

소형 로컬 LLM 기반 항공기 Text-to-CAD 프레임워크

최준석^{*†} · 정승한^{*} · 양선웅^{*}

^{*}한양대학교 ERICA 기계공학과

Aircraft Text-to-CAD Framework using a Small Local LLM

Junseok Choi^{*†}, Seunghan Jung^{*}, Sunwoong Yang^{*}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ. ERICA

Key Words: 텍스트 기반 CAD(Text-to-CAD), 소형 로컬 LLM(Small local LLM), 검색 증강 생성(Retrieval-augmented generation), 절차적 skill(Procedural skill), 항공기 형상(Aircraft geometry)

Abstract

This study presents a fine-tuning-free aircraft Text-to-CAD framework using a 9-billion-parameter local large language model (LLM). Four Qwen3.5-9B agents interpret natural-language requirements, retrieve domain knowledge, plan geometry, and generate FreeCAD Python code. Grammar-constrained decoding, syntax and application programming interface checks, and FreeCAD execution reject invalid code and return errors for revision. Retrieval-augmented generation (RAG) supplies NACA and FreeCAD knowledge, while procedural skills support airfoil calculation, coordinate transformation, profile closure, and loft construction. The reference implementation was progressively removed to identify model limitations and was excluded from generation. In a preliminary single-seed experiment, the framework generated a twisted, tapered NACA 0012 wing that remained a valid closed solid after saving and reopening. Comparison with a post-run reference yielded 99.83% volumetric intersection-over-union (IoU) and a 0.36 μm mean chamfer distance. Multi-seed ablation is required to assess component effects and generation reliability.

1. 서 론

자연어 기반 항공기 컴퓨터 지원 설계(computer-aided design, CAD) 형상 생성은 설계 명세 해석, 3차원 공간 추론 및 실행 가능한 모델링 연산 구성을 동시에 요구한다. Text2CAD는 자연어로부터 CAD construction sequence를 생성하였으며, Text-to-CadQuery와 CAD-Coder는 실행 가능한 CadQuery code를 직접 생성하는 방식을 제시하였다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

이들의 학습 기반 연구는 자연어로부터 parametric CAD model을 생성할 수 있음을 보였으나, 대규모 학습 데이터와 fine-tuning을 요구하고 생성 형상의 치수, 위상 및 설계 요구 충족 여부에 대한 별도 검증이 필요하다. 최근 CAD Smith는 retrieval-augmented generation(RAG)과 programmatic geometric validation을 결합한 training-free multi-agent CAD generation을 제시하였다⁽⁴⁾. 그러나 설계 정보의 외부 전송이 제한되는 항공우주·국방 환경에서는 외부 상용 LLM application programming interface(API)에 의존하지 않는 생성 체계가 필요하다. 또한 소형 local LLM은 좌표계 해석, 단면 배치, 형상 간 연결 관계 및 CAD API 사용에 필요한 도메인 지식과 추론 능력이 제한적이며, code의 실행 성공만으로는 생성 형상의 정확성을 보장하기 어렵다.

본 연구는 fine-tuning 없이 소형 local LLM의 형상 추론을 보장하는 항공기 Text-to-CAD framework를 제안한다. 기존 training-free multi-agent CAD 연구와 구별되는 지점은 9B local model을 대상으로 구조화된 계획 contract와 허용 FreeCAD API를 이용해 추론 공간을 제한하고, 관찰된 실패 경험에

서 도출한 procedural skill로 항공기 형상 제작 절차를 제공한다는 점이다. Qwen3.5-9B 기반 agent는 자연어 설계 명세 해석, 관련 지식 검색, 형상 계획 및 FreeCAD Python code 생성을 순차적으로 수행한다. RAG⁽⁵⁾는 NACA 익형의 정의와 수식 등 사실 지식을 포함한다. 기존 CAD code는 생성 과정과 분리하여 사후 평가에만 사용한다. 본 논문은 비틀림과 테이퍼가 적용된 NACA 0012 날개의 단일 seed 예비 실험을 보고하며, B-Rep 유효성과 기존 형상 대비 체적 및 표면 유사도를 평가한다.

