

도어트림 고정을 위한 Agile Robotic Fixture 개발

Development of an Agile Robotic Fixture for Door Trim Fixation

이재순¹·박상현²·김종걸²·강민석³·김무림[†]

Jaesoon Lee¹, Sang Hyun Park², Jong-Geol Kim², Minseok Kang³, Murim Kim[†]

Abstract: This study presents the development of an Agile Robotic Fixture (ARF) for door trim fixation in robotic workcell production systems. The ARF is a modular robotic jig designed to accommodate geometric variations in door trims based on vehicle position. To ensure full reachability across the anticipated trim positions, a workspace analysis is conducted using the Monte Carlo method. For compliant interaction and intuitive operation, a force-based admittance control algorithm is implemented, which adjusts joint trajectories in real time based on measurements from a force/torque sensor. Experimental validation is performed using a prototype ARF, during which door trims are fixed and subjected to manual clip insertion and removal. The results confirm that the proposed ARF provides compliant fixation without unintended displacement under the tested conditions.

Keywords: Workcell, Cell Production System, Admittance Control, Robotic Fixture, Automated Process

1. 서론

최근 다양한 제조업 분야에서 셀 생산 시스템(cell production system)이 도입되고 있다. 1970년대에는 대량생산 체계가 주류를 이루었으며, 단일 품목을 대량으로 생산하기 위한 공정 중심 방식이 일반적이었다. 이는 동일한 유형의 기계들을 한 장소에 집중 배치하는 방식이었다. 이후 1970~80년대에는 공정 중심 배치 방식에서의 대기 시간 증가, 재공품(Work In Progress; WIP) 증가, 비효율적인 흐름들의 문제들을 야기하면서 품질 및 유연성 요구가 증가되었다. 이에 라인 단위 생산 체계로의 전환이 진행되었다. 1980년대 중반 이후에는 작업자의 자율성

과 문제 해결 능력을 중시하는 작업자 주도형 조직과 인간 중심 생산 시스템이 부상하면서 팀워크 기반의 자율적 운영 체계가 확대되었다. 그리고 1980년대 후반에서 1990년대 초반에 이르러 소량 다품종 생산 요구가 대두됨에 따라 전통적인 대량 생산 방식의 한계가 드러나면서, 셀 생산 시스템으로의 전환 모색이 되었다^[1]. 최근에는 제조업체 간의 경쟁 심화, 제품의 수명 단축, 고객 요구의 다양성 증가, 맞춤형 제품 생산 등 외부 환경의 변동성이 확대되면서, 제조업체들은 비용 절감과 생산 효율화를 위한 전략으로써 셀 생산 시스템을 자연스럽게 채택하게 되었다^[2].

셀 생산 시스템은 다양한 주문 사양에 능동적으로 대응할 수 있으며, 작업 흐름의 최적화 및 품질 제어에 유리한 구조를 갖는다. 이에 Beju(2021)은 [Fig. 1]과 같이 제품군 설정, 공정 설계, 품질 관리 절차, 생산계획 및 흐름, 공급 체계 설계, 셀 구성, 그리고 표준화 및 지속 개선 등 7단계를 포함한 설계 알고리즘을 제안하기도 하였다^[3]. 이론뿐만 아니라 실제 제조현장에서도 이를 구현하려는 시도도 나타나고 있다. 대표적으로 현대자동차그룹 싱가포르 글로벌 혁신센터(Hyundai Motor Group Innovation Center Singapore; HMGICS)에서는 컨베이어 벨트 대신 셀 기반 생산방식을 도입하여, 각 셀에서 기술자와 로봇이 협업해 차량 조립을 수행하게 된다^[4]. 여기서 무인운반차가 차

Received : May. 19. 2025; Revised : Jul. 11. 2025; Accepted : Jul. 17. 2025

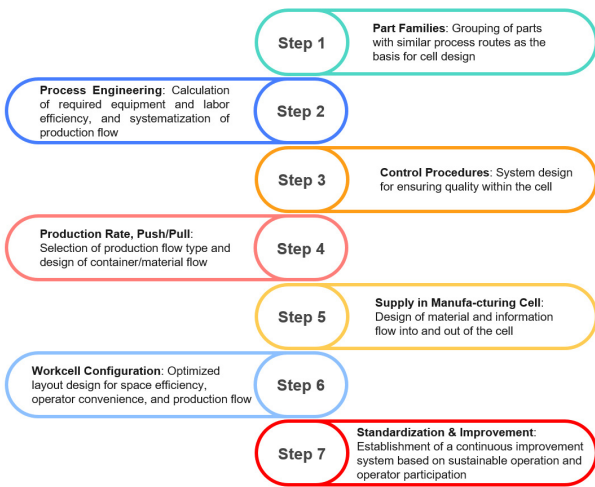
※ This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 20023606, Rapid reconfigurable robotic workcell technology for fast automation and modification in cell production processes including assembly, packaging, and inspection) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

