

Cosine Function-Based Trajectory Design of Swivel Seats for Ride Comfort Improvement

Yong Choi*, Cheol-Hong Kim**, Jae-hyung Park***

*Assistant Researcher, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, Pohang, Korea

**Professor, School of Computer Science and Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea

***Professor, School of Electronics and Computer Eng. and Dept. of Intelligence Electronics and Computer Eng., Chonnam National University, Gwangju, Korea

[Abstract]

The rapid development of autonomous driving has emphasized the role of swivel seats in maximizing spatial utility and passenger convenience, significantly raising the importance of developing advanced actuation systems. Conventional trapezoidal velocity profiles induce infinite jerk and mechanical shocks due to discontinuities in acceleration. Meanwhile, complex polynomial-based S-curve techniques impose a high computational burden on embedded systems. To overcome these limitations, this paper proposes a single cosine function-based velocity trajectory utilizing a time normalization technique that maps the physical time domain to a phase variable within the interval $0 \leq t \leq \pi/2$. The proposed method ensures the mathematical continuity of both velocity and acceleration, thereby constraining jerk to a finite value. Furthermore, by ensuring that acceleration starts from zero, it fundamentally eliminates initial operational impulses. In particular, because it is formulated as a single mathematical equation, we demonstrate that precise real-time control is achievable even in low-specification Micro Controller Unit (MCU) environments. By suppressing abrupt inertial changes, the proposed method is expected not only to provide passengers with superior ride comfort and psychological stability but also to yield industrial benefits, such as enhanced durability through the reduction of mechanical vibrations.

▶ **Key words:** Autonomous Vehicle, Swivel Seat, Trajectory Planning, Embedded System, Cosine velocity profile

-
- First Author: Yong Choi, Corresponding Author: Jae-hyung Park
 - *Yong Choi (potchy0927@potchy0927.re.kr), Korea Institute of Robotics & Technology Convergence
 - **Cheol-Hong Kim (cheolhong@ssu.ac.kr), School of Computer Science and Engineering, Soongsil University
 - ***Jae-hyung Park (hyeoung@chonnam.ac.kr), School of Electronics and Computer Eng. and Dept. of Intelligence Electronics and Computer Eng., Chonnam National University
 - Received: 2026. 03. 20, Revised: 2026. 04. 17, Accepted: 2026. 04. 20.

[요 약]

자율주행 자동차 기술이 고도화됨에 따라 탑승자의 편의와 실내 공간 활용성을 극대화할 수 있는 스윙블 시트(Swivel Seat)의 역할이 부각되며, 관련 구동 기술 개발의 중요성이 크게 대두되고 있다. 이에 따라 본 연구는 스윙블 시트의 승차감 및 구동 품질 향상을 위한 새로운 궤적 생성 알고리즘을 제안한다. 기존의 사다리꼴 속도 프로파일은 가속도의 불연속성으로 인해 무한 저크(Infinte Jerk)와 기계적 충격을 유발하며, 복잡한 다항식 기반의 S-curve 기법은 임베디드 시스템에서 높은 연산 부하를 요구한다는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 논문에서는 물리적 시간 도메인을 $0 \leq t \leq \pi/2$ 구간의 위상 변수로 매핑하는 시간 정규화 기법 기반의 단일 코사인(Cosine) 함수 속도 궤적을 제안한다. 제안된 기법은 속도 및 가속도의 수학적 연속성을 보장하여 저크를 유한하게 제한하며, 가속도가 0에서 시작하는 특성을 통해 초기 구동 충격을 근본적으로 제거하는 것이 가능하다. 특히, 제안 기법은 단일 수식 연산만으로 구성되어 저사양 MCU 환경에서도 실시간 정밀 제어가 가능하다는 장점이 있다. 본 연구의 결과물은 급격한 관성 변화를 억제함으로써 탑승자에게 우수한 승차감과 심리적 안정감을 제공할 뿐만 아니라, 기계적 진동 줄임을 통한 내구성 향상이라는 산업적 효과도 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

▶ **주제어:** 자율주행차, 스윙블 시트, 궤적 설계, 임베디드 시스템, 코사인 함수 궤적

I. Introduction

자동화 및 정밀 제어 기술이 지속적으로 발달하면서 다양한 산업 분야에서 위치 제어 시스템에 대한 요구사항이 많아지고 있다. 산업용 로봇, CNC 머신, 3D 프린터, 무인 이동체(AGV) 등에서는 목표 위치로의 빠르고 정확한 이동이 해당 시스템의 성능을 좌우하는 핵심이 된다. 그러나 단순한 위치 이동 명령만으로는 시스템에 과도한 부하, 진동, 또는 기계적 마모를 유발할 수 있으므로 궤적을 따라 부드럽게 이동하면서도 물리적 제약을 만족시키는 궤적 생성 기법이 필수적으로 요구되는 상황이다[1].

제어 분야에서 일반적으로 사용되고 있는 궤적 생성 기법 중 하나는 사다리꼴 위치 궤적(Trapezoidal Position Trajectory) 이다[2]. 이 방법은 일정한 가속도 구간, 일정 속도 구간, 감속 구간으로 구성된 사다리꼴 형태의 궤적을 통해 속도 및 가속도 제약을 자연스럽게 만족시킬 수 있는데, 궤적 생성 계산이 단순하므로 실시간 시스템에서도 용이하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 기존 시스템에서는 사다리꼴 속도 프로파일(Trapezoidal Velocity Profile)을 중심으로 궤적 계획이 이루어졌으며, 이를 기반으로 위치 추정을 수행하는 방법이 주로 사용되어 왔다[3]. 그러나 복잡한 환경에서는 궤적을 속도가 아닌 위치 기준으로 직접 생성하고 제어하는 것이 제어부 설계와 시스템 응답성 측면에서 보다 효과적일 수 있다. 이러한 시스템에서는 위치 목표값과 더불어 속도, 가속도, jerk(가속도의 변화율) 등

의 운동 프로파일이 제약 조건으로 주어지며, 이를 만족하는 사다리꼴 궤적 생성기(trajjectory generator)의 설계가 핵심 요소로 자리 잡고 있다[4]. 사다리꼴 속도 프로파일은 가속-등속-감속의 세 구간으로 속도를 구성하여 시스템의 기계적 부하를 줄이고 안정적인 제어가 가능함과 동시에, 일정한 가속도와 감속도를 유지하므로 모터 토크 요구량이 일정 범위 내에서 유지되며 진동 및 기계적 마모를 최소화할 수 있는 장점이 있다.

기존의 단순 위치 목표 입력 방식은 목표 위치에 단번에 도달하는 형태의 제어 명령을 생성하기 때문에, 가속도의 급격한 변화로 인해 시스템에 불필요한 진동과 피크 토크가 발생하게 된다[5]. 반면 사다리꼴 속도 프로파일을 사용하면 부드러운 속도 변화가 가능해지고, 제어기의 안정성과 기계 부품의 수명을 향상시킬 수 있다. 이러한 이유로, 사다리꼴 궤적 생성은 산업계 뿐 아니라 자율주행 로봇, 의료 재활 장비, 특수 차량 제어 등 다양한 분야에서 표준적인 방식으로 활용되고 있다.

