

박사학위논문

가전제품 물리적 사용자 인터페이스
동적 특성 평가를 위한
협동로봇 기반 계측 방법 연구

2026년

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합제품전공

연 경 수

박사학위논문
지도교수 노광현

가전제품 물리적 사용자 인터페이스
동적 특성 평가를 위한
협동로봇 기반 계측 방법 연구

A Study on Collaborative Robot-based Measurement
Method for Evaluating Dynamic Characteristics of
Physical User Interfaces in Home Appliances

2025년 12월 일

한성대학교 대학원

스마트융합건설링학과

스마트융합제품전공

연 경 수

박사학위논문
지도교수 노광현

가전제품 물리적 사용자 인터페이스
동적 특성 평가를 위한
협동로봇 기반 계측 방법 연구

A Study on Collaborative Robot-based Measurement
Method for Evaluating Dynamic Characteristics of
Physical User Interfaces in Home Appliances

위 논문을 공학 박사학위 논문으로 제출함

2025년 12월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합컨설팅학과

스마트융합제품전공

연 경 수

연경수의 공학 박사학위 논문을 인준함

2025년 12월 일

심사위원장 이 후 진 (인)

심사위원 노 광 현 (인)

심사위원 이 경 복 (인)

심사위원 임 황 용 (인)

심사위원 박 재 규 (인)

국 문 초 록

가전제품 물리적 사용자 인터페이스 동적 특성 평가를 위한 협동로봇 기반 측정 방법 연구

한 성 대 학 교 대 학 원
스 마 트 융 합 컨 설 팅 학 과
스 마 트 융 합 제 품 전 공
연 경 수

가전제품의 성능이 상향 평준화되고 감성적인 요소에 대한 소비자의 관심이 높아지면서 가전제품 시장의 패러다임이 변화하고 있다. 이러한 변화 속에서 가전제품의 물리적 사용자 인터페이스(PUI)가 제공하는 햅틱(Haptic) 품질은 핵심적인 경쟁 요소로 부상하였다. 소비자가 제품을 조작할 때 직관적으로 인지하는 감성 품질은 사용자의 구매 결정에 결정적인 영향을 미치지만, 감성 품질을 높이기 위해 사용되었던 기존의 수동 측정 방식은 작업자의 숙련도와 주관에 의존하여 데이터의 반복 재현성과 신뢰성을 확보하는 데 근본적인 한계가 있었다. 또한, 제품별로 특화된 전용 측정 장비는 유연성이 부족하여 다품종 소량 생산 체제에서의 신속한 품질 평가와 연구 개발에 적용하기 어려운 단점이 존재한다.

본 연구는 이러한 문제점들을 극복하고 주관적인 감성 품질을 객관적인 동적 특성 지표로 정량화하기 위해, 6축 다관절 협동로봇과 6축 힘/토크 센서를 통합한 유연한 PUI 동적 특성 계측 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 협동로봇을 활용하여 인간의 팔 동작을 모사한 정밀한 모션 생성을 통해 다양한 형태의 PUI에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 6축 힘/토크 센서는 협동로봇이 PUI를 조작하는 전 과정에서 발생하는 다차원적 상호작용 힘과 토크를 수집할 수 있다. 또한 측정 데이터의 일관성 확보를 위해 표준화된 측정 프로토콜을 제안하였다.

제안 시스템의 성능 검증을 위해 냉장고, 오븐, 세탁기 등 대표적인 가전 제품의 PUI를 대상으로 작동 메커니즘에 기인한 동적 특성을 정량화하기 위한 실증 실험을 수행하였다. 냉장고 회전형 도어 실험에서는 마그네틱 개스킷에 의한 초기 분리력, 힌지 시스템에 의한 자동 닫힘 구간, 그리고 마찰 특성을 포함한 전체 개폐 과정의 힘/토크 프로파일을 연속적으로 획득하였다. 냉장고 서랍형 도어 실험에서는 레일 경사에 따른 저항력, 구름마찰 및 진동, 소프트 클로징 구간 등을 정량적으로 확인하였으며, 오븐 드롭다운 도어 실험에서는 카운터밸런스 힌지의 중력 보상 토크를 측정하여 사용자가 느끼는 무게감을 확인하였다. 또한, 세탁기 노브 실험을 통해 디텐트 메커니즘에서 발생하는 주기적인 토크 패턴을 포착함으로써 시스템의 정밀한 측정 능력을 입증하였다.

나아가, 본 연구는 냉장고 회전형 도어의 개폐 과정에서 측정된 6축 힘/토크 데이터에 함수적 주성분 분석(FPCA) 방법을 적용하여 분석하였다. 6축 힘/토크 데이터의 축 간 강한 상관관계를 고려하여 다변량 FPCA 분석을 수행한 결과, 해당 분석 방법이 시계열 데이터에 포함된 동적 특성에 대해 높은 설명력을 가짐을 확인하였다. 또한, 열림과 닫힘 과정의 기계적 메커니즘 차이가 주성분 점수(PC Score) 공간상에서 서로 다른 군집으로 명확히 구분됨을 확인함으로써, 동적 특성의 차이를 시각적으로 규명하였다.

결론적으로, 본 연구에서 구축한 협동로봇 기반 측정 시스템과 데이터 분석 방법론은 기존 측정 방식의 한계를 극복하고, 감성 품질 정량화를 위한 재현성 및 객관성이 우수한 신뢰성 있는 시계열 데이터를 확보하는 데 성공하

였다. 획득된 고해상도의 햅틱 프로파일 데이터는 향후 인공지능(AI) 기반의 감성 품질 예측 모델 개발을 위한 핵심 데이터로 활용될 수 있으며, 제품 개발 초기 단계에서부터 양산 품질 관리에 이르기까지 가전제품의 품질 경쟁력을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

【주요어】 물리적 사용자 인터페이스(PUI), 협동로봇, 6축 힘/토크 프로파일, 함수적 주성분 분석(FPCA), 감성 품질 정량화

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
1. 가전제품 시장의 패러다임 변화	1
2. 물리적 상호작용과 물리적 사용자 인터페이스	2
3. 감성의 정의 및 정량화의 필요성	3
제 2 절 연구의 필요성	5
1. 물리적 사용자 인터페이스의 동적 특성 지표	5
2. 현행 동적 특성 측정 방식의 한계	6
3. 협동로봇 기반 측정 시스템의 필요성	7
제 3 절 연구의 목적과 범위	9
1. 연구 목표	9
2. 주요 연구 내용	9
3. 연구 범위 및 제한점	10
제 2 장 이론적 배경 및 선행 연구	11
제 1 절 감성 품질	11
1. 감성 품질의 개념	11
2. 감성 디자인의 과제	11
제 2 절 물리적 사용자 인터페이스와 햅틱 지각	13
1. 물리적 사용자 인터페이스(PUI)	13
2. 햅틱스(Haptics)의 공학적 의미	14
3. 햅틱 지각의 구성	15
제 3 절 PUI 조작감의 물리적 특성화	16
1. 도어 메커니즘 분석	16
2. 노브 및 버튼 분석	17
3. 햅틱 역공학	18
제 4 절 물리적 측정과 사용자 감성 간의 정량적 모델링	20
1. 햅틱 지각의 심리물리학	20

2. 힘과 토크의 지각적 통합	20
3. 감성 반응 예측 모델링	21
제 5 절 기존 PUI 동적 특성 평가 방식의 한계	23
1. 수동 측정 및 주관적 평가의 한계	23
2. 전용 측정 장치의 한계	24
3. 새로운 PUI 동적 특성 계측 방법론의 필요성	25
제 6 절 로봇틱스와 인공지능 기반 햅틱 분석	26
1. 협동로봇 기반 계측의 유연성	26
2. 6축 힘/토크 센서의 통합	26
3. 물리-감성 모델링을 위한 인공지능 방법론	27
4. 인공지능 기반 햅틱-감성 예측 모델	28
제 3 장 협동로봇 기반 측정 시스템	31
제 1 절 협동로봇 기반 측정 시스템 아키텍처	31
1. 시스템 아키텍처 개요	31
2. 세부 레이어별 구성 및 역할	32
제 2 절 측정 시스템 하드웨어 구성	34
1. 6축 다관절 협동로봇	34
2. 6축 힘/토크 센서	37
3. 말단장치 설계 및 TCP 교정	40
제 3 절 협동로봇 제어 및 측정 알고리즘	42
1. 유연한 궤적 추종 제어	42
2. 협동로봇 궤적 생성	45
3. 측정 데이터 보정 알고리즘	46
제 4 절 표준 측정 프로토콜	48
1. 표준 측정 프로토콜 수립 목적	48
2. 표준 측정 프로토콜 구성	48
제 5 절 제안 시스템의 계측학적 우수성	51
제 4 장 PUI 동적 특성 프로파일 측정 및 분석	53

제 1 절	협동로봇 측정 시스템 구성	53
제 2 절	가전제품 PUI 동적 특성 프로파일 측정	56
1.	냉장고 회전형 도어 동적 특성 프로파일 측정	56
2.	냉장고 서랍형 도어 동적 특성 프로파일 측정	63
3.	오븐 드롭다운 도어 동적 특성 프로파일 측정	69
4.	세탁기 회전형 제어 노브 동적 특성 프로파일 측정	74
제 3 절	함수적 주성분 분석(FPCA)을 이용한 동적 특성 추출	77
1.	FPCA 이론적 배경	77
2.	FPCA 절차	78
3.	FPCA 결과 및 고찰	80
4.	FPCA 요약 및 인공지능 모델과의 연계	84
제 5 장	결 론	86
제 1 절	연구 요약 및 시사점	86
제 2 절	기대 효과 및 활용 방안	87
제 3 절	향후 연구 과제	88
참 고 문 헌	89
ABSTRACT	98

표 목 차

[표 2-1] 사용자 인터페이스 구분 및 측정 대상 비교	13
[표 2-2] PUI 동적 특성 계측 방법론 비교 및 제안	25
[표 2-3] 인공지능 기반 햅틱-감성 예측 모델 선행 연구 비교	30
[표 3-1] 협동로봇 선정 기준	37
[표 3-2] F/T센서 선정 기준	39
[표 3-3] 협동로봇 제어 방식 비교	44
[표 3-4] 유연한 궤적 추종 제어 전략	44
[표 3-5] 협동로봇 궤적 생성 기본 명령어	45
[표 3-6] 측정 프로토콜(1) 시스템 초기화 및 교정	49
[표 3-7] 측정 프로토콜(2) 궤적 생성 및 좌표계 설정	49
[표 3-8] 측정 프로토콜(3) 상세 동작 및 핵심 파라미터	50
[표 4-1] 하드웨어 구성 요소 및 사양	55
[표 4-2] 최대/최소 힘 분포 (냉장고 회전형 도어)	61
[표 4-3] 최대/최소 힘 분포 (냉장고 서랍형 도어)	67
[표 4-4] Standard PCA와 Functional PCA 비교	78
[표 4-5] FPCA 활용 분야	85

그림 목 차

[그림 2-1] 물리 속성과 지각 경험 파이프라인	12
[그림 3-1] 협동로봇 계측 시스템 아키텍처	32
[그림 4-1] 협동로봇 측정 시스템 구성 및 좌표계	54
[그림 4-2] 협동로봇 측정 시스템 하드웨어 구성	55
[그림 4-3] 냉장고 구조 및 핵심 부품	57
[그림 4-4] 프로파일 측정 실험 구성 (냉장고 회전형 도어)	57
[그림 4-5] TCP 방향 및 각속도 프로파일 (냉장고 회전형 도어)	58
[그림 4-6] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (냉장고 회전형 도어)	60
[그림 4-7] 도어 각도에 따른 힘 프로파일 (냉장고 회전형 도어)	61
[그림 4-8] 프로파일 측정 실험 구성 (냉장고 서랍형 도어)	64
[그림 4-9] TCP 위치 및 속도 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)	65
[그림 4-10] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)	66
[그림 4-11] 도어 변위에 따른 힘 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)	67
[그림 4-12] 프로파일 측정 실험 구성 (오븐 드롭다운 도어)	70
[그림 4-13] TCP 자세 및 각속도 프로파일 (오븐 드롭다운 도어)	71
[그림 4-14] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (오븐 드롭다운 도어)	72
[그림 4-15] 프로파일 측정 실험 구성 (세탁기 노브)	74
[그림 4-16] 협동로봇 조인트 각도 프로파일 (세탁기 노브)	75
[그림 4-17] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (세탁기 노브)	76
[그림 4-18] 열림/닫힘 과정의 기저 함수 전개 예시	81
[그림 4-19] 열림/닫힘 과정의 평균 함수 및 주성분 변동 모드	82
[그림 4-20] 열림/닫힘 과정의 주성분 점수(PC Score) 산점도	84

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

1. 가전제품 시장의 패러다임 변화

21세기 가전제품 산업은 근본적인 패러다임의 전환기를 맞이하고 있다. 과거 산업화 시대의 가전제품이 가사 노동의 효율성을 극대화하기 위한 기능적 도구(Functional Tool)로의 역할에 충실했다면, 현대의 가전제품은 사용자의 주거 공간과 조화를 이루고 심리적 만족감을 제공하는 감성적 오브제(Affective Object)로 그 위상이 변화하였다. 냉장고의 냉각 성능, 세탁기의 세정력, 에어컨의 냉방 속도와 같은 물리적 기능성은 기술의 성숙과 함께 상향 평준화되었다. 최근 출시되는 가전제품은 보급형 제품조차도 소비자가 기대하는 기본적인 성능 요건을 완벽하게 충족시키는 상황에서 가전제품 제조사들은 더 이상 기능적 사양의 우위만으로는 시장에서의 제품 차별화를 피하기 어려워졌다.

기술적 격차가 줄어들면서 소비 기준은 제품의 물리적 성능보다는 사용자의 심리적 만족감으로 이동하였다. 이는 소비자의 잠재된 니즈(Needs)와 욕구(Wants)가 제품 개발의 출발점으로 삼는 마켓 인(Market-In) 철학으로의 전환을 의미한다.¹⁾ 소비자는 단순한 필요(Need)로 제품을 구매하기보다는 자신의 개성을 표현하고 사용 과정에서 즐거움과 애착을 느낄 수 있는 제품을 원하고 있다. 즉, 이성적이고 합리적인 판단 기준보다는 제품이 전달하는 이미지, 브랜드의 철학, 그리고 사용 시 느껴지는 주관적인 감정이 구매 결정의 핵심 요인(Determinant Factor)으로 자리 잡았다. 이러한 배경 속에서 사용자 경험(User Experience, UX)과 감성 품질(Affective Quality)은 제품의 가치를 결정짓는 핵심 경쟁력으로 부상하였다.²⁾

1) Nagamachi, M. (2008). Perspectives and new trend of Kansei/affective engineering. The TQM Journal, 20(3), 290-298

감성 품질은 시각적 디자인뿐만 아니라, 청각, 그리고 무엇보다 촉각(Haptics)을 통해 완성된다. 소비자가 가전제품 매장에서 가장 먼저 하는 행동은 제품을 눈으로 보는 것에 그치지 않고, 냉장고 문을 열어보거나 세탁기 다이얼을 돌려보는 것이다. 이때 손끝으로 전달되는 묵직한 저항감, 문이 닫힐 때의 견고한 체결감, 다이얼의 부드러운 회전 질감 등은 제품의 품질과 내구성을 직관적으로 판단하게 하는 무의식적 신호로 작용한다.

2. 물리적 상호작용과 물리적 사용자 인터페이스

디지털 기술의 급격한 발전으로 터치스크린, 동작 인식, 음성 인식 등 비접촉식 인터페이스의 적용이 확산되고 있으나, 물리적인 실체를 가진 가전제품을 제어하는 데 있어 실제 버튼이나 핸들이 주는 직관성과 신뢰성을 완전히 대체하기는 어렵다. 가전제품의 본질적인 사용성은 여전히 물리적 상호작용(Physical Interaction)에 기반하고 있다. 냉장고의 문을 여닫고, 드럼 세탁기의 문을 잠그고, 오븐의 트레이를 당기는 행위는 제품을 사용하는 과정에서 사용자가 가장 빈번하고 직접적으로 경험하는 물리적 상호작용이다. 사용자가 가전제품과 상호작용하기 위한 접점인 물리적 사용자 인터페이스(Physical User Interface, PUI)는 물리적 공간과 디지털 공간을 연결하는 매개체이자, 제품의 품질 상태를 사용자에게 전달하는 촉각적 디스플레이로서의 역할을 담당한다.

PUI를 통한 상호작용은 햅틱스(Haptics)의 관점에서 해석될 때 그 중요성이 더욱 명확해진다. 햅틱스는 사용자가 능동적으로 물체를 탐색하고 조작할 때 느끼는 정보의 총체로, 피부의 기계수용체(Mechanoreceptor)를 통해 느끼는 피부 감각(Cutaneous sense)과 근육, 힘줄, 관절의 고유수용성 감각(Proprioception)을 통해 느끼는 운동 감각(Kinesthetic sense)의 결합으로 이루어진다.³⁾ 예를 들어, 다이얼의 표면 재질이 주는 거칠기나 온도는 피부 감

2) 최재호. (2013). 감성의 이해를 통한 감성품질의 구조적 접근 방법에 관한 연구. 대한산업공학회지, 39(1), 73-77.

3) Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. Attention, Perception, & Psychophysics, 71(7), 1439-1459.

각에 해당하며, 다이얼을 돌릴 때 필요한 회전 토크나 멈춤쇠의 걸림 느낌은 운동 감각에 해당한다.

가전제품의 시각 정보는 제품에 대한 기대감을 형성한다면, 촉각 정보는 그 기대감을 검증하고 확신을 주는 역할을 한다. 시각적으로 견고해 보이는 제품임에도 막상 만졌을 때 헐겁거나 조잡한 느낌을 준다면, 시각적 기대와 촉각적 경험 사이의 불일치로 인해 사용자 경험은 급격히 저하된다. 사용자가 냉장고 핸들을 잡고 당기는 순간 느껴지는 초기 저항력, 문이 열리면서 느껴지는 관성 모멘트의 변화, 그리고 닫힐 때 개스킷이 밀착되며 발생하는 감쇠력 등은 사용자가 느끼는 제품의 내구성, 정밀도, 완성도에 대한 직관적인 인식을 형성한다. 한편, 사용자가 문을 닫을 때 적절한 피드백이 없다면 문이 제대로 닫혔는지 다시 확인하는 행동을 유발하게 된다. 따라서 PUI의 물리적 특성을 최적화하는 것은 단순한 감성적 만족을 넘어, 사용자의 오조작을 방지하고 제품의 신뢰성을 담보하는 필수 조건이다.

3. 감성의 정의 및 정량화의 필요성

본 연구에서 정의하는 감성(Affective Property)은 사용자가 PUI를 조작할 때 유발되는 주관적이고 정서적인 반응을 의미하며, 물리적 자극이 인간의 심리적 상태에 미치는 영향을 공학적으로 다루는 분야이다. 물리적 상호작용을 통해 표현하는 감성 어휘들(예: 부드럽다, 경쾌하다, 묵직하다, 고급스럽다)은 사용자가 PUI의 물리적 거동을 해석한 결과물이다. 감성은 심미적 디자인 요소(형태, 재질, 색상)뿐만 아니라, 조작 시 손끝으로 전달되는 힘과 진동, 소리와 같은 동적 요소에 의해 복합적으로 형성된다.⁴⁾

감성은 본질적으로 주관적이고 추상적이며, 개인의 경험이나 문화적 배경에 따라 해석이 달라질 수 있다는 모호성을 내포하고 있다. 이는 제품 개발 과정에서 디자이너와 엔지니어 간의 의사소통을 저해하는 원인이 된다. 디자이너가 요구하는 조작감을 엔지니어가 구체적인 기구 설계 변수로 변환하는

4) Shin, G. W., Park, S., Kim, Y. M., Lee, Y., & Yun, M. H. (2020). Comparing semantic differential methods in affective engineering processes: a case study on vehicle instrument panels. *Applied Sciences*, 10(14), 4751.