1. Senior Researcher, Human-Centered Robotics R&D Division, KIRO, Pohang, Korea (rob_js@kiro.re.kr)

2. Principal Researcher, Human-Centered Robotics R&D Division, KIRO, Pohang, Korea (shpark, ps100@kiro.re.kr)

3. Researcher, Human-Centered Robotics R&D Division, KIRO, Pohang, Korea (cwyh1118@kiro.re.kr)

† Chief Researcher, Corresponding author: Human-Centered Robotics R&D Division, KIRO, Pohang, Korea (mulimkim@kiro.re.kr)

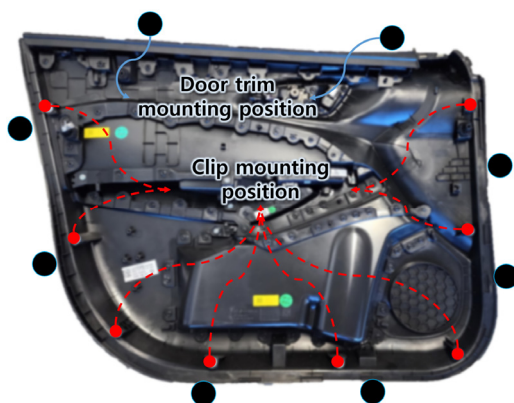


[Fig. 1] A seven-step approach to designing a cell production system

량을 각 셀로 이동시키며, 각 셀은 주문 사양에 따라 유연하게 작업을 분담한다. 이 방식은 소량 다품종 생산, 공정 유연성, 품질 향상, 신속한 라인 변경 등에서 강점을 보인다. 이는 셀 생산 방식이 실무적으로도 매우 이점이 많다는 것을 의미한다.

아직까지 자동차 산업 전반에 셀 구조가 모든공정에 완전히 적용된 것은 아니다. 셀 생산 시스템의 자동화를 위하여 최근에는 로봇을 활용한 워크셀 구현에 관한 연구가 진행되고 있다^[5,6]. 일반적으로 제조 공정에서 로봇을 성공적으로 적용하려면 로봇의 기구학 캘리브레이션 기술, 비전센서와 힘센서의 활용을 통한 통합 솔루션 개발이 필요하다^[7-9]. 그러나 도어 트림 ([Fig. 2]) 조립 공정과 같은 작업을 로보틱 워크셀 방식으로 개선하기 위해서는 도어트림 고정이 쉬워야 한다.

현재 도어 트림 조립 공정과 같은 작업은 로보틱 워크셀을 적용하지 못하고 여전히 작업자의 수작업 위주의 방식으로 수행되고 있다. 이 도어 트림의 공정은 주로 도어 트림 내의



[Fig. 2] Door trim example and the assembly locations of the target fixture and clips

클립을 조립해야 한다. 이 도어 트림은 앞과 뒤의 형태가 다르며 좌, 우는 서로 대칭 형태이다. 이를 작업하기 위해서는 차량의 특정 도어 위치에 맞는 도어 트림을 고정해야 한다. 이후 다른 위치에 해당하는 도어 트림을 작업하려면 이를 고정하는 부분을 옮겨야 한다. 따라서 도어 트림 조립 공정의 자동화는 셀 생산 시스템의 적용 범위를 확장하는 데 중요한 요소가 된다.

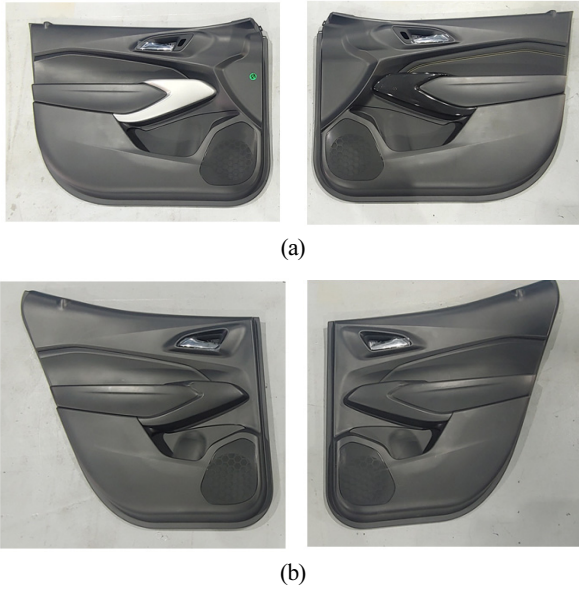
이 도어 트림의 공정을 셀 단위 자동화를 하기 위해서는 이 공정을 세팅할 때 도어 트림 고정부를 쉽게 조작 및 고정시킬 수 있어야 한다. 본 논문에서는 도어 트림의 고정부를 적은 자유도의 로봇팔로 모듈을 구성하고 각 모듈의 말단을 움직여 도어 트림을 고정시킬 수 있는 시스템인 Agile Robotic Fixture (ARF)를 제안한다.

