

3D 애니메이션 환경 기반의 디자이너 중심 로봇 움직임 설계 프레임워크

A Design-Centered Framework for Robot Motion Design in a 3D Animation Environment

이지연*
 홍익대학교 시각디자인학과

Jiyeon Lee
 Dept. of Visual Communication Design, HIU

박기철
 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수

Kicheol Pak
 Professor, Dept. of MSDE, HIU

• Key words: Robot Motion Design, Animation to Motor Framework, Skeleton-based Rigging, Design-centered Approach, HRI

1. 서론

1.1. 로봇 움직임 구현에서의 디자이너 접근성 한계

로봇 프로토타입 개발 환경에서 디자이너는 로봇의 움직임을 직접 구현하기 어려운 구조적 제약이 있다. 디자이너가 HRI(Human-Robot Interaction)를 고려한 생동감 있는 움직임의 표현 의도를 제안하더라도, 구현 과정에서 엔지니어를 거치며 기술적 해석과 처리가 이루어지기 때문에 최종 결과물에는 원래의 의도가 왜곡되거나 희석되는 경우가 빈번하다¹.

Mcharek(2019)과 Nguyen(2022)은 이러한 현상이 언어, 도구 체계, 작업 방식의 차이에서 비롯된다고 지적하며, 디자이너-엔지니어 간 커뮤니케이션 격차가 협업 과정의 가장 큰 한계로 작용한다고 보고하였다²³. 또한 아두이노의 등장으로 프로토타이핑에 대한 접근성이 향상되었음에도, 여전히 C++ 기반의 프로그래밍 환경은 비전문가에게 높은 진입장벽으로 작용하여 디자이너가 직접 움직임을 수정하고 검증하기 어렵게 만든다⁴.

1.2. HRI 기반 표현 의도의 반영 필요성

로봇의 움직임은 단순한 기능 수행을 넘어 로봇에 대한 사용자의 긍정적 태도와 정서적 반응에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. Nakayama(2016)은 로봇의 움직임 패턴의 설계가 사용자와의 친밀감 형성에 유의미한 영향을 미친다고 하였으며, Hu et al. (2025)는 기능적 움직임(functional movement)과 표현적 움직임(expressive movement)의 결합이 로봇에 대한 사용자의 긍정적 인식을 유의미하게 향상시키고 상호작용 참여도(engagement)와 유대감(sense of connection) 증진에 기여한다고 밝혔다⁵⁶.

따라서 로봇의 표현적 움직임은 사용자의 감정적 반응과 친밀감 형성에 중대한 영향을 미치는 요인이지만, 현 개발 환경에서는 디자이너가 의도한 생동감 있는 물리적 움직임과 감정 표현이 실제 로봇 움직임에 충분히 구현되지 못하고 있다. 이에 따라 디자이너의 표현 의도가 실제 움직임에 직접 반영될 수 있는 개발 환경의 구축이 필요하다.

2. 문제 접근법

로봇의 움직임에 생동감을 부여하기 위한 접근 중 하나로 애니메이션의 원리를 활용하는 방법이 있다.

Lasseter(1987)는 동작의 완급을 조절하는 ‘Slow in and out’, 곡선형 궤적으로 자연스러운 흐름을 만드는 ‘Arcs’, 주동작에 따라 보조적으로 발생하는 움직임을 통해 사실감을 부여하는 ‘Secondary Action’ 등의 원리를 제시하였다⁷.

이러한 원리는 3D 애니메이션 캐릭터의 생동감을 표현하기 위해 제안되었으나, 움직임의 속도 변화·궤적·보조 반응을 설계하는 개념으로서 로봇의 움직임 설계에도 적용 가능한 기준으로 볼 수 있다.

애니메이션 기반 접근법에 대한 사례로 모션 디자이너와 엔지니어가 협업하여 개발한 디즈니 리서치의 이족보행 로봇 ‘BDX Droid’는 시각적으로 생동감 있는 움직임을 물리적 환경에서 구현하였다⁸. 이 연구는 3D 애니메이션 소프트웨어(Maya)에서 제작된 움직임 데이터를 활용하여, 강화학습을 통해 로봇이 해당 움직임을 재현하도록 학습시켰다. 이를 실제 로봇에 적용함으로써, 모션 디자이너의 작업 흐름을 중심으로 한 로봇 모션 설계 프로세스의 가능성을 제시하였다.