2. 이론 및 실험

2.1 제안된 Text-to-CAD framework

본 연구의 framework는 자연어로 입력된 항공기 설계 요구를 실행 가능한 FreeCAD Python code와 3차원 CAD 형상으로 변환한다. Fig. 1과 같이 전체 과정은 Design Interpreter, Knowledge Retriever, Geometry Planner, Code Agent 및 Geometry Validator로 구성된다. 각 생성 agent에는 Qwen3.5-9B를 적용하고, fine-tuning 없이 추론 단계에서 도메인 지식과 생성 제약을 제공하였다. 본 논문에서 local LLM은 외부 상용 LLM API를 호출하지 않고 실행 환경 내부에 저장된 model weight로 추론하는 방식을 의미한다. Design Interpreter는 자연어에 포함된 익형 종류, 시위 길이, 날개 길이, 후퇴 거리 및 비틀림 각 등을 구조화된 설계 변수로 변환한다. Knowledge Retriever는 RAG를 이용하여 NACA 익형 정의와 FreeCAD API 등 형상 생성에 필요한 사실 지식을 제공한다. Geometry Planner는 설계 변

[†] Presenting Author, chwl0109@hanyang.ac.kr

수를 좌표계, 단면 배치 및 loft 연산으로 변환하며, Code Agent는 이를 바탕으로 FreeCAD Python code를 생성한다.

RAG와 procedural skill의 구성은 개발 과정에서 축적된 Qwen 작업의 실패 유형, 한계를 바탕으로 결정하였다. 구체적인 한계 분석과 skill의 정보 범위는 2.2절에 기술하였다.

또한 XGrammar 기반 grammar-constrained decoding⁽⁶⁾을 적용하여 생성 가능한 출력을 허용된 FreeCAD Python 문법으로 제한하였다. 생성 code는 abstract syntax tree(AST)와 허용된 FreeCAD API를 이용하여 검사되며, 오류가 발견되면 해당 내용을 Code Agent에 전달하여 새로운 code를 생성하도록 하였다. 최종 형상은 FreeCAD에서 저장한 후 다시 열어 유효한 폐쇄형 solid인지 검사하였다.

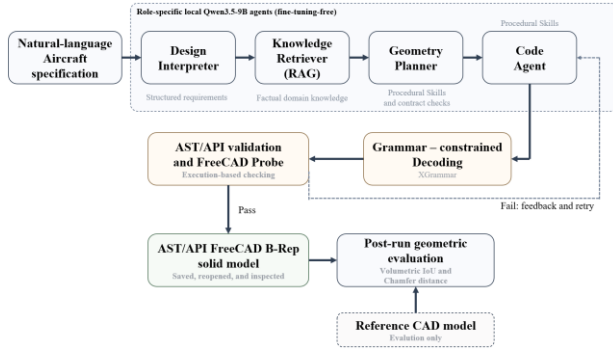


Fig. 1 Overall workflow of the proposed aircraft Text-to-CAD framework

2.2 Qwen 한계 분석 및 skill 구성

개발 과정에서 얻은 36개 진단 결과와 104개 실행 기록을 검토하여 Code Agent의 반복 오류를 분류하였다. 각 기록은 시스템 버전, 입력 문장 및 생성 조건이 달라 정량적인 성공률 대신 오류 유형을 분석하였다. 주요 오류는 네 가지였다. 첫째, NACA 식의 무차원 좌표에 시위 길이를 잘못 적용하거나 단위를 두 번 곱했다. 둘째, 익형 윗면과 아랫면의 점 순서를 잘못 연결하여 앞전 또는 뒷전이 닫히지 않았다. 셋째, FreeCAD에서 지원하지 않는 함수 인자를 사용하거나 좌표와 FreeCAD 벡터 객체를 혼동했다. 넷째, 단면 생성 함수가 반환한 wire를 비틀림 또는 loft 연산에 전달하지 않았다. 따라서 Qwen은 Python 코드의 기본 형식은 생성했지만, 설계 치수를 익형 계산과 좌표 변환에 일관되게 적용하고 생성된 단면을 최종 loft까지 연결하는 과정에서 반복적으로 실패하였다.