사람이 직접 움직이는 알고리즘들 중에서 직관적이고 효과적인 방법은 힘/토크 센서를 활용한 어드미턴스 제어다. 이 방법을 사용하면 ARF의 손잡이를 직접 잡고 조작할 수 있으며, 작업자가 환경을 쉽게 세팅할 수 있다. 이에 본 연구에서는 자동차 공정의 셀 생산 방식을 도입하기 위해 도어 트림 고정을 위한 시스템을 개발하고, 사용자가 직관적으로 조작할 수 있도록 어드미턴스 제어를 적용하였다.

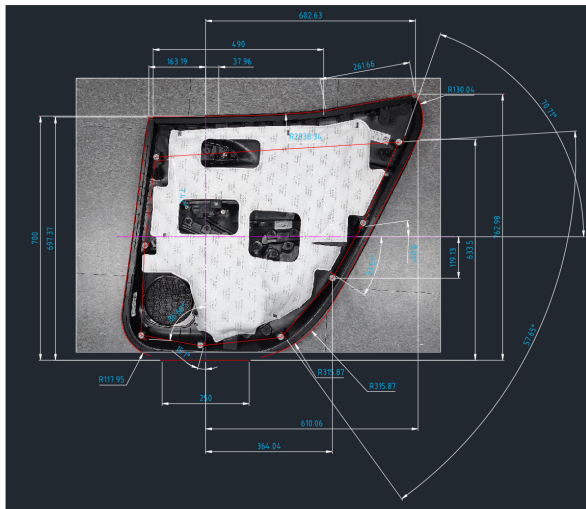
본 논문은 다음의 순서로 구성되어있다. 2장에서는 도어트림 고정을 위한 시스템인 ARF를 설명한다. 3장에서는 이 시스템을 위한 어드미턴스 제어 알고리즘을 적용하였으며, 4장에서는 어드미턴스 제어 실험 및 도어 트림 고정검증을 수행한다. 마지막으로 5장에서 결론으로 마무리한다.

2. Agile Robotic Fixture 시스템

ARF은 다양한 도어 트림의 형태에 대응이 가능한 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해서는 먼저 도어 트림의 형태와 이를 고정하기 위한 방법이 필요하다. [Fig. 3]의 도어 트림을 보면 자동차의 앞/뒤 그리고 좌/우에 따라 형상이 다르다는 것을 알 수 있다. 앞자리의 도어 트림의 형상은 직사각형에 가깝다면, 뒷자리의 도어 트림의 형상은 사다리꼴에 가깝다. 이렇게 다양한 도어트림을 고정시키기 위한 시스템을 개발하기 위해서는 대략적으로 도어 트림의 크기를 측정 해야 된다. [Fig. 4]는 이 연구에서 도어 트림의 크기를 측정하는 방법을 보여준다. 도어 트림의 경우 제조사에서 정밀한 치수를 알려주지 않기 때문에, 리버스 엔지니어링을 통해 대략적으로 측정하는 것이 효율적이다. 측정하고자 하는 도어 트림을 2D CAD 틀에 불러온 뒤, 대략적으로 이 이미지의 스케일을 조정한다. 그 후에 도구를 통해 대략적인 치수를 측정하며 이 과정을 다른 도어 트림에도 동일하게 적용하여 측정하였다.

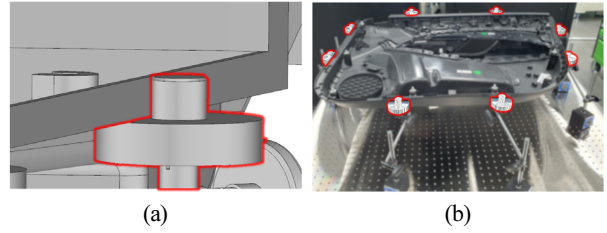


[Fig. 3] Door trim assembly types according to door location on the vehicle: (a) Front-left and front-right door trim shapes. (b) Rear-left and rear-right door trim shapes

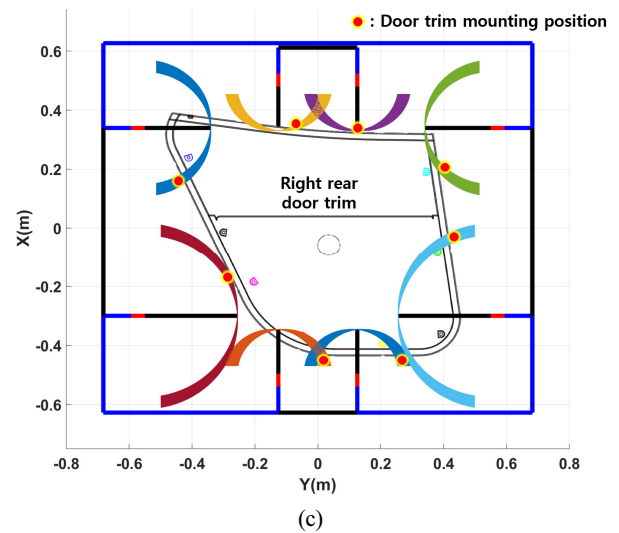
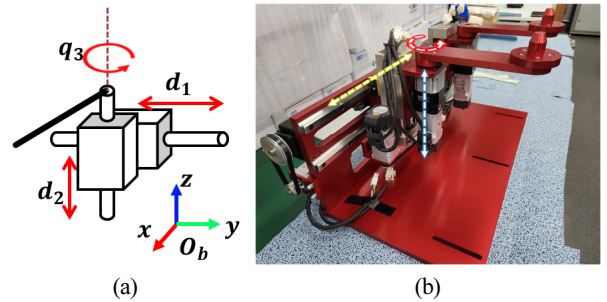


