

# 드로잉 로봇의 기구학적 해석과 시뮬레이션 시스템의 구현 : 붓의 방향과 기울기 설정이 가능한 로봇을 중심으로

## Kinematic Analysis and Simulation of a Drawing Robot : Centered on Robots with Adjustable Brush Orientation and Tilt

윤지현<sup>1</sup>

Ji-Hyun Yoon<sup>1</sup>

### 요약

본 연구는 현대 미술에서의 드로잉 개념을 토대로 로봇의 구조적 특징을 활용한 선의 표현 효과를 연구한다. 이는 전통적 예술에서 타자에 의한 창작 행위가 유발하는 행위 주체성에 대한 근본적인 논의에 참여하며, 인간-기계의 협력이 단순히 편리함이나 효율성을 넘어 예술가의 의도와 기계의 자동성 사이의 균형을 통한 새로운 협력 관계임을 제시한다. 연구 방법론으로는 로봇 드로잉에 필요한 최소한의 자유도를 정의하고 역기구학적 해석과 시뮬레이션을 진행한다. 붓의 위치, 압력, 방향 그리고 기울기에 대한 로봇 관절의 각도를 계산하는 알고리즘을 구현하였다. 또한 드로잉 붓의 유연한 특성을 고려하여 붓의 기울기 변화에 따른 압력 허용 범위를 구하고, 선의 두께 변화나 획의 표현이 가능한 조건을 시뮬레이션으로 검증하였다. 결론적으로 본 연구는 로봇을 단순히 기존의 인간 예술 작품을 답습하는 도구적 대상이 아닌 창작의 과정적 협력 대상으로 평가한다.

핵심어 : 드로잉 로봇, 로보틱 아트, 인간-로봇 상호작용, 붓놀림

### Abstract

This study explores the expressive effects of lines by leveraging the structural characteristics of robots, based on the concept of drawing in contemporary art. It engages with fundamental discussions on agency in creative acts mediated by the Other in traditional art, and suggests a model of human-machine collaboration that goes beyond mere convenience or efficiency by balancing the artist's intention with the machine's automaticity. The research defines the minimum degrees of freedom required for robotic drawing and conducts inverse kinematics analysis and simulation. An algorithm was implemented to calculate the joint angles corresponding to the brush position, pressure, direction, and tilt. Furthermore, considering the flexible properties of the brush, the study derives allowable pressure ranges based on changes in brush tilt and verifies the conditions under which variations in line thickness and stroke expression become possible. In conclusion, this research evaluates the robot not as mere tool for imitating human artworks but as a collaborative agent in the creative process.

Keyword : drawing robot, robotic art, human-robot interaction, brush stroke

<sup>1</sup> Division of Design and Art, Yonsei University, Wonju, Korea [Professor]  
e-mail: ygdrasil@yonsei.ac.kr

Received(September 1, 2025), Review Result(1st: September 28, 2025), Accepted(December 12, 2025), Published(December 31, 2025)



© 2025 The Authors. Published by NCISS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

현대미술에서의 드로잉은 작가가 영감을 받아 떠오르는 아이디어 즉, 두뇌 속에서 일어나는 사고의 발생과 진행에서부터 그것을 전개하고 실현해 나가는 일련의 과정, 그리고 그 결과물인 작품까지 이르는 아주 포괄적인 개념이다 [1]. 드로잉이 회화나 조각 등 여타 작품을 제작하기 위한 보조적인 수단으로 한정되지 않고 자율적이고 우발적 행위와 즉흥적 사고를 빠르고 민첩하게 표현할 수 있는 작업으로 인식된 것은 그리 오래되지 않았다. 1800년대 후반 이후 재현과 모방의 사명에서 벗어나고자 한 화가들은 캔버스 화면 자체를 구성하는 데 몰두하게 되고 산업화로 인해 생산된 새로운 미술 재료와 온갖 사물들, 인쇄물, 사진 등은 작품의 제작 요소로 포착되기 시작한다. 유화 물감보다 점성이 낮고 흐름성이 좋은 공업용 페인트는 붓으로 그리기보다 화면에 뿌리거나 흐르는 흔적을 남기는 작업에 활용되기도 한다. 또한 건조가 빠르고 접착강도가 높은 접착제의 발명은 캔버스 화면을 더욱 도드라지고 돌출되도록 이끈다. 미술가들은 일루전에 대한 의문을 제기하며 인식과 창작의 향로를 행위, 신체, 개념, 기술과 같이 고착된 형상을 갖지 않는 것들로 변경한다. 묘사하는 대상의 윤곽을 나타내거나 배경과 형상을 분리하고 경계를 짓기 위해 사용되었던 절제된 선도 신체적 행위나 움직임의 흔적, 그리고 개념의 전개 과정과 흐름을 드러내는 새로운 선이 된다. 이러한 선은 사용되는 화면과 붓 그리고 물감 또는 잉크의 종류에 따라 두께, 농담, 갈필, 굵힘, 꺾적 및 길이 등 매우 다양한 특징으로 표현될 수 있다.