디자이너-엔지니어 간 협업을 지원하거나 간극을 줄이기 위한

¹ Hoffman, G., & Ju, W. (2014). Designing robots with movement in mind. *J. Hum. Robot Interact.*, 3(1), 89–122.

² Mehdi Mcharek, Toufik Azib, Cherif Larouci, and Moncef Hammadi, Collaboration and multidisciplinary design optimization for mechatronic systems, IECON 2019–45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, IEEE, pp. 624–629, 2019.

³ Mimi Nguyen and Celine Mougnot, A systematic review of empirical studies on multidisciplinary design collaboration: Findings, methods, and challenges, *Design Studies*, Vol. 81, p. 101120, 2022.

⁴ Hari Kishan Kondaveeti, Nandeesh Kumar Kumaravelu, Sunny Dayal Vanambathina, Sudha Ellison Mathe, and Suseela Vappangi, A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations, *Computer Science Review*, Vol. 40, p. 100364, 2021.

⁵ Momoka Nakayama and Shunji Yamanaka, Perception of animacy by the linear motion of a group of robots, *Proc. 4th International Conference on Human Agent Interaction*, pp. 3–9, 2016.

⁶ Yifan Hu, Peng Huang, Madhav Sivapurapu, and Jianming Zhang, ELEGNT: Expressive and functional movement design for non-anthropomorphic robots, *Proc. ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS '25)*, ACM, pp. 1–13, 2025.

⁷ John Lasseter, Principles of traditional animation applied to 3D computer animation, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 35–44, 1987.

⁸ Robert Grandia, Eike Knoop, Matthew A. Hopkins, Gregor Wiedebach, James Bishop, Sam Pickles, David Müller, and Moritz Bäcker, Design and control of a bipedal robotic character, *arXiv preprint arXiv:2501.05204*, 2025.

연구에서는 MoveIt을 기반 기술로 활용하여, 3D 디지털 트윈 환경에서 로봇을 설계하고 시각적으로 직관적인 인터페이스를 통해 움직임을 제작하는 방식을 제안하였다^{9,10,11}. 이러한 접근은 로봇 제어의 운동학(Kinematic)적 수식들을 시각화 하여 사용자 접근성을 높였다는 점에서 의의를 가진다.

그러나 두 사례 모두 로봇 엔지니어를 필요로 하는 개발 과정을 포함하고 있으며, 강화 학습을 위한 데이터 추출 단계에서 활용되거나 ROS(Robot Operating System)를 기반으로 한 리눅스 환경 구축과 코딩 지식이 요구된다. 이러한 구조에서는 디자이너가 직접 로봇의 움직임을 구현하기 어렵고, 엔지니어의 중간 개입을 거쳐야만 모션이 완성되는 체계를 벗어나지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 모션 디자이너에게 익숙한 3D 애니메이션 환경에서 제작된 키프레임 애니메이션 데이터를 직접 변환하여 로봇의 모터 제어에 적용할 수 있는 프레임워크를 제안한다.

3. 프레임워크 개요 및 구현 방법

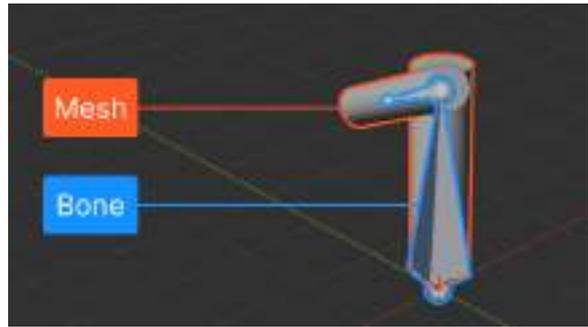
3.1 개념

본 연구에서 제안하는 프레임워크는 3D 애니메이션 환경에서 제작된 스켈레톤(skeleton) 기반 애니메이션의 회전값을 추출하여, 이를 실제 로봇의 모터 제어 입력값(motor control input)으로 변환하는 방식이다. 프레임워크의 핵심 개념은 애니메이션 제작 과정에서 사용되는 스켈레톤 구조(skeletal structure)를 로봇의 물리적 관절 구조(physical joint structure)와 대응시키는 것이다.