[Fig. 4] Door trim dimension measurement through reverse engineering

ARF를 개발하기 위해서는 도어 트림을 고정하는 부품 또한 중요하다. 도어 트림은 [Fig. 5(a)]에서의 모습과 같이 턱이 있는 구간이 있으며, 이를 활용할 수 있다면 쉽게 도어 트림 고정을 할 수 있다. [Fig. 5(a)]에서의 빨간색 테두리로 그려진 형상(모자형상)과 같은 형상으로 부품을 만들었다. 아래의 직경이 큰 원기둥은 도어 트림을 받치는 형태이며, 위의 작은 원기둥이 도어 트림을 강하게 눌러 고정시키는 형태가 된다. 따라서 [Fig. 4]에서 측정한 도어 트림의 수치와 이 부품을 활용하여 [Fig. 5(b)]와 같이 고정 테스트를 하였으며, 고정 되는 것을 확인하였다.



[Fig. 5] Fixture component for door trim mounting (a) and verification test using the fixture (b)



[Fig. 6] ARF system workspace, fixture positions, and module configuration: (a) Mechanical structure of the ARF system with two translational axes and one rotational axis, (b) Implemented ARF module, (c) ARF workspace and fixture positions (indicated by red dots)

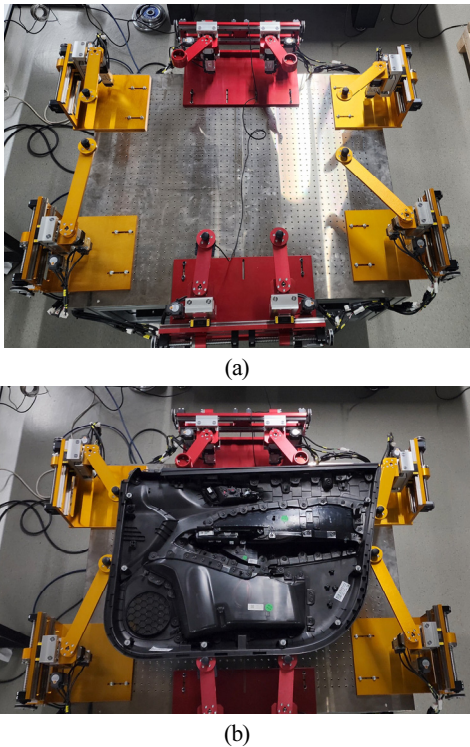
이 결과를 토대로 우리는 [Fig. 6(a)]과 같이 2개의 병진과 1개의 회전으로 이뤄진 3축 매니퓰레이터 구조를 구성하였으며, [Fig. 6(b)]와 같이 실물로 구성하였다. 이 연구에서 사용된 3축 구조는 병진 관절이 있기 때문에, 적은 관절 수 대비 평면의 넓은 작업공간을 확보 할 수 있다. 이 구조를 기반으로 작업공간을 분석하면 [Fig. 6(c)]와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때, 작업공간은 Monte Carlo 방법을 통해 계산하였다^[10]. 이 방법은 균일하게 분포된 랜덤 데이터를 각 관절에 적용한 뒤, 정기구학을 통해 말단의 작업공간을 계산 할 수 있는 방법이다. 다음의

수식을 통해 특정 모듈에 대한 정기구학을 계산 할 수 있다.