본 논문에서는 강제 로봇의 구조적 특징을 활용한 선의 표현 효과를 연구한다. 붓으로 그림을 그리는 로봇의 설계 및 제작을 위한 기초연구로서 로봇의 기구학적 해석과 시뮬레이션 시스템을 개발하여 표현의 다양성을 탐구한다. 전통적 시각예술의 관점에서 로봇 팔을 활용한 창작행위는 자동화와 행위주체에 대한 근본적인 논의를 유발한다. 그러나 솔 르윗(Sol LeWit, 1928~2007)의 <월 드로잉(Wall Drawing)> 시리즈의 ‘지시(instruction)’서와 ‘제도사(draftsman)’의 관계처럼 예술가의 의도와 지시 그리고 의도된 무통제(타자의 자율성) 간의 균형과 협력은 새로운 창의적 발견의 촉매로서 작용했다 [2]. 더 나아가 생성형 AI와 같은 비인간적 힘들과의 협력을 위해 기술과 기계를 분석하고 그것의 작동 원리를 파악함으로써 인간-기계의 협력이 단순히 편리함과 효율성의 효과에 따른 것이 아닌 의도 재중심화를 목표로 하게 된다. 예술가가 도구와 재료를 마치 신체의 일부처럼 숙련되게 다루듯이 매체에 대한 이해와 분석으로 선의 위치 꺾적에서 붓의 기울기와 방향의 변화가 드로잉 표현에 어떤 효과를 나타내는지 살펴본다.

### 1.2 연구방법 및 범위

본 논문은 붓의 방향과 기울기 설정이 가능한 로봇을 디자인하기 위해 관절과 링크의 기본 구조를 설정하고 역기구학적 해석을 통해 붓을 사용하는 기계의 드로잉 가능성을 연구한다. 로봇을 활용한 예술에서 로봇은 그 자체로 예술의 부분이 되거나 아니면 도구가 된다. 즉 로봇 자체가 작품의 일부로 함께 전시되거나 예술 작품의 제작을 위한 수단으로 활용된다. 본 연구는 궁극적으로 예술 작품을 제작하는 로봇이 동시에 작품의 일부가 될 수 있도록 로봇을 직접 제작하는 것을 목표로 한다. 기성 시스템을 활용할 경우 제한적인 외형 변경이나 기술적 제약 내에서 창작해야 하는 단점이 있기 때문에 커스터마이징과 확장성을 고려하여 디자인에 반영한다.

[표 1] 그림 그리는 로봇에 대한 연구와 주요 특징

[Table 1] Research and comparison of drawing robot projects

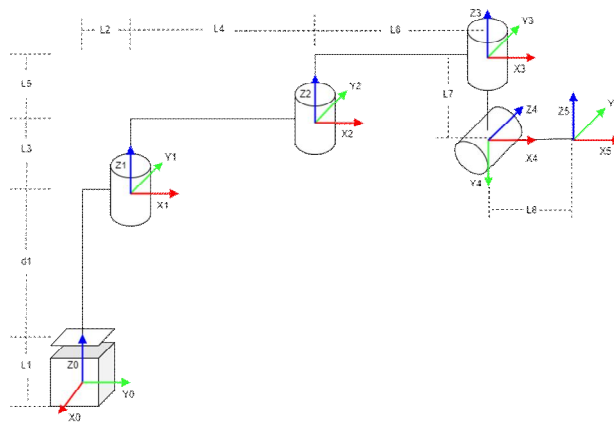
분류	연구/프로젝트 이름	주요 특징
기성 로봇 활용	A Semi-Automatic Oriental Ink Painting Framework	3D 모델에서 기하학적 윤곽선을 추출하고 신경망으로 단순화하여 디지털 스트로크를 생성 후 기성 로봇 팔로 드로잉 모방 [3].
	Emulating Artistic Expressions in Robot Painting	강화학습(DRL) 프레임워크를 통해 인간 예술가의 부정확한 붓 터치나 오류를 포함한 드로잉 전략을 학습 [4].
	FRIDA (Framework and Robotics Initiative for Developing Arts)	언어 설명, 이미지, 스케치 등 다양한 인간 입력으로부터 영감을 받아 그림을 그리는 로봇 시스템. 딥 신경망 피드백을 활용하여 붓 스트로크 계획을 지속적으로 최적화하고 재조정 [5].
	Self-Improving Robotic Brushstroke Replication (e-David)	붓 압력과 두께 간의 관계를 측정하고, 카메라 피드백을 통해 붓 스트로크 복제 기술을 자가 개선하는 시스템. 인간의 붓 스트로크와 유사한 특성을 가진 개별 스트로크 라이브러리를 구축 [6].
로봇 자체 제작	Six Robots Named Paul (Artist: Patrick Tresset)	여러 로봇이 동시에 다른 시점에서 방문자의 초상화를 그리는 설치 미술. 인간 초상화 그리기 과정을 전시하고 기계의 행위성과 예술의 진정성 문제에 대한 논의를 유발 [7].
	Interactive Multi-Robot Painting (Swarm Painting)	인간의 입력과 로봇 떼의 집단 행동 및 이질성이 결합되어 예측 불가능한 색상 구성과 새로운 스타일의 작품을 창출하는 생성 예술 [8].
	MEART: The Semi-Living Artist	살아있는 쥐의 대뇌 피질 신경망이 다중 전극 배열(MEA)을 통해 로봇 팔의 그림 그리기 움직임을 제어하는 뉴로로봇 프로젝트 [9].
	Artbots (Artist: Leonel Moura)	마이크로칩, 센서, 색상 마커 펜을 갖춘 자율 로봇. 로봇 에이전시를 통해 예술의 경계와 작가에 대한 전통적인 관념에 도전하는 개념 예술 [10].

로봇과 예술에 대한 연구에서 의도나 목적에 따라 [표 1]과 같이 두 경향으로 분류할 수 있는데, 기존 인간의 예술에서 기교적 특징을 기계적으로 모방하기 위한 방안을 연구하는 분야는 주로 기성 시스템을 활용한다. 반면 고유한 미학적 표현성, 상호작용성 등을 연구하기 위한 분야에서는 예술가가 직접 기계나 로봇을 개발하는 경향이 파악된다.