과정에서 정량적인 기준이 부재하다면, 제품 개발 과정은 잦은 시행착오(Trial and Error)를 반복할 수밖에 없으며, 비용 증가와 개발 기간 지연으로 귀결된다. 나아가 추상적인 감성 언어를 구체적인 공학 언어로 번역하는 과정에서의 불일치는 최종 제품의 감성 품질 저하로 이어질 수밖에 없다.

따라서 주관적인 사용자 경험을 객관적인 데이터로 변환하여 체계적으로 관리하고 설계에 반영할 필요성이 대두된다. 이를 감성의 정량화(Quantification of Affective Property)라고 하며, 모호한 감성 어휘를 측정 가능한 물리량으로 매핑(Mapping)하는 과정을 의미한다.⁵⁾ PUI의 감성 품질은 정적인 상태보다는 조작이 이루어지는 동적인 과정에서 결정되므로, 시간에 따른 힘(Force), 토크(Torque), 변위(Displacement), 속도(Velocity)의 변화를 연속적으로 측정하고 분석하는 것이 필수적이다. 정량화된 데이터는 제품의 감성 품질을 일관성 있게 관리하고, 나아가 사용자에게 최적의 경험을 제공하는 제품 설계를 가능하게 하는 기반이 된다.

5) Chen, X., Barnes, C. J., Childs, T. H. C., Henson, B., & Shao, F. (2009). Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design. *Materials & Design*, 30(10), 4299-4310.

제 2 절 연구 필요성

1. 물리적 사용자 인터페이스의 동적 특성 지표

가전제품 PUI의 감성 품질을 공학적으로 해석하기 위한 핵심 지표는 힘/토크 프로파일(Force/Torque Profile)이다. 힘/토크 프로파일이란 사용자가 가전제품을 조작(예: 문 열기, 셔랍 당기기, 다이얼 회전 등)하는 전체 시퀀스 동안 가하는 힘(Force)과 발생하는 토크(Torque)의 변화를 시간 또는 변위의 함수로 기록한 연속적인 데이터 스트림(Data Stream)을 의미한다.⁶⁾ 힘/토크 프로파일은 어떤 작업을 수행하는데 필요한 단일 최대값(Peak Value) 정보(예: 문을 여는 데 50N의 힘이 필요)만을 제공하는 기존의 측정 방식보다 풍부한 정보를 제공한다.

힘/토크 프로파일은 제품의 객관적인 물리적 특성과 사용자의 주관적인 인지적 감성을 연결하는 데이터 공간(Data Space) 역할을 수행한다.⁷⁾ 예를 들어, 사용자가 느끼는 부드러움은 프로파일 상에서 힘의 변화율(기울기)이 급격하지 않고 완만하며, 고주파 진동 성분이 적은 형태로 나타날 수 있다. 반면, 클릭감이나 걸림은 힘이 국소적으로 급격하게 상승했다가 하강하는 특정한 패턴으로 식별된다. 즉, 힌지 내부의 스프링 장력, 개스킷의 자력, 윤활유의 점성, 레일의 마찰 계수 등 복잡한 설계 정보들이 모두 이 힘/토크 프로파일이라는 하나의 동적 거동 데이터로 집약되어 나타나는 것이다.⁸⁾ 따라서, 복잡한 부품 설계 정보를 일일이 분석하지 않아도 이 프로파일 데이터만을 통해 사용자가 느끼는 감성적인 경험을 예측할 수 있는 직접적인 통로를 확보하게 되는 것이다.

힘/토크 프로파일은 객체 중심적 특성(Object-Centered Property)을 가진

-
- 6) Abu-Dakka, F. J., Nemeč, B., Jørgensen, J. A., Savarimuthu, T. R., Krüger, N., & Ude, A. (2015). Adaptation of manipulation skills in physical contact with the environment to reference force profiles. *Autonomous Robots*, 39(2), 199–217
 - 7) Awan, M. I., Raza, A., Hassan, W., Kyung, K. U., & Jeon, S. (2025). Quantifying Haptic Affection of Car Door through Data-Driven Analysis of Force Profile. *IEEE Access*.
 - 8) Eid, M. A., & Al Osman, H. (2015). Affective haptics: Current research and future directions. *IEEE Access*, 4, 26–40.

다.⁹⁾ 측정 방식에 따라 측정값이 일부 변동될 수는 있으나, 프로파일의 고유한 형상(Shape)과 특징점(Feature Points)은 제품의 기구적 설계에 의해 결정된다.¹⁰⁾ 특히, 문이나 서랍을 천천히 조작하는 경우, 이 힘/토크 프로파일은 조작하는 주체의 특성보다는 메커니즘 자체의 특성에 의해 크게 좌우되는 경향이 있어, 객관적인 물리적 지표로서의 가치가 매우 높다. 따라서 이는 제품 간의 성능을 객관적으로 비교하고 벤치마킹(Benchmarking)하거나, 설계 변경 전후의 품질 변화를 추적하는 데 있어 가장 신뢰할 수 있는 지표가 된다. 힘/토크 프로파일은 단순한 성능 지표를 넘어, 제품 내부 부품의 비정상적인 마찰, 조립 불량, 간섭 등을 진단할 수 있는 모니터링 수단으로도 활용될 수 있다.

2. 현행 동적 특성 측정 방식의 한계

현재 산업 현장에서 PUI의 동적 특성을 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 방식은 작업자가 휴대용 힘 측정기(Push-pull Gauge)를 이용하거나 전문 패널이 직접 조작하여 점수화하는 방식의 관능 평가에 의존하는 수동 측정(Manual Measurement) 방식이다. 그러나 이러한 접근법은 정량적인 연구와 엄격한 품질 관리에 있어 다음과 같은 한계를 드러낸다.

첫째, 측정의 일관성과 반복성(Repeatability)의 결여이다. 인간은 기계처럼 매번 동일한 속도, 가속도, 궤적으로 PUI를 조작할 수 없다. 작업자의 숙련도, 피로도, 자세, 힘을 가하는 각도 등에 따라 측정 결과의 변동 가능성이 있다.¹¹⁾ 또한, 작업자가 추정하는 힘과 실제 발휘된 힘 사이에는 오차가 존재할 가능성이 있어 데이터의 신뢰성을 담보하기 어렵다.¹²⁾

9) Jain, A., & Kemp, C. C. (2013). Improving robot manipulation with data-driven object-centric models of everyday forces. *Autonomous Robots*, 35(2), 143-159.

10) Rempel, D. (2025). Biomechanical Models for Estimating Hand Forces When Manually Moving Inert Objects. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-12.

11) Dale, A. M., Rohn, A. E., Patton, A., Standeven, J., & Evanoff, B. (2011). Variability and misclassification of worker estimated hand force. *Applied ergonomics*, 42(6), 846-851.

12) Wurzelbacher, S. J., Lampl, M. P., Bertke, S. J., & Tseng, C. Y. (2020). The effectiveness of ergonomic interventions in material handling operations. *Applied ergonomics*, 87, 103139.

둘째, 다차원 정보의 손실 및 기구적 특성 분석의 한계이다. 대부분의 수동 게이지는 단일 축(1-DOF) 방향의 인장력이나 압축력만을 측정한다. 그러나 실제 냉장고 문을 여는 동작은 3차원 공간상에서의 회전 운동이며, 이때 주된 힘(Force)뿐만 아니라 토크(Torque)가 복합적으로 작용한다. 단방향 측정은 이러한 6자유도(6-DOF)의 복합적인 물리 현상을 단순화시켜 버리기 때문에 힌지의 비틀림, 도어의 처짐(Sagging), 편심 구동 등에 의한 미세한 감성 저하 요인을 포착해내지 못한다.¹³⁾

셋째, 연속적인 동적 거동 분석의 부재이다. 수동 측정은 주로 최대 개방력과 같은 특정 시점의 스칼라(Scalar) 값을 얻는 데 그친다. 그러나 사용자의 감성은 조작의 시작부터 끝까지 이어지는 연속적인 힘의 변화 과정에서 형성된다. 초기 구동력은 적절했으나 중간 구간에서 레일의 뻑뻑함이 느껴지거나, 닫히는 순간 댐퍼의 감쇠력이 부족하여 충격이 발생하는 등의 동적 결함은 단편적인 최대값 측정으로는 발견할 수 없다.

3. 협동로봇 기반 측정 시스템의 필요성

수동 측정의 한계를 극복하고, 감성 품질 관리에 필요한 고해상도의 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해, 협동로봇을 활용한 자동화된 측정 시스템의 도입을 대안으로 제시한다. 협동로봇은 기존의 산업용 로봇과 달리 펜스 없이 사람과 동일한 공간에서 안전하게 협업할 수 있도록 설계되었으며(ISO 10218, ISO/TS 15066), 유연한 프로그래밍과 직접 교시(Direct Teaching) 기능을 통해 다품종 소량 생산이 특징인 가전 산업에 최적화된 솔루션이다.¹⁴⁾ 협동로봇 기반 시스템을 활용하여 PUI의 동적 특성 데이터를 측정하는 방법은 다음과 같은 장점이 있다.

13) Verner, L. N., & Okamura, A. M. (2009, March). Force & torque feedback vs force only feedback. In World Haptics 2009—Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (pp. 406-410). IEEE.

14) Falco, J. A., Marvel, J. A., & Norcross, R. J. (2012). Collaborative robotics: Measuring blunt force impacts on humans. *Chest*, 140(210), 45.

가. 정밀한 궤적 제어 및 반복 재현성

로봇은 프로그래밍이 된 궤적(Trajectory)을 마이크로미터 단위의 정밀도로 반복 수행할 수 있으며, 속도와 가속도를 일정하게 제어할 수 있다. 측정의 가장 큰 변수인 조작 속도를 완벽하게 통제함으로써 데이터의 높은 신뢰성을 보장한다.¹⁵⁾

나. 6축 힘/토크 센서의 통합

로봇의 끝단(End-effector)에 장착된 6축 F/T 센서는 3축 힘(F_x, F_y, F_z)과 3축 토크(T_x, T_y, T_z)를 동시에 측정한다. 단방향의 문 개폐력을 넘어 문 처짐이나 힌지 유격과 같은 기구적 결함을 입체적으로 분석할 수 있는 다차원 데이터를 제공한다.

다. 인간 모사(Human-Mimetic) 동작 구현

협동로봇은 다관절 구조를 통해 인간의 팔과 유사한 운동 범위를 구현할 수 있다. 단순한 운동을 하는 전용 측정 장치와 달리, 실제 사용자가 가전제품을 사용할 때의 자연스러운 곡선 궤적과 관절 움직임을 모사하여 사용자 관점에서의 현실적인 데이터를 획득할 수 있다.

라. 데이터 기반 분석(Data-Driven Analysis)의 토대

로봇을 통해 수집된 방대하고 정밀한 데이터는 주성분 분석(PCA), 머신러닝(SVM, Neural Networks) 등 고급 통계 및 인공지능 기법을 적용할 수 있는 기반이 된다. 이를 통해 육안이나 감각으로는 구분하기 힘든 미세한 감성 품질의 차이를 패턴화하여 분류하고 예측할 수 있다.¹⁶⁾

15) Pagani, R., Nuzzi, C., Ghidelli, M., Borboni, A., Lancini, M., & Legnani, G. (2021). Cobot user frame calibration: Evaluation and comparison between positioning repeatability performances achieved by traditional and vision-based methods. *Robotics*, 10(1), 45.

16) Hayami, Y., Wan, W., Koyama, K., Shi, P., Rojas, J., & Harada, K. (2021, January). Error identification and recovery in robotic snap assembly. In 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (pp. 46-53). IEEE.

제 3 절 연구의 목적과 범위

1. 연구 목표

본 연구의 최종 목표는 가전제품의 물리적 사용자 인터페이스(PUI)가 갖는 동적 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 ‘협동로봇 기반의 힘/토크 프로파일 계측 및 분석 방법론’을 제안하고, 이를 통해 감성 품질 관리를 위한 과학적 기반을 마련하는 것이다. 구체적으로는 사람의 조작 동작을 정밀하게 모사하면서도 높은 반복 정밀도를 갖는 로봇 측정 시스템을 구축하고, 획득된 고차원 시계열 데이터를 분석하여 PUI의 기구적 특성과 감성적 요인을 해석할 수 있는 분석 방법론을 제시한다.

2. 주요 연구 내용

연구 목표를 달성하기 위해 구체적으로 다음과 같은 세부 연구를 수행한다.

가. 협동로봇 통합 측정 시스템 설계 및 구축

협동로봇과 6축 힘/토크 센서를 이용하여, 다양한 가전제품 PUI 메커니즘을 유연하게 테스트할 수 있는 통합 측정 시스템을 설계하고, 측정 데이터의 신뢰성과 일관성을 보장하기 위한 표준화된 측정 절차를 수립한다.

나. 가전제품 대표 PUI에 대한 동적 특성 프로파일 측정

제안된 시스템과 방법론의 타당성을 검증하기 위해, 가전제품의 대표적인 메커니즘 대상으로 실증 실험을 수행한다. 냉장고의 회전형 도어와 서랍형 도어, 오븐의 드롭다운(Drop-down) 도어, 세탁기의 회전형 제어 노브 등을 대상으로 실제 조작 시 발생하는 힘/토크 프로파일을 측정하고 분석함으로써 제안된 시스템의 우수성을 입증한다.

다. 데이터 분석 및 특징 추출(Feature Extraction)

측정된 시계열 힘/토크 데이터에서 유의미한 물리적 특징을 추출하기 위한 분석 기법을 연구한다. 수집된 6축 힘/토크 프로파일을 기반으로 전체 프로파일의 형상 정보를 분석할 수 있는 함수적 주성분 분석(Functional Principal Component Analysis, FPCA) 기법을 활용하여, 고차원의 힘/토크 데이터 속에 내재된 동적 특성을 분석한다.

3. 연구 범위 및 제한점

본 연구는 가전제품 PUI의 물리적 특성을 객관적 데이터로 측정하고 분석하는 계측 및 분석 방법론에 집중한다. 연구 대상은 가정용 냉장고, 오븐 등 대형 가전제품의 도어와 같은 구동형 PUI(Operable PUI)를 중심으로 하며, 제어형 PUI(Control PUI)인 회전형 제어 노브를 포함한다.

본 연구의 범위는 신뢰할 수 있는 객관적 물리 데이터인 힘/토크 프로파일을 획득하고, 이를 통계적 기법(FPCA)을 통해 기구적 특성으로 해석하는 단계까지를 포함한다. 획득된 물리 데이터와 실제 사용자의 주관적인 감성 평가 점수 간의 직접적인 상관관계 모델을 구축하거나, 이를 기반으로 감성을 자동으로 예측하는 인공지능 모델 개발은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다. 다만, 향후 이러한 감성 예측 모델 개발을 위한 전처리 단계로서, 고품질의 학습 데이터를 생성하고 핵심 특징(Feature)을 추출하는 엔지니어링 기반을 마련하는 데 본 연구의 의의를 둔다.

제 2 장 이론적 배경 및 선행 연구

제 1 절 감성 품질

1. 감성 품질의 개념

가전제품은 작동하기 위한 핵심 기능을 충족함과 동시에, 사용자에게 긍정적인 감정적 반응을 유발하고 총체적인 경험을 만족시키는 방향으로 진화하고 있다. 경쟁우위를 확보하려는 제조업체는 기능성, 사용성, 안전성, 가격 적절성뿐만 아니라 제품이 유발하는 감정과 느낌을 예측하고 설계할 수 있는 도구를 필요로 한다.¹⁷⁾ 이러한 배경에서 감성 디자인(Emotional Design) 또는 감성 품질(Affective Quality)이라는 개념이 중요하게 대두되고 있다. 감성 디자인은 사용자의 주관적인 감정적 반응(Affective Responses) 또는 감정적 요구(Affective Needs)를 제품의 구체적인 디자인 요소나 엔지니어링 파라미터로 변환하는 것을 목표로 하는 소비자 지향적 접근 방식을 말한다. 감성 디자인을 통해 달성되는 감성 품질 또는 감정적 속성은 사용자가 제품과 상호작용하며 느끼는 주관적, 정서적 인식을 의미하며, '고급스러운', '부드러운', '견고한' 등과 같은 총체적인 느낌을 포함한다.¹⁸⁾

2. 감성 디자인의 과제

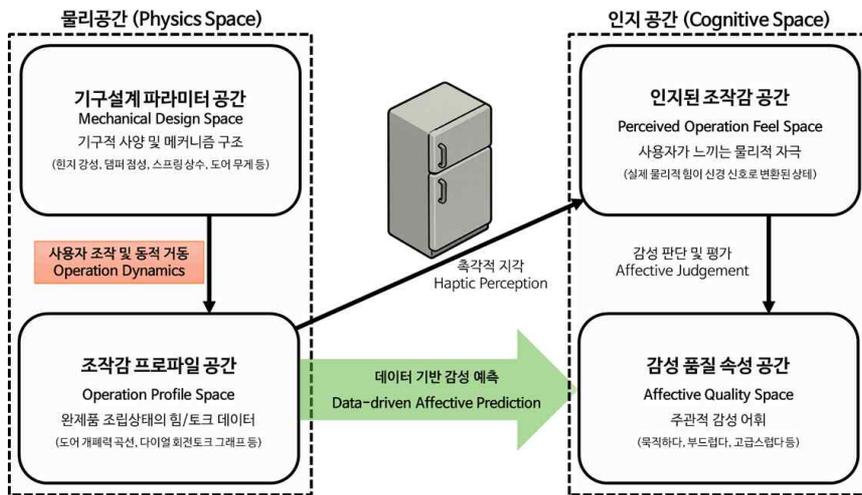
감성 디자인은 사용자 경험(UX)이 제품의 가치 중 큰 비중을 차지하는 자동차 산업과 가전제품 산업에서 활발하게 적용되어 왔다. 감성 디자인의 핵심 과제는 측정이 어려운 주관적 영역과 측정이 가능한 객관적 영역 간의 연

17) López, Ó., Murillo, C., & González, A. (2021). Systematic literature reviews in kansei engineering for product design—a comparative study from 1995 to 2020. *Sensors*, 21(19), 6532.

18) Ikejima, T., Mizukoshi, K., & Nonomura, Y. (2024). Predicting Sensory and Affective Tactile Perception from Physical Parameters Obtained by Using a Biomimetic Multimodal Tactile Sensor. *Sensors*, 25(1), 147.

관성을 찾는 것이다.¹⁹⁾ 구체적으로, 사용자의 주관적인 감성적 반응을 수집하고, 이를 제품의 객관적인 디자인 요소(예: 색상, 형태, 재질, 치수, 구조)와 정량적으로 연결하는 것이다. 이러한 관계를 찾는 일반적인 접근 방식은 주로 설문조사(Questionnaire Survey)에 의존해 왔다. 그러나 이 방식은 시간과 노동 집약적일 뿐만 아니라, 수집되는 데이터의 규모가 작고, 시장 트렌드 변화에 따른 업데이트가 어렵다는 본질적인 한계를 가진다.²⁰⁾

따라서, 감성 디자인의 실효성을 높이기 위해서는 기존 설문 방식의 한계를 넘어선 새로운 객관적 계측 방법론이 요구된다. 본 연구는 주관적 감성을 객관적인 설계 변수로 변환하려는 감성 디자인의 궁극적인 목표와 연결된다. 본 연구는 협동로봇을 통한 정밀한 물리량 측정이라는 새로운 공학적 도구를 통해 감성 디자인의 목표를 보다 객관적이고, 효율적이며, 확장성 있는 방식으로 달성하기 위한 새로운 엔지니어링 프레임워크를 제안하고자 한다.