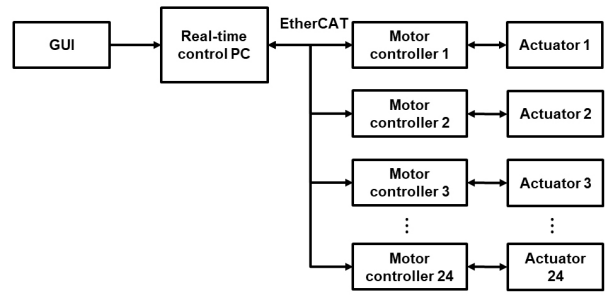
$$\begin{aligned} \mathbf{T}_E^b(\mathbf{q}) &= \mathbf{T}_0^b \mathbf{T}_3^0(\mathbf{q}) \mathbf{T}_E^3 \\ &= \mathbf{T}_0^b \mathbf{A}_1^0(q_1) \mathbf{A}_2^1(q_2) \mathbf{A}_3^2(q_3) \mathbf{T}_E^3, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{T}_E^b 는 시스템의 베이스 프레임(b)로부터 로봇팔의 말단 프레임(E)까지의 변환행렬(transformation matrix)이다. $\mathbf{A}_i^{i-1}(q_i)$ 는 인접 링크 프레임 간의 동차 변환행렬(homogeneous transformation matrix)이며, 이 때의 $i = 1$ 부터 3까지이다. 모든 모듈에 대해 이 기구학 식을 적용하며, 각 모듈당 20만개의 랜덤한 관절 데이터를 적용하였다. [Fig. 3]의 도어트림 모양에서는 차량 뒷자리의 도어트림이 더 작기 때문에 이 도어트림을 고정할 수 있으면 다른 3종의 도어트림 또한 이 구조를 사용할 수 있다. 이것들을 기반으로 하여 최종적으로 개발된 ARF는 [Fig. 7]과 같다. [Fig. 7(a)]는 개발된 ARF에 도어 트림을 올려놓지 않은 모습이며, [Fig. 7(b)]는 ARF에 도어 트림에 올려놓은 상태의 모습이다.

개발된 ARF는 [Fig. 8]와 같이 구성되어 있다. GUI를 포함한 외부 PC에서 Real-time control PC에 TCP/IP과 UDP 통신로 데이터를 송/수신한다. 이 PC에서는 ARF과는 EtherCAT을 사용한다. 또한 1kHz로 제어 알고리즘이 동작되며, 이 시스템 개발을 위해 사용된 구동기와 제어기는 파나소닉 제품을 사용하였다.



[Fig. 7] Developed ARF. (a) ARF without the door trim mounted. (b) ARF with the door trim mounted



[Fig. 8] Control scheme of Developed ARF

3. ARF를 위한 어드미턴스 제어

앞서 설명한 것처럼, 이 연구에서 개발한 ARF는 실제도어트림의 치수를 정확하게 측정하여 정밀하게 만든 시스템이 아니기 때문에, 정확하게 고정하기 위해서는 ARF의 말단 장치를 작업자가 움직여서 고정을 해야 한다. 이 때, 여러 방법이 있겠지만 작업자 입장에서는 말단부에 조작용 손잡이가 존재할 경우 그것을 직접 유도하는 것이 사용자 측면에서 직관적일 수 있다. 따라서 우리는 작업자의 편의를 제공하기 위해 로봇의 말단을 쉽게 이동시킬 수 있게 어드미턴스 제어를 사용하였다^{[11],[12]}. 어드미턴스 제어는 기본적으로 외부의 힘을 감지하여 속도 또는 위치로 변환하여 제어하는 방식이다. 이것은 로봇이 환경과의 상호작용에서 어떻게 움직여야 하는지 결정해야 하므로, 가상의 질량-스프링-댐퍼, 즉 2차 시스템을 기반으로 설계된다. 이 시스템의 식은 다음과 같다.

$$F_{ext}(t) = M_a \ddot{x}_a(t) + B_a \dot{x}_a(t) + K_a(x_a(t) - x_0), \quad (2)$$

여기서 $F_{ext}(t)$ 는 외부에서 작용한 힘/토크로, 이 실험에서는 힘/토크 센서에서 얻어진 데이터이다. M_a 는 가상의 질량이다. B_a 는 가상의 댐핑 계수이며, 이는 감쇠 효과를 제공하고 진동 억제 및 속도 안정화 역할을 한다. K_a 는 가상의 스프링 계수이다. 이 식에서는 x_0 는 어드미턴스 제어를 할 때의 초기 위치이기 때문에 이 스프링 계수가 $K_a > 0$ 라면 복원력이 생기게 된다. x_0 는 어드미턴스 제어를 통해 계산된 출력 위치이며, \dot{x}_a 과 \ddot{x}_a 는 각각 출력 속도와 출력 가속도이다. 이 연구에선 복원력은 필요 없기 때문에 $K_a = 0$ 로 하였다. 이럴 경우에 식이 다음과 같이 된다.

$$F_{ext}(t) = M_a \ddot{x}_a(t) + B_a \dot{x}_a(t) \quad (3)$$

로봇을 제어하기 위해서는 어드미턴스 제어를 통해 목표 위

치 계산을 해야 한다. ‘식 (3)’의 식을 통해 목표 위치를 얻기 위해서는 2차 미분방정식을 해석적으로 풀어 계산해야 한다. 이때, 항상 $B_a > 0$, $K_a = 0$ 이기 때문에 입력이 F_{ext} 이고, 출력이 \dot{x}_a 인 1차 시스템이라고 할 수 있다. 이를 계산하기 위해 먼저 동차해 (homogeneous solution)와 비동차해(non-homogeneous solution)를 순차적으로 계산하여 전체적인 해를 얻어야 한다^[13]. 이 해는 $v_a(t) = v_h(t) + v_p(t)$ 로 계산된다. $v_a = \dot{x}_a$ 로 하여 계산하면 다음과 같다.