## 2. 드로잉 로봇의 기구학적 해석

### 2.1 붓의 위치 설정이 가능한 로봇의 역기구학

드로잉이 가능한 로봇을 제작하기 위해 그 형태를 상상해 본다면 사람의 팔을 모방한 구조가 가장 먼저 떠오른다. 인간형 로봇 팔은 3자유도를 갖는 구형 어깨 관절(Spherical joint), 팔꿈치의 1자유도 회전 관절(Revolute joint), 손목의 3자유도 구형 관절로 구성되며 1개의 여유 자유도를 갖는다. 로봇의 관절이 많을수록 목표지점에 도달하기 위한 해의 수가 많아지고 판단하고 검증해야 하는 계산량이 증가한다는 단점에도 불구하고 풍부한 자세 설정에 유리한 7자유도를 갖는 인간형 로봇 팔은 산업뿐만 아니라 소비자 대상의 서비스 분야나 예술 공연 등에서도 활용된다. 그러나 이 연구는 공연을 위한 로봇의 설계가 아니다. 로봇 자체의 화려한 움직임보다 붓의 기계적 위치 이동과 방위의 변화가 어떤 표현 효과를 나타내는지 연구하는 것이 목적이다. 따라서 드로잉을 위해 필요한 최소한의 자유도를 정의하면 2차원 평면 화면의 특정 위치에 대한 접근과 회전에 대한 4자유도와 화면과 수직 방향 선형운동을 위한 1자유도와 같다. 따라서 붓이 화면과 맞닿는 위치는 X, Y축에 대한 이동으로, 붓을 들거나 압력을 가하는 방향은 Z축 이동으로, 붓의 방향은 Z축에 대한 회전, 그리고 붓의 기울기는 X축에 대한 회전으로 정의하고 [그림 1]과 같이 스카라(SCARA, Selective Compliance Assembly Robot Arm)형 로봇을 바탕으로 드로잉 로봇을 구성하였다.



[그림 1] 붓의 방향 및 기울기 축이 추가된 스카라형 로봇의 기구학 모델

[Fig. 1] Kinematic model of a SCARA robot with added brush direction and tilt axes

역기구학은 관절과 링크로 구성된 로봇에 임의의 위치와 방위가 목표로 주어진 경우, 로봇의 말단 부분(붓 끝)이 목표(드로잉 경로)에 도달하기 위해 관절의 회전 각이나 이동 길이를 구하는 것

이다. 보통 캐릭터 애니메이션에서 동물의 다리 움직임을 표현할 때 각 관절의 회전각을 키프레임에 입력해 자세와 동작을 연출하는데 이를 전향기구학(Forward kinematics)이라고 한다. 이와 반대로 캐릭터의 발끝을 마우스로 조작하여 움직이면 무릎이 접히거나 발목 관절의 각도가 변하는 경우가 있는데 이것이 역기구학을 애니메이션에 적용한 것이다. 이 연구에서는 기하학적 해석을 통해 역기구학을 위한 계산 알고리즘을 터치디자이너(Touchdesigner) [11]에서 파이썬 스크립트로 구현하였다.

공구계 {T}를 정지계 {S}에 기준하여 관절각을 구하는 문제는 두 부분으로 나뉜다. 기저계 {B}에 기준하는 손목계 {W}를 찾는 문제로 계 변환을 수행하고, 그 후에 역기구 계산을 하여 관절각을 구한다 [12]. 역기구학에서 손목의 위치를 먼저 구하는 이유는 공구계(말단, 붓)의 위치와 자세를 관절 좌표계 상에 변환하는 것으로 폐형식의 해를 구할 수 없기 때문이다 [13]. 따라서 말단 좌표계를 기저계에 대하여 변환하고 손목의 위치를 구하는 과정은 다음과 같다. [그림 1]에서 말단 좌표계는 기저계의 Z축을 기준으로 90도 회전한 행렬이다. 식(1)의 3차원 회전 행렬을 이용해 말단의 좌표계를 식(2)와 같이 변환하면 임의의 붓의 방향(YAW)과 기울기(PITCH)에 대한  ${}^0R_5$ 를 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$Rx(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}, Ry(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}, Rz(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Rz(\pi*0.5) \cdot (Ry(0) \cdot Rx(0)) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

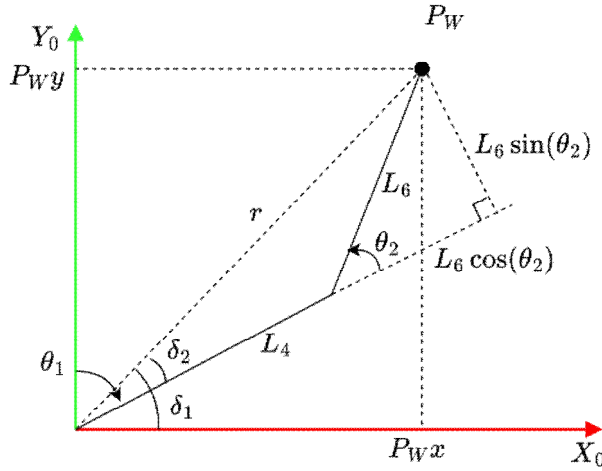
$${}^0R_5 = (Rz(YAW) \cdot (Ry(0) \cdot Rx(PITCH))) \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

드로잉을 위한 평면의 붓 끝(TIP) 위치에 해당하는 벡터를  ${}^0P_5$ 로 정의하고, 손목의 위치를 구한다. 현재 주어진 선 위의 점 위치와 붓의 방향 및 기울기가 [그림 1]의 말단의 5번 좌표계라고 가정하면 손목의 위치는 X축 방향으로  $L_8$  만큼 감소해야 한다. 즉 기저계를 기준으로 할 때 Y축 방향으로  $L_8$ 의 길이로 감소하는 것이다. 따라서 손목계  $P_W$ 를 다음과 같이 구한다.

$${}^0P_5 = \begin{bmatrix} TIP_x \\ TIP_y \\ TIP_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_W = {}^0P_5 - L_8 \cdot ({}^0R_5 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}) \quad (5)$$

다음으로  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 구하기 위해 기저계를 위에서 바라본 시점으로 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다. 이때 [그림 1]의  $L_2$ 를 0으로 대입하여 1번 좌표계를 기저계의 원점으로 이동시킨다.  $L_4$ 와  $L_6$ 는 기저계의 X, Y 평면(그림의 화면)과 항상 수평을 이루며 높이(기저계 Z축에 대한 선형 이동)는 여기서 구하지 않는다.