[그림 2-1] 물리 속성과 지각 경험 파이프라인 (Awan et al., 2025, 재구성)

- 19) Jiang, H., Kwong, C. K., Liu, Y., & Ip, W. H. (2015). A methodology of integrating affective design with defining engineering specifications for product design. *International Journal of Production Research*, 53(8), 2472–2488.
- 20) Li, Z., Tian, Z. G., Wang, J. W., Wang, W. M., & Huang, G. Q. (2018). Dynamic mapping of design elements and affective responses: a machine learning based method for affective design. *Journal of Engineering Design*, 29(7), 358–380.

제 2 절 물리적 사용자 인터페이스와 햅틱 지각

1. 물리적 사용자 인터페이스(PUI)

사용자 인터페이스(User Interface, UI)는 사용자가 특정 시스템에 접근하고 상호작용할 수 있도록 하는 매개체를 말한다. 인간-컴퓨터 상호작용(Human-Computer Interaction, HCI) 분야의 연구들은 일반적으로 UI를 그래픽 사용자 인터페이스(Graphical UI, GUI), 논리적 사용자 인터페이스(Logical UI, LUI), 그리고 물리적 사용자 인터페이스(Physical UI, PUI) 세 가지 주요 영역으로 구분한다.²¹⁾

[표 2-1] 사용자 인터페이스 구분 및 측정 대상 비교

구분	개념	예시	측정 대상
물리적 사용자 인터페이스 (PUI)	· 사용자의 물리적 조작을 지원하는 유형의(tangible) 요소	· 버튼 · 노브 · 스위치 · 핸들 · 서랍	· 힘 · 토크 · 변위 · 속도 · 궤적
그래픽 사용자 인터페이스 (GUI)	· 화면에 시각적으로 표시되는 그래픽 요소	· 아이콘 · 메뉴 · 폰트 · 레이아웃	· 픽셀 · 반응 시간 · 레이아웃 · 클릭 정확도
논리적 사용자 인터페이스 (LUI)	· 작업의 논리적 흐름 및 정보 구조	· 메뉴 계층 · 작업 순서 · 정보 구조	· 작업 완료 시간 · 오류율 · 메뉴 깊이

21) Jin, B. S., & Ji, Y. G. (2010). Usability risk level evaluation for physical user interface of mobile phone. Computers in Industry, 61(4), 350-363.

PUI는 사용자가 물리적으로 작업을 실행하는 상호작용 도구 또는 사용자가 실제로 만지고 조작하는 인터페이스를 총칭한다. GUI가 시각적 정보에 의존하는 것과 달리, PUI는 사용자의 신체적 개입을 필수적으로 요구하는 유형(Tangible)의 요소를 다룬다. 여기에는 냉장고나 자동차의 도어 핸들, 세탁기의 다이얼 노브, 오디오 시스템의 볼륨 버튼, 모바일 기기의 물리적 키(key) 등 사용자가 직접 힘을 가하고 움직임을 제어하는 모든 물리적 구성요소가 포함된다.

최근 스마트폰, 가전제품 등에서 다양한 기능이 하나의 기기로 융합되는 디지털 융합(Digital Convergence) 현상이 가속화되면서 화면상의 GUI는 점점 더 복잡해지고 있다. 이러한 복잡성은 때때로 기기 제어의 비효율성을 초래할 수 있으며, 사용자의 만족과 사용 편의성을 직관적으로 지원하는 PUI 디자인의 중요성은 오히려 더욱 부각되고 있다.

2. 햅틱스(Haptics)의 공학적 의미

PUI와의 상호작용은 본질적으로 햅틱스(Haptics) 경험, 즉 사용자가 시스템에 물리적 힘을 가하고, 시스템이 이에 대한 물리적 반력을 사용자에게 전달하는 양방향 정보 교환 과정을 의미한다. 햅틱스라는 용어는 '촉각에 관한'이라는 의미의 그리스어(haptikos)에서 유래했으며, 촉각(touch)을 통한 감지(Sensing) 및 조작(Manipulation)으로 정의할 수 있다.²²⁾ 햅틱스는 공학, 심리학, 신경과학, 생물학, 디자인 등 다양한 학문이 융합된 다학제적 분야이다. 공학적 관점에서 햅틱 기술은 사용자 경험을 향상시키기 위해 인터페이스에 제어된 촉각 자극을 제공하는 것을 목표로 한다. 단순히 스마트폰의 진동 피드백과 같은 일상적인 적용을 넘어, 햅틱 기술은 원격 수술, 가상 현실(VR) 시뮬레이션, 증강 현실 인터페이스 등 높은 정밀성이 요구되는 분야에 활용되어 핵심적인 역할을 수행하고 있다.

22) Srinivasan, M. A. (1995). What is haptics. Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab, Massachusetts Institute of Technology, 1-11.

3. 햅틱 지각의 구성

PUI의 조작감을 공학적으로 분석할 때, 햅틱 지각(Haptic Perception)은 두 가지 하위 시스템인 촉각 피드백과 운동 감각 피드백의 조합으로 나누어 볼 수 있다.

가. 촉각 피드백 (Tactile Feedback)

촉각 피드백은 피부의 다양한 수용체를 통해 감지되는 감각을 의미한다. 주로 물체와의 접촉 여부나 표면의 상태를 파악하는 데 기여하며, 주로 표면의 거칠기, 미세한 질감, 진동, 압력, 온도 등과 관련되어 있다.

나. 운동 감각 피드백 (Kinesthetic Feedback)

운동 감각 피드백은 근육, 힘줄, 관절에 있는 수용체를 통해 감지되는 감각으로, 힘과 움직임과 직접적으로 관련되어 있다.²³⁾ PUI를 조작할 때 느껴지는 저항감, 무게감, 관성, 감쇠력, 그리고 조작 궤적 등은 운동 감각 피드백에 속한다.

본 연구가 주목하는 가전제품 도어나 고품질 노브의 조작감은 표면의 재질감보다는 문을 여닫거나 노브를 돌리는 전 과정에서 발생하는 힘과 토크의 동적인 프로파일, 즉 운동 감각 피드백에 의해 주로 결정된다. 따라서 PUI의 감성 품질을 공학적으로 정량화하기 위해서는 조작 시 발생하는 운동 감각 피드백을 정밀하게 측정하고 분석하는 것이 필수적이다.

23) Jafari, N., Adams, K. D., & Tavakoli, M. (2016). Haptics to improve task performance in people with disabilities: A review of previous studies and a guide to future research with children with disabilities. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 3, 2055668316668147.

제 3 절 PUI 조작감의 물리적 특성화

PUI의 햅틱 조작감, 특히 운동 감각 피드백을 공학적으로 이해하기 위해, 다수의 선행 연구는 PUI의 동적 특성, 즉 조작 시 발생하는 힘과 토크 프로파일을 측정하고 분석하는 데 집중해왔다.

1. 도어 메커니즘 분석

가전제품 및 자동차의 도어는 사용자가 제품의 품질을 직관적으로 인지하는 첫 번째 접점이자 대표적인 대형 PUI이다. 대형 PUI는 큰 작동 범위와 무거운 하중을 다루기 때문에 사용자는 전신을 통해 전달되는 운동 감각 피드백에 민감하게 반응한다.

가. 가전제품

가전제품 시장에서 사용자 경험(UX)은 구매 결정에 큰 영향을 미친다. 특히 도어의 조작감은 사용자의 다중감각적 경험(Multi-sensory Experience)에서 중요한 부분을 차지한다. 식기세척기 도어의 햅틱 피드백을 재설계(Re-engineering)하려는 연구²⁴⁾는 도어를 여닫을 때의 토크 프로파일을 실험적으로 측정하고, 도어 메커니즘과 힌지(Hinge)에서 발생하는 마찰(Friction)이 조작감에 중대한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 냉장고 도어의 경우, 개폐 시 요구되는 토크 측정이나 장기간 사용에 따른 도어 처짐(Door Sag) 현상 분석과 같은 기계적 성능 평가가 이루어져 왔다.²⁵⁾ 기계적 특성은 조작감뿐만 아니라 제품의 내구성 및 품질 인식과도 직결된다.

나. 자동차 산업

24) Ferrise, F., Graziosi, S., Furtado, G. P., Bordegoni, M., & Bongini, D. (2013). Re-engineering of the Haptic Feedback of a Dishwasher Door. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(6), 995-1006.

25) Kapadia, M. N., Sonawane, P. D., & Marhatta, A. (2019). Experimentation & analysis of door sag for refrigerator. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2).

자동차 산업은 지각 품질(Perceived Quality)이 브랜드의 프리미엄 가치를 결정짓는 핵심 분야이다.²⁶⁾ 특히 자동차 도어의 개폐 조작감(Operating Feel)은 차량 전체의 견고함과 고급스러움을 대변하는 상징적인 요소로 간주된다.

선행 연구들은 도어 개폐 과정에서 발생하는 동적 특성, 즉 힘 또는 토크 프로파일을 정밀하게 측정하고, 이 객관적인 물리 데이터를 사용자의 주관적인 햅틱 감성(Haptic Affection) 등급과 연관 짓는 데이터 기반 분석(Data-Driven Analysis)을 시도하였다²⁷⁾ 또한, 도어의 경량화²⁸⁾나 측면 충돌 시의 강도 및 변형 해석(Strength and Deformation Analysis)²⁹⁾과 같은 연구에서도 구조적 강성(Stiffness)과 NVH(Noise, Vibration, and Harshness) 성능이 조작 품질과 연관되어 다루어진다. 즉, 도어의 물리적 설계 변경은 필연적으로 햅틱 피드백의 변화를 수반하므로, 이에 대한 정량적 관리가 필수적이다.

2. 노브 및 버튼 분석

사용자가 일상적으로 조작하는 제어형 PUI인 노브와 버튼의 햅틱 피드백 역시 사용자 경험을 구성하는 중요한 요소이다. 이와 같은 소형 PUI는 도어 메커니즘과 달리 손가락 끝의 섬세한 감각을 통해 미세한 조작 정보를 전달해야 한다.

가. 노브(Knobs)

햅틱 노브는 회전 시 명확한 딸깍거림(Detents)이나 적절한 마찰 피드백

26) Styliadis, K., Wickman, C., & Söderberg, R. (2015). Defining perceived quality in the automotive industry: An engineering approach. *Procedia CIRP*, 36, 165-170.

27) Awan, M. I., Raza, A., Hassan, W., Kyung, K. U., & Jeon, S. (2025). Quantifying Haptic Affection of Car Door through Data-Driven Analysis of Force Profile. *IEEE Access*.

28) Chen, H., Lu, C., Liu, Z., Shen, C., & Sun, M. (2022). Multi-response optimisation of automotive door using grey relational analysis with entropy weights. *Materials*, 15(15), 5339.

29) Pradanawati, S. A., Harnany, D., Riyandwita, B. W., Ikhtiar, A. R., Sasongko, D. W., Khoiruddin, A. I., ... & Widodo, R. S. (2024). Strength and Deformation Analysis on Car Door Design for Energy Saving Contest. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 3(1), 45-56.

(Frictional Feedback)을 사용자에게 제공함으로써, 조작의 정확성을 높이고 만족스러운 사용자 경험을 창출한다.³⁰⁾ 햅틱 피드백이 단순한 느낌을 넘어 정보 전달의 매개체로 기능함을 보여준다. 이러한 햅틱 피드백을 전자적으로 생성하고 제어하는 방법에 관한 연구³¹⁾나, 시각 장애인을 위한 보조 인터페이스로서 햅틱 노브의 점자(Braille) 엠보싱 기능을 활용하는 연구³²⁾ 등이 진행되었다.

나. 버튼(Buttons)

버튼 표면의 햅틱 질감(Haptic Texture)이 사용자의 버튼 선택 정확도에 미치는 영향³³⁾이나, 터치스크린 상에서 햅틱 피드백으로 가상 버튼의 가장자리(Edges)를 효과적으로 구현하는 디자인에 대한 비교 연구³⁴⁾ 등이 수행되었다. 이와 같은 연구들은 물리적 버튼의 햅틱 속성이 가상 인터페이스 설계에도 중요한 기준점(Baseline)이 됨을 보여주고 있다.

3. 햅틱 역공학

앞서 살펴본 PUI의 물리적 특성화 시도들은 햅틱 역공학(Haptic Reverse Engineering)이라는 상위 개념으로 통합될 수 있다. 이는 사용자부터 수집된 정성적 시각 피드백을 정량적 사양으로 변환하는 것을 궁극적인 목표로 하는 방법론이다.

30) Engin, S. E., Aghakhani, A., Sezgin, T. M., & Basdogan, C. (2018). Haptable: An interactive tabletop providing online haptic feedback for touch gestures. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(9), 2749-2762.

31) Giraud, F., Amberg, M., & Lemaire-Semail, B. (2013). Design and control of a haptic knob. *Sensors and Actuators A: Physical*, 196, 78-85.

32) Mengoni, M., Cavalieri, L., & Raponi, D. (2015, July). A haptic knob as an innovative user interface for visually-impaired. In *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction* (pp. 127-138). Cham: Springer International Publishing.

33) Kobayashi, D., & Suzuki, Y. (2017). F5-4 Study on Haptic Texture of Buttons for User Interfaces. *The Japanese Journal of Ergonomics*, 53(Supplement2), S568-S571.

34) Pakkanen, T., Raisamo, R., Raisamo, J., Salminen, K., & Surakka, V. (2010, March). Comparison of three designs for haptic button edges on touchscreens. In *2010 IEEE Haptics Symposium* (pp. 219-225). IEEE.

선행 연구³⁵⁾는 기존에 조작감이 좋다고 평가받는 제품 인터페이스의 도어의 토크 프로파일을 측정 후 모델링하여 파라미터로 변환하고, 이를 다중감각 가상환경(Multi-sensory Virtual Environment) 내에서 재현(Reproduction)하는 접근법을 제안하고 있다. 이를 통해 사용자는 가상 프로토타입을 조작하며 원하는 거동을 식별하거나 실시간으로 수정할 수 있으며, 엔지니어는 이로부터 새로운 정량적 설계 사양을 도출할 수 있다. 또 다른 연구³⁶⁾는 햅틱 인터페이스를 사용하여 가상 공간에서 3D CAD 모델을 직접 만지고 밀기(Pushing), 당기기(Pulling) 등의 방식으로 변형함으로써, 역공학 및 재설계(Redesign) 프로세스에 직관성을 더하는 방법을 연구하였다.

이러한 선행 연구들은 PUI의 조작감을 공학적으로 다루기 위해 힘/토크 프로파일과 같은 물리적 데이터를 측정하는 것이 필수적임을 명확히 보여주고 있다. 하지만 선행 연구에서 지적하듯이, 수집된 정량적 물리 데이터와 사용자의 정성적 피드백을 연결하는 것은 주된 어려움(Main Difficulties)이며, 이 두 영역을 연결하는 정량적 예측 모델의 연구가 요구된다.

35) Graziosi, S., Ferrise, F., Phillips Furtado, G., & Bordegoni, M. (2014). Reverse engineering of interactive mechanical interfaces for product experience design: This paper proposes a method for guiding the redesign of product interfaces based on a reverse engineering approach. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(2), 65-79.

36) Yu, G., Cheng, S., & Zhang, X. (2007, December). Application of haptics in reverse engineering based on physical objects. In *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages (DMAMH 2007)* (pp. 147-151). IEEE.

제 4 절 물리적 측정과 사용자 감성 간의 정량적 모델링

1. 햅틱 지각의 심리물리학

PUI의 객관적인 물리적 특성과 사용자의 주관적인 감성 품질 사이의 간극을 메우기 위해, 연구자들은 두 영역을 정량적으로 연결하는 예측 모델을 개발하고자 노력하였다. 이러한 모델링의 과학적 기반은 심리물리학(Psychophysics)에 있다. 심리물리학은 물리적 자극(Physical Stimuli)의 변화와 인간의 감각적 지각(Human Perception) 사이의 정량적 관계를 연구하는 학문이다.

자동차 산업에서 중요하게 다루는 지각 품질(Perceived Quality)은 단순한 마케팅 용어가 아닌 심리물리학적 접근이 필수적인 복합적인 개념이다. 선행 연구³⁷⁾는 자동차 외판의 미학적 특징 라인(Feature Lines)의 제조 공차를 결정하기 위해, 인간 시각 시스템이 차이를 인지할 수 있는 최소한의 물리적 변화, 즉 차이 임계값(Difference Threshold)을 식별하려고 하였다. PUI의 조작감 역시 사용자의 햅틱 지각 임계값(Haptic Perception Threshold)과 밀접하게 연관되어 있다.

2. 힘과 토크의 지각적 통합

PUI의 운동 감각(Kinesthetic) 품질을 정량적으로 모델링할 때, 힘과 토크는 개별적인 요소가 아니라 상호작용하는 통합된 단서로 처리되어야 한다. 이는 인간의 햅틱 지각 메커니즘과 직접적으로 관련이 있다. 힘과 토크 단서가 햅틱 식별(Haptic Discrimination) 과정에서 어떻게 상호작용하는지를 조사한 심리물리학 연구³⁸⁾는, 피험자들이 힘과 토크를 각각 별도로 처리하기보다는

37) Chung, Y., & Bang, M. S. (2025). A Psychophysical Methodology for Determining Manufacturing Tolerance of Feature Lines on Automotive Outer Panels. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(10), 324.

38) Wu, B., Klatzky, R. L., & Hollis, R. L. (2011). Force, torque, and stiffness: Interactions in perceptual discrimination. *IEEE transactions on haptics*, 4(3), 221-228.

지각에서 통합(Integrated in Perception)한다는 것을 실험적으로 입증하였다. 이러한 발견은 PUI의 고급스러움이나 견고함과 같은 복합적인 햅틱 품질을 평가하고 모델링할 때, 힘 또는 토크 중 하나만 측정하는 방식(예: 1축 로드 셀)으로는 불충분함을 시사하고 있다. 다른 선행 연구³⁹⁾는 인간의 지각 메커니즘을 더 정확하게 반영하기 위해서는 힘과 토크를 동시에 그리고 다축(Multi-axis)으로 측정하여 두 요소 간의 복잡한 상호작용과 상관관계를 포착하는 것이 필수적임을 뒷받침하고 있다.

3. 감성 반응 예측 모델링

측정된 물리적 단서와 햅틱 지각에 대한 심리물리학적 이해를 바탕으로, 연구자들은 사용자의 감성 반응(Affective Response)을 직접 예측하는 정량적 모델을 구축하기 시작하였다. 컴퓨터가 사용자의 감성 상태(Affective State)를 이해하고 이에 적응하는 것을 목표로 하는 감성 컴퓨팅(Affective Computing)⁴⁰⁾ 분야와도 밀접하게 연결된다.

감성 디자인(Affective Design) 분야의 최근 연구들은 센서 데이터와 기계 학습(Machine Learning)을 결합하여 이러한 예측 모델을 구현하고 있다.⁴¹⁾ 선행 연구⁴²⁾는 인간의 촉각 메커니즘을 모방한 바이오미메틱 다중모드 촉각 센서(Biomimetic Multimodal Tactile Sensor)를 활용하여 마찰, 거칠기, 열, 순응성 등 15가지 고유한 물리적 파라미터를 측정하였다. 이 15개의 물리적 파라미터를 설명 변수로 사용하여, '촉촉한(moist)', '탄력 있는(elastic)'과 같은 19개의 감각적 서술자(Sensory Descriptor)와 12개의 '쾌적한(pleasant)', '좋아

39) Tu, T. K., Tsai, I. H., Yen, J. Y., Tsao, T. C., & Tsai, M. C. (2021). Improved haptic transparency of bilateral control using torque-measured magnetic coupling. *Machines*, 9(8), 172.

