌 회피 조건을 동시에 만족하도록 설계된 자동 배근 알고리즘을 나타낸다.

Algorithm 1. Automatic grid-based rebar layout

```
def generate_rebar_layout(
    footing_length, cover_thickness, user_spacing,
    pedestal_length, vertical_rebar_amt,
    rebar_diameter, grid=B, start_min=x_min
):
```

```

# 1. Compute vertical rebar positions
V = compute_vertical_rebars(pedestal_length,
                             cover_thickness,
                             vertical_rebar_amt,
                             rebar_diameter)
C = build_clash_intervals(V, tolerance=e)

# 2. Build admissible grid positions
x_star = floor_to_grid(footing_length, grid)
Omega = [
    x for x in grid_range(start_min, x_star, grid)
    if not in_clash(x, C)
]

# 3. Sequential forward placement
bars = []
bars.append(first_valid(Omega, start_min))
while True:
    candidate = find_next_bar(
        last=bars[-1],
        Omega=Omega,
        min_step=grid,
        max_step=user_spacing,
        x_star=x_star
    )
    if candidate is None:
        break
    bars.append(candidate)

# 4. End snap
bars[-1] = snap_to_end(bars, Omega, x_star)

# 5. Global right shift
while can_shift_right(bars, Omega, grid, x_star):
    bars = [x + grid for x in bars]

# 6. Tail tightening
tighten_tail(bars, user_spacing, Omega, grid)

# 7. Optional extra bar
if need_extra_bar(bars, footing_length,
                   cover_thickness, user_spacing):
    append_extra_bar(bars, Omega, grid, x_star)

return bars

```

Algorithm 1에 따라 허용 좌표 집합 S 내에서 계산된 철근 배근 결과는 이후 BIM 모델로 생성된다. Fig. 1은 제안된 자동 배근 알고리즘을 적용하여 생성된 토목 기초 철근 배근 BIM 모델을 보여준다. 알고리즘에 의해 계산된 철근 위치와 간격이 기초 형상 및 기둥 수직철근 조건을 만족하도록 배치된 것을 확인할 수 있다.

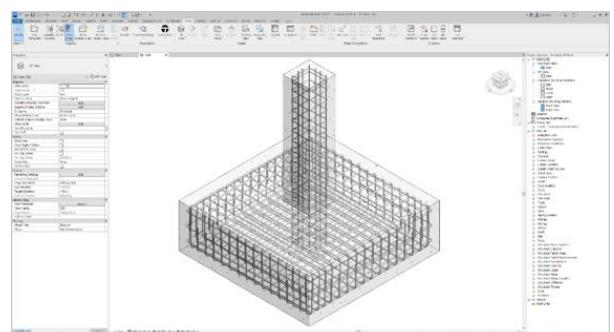


Fig. 1. BIM-based rebar layout generated by the proposed algorithm

또한 Fig. 2는 해당 배근 결과를 로봇 제어가 가능한 IFC 형식의 데이터로 변환하고, 이를 기반으로 수행한 철근 배근 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이를 통해 생성된 배근 데이터가 로봇 시공 관점에서 실행 가능함을 사전에 검증하였다.

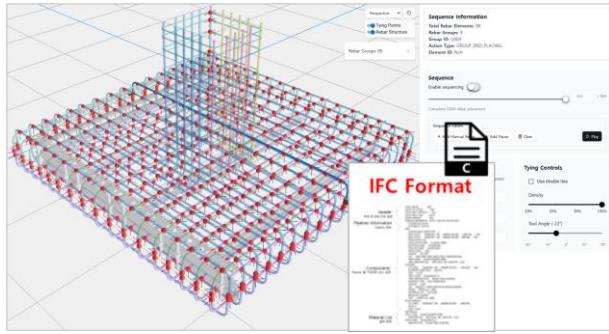


Fig. 2. Robotic simulation based on IFC-converted rebar data

Algorithm 1 은 본 연구에서 개발한 실제 프로그램 코드의 구조를 반영한 것으로, 제안 기법의 구현 가능성을 보여준다. 본 의사코드는 본 연구에서 개발한 실제 프로그램 코드의 구조를 그대로 반영한 것으로, 알고리즘의 구현 가능성을 명확히 보여준다.