[그림 2] 기하학적 해석을 위한 변수 설정  
 [Fig. 2] variables for geometric interpretation

우선  $\theta_2$ 를 구하기 위해 코사인 제2법칙을 적용한다.  $r$ 은 원점에서 손목까지 길이이고  $P_W$  벡터의 길이( $\|P_W\|$ )이기도 하다. 따라서 식(6), (7)의 과정과 코사인 대칭성을 이용하여  $\cos(\theta_2)$ 에 대한 식(9)의 값을  $D$ 에 대입한다.

$$\|P_W\|^2 = L_4^2 + L_6^2 - 2L_4L_6\cos(\pi - \theta_2) \tag{6}$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = \frac{L_4^2 + L_6^2 - \|P_W\|^2}{2L_4L_6} \tag{7}$$

$$\cos(\pi - \theta_2) = -\cos(\theta_2) \tag{8}$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{\|P_W\|^2 - L_4^2 - L_6^2}{2L_4L_6} = D \tag{9}$$

그리고 삼각함수 사이의 관계식을 이용하여  $\tan(\theta_2)$ 를 식(9)에서 구한  $D$ 에 대한 식으로 정리한 후  $\theta_2$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1, \quad \tan(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} = \frac{\sqrt{\sin^2(\theta)}}{\cos(\theta)} = \frac{\sqrt{1-\cos^2(\theta)}}{\cos(\theta)} \quad (10)$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{\sin(\theta_2)}{\cos(\theta_2)} = \frac{\sqrt{1-\cos^2(\theta_2)}}{\cos(\theta_2)} = \frac{\sqrt{1-D^2}}{D} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sqrt{1-D^2}, D) \quad (12)$$

다음으로  $\theta_1$ 을 구하기 위해  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 를 정의하고 해석하면 식(13)과 같다.  $\theta_1$ 의 좌표계는 기저계 Z축의 회전 방향으로 90도 회전되어 있어 기저계의 Y축이  $\theta_1$  좌표계의 시작점이 된다. 따라서 [그림 1]의 경우  $\theta_1$ 은 Z축 회전 방향의 반대로 회전한 경우를 나타낸다.  $\delta_1$ 은  $P_W$ 를 이용해 구하고,  $\delta_2$ 는 식(12)에서 구한  $\theta_2$ 를 이용해 기하학적 해석이 가능하다.

$$\theta_1 = -\pi*0.5 + (\delta_1 - \delta_2) \quad (13)$$

$$\delta_1 = \text{atan2}(P_{Wy}, P_{Wz}) \quad (14)$$

$$\delta_2 = \text{atan2}(L_6\sin(\theta_2), L_4 + L_6\cos(\theta_2)) \quad (15)$$

마지막으로  $\theta_3, \theta_4, d_1$ 은 위에서 계산된 값들을 사용해 다음과 같이 구한다.  $\theta_4$ 는 붓의 기울기에 해당하는 값으로 기저계의 X축 회전 방향과 말단 좌표계의 Y축 회전 방향이 반대이기 때문에 식 (17)과 같이 구한다.

$$\theta_3 = YAW - \theta_2 - \theta_1 \quad (16)$$

$$\theta_4 = -PITCH \quad (17)$$

$$d_1 = P_{Wz} - (L_1 + L_3 + L_5 - L_7) \quad (18)$$

## 2.2 역기구학의 검증 및 붓의 방향과 기울기 적용

이 장에서는 앞에서 구한 각 조인트의 회전( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ )과 이동( $d_1$ ) 값을 검증한다. 이를 위해 데 나비트-하텐버그 표기법(Denavit-Hartenberg notation)에 따라 DH 파라미터를 정리하면 [표 2]와 같다 [12]. 표의 값을 회전과 이동을 동시에 다루는 변환 행렬(homogeneous transformation matrix)에 적용하여 각 관절의 링크 사이의 변환을 구한 후 말단 부분의 위치와 자세에 해당하는  ${}^0T_5$ 를 구한다.

[표 2] DH(Denavit-Hartenberg) 파라미터

[Table 2] DH(Denavit-Hartenberg) parameter

Link	Theta	Alpha	R	D
1	90°	0°	$L_2$	$L_1 + d_1$
2	$\theta_1$	0°	$L_4$	$L_3$
3	$\theta_2$	0°	$L_6$	$L_5$
4	$\theta_3$	-90°	0	$-L_7$
5	$\theta_4$	90°	$L_8$	0