$$\dot{v}_a(t) + \frac{B_a}{M_a}v_a(t) = 0 \tag{4}$$

$$v_h(t) = Ae^{-\frac{B_a}{M_a}t} \tag{5}$$

$$\dot{v}_a(t) + \frac{B_a}{M_a}v_a(t) = F_{ext} = F_0 \tag{6}$$

$$v_p(t) = \frac{F_0}{B_a}, \tag{7}$$

여기서 ‘식 (4)’와 ‘식 (5)’는 $F_{ext} = 0$ 일 때에 대한 해고, ‘식 (5)’에서의 A 는 초기 조건에 따라 결정 된다. 또한, ‘식 (6)’와 ‘식 (7)’은 $F_{ext} = F_0$ 로 상수로 가정하였을 때의 해를 구한 것이다. 여기서 힘/토크 센서에서 얻어지는 값은 한 주기 동안 유지 된다고 가정할 수 있으므로, 매 스텝에 대해서는 상수 값이라고 가정 할 수 있다. 따라서 새롭게 업데이트 되는 목표 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_a(t) &= \int v_a(t)dt + C \\ &= \int \left(Ae^{-\frac{B_a}{M_a}t} + \frac{F_0}{B_a} \right) dt + C, \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 적분 상수인 C 는 어드미턴스 제어 시작 시의 초기 위치 이므로, $C = x_a(0)$ 이다. 따라서 이 방법을 통해 새로운 목표 위치 값을 갱신 할 수 있다.

실제 우리가 개발한 ARF에 이 방법을 바로 적용 할 수 없다. 6축의 협동 로봇이라고 가정할 경우, 6축 힘/토크 센서를 사용하면 앞서 전개하였던 수식들을 말단 기준으로 계산해서 말단의 위치, 방향으로 1:1대응이 가능하다. 하지만, 6축 힘/토크 센서를 우리 시스템에서 사용하게 될 경우 1:1대응 할 수 없으며, 또한 로봇 팔이 쉽게 특이점에 위치 할 수 있게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 힘/토크 센서와 자코비안을 이용하여 다음과 같이 전개 해야 한다.

$$\tau_{ext}(t) = J_G^T F_{ext}(t) \tag{9}$$

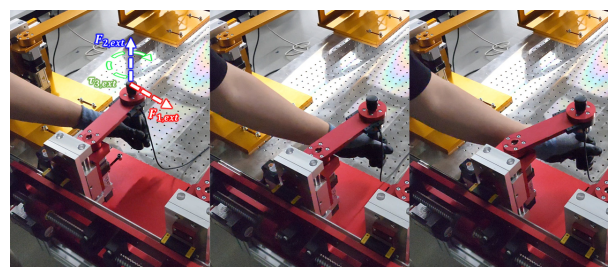
$$M_a \ddot{q}_a(t) + B_a \dot{q}_a(t) = \tau_{ext}(t), \tag{10}$$

여기서 $M_a \in \mathbb{R}^3 = [m_1, m_2, m_3]^T$ 은 각 관절의 가상의 질량이다. $B_a \in \mathbb{R}^3 = [b_1, b_2, b_3]^T$ 는 각 관절의 가상의 댐핑 계수이고, $\tau_{ext} \in \mathbb{R}^3 = [F_1, F_2, \tau_3]^T$ 는 힘/토크 센서로부터 얻어진 정보를 관절의 힘/토크로 변환한 것이다. $q_a \in \mathbb{R}^3 = [q_1, q_2, q_3]^T$ 은 관절의 위치이며, q_1 와 q_2 는 각각 ARF의 병진 관절의 위치 정보이며, q_3 은 회전 관절에 대한 위치 정보이다. $\dot{q}_a, \ddot{q}_a \in \mathbb{R}^3$ 는 각각 속도 및 가속도이다. 이렇게 계산된 ‘식 (10)’을 기반으로 각 관절에 대해 ‘식 (4)’~‘식 (8)’을 적용하면 각 관절의 목표 위치를 계산할 수 있게 된다.