40) El-Khalili, N., Alnashashibi, M., Hadi, W., Banna, A. A., & Issa, G. (2019). Data engineering for affective understanding systems. *Data*, 4(2), 52.

41) Li, Z., Tian, Z. G., Wang, J. W., Wang, W. M., & Huang, G. Q. (2018). Dynamic mapping of design elements and affective responses: a machine learning based method for affective design. *Journal of Engineering Design*, 29(7), 358-380.

42) Ikejima, T., Mizukoshi, K., & Nonomura, Y. (2024). Predicting Sensory and Affective Tactile Perception from Physical Parameters Obtained by Using a Biomimetic Multimodal Tactile Sensor. *Sensors*, 25(1), 147.

하는(like)와 같은 감성적 서술자(Affective Descriptors)에 대한 사용자의 평점을 예측하는 회귀모델을 구축하였다. 또 다른 선행 연구⁴³⁾에서도 촉각적 거칠기(Perceived Roughness)가 감성 반응의 긍정적/부정적 가치와 관계가 있으며, 이러한 관계가 시각적 외관에 의해 조절된다는 복합적인 상호작용이 확인되었다.

이상을 종합하면, 이러한 선행 연구들은 PUI의 감성 품질을 정량화 가능성을 시사한다. 정량화를 위한 핵심 요건은 인간의 지각 메커니즘을 고려한 물리적 파라미터(예: 힘과 토크의 통합)의 정확히 측정하고, 인간의 지각을 모방한 고해상도 센서(예: 바이오미메틱 센서)의 활용하여, 물리적 특성과 감성 반응 간의 복잡하고 비선형적인 관계를 해석할 수 있는 고급 기계 학습 모델(예: 회귀모델 또는 딥러닝)의 적용하는 것으로 요약할 수 있다.

43) Kim, W. (2021). A study on the subjective feeling affecting tactile satisfaction of leather in automobile: A structural equation modeling approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 84, 103167.

제 5 절 기존 PUI 동적 특성 평가 방식의 한계

선행 연구들이 PUI의 물리적 특성과 사용자 감성 사이의 연결 고리를 규명하려 노력했음에도 불구하고, 물리적 데이터를 수집하고 평가하는 방식(Methodology)에는 연구의 신뢰성과 효율성을 저해하는 명확한 한계점들이 존재한다.

1. 수동 측정 및 주관적 평가의 한계

R&D 초기 단계나 경쟁사 제품 분석(Benchmark, B/M) 시, 숙련된 평가자가 직접 제품을 조작해보는 방식이나 수동 게이지를 이용하여 평가자가 측정하는 방식은 이 널리 사용되지만, 이 방식은 다음과 같은 과학적, 공학적 한계가 있다.

가. 주관성 및 재현성 부족

햅틱 평가는 본질적으로 주관적이며, 사람마다 햅틱 지각이 다를 수 있다.⁴⁴⁾ 또한, 동일한 제품에 대해 동일한 측정 장치를 사용하더라도 평가자의 컨디션, 개인적 선호도, 경험 수준 등에 따라 평가 결과가 달라질 수 있다. 특히, 수동으로 햅틱 인터페이스를 테스트할 때, 동일한 형상과 경도를 가진 샘플을 반복적으로 생성하고 매번 동일한 속도, 동일한 궤적 등 같은 방식으로 측정 대상을 조작하기는 매우 어려운 작업이다. 이러한 재현성의 부재는 측정 결과의 신뢰도를 저하시키는 주된 요인이다.

나. 수동 게이지 측정의 비효율성

힘 게이지(Force Gauge)나 동력계(Dynamometer)를 평가자가 손으로 들고 측정하는 방식은 자동화된 시스템에 비해 상당한 단점이 있다. 이 방식은

44) Silva, B., Costelha, H., Bento, L. C., Barata, M., & Assuncao, P. A. A. (2019, July). Subjective evaluation of haptic feedback technologies for interactive multimedia. In IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies (pp. 1-6). IEEE.

비용이 많이 들고, 측정을 수행하는 데 높은 시간 소모가 필요하다.⁴⁵⁾ 또한, 측정 과정 자체가 작업자의 숙련도에 의존하며, 미세한 힘 게이지는 센서 부착 및 보정(Calibration)이 매번 필요할 수 있어 측정 과정의 변동성이 결과의 정확도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

2. 전용 측정 장치의 한계

수동 측정의 한계를 극복하기 위해, 양산 단계의 품질 관리(QC)에서는 특정 제품의 특정 동작(예: 도어 개폐 반복)을 수행하는 자동화된 테스트 지그(Jig) 또는 고정 장치(Fixture)를 사용하고 있다. 이 방식은 객관성과 재현성을 확보할 수 있지만, 다양한 제품에 적용할 수 있는 범용성이 부족하고, 상당한 비용을 수반하는 단점이 있다.

가. 낮은 유연성 (Low Flexibility)

전용 장치(Special Fixtures)는 특정 제품 모델의 대량 생산 라인에 최적화되어 설계된다. 따라서, 제품의 종류가 매우 많고, 측정하고자 하는 다양한 형상에 대응하기에 유연성이 낮고, 다른 제품 모델이나 새로운 디자인의 프로토타입에는 적용하기 어려워 재사용성이 낮다.

나. 높은 비용 및 시간 (High Cost and Time)

전용 지그와 고정 장치는 설계 및 제작에 막대한 비용이 소요되는 중요한 비용 요인이며, 자동차 차체 공장의 경우 전체 제조 시스템 투자의 10~29%를 차지할 수 있다.⁴⁶⁾ 이는 신제품 개발(R&D) 단계나 다품종 소량 생산 환경에서 신속한 테스트를 어렵게 한다.

45) Bohannon, R. W. (2005). Manual muscle testing: does it meet the standards of an adequate screening test?. *Clinical rehabilitation*, 19(6), 662-667.

46) Bi, Z. M., & Zhang, W. J. (2001). Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*, 39(13), 2867-2894.

3. 새로운 PUI 동적 특성 계측 방법론 필요성

PUI 동적 특성 평가는 유연성과 신뢰성이라는 근본적인 문제에 직면해 있음을 알 수 있다. 수동 측정 방식은 유연성은 높지만, 신뢰성(객관성 및 재현성)이 낮다. 한편, 전용 측정 장치는 동일한 작업을 오차 없이 반복할 수 있어 신뢰성은 높지만, 유연성이 낮다. 따라서, 다양한 PUI를 신속하게 테스트할 수 있는 높은 유연성과 객관적이고 재현이 가능한 데이터를 확보하기 위한 높은 신뢰성을 동시에 갖춘 새로운 PUI 동적 특성 계측 방법론이 필요하며, 이 점이 바로 본 연구가 해결하고자 하는 핵심 과제이다.

[표 2-2] PUI 동적 특성 계측 방법론 비교 및 제안

평가 기준	수동 측정	전용 측정 장치	연구 제안
반복성 (Repeatability)	매우 낮음 (속도/각도 제어 불가)	매우 높음 (정밀 제어 가능)	매우 높음 (로봇 기반 정밀 제어)
재현성 (Reproducibility)	매우 낮음 (작업자 숙련도 의존)	매우 높음 (단일 기기 내)	매우 높음 (표준화된 프로토콜)
측정 가능 프로파일	1D 정적 (최대 힘, 단편적)	1D 정적 (단순 반복 위주)	6D 동적 (힘/토크 프로파일)
유연성 (다품종 대응)	매우 높음 (모든 형상 대응)	매우 낮음 (단일 목적/ 전용 지그)	매우 높음 (알고리즘 대응)
초기 비용	매우 낮음	매우 높음 (지그 제작 비용)	중간 (범용 로봇 장비)
계측학적 결론	신뢰성 부족 (GR&R 실패)	확장성 없음 (다품종 부적합)	대안 (유연성/신뢰성 확보)

제 6 절 로봇틱스와 인공지능 기반 햅틱 분석

1. 협동로봇 기반 계측의 유연성

고정형 지그(Fixed Jig)의 유연성 부재 한계를 극복하기 위한 대안으로, 작업자와 동일한 공간에서 안전하게 작업할 수 있는 협동로봇이 품질 관리(Quality Control, QC) 공정에 도입되고 있다.⁴⁷⁾ 협동로봇은 제품 테스트 및 검사, 비파괴 제품 테스트, 그리고 머신 비전과 결합된 자동화된 검사 등과 같이 작업자가 수행하던 반복적이고 정밀한 작업을 대신 수행하는 데 사용되고 있다.

단일 목적의 고정형 지그와 달리 협동로봇의 장점은 간단한 프로그래밍을 통해 다양한 작업 경로와 동작을 수행할 수 있다는 유연성(Flexibility)에 있다. 이 유연성은 다양한 제품군이나 프로토타입의 PUI 햅틱 프로파일링 및 햅틱 인터페이스의 동적 특성을 신속하고 반복적으로 특성화하는 데 이상적인 도구가 될 수 있다.

2. 6축 힘/토크 센서의 통합

PUI의 운동 감각(Kinesthetic) 피드백을 객관적으로 측정하여 신뢰성을 확보하기 위해, 로봇 시스템에는 정밀 센서가 통합된다. 특히, 앞서 언급된 '힘과 토크의 지각적 통합'이라는 인간의 심리물리학적 특성을 공학적으로 모사하기 위해 6축 힘/토크 센서의 사용이 필수적이다.

6축 힘/토크 센서는 로봇의 엔드 이펙터(End-effector)에 장착되어, 3축의 선형 힘과 3축의 회전 토크를 실시간으로 동시에 측정할 수 있다. 이를 통해 로봇이 PUI와 접촉하고 조작하는 전 과정에서 발생하는 다차원적으로 상호작용하는 힘과 토크를 풍부하게 포착할 수 있다.⁴⁸⁾ 6축 힘/토크 센서를 사용하

47) Puttero, S., Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2025). Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-37.

는 방법이 PUI를 조작할 때 근육과 관절에서 느끼는 복합적인 물리적 상호작용을 가장 근접하게 데이터로 포착하는 방식이다.

3. 물리-감성 모델링을 위한 인공지능 방법론

협동로봇과 6축 F/T 센서를 통해 수집된 고차원의 동적 시계열 데이터, 즉 힘/토크 프로파일의 단순한 통계적 수치(예: 최대값, 평균값, 기울기)만으로는 '고급스러움'이나 '부드러움'과 같은 복잡한 감성 품질을 설명하기 어렵다. 물리적 파라미터와 인간의 감성 지각 사이에는 복잡한 비선형적(Non-linear) 관계가 존재하기 때문이다.⁴⁹⁾

이 복잡한 비선형 관계를 모델링하고, 시계열 데이터에 내재된 미묘한 패턴을 학습하기 위해 인공지능 기술이 해결책으로 부상하고 있다. 머신러닝/딥러닝은 생체역학 분야의 관절 힘 예측⁵⁰⁾, 자동차 ECU의 엔진 토크 회귀 분석⁵¹⁾, 수술 로봇의 접촉 힘 추정⁵²⁾ 등 다양한 공학 분야에서 힘/토크 프로파일 데이터를 분석하고 예측하는 데 성공적으로 사용되고 있다. 또한, 머신러닝/딥러닝 기술은 다양한 센서 데이터(IoT, 웨어러블 등)로부터 사용자의 행동 패턴, 심리 상태, 선호도 또는 감성 상태를 예측하는 데 강력한 성능을 나타낸다.

48) Tran, T. H., Phan, T. P., Chao, P. C. P., Wang, Y. J., & Wang, C. C. (2017, August). A Six-DOF Force/Torque Sensor for Collaborative Robot and its Calibration Method. In *Information Storage and Processing Systems* (Vol. 58103, p. V001T07A010). American Society of Mechanical Engineers.

49) Ikejima, T., Mizukoshi, K., & Nonomura, Y. (2024). Predicting Sensory and Affective Tactile Perception from Physical Parameters Obtained by Using a Biomimetic Multimodal Tactile Sensor. *Sensors*, 25(1), 147.

50) Ahmadi, R., Rasoulilian, S., Veisari, S. F., Parsaei, A., Heidary, H., Herzog, W., & Komeili, A. (2024). A machine learning approach for predicting pedaling force profile in cycling. *Sensors*, 24(19), 6440.

51) Canal, R., Bonomo, J. P. A., de Carvalho, R. S., & Gracioli, G. (2024). Torque regression using machine learning techniques in automotive ECUs. *Design Automation for Embedded Systems*, 28(3), 219-243.

52) Yang, H., Acar, A., Xu, K., Deguet, A., Kazanzides, P., & Wu, J. Y. (2025). An effectiveness study across baseline and learning-based force estimation methods on the da vinci research kit si system. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*.

PUI의 힘/토크 프로파일과 같은 햅틱 시계열 데이터를 처리하는 데 가장 유망한 딥러닝 아키텍처는 CNN(Convolutional Neural Networks) 모델과 LSTM(Long Short-Term Memory) 모델의 하이브리드 방식이다. CNN은 힘 프로파일의 급격한 변환('딸깍'하는 클릭 지점)과 같이 데이터의 국소적(local) 패턴이나 공간적 특징을 포착하는 성능이 우수하다. LSTM은 전체 조작 과정의 '일관성' 또는 '부드러움'과 같이 데이터의 시간적 종속성이나 장기적 순서 모델링에 특화되어 있다. 이 두 아키텍처를 결합하면(예: CNN-LSTM 또는 ConvLSTM), 햅틱 데이터에 내재된 복잡한 시공간적(Spatio-temporal) 특징을 동시에 학습하여 사용자의 지각과 더 밀접하게 연관된 특징을 추출할 수 있다.

4. 인공지능 기반 햅틱-감성 예측 모델

최근 인공지능 기반 햅틱-감성 예측 모델에 관한 핵심 선행 연구들은 로봇/센서 시스템과 CNN-LSTM 계열의 AI 모델을 결합하여, PUI의 물리적 측정값으로부터 사용자의 감성 등급을 직접 예측하는 데 성공적인 결과를 보고하고 있다.

가. 선행 연구 사례 1: 운동 감각 - 자동차 도어 감성⁵³⁾

연구 사례 1은 6개 차종의 자동차 도어 개폐 힘/토크 프로파일을 측정하고, 이 시계열 데이터를 CNN-LSTM 아키텍처를 사용하여 학습시켰다. 그 결과, '부드러운-거친 (Smooth-Rough)', '싼티나는-고급스러운 (Cheap-Classy)', '무거운-가벼운(Heavy-Light)' 등 10가지 햅틱 감성 형용사 쌍에 대한 사용자의 주관적 평가 등급을 높은 예측 정확도로 예측하는 데 성공하였다. 이는 운동 감각 프로파일로부터 고급스러움과 같은 고차원의 감성 품질을 직접 예측할 수 있음을 실증하였다.

53) Awan, M. I., Raza, A., Hassan, W., Kyung, K. U., & Jeon, S. (2025). Quantifying Haptic Affection of Car Door through Data-Driven Analysis of Force Profile. IEEE Access.

나. 선행 연구 사례 2: 촉각 - 질감 지각 속성⁵⁴⁾

연구 사례 2는 50개의 다양한 질감 샘플에 대해 시각 및 촉각 데이터(가속도 신호, 힘 등)를 수집한 후, 시각 데이터 분석에는 CNN 기반 오토인코더를 적용하고, 촉각 데이터 분석에는 ConvLSTM 네트워크 적용하는 다중모드(Multi-Modal) 딥러닝 프레임워크를 사용하여, '거친-부드러운', '평평한-울퉁불퉁한', '단단한-부드러운' 등 4차원의 지각 속성 등급(Perceptual Attribute Ratings)을 성공적으로 예측하였다. 이는 시각 및 촉각 데이터 융합의 유효성과 ConvLSTM 아키텍처의 적합성을 입증하였다.

다. 선행 연구 사례 3: 바이오미메틱 센서 - 감성 반응⁵⁵⁾

연구 사례 3은 비록 딥러닝은 아니지만, 바이오미메틱 센서 데이터(15개 물리 파라미터)와 Bagging Regressor(앙상블 ML) 모델을 사용하여 '쾌적함(pleasant)'과 '선호도(like)'와 같은 감성적 서술자(affective descriptors)를 성공적으로 예측하였다. 이는 고도로 정제된 물리적 파라미터와 기계 학습을 통해 순수한 감성 반응을 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

이 세 가지 핵심 선행 연구는 각각 운동 감각(Kinesthetic), 촉각(Tactile), 바이오미메틱(Biomimetic)이라는 서로 다른 유형의 햅틱 데이터를 다루고 있다. 그러나, '물리적 센서 데이터 → AI/ML 모델 → 사용자 감성/지각 등급'로 연결되는 구조를 갖는 공통점이 있다.

54) Awan, M. I., & Jeon, S. (2025). Estimating Perceptual Attributes of Haptic Textures Using Visuo-Tactile Data. IEEE Access.

55) Ikejima, T., Mizukoshi, K., & Nonomura, Y. (2024). Predicting Sensory and Affective Tactile Perception from Physical Parameters Obtained by Using a Biomimetic Multimodal Tactile Sensor. Sensors, 25(1), 147.

[표 2-3] 인공지능 기반 햅틱-감성 예측 모델 선행 연구 비교

구분	선행 연구 1	선행 연구 2	선행 연구 3
입력 데이터	<ul style="list-style-type: none"> · 힘 프로파일 (Force Profile) 	<ul style="list-style-type: none"> · 시각(Image) · 촉각(Acceleration, Force) 	<ul style="list-style-type: none"> · 15개 물리 파라미터 (Friction, Roughness 등)
평가 대상	<ul style="list-style-type: none"> · 자동차 도어 (Car Doors) 	<ul style="list-style-type: none"> · 50개 질감 샘플 	<ul style="list-style-type: none"> · 32개 재료 샘플
AI/ML 모델	<ul style="list-style-type: none"> · CNN-LSTM 	<ul style="list-style-type: none"> · CNN Autoencoder · ConvLSTM 	<ul style="list-style-type: none"> · Bagging Regressor (Ensemble ML)
예측 대상	<ul style="list-style-type: none"> · 10가지 햅틱 감성 형용사 등급 (예: 'Classy', 'Smooth') 	<ul style="list-style-type: none"> · 4가지 햅틱 지각 속성 등급 (예: 'Rough-Smooth') 	<ul style="list-style-type: none"> · 12가지 감성 서술자 등급 (예: 'Pleasant', 'Like')
핵심 기여	<ul style="list-style-type: none"> · 힘 프로파일 시계열 데이터로 고급 스러움과 같은 고차원적 감성 품질 예측 가능성 실증 	<ul style="list-style-type: none"> · 다중모드(시각+촉각) 데이터 융합 및 ConvLSTM을 통한 촉각(Tactile) 지각 속성 예측 	<ul style="list-style-type: none"> · 바이오미메틱 센서와 ML을 결합하여 '쾌적함', '선호도'와 같은 감성 반응 예측

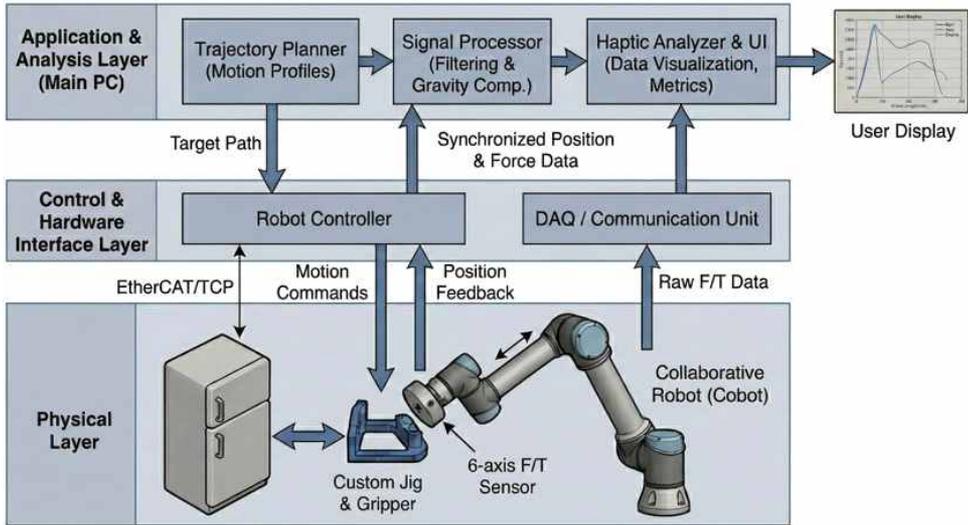
제 3 장 협동로봇 기반 측정 시스템

제 1 절 협동로봇 기반 측정 시스템 아키텍처

1. 시스템 아키텍처 개요

본 장은 물리적 사용자 인터페이스(PUI) 동적 특성 프로파일 측정의 근본적인 과제인 정밀도(Precision)와 유연성(Flexibility)을 확보할 수 있는 시스템의 아키텍처 설계를 목표로 한다. 기존의 수동 측정 방식은 측정 결과가 작업자의 숙련도와 주관성에 의존하며, 측정자의 오류(Human Error)에 본질적으로 취약하다. 이로 인해 게이지 반복성 및 재현성(Gage Repeatability & Reproducibility, GR&R) 관점에서 측정 데이터의 신뢰성을 확보하기 어렵다. 반면, 이러한 신뢰성 문제를 해결하기 위해 도입된 고정 자동화 또는 단일 목적 테스트 장비는 높은 반복성은 보장하지만, 유연성(Flexibility)이 낮아 제품 설계가 변경될 때마다 수정 또는 폐기 비용이 발생하는 경직성을 지닌다.