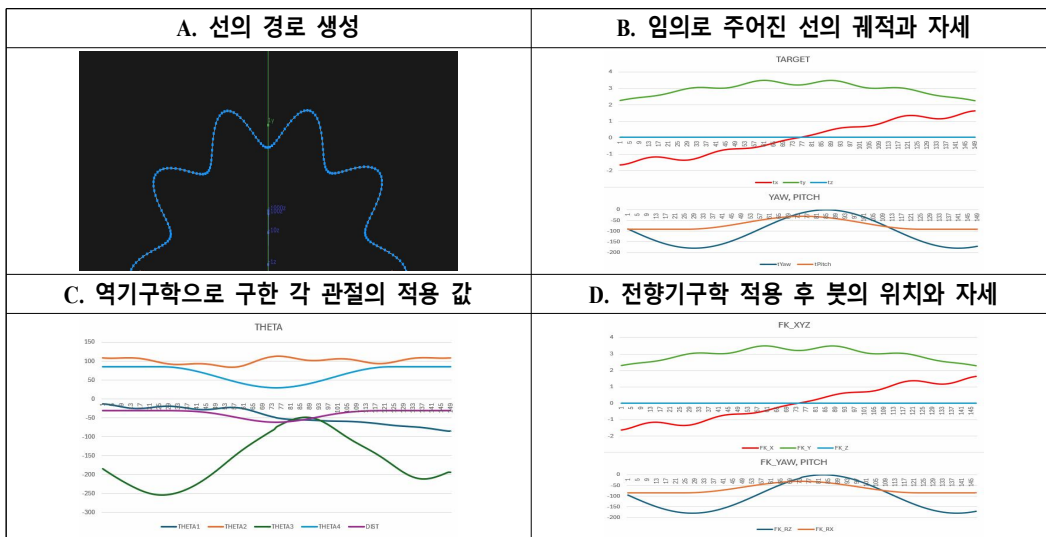
$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n)\cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n)\sin(\alpha_n) & r_n\cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n)\cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n)\sin(\alpha_n) & r_n\sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^0T_5 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 = \begin{bmatrix} {}^0R_5 & {}^0P_5 \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

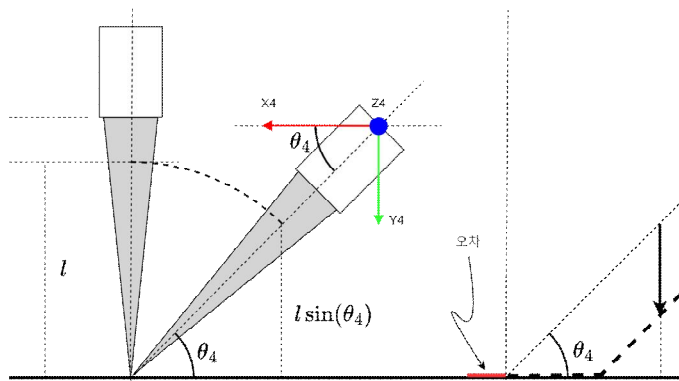
역기구학에서 구한 값을 각 관절에 적용하여 붓의 최종 위치와 자세가 최초에 주어진 임의의 값과 동일한 결과를 나타내는지 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 임의의 위치 좌표는 평면상의 점들의 궤적을 생성해 적용하였고, 기울기는 -90 ~ -35도로 변화하며, 방향은 -180 ~ 0도 사이를 1.33 주기로 변하는 값을 적용하여 실험하였다.

[표 3] 역기구학과 전향기구학의 상호 검증

[Table 3] Cross-validation of inverse kinematics and forward kinematics



로봇의 각 관절의 움직임을 파악하고 붓의 표현 효과를 시뮬레이션 하기 위해 소프트웨어를 제작하면서 위 검증 절차를 함께 진행하였다. [표 3]의 A와 같이 345개의 세그먼트로 구성된 선을 생성하고 각 관절의 움직임을 관찰하면서 관절에 적용되는 값을 저장한 후 이것을 다시 식(20)을 이용해 말단계(붓)의 위치와 방위를 계산하였다. 그 결과 최초에 설정한 선의 궤적 및 붓의 방향과 전향기구학으로 생성한 결과가 서로 일치하는 것을 확인하였다. 그런데 이 궤적, 기울기, 그리고 방향에 대한 정보에서 기울기나 방향이 바뀌어도 선의 두께 변화나 획의 표현은 가능하지 않다. 그 이유는 역기구학으로 구한 관절들의 값은 송곳과 같이 끝이 뾰족하고 휘지 않는 공구를 위한 결과들이기 때문이다. 목표하는 한 점을 지정해서 그 위치를 벗어나지 않고 송곳을 이리저리 기울이면 팔의 자세는 다양하게 바꿀 수 있지만 화면에는 결국 하나의 점만 남는다. 필기용 펜이나 가늘고 딱딱한 건식 재료를 선택하면 기울기와 방향에 대한 설정은 계산의 부하만 높이는 불필요한 정보가 된다. 따라서 비교적 유연하고 탄력이 있는 붓을 선택했을 때 어떤 추가적인 정보가 필요한지 살펴보겠다.



[그림 3] 붓의 기울기와 압력의 범위

[Fig. 3] The range of brush tilt and pressure

붓은 형태, 크기 그리고 소재 등이 매우 다양하다. 특히 붓모의 형상과 재질은 표현의 효과와 가장 밀접한 관계가 있으며 붓의 형태가 납작하고 크기가 크다면 위와 같은 상황에서도 독특한 붓의 흔적을 남길 수 있을 것이다. 예술적 표현에서의 다양성과 자율성을 고려하면 다채로운 붓들의 존재는 매우 긍정할 일이지만 이 연구에서는 둥글고 끝이 가지런히 정렬된 가상의 붓으로 가정하여 로봇의 제어와 표현 효과와의 관계를 탐구한다. [그림 3]은 붓의 기울기에 의한 압력의 허용 범위를 결정하기 위한 도식이다. 붓이 화면과 맞닿아 휘 수 있는 범위는 붓모의 전체 길이보다 짧은  $l$ 로 정의한다. 붓이 화면에 대해 직각을 이루고 있다면 이  $l$ 의 길이 만큼 로봇을 아래로 이동시켜 압력을 가할 수 있다. 그러나 붓을 기울이면 이 길이는 수직으로 이동할 수 있는 범위가  $l \sin(\theta_4)$