본 연구에서는 코사인 함수 속도 궤적 생성의 수학적 모델을 정립하고, 이를 PID 제어기와 결합하여 모터 기반 위치 제어 시스템에 적용하고자 한다. 이를 위해, 제어 구간을 $0 \leq t \leq \pi/2$ 로 정의하고 코사인 함수의 단조 감소 특성을 이용하여 스윙블 시트의 회전 속도를 초기 최대값에서 0까지 연속적으로 감속하는 제어 기법을 제안한다. 제안된 방

법은 RPM으로 명령된 최대 속도를 각속도로 변환하여 적용함으로써 계산이 단순하고 속도·가속도 연속성이 우수해 승차감과 시스템 안정성을 동시에 향상시킬 수 있다. 제안한 속도 궤적과 제어기의 성능 검증을 위하여 실제 스윙블 시트 시스템에 대해 적용하여 그 성능을 검증하였다. 또한 실제 스윙블 시트(Swivel Seat)에 적용하여 실험을 통해 성능을 검증하였으며, 이를 통해 복잡하지 않으면서도 신뢰성 있는 위치 제어 시스템 구축 방안을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 사다리꼴 궤적 및 S-Curve 관련 연구를 소개하고, 3장에서는 제안한 코사인 함수 속도 궤적을 자세히 설명한다. 4장에서는 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위한 실험 환경 구축 및 실험 결과를 제시하며, 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구에 대해 논의한다.

II. Preliminaries

2. Related works

2.1 Conventional Velocity Profile Design Techniques

PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기는 궤적 추종 분야에서 가장 널리 사용되는 피드백 제어 구조이다. 구조가 단순하고 튜닝이 직관적이며 선형 시스템에서 높은 성능을 발휘할 수 있다는 점이 주요 장점이다. Astrom과 Murray는 PID 제어기의 일반적인 이론적 기반을 정리하였으며 다양한 실제 적용 사례를 소개하였다[6].

궤적 추종 제어에서는 PID를 기반으로 위치 오차를 실시간으로 보정함으로써 사전에 생성된 궤적을 정확히 따르는 것이 가능하다. Liu et al. 은 고속 이송 시스템에서 PID 기반 궤적 추종이 S-curve와 사다리꼴 궤적 모두에 대해 안정적인 추종 성능과 오차를 분석한 내용을 보고하였다[7].

산업용 모션 제어 및 전동식 액추에이터 구동 분야에서 가장 보편적으로 사용되는 방식은 사다리꼴 속도 프로파일이다. 산업 자동화 시스템 및 AGV(Automatic Guided Vehicle)의 위치 제어에서는 구동체에 가해지는 부하를 최소화하고 목표 위치에 정확히 도달하기 위해 속도 프로파일을 생성하여 제어한다. 그중 사다리꼴 속도 프로파일은 구현이 용이하고 최대 속도와 가속도를 설정하여 시스템의 무리한 구동을 방지할 수 있다는 장점 때문에 DC 모터의 가속 및 감속 제어에 널리 사용되는 기법이다. 사다리꼴 속도 프로파일은 가속 구간(Acceleration), 등속 구간(Constant Velocity), 감속 구간(Deceleration)의 세 단

계로 구성된다. 그림 1은 전형적인 사다리꼴 속도 프로파일을 보여준다. 목표 이동 거리가 가속 구간(Acceleration)의 이동 거리보다 큰 경우, 시스템은 설정된 가속도(A)로 가속하여 최고 속도(V_{max})에 도달한 후 등속 운동을 유지하다가 목표 위치 도달 전 감속하여 속도와 가속도가 0이 되도록 제어된다. 이때 시간 t 에 따른 속도 식 $v(t)$ 는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$v(t) = \begin{cases} at & (0 \leq t < t_1) \\ v_{max} & (t_1 \leq t < t_2) \\ v_{max} - a(t - t_2) & (t_2 \leq t < t_f) \end{cases} \quad \text{식(1)}$$

여기서 t_1 은 가속이 종료되고 등속 구간이 시작되는 시점, t_2 는 감속이 시작되는 시점, t_f 는 목표 위치에 도달하는 종료 시점을 의미한다. 사다리꼴 아래의 파란색 영역은 총 이동거리를 의미한다.

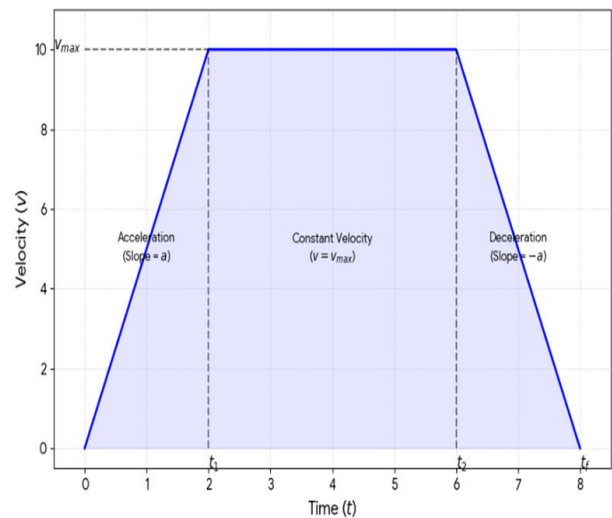


Fig. 1. Trapezoidal Velocity Profile

사다리꼴 속도 프로파일은 연산 부하가 매우 적다는 장점이 있으나 가속도가 불연속적으로 변화하는 지점에서 저크(Jerk)가 이론적으로 무한대에 도달하여 시스템의 기계적 진동과 소음을 유발하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 가속도 구간을 선형적으로 변화시키는 S-커브(S-curve) 프로파일이 제안되었다[8]. S-커브 방식은 가속도의 연속성을 부여하여 기계적 충격을 완화할 수 있으나 다항식의 차수가 높아짐에 따라 제어 파라미터 튜닝이 복잡해지고 임베디드 제어기에서의 연산 오버헤드가 증가하는 단점이 있다[4].

S-curve 프로파일은 가속도의 연속성을 보장하기 위해 가속도 변화율(jerk)까지 제어하는 방식이다. 이 기법은 기

계적 진동을 크게 줄일 수 있으며, 고속 정밀 모션 제어에 적합하다. Park과 Lee는 산업용 로봇에 S-curve 궤적을 적용하여, 사다리꼴 궤적에 비해 충격을 30% 이상 줄일 수 있음을 실험적으로 증명하였다[9]. 하지만, S-curve 프로파일은 궤적 생성 과정이 복잡하고, 실시간 계산량이 많아진다는 단점이 있다. 따라서 연산 리소스가 제한된 임베디드 시스템이나, 복잡한 경로 계획이 필요 없는 단순 이송 작업에서는 오히려 사다리꼴 프로파일이 선호된다.