따라서 본 연구는 협동로봇과 힘/토크 센서를 이용한 계측 시스템 아키텍처를 제안한다. 본 아키텍처의 핵심 목표는 로봇의 정밀 제어를 통해 작업자 변동성을 원천적으로 제거하여 계측 신뢰성(GR&R)을 확보하고, 소프트웨어 프로그래밍을 통해 다양한 PUI 형상과 조작 방식에 대응하는 유연성을 달성하는 것이다. 협동로봇 계측 시스템 아키텍처는 [그림 3-1]과 같이 물리적 레이어(Physical Layer), 제어 및 인터페이스 레이어(Control & Interface Layer), 애플리케이션 및 분석 레이어(Application & Analysis Layer)로 구성된다. 물리적 레이어는 크게 협동로봇, 힘/토크 센서, 엔드이펙터로 구성된다. 제어 및 인터페이스 레이어는 협동로봇의 모션을 제어하는 로봇 제어기와 6축 힘/토크 센서로부터 측정된 데이터를 실시간으로 수집하기 위한 데이터 수집 및 통신 유닛으로 구성된다. 애플리케이션 및 분석 레이어는 메인 PC에서 이루어지며, 측정하고자 하는 PUI의 기구학적 구속 조건을 고려한 궤적 생성, 신호처리, 분석 및 가시화를 위한 부분으로 구성된다.



[그림 3-1] 협동로봇 계측 시스템 아키텍처

2. 세부 레이어별 구성 및 역할

가. 물리적 레이어(Physical Layer)

물리적 레이어는 협동로봇과 가전제품이 물리적으로 상호작용(Physical Interaction)을 수행하는 하드웨어 요소들로 구성된다. 협동로봇은 6자유도 협동로봇 팔이 사람이 가전제품을 구동하는 궤적을 모사하는 시스템의 액추에이터 역할을 담당한다. 6축 F/T 센서는 협동로봇 말단의 툴 플랜지(Tool Flange)에 부착되어 가전제품 조작 시 물리적 상호작용에서 발생하는 힘과 토크를 동시에 측정하는 핵심 센서이다. 엔드이펙터(End-effector)는 다양한 형상의 PUI와 직접 접촉하는 말단장치로, 대상에 따라 능동형 전동 그리퍼, 맞춤형 수동 그리퍼 등이 사용된다.

나. 제어 및 인터페이스 레이어 (Control & Interface Layer)

제어 및 인터페이스 레이어는 물리적 레이어와 애플리케이션 레이어를 연결하는 미들웨어로서, 협동로봇 제어의 실시간성(Real-time)을 확보하는 역할을 수행한다. 로봇 제어기는 상위 레이어의 모션 명령을 해석하여 로봇의 각

관절을 제어하고, 협동로봇의 안전 기능을 감시한다. 데이터 수집 유닛(DAQ Unit)은 6축 F/T 센서 데이터를 수집하여 노이즈 필터링 및 증폭을 수행한다. 통신 유닛(Communication Unit)은 F/T 센서 데이터를 디지털 신호로 변환하여 전송한다. 통신 인터페이스는 EtherCAT을 사용하여 실시간 모션 명령을 동기화(Synchronization)하고, TCP 프로토콜을 통해 F/T 데이터나 상태 정보를 안정적으로 상위 레이어로 전송한다.

다. 애플리케이션 및 분석 레이어 (Application & Analysis Layer)

최상위 레이어인 애플리케이션 및 분석 레이어는 메인 PC에서 구동되며, 사용자와 시스템 간의 인터페이스(GUI) 및 데이터 처리를 담당한다. 궤적 생성기(Trajectory Planner)는 PUI가 이동하는 궤적의 기구학적 특성(회전축, 회전 반경 등)을 고려하여 로봇의 이동 경로를 계획한다. 신호 처리기(Signal Processor)는 수신된 센서 데이터의 노이즈를 제거하고, 중력 보상을 하는 역할을 한다. 햅틱 분석기(Haptic Analyzer & UI)는 정제된 힘/토크 프로파일을 시각화하고, 특징 추출(Feature Extraction) 등의 로직을 수행한다.

제 2 절 측정 시스템 하드웨어 구성

1. 6축 다관절 협동로봇

협동로봇(Collaborative Robot, Cobot)은 인간의 팔 동작과 유사한 6자유도(6-DOF) 움직임이 가능하며, 물리적인 안전 펜스(Safety Cage) 없이 작업자와 동일한 작업 공간 내에서 물리적으로 상호작용하거나 협업하도록 설계된 로봇을 지칭한다. 협동로봇의 안전 요구사항은 산업용 로봇의 일반 안전 표준인 ISO 10218⁵⁶⁾과 인간-로봇 협업(Human-Robot Collaboration)의 안전 요구사항을 구체적으로 명시한 기술 사양인 ISO/TS 15066⁵⁷⁾에 의해 정의된다. ISO/TS 15066은 4가지 주요 협업 작동 방식인 안전 정지, 직접 교시, 속도 및 거리 감시를 정의한다. 본 시스템 아키텍처의 핵심인 6축 다관절 협동로봇은 계측의 GR&R 문제와 유연성 문제를 다음과 같이 해결한다.

가. 반복성

반복성(Repeatability)과 정확도(Accuracy)는 로봇 공학 분야에서 명확히 다른 개념으로 정의한다.⁵⁸⁾ 정확도는 로봇에게 절대 좌표로 지정하여 이동하라고 명령했을 때, 실제 도달하는 지점과 지정된 절대 좌표 간의 오차를 의미한다. 반면, 반복성은 동일한 지점으로 반복 이동 명령을 내렸을 때 도달 지점들의 산포(Dispersion) 정도를 의미한다. 즉, 반복성(Repeatability)은 로봇이 프로그래밍이 된 동일한 지점 또는 경로를 반복적으로 되돌아올 수 있는 능력을 의미한다.

본 시스템은 수동 측정의 가장 큰 문제였던 재현성(Reproducibility, AV) 오류를 협동로봇의 높은 반복성(Repeatability)으로 대체한다. PUI 동적 특성

56) International Organization for Standardization. (2011). Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots (ISO Standard No. 10218-1:2011).

57) International Organization for Standardization. (2016). Robots and robotic devices — Collaborative robots (ISO/TS Standard No. 15066:2016).

58) International Organization for Standardization. (1998). Manipulating industrial robots— Performance criteria and related test methods (ISO 9283:1998).

계측(Metrology)의 본질은 PUI의 절대 좌표를 측정하는 것이 아니라, PUI 조작 프로파일이 제품 간 또는 제품 내 부품 간 어떻게 다른지를 비교하는 것이다. 이러한 비교 계측학(Comparative Metrology) 영역에서 절대 정확도는 부차적인 문제이며, 가장 중요하게 요구되는 것은 높은 반복성이다. 협동로봇의 높은 반복성⁵⁹⁾은 우리가 측정한 측정 데이터의 변동 원인이 로봇에 의한 것이 아닌 측정 대상 부품의 변동임을 보장한다.

나. 유연성

본 시스템에서 제안된 6축 다관절 협동로봇은 단순한 1축(수직) 또는 3축(XYZ) 자동화 지그(Jig)와는 근본적인 차별점을 가진다. 냉장고 문과 같이 가전제품의 대형 PUI는 단순한 구조로 1차원적으로만 동작하는 것으로 보일 수 있지만, 다양한 구조와 메커니즘이 적용될 수 있다. 그리고 가전제품 또는 자동차의 소형 PUI는 단순한 수직 누름 버튼만 존재하지 않는다. 회전 노브, 조이스틱형 다이얼, 토글 스위치, 비틀림 방식의 전원 스위치 등은 3차원 공간에서 복잡한 궤적(Trajectory)과 방향(Orientation)을 요구한다. 6축 협동로봇은 이러한 모든 PUI의 복잡한 조작(예: 45도 각도로 기울여 누르기, 비틀면서 당기기)을 인간과 유사하게 모사(Mimic)하고 측정할 수 있는 공학적 솔루션이다. 1축 또는 3축 고정 자동화 장비로는 이러한 복잡한 PUI의 동적 프로파일을 측정하는 것이 불가능하다. 따라서, 6축 협동로봇은 고정 자동화 장비로 측정할 수 없었던 복잡한 PUI 영역까지 측정을 가능하게 하며, 아울러 고가의 측정 대상물(시제품)이나 R&D 환경의 연구원을 보호하는 안전성도 제공한다.

다. 선정 기준

가전제품의 다양한 PUI의 움직임(회전, 직선, 복합 곡선 등)에 따라 유연하게 추종하고, 작업자와의 협업 안전성을 보장하기 위해 다음과 같은 기준으로 협동로봇을 선정한다.

59) Taesi, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT applications—recent advances and challenges. *Robotics*, 12(3), 79.

1) 자유도(DOF)

3차원 공간상의 임의의 위치와 방향(Position & Orientation)에 도달하기 위해 6축 다관절 구조를 채택한다. 단순한 직선 왕복 장치와 달리, 협동로봇이 다양한 각도로 팔을 움직이며 PUI를 조작하는 복잡한 인체 동작을 모사하는 데 필수적이다.

2) 가반하중(Payload)

대형 냉장고(Side-by-side)나 김치냉장고 서랍의 경우, 개방 시 약 100N 이상의 힘이 필요할 수 있다. 따라서 로봇의 가반하중은 최소 10kg 이상으로 하고, 실험 대상의 측정 시나리오를 구현하기 위해 충분한 가반하중을 갖는 모델을 사용해야 한다.

3) 작업 반경 (Reach)

냉장고 상단의 문부터 하단의 냉동실 서랍, 식기세척기 도어까지 다양한 높이의 PUI에 접근해야 한다. 따라서 가반하중뿐만 아니라 최소 1,300mm 이상의 작업 반경(Reach)을 확보하여, 로봇 베이스(Base)의 잦은 위치 이동 없이도 단일 설치 위치에서 대상 가전제품의 모든 조작부에 접근할 수 있어야 한다.

4) 반복 정밀도 (Repeatability)

PUI 측정은 미세한 감성 품질 차이를 정량화해야 하므로 데이터의 일관성이 무엇보다 중요하다. 따라서 동일한 궤적을 수백 회 반복 수행하더라도 오차가 $\pm 0.1\text{m}$ 이내인 모델을 선정하여 로봇의 위치 오차로 인한 데이터의 노이즈(Noise) 발생을 최소화해야 한다.

5) 통신 및 제어 개방성 (Connectivity & Interface)

외부의 정밀 힘/토크 센서 및 데이터 수집 장치(DAQ)와의 실시간 동기화가 필수적이다. 따라서 TCP/IP, Modbus, EtherCAT 등의 산업용 통신 프로토콜을 지원하고, Python이나 C++ 기반의 API/SDK를 제공하여 로봇의 모션

과 센서 데이터를 1ms~10ms 단위의 고속 주기로 통합 제어할 수 있는 모델 이어야 한다.

6) 안전 규격

별도의 안전 펜스 없이 실험실이나 생산라인에서 사용할 수 있도록 ISO 10218-1 및 ISO/TS 15066(협동로봇 안전 기술 사양)을 준수하는 모델을 선정한다.

[표 3-1] 협동로봇 선정 기준

선정 항목	기준 요건	선정 사유
자유도	6축 이상	· 3차원 공간상의 임의 위치 및 방향(Pose) 도달 및 복잡한 인체 동작 모사
기반 하중	10kg 이상	· 대형 냉장고 도어 개방력(약 100N) 대응 및 토크 포화(Saturation) 방지
작업 반경	1,300mm 이상	· 단일 설치 위치에서 냉장고 상단 도어부터 하단 서랍까지 접근 범위 확보
반복 정밀도	0.1mm 이내	· 데이터 일관성 확보 및 로봇 위치 오차로 인한 노이즈 최소화
인터페이스	실시간	· 모션 제어를 실시간 동기화를 위한 고속 통신(EtherCAT, TCP/IP) 지원
안전 규격	ISO 10218-1	· 별도의 펜스 없이 연구실이나 생산 라인에 즉시 적용을 위한 안전 인증 필수

2. 6축 힘/토크 센서

가. 6축 힘/토크 센서 개념

로봇의 손목(Wrist)과 엔드이펙터 사이에 장착되는 6축 힘/토크 센서는 시스템의 핵심이다. 6축 힘/토크 센서는 단일 장치에서 3개의 직교하는 힘 벡

터(F_x, F_y, F_z)와 3개의 직교하는 토크 벡터(T_x, T_y, T_z)를 실시간으로 동시에 측정하는 고정밀 변환기(Transducer)이다. 대부분의 힘/토크 센서는 내부에 정밀하게 가공된 탄성 구조물(Elastic Structure)⁶⁰⁾을 포함한다. 외부에서 힘이나 토크가 가해지면 이 구조물이 예측 가능한 방식으로 미세하게 변형(Strain)하게 되며, 이 변형을 감지하는 방식에 따라 압전저항(Piezoresistive), 정전용량(Capacitive), 광학(Optical) 방식 등으로 나누어진다. 압전저항 방식은 스트레인 게이지(Strain Gauge)의 저항 변화로 감지하는 방식으로, 이 방식은 견고하고 산업 현장에서 널리 사용된다.⁶¹⁾ 센서 내부에 부착된 여러 개의 스트레인 게이지에서 나온 원시 신호(Raw Signals)는 상호 간섭(Cross-Talk)을 포함한다. 이 신호는 디커플링 매트릭스(Decoupling Matrix) 또는 교정 매트릭스(Calibration Matrix)라는 선형 회귀 모델을 통과하여 상호 간섭이 제거된 6축의 순수한 힘/토크 값으로 변환되어 출력된다.⁶²⁾

나. 6축 센서의 필요성

버튼과 같은 단순한 PUI조차 조작감은 수직 방향의 힘만으로 결정되지 않는다. 누르는 과정에서 발생하는 미세한 마찰이나 흔들림 등 복합적인 요인이 조작감에 영향을 미치기 때문이다. 나아가 3차원 공간상에서 회전하는 냉장고 문과 같은 PUI의 동적 특성은, 단순한 1차원적 힘 측정만으로는 온전히 설명할 수 없다. 기존의 1축 로드셀(Load Cell)을 사용한 고정 자동화 장비는 운동 방향과 수직인 값만을 측정하므로, 조작감의 핵심 요소인 마찰력과 비틀림 모멘트를 측정하지 못한다. 따라서 6축 힘/토크 센서는 PUI가 가진 복합적이고 완전한 동적 프로파일을 포착하기 위한 필수 요건이다.

60) Beyeler, F., Muntwyler, S., & Nelson, B. J. (2009, May). Design and calibration of a microfabricated 6-axis force-torque sensor for microrobotic applications. In 2009 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 520-525). IEEE.

61) Andrade Chavez, F. J., Traversaro, S., & Pucci, D. (2019). Six-axis force torque sensor model-based in situ calibration method and its impact in floating-based robot dynamic performance. *Sensors*, 19(24), 5521.

62) Leslie, O., Bulens, D. C., & Redmond, S. J. (2023). Design, Fabrication, and Characterization of a Novel Optical 6-Axis Distributed Force and Displacement Tactile Sensor for Dexterous Robotic Manipulation.

[표 3-2] F/T 센서 선정 기준

선정 항목	기준 요건	선정 사유
측정 방식	스트레인 게이지 (Strain Gauge)	· 낮은 노이즈 레벨과 검증된 산업적 신뢰성 확보, 미세 조작감 변화 포착에 유리
측정 범위	Force: $\pm 200\text{N}$ 이상 Torque: $\pm 10\text{Nm}$ 이상	· 대형 가전(냉장고 등)의 최대 조작력을 포화(Saturation) 없이 측정할 수 있는 용량 선정
분해능	Force: 0.1N 이하 Torque: 0.005Nm 이하	· 기구적 마찰이나 유격에 의한 미세한 힘/토크 변화를 감지하기 위한 고정밀 사양
반복 정밀도	비선형성/히스테리시스 1.0% F.S. 이하	· 동일 동작 반복 측정 시 센서 자체의 오차를 최소화하여 GR&R 확보
통신 속도	1kHz 이상	· 조작 시작/종료 시점의 급격한 과도 응답(Transient Response)을 놓치지 않기 위한 고속 샘플링
허용 과부하	200% F.S. 이상	· 실험 중 의도치 않은 충돌이나 급정지 시 센서 파손을 방지하기 위한 내구성 확보
물리적 제한	자중: 0.5kg 이하 두께: 40mm 이하	· 로봇의 가반하중(Payload) 손실을 줄이고, TCP 오프셋에 의한 모멘트 오차 최소화

다. 선정 기준

1) 측정 방식

미세한 조작감 변화를 포착해야 하므로 노이즈 레벨이 낮고 정밀도가 검증된 스트레인 게이지 방식의 고정밀 센서를 선정한다.

2) 측정 범위 및 분해능

측정 범위는 가전제품 조작력 범위를 커버하는 힘 200N, 토크 10Nm 수준으로 선정한다. 또한, 미세한 마찰 변화를 감지하기 위해 분해능 (Resolution)은 힘 0.1N, 토크 0.005Nm 이하가 요구된다.

3) 데이터 인터페이스

급격한 힘의 변화(Transient Response)를 놓치지 않으려면 고속 통신이 필수적이다. EtherCAT 또는 TCP/IP 통신을 지원하여 최소 1kHz 이상의 샘플링 레이트를 보장하는 모델을 선정한다.

4) 허용 과부하(Overload Capacity)

실험 중에 발생할 수 있는 충격으로부터 센서를 보호하기 위해 정격 용량의 200% 이상의 과부하를 견딜 수 있는 내구성을 갖춰야 한다.