이 과정은 3D 애니메이션 제작에서 표준적으로 활용되는 리깅(rigging) 절차를 기반으로 한다. 리깅은 모델 내부에 스켈레톤(skeleton) 또는 본(bone)을 삽입해 각 관절의 위치와 회전축을 정의하고, 이를 메쉬(Mesh, 모델의 외형 형상 데이터)와 연결하여 움직임을 제어할 수 있도록 하는 핵심 단계이다.

로봇의 경우 각 모터가 실제 관절 역할을 수행하므로, 애니메이션 스켈레톤의 회전축을 로봇의 관절 회전축과 일치시키는 과정이 필요하다. 이를 통해 모션 디자이너가 조작한 회전 값이 물리적 구동 데이터로 직접 변환될 수 있다.

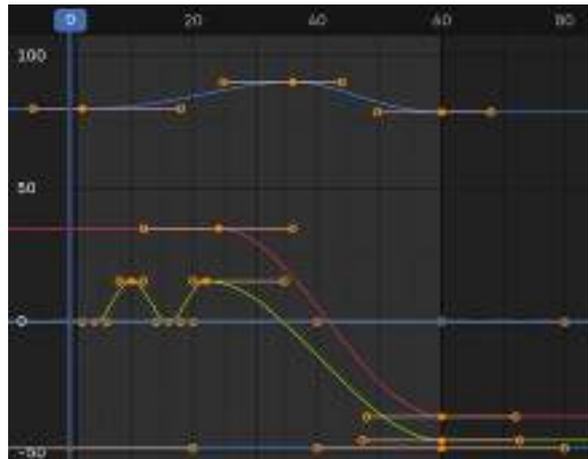
구체적으로는 로봇의 각 부분(예: 팔, 허리, 머리 등)을 3D 공간 내 메쉬 형태로 배치한 후, 이를 대응하는 본(bone) 계층에 연결하여 구조적 일관성을 확보한다. 이때 실제 로봇의 기구학적 구조를 반영하기 위해 회전축을 모터와 동일한 회전축의 움직임만으로 제한함으로써 불필요한 자유도를 제거한다.



[그림1] 3D 애니메이션 환경에서의 리깅(Rigging) 구조 예시

3.2 애니메이션 기반 움직임 설계 과정

모션 디자이너는 제안된 프레임워크를 활용하여 기존에 사용했던 3D 애니메이션 제작 방식으로 로봇의 움직임을 설계할 수 있다. 스켈레톤 구조를 기반으로, 위에서 언급한 Lasseter(1987)의 애니메이션 원리의 타이밍(Timing)과 아크(Arc)를 반영하여 각 키프레임을 설정한다. 이후 [그림2]와 같은 그래프 편집기(Graph Editor)에서 키프레임 간의 곡선 보간을 조정함으로써 완급 조절(ease-in/out)과 곡선형 움직임(motion arc)을 구현하여 시각적 자연스러움을 확보한다⁷.



[그림2] 그래프 에디터(Graph Editor)에서의 키프레임 보간·회전값 변화 예시

이때 각 관절의 회전축에는 프레임 단위로 회전각이 기록되며, 그래프 영역에서는 베지어(Bezier) 곡선 형태로 시각화되어 시간에 따른 각도 변화가 연속적으로 표현된다. 이를 통해 디자이너는 동작의 속도 조절과 간격, 움직임의 연속성을 직관적으로 확인하고 수정할 수 있다.

이렇게 생성된 회전 데이터는 모터 제어 입력값으로 변환 및 추출되어, 애니메이션에서 설정된 타이밍에 따라 동일한 회전 동작을 수행한다. 여러 관절이 동시에 구동되는 경우에도, 스켈레톤의 본과 로봇의 각 모터를 일대일로 대응시켜 동일한 데이터 변