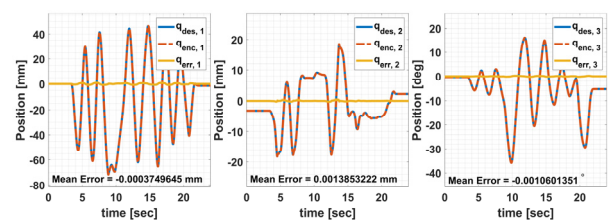
4. 실험

4.1 어드미턴스 제어 검증 실험

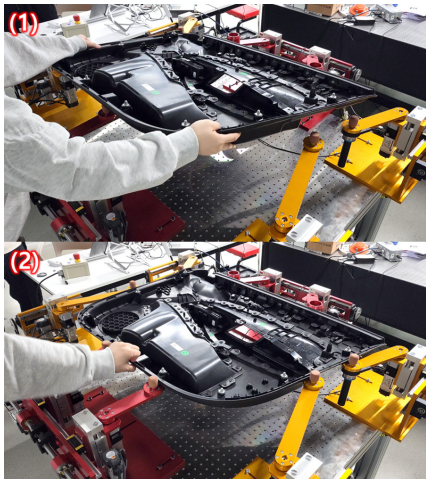
이 실험에서는 앞서 계산된 관절에서의 어드미턴스 제어를 수행한다. 실험은 ARF의 첫번째 모듈에 대해서 실험을 수행한다(Fig. 9참조). 그림에서 표기 되어 있는 화살표의 방향으로 힘/토크 센서에 힘을 인가할 경우, 각 관절의 목표 위치가 업데이트 되면서 움직이게 된다. 그 결과 [Fig. 10]과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 실험 결과 생성된 목표 위치를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 평균 에러 값은 $q_{err,mean} = [-3.75 \times 10^{-4} \text{ mm}, 1.39 \times 10^{-3} \text{ mm}, -1.06 \times 10^{-3} \text{ }^\circ]$ 이다. 따라서 이 실험에서는 로봇팔의 말단이 아닌 관절 구동부에서의 어드미턴스 제어가 효과적으로 수행됨을 실험적으로 검증하였다.



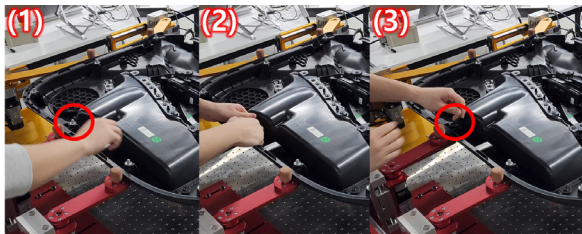
[Fig. 9] Experimental demonstration of the ARF's admittance control performance



[Fig. 10] Experimental results of the admittance control



[Fig. 11] Experiment on door trim fixation with the ARF



[Fig. 12] Experiment on removing clip from a door trim mounted on the ARF

4.2 도어 트림 고정 실험

앞서 설명한 것처럼 이 ARF는 도어트림을 고정해야 한다. 이 실험에서는 도어트림의 위치를 대략적으로 세팅한 다음 어드미턴스 제어를 통해 ARF의 모듈을 조작하여 도어트림의 고정을 강하게 하였다. 또한 도어트림이 제대로 고정 되어 있다면, 도어트림 내의 Clip을 손으로 조립해도 문제 없어야 한다. 먼저 도어 트림은 [Fig. 11]와 같이 설치가 되며, 고정 된 이후에는 손으로 움직여도 잘 고정이 되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 다음으로는, [Fig. 12]과 같이 도어트림내에 설치되어 있는 Clip을 제거하였다. 이 실험에서는 손으로 직접 제거 하였다. 손으로 제거 할 때에는 특정 방향으로 제거하기 어렵기 때문에 도어 트림이 고정되어 있지 않다면, 이 도어트림이 ARF에서 벗어날 수 있다. 하지만, 도어트림이 고정되어 있기 때문에 안정적으로 Clip을 제거 할 수 있었다. 따라서 개발된 ARF도 도어트림의 고정성능을 실험을 통해 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 차량용 도어트림의 Clip 설치 및 제거를 셀단 위 공정으로 하기 위한 시스템인 ARF를 개발하였다. 도어트림

을 안정적으로 고정하기 위해 도어트림의 고정 방법을 고려했으며, 작업 공간을 얻기 위해 도어트림의 사이즈를 리버스 엔지니어링기반으로 분석하였다. 이를 기반으로 2축 병진 관절과 1축 회전 관절을 갖는 모듈을 구성하였으며 ARF를 전체적으로 구성하였다. 이렇게 개발한 ARF는 도어트림을 정확하게 고정하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 각 모듈에 어드미턴스 제어를 적용하였다. ARF에 어드미턴스 제어를 적용하려면 기존 로봇팔에 사용되던 방식과는 다른 접근이 필요하였다. 말단에서 센서로부터 측정된 힘/토크 데이터를 관절단의 토크로 변환을 하고 그 다음 각 관절의 목표 위치를 얻도록 하였다. 이렇게 개발된 어드미턴스 제어를 조작을 통해 동작 검증을 하였다. 마지막으로 이 제어 방법을 활용하여 도어트림 고정을 하였으며, 고정된 도어트림의 Clip을 직접 제거하면서 개발된 ARF를 검증하였다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제안한 ARF의 도어트림고정 알고리즘을 고도화 할 계획이다. 이는 자동차 종에 따른 도어트림마다 종류가 다르며, 마찰 및 형상이 매우 다양할 수 있다. 이 뿐만 아니라 Clip의 설치할 때의 고정력에 대해서 최적화 하는 것이 필요하기 때문에 알고리즘 고도화는 필수적이다. 또한, 이 시스템을 확장하여 다른 셀 생산 시스템과의 통합을 통해 도어트림 Clip 설치 및 제거의 자동화에 대한 연구를 수행을 할 계획이다.