5) 물리적 제원

로봇의 가반하중 손실을 줄이고 기구적 모멘트 오차를 최소화하기 위해 자중 0.5kg 이하, 두께 40mm 이내의 박형 구조를 선정한다.

3. 말단장치 설계 및 TCP 교정

가. 맞춤형 말단장치(End-Effector)

로봇의 힘/토크 센서에 최종적으로 부착되어 실제 PUI와 물리적으로 접촉하는 부품을 말단장치(End-Effector)라고 부른다. 일반적인 이송용 로봇 그리퍼와 달리, 다양한 크기의 가전제품 핸들에 대응하기 위해 길이 조절이 가능(Adjustable)하고, PUI를 걸어서 당기거나, 감싸 질 수 있는 형태의 수동 조절형 패시브 그리퍼를 설계하여 사용한다. 이는 측정 목적에 맞게 정밀하게 설계된 계측 도구로서의 역할을 수행한다.

나. 설계 요구사항

1) 형상 및 메커니즘 (Shape & Mechanism)

말단장치는 냉장고의 매립형 손잡이와 바(Bar) 형태의 손잡이 등 다양한 형태의 PUI에 모두 대응할 수 있어야 한다. 걸이형(Hook)은 매립형 손잡이에 걸어서 당기는 인장(Pull) 동작을 구현하기 위해 'L'자 또는 'U'자 형상을 갖는다. 그리퍼형(Gripper)은 바 형태의 손잡이를 감싸 쥐는 동작을 구현하며,

사람의 손아귀 힘을 모사하거나 미끄러짐 없이 고정될 수 있는 구조여야 한다. 한편, 다양한 제품 규격에 맞춰 로봇의 접근성을 확보하기 위해, 슬라이딩 방식이나 볼트 체결 방식으로 지그의 길이를 조절할 수 있어야 한다.

2) 강성 및 체결력 (Stiffness & Clamping)

길이 조절부는 측정 중 유격(Backlash)이나 흔들림이 발생하지 않도록 견고하게 고정되어야 한다. 지그의 길이가 길어질수록 모멘트 암(Moment arm)이 길어져 휨이 발생할 수 있으므로, 알루미늄 프로파일이나 고강도 스틸 소재를 사용하여 충분한 굽힘 강성을 확보해야 한다.

3) 접촉면 재질 (Contact Material)

PUI와 닿는 접촉면은 제품의 스크래치를 방지하고 인간 피부의 마찰 특성을 모사하기 위해 쇼어 경도(Shore A) 40~60 수준의 우레탄이나 실리콘 패드 등을 부착한다. 필요에 따라 순수 기계적 특성 측정을 위해 금속 팁으로 교체할 수 있도록 설계한다.

다. TCP 교정

툴 센터 포인트(Tool Center Point, TCP)는 로봇이 제어하는 작업의 기준점이 되는 말단장치의 끝점을 의미한다.⁶³⁾ 길이를 조절할 수 있는 말단장치는 길이가 변경될 때마다 정확한 TCP 교정(Calibration)이 필수적이다. TCP는 로봇 플랜지 좌표계를 기준으로 F/T 센서 좌표계를 거쳐, 실제 PUI와 접촉하는 지그의 끝단까지의 거리 벡터를 정의할 수 있다. TCP 정보가 부정확하면 회전 운동 시 로봇이 그리는 궤적의 회전 반경이 실제와 달라져 문을 여는 것이 아니라 비틀거나 누르는 불필요한 힘(Internal force)을 발생시킨다. 이는 측정 데이터의 신뢰성을 떨어뜨리는 원인이 되므로, 지그 길이 변경 시마다 TCP 값을 일정 수준(예: 1mm) 이내의 오차로 갱신해야 한다.

63) 이경복, 남상준, 노광현. (2025). 휴대용 로봇 캘리브레이션 장치 개발 및 TCP 캘리브레이션 수렴성 개선과 정확도 향상에 관한 연구. 『한국산업융합학회논문집』, 28(3), 799-807.

제 3 절 협동로봇 제어 및 측정 알고리즘

문을 여는 것과 같이 기구학적 구속(Kinematic Constraint)이 존재하는 접촉 지향(Contact-rich) 과업은 로봇 제어 기술의 핵심적인 도전 과제이다. 협동로봇의 PUI 측정 능력을 정확하게 평가하기 위해서 로봇 상호작용 제어를 위해 이론적 프레임워크를 정립해야 한다. 본 절에서는 접촉력 제어를 위한 유연한 궤적 추종 제어, 실험을 위한 궤적 생성 방법, 그리고 정밀한 데이터 획득을 위한 보정 알고리즘을 기술한다.

1. 유연한 궤적 추종 제어

가. 제어 패러다임의 필요성

전통적인 로봇 제어는 크게 위치 제어(Position Control)와 힘 제어(Force Control)로 구분된다. 위치 제어는 픽 앤 플레이스, 용접, 단순 이송 등과 같이 대부분의 산업용 로봇 애플리케이션의 근간을 이루는 방식으로, 로봇의 말단장치가 외부에서 가해지는 힘과 무관하게 목표로 하는 위치와 자세(Pose)를 최대한 정확하게 달성하도록 제어하는 방식이다. 반면, 힘 제어는 로봇이 환경에 가하는 힘 또는 토크를 주된 제어 목표로 삼는 방식이다. 연마(Polishing), 디버링(Deburring) 또는 섬세한 조립 작업과 같이 일정한 압력을 유지하는 것이 중요한 과업에 필수적이다. 힘 제어기는 힘/토크 센서로부터 피드백을 받아 로봇이 목표 힘 값을 유지하도록 자신의 위치를 미세하게 조정한다.

위치 제어 방식은 협동로봇이 정해진 경로를 추종한다. 경로상에 예기치 않은 장애물이 존재할 경우, 제어기는 목표 위치와의 오차를 줄이기 위해 모터 토크를 계속 증가시켜 과도한 내력(Internal Force)을 유발하여 시스템 손상을 초래할 수 있다. 반대로 순수한 힘 제어를 사용해 문에 일정한 힘을 가하도록 하면, 로봇은 힘을 유지할 수 있겠지만 정해진 경로를 따르지 못하고 엉뚱한 방향으로 움직일 수 있다.⁶⁴⁾ 이처럼 문 열기 과업은 특정 경로를

64) Siciliano, B., & Villani, L. (1999). Robot force control. Springer Science & Business Media.

추종하면서 동시에 상호작용 힘을 조절해야 하는 두 가지 요구사항을 가지며, 이는 단순한 위치 제어나 힘 제어만으로는 해결하기 어려운 근본적인 문제를 초래한다.

임피던스 제어(Impedance Control)는 로봇과 환경 간의 상호작용에서 발생하는 힘을 직접적으로 제어하는 대신, 로봇의 위치와 외부 힘 사이의 동적 관계, 즉 기계적 임피던스를 제어하는 간접적인 힘 제어 전략이다.⁶⁵⁾ 임피던스 제어는 로봇의 말단장치를 가상의 '질량-스프링-댐퍼' 시스템으로 모델링하여 환경과의 상호작용을 제어한다. 로봇은 다음의 관계식을 통해 외부 힘에 반응한다.

$$F_{ext} = M(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + D(\dot{x} - \dot{x}_d) + K(x - x_d)$$

여기서, M , D , K 는 각각 가상의 질량, 댐핑, 강성 행렬을 의미하며, x 는 실제 위치, x_d 는 목표 위치이다. 문이 열리는 접선 방향으로는 강성(K)을 높여(High Stiffness) 궤적을 유지하고, 힌지 구속에 의해 위치 오차가 발생하는 법선 방향으로는 강성을 낮춰(Low Stiffness) 유연하게 순응하도록 설정한다. 이를 통해 로봇은 기구적 간섭 없이 자연스러운 도어 개폐 동작을 수행할 수 있다.⁶⁶⁾ 한편, 협동로봇 시스템이 임피던스 제어를 지원하는지 판단하기 위해서는 강성이나 댐핑과 같이 힘과 위치 편차 간의 관계를 정의하는 파라미터를 사용자가 설정할 수 있는지를 확인해야 한다.⁶⁷⁾

나. 유연한 궤적 추종 제어 전략

위에서 살펴본 바와 같이, 정확한 힘/토크 프로파일 측정을 위해서는 로봇이 PUI의 기구적 궤적을 거스르지 않고 자연스럽게 따라가야 한다. 강체

65) Abu-Dakka, F. J., & Saveriano, M. (2020). Variable impedance control and learning—a review. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 590681.

66) Pérez-Ubeda, R., Zotovic-Stanisić, R., & Gutiérrez, S. C. (2020). Force control improvement in collaborative robots through theory analysis and experimental endorsement. *Applied sciences*, 10(12), 4329.

67) Nadeau, N. A., Bonev, I. A., & Joubair, A. (2019). Impedance control self-calibration of a collaborative robot using kinematic coupling. *Robotics*, 8(2), 33.

(Rigid body)인 로봇이 사전에 정의된 완벽한 원호 궤적만을 고집할 경우, 실제 도어 힌지의 유격이나 조립 오차로 인해 발생하는 미세한 궤적 불일치가 과도한 구속력(Internal Constraint Force)을 발생시킨다. 이는 순수한 PUI의 특성이 아닌 측정 시스템의 오차(Artifact)로 작용한다. 이를 해결하기 위해 유연한 추종(Compliant Following) 전략을 요구되며, 이는 하이브리드 힘/위치 제어(Hybrid Force/Position Control) 또는 임피던스 제어(Impedance Control)를 통해 구현된다.⁶⁸⁾ 유연한 궤적 추종 전략을 통해 로봇은 도어의 궤적에 맞추어(Self-alignment) 움직이게 되며, 순수한 개폐력 만을 정밀하게 측정할 수 있다.

[표 3-3] 협동로봇 제어 방식 비교

제어 방식	핵심 원리	PUI 측정 적합성
위치 제어	· 외부 힘 무시, 목표 위치 오차 최소화	· 궤적 불일치 시 과도한 구속력 발생
힘 제어	· 힘/토크 센서 피드백 기반 힘 오차 제어	· 정해진 궤적 추종이 어려움
임피던스 제어	· 힘과 위치의 동적 관계 제어	· 궤적을 따르는 동시에 구속력에 순응함

[표 3-4] 유연한 궤적 추종 제어 전략

제어 방향	제어 전략
주 운동 방향	· 도어가 열리는 접선 방향(Tangential direction)으로는 위치 제어(Position Control)를 수행하여 일정한 속도 프로파일을 유지
구속 방향	· 도어의 회전축 방향(축방향)이나 반경 방향(Radial direction) 등 운동이 구속된 방향으로 힘 제어(Force Control)를 통해 목표 힘을 '0'으로 설정

68) Tiseo, C., Ivan, V., Merkt, W., Havoutis, I., Mistry, M., & Vijayakumar, S. (2021, May). A passive navigation planning algorithm for collision-free control of mobile robots. In 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 8223-8229). IEEE.

2. 협동로봇 궤적 생성

가. 기본 동작 명령어

협동로봇은 기본적으로 모션 제어를 지원하며, PUI 동적 특성 측정 시나리오에서는 단계별 목적에 맞춰 세 가지 핵심 명령어를 구분하여 사용한다.

[표 3-5] 협동로봇 궤적 생성 기본 명령어

명령어	특징 및 용도
PTP (Point-to-Point, Joint Motion)	<ul style="list-style-type: none"> · 기능: 각 관절을 목표 각도로 최단 시간 내에 이동시키는 조인트 각도 보간(Joint Interpolation) 방식 · 특징: 말단장치의 이동 경로가 직선이 아닌 예측하기 힘든 곡선을 그리며, 속도가 가장 빠름. · 용도: 정밀한 힘 측정이 필요한 접촉 구간에서는 사용을 배제하며, 측정 시작 위치로 빠르게 이동하는 접근(Approach) 단계나 실험 종료 후 안전 위치로 돌아가는 복귀(Retract) 단계에서 사이클 타임을 단축하기 위해 사용
LIN (Linear Motion)	<ul style="list-style-type: none"> · 기능: TCP를 현재 위치에서 목표 위치까지 직선 경로로 이동 · 용도: 서랍이나 슬라이딩 도어와 같이 직선 운동을 하는 PUI 측정 시, 또는 버튼을 수직으로 누르는 동작(Push)에 사용. 일정한 속도로 진입하여 미세한 마찰력을 측정하는 데 적합
ARC (Arc Motion)	<ul style="list-style-type: none"> · 기능: 시작점, 중간점, 끝점의 3점을 지나는 원호 궤적을 생성 · 용도: 냉장고 문, 세탁기 도어 등 힌지(Hinge)를 중심으로 회전 운동을 하는 PUI 측정의 기본 궤적

나. 하이브리드 궤적 계획 (Hybrid Trajectory Planning)

PUI(예: 냉장고 문)는 힌지에 의해 완벽한 원호 궤적을 그리는 것처럼 보이지만, 실제로는 조립 공차와 힌지의 유격으로 인해 이론적인 원호와 미세한 차이가 발생한다. 따라서 PUI 동적 특성 측정을 위해서는 공칭 궤적(Nominal Trajectory) 생성 후 제어 전략으로 보완하는 것이 바람직하다. 회

전 운동의 경우, PUI의 회전 반경과 회전 중심을 추정하여 이상적인 ARC 명령어로 기준 경로를 생성한다. 이후 유연한 궤적 추종 제어 전략을 이용하여 로봇이 공칭 궤적을 따라가되, 실제 한지의 구속력에 의해 궤적이 자연스럽게 수정되도록 한다. 이를 통해 로봇은 강제된 움직임이 아닌 가이드 된 움직임(Guided Motion)을 수행하게 된다.

3. 측정 데이터 보정 알고리즘

가. 중력 및 관성 보상 (Gravity & Inertia Compensation)

6축 F/T 센서는 로봇의 손목 끝단에 부착된다. F/T 센서에서 측정된 데이터에는 협동로봇과 PUI 사이의 상호작용으로 인해 발생하는 PUI 조작력만이 아니라 말단장치(지그) 자체의 무게와 협동로봇 움직임에 의한 관성력이 포함된다.

$$F_{measured} = F_{PUI} + F_{gravity} + F_{inertia} + F_{bias}$$

순수 PUI 조작력(F_{PUI})은 전체 측정값에서 중력, 관성력, 초기 바이어스를 제거하여 도출한다.

$$F_{PUI} = F_{measured} - (R \cdot m \cdot g + m \cdot a + F_{bias})$$

여기서, m 은 말단장치 질량, g 는 중력 가속도 벡터, R 는 센서 자세 회전 행렬, a 는 가속도 벡터이다. PUI의 동적 특성을 좀 더 정밀하게 측정하기 위해 로봇 컨트롤러로부터 실시간 자세 정보(R)를 수신하여 중력 벡터를 센서 좌표계로 변환해 제거하는 알고리즘을 적용할 필요가 있다. 또한, 측정 구간을 등속 구간으로 설정하여 가속도 항을 최소화하거나(등속 구간 측정 시, $a \approx 0$ 가정), 가속도 센서(IMU)를 추가하여 동적 관성력을 보상하는 알고리즘을 고려한다.

나. 필터링 및 데이터 동기화

센서 신호의 고주파 노이즈를 제거하기 위해 저역 통과 필터(Low-pass Filter)를 적용하며, 로봇의 위치 데이터(Encoder)와 F/T 센서 데이터 간의 통신 지연 시간을 고려하여 타임스탬프(Timestamp) 기반의 데이터 동기화를 수행한다. 데이터 수집 시점의 시스템 시각을 기준으로 모든 데이터 패킷에 타임스탬프를 부여한다. 이후 상대적으로 샘플링 주기가 긴 로봇의 위치 데이터는 선형 보간(Linear Interpolation)을 적용하여 F/T 센서의 타임스탬프와 1:1로 정렬한다. 이를 통해 위상 지연(Phase Lag) 없는 정밀한 프로파일을 획득할 수 있다.

제 4 절 표준 측정 프로토콜

1. 표준 측정 프로토콜 수립 목적

본 절에서 제안하는 표준 측정 프로토콜은 PUI 동적 특성 프로파일의 재현 가능한 기준을 제공하는 것을 목적으로 한다. 측정 시스템의 하드웨어(로봇, 센서 등)가 동일하더라도, 동작 속도나 변위 범위와 같은 측정 파라미터에 따라 PUI의 동적 응답 특성은 달라질 수 있다. 앞서 기술한 시스템 아키텍처가 '신뢰성 있는 도구'를 제공한다면, 표준 측정 프로토콜은 이 도구를 활용하여 '신뢰성 있는 데이터'를 획득하기 위한 방법론을 정의한다. 이러한 표준화된 기준이 확립되어야만 서로 다른 제품 간의 동일 조건 비교 평가(Comparative Analysis)가 가능해지며, 나아가 파라미터 변화에 따른 감성 품질 상관관계 분석과 같은 심층 연구의 기반을 마련할 수 있다.

2. 표준 측정 프로토콜 구성

가. 시스템 초기화 및 교정

데이터의 신뢰성을 확보하기 위해, 본 연구에서는 '초기화 및 교정 → 궤적 생성 및 좌표계 설정 → 측정 수행'의 표준화된 절차를 따른다. 특히 TCP 교정, 중력 보상, 센서 영점 설정 등은 PUI 측정에 선행되어야 할 필수적인 공통 단계이며, 이를 통해 외부 요인에 의한 측정 오차를 최소화한다.

나. 궤적 생성 및 PUI 좌표계 설정

작업자는 협동로봇의 직접 교시(Direct Teaching) 기능을 이용하여 측정 대상 PUI의 기준 궤적을 생성하고 등록한다. 단순한 1차원 직선 운동과 달리, 힌지(Hinge)로 구속된 PUI는 3차원 공간상의 복합적인 궤적을 갖는다. 이때 로봇이 기구학적 구속을 고려하지 않고 단순 궤적으로 움직일 경우, PUI 고유의 특성이 아닌 기구적 엇갈림에 의한 내력(Internal Force)이 측정 데이터

에 포함되어 신뢰성을 저하시킨다. 따라서 PUI의 기구적 회전 중심과 반경을 고려하여 6축 토크 형상을 왜곡 없이 측정할 수 있는 정밀 궤적을 생성해야 한다. 이후, 티칭된 위치를 기준으로 상대 좌표계(User Frame)를 설정한다. 이를 통해 제품의 설치 위치가 변경되더라도, 상대 좌표계만 재설정하면 로봇이 동일한 로컬 궤적을 수행할 수 있어 실험의 효율성과 정확성을 보장한다.

[표 3-6] 측정 프로토콜(1) 시스템 초기화 및 교정

세부 절차	주요 내용 및 목적
TCP 교정	· F/T 센서 중심 좌표계 대비 말단장치 끝단의 정확한 6자유도 오프셋(Position/Orientation)을 계산하여 입력함.
중력 보상	· 로봇을 다각도로 회전시켜 말단장치의 자중이 센서에 미치는 영향을 측정하고, 이를 실시간으로 상쇄(Offset)하여 순수 외력만을 측정하도록 함.
영점 설정	· 외부 접촉이 없는 자유 공간(Free space) 상태에서 F/T 센서의 6축 값을 초기화하여 바이어스 오차를 제거함.
초기 정렬	· 로봇이 PUI를 잡거나 접촉하기 직전 상태에서 센서값을 모니터링하며, 사전 부하(Pre-load)가 '0'에 수렴하도록 초기 자세를 미세 조정함.