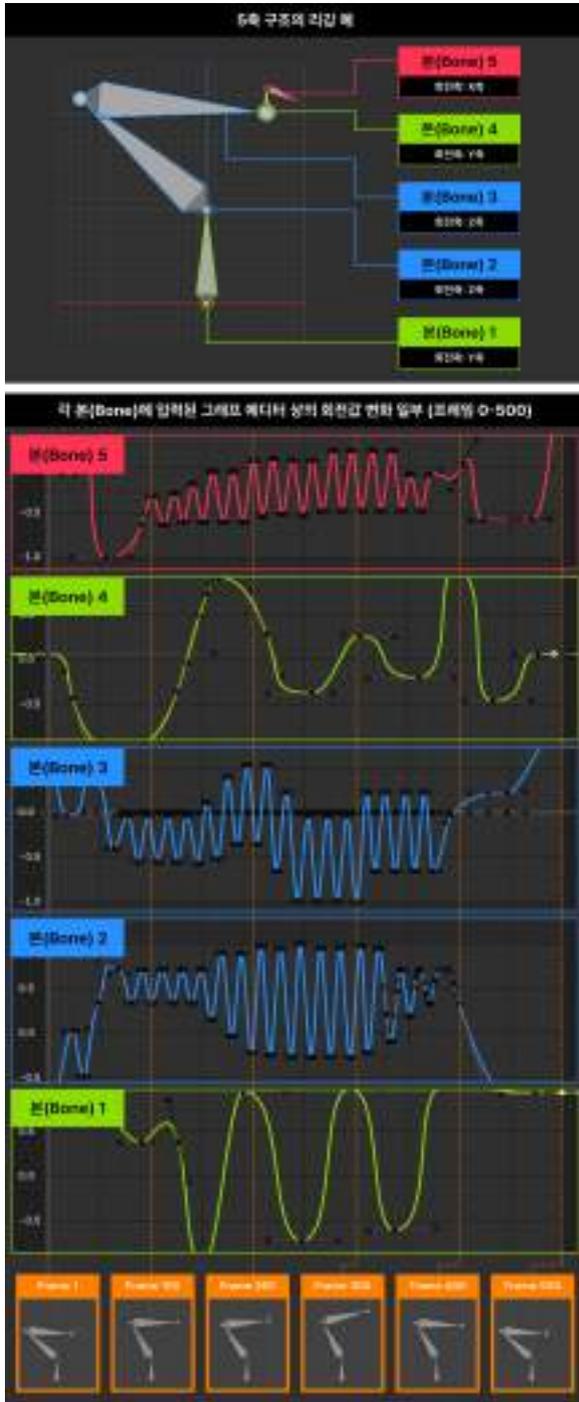
⁹ Yeping Wang, Alexander Peseckis, Zelong Jiang, and Michael Gleicher, Motion comparator: Visual comparison of robot motions, IEEE Robotics and Automation Letters, 2024.

¹⁰ Andoni Rivera-Pinto, Johan Kildal, and Elena Lazkano, Toward programming a collaborative robot by interacting with its digital twin in a mixed reality environment, International Journal of Human-Computer Interaction, Vol. 40, No.

17, pp. 4745-4757, 2024.

¹¹ Pablo Malvido Fresnillo, Saigopal Vasudevan, Wael M. Mohammed, Jose L. Martinez Lastra, and Jose A. Perez Garcia, Extending the motion planning framework MoveIt with advanced manipulation functions for industrial applications, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 83, p. 102559, 2023.

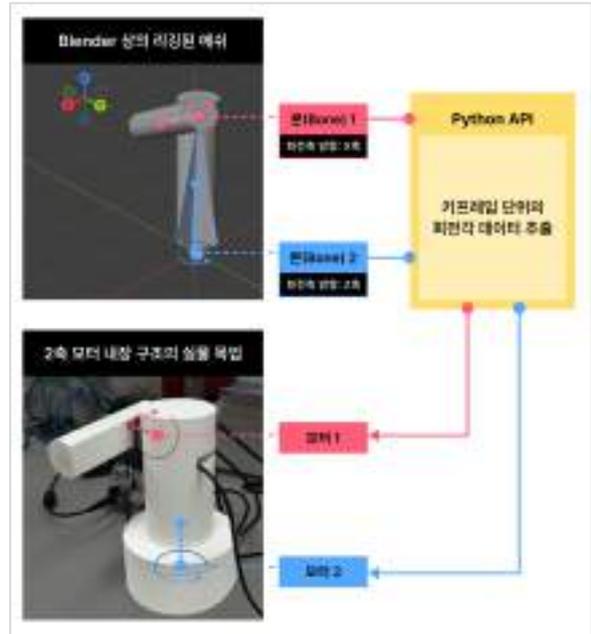
환 과정을 거침으로써 전체 움직임의 일관성을 유지할 수 있다. 이 과정을 통해 디자이너는 3D 애니메이션 환경에서 실물 로봇의 움직임을 설계하고, 애니메이션 환경에서 구상한 표현을 실제 로봇 구동으로 검증할 수 있다.