마지막으로, PID 제어기와의 결합뿐 아니라, 모델 예측 제어(MPC), 적응 제어, feedforward 제어 등 고급 제어 기법과 함께 사용하여 추종 오차를 줄이고 응답 속도를 개선하는 연구들이 활발히 진행 중이다[10][11]. 이러한 연구들은 사다리꼴 궤적 생성이 단순한 속도 계획을 넘어서, 정밀 동작 제어 시스템의 핵심 구성 요소임을 입증하고 있다[12].

최근에는 다항식 기반 궤적의 복잡성을 해결하기 위해 삼각함수(Trigonometric functions)를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. J. Zhao 등은 가속도 프로파일에 코사인 함수를 적용하여 전 구간에서 가속도와 저크가 연속되도록 설계하는 방법을 제안하였다[13]. 또한, S. S. Seweryn의 연구에 따르면, 삼각함수 프로파일이 다항식 기반 S-커브보다 고주파 진동 억제와 저크 제어에 유리하다는 수학적 분석을 담고 있다[14]. K. J. Åström의 연구에 따르면 모터 제어 시스템에서 코사인 궤적이 사다리꼴 속도 제어보다 우수한 성능을 제공할 수 있음을 보여준다[15].

제어 시스템의 유연성을 확보하기 위해 실제 시간(τ) 대신 정규화된 위상(Normalized Phase)을 독립 변수로 도입하는 연구도 지속되어 왔다[16][17]. Biagiotti와 Melchiorri는 궤적 설계를 시간 도메인이 아닌 정규화된 매개변수 공간에서 수행함으로써, 샘플링 주기나 목표 시간이 변화하는 상황에서도 시스템의 동적 특성을 일정하게 유지할 수 있는 강인한 제어 방법론을 제시하였다. 이러한 기법은 다양한 운전 조건에 능동적으로 대응해야 하는 지능형 모빌리티 시스템에서 핵심적인 설계 전략으로 활용되고 있다[4]. Piazzì와 Visioli(2000)는 B-스플라인과 시간 정규화 기법을 이용하여 보호용 로봇 암의 최소 저크 궤적을 생성함으로써, 기존 속도 프로파일 대비 기계적 충격과 진동을 효과적으로 저감하는 방법을 제안하였다[18].

Pandi 등[19]은 궤적 생성 알고리즘이 실제 산업 현장의 마이크로컨트롤러(MCU)에 탑재될 때 발생하는 '실행 지연(Execution latency)' 문제를 심층적으로 분석하였다. 전통적인 S-curve 기법의 고차 다항식을 풀기 위해서는 다수의 곱셈 및 부동소수점(Floating-point) 연산이 필수

적이다. 고성능 프로세서와 달리, FPU(부동소수점 연산 장치)가 부재하거나 성능이 제한적인 저사양 MCU에서는 이러한 연산이 과도한 클럭 사이클을 소모하여 심각한 실행 지연을 유발한다. 결과적으로 연산 부하로 인해 정해진 제어 주기를 맞추지 못하는 오버헤드가 발생하며, 이는 곧 궤적 추종 오차 및 시스템 불안정으로 직결된다. 이를 통해 해당 연구는 저사양 제어기에서 안정적인 실시간 실행(Real-time execution)을 보장하기 위해서는 궤적 생성의 연산 복잡도(Computational complexity)를 대폭 낮추어야 함을 실험적으로 증명하고 있다.“

III. The Proposed Scheme

3.1 Contributions of this study

전동식 스위블 시스템에서 가장 널리 사용되는 방식인 사다리꼴 속도 프로파일은 가속, 등속, 감속 구간이 직선으로 연결되어 계산이 간편하다는 장점이 있으나, 가속도가 급격히 변하는 변곡점에서 저크(Jerk, 가속도의 미분값)가 무한대가 되어 시스템의 진동을 유발하는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 MCU 환경에서도 연산 부하를 최소화하면서 기계적 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 삼각함수(Trigonometric Function) 기반의 속도 프로파일 생성 기법을 제안한다. 삼각함수는 본질적으로 미분 가능한 연속 함수이므로, 속도뿐만 아니라 가속도와 저크 궤적까지 부드럽게 이어지는 연속성을 수학적으로 보장할 수 있다. 또한, 복잡한 고차 방정식 계산 대신 최적화된 수학 라이브러리를 활용할 수 있어 저사양 MCU에서도 실시간 제어가 용이하다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 방식은 기존의 고도화된 프로파일 기법들과 동등한 수준의 진동 억제 성능을 제공하면서도 임베디드 시스템에 최적화된 실용성과 연산 효율성을 제공할 수 있다는 점에서 명확한 차별성을 가진다.

3.2 Modeling the kinematics of velocity and acceleration trajectories

본 연구에서 제안하는 궤적 생성 기법은 다양한 이동 시간(T) 요구 조건에 대해 궤적 형태를 유연하게 재계산하기 위하여, 실제 물리적 시간 도메인 대신 독립된 정규화 위상 변수(Normalized phase variable)를 도입하였다. 이때 제어 알고리즘의 수치적 엄밀성과 단위계의 일관성(Dimensional consistency)을 보장하기 위해 물리적 시간과 위상 변수 간의 매핑 함수(Mapping function)를 다

음과 같이 명확히 정의한다. 실제 시스템이 구동되는 물리적 시간을 τ ($0 \leq \tau \leq T$, 단위: [s])라 하고, 제안된 코사인 궤적의 형태를 결정짓는 0에서 $\pi/2$ 구간의 무차원(Dimensionless) 정규화 위상 변수를 s ($0 \leq s \leq \pi/2$, 단위: [rad])라고 할 때, 두 변수 간의 선형 매핑 함수는 식(2) $s(\tau)$ 과 같다.

$$s(\tau) = \frac{\pi}{2T}\tau \quad \text{식 (2)}$$

$t \in [0, \pi/2]$ 값의 범위 중에서 $t=0$ 은 회전의 시작을, $t = \pi/2$ 는 목표 각도 90° 도달 및 회전 종료를 의미한다. 이는 코사인 함수의 단조 감소 특성을 활용하여 별도의 복잡한 감속 로직 없이도 자연스러운 종점 정지를 유도하기 위함이다. 모터의 최대 출력 각속도를 ω_{\max} 라 할 때, 목표 속도 궤적 $\dot{\theta}_d(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\theta}_d(t) = \omega_{\max} \cos(t)$$

위 식을 위상 변수 t 에 대해 미분함으로써 가속도 궤적 $\ddot{\theta}_d(t)$ 를 얻을 수 있다.