[표 3-7] 측정 프로토콜(2) 궤적 생성 및 좌표계 설정

세부 절차	주요 내용 및 목적
기준 궤적 티칭	· 직접 교시를 통해 PUI의 시점, 경유점(Via-point), 종점을 입력하고, PUI의 운동 특성(직선/회전)에 부합하는 경로를 생성함.
상대 좌표계 설정	· 제품의 위치가 변경되어도 궤적을 다시 설정할 필요가 없도록, 측정 대상을 기준으로 한 로컬 좌표계(Object Frame)를 정의함.

다. 측정 프로토콜 상세

기준 궤적 설정 후, 데이터의 재현성을 확보하기 위한 핵심 파라미터(동작 속도 등)를 결정한다. 표준 측정 단계는 '접근(Approach) → 접촉 및 정렬→

측정(Actuation) → 복귀(Retract)'의 4단계로 구성되며, 세부 동작은 PUI 종류에 따라 최적화된다. [표 3-8]은 회전 노브에 대한 상세 동작 및 핵심 파라미터를 구성한 예시이다.

한편, 반복 측정의 효율성을 극대화하기 위해, 로봇이 PUI를 잡은 상태를 초기 상태로 유지하여 접근 및 접촉 단계를 생략하는 간소화된 프로토콜을 적용할 수 있다. 이 경우 데이터 후처리 단계에서 데이터 분할(Segmentation) 기법을 적용하여 유효 데이터를 추출한다. 구체적으로는 로봇의 관절 각도나 TCP 변위가 사전 설정된 기구학적 임계값(Kinematic Threshold)을 초과하는 순간을 운동의 시작점($t=0$)으로 정의하며, 해당 시점의 센서 값을 초기 오프셋(Initial Offset)으로 간주하여 보정하거나 분석 목적에 따라 포함하여 해석한다.

[표 3-8] 측정 프로토콜(3) 상세 동작 및 핵심 파라미터

단계	동작 설명	핵심 파라미터
접근	<ul style="list-style-type: none"> 초기 진입: PUI 좌표계를 기준으로 설정된 접근 지점(예: 노브 표면 전방 10mm)까지 접근 속도로 빠르게 이동함. 정렬: 측정 축과 PUI 축을 정렬하고 대기함. 	<ul style="list-style-type: none"> 접근 속도
접촉	<ul style="list-style-type: none"> 접촉 탐색: 접근 지점에서 PUI 방향(Z축)으로 매우 느린 탐색 속도로 이동함. 임계값 감지: 이동 중 F/T 센서의 수직 분력(F_z)을 실시간 모니터링함. 기준점 설정: 센서값이 사전 정의된 접촉 임계값을 초과하는 순간 로봇을 정지하고, 해당 위치를 변위 측정의 기준점($t=0$)으로 설정함. 	<ul style="list-style-type: none"> 탐색 속도 접촉 임계값 위치
측정	<ul style="list-style-type: none"> 회전 구동: PUI 회전축을 중심으로 설정된 시험 각속도로 등속 회전을 수행함. 데이터 로깅: 전 구간에서 샘플링 주기로 시간, 각도, 토크 데이터를 수집함. 종료 조건: 목표 각도 또는 한계 토크에 도달하면 즉시 정지함. 	<ul style="list-style-type: none"> 시간 시험 각속도 목표 각도 한계 토크,
복귀	<ul style="list-style-type: none"> 이탈 및 복귀: 측정 종료 지점에서 안전거리만큼 후퇴한 뒤, 초기 대기 위치(접근 지점)로 복귀함. 	<ul style="list-style-type: none"> 복귀 속도 이탈 거리

제 5 절 제안 시스템의 계측학적 우수성

본 절에서 상세히 설계된 협동로봇 기반 계측 시스템은 제2장에서 제기된 기존 측정 방식(수동 측정, 고정식 자동화)의 한계를 다음과 같이 공학적으로 극복하며, 정밀 계측 시스템으로서의 타당성을 확보하였다.

1) 신뢰성 (Reliability): 수동 측정의 고질적인 문제였던 작업자 간의 편차, 즉 재현성(Reproducibility) 부재 문제를 협동로봇의 높은 반복 정밀도 (Repeatability)를 통해 근본적으로 제거하였다. 이를 통해 측정 시스템 자체의 변동(Variation)을 최소화함으로써, 통계적으로 신뢰할 수 있는 게이지 R&R(Gage R&R) 수준을 달성할 수 있는 기반을 마련하였다.

2) 유연성 (Flexibility): 기존 전용 측정 장비가 가진 비유연성과 재구축 비용(Retooling Cost) 문제를 프로그래밍이 가능한 6자유도 협동로봇을 도입하여 해결하였다. 신제품 출시로 인해 PUI의 위치나 조작 방식이 변경되더라도, 하드웨어의 물리적 수정 없이 소프트웨어(티칭 궤적 및 측정 파라미터)의 재설정만으로 즉각적인 대응이 가능하다.

3) 충실도 (Fidelity): 단순한 최대 힘(Peak Force)만 측정하는 정적 측정의 한계를 넘어, 고정밀 6축 F/T 센서와 고속 DAQ를 통합하여 PUI의 동적 거동을 온전히 포착한다. 이를 통해 미세한 마찰력 변화, 비틀림 모멘트, 그리고 동작 시의 과도 응답(Transient Response) 등을 포함하는 동적 햅틱 프로파일(Dynamic Haptic Profile)을 수집할 수 있다.

4) 표준성 (Standardization): 측정 조건의 불일치로 인한 데이터의 비일관성을 극복하기 위해 표준 측정 프로토콜을 정립하였다. 이는 단순히 측정 절차를 나열한 것이 아니라, 데이터의 상호 비교 가능성(Comparability)과 축적을 가능하게 하는 과학적 토대를 제공한다.

결론적으로, 본 장에서 설계된 시스템은 제조 현장에서 사용되는 로봇 기술을 정밀 계측 분야에 적용하여 측정의 불확실성을 통제하고 제어할 수 있는 환경을 구축한 결과물이다. 본 연구에서 제안된 시스템은 PUI 동적 특성 분석을 위한 공학적 인프라를 제공하며, 향후 감성 품질 정량화 모델 개발을 위한 신뢰성 높은 객관적 데이터를 생성하는 핵심 도구로 기능할 것이다.

제 4 장 PUI 동적 특성 프로파일 측정 및 분석

제 1 절 협동로봇 측정 시스템 구성

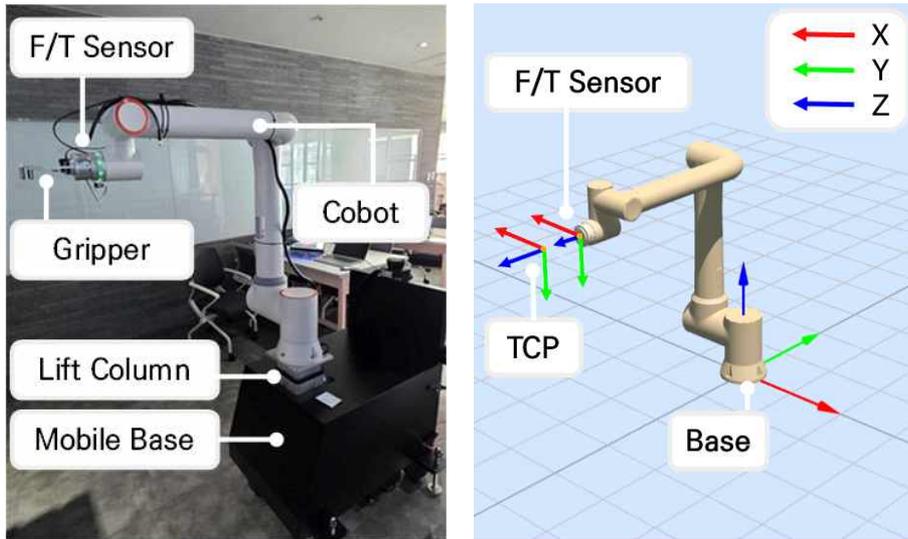
본 연구에서는 물리적 사용자 인터페이스(PUI)의 정밀하고 유연한 동적 특성 프로파일 측정을 위해, [그림 4-1]과 같이 협동로봇을 핵심 구동체로 하는 동적 특성 측정 시스템을 구축하였다. 협동로봇, 6축 힘/토크 센서, 모듈형 말단장치로 구성된 시스템의 하드웨어는 [그림 4-2]와 같이 순차적으로 결합되며, 메인 PC와 실시간 통신할 수 있도록 구성하였다. 협동로봇 시스템은 이동성을 고려하여 전도 방지용 다리가 있는 카트를 베이스로 하였고, 다양한 높이에서 측정할 수 있도록 리프트 컬럼 위에 협동로봇을 배치하였다.

측정 시스템의 구동부로는 6축 다관절 협동로봇인 FAIRINO FR10 모델을 선정하였다. 본 모델은 인간의 팔 동작과 유사한 6자유도(6-DOF) 움직임을 구현할 수 있어, 3차원 공간상의 임의의 위치와 방향 제어가 필수적인 복잡한 PUI 조작 궤적을 모사할 수 있다. 본 모델은 1,400mm의 작업 반경을 확보하고 있으며, 10kg의 가반하중을 지원하여 냉장고 도어 개방 등 100N 이상의 힘이 요구되는 고부하 측정 시나리오에서도 토크 포화(Saturation) 없이 안정적인 측정이 가능하다. ISO 10218 및 ISO/TS 15066 안전 규격을 준수하여 별도의 안전 펜스 없이 작업자와 협업이 가능하며, 높은 반복 정밀도(Repeatability)를 통해 측정 데이터의 신뢰성을 보장할 수 있다.

PUI 조작 시 발생하는 미세한 힘과 토크 변화를 포착하기 위해 로봇의 플랜지(Flange)에는 FR10과 호환이 가능한 6축 힘/토크 센서(FR-6F-75MM)를 장착하였다. 단일 디바이스에서 3축 힘 벡터와 3축 토크 벡터를 실시간으로 동시 측정하여 PUI의 동적 프로파일을 획득한다. 고속 통신을 지원하며, 로봇 제어기와 실시간으로 동기화되어 정밀한 햅틱 데이터를 수집한다.

다양한 형태의 가전제품 PUI에 유연하게 대응하기 위해 교체 및 조절을 할 수 있는 모듈형 말단장치 구성하였다. 바(Bar) 형태의 손잡이나 회전 노브(Knob)와 같이 파지가 필요한 PUI를 측정하기 위해 전동 그리퍼(DH-5)를

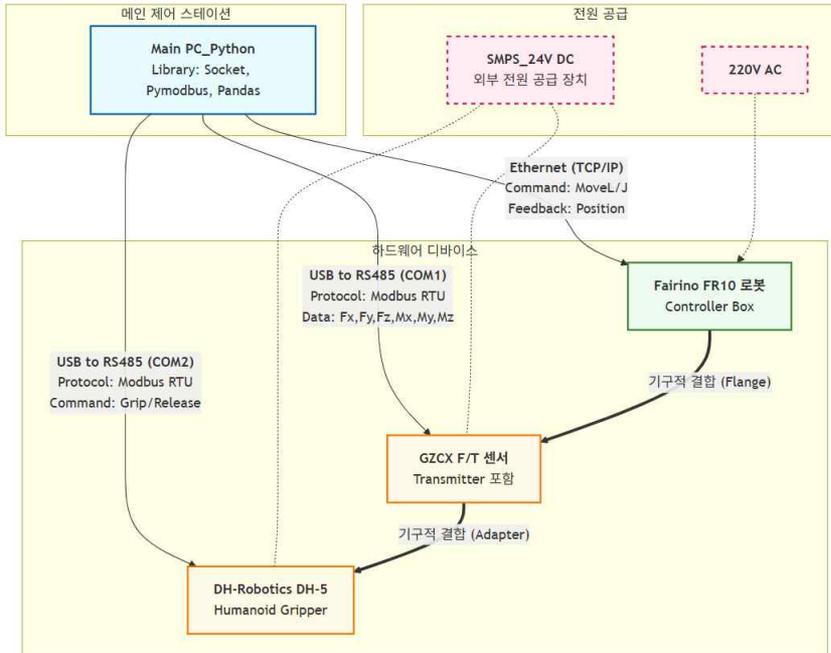
적용하였다. 또한, 냉장고 포켓형 손잡이와 같이 전동 그리퍼로 접근이 어려운 PUI와 안정적인 접촉을 유지하기 위해 맞춤형 지그를 제작하여 사용하였다. 이 지그는 'L'자형 훅(Hook) 2개가 연결된 구조로 되어있어 다양한 두께의 손잡이를 잡을 수 있으며, 당기는 동작과 미는 동작에 모두 대응할 수 있어 개폐 전 과정을 한 사이클 내에 측정할 수 있다. 힘/토크 센서 좌표계는 [그림 4-1](b)와 같이 로봇 말단에 부착한 센서의 물리적 중심(Center of Gravity, CoG)에 위치하며, TCP(Tool Center Position) 좌표계는 힘/토크 센서 좌표계와 방향과 같고, 센서 중심으로부터 그리퍼 길이만큼 이동한 위치에 설정하였다. 시스템 구성 요소에 대한 주요 사양은 [표 4-1]과 같다.



(a) 협동로봇 측정 시스템 구성

(b) 로봇 시스템 좌표계

[그림 4-1] 협동로봇 측정 시스템 구성 및 좌표계



[그림 4-2] 협동로봇 측정 시스템 하드웨어 구성

[표 4-1] 하드웨어 구성 요소 및 사양

구성요소	제조사(모델)	주요 사양
협동로봇	FAIRNO /FR10	<ul style="list-style-type: none"> · 가반하중: 10kg · 도달거리: 1,400mm · 반복 정밀도: ± 0.05mm
F/T 센서	GZCXSENSOR /FR-6F-75MM	<ul style="list-style-type: none"> · 힘 측정 범위: 100N · 토크 측정 범위: 5Nm · 분해능: 0.1%FS · 반복 정밀도: 0.2%FS · 샘플링 속도: 1,000Hz
말단장치	DH-Robotics /DH-5	<ul style="list-style-type: none"> · 자유도: 6 축 · 총 관절: 11개 · 무게 0.7kg
개발 환경	-	<ul style="list-style-type: none"> · CPU: AMD R5 9000 · RAM: 32GB · OS: Ubuntu22.04 · ROS: ROS2 Humble

제 2 절 가전제품 PUI 동적 특성 프로파일 측정

1. 냉장고 회전형 도어 동적 특성 프로파일 측정

가. 실험 개요 및 핵심 메커니즘

본 사례 연구는 가전제품의 대표적인 PUI인 냉장고 회전형 도어(Swing Door)의 개폐 메커니즘을 규명하고 동적 특성을 정량화하는 것을 목표로 한다. 냉장고 회전형 도어는 사이드 힌지 도어라고도 하며, 지면에 수직인 고정된 축을 중심으로 회전 운동하는 강체로 모델링되며, 사용자가 문을 여닫을 때 느끼는 조작감은 자기 개스킷(Magnetic Gasket)과 힌지 시스템(Hinge System)이라는 두 가지 핵심 부품의 상호작용에 의해 결정된다.

자기 개스킷은 냉기가 새지 않도록 문과 본체 사이에서 자력으로 기밀을 유지하는 부품으로, 문이 닫힌 상태에서는 강한 자력으로 밀착된다. 열림 과정 초기에는 자력을 극복하기 위해 강한 초기 분리력(Breakaway Force)을 필요하다. 닫힘 과정에서는 자석이 프레임에 가까워짐에 따라 당기는 힘을 발생시킨다. 힌지 시스템은 문의 회전축을 형성하며, 내부에 경사진 캠(Cam) 부품이 적용되어 일정 각도 내에서 자동 닫힘(Auto-closing) 기능을 구현한다.

사용자가 도어 조작 시 느끼는 힘(F_{user})은 회전 궤적의 접선 방향으로 작용하며, 다음과 같은 힘의 평형 방정식으로 모델링할 수 있다.⁶⁹⁾

$$F_{user} + F_m + F_h + F_f + F_i = 0$$

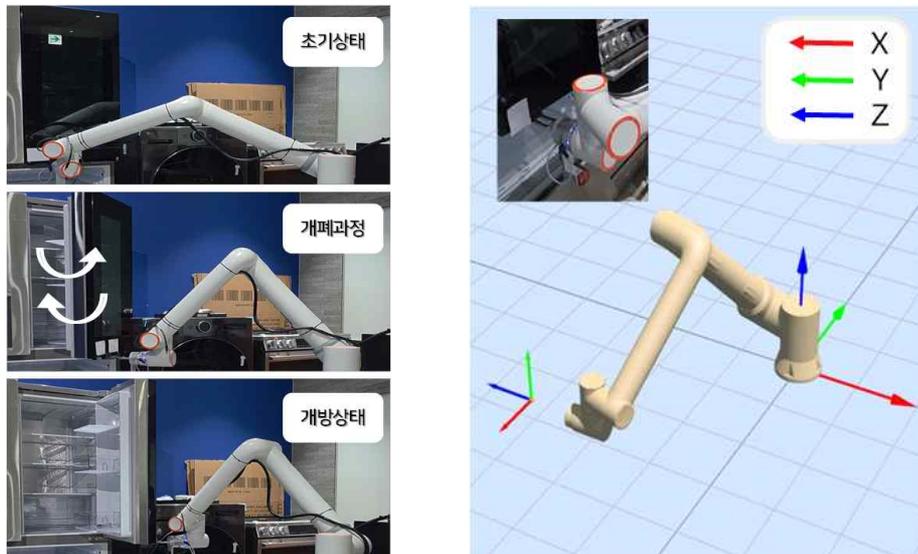
여기서, F_m 은 자기 개스킷에 의한 자력, F_h 는 힌지 캠 형상에 의한 회전력, F_f 는 마찰력(정지/운동 마찰 및 댐퍼 점성 마찰), F_i 는 도어의 관성력을 의미한다. 본 실험에서는 이러한 복합적인 힘의 요소를 분해하고 프로파일링하여 감성 품질을 분석한다.

69) 연경수, 이경복, 노광현. (2025). 협동로봇 기반 가전제품 문 개폐 프로파일 측정 시스템에 관한 연구. 『한국산업융합학회논문집』, 28(5), 1423-1432.