[그림3] 여러 축을 가진 구조에서 본(Bone)의 회전값 그래프, 프레임 당 각 본 별로 입력된 회전 데이터가 대응되는 모터의 제어값으로 변환 및 추출된다

3.3 구현 예시

본 연구에서는 Blender를 활용하여 프레임워크의 예시 시스템을 구현하였다. Blender는 오픈소스 3D 애니메이션 제작 도구로서 접근성이 높고, Python API를 통해 각 키프레임의 회전 데이터 등에 쉽게 접근할 수 있다는 점에서 연구 목적에 부합하였다¹². [그림 4]는 Blender 상에서 추출된 회전값이 실제 모터 동작으로 동기화되는 과정과 모습을 보여준다.



[그림4] Blender 리깅 환경에서의 회전값 추출과 실제 모터 구현 동기화 모습

4. 프레임워크 효과 검증

4.1 평가 설계

제안하는 프레임워크의 효과를 검증하기 위해 두 개의 그룹을 대상으로 평가를 진행하였다. 디자이너와 엔지니어로 구성된 총 18명의 사용자가 5개의 팀을 구성하여 프레임워크를 활용해 로봇의 움직임을 제작하고, 이후 제작 과정에 참여하지 않은 24명의 관찰자 그룹이 해당 결과물을 평가하였다.

사용자 그룹의 평가는 아래와 같은 설문을 통해 사용성(Usability)에 대한 응답을 받았으며, 관찰자 그룹의 평가는 제작된 움직임이 전달하는 감성적 인상과 사회적 인식특성을 측정하기 위해 GQS(Godspeed Questionary Series)를 활용했다^{13 14}. 모든 문항은 7점 리커트 척도로 구성하였다.

사용성 평가는 총 8개 항목(프로그래밍 지식 없이 사용 가능 여부, 모션 표현의 자유도, 다수 모터 동작 구현 용이성, 미리보기 기능의 유용성, 키프레임 조작의 직관성, 모션 수정 편의성, 제작 및 검증의 신속성, 모터-애니메이션 일치성)으로 구성하였다.

감성 인식(GQS) 평가는 5개 차원—Anthropomorphism(의인성),

¹² S.Y. Hwang (2025), Blender2Motor: A skeletal 3D animation-based framework for robot motion design, [Computer software], <https://github.com/YoungSDE/blender2motor>

¹³ Jakob Nielsen, Usability Engineering, Morgan Kaufmann, 1994.

¹⁴ Christoph Bartneck, Dana Kulić, Elizabeth Croft, and Susana Zoghbi,

Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots, International Journal of Social Robotics, Vol. 1, No. 1, pp. 71-81, 2009.

Animacy(생동감), Likeability(호감도), Perceived Intelligence(지능성), Perceived Safety(안전성)으로 구성되며, 각 차원의 문항 수는 Anthropomorphism 5문항, Animacy 6문항, Likeability 5문항, Perceived Intelligence 5문항, Perceived Safety 3문항으로 구성되어 있다.

또한 응답 항목 간 상관관계 분석 이후, 인과관계 검토와 추가적 인사이트 도출을 위해 자유 응답형 문항을 통해 사용 경험 전반의 만족도와 개선 의견 및 기타 자유 의견을 수집하였다.