$$\ddot{\theta}_d(t) = \frac{d}{dt}(\omega_{\max} \cos(t)) = -\omega_{\max} \sin(t)$$

사다리꼴 속도 프로파일의 경우 가속도 궤적이 불연속적인 계단 함수(Step Function)의 형태가 되므로, 가속이 시작되거나 종료되는 시점, 그리고 가속에서 감속으로 전환되는 구간에서 가속도의 미분값인 저크(Jerk)가 이론상 무한대가 되는 현상을 초래한다. 반면, 사인(Sine) 함수 기반의 가속도 궤적은 전 구간에서 미분 가능한 연속 함수로 동작한다. 사다리꼴 프로파일은 최대 가속도 지점에서 기울기가 급격하게 꺾이거나 부호가 반전되는 불연속성을 보이는 반면, 사인 함수 기반 궤적은 가속도가 최대값에 도달하는 정점($t = \pi/2$)에서 저크가 정확히 '0'이 된다. 이는 가속도의 변화율이 점진적으로 둔화하며 극점에 도달함을 의미하므로, 시스템에 가해지는 물리적인 충격량(Impulse)을 원천적으로 방지한다. 결과적으로 이러한 삼각함수 기반의 궤적 생성 기법을 전동식 스윙블 시트에 적용할 경우, 구동부의 기계적 진동을 효과적으로 억제할 뿐만 아니라 탑승자가 체감하는 승차감(Ride Comfort) 및 감성 품질을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 Dynamic Response Analysis of Trajectories

제안된 궤적의 주요 물리적 특징은 다음과 같다. 1) 속도 연속성 : $\dot{\theta}_d(0) = \omega_{\max}$ 에서 시작하여 $\dot{\theta}_d(\pi/2) = 0$ 으로 수렴하며, 전 구간에서 미분 가능하므로 속도가 불연속적으로 변하지 않는다. 초기 가속도가 $t = 0$ 일 때, $\ddot{\theta}_d(0) = 0$ 이므로, 구동 시작 시점에 발생하는 급격한 토크 변화와 기계적 충격을 방지한다. 2) 자연스러운 감속 : t 가 증가함에 따라 가속도(감속도)가 $-\omega_{\max}$ 까지 점진적으로 증가하며 부드럽게 감속한다. 속도 궤적을 적분하여 도출된 위치(각도) 궤적 $\theta_d(t)$ 는 다음과 같다.

$$\theta_d(t) = \int_0^t \omega_{\max} \cos(\tau) d\tau = \omega_{\max} \sin(t)$$

최종 위치 $t = \pi/2$ 에서 $\theta_d(\pi/2) = \omega_{\max} \cdot 1$ 이 되므로, 목표 회전 각도(θ_f)와 최대 속도 설정값(ω_{\max})이 동일해지는 설계를 얻게 되는데, 이는 제어기 설계 시 복잡한 비례 상수 없이 직관적인 파라미터 설정이 가능함을 의미한다.

3.4 Comparison with Conventional Trajectory Methods

본 절에서는 앞서 기술한 사다리꼴 속도 프로파일 및 S-curve 속도 프로파일과 본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 종합적으로 비교 분석한다. 비교 항목은 기구학적 연속성(속도, 가속도, 저크), 연산 복잡도, 마이크로컨트롤러(MCU) 기반의 실시간 구현 용이성, 그리고 최종적인 탑승자의 승차감(Ride Comfort)으로 구성되었다.

3가지 기법에 대한 비교 결과는 표 1과 같이 요약된다. 운동의 부드러움을 결정하는 기구학적 특성을 살펴보면, 사다리꼴 기법은 속도 측면에서는 연속성을 가지나 가속도와 저크(Jerk)에서는 불연속 구간이 발생한다. 이러한 불연속성은 시스템에 급격한 기계적 충격을 주어 진동을 유발하는 원인이 된다. 반면, S-curve 기법과 제안 기법은 속도, 가속도, 저크의 모든 단계에서 연속성을 유지할 수 있으므로, 모터 구동 시 기계적 무리를 최소화하고 부드러운 동작을 보장할 수 있다.

Table 1. Comparison with Conventional Trajectories

Item	Trapezoidal Trajectory	S-Curve Trajectory	Proposed Method
Velocity Continuity	0	0	0
Acceleration Continuity	X	0	0
Jerk Continuity	X	0	0
Computational Complexity	LOW	HIGH	Very Low
MCU Real-time Implementation	0	△	◎
Ride Comfort	Moderate	Excellent	Excellent

자동차 내부에 사용되는 스위블 시트이기 때문에, 가격 경쟁력 또한 매우 중요하므로, 자동차에는 일반적으로 임베디드 시스템이 적용된다. 임베디드 시스템 적용에 있어 가장 중요한 지표인 연산 효율성 측면에서 살펴보면 각 기법은 뚜렷한 차이를 보인다. 사다리꼴 기법은 연산 복잡도가 '낮음(Low)'으로 실시간 구현이 용이하나 앞서 언급한 저크 불연속성으로 인해 고품질 제어에는 한계가 있다. S-curve 기법은 높은 차수의 다항식 연산이 요구되어 연산 복잡도가 '높음(High)'으로 나타나므로 저 사양 MCU에서 실시간으로 궤적을 생성하고 제어하는데 연산 오버헤드를 발생시킬 수 있으며, 실시간 구현성에 있어 제약(△)이 따른다. 제안 기법 코사인 궤적은 S-curve와 동등한 수준의 기구학적 연속성을 보장함에도 불구하고, 연산 복잡도는 '매우 낮음(Very Low)'으로 평가되었다. 이는 제안 기법이 복잡한 다항식 연산 없이도 효율적인 궤적 생성이 가능함을 의미하며, MCU 내에서의 실시간 구현성 또한 '매우 우수(◎)'한 것으로 확인되었다. 최종적인 시스템 성능 지표인 승차감에 있어, 가속도와 저크의 불연속성을 가진 사다리꼴 기법은 '보통' 수준에 머문 반면, 제안 기법은 저크 연속성을 확보하여 S-curve 기법과 동일한 '우수(Excellent)' 등급의 승차감을 제공한다.