이와 같이 제안된 기법은 철근 배근 문제를 로봇 기준의 이산 좌표 배치 문제로 정식화하고, 실제 구현 가능한 알고리즘으로 제시함으로써 로봇 자동화 적용 가능성을 명확히 한다. 생성된 철근 배근 결과는 로봇 제어 데이터로 변환되어 시공 시뮬레이션을 통해 검증되며, 그 결과는 다음 장에서 설명하는 웹 기반 디지털 트윈 동기화 단계로 연계된다.

III. 디지털 트윈 동기화

본 연구에서는 자동 배근 및 로봇 시뮬레이션을 통해 검증된 철근 배근 결과를 웹 기반 디지털 트윈 환경과 동기화함으로써, 설계-제작-시공-검증 단계 간 데이터 정합성을 확보한다. 디지털 트윈은 단순한 시각화 모델이 아니라, 로봇 시공 결과와 검증 정보를 지속적으로 반영하는 데이터 허브로 정의된다. 이를 위해 IFC 기반 철근 모델을 glTF 형식으로 변환하여 웹 환경에서 경량화된 3 차원 모델로 표현한다. 변환 과정에서는 철근 객체의 형상 정보와 함께 원본 IFC 속성자를 유지하여, 웹 뷰어 상의 객체와 서버 측 데이터 간의 연계를 가능하게 한다. 철근의 이름, 길이, 배근 순서, 제작 상태와 같은 속성 정보는 별도의 데이터 구조로 관리되며, 필요 시 디지털 트윈 환경에서 실시간으로 조회 및 갱신될 수 있다. 웹 기반 디지털 트윈 모델에서는 철근 객체 단위로 배근 상태와 제작 및 시공 진행 상황을 시각적으로 확인할 수 있으며, 로봇 시뮬레이션 결과를 반영하여 시공 가능 여부와 검증 상태를 함께 표현한다. 이러한 시각화는 철근 배근 상태를 직관적으로 이해할 수 있도록 지원하며, 시공 단계에서 발생할 수 있는 문제를 사전에 파악하는 데 기여한다. 또한 디지털 트윈 환경에서의 검증 결과는 다시 BIM 모델의 속성으로 피드백된다. 이를 통해 기존의 설계에서 시공으로 이어지는 단방향 프로세스를, 설계-자동 배근-로봇 시뮬레이션-디지털 트윈-피드백으로 구성된 폐루프 구조로 전환할 수 있다. 이러한 폐루프 구조는 철근 배근 작업의 로봇 자동화를 위한 지속적인 데이터 정합성 유지와 공정 신뢰성 확보에 중요한 역할을 한다. Fig. 3 는 로봇 시공 검증이 완료된 철근 배근 데이터를 웹 기반 디지털 트윈 환경에서 시각화한 결과를 보여준다. 철근 객체 단위의

형상과 속성 정보를 확인할 수 있으며, 설계 및 시공 단계 간 데이터 연계를 지원한다.

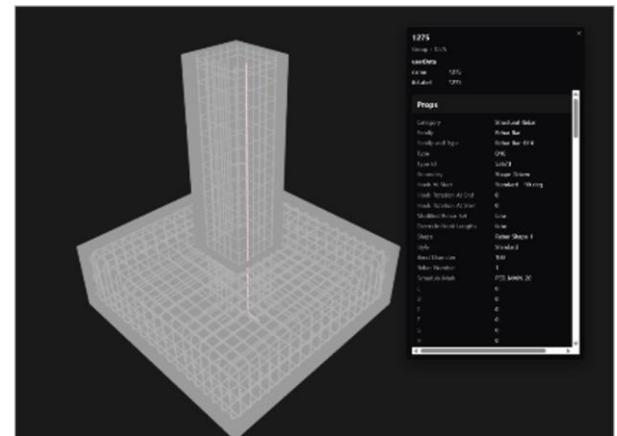


Fig. 3. Web-based digital twin visualization of the rebar layout

결과적으로 본 연구에서 제안한 디지털 트윈 동기화 기법은 철근 배근 정보를 로봇 자동화와 연계된 핵심 시공 데이터로 재정의하고, 토목 기초 공정의 디지털 전환을 실질적으로 지원하는 기반을 제공한다.