[표 1] 측정 항목 구성: 사용성 평가 항목과 GQS 평가 차원 및 항목

평가 영역	항목 수	평가 항목	
사용성	8개	프로그래밍 지식 없이 사용 가능 여부 / 모션 표현 자유도 / 다수 모터 동작 구현 용이성 / 미리보기 기능 유용성 / 키프레임 조작의 직관성 / 모션 수정 편의성 / 제작 및 검증 신속성 / 모터-애니메이션 일치성	
GQS	Anthropomorphism (의인성)	5개	Fake - Natural Machinelike - Humanlike Unconscious - Conscious Artificial - Lifelike Moving rigidly - Moving elegantly
	Animacy (생동감)	6개	Dead - Alive Stagnant - Lively Mechanical - Organic Artificial - Lifelike Inert - Interactive Apathetic - Responsive
	Likeability (호감도)	5개	Dislike - Like Unfriendly - Friendly Unkind - Kind Unpleasant - Pleasant Awful - Nice
	Perceived Intelligence (감지된 지능)	5개	Incompetent - Competent Ignorant - Knowledgeable Irresponsible - Responsible Unintelligent - Intelligent Foolish - Sensible
	Perceived Safety (감지된 안전성)	3개	Anxious - Relaxed Agitated - Calm Quiescent - Surprised

(Nielsen, 1994; Bartneck et al., 2009 참고)

4.2 분석 결과

사용성과 GQS 간의 상관관계 분석은 리커트 척도의 순서형 특성과 표본 수의 제한을 고려하여, 스피어만 순위 상관분석(Spearman's rank correlation analysis)을 진행하였다. 본 분석의 목적은 로봇 움직임을 직접 설계한 사용자가 경험한 사용성이 해당 움직임을 관찰한 관찰자의 감성 인식에 어떠한 영향을 미치는지를 실증적으로 확인하는 데 있다.

분석 결과, GQS의 상위 차원 수준과 사용성 사이에서는 뚜렷한 상관관계가 확인되지 않았으나, GQS의 세부 문항 수준에서 총 9건의 유의미한 상관 관계가 나타났다($p < 0.05$). 이는 사용성의 일부 속성이 관찰자의 감성 인식 중 특정 하위 요인에 선택적으로 작용함을 시사한다.

모션 표현 자유도는 GQS 세부 항목 중 Likeability의 'Dislike-Like'($\rho = 0.476, p = 0.046$), 'Unfriendly-Friendly'($\rho = 0.522, p = 0.023$), 'Awful-Nice'($\rho = 0.539, p = 0.021$)와 Perceived Safety의 'Agitated-Calm'($\rho = 0.496, p = 0.036$)에서 유의한 정적 상관관계를 보였다. 이 결과는 감정적 의도 표현의 자유도가 높을수록 관찰자는 움직임을 보다 친근하고 안정적으로 인식한 것으로 해석된다.

또한 모터-애니메이션 일치성은 Animacy의 'Dead-Alive'($\rho = 0.497, p = 0.036$)와 Likeability의 'Unpleasant-Pleasant'($\rho = 0.511, p = 0.030$), 'Dislike-Like'($\rho = 0.534, p = 0.023$), 'Unfriendly-Friendly'($\rho = 0.493, p = 0.038$)에서 유의한 정적 상관관계를 나타냈다. 즉, 모터-애니메이션 일치도가 높을수록 움직임을 자연스럽고 생명감 있게 인식했으며, 호감도 역시 증가하였다. 아울러 모션 수정 편의성은 Perceived Safety의 'Anxious-Relaxed'($\rho = 0.499, p = 0.035$)와 정적 상관관계를 보였다. 이는 동작을 손쉽게 수정할 수 있는 시스템일수록 관찰자가 로봇을 더 안정적이고 신뢰 가능한 대상으로 인식함을 보여준다.

[표 2] 사용성 항목과 GQS 항목 간 Spearman 상관분석 결과

사용성	GQS	ρ	p (<0.05)
모션 표현 자유도	Likeability (Dislike - Like)	0.539	0.046
	Likeability (Unfriendly - Friendly)	0.522	0.026
	Likeability (Awful - Nice)	0.539	0.036
	Perceived Safety (Agitated - Calm)	0.496	0.021
모터-애니메이션 일치성	Animacy (Dead - Alive)	0.497	0.036
	Likeability (Unpleasant - Pleasant)	0.511	0.030
	Likeability (Dislike - Like)	0.534	0.023
모션 수정 편의성	Perceived Safety (Anxious - Relaxed)	0.499	0.035