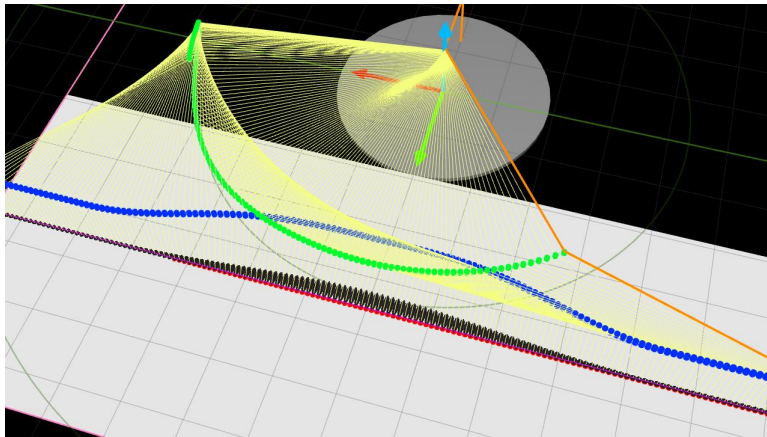
로 줄어들게 된다. 식(18)의  $d_1$ 은 미끄럼 관절의 이동 거리이고  $L_1, L_3, L_5, L_7$ 이 0일 때 손목의 높이와 같다. 즉  $d_1$ 의 크기를  $l \sin(\theta_4)$ 의 크기 이내에서 줄이게 되면 붓은 아래로 이동하고 기울기와 붓끝의 방향 설정에 대한 표현이 가능해진다. 여기서 주의할 점은 붓을 아래로 내리면 붓끝의 위치가 화면을 따라 미끄러져 최초의 위치에서 앞으로 밀려난다는 것이다. 그러나 현실 세계의 실제 붓은 물감의 종류나 희석 정도에 따라 계산된 오차만큼 정확하게 벗어나지 않을 것이다.

### 3. 붓의 방향과 기울기의 변화에 의한 표현 효과 연구

일반적으로 산업 생산 현장에서 사용되는 로봇은 절제되고 불필요한 동작 없이 효율인 동선으로 작동하도록 제어된다. 투입되는 시간과 자본에 비해 산출량을 높이기 위해서는 절도 있는 움직임이 요구된다. 이것이 우리가 로봇의 움직임에 대해 갖는 일반적인 인상일 것이다. 그러나 이 연구는 예술가의 드로잉 작품에서 관찰되는 선의 강약, 질감, 흐름 등 구성의 자율성이 높은 선을 모방하고자 하는 것이 아니라, 절제된 기계적 움직임의 특징을 유지하면서 추가적인 변수에 의해 어떤 표현적 결과가 나타나는지를 확인하기 위해 시뮬레이션을 실행하였다. 드로잉 작업은 화면과 붓 또는 그 이외의 재료 사이의 맞닿음에서 직접적인 효과가 발생한다. 물론 제안된 로봇은 인간의 행위를 간결하게 모방한 것이며 화면과 재료 사이의 위치와 방위에 대한 관계까지 동일하다. 그러나 로봇은 손목에 해당하는 구동계를 360도 이상 연속적으로 일정하게 회전할 수 있고 다양한 형태의 붓을 사용해 정확히 동일한 궤적의 드로잉을 반복적으로 제작하는 것이 가능하다. 이러한 로봇의 특징이나 강점을 감추지 않고 적극적으로 분석하고 활용해 기계가 지닌 매체적 특성을 드러낼 필요성이 있다. 이제 곧은 직선을 긋는 과정에서 붓의 방향과 기울기에만 변화를 주면서 각 관절이 움직이는 경로를 확인해 보겠다. [그림 4]는 드로잉 작업 표면에 가로의 긴 선을 그리는 경로를 생성한 것이다. 파란색 점들은 손목, 초록색 점들은 팔꿈치의 경로이며 흰색 화면 위의 붉은 점들은 선의 경로를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 직선을 그리기 위해 구한 각 관절의 해들은 연결된 링크를 부드럽게 이동시키는데 문제없이 적용되었다. 붓의 흔적은 검은색 점들로 방향과 기울기에 따라 다르게 표현된다. 붓의 압력의 경우 30~90도 사이의 기울기에 따라 화면 방향으로의 최대 이동 길이( $l \sin(\theta_4)$ )에 대해 95~5% 차등 적용하였다. 즉 붓이 수직으로 세워져 있는 경우 최대 길이의 5%를 추가로 이동시켜  $d_1$ 의 크기를 줄이게 된다.

위에서 설명한 붓의 압력에 대한 조건을 유지하고 방향과 기울기만을 변경하여 적용한 결과는 다음 [표 4]와 같이 나타났다. 물론 사람이 동일한 작업을 수행한다면 더 풍부하고 다양한 선을 표현할 수 있다는 것을 부정할 수 없다. 그러나 기계의 움직임이 인간의 움직임을 그대로 모방하도록 강제할 필요는 없으며 기계의 구조가 가진 명확한 규칙 안에서 드러낼 수 있는 표현의 효과와 차이를 알아본다. 그리고 아래의 결과에서 불연속적인 점들로 시뮬레이션을 진행한 이유는 붓의

끝 방향과 기울기에 따른 차이를 구분하고자 간격을 둔 것임을 밝힌다.