References

- [1] E. Molleman, J. Slomp, and S. Rolefes, "The evolution of a cellular manufacturing system - a longitudinal case study," *International Journal of Production Economics*, vol. 75, no. 3, pp. 305-322, Feb., 2002, DOI: 10.1016/S0925-5273(01)00139-6.
- [2] J. G. Nahr, M. Bathaee, A. Mazloumzadeh, and H. Nozari, "Cell production system design: a literature review," *International Journal of Innovation in Management, Economics and Social Sciences*, vol 1, pp. 16-44, Apr., 2021, DOI: 10.52547/ijimes.1.1.16.
- [3] L. D. Beju, "Algorithm for workcells design," *10th International Conference on Manufacturing Science and Education - MSE 2021, Sibiu, Romania, 2021*, DOI: 10.1051/mateconf/202134303002.
- [4] Hyundai Motor Group, *The mobility factory without conveyor belts*, [Online], <https://www.hyundaimotorgroup.com/story/CONT000000000125996>, Accessed: Jul.23.2025.
- [5] H. S. Jeong, T. K. Kim, B. J. Jung, C. N. Cho, G. W. Kim, and J. H. Hwang, "A design of the flexible assembly able robotic workcell frame," *2023 The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Jeju, Korea, pp. 251, 2023, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11673968>.
- [6] C. N. Cho, T. K. Kim, B. J. Jung, and J. H. Hwang, "OPC UA-based modular control of robotic workcells for high-mix low-volume production," *2023 The Korean Society of Mecha-*

nical Engineers, Songdo, Incheon, Korea, pp. 1908, 2023, DOI: <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11709400>.

[7] J. H. Park, W. B. Jang, S. Y. Chung, M. Jin, and M. J. Hwang, "Kinematic calibration based on position of robot manipulator eliminating redundancy of parameters," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 517-528, Jul., 2022, DOI: 10.7736/JKSPE.022.023.

[8] W. B. Jang, S. H. Park, S. Y. Chung, M. J. Hwang, and M. Kim, "Automation of shoe upper adhesive spraying process using robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 40, no. 12, pp. 981-988, Dec., 2023, DOI: 10.7736/JKSPE.023.093.

[9] W. B. Jang, J. Lee, S. H. Park, S. Y. Chung, M. Jin, and M. J. Hwang, "Kinematic calibration of robot manipulator using RBG-D Camera," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 264-271, Mar., 2023, DOI: 10.5302/J.ICROS.2023.22.0225.

[10] J. Lee and B.-K. Cho, "Development of a DDP-based trajectory generation method considering the manipulability measure for 6-DOF collaborative robots," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 98-114, Mar., 2024, DOI: 10.1093/jcde/qwae110.

[11] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation," *1984 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, pp. 304-313, 1984, DOI: 10.23919/ACC.1984.4788393.

[12] S. Jung and D.-J. Jeong, "Admittance force tracking control schemes for robot manipulators under uncertain environment and dynamics," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 19, no. 11, pp. 3753-3763, 2021, DOI: 10.1007/s12555-020-0959-7.

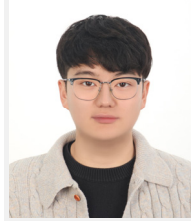
[13] D. G. Zill, "Ordinary Differential Equations," *Advanced Engineering Mathematics*, 7th ed. Jones & Bartlett Learning, 2020, [Online], <https://www.amazon.com/Advanced-Engineering-Mathematics-Dennis-Zill/dp/1284206246>.



이 재 순

2014 국민대학교 기계시스템공학부(공학사)
 2016 국민대학교 기계시스템공학부(공학석사)
 2023 국민대학교 기계시스템공학부(공학박사)
 2023~2024 Robotics and Control Lab 박사후
 연구원
 2024~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 협동로봇제어, 휴머노이드, 여자유도 로봇팔 제어



강 민 석

2020 고려대학교 제어계측공학과(공학사)
 2022 성균관대학교 기계공학과(공학석사)
 2023~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 로봇 제어, 비전, 로봇 파지, 공정 자동화



박 상 현

2002 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
 2004 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
 2024 울산과학기술원 기계공학과(공학박사)
 2018~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원

관심분야: 여유자유도 로봇, 제어, 로봇 동역학, 로봇 설계



김 무 림

2004 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
 2008 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
 2008~2016 포항산업과학연구원 선임/책임
 연구원
 2016~현재 한국로봇융합연구원수석연구원/
 본부장

관심분야: 재난대응로봇, 로봇 제어, 협동로봇, 공장자동화, 유압구동
 로봇, 휴머노이드 로봇, 공중매니플레이션



김 종 걸

1996 경일대학교 기계설계학과(학사)
 2010 경북대학교 기계공학과(석사)
 1996~2007 (주)풍산 기술개발부과장
 2007~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원

관심분야: 로봇 기구, 로봇 메커니즘, 로봇 매니플레이터, 유압형 로봇,
 재난대응 로봇, 공장자동화 로봇