본 연구에서 제안한 코사인 궤적은 정지 시 가속도가 최댓값에 도달함에도 불구하고, 기존 사다리꼴 궤적 대비 다음과 같이 기술적·심리적 우위를 점한다. 1) 저크(Jerk)의 유한성과 불연속성 제거: 사다리꼴 궤적은 가속이 시작되는 지점과 정지하는 지점에서 가속도가 계단 함수(Step function) 형태로 급격히 변한다. 이는 수학적으로 무한대의 저크를 발생시키며 시스템에 강력한 충격을 준다. 반면, 코사인 궤적은 가속도 자체가 사인 곡선을 그리며 변화하므로 저크가 전 구간에서 유한한 상수 내로 유지된다. 이는 기계적 부하를 분산시키고 부드러운 전이를 가능하게 한다. 2) 정지 시 에너지 소산의 점진적 변화: 사다리꼴

궤적은 일정한 감속도로 멈추다가 정지 순간 속도 기울기가 갑자기 평탄해진다. 반면 코사인 궤적은 정지 지점에 가까워질수록 속도의 감소율이 커지는 곡선 형태를 띤다. 이는 운동 에너지가 정지 시점에 집중되어 소산되지 않고, 전체 감속 구간에 걸쳐 비선형적으로 배분되게 함으로써 시스템이 느끼는 급격한 에너지 변화(Energy shock)를 완화한다. 3) 전정기관의 감속 예측 및 방어 기제 형성: 사람의 전정기관은 일정한 가속도보다 '가속도의 변화'에 민감하게 반응한다. 코사인 궤적은 정지 지점으로 갈수록 감속도가 서서히 증가하는 특성을 가진다. 탑승자는 이 점진적인 관성 증가를 통해 "시스템이 곧 정지할 것"이라는 물리적 피드백을 사전에 인지하게 되며, 이는 목 근육 등을 통한 신체적 방어 기제(Anticipatory postural adjustment)를 자연스럽게 유도하여 심리적 안정감을 높인다. 4) 제어 루프의 응답성 및 오버슈트 억제: 사다리꼴 궤적은 정지 직전까지 일정한 속도 기울기를 유지하다가 갑자기 멈추므로, 모터 제어기의 응답 지연이 발생하는 경우 목표 지점을 지나치는 오버슈트(Overshoot) 가능성이 크지만, 코사인 궤적은 정지 시점에 감속력을 최대화하여 관성을 강하게 억제하는 구조이다. 이는 물리적 마찰력과 결합하여 정지 정밀도를 극대화하며, 외란이 존재하는 환경에서도 높은 반복 정밀도를 보장한다.

IV. Implementation and Experimental Results

4.1 Implementation of Swivel Seat Control System

스위블 시트의 효율적인 회전을 위한 스위블 시스템은 그림 2에 보이는 바와 같이 회전을 처리하는 모터와 모터 제어를 위한 모터 드라이버 및 제어기로 구성된다. 제어기는 모터 드라이버와 통신이 가능해야 하고, 스위블 시트 각도를 측정하기 위한 ABS 엔코더 값을 SSI 통신을 통해 받을 수 있어야 하므로, 이러한 기능들을 만족하는 ST사의 STM32F407을 사용하여 제어기를 제작한다. 제어기 STM32F407의 주요 특성은 ARM 32bit Cortex M4 CPU with FPU 코어가 사용되며, CAN 통신 및 SSI 통신이 가능하다. 제어기를 위한 프로그램 컴파일러는 Keil 프로그램을 사용한다.

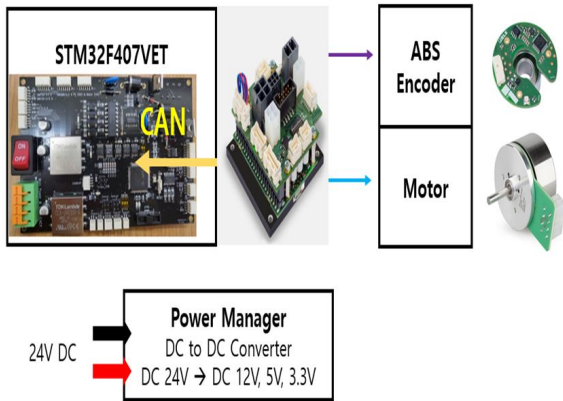


Fig. 2. Swivel system diagram

스위블 시트 전장 구성품은 표2와 같다. 모터 및 모터 드라이버는 MAXON MOTOR사의 제품을 사용했다. 모터는 MAXON사의 393023 모델로 DC 48V에 3.69A를 소비하는 모터로 최대 속도 9840rpm에 최대 토크는 2760mNm 이다. 기어박스는 MAXON사의 156:1의 기어비로 393023모터와 조합할 때 최대속도는 63rpm에 최대 토크는 414.9Nm 이다. 엔코더는 RLS사의 ABS 엔코더를 사용하였다. ABS 엔코더는 14bit Resolution을 가진 엔코더이고, 엔코더 데이터는 SSI 통신을 통해 제어기로 보내진다.

Table 2. Electronic components for swivel seat

Electronic components	Name	Spec	Brand	Interface
B L D C Motor	Motor	393025	170W, 48V, 9150RPM, 3.69A	MAXON MOTOR
	Gear	203129	156:1	
	Encoder	110516	500CPR	
Motor Driver	EPOS4 COMPACT	15A, 50V		CAN
Absolute Encoder	BRD01	14bit, 5V, 65mA	RLS	SSI

실제 구현된 스위블 시트 시스템은 그림 3에서 보이는 바와 같다. 왼쪽 그림은 모터 및 모터 드라이버이고, 오른쪽 그림은 ABS 엔코더를 나타낸다. 모터가 구동되면 시트가 회전되면서 ABS 엔코더에서 각도를 측정한다. 제어기와 모터 드라이버는 CAN 통신을 통하여 데이터를 주고 받고, 엔코더는 SSI 통신을 통해 각도 값을 수신한다. 이를 통해 제작된 스위블 시트 시스템은 자연스러운 회전이 가능하게 된다.

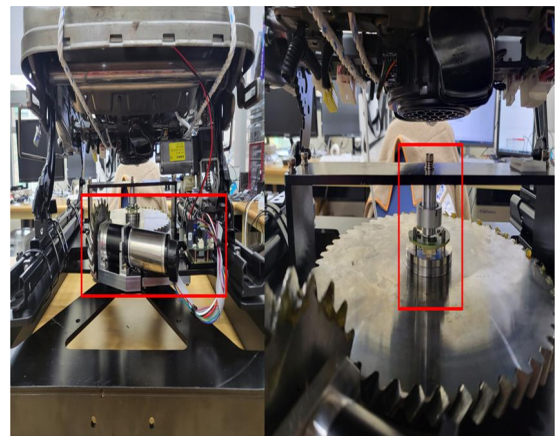


Fig. 3. Swivel Seat System

제안된 기법을 토대로 스위블 시트를 정확하게 회전시키기 위해 32bit Cortex-M4 계열의 STM32F407 코드의 프로그래밍, 컴파일, 디버깅 및 최적화를 동시에 하기 위해서는 Keil MDK-ARM 프로그램을 사용하였다. 데이터 로깅을 위해 제어기에서는 CAN 통신을 통해 PC 프로그램과 데이터를 주고 받는다. PC 프로그램은 그림 4와 같고 Visual Studio를 활용하여 구현하였다. PC 프로그램의 용도는 제어기에서 PC로 송신하는 각도 값과 Com Bit 값을 10ms마다 받아 그래프로 확인하기 위함이다. 또한 10ms