[그림 4] 관절과 링크의 이동 경로 시뮬레이션

[Fig. 4] Simulation of joint and link movement paths

[표 4] 붓의 방향과 기울기에 따른 선의 표현 효과

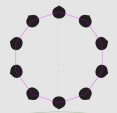

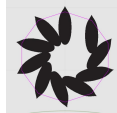

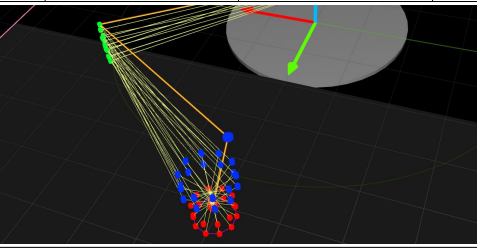


[Table 4] The effect of expressing lines according to the direction and inclination of the brush

구분	선의 표현 효과	방향	기울기
(가)		0°	90°
(나)		0°	35°
(다)		0-180° 반복3회	35°
(라)		0°	90-35° 반복1회
(마)		0°	90-35° 반복10회
(바)		0-180° 반복3회	90-35° 반복10회

[표 4]에서 확인된 바와 같이 결과로 나타난 선이 특히 로봇에서 실행이 가능한 이유는 다음과 같다. 로봇은 기본적으로 강체로 구성됨을 전제로 한다. 외부의 작용에 대해 크기나 형태가 쉽게 변하지 않도록 제작된다. 변형은 곧 역기구학에서 설정한 조건들의 변화를 의미하며 미세하게 축이 어긋난 경우에도 계산된 결과의 차이는 크다. [표 4]의 (가) 그림의 경우 붓이 90도로 세워진 상

태로 선을 그은 것이며 5%의 압력을 가하지 않았다면 선이 나타나지 않았을 것이다. 이론적으로 [그림 3]에서 설명했듯이 뾰족한 붓끝의 아주 미세한 부분만이 화면에 닿아 있는 상태로 세워져 있는 것이다. 보통 우리가 드로잉할 때 손이나 신체의 일부를 지면에 고정하기도 하지만 선을 긋는 과정에서 붓이나 연필 자체에 의지하며 선을 긋는다. 그런데 (바)의 경우처럼 붓모가 5%만 화면에 닿아 있는 상황에서 방향과 기울기를 동시에 전환하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 로봇이 목표지점의 한 점을 중심으로 여러 자세(방위)를 취할 수 있는 이유는 강체로 연결된 연쇄적 링크 구조에서 찾을 수 있다. 로봇의 이러한 구조적 특징은 붓에 의존하여 경로를 수정하거나 방향을 전환할 필요 없이 각 관절에 입력되는 정보만으로 가능해진다. 사람의 경우 시각적 정보만이 아니라 붓과 종이 또는 캔버스가 서로 닿는 마찰, 질감, 반발력, 물감의 점도 등 무수히 많은 감각 정보와 상호작용하는 과정을 거치게 된다. 여기서 제안된 로봇은 복잡한 피드백 센서를 장착하거나 스스로 사고하는 듯 보이는 지능체계를 갖추지 않았지만 오직 기구적 구조에서 계산된 제한적 정보로만 표현의 다양성을 실험하는 대상인 것이다.

[표 5] 선의 표현에 대한 응용  
 [Table 5] Application to the expression of lines

구분	표현 효과			
원형경로				
방향	0-324°	0-324°	0-360°	0-324°
기울기	85°	30°	30°	random
경로생성결과				
드로잉 응용 시뮬레이션				
				

프랑스 추상회화 그룹 베엠펬테(B.M.P.T)는 회화를 무한히 되풀이되는 행위의 궤적으로 붓으로 써 기존 회화의 표현 양식을 무시하고 대신 창조적 행위 자체의 표현적 가치를 강조하였고, 수직 줄무늬, 수평 줄무늬, 규칙적 흔적, 똑같은 직경의 원 등을 그리는 기계적이고 반복적인 방법으로 작품을 제작하였다 [14]. 선은 어떤 대상을 드러내고 배경으로부터 경계 짓기 위한 수단에서 벗어나 [표 5]와 같이 역동적 조형 요소로서 탐구의 대상이 된다. 프랑수아 모를레(François Morellet, 1926-2016), 다다마이노(Eduarda Emilia Maino, 1930-2004), 솔 르윗, 카를로스 크루즈 디에즈(Carlos Cruz-Diez, 1923-2019), 브리짓 라일리(Bridget Riley, 1931-), 훌리오 르 파르크(Julio Le Parc, 1928-) 등 수많은 시각예술가들은 선이라는 조형 요소가 지닌 표현적, 현상적, 인식적 효과를 연구하였다. 베라 몰나르(Vera Molnár, 1924-), 만프레드 모어(Manfred Mohr, 1938-), 벤 라포스키(Benjamin F. Laposky, 1914-2000) 등 컴퓨터 알고리즘을 활용한 예술가들도 절차적 반복, 점진적 규칙들과 예측 불가능성을 적용한 기계적 드로잉으로 기술미학에 대한 논의의 장을 열었다. 로봇을 활용한 드로잉은 선에 대한 예술가의 표현적 양식과 컴퓨터 알고리즘의 계산이 복합된 창의적 가능성을 내포한다. 기술미학에 대한 논의는 이 연구의 범위를 넘어서지만 이미지, 영상 생성 AI가 급진적으로 발전함에 따라 다학제적 관점의 논의는 반드시 필요하다. 마법처럼 이미지들이 자동 생산되며 쏟아져 나와 유포되는 시대에 로봇을 활용한 선의 표현 연구가 초라해 보일 수도 있겠다. 그러나 선이라는 단순한 조형적 요소를 로봇이 어떻게 그려내는지 그 과정을 분석하고 이해함으로써 기계를 도구성이나 유용성으로 평가하는 대상이 아닌 기술적 대상 또는 예술 작품 그 자체로서 바라볼 수 있게 된다.