정성 응답 결과, 사용자들은 공통적으로 “빠르고 직관적인 수정 과정”, “자연스럽고 시각적인 피드백”을 주요 장점으로 언급하였다. “Blender 인터페이스를 그대로 활용할 수 있어 익숙했다”, “아두이노 기반 제어보다 구현 과정이 직관적이었다”, “시각적으로 확인하며 즉시 결과를 검증할 수 있었다”는 의견이 다수 제시되었다. 이러한 응답은 프레임워크의 시각적 직관성과 제작 및 검증의 효율성이 실제 사용자 경험에서도 긍정적으로 인식되었음을 뒷받침한다. 반면, 일부 사용자는 “Blender 사용의 학습 필요성”과 “코딩의 진입장벽”을 한계로 언급하였다. 이는 프레임워크의 예시로 쓴 Blender를 처음 접한 사용자에게 인터페이스 적응이 부담으로 작용했을 가능성을 시사하며, 특히 VS Code와 같은 IDE 환경에 익숙하지 않은 사용자에게는 코드를 복사해 붙여넣는 과정 자체가 생소하게 느껴졌던 것으로 해석될 수 있다. 이러한 점은 향후 코드 조작 과정을 최소화한 Blender Add-on 형태의 인터페이스 제공을 통해 접근성을 높일 필요성을 보여준다. 또한 “모터의 실제 토크 계산의 어려움”을 언급한 응답도 있었다. 이는 프레임워크가 실제 구동 단계에서의 물리적 변수(토크, 하중, 관성 등) 반영 한계가 있음을 보여준다.

참고문헌

- S.Y. Hwang (2025). Blender2Motor: A skeletal 3D animation-based framework for robot motion design, [Computer software], <https://github.com/YoungSDE/blender2motor>
- Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E., & Zoghbi, S. (2009). Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(1), 71–81, <https://doi.org/10.1007/s12369-008-0001-3>
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340, <https://doi.org/10.2307/249008>
- Fresnillo, P. M., Vasudevan, S., Mohammed, W. M., Martinez Lastra, J. L., & Perez Garcia, J. A. (2023). Extending the motion planning framework MoveIt with advanced manipulation functions for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102559, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102559>
- Grandia, R., Knoop, E., Hopkins, M. A., Wiedebach, G., Bishop, J., Pickles, S., Müller, D., & Bächer, M. (2025). Design and control of a bipedal robotic character. arXiv preprint arXiv:2501.05204, Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2501.05204>
- Hoffman, G., & Ju, W. (2014). Designing robots with movement in mind. *Journal of Human-Robot Interaction*, 3(1), 91–122, <https://doi.org/10.5898/JHRI.3.1.Hoffman>
- Hu, Y., Huang, P., Sivapurapu, M., & Zhang, J. (2025). ELEGNT: Expressive and functional movement design for non-anthropomorphic robots. *Proceedings of the ACM Designing Interactive Systems Conference (DIS '25)*, 1–13.
- Kondaveeti, H. K., Kumaravelu, N. K., Vanambathina, S. D., Mathe, S. E., & Vappangi, S. (2021). A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. *Computer Science Review*, 40, 100364.
- Lasseter, J. (1987). Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21(4), 35–44, <https://doi.org/10.1145/37402.37407>
- Mcharek, M., Azib, T., Larouci, C., & Hammadi, M. (2019). Collaboration and multidisciplinary design optimization for mechatronic systems. *Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2019)*, 1, 624–629.
- Nguyen, M., & Mougenot, C. (2022). A systematic review of empirical studies on multidisciplinary design collaboration: Findings, methods, and challenges. *Design Studies*, 81, 101120, <https://doi.org/10.1016/j.destud.2022.101120>
- Nakayama, M., & Yamanaka, S. (2016). Perception of animacy by the linear motion of a group of robots. *Proceedings of the 4th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI '16)*, 3–9.
- Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann.
- Rivera-Pinto, A., Kildal, J., & Lazkano, E. (2024). Toward programming a collaborative robot by interacting with its digital twin in a mixed reality environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(17), 4745–4757.
- Wang, Y., Peseckis, A., Jiang, Z., & Gleicher, M. (2024). Motion comparator: Visual comparison of robot motions. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(2), 1–12.