분석 결과를 바탕으로 Geometry Planner skill에는 익근과 익단의 좌표계, 단면 위치, 회전 중심 및 loft 입력 순서를 정하는 절차를 포함하였다. Code Agent skill은 NACA 4 자리 계열(4-digit series) 번호

해석, 익형 좌표 계산, 정규화 좌표의 FreeCAD 좌표 변환, 폐쇄형 wire 조립, 단면 wire 생성 및 시위 비율에 따른 회전 중심 계산을 위한 함수 6 개를 제공한다. Fig. 2 에는 실제 skill 파일에서 발췌한 날개 단면 배치 기준, FreeCAD 형상 생성 및 검증 절차, 대표 단면 생성 함수를 제시하였다. skill에는 특정 날개의 치수, 위치, 비틀림 각 또는 완성된 날개 코드가 포함되지 않는다. 이 값은 현재 설계 계획에서 LLM 이 직접 가져오며, 회전과 loft 코드는 Code Agent 가 작성한다.

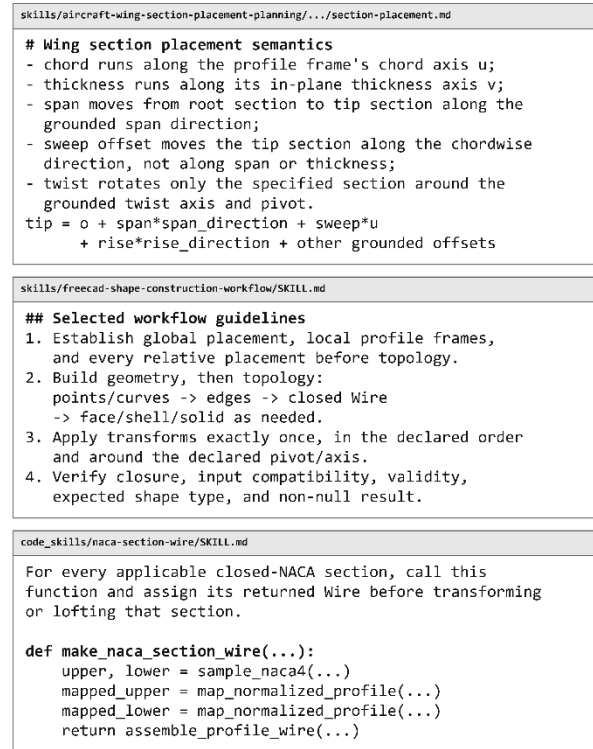


Fig. 2 Procedural Skill guidelines and a representative Code Agent function

2.3 NACA 0012 날개 생성 조건

NACA 0012 단면은 NACA 4-digit series 의 대칭 익형 두께 분포⁽⁷⁾를 이용하여 생성하였다. 무차원 시위 방향 좌표를 $\xi=x/c$, 정규화 된 반 두께를 $\eta=y/c$ 로 정의하고 NACA 0012 의 최대 두께 비 $t=0.12$ 를 대입하면 식 (1)을 얻는다.

$$\eta = 0.17814\sqrt{\xi} - 0.07560\xi - 0.21096\xi^2 + 0.17058\xi^3 - 0.06216\xi^4 \quad (1)$$

식 (1)의 마지막 계수는 $\xi=1$ 에서 $\eta=0$ 이 되도록 설정하여 trailing edge 가 수학적으로 닫히도록 하였다. 실험에 사용된 자연어 설계 요구와 생성 환경은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Experimental configuration for NACA 0012 wing generation