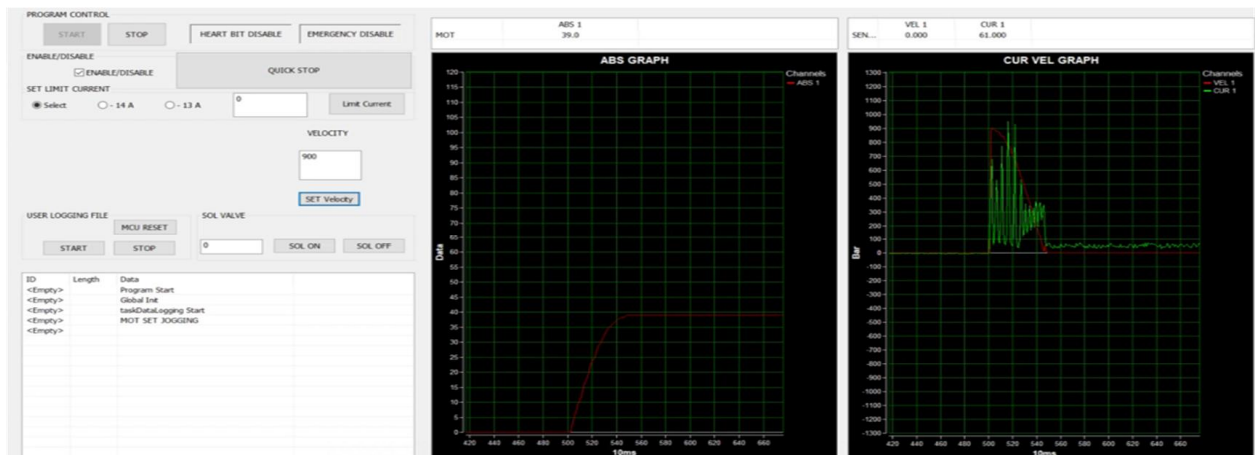


Fig. 4. Swivel Seat UI Program

마다 데이터 로깅을 가능할 수 있게 별도의 프로그램을 구현하였다. 왼쪽 그래프는 각도값을 표시하고, 오른쪽은 속도와 전류의 값을 표시하는 그래프이다. 빨강 그래프는 속도를 의미하고, 녹색은 전류를 의미한다. UI 프로그램은 제어기와 CAN 통신을 통해 데이터를 주고 받는다.

스위블 시트는 사람이 앉아 있는 것과 유사한 효과를 얻기 위해 그림 5와 같이 개당 20Kg 바벨 원판 3개를 올린 60Kg와 4개를 올린 80Kg 상태로 실험하였다. 또한 바벨 원판을 하나도 올리지 않는 무부하 상태로도 테스트하였다. 실험을 통해 각도, 속도, 전류에 대해 분석하였다.

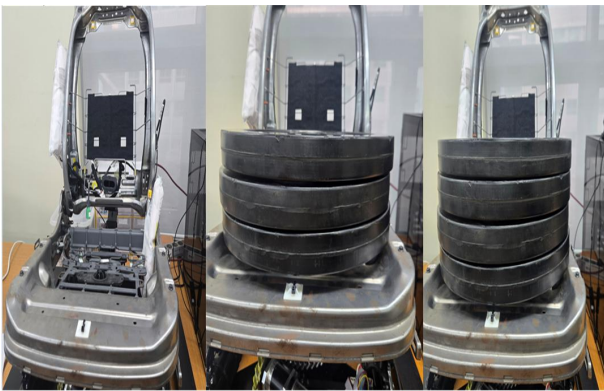


Fig. 5. Swivel Seat Experiment Picture(0Kg, 60Kg, 80Kg)

4.2 Experimental Results

본 연구에서는 스위블 시트 구동 모터의 안정적인 부드러운 정지를 위해 코사인 함수 기반 속도 궤적 방법을 설계하고, 그 제어 성능을 검증하였다. 궤적 생성을 위한 제어 구간은 $0 \leq t \leq \pi/2$ 로 정의하였다. 코사인 함수의 단조 감소 특성을 이용하여 스위블 시트의 회전 속도를 초기 최대값에서 0까지 연속적으로 감속하는 제어 기법으로 실험을 수행하였다. 그림 6는 제안된 코사인 함수 기반 제어 기법을 적용하여 도출된 스위블 시트의 속도 응답 그래프이다. 실험 시 모터의 초기 진입 속도는 1900 RPM으로 설정되었다. 그래프에서 관찰할 수 있듯이, 시스템의 제어 속도는 1900 RPM에서 시작하여 목표 지점인 0에 도달할 때까지 선형적인 꺾임(불연속점) 없이 매우 부드러운 곡선 형태로 감소한다. 일반적인 선형 감속(Linear deceleration) 궤적의 경우 정지 순간에 급격한 가속도 변화가 발생하여 기계적 충격을 유발하지만 본 논문에서 제안한 코사인 궤적은 전 구간에서 미분이 가능하므로 가속도 변화율(Jerk)을 효과적으로 제한하여 시스템에 가해지는 충격을 최소화할 수 있음을 확인하였다.

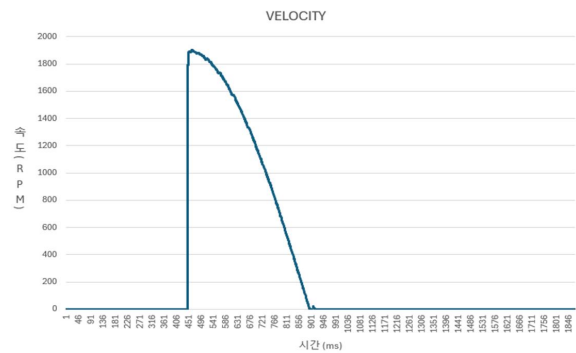


Fig. 6. Experimental results of the Velocity for the Proposed Cosine Trajectory

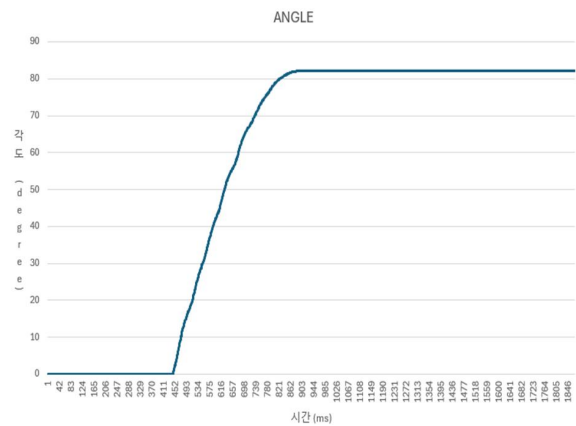


Fig. 7. Experimental Results of the Angle for the Proposed Cosine Trajectory

그림7은 동일한 제어 구간 내에서 측정된 스위블 시트의 회전 각도(Position) 변화 추이를 나타낸다. 속도가 코사인 곡선을 따라 부드럽게 감소함에 따라, 각도 궤적 역시 급격한 기울기 변화나 오버슈트 현상 없이 목표 정지 각도를 향해 매끄럽게 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 감속 궤적의 적분 형태가 부드러운 S-커브 특성을 띠기 때문이다. 결과적으로, 코사인 함수를 적용한 속도 프로파일 제어는 스위블 시트가 목표 위치에 도달하여 정지할 때 발생하는 잔류 진동(Residual vibration)을 현저히 억제할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해 기계적 구동부의 마모를 방지할 뿐만 아니라, 실제 시트 탑승자가 느낄 수 있는 기계적 덜컥거림을 방지하여 승차감을 크게 향상시킬 수 있음을 실험을 통해 입증할 수 있었다.