#### 4. 결론

본 연구는 붓으로 드로잉하는 로봇을 제작하고 전시하기 위한 기초연구로 최소한의 관절과 링크로 가능한 선의 표현 효과를 확인하였다. 현대 미술에서의 드로잉이 지닌 포괄적인 개념을 바탕으로 강체 로봇의 구조적 특징을 활용한 선의 표현 효과를 연구하는 데 중점을 두며, 로봇의 기구학적 해석과 시뮬레이션 시스템 개발을 통해 드로잉 표현의 다양성을 탐색하였다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 뾰족하고 휘지 않는 재료와 달리 유연하고 탄력이 있는 붓의 경우 기울기와 방향의 변화가 선의 두께 변화나 획의 표현에 영향을 미칠 수 있음을 확인했다. 로봇의 연쇄적 링크 구조는 붓에 의존하여 경로를 수정하거나 방향을 전환할 필요 없이 각 관절에 입력되는 정보만으로 다양한 자세를 취할 수 있게 한다. 따라서 로봇이 선을 어떻게 그려내는지 그 과정을 분석하고 이해함으로써, 기계는 도구성이나 유용성으로만 평가되는 대상이 아닌 작품의 일부가 된다. 인간이 창작한 예술의 기교적 특징을 기계적으로 모방하는 것을 넘어, 로봇 자체의 고유한 미학적 표현성을 탐구하고 자동화와 행위 주체성에 대한 근본적인 논의를 제기하며 로봇과의 협업을 통해 예술

가의 아이디어를 변화시키는 비인간 요소들과의 상호 의존성을 확인한다. 앞으로 본 연구의 시뮬레이션을 토대로 로봇을 설계하고 제작하여 실제 화면, 물감 그리고 붓의 작용과 표현 효과를 실험해야 할 것이다. 또한 이 연구에서 다루지 않은 붓질의 속도와 관련된 로봇의 동역학을 적용하여 표현의 범위를 넓혀갈 것이다.

## References

- [1] J. Kim, "The role of drawing in contemporary art as seen through its conceptual shift", *Journal of Korea Society of Design Forum*, vol. 29, November 2010, pp. 103-114, doi: 10.21326/ksdt.2010..29.009.
- [2] J. Woo, "Sol LeWitt's Wall Drawings and the Originality of Conceptual Art", *Art History*, vol. 28, August 2014, pp. 453-483, doi: 10.14769/jkaah.2014.08.28.453.
- [3] H. Jin, M. Lian, S. Qiu, X. Han, X. Zhao, L. Yang, Z. Zhang, H. Xie, K. Konno, S. Hu, "A Semi-Automatic Oriental Ink Painting Framework for Robotic Drawing From 3D Models", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 10, September 2023, pp. 6560-6567, doi: 10.1109/LRA.2023.3311364.
- [4] Z. Wang, L. Li, T. Zhang, T. Liu, M. Li, Z. Wang, Z. Li, "Emulating Artistic Expressions in Robot Painting: A Stroke-Based Approach", *Applied Sciences*, vol. 14, no. 12, June 2024, pp. 1-10, doi: 10.3390/app14125265.
- [5] P. Schaldenbrand, J. McCann, J. Oh, "FRIDA: A collaborative robot painter with a differentiable, real2sim2real planning environment", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 29-June 2, 2023, London, UK, pp. 11712-11718, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160702.
- [6] J. M. Gülzow, L. Grayver, O. Deussen, "Self-Improving Robotic Brushstroke Replication", *Arts*, vol. 7, no. 4, November 2018, pp. 1-28, doi: 10.3390/arts7040084.
- [7] P. Tresset, F. F. Leymarie, "Portrait drawing by Paul the robot", *Computers & Graphics*, vol. 37, no. 3, January 2013, pp. 348-363, doi: 10.1016/j.cag.2013.01.012.
- [8] M. Santos, G. Notomista, S. Mayya, M. Egerstedt, "Interactive Multi-Robot Painting Through Colored Motion Trails", *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, October 2020, pp. 1-15, doi: 10.3389/frobt.2020.580415.
- [9] D. J. Bakkum, P. M. Gamblen, G. Ben-Ary, Z. C. Chao, S. M. Potter, "MEART: The semi-living artist", *Frontiers in Neurobotics*, vol. 1, November 2007, pp. 1-10, doi: 10.3389/neuro.12.005.2007.
- [10] L. Moura, "Robot Art: An Interview with Leonel Moura", *Arts*, vol. 7, no. 3, July 2018, pp. 1-5, doi: 10.3390/arts7030028.
- [11] Derivative, "Touchdesigner", derivative.ca, <https://derivative.ca>, (accessed July 10, 2025).
- [12] J. Craig, *Introduction to Robotics (Korean Edition)*, Textbooks, 2021.
- [13] Y. Chung, K. Jeong, *Introduction to Robotics*, Gs Intervision, 2017.
- [14] W. Kim, "A Study on the Shapes by Brush Strokes and Lines with Analysis of Painting Space in Modern Art: focusing on my work "The flow of the mind's eye" series", *Doctoral Dissertation*, Department of Fine Art, Graduate School of Hongik University, Republic of Korea, 2015. [Online]. Available: <http://dcoll.hongik.ac.kr/jsp/common/DcLoOrgPer.jsp?sItemId=000000019436>.