Item	Configuration
Local LLM / CAD	Qwen3.5-9B / FreeCAD 1.1.3
Runtime / GPU	Google Colab / NVIDIA L4 (24 GB)
Code decoding / quantization	XGrammar / 4-bit NF4
Context / code-token limit	16,384 / 4,096
Code reasoning / max attempts	off / 4 (accepted: 3rd)
Airfoil / sampling	NACA 0012 / 101 points
Root / tip chord	120 / 60 mm
Span / sweep / tip rise	300 / 40 / 20 mm
Tip twist / axis	-3° / quarter-chord
RAG / procedural skill	on / on
Seed / tolerance	100 / 0.1 mm, 0.1°

날개는 root 와 tip 에 각각 NACA 0012 단면을 배치한 후 두 단면 사이에 solid loft 를 생성하였다. tip 단면은 root 를 기준으로 span 방향 300 mm, 후퇴 방향 40 mm 및 높이 방향 20 mm 만큼 이동시켰으며, quarter-chord 축을 중심으로 -3° 비틀림을 적용하였다. 기준이 되는 CAD code 는 어떤 생성 agent 에도 제공하지 않고 생성 완료 후 형상 비교에만 사용하였다.

2.4 형상 평가 및 결과

생성 형상과 기준 형상의 체적 유사도는 volumetric intersection-over-union(IoU)을 이용하여 평가하였다. 생성 형상을 G, 기준 형상을 R, 체적 연산자를 V 라고 할 때 IoU 는 식 (2)와 같이 정의된다.

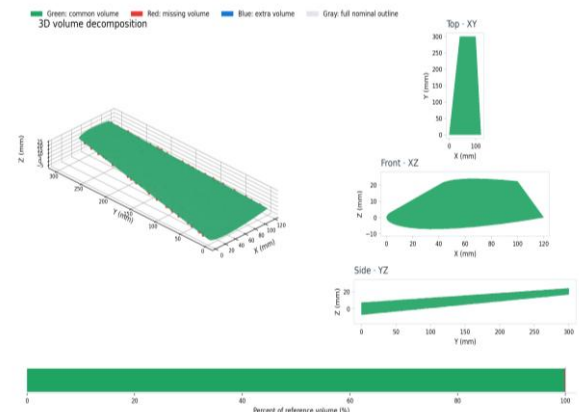
$$IoU = \frac{V(G \cap R)}{V(G \cup R)} \times 100 \quad (2)$$

여기서 $V(G \cap R)$ 은 두 형상의 공통 체적이고 $V(G \cup R)$ 은 합집합 체적이다. 표면 차이는 두 형상에서 추출한 표면 점 사이의 양방향 최근접 거리를 평균한 symmetric chamfer distance 로 평가하였다. 생성 결과는 FreeCAD 에서 저장하고 다시 연이후에도 유효한 폐쇄형 solid 로 확인되었다. 정량 평가 결과는 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Geometric evaluation results of the generated wing

Evaluation metric	Result
Generated / reference volume	205,362 / 205,703 mm ³
Common / missing / extra volume	205,362 / 340 / 0 mm ³
Volumetric IoU	99.83%
Mean Chamfer distance	0.36 μ m
RMS / Hausdorff distance	2.93 / 49.61 μ m
Surface points within 0.1 mm	100%
Total / Code Agent time	15.38 / 10.28 min

Fig. 3 은 생성 형상과 기준 형상의 체적 비교 결과를 나타낸다. 공통 체적은 녹색, 기준 형상에서 누락된 체적은 적색, 생성 형상에만 존재하는 추가 체적은 청색으로 표시하였다. 전체 형상의 대부분이 공통 체적으로 나타났으며 추가 체적은 발생하지 않았다.

**Fig. 3** Volumetric comparison between the generated and reference NACA 0012 wings

체적 IoU 는 99.83%였으며 평균 chamfer distance 는 0.36 μ m 였다. root mean square(RMS) surface distance 와 sampled hausdorff distance 는 각각 2.93 μ m 와 49.61 μ m 였고, 표면 오차가 0.1 mm 이내인 표본점의 비율은 100%였다. NVIDIA L4 GPU(24 GB) 에서 전체 생성 시간은 15.38 min 이었으며 Code Agent 수행 시간은 10.28 min 이었다. Code Agent 는 실행 probe 에서 확인된 누락 함수와 잘못된 FreeCAD loft API 호출을 수정하고 세 번째 코드 후보에서 유효한 solid 를 생성하였다.