다음 실험에서는 제안된 스위블 시트 구동 시스템이 탑승자의 하중 변화에 대하여 어떠한 동적 특성을 나타내는지 검증하기 위해, 시트 상단에 0 kg(무부하), 60 kg(표준 성인 하중), 80 kg(고하중)의 부하를 각각 인가한 상태에서 구동 모터의 전류(Current)를 측정 및 분석하였다. 모터의 구동 전류는 시스템에서 요구되는 구동 토크와 직결

되므로, 전류의 변화 양상을 통해 시스템의 기계적 부하 및 제어 안정성을 평가할 수 있다. 실험 결과, 시트에 인가 되는 하중이 증가할수록 전체 이동 구간에서 모터에 소모 되는 평균 전류 및 피크 전류가 뚜렷하게 증가하는 경향을 확인하였다. 0 kg 조건에 비해 60 kg 및 80 kg 조건에서는 스윙블 시트 회전부의 총 관성 모멘트(Moment of Inertia)가 크게 증가한다. 동역학적 관점에서 관성 모멘트의 증가는 동일한 가속도를 내기 위해 더 큰 토크를 요구하며, 이는 곧 모터 제어기의 출력 전류 증가로 나타난다. 특히, 정지 상태에서 목표 속도로 도달하기 위한 가속 구간과, 목표 위치에 도달하기 위한 감속 구간에서 부하 질량에 따른 전류 편차가 가장 두드러지게 관찰되었다.

다음 사진 8, 9, 10은 무부하, 60Kg, 80Kg 3가지 실험에 대한 전류 그래프이다. 무부하 일때는 전류가 1.1A가 흐르고, 60Kg일 때는 1.4A가 흐르고, 80Kg 일 때는 1.8A가 흐른다. 부하가 80 kg인 고 하중 조건의 경우, 가감속 시 발생하는 급격한 전류의 상승(Current Ripple 및 Peak)은 시스템의 기계적 진동을 유발하고 구동기에 열적 부담을 가중시키는 주요 원인이 된다.

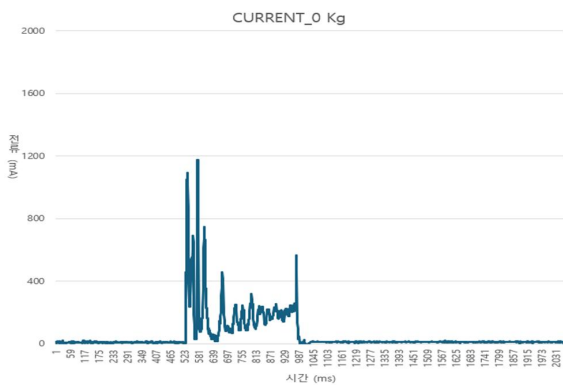


Fig. 8. Experimental Results of the Current for the Proposed Cosine Trajectory(0Kg)

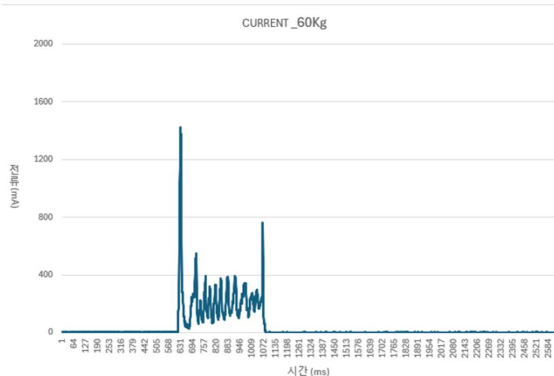


Fig. 9. Experimental Results of the Current for the Proposed Cosine Trajectory(60Kg)

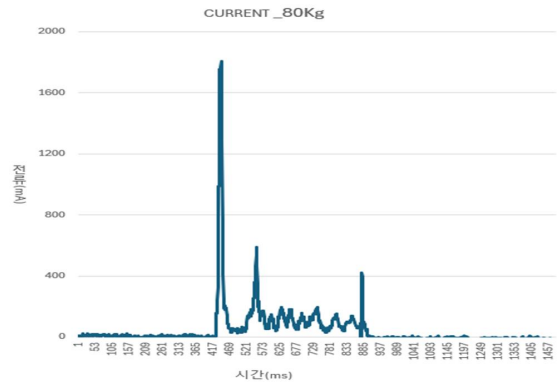


Fig. 10. Experimental Results of the Current for the Proposed Cosine Trajectory(80Kg)

이러한 실험 결과는 스윙블 시트 시스템에서 탑승자의 하중이 변하더라도 승차감을 유지하고 모터의 피크 부하를 억제하기 위해서는, 가속도의 급격한 변화(Jerk)를 최소화할 수 있는 유연한 궤적 설계가 필수적임을 시사한다. 따라서 단순 위치 제어나 사다리꼴 속도 프로파일 대신, 제안하는 코사인 궤적을 적용하여 과도 상태에서의 전류 스파이크를 억제하고 부하 변동에 강인한 제어 성능을 확보해야 함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

결론적으로, 제안된 코사인 기반 궤적 제어는 성인 체중에 상응하는 부하 조건에서도 우수한 구동 성능을 나타냈다. 특히 하중 변동과 무관하게 동일한 궤적 명령 하에서 스윙블 시트의 최종 이동 거리가 정확히 일치함을 확인함으로써, 제안하는 제어 방식의 뛰어난 궤적 추종 성능 및 부하 변동에 대한 강인성(Robustness)을 검증하였다.