IV. 결론

본 논문은 토목 기초 철근 배근 작업의 로봇 자동화를 목표로, 구조 설계 결과로부터 로봇이 직접 실행 가능한 철근 배근 데이터를 생성하고 이를 디지털 트윈 환경과 연계하는 통합적인 방법론을 제안하였다. 기존의 철근 배근 공정이 도면 해석과 현장 인력의 경험에 의존해 왔던 한계를 지적하고, 철근 배근 문제를 로봇 기준의 이산 좌표 배치 문제로 재정의함으로써 자동화 적용을 위한 데이터 구조적 기반을 마련하였다. 제안 기법에서는 콘크리트 퍼복, 철근 간격, 기둥 수직철근과의 간섭 조건을 명시적인 규칙과 좌표 제약으로 정형화하고, 이를 바탕으로 실제 구현 가능한 철근 자동 배근 알고리즘을 제시하였다. 특히 로봇 기준 그리드를 도입하여 배근 좌표를 이산화하고, 충돌 회피, 간격 보정, 엔드 커버 보정을 단계적으로 수행함으로써 로봇 시공에 적합한 배근 결과를 생성할 수 있음을 보였다. 또한 제안된 알고리즘을 Python 기반 프로그램과 의사코드 형태로 제시함으로써, 개념 제안에 그치지 않고 실제 구현 가능성과 재현성을 명확히 하였다. 아울러 자동 배근 및 로봇 시뮬레이션을 통해 검증된 철근 배근 결과를 웹 기반 디지털 트윈 환경과 동기화함으로써, 설계-제작-시공-검증 단계 간 데이터 정합성을 유지하는 폐루프(Closed-loop) 프로세스를 제안하였다. 이는 기존의 설계에서 시공으로 이어지는 단방향(Open-loop) 프로세스를 개선하여, 로봇 시공 결과와 검증 정보를 다시 설계 및 관리 단계로 환류할 수 있는 구조를 제공한다는 점에서 의의가 있다.

본 연구의 결과는 토목 기초 철근 배근을 단순한 모델링 대상이 아닌 로봇 자동화와 디지털 트윈을 연결하는 핵심 시공 데이터로 정의하고, 이를 위한 구체적인 구현 방법을 제시한다. 향후 연구에서는 제안 기법을 다양한 기초 형상 및 실제 로봇 시공 환경에 적용하여 실증 검증을 수행하고, 현장 센서 데이터 및 시공 이력과의 연계를 통해 디지털 트윈의 실시간

동기화 수준을 고도화하는 방향으로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Kim J., Park S., Lee H., and Choi M., "Integrating Digital Twin and BIM for Special-Length-Based Rebar Layout Optimization in Reinforced Concrete Construction," *Buildings*, Vol. 15, No. 1, Article 2617, 2025.
- [2] Lindström M., Johansson B., and Åkesson K., "On the Bar Installation Order for Automated Fabrication of Rebar Cages," *Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Bogotá, Colombia, 2022.
- [3] Hack N., Wangler T., Mata-Falcón J., and Gramazio F., "Automated Fabrication of Reinforcement Cages Using a Robotized Production Cell," *Automation in Construction*, Vol. 133, Article 104014, 2022.
- [4] Khosrowshahi F., Sacks R., and Brilakis I., "An OpenBIM-based Framework for Lifecycle Management of Steel Reinforcement," *Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, IAARC Publications, 2024.
- [5] Zhang Y., Li X., Wang J., and Chen Z., "A BIM-based Intelligent Approach to Rebar Layout Optimization for Reinforced Concrete Columns," *Journal of Building Engineering*, Vol. 102, Article 110542, 2025.
- [6] Smith A., and Lee B., "A BIM-enabled Robot Control System for Automated Integration Between Rebar Placement and Construction Processes," *3D Construction Printing*, Vol. 8, pp. 112– 125, 2024.
- [7] Teng F., Zhang D., Li H., and Weng Y., "Feasibility Study on Reinforcement Placement with a BIM-Enabled Collaborative Robot System," *Proceedings of the 4th International Conference on 3D Construction Printing (3DcP)*, pp. 263– 271, 2024.
- [8] Huang L., Wu Q., and Yue J., "Interactions between BIM and Robotics: Towards Intelligent Construction Engineering Frameworks," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 58, Article 102163, 2025.
- [9] Liu W., Chen K., and Cheng J. C., "BIM-based Digital Twin System for Real-time Monitoring of Rebar Assembly in Civil Infrastructures," *Automation in Construction*, Vol. 158, Article 105210, 2024.