기준 형상과의 비교 결과는 생성 agent 의 입력이나 성공 판정 기준으로 사용하지 않았다. 그에 대한 근거는 다음과 같다. 생성 code 에는 uniform spacing 과 최대 차수 3 의 loft 를 적용했으며, 기준 code 에는 cosine spacing 과 FreeCAD 기본 loft 설정

을 적용하였다. 따라서 Table 2 의 결과는 두 형상의 최종 일치 정도를 나타내며, 단면 점 배치 방식과 loft 설정이 각각 형상 차이에 미친 영향은 구분하지 않았다.

3. 결 론

본 연구에서는 fine-tuning 없이 소형 local LLM 의 항공기 CAD 형상 추론을 보강하는 Text-to-CAD framework 를 제안하였다. 역할별 Qwen3.5-9B agent 에 RAG, grammar-constrained decoding, AST/API 검사, 실행 feedback 및 procedural skill 을 결합하였다. 단일 seed 의 NACA 0012 날개 예비 실험에서 저장 및 재호출 후에도 유효한 폐쇄형 solid 를 생성하였고, 기준 형상 대비 체적 IoU 99.83%와 평균 chamfer distance 0.36 μm 를 얻었다. 이 결과는 완성된 기준 코드를 생성 agent 에 제공하지 않고도 소형 local LLM 으로 FreeCAD 항공기 형상을 생성할 수 있다는 가능성을 보여준다. 다만 RAG 와 skill 을 모두 적용한 한 개 형상과 한 개 seed 의 결과이므로 각 구성 요소의 효과, 반복 생성 신뢰성 및 다른 형상으로의 일반화는 아직 입증되지 않았다. 향후에는 RAG 와 skill 의 on/off 조건을 random seed 에서 비교한 후 NACA 0012 항공기의 동체, 꼬리날개 및 조종면으로 생성 범위를 확장할 예정이다. 개별 부품의 생성 신뢰성이 확보되면 assembly 기능을 추가하고, 이후 더 큰 Qwen 모델과 다른 local LLM 을 이용해 다양한 항공기 형상으로의 적용 가능성을 평가할 계획이다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00355857).

참고문헌

- (1) Khan, M. S., Sinha, S., Sheikh, T. U., Stricker, D., Ali, S. A. and Afzal, M. Z., 2024, "Text2CAD: Generating Sequential CAD Models from Beginner-to-Expert Level Text Prompts," arXiv preprint arXiv:2409.17106.
- (2) Xie, H. and Ju, F., 2025, "Text-to-CadQuery: A New Paradigm for CAD Generation with Scalable Large Model Capabilities," arXiv preprint arXiv:2505.06507.
- (3) Guan, Y., Wang, X., Ming, X., Zhang, J., Xu, D. and Yu, Q., 2025, "CAD-Coder: Text-to-CAD Generation with Chain-of-Thought and Geometric Reward," arXiv preprint arXiv:2505.19713.
- (4) Barkley, J., Loghmani, R. and Barati Farimani, A., 2026, "CADSmith: Multi-Agent CAD Generation with Programmatic Geometric Validation," arXiv preprint arXiv:2603.26512.
- (5) Lewis, P. et al., 2020, "Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks," Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 33, pp. 9459~9474.
- (6) Dong, Y., Ruan, C. F., Cai, Y., Lai, R., Xu, Z., Zhao, Y. and Chen, T., 2024, "XGrammar: Flexible and Efficient Structured Generation Engine for Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2411.15100.
- (7) Jacobs, E. N., Ward, K. E. and Pinkerton, R. M., 1933, "The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel," NACA Report No. 460.