V. Conclusions

본 연구에서는 자율주행 기반 PBV(Purpose Built Vehicle)의 핵심 요소인 스윙블 시트의 구동 품질을 향상시키기 위해, 시간 정규화 기법이 적용된 코사인 함수 기반의 속도 궤적 생성 알고리즘을 제안하였다. 기존의 사다리꼴 속도 프로파일이 가지는 가속도 불연속성과 무한 저크(Infinite Jerk) 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 물리적 시간 도메인을 $0, \pi/2$ 구간의 위상 변수로 매핑하는 접근 방식을 채택하였다. 이를 통해 제안 기법은 다음과 같은 주요 결과들을 도출할 수 있었다. 속도 및 가속도 궤적의 수학적 연속성을 통해 저크(Jerk)를 유한한 범위 내로 제한하였다. 시뮬레이션 및 이론적 분석 결과, 기동 시 가속도가 0에서 시작하는 'Soft Start' 특성을 통해 초기 구동 충격을 근본적으로 제거할 수 있음도 확인하였다. 또

한, 복잡한 다항식 연산이 필요한 S-curve 방식과는 달리, 단일 코사인 함수만을 사용하여 연산 부하를 최소화함으로써 저 사양 MCU 환경에서도 실시간 정밀 제어가 가능함을 입증하였다. 본 연구는 단순히 모터의 위치를 제어하는 것을 넘어, '탑승자의 승차감'이라는 감성적 요소를 수학적 제어 모델로 구체화했다는 점에서 의의가 있다. 종합하면, 제안 기법은 S-curve 기법이 갖는 고품질의 모션 제어 성능(승차감, 연속성)을 유지하면서도 사다리꼴 기법보다 더 낮은 연산 부하를 갖는 효율적인 알고리즘이다. 이는 제한된 연산 능력을 가진 임베디드 시스템 환경에서 고성능 모션 제어를 실현하기 위한 최적의 솔루션임을 의미한다. 인체의 전정기관이 가속도 변화에 민감하다는 점에 착안하여 설계된 코사인 궤적은, 급격한 관성 변화를 억제하고 예측 가능한 감속감을 제공함으로써 탑승자에게 심리적 안정감을 제공한다. 또한, 기계적 진동과 소음을 저감시켜 시트 메커니즘의 내구성을 연장하는 산업적 기대 효과를 가진다.

제안된 코사인 궤적 기법은 전반적으로 주행 품질을 높이는 데에는 기여했으나, 궤적의 특성상 정지 시점($t = \pi/2$)에서 최대 감속도가 발생한다는 물리적 한계는 존재한다. 이로 인해 감속기의 백래시가 큰 시스템에서는 정지 순간 기어 간의 충돌로 인한 미세한 소음이나 진동이 발생할 수 있음이 확인되었다. 따라서 향후에는 이와 같은 소음이나 진동을 감소시킬 수 있는 보완 기술을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation(IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT)(IITP-2026-RS-2022-00156287)

REFERENCES

- [1] G. Wu and N. Zhang, "Kinematically Constrained Jerk-Continuous S-Curve Trajectory Planning in Joint Space for Industrial Robots," *Electronics*, vol. 12, no. 5, p. 1135, Feb. 2023, doi: 10.3390/electronics12051135.
- [2] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London, U.K.: Springer, 2009.
- [4] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Berlin, Germany: Springer, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-85629-0.
- [5] L. Biagiotti and C. Melchiorri, "Trajectory generation via FIR filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 1058-1070, Feb. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2146223.
- [6] K. J. Åström and R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2008.
- [7] S. G. Liu, J. C. Li, and Y. F. Zhang, "Study on PID Control for Trajectory Tracking of High-speed Transport System," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 25-30, 2013.
- [8] K. D. Nguyen, T. C. Ng, and I.-M. Chen, "On algorithms for planning S-curve motion profiles," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 99-106, Mar. 2008, doi: 10.5772/5674
- [9] J. H. Park and H. S. Lee, "A Study on the S-curve Acceleration and Deceleration Control for Industrial Robot," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 16, no. 10, pp. 29-36, 1999.
- [10] A. Visioli, "A new design for a PID plus feedforward controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 288-292, Feb. 2004, doi: 10.1109/TIE.2003.822089.
- [11] H. Wang, Y. Liu, and W. Chen, "Tube-based robust model predictive control for trajectory tracking of industrial robots," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4735-4745, Jun. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2926055.
- [12] Nguyen, K. D., Ng, T. C., & Chen, I. M. (2008). "On algorithms for planning S-curve velocity profiles for industrial robots." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(2), 425-443.
- [13] J. Zhao, Y. Zhu, and G. Yin, "A new s-curve acceleration/deceleration method based on sine and cosine functions for high-speed machining," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Changchun, China, 2009, pp. 2406-2411, doi: 10.1109/ICMA.2009.5246193.
- [14] S. S. Seweryn and A. M. J. Grabowski, "Smooth trajectory planning using trigonometric functions for vibration reduction," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12345-12356, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051234.
- [15] K. J. Åström and B. Wittenmark, "Trigonometric velocity profiles for smooth motion control," in *Proceedings of the 2001 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Mexico City, Mexico, 2001, pp. 450-455, doi: 10.1109/CCA.2001.973912.
- [16] K. G. Shin and N. D. McKay, "Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints," *IEEE Transactions*

on Automatic Control, vol. 30, no. 6, pp. 531-541, Jun. 1985, doi: 10.1109/TAC.1985.1104009.

- [17] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi, H. Hoffmann, P. Pastor, and S. Schaal, "Dynamical movement primitives: Learning attractor models for motor behaviors," *Neural Computation*, vol. 25, no. 2, pp. 328-373, Feb. 2013, doi: 10.1162/NECO_a_00393.
- [18] A. Piazzzi and A. Visioli, "Minimum-jerk trajectory planning of protective robot arms," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 369-375, Apr. 2000, doi: 10.1109/41.836352.
- [19] T. Pandi, A. K. Inkulu, J. K. Raghupatruni, P. K. V. Tirumalaraju, and M. V. A. R. Bahubalendruni, "Experimental validation of jerk-minimized trajectory planning in a 4-DOF industrial robotic arm using inverse kinematics with root multiplicity," *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, Feb. 2026, doi: 10.1108/ir-11-2025-0397.

Authors



Yong Choi received the M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Chonnam National University, Gwangju, Korea, in 2017, where he is currently working toward the Ph.D. degree with the

Department of Electrical and Computer Engineering. CHOI has been a Assistant Researcher with the Korea Institute of Robot and Technology Convergence(KIRO), Pohang, Korea, since 2017. His research interests include circuit design, embedded systems, and control algorithms.



Cheol-Hong Kim received the B.S. and M.S. degrees in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Seoul, Korea, in 1998 and 2000, respectively. He received the Ph.D. degree in Electrical and Computer

Engineering from Seoul National University in 2006. Dr. KIM has been a Professor with the School of Computer Science and Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea, since 2020. His research interests include computer systems, embedded systems, and fault diagnosis systems.



Jae-hyung Park received the B.S. degree in Computer Science from Yonsei University, Seoul, Korea, in 1991, and the M.S. and Ph.D. degrees from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),

Daejeon, Korea, in 1993 and 1997, respectively. Dr. PARK has been a Professor with the Department of Intelligent Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea, since 2002. His research interests include internet routing, multicast routing, network security, wireless mesh networks, and artificial intelligence.