(a) 실험 대상(냉장고) (b) 회전형 도어 (c) 서랍형 도어

[그림 4-3] 냉장고 구조 및 핵심 부품



(a) 실험 과정

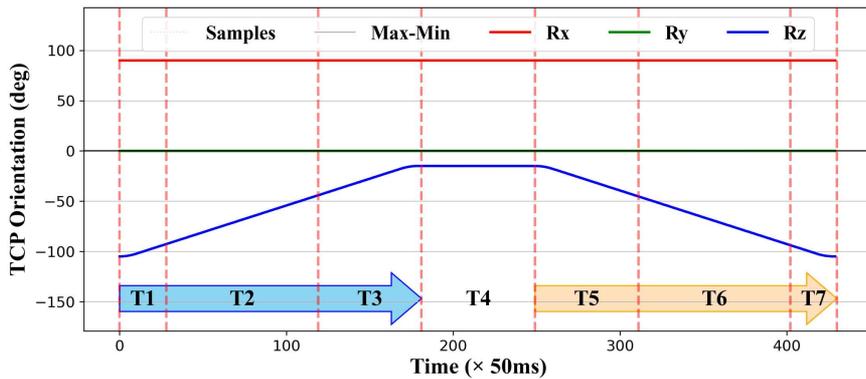
(b) 초기 좌표계

[그림 4-4] 프로파일 측정 실험 구성 (냉장고 회전형 도어)

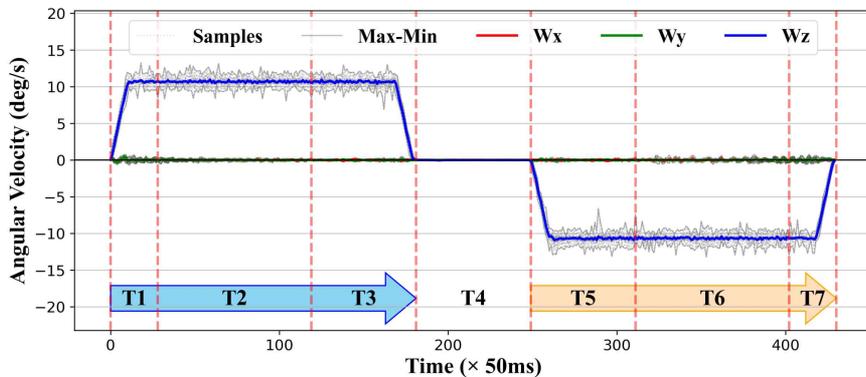
나. 실험 구성

1) 측정 시나리오 및 데이터 수집 방법

실험 과정은 [그림 4-4]에서 제시된 것과 같이 회전형 냉장고 문을 0° 에서 90° 까지 개방하는 열림(Opening) 과정과 다시 초기 위치로 복귀하는 닫힘(Closing) 과정을 하나의 사이클로 정의한다. 열림 과정과 닫힘 과정의 구분을 위해 정지 과정을 추가한다. 힌지 시스템의 동적 특성을 명확히 관찰하기 위해 등속 운동(Constant Angular Velocity)을 수행하며, 속도 프로파일은 [그림 4-5]와 같이 가감속 구간을 포함한 사다리꼴 형태를 적용한다. 실험은 동일한 모션을 총 30회 반복 측정을 수행하며, 50ms 주기로 힘/토크 데이터를 동기화하여 수집한다.



(a) TCP 방향 (베이스 프레임 기준)



(b) TCP 각속도 (베이스 프레임 기준)

[그림 4-5] TCP 방향 및 각속도 프로파일 (냉장고 회전형 도어)

2) 직접 교시 및 모션 생성

냉장고 회전형 도어는 힌지에 구속된 원운동을 하므로, 협동로봇의 직접 교시 기능을 이용해 운동 궤적상의 시점, 중간점, 종점을 입력하고 원호 보간을 통해 협동로봇의 모션을 생성한다. 로봇 TCP(Tool Center Point)의 Y축이 문의 회전축과 평행하도록 정렬 상태를 점검한다. 특히 중요한 점은 문을 여는 동안 말단장치가 항상 문에 수직인 상태를 유지하도록 TCP의 방향(Orientation)을 제어한다. TCP 자세 제어를 통해 베이스 프레임 기준 Z축 방향의 TCP 회전 각도(R_z)는 문의 개방 각도와 기구학적으로 일치하게 되며, 이는 데이터 분석을 용이하게 하는 기초가 된다.

3) 시스템 초기화 및 교정

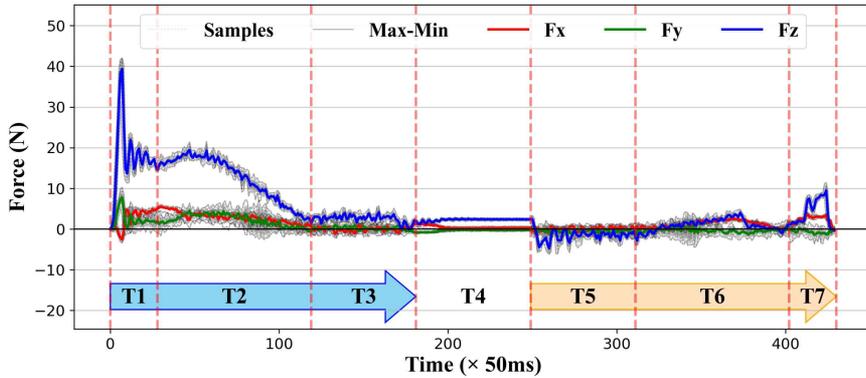
로봇이 그리퍼를 이용하여 냉장고 손잡이를 잡은 상태를 초기 자세(0°)로 설정한다. 로봇이 손잡이를 잡은 직후 센서값을 모니터링하여 초기 응력을 제거하고, 모션을 생성하여 데이터를 수집한다.

다. 실험 결과 분석 및 고찰

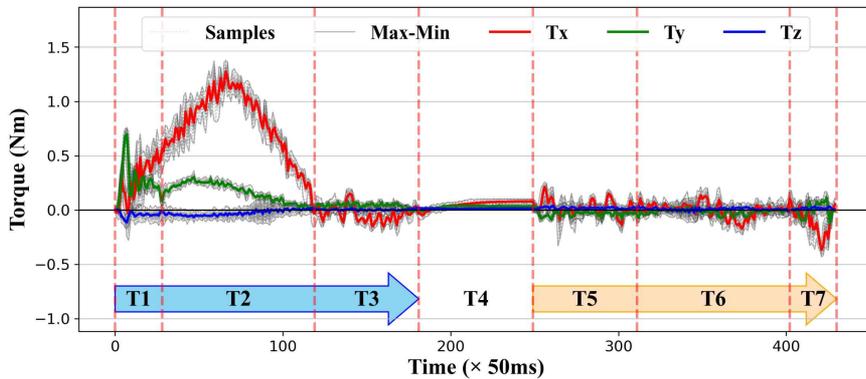
1) 데이터 후가공

가) 유효 동작구간 분할

수집된 데이터 결과를 살펴보면, 로깅 시작 시점에 따라 동작 구간의 시작점과 끝점은 매 실험마다 달라진다. 따라서 반복 측정된 데이터의 시작점과 끝점을 일정한 기준에 따라 정렬하여 유효한 동작 구간을 확인하여야 한다. 유효 동작구간을 확인하는 방법은 TCP 위치, TCP 각도, 조인트 각도 값 중 어느 하나를 기준으로 임계값 이상으로 값이 변하는 순간을 유효 동작 구간의 시작 지점으로(임계값 이하인 경우 종료 지점) 판단할 수 있다. 본 실험에서는 TCP의 Z축 회전이 주된 운동 방향이므로 TCP 각도 변화 기준 임계값을 기준으로 유효구간을 나누었다. [그림 4-6]은 유효 동작 구간의 시간에 따른 힘/토크 프로파일이다.



(a) 시간에 따른 3축 힘 프로파일

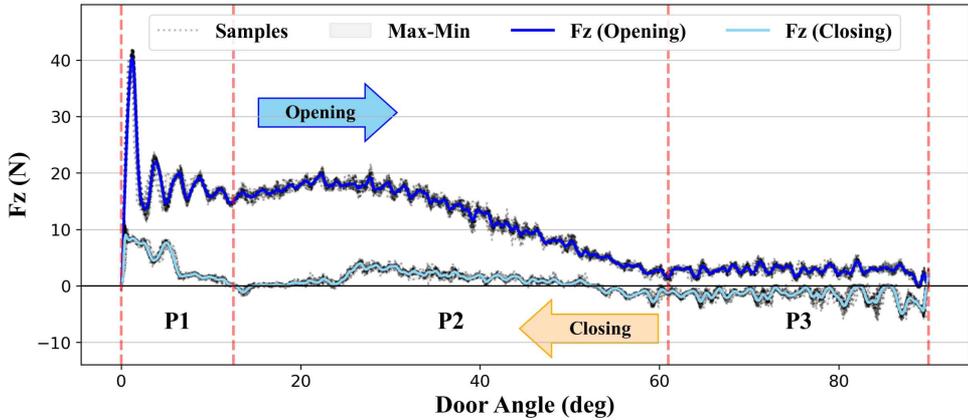


(b) 시간에 따른 3축 토크 프로파일

[그림 4-6] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (냉장고 회전형 도어)

나) 문 열림 각도 기준 힘/토크 프로파일 도출

본 시스템은 실시간으로 조인트 각도 및 토크, TCP 위치 및 방향, TCP 속도 및 각속도, F/T 센서의 힘 및 토크 데이터를 수집할 수 있다. '나. 실험 구성'에서 말단장치가 문에 수직인 방향으로 자세를 제어하면서 교시하였으며, 이를 통해 TCP 회전 각도(R_z)는 문의 개방 각도와 동일함을 언급하였다. 이 기구학적 성질을 바탕으로 문의 개방 각도에 따른 힘/토크 프로파일은 [그림4-7]과 같이 도출할 수 있다.



[그림 4-7] 도어 각도에 따른 힘 프로파일 (냉장고 회전형 도어)

[표 4-2] 최대/최소 힘 분포 (냉장고 회전형 도어)

(a) 열림 과정 최대 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	41.8	21.5	5.5
Avg.(N)	40.8	20.2	4.9
Min.(N)	37.6	19.4	4.3
Std.(N)	1.0	0.5	0.3

(b) 열림 과정 최소 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	4.5	2.1	0.1
Avg.(N)	2.3	1.3	-0.2
Min.(N)	1.1	0.3	-0.5
Std.(N)	0.7	0.4	0.1

(c) 닫힘 과정 최대 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	11.0	4.8	2.0
Avg.(N)	9.7	4.2	0.9
Min.(N)	8.2	3.8	0.0
Std.(N)	0.7	0.3	0.6

(d) 닫힘 과정 최소 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	0.0	-2.0	-4.6
Avg.(N)	-0.3	-3.1	-5.4
Min.(N)	-0.8	-4.0	-6.1
Std.(N)	0.2	0.6	0.4

2) 힘/토크 프로파일 고찰

수집된 힘/토크 프로파일을 분석한 결과, 냉장고 문의 개폐 과정은 작용하는 주된 힘의 유형에 따라 초기 개방 구간(P1), 중간 이동 구간(P2), 최대 개방 구간(P3)의 세 단계로 명확히 구분되었다.

가) 초기 개방 구간 (P1: 도어 분리 구간)

(1) 열림 과정: 자력(F_m)과 정지 마찰력이 최대로 작용하는 구간이다. 분석 결과 약 1.2° 지점에서 개스킷이 떨어지며, 약 40.8N의 최대 분리력 (Peak Force)이 발생하였다. 이는 사용자가 가장 큰 저항감을 느끼는 구간이다.

(2) 진동 패턴: 도어가 냉장고 본체와 분리된 이후 관측된 진동은 문과 그리퍼 사이의 기구적 유격(Backlash)에 기인한 것으로, 고속 샘플링을 통해 시스템이 이를 놓치지 않고 포착함을 확인하였다.

(3) 닫힘 과정: 닫힘 시에는 약 0.5° 부근부터 자력에 의해 문이 저절로 붙는 현상이 관측되었다. 열림 시보다 힘이 작은 이유는 자기 히스테리시스 (Magnetic Hysteresis) 현상 때문으로 판단된다.

나) 중간 이동 구간 (P2: 자동 닫힘 구간)

(1) 열림 과정: 힌지 시스템의 캠(F_h)과 운동 마찰력이 지배적인 구간이다. 약 24.0° 부근에서 힌지 저항력이 약 20.2N으로 최대로 측정되었다.

(2) 닫힘 과정: 닫힘 과정에서는 열림 과정에 비해 상대적으로 힘이 적게 측정되었는데, 이는 캠 형상의 비대칭 설계와 소프트 클로즈(Soft-close) 댐퍼의 점성 마찰이 닫힘 충격을 완화했기 때문으로 판단된다. 최대 약 4.2N의 닫힘력(Closing Force)이 확인되었다.

다) 최대 개방 구간 (P3: 자유 이동 구간)

힌지 캠의 영향력이 사라지고 운동 마찰력과 관성력(F_i)만이 작용하는 구간이다. 발생하는 최대 힘은 약 4.9N으로 사용자는 저항감을 거의 느끼지 못하고 부드럽게 움직이는 것으로 느끼게 되는 구간이다.

3) 냉장고 회전형 도어 실험 요약

본 사례 연구를 통해 제안된 협동로봇 기반 측정 시스템은 다음과 같은 우수성을 입증하였다.

가) 동적 특성의 정량화: 단순한 최대 힘뿐만 아니라, 히스테리시스, 댐퍼의 점성 효과, 캠의 동작 범위 등 수동 측정으로는 파악할 수 없었던 복합적

인 동적 특성을 정밀하게 정량화하였다.

나) 데이터의 무결성: 30회 반복 측정에도 일관된 프로파일을 획득함으로써, 로봇을 통한 계측 재현성이 매우 높음을 확인하였다.

다) 감성 품질 분석 토대: 문의 회전 각도에 따른 힘 변화를 나타내는 힘-변위 곡선을 성공적으로 도출함으로써, 향후 사용자 감성 평가와 물리적 데이터 간의 상관관계를 규명할 수 있는 객관적 토대를 마련하였다.

2. 냉장고 서랍형 도어 동적 특성 프로파일 측정

가. 실험 개요 및 핵심 메커니즘

냉장고 서랍형 도어(Drawer-type Door)는 김치냉장고나 대용량 냉동실에 주로 적용되는 형태로, 직선 왕복 운동을 하는 슬라이딩 메커니즘을 갖는다. 회전형 도어와 달리, 서랍형 도어의 조작감은 레일 시스템(Rail System)의 구름마찰(Rolling Friction)과 자기 개스킷, 그리고 충격 흡수를 위한 소프트 클로징(Soft-closing) 댐퍼의 상호작용으로 결정된다.

서랍형 도어의 운동 방정식은 회전형 도어와 유사하나, 힌지 시스템에 의한 회전력(F_h) 대신 슬라이드 레일의 경사도와 중력에 의한 힘(F_s)이 작용한다는 점에서 차이가 있다. 사용자가 느끼는 조작력(F_{user})은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

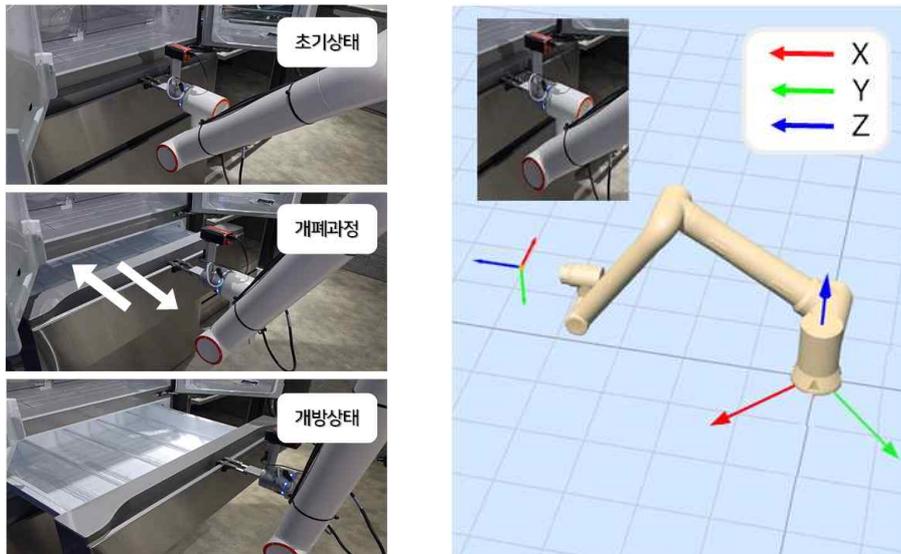
$$F_{user} + F_m + F_s + F_f + F_i = 0$$

여기서, F_m 은 자기 개스킷에 의한 자력, F_s 는 레일 경사에 의해 서랍 무게가 이동 방향으로 분산된 힘(중력 성분), F_f 는 레일의 롤러와 트랙 사이의 구름마찰력 및 댐퍼의 점성 저항력, F_i 는 서랍 전체 질량에 의한 관성력을 의미한다. 특히 서랍형 PUI의 감성 품질은 마찰의 균일성(Uniformity), 적재 하중(Load) 변화에 따른 힘 민감도(Sensitivity), 그리고 닫힘 직전 댐퍼의 에너지 흡수율에 의해 영향을 받는다.

나. 실험 구성

1) 측정 시나리오 및 데이터 수집 방법

냉장고 서랍형 도어 실험은 [그림 4-8]에 제시된 것과 같이 서랍이 닫힌 초기 상태에서 최대 인출 상태(0~430mm)까지 개방하는 열림(Opening) 과정과 일시 정지 후 다시 초기 위치로 복귀하는 닫힘(Closing) 과정을 하나의 사이클로 정의한다. 마찰 특성과 레일 이음매(Joint)의 진동 특성을 확인하기 위해 총 15회 반복 측정을 수행한다. 개폐 과정의 속도 프로파일은 [그림 4-9]와 같이 가감속 구간을 포함한 사다리꼴 형태를 적용하고, 회전형 도어 실험과 동일한 샘플링 레이트로 데이터를 수집한다.



(a) 실험 과정

(b) 초기 좌표계

[그림 4-8] 프로파일 측정 실험 구성 (냉장고 서랍형 도어)

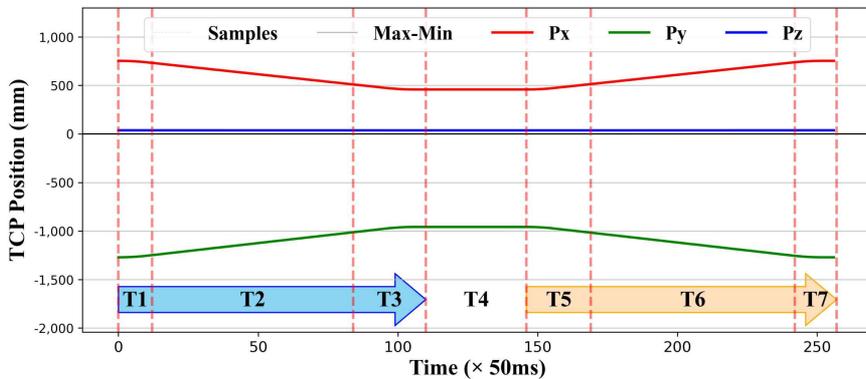
2) 직접 교시 및 모션 생성

서랍형 도어는 직선 운동을 하므로 협동로봇의 직선 보간(Linear Interpolation) 기능을 사용하여 궤적을 생성한다. 로봇의 말단장치(TCP)가 서랍 앞면에 항상 수직이 되도록 자세를 고정한다. 실험 환경 구성상 서랍의 이동 방향은 로봇 베이스(Base) 프레임 기준 X-Y 평면상에서 Z축 기준 45° 방

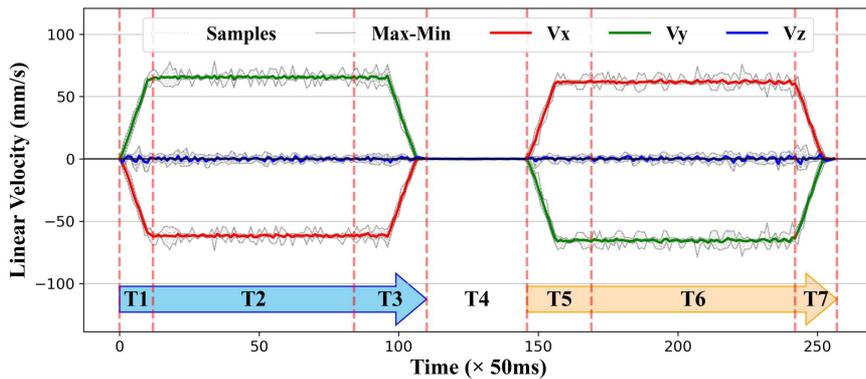
향으로 설정하였으며, 기하학적 성질을 바탕으로 서랍의 실제 인출 변위(d)와 속도는 TCP의 위치 벡터(P_x, P_y)를 이용하여 도출할 수 있다.

3) 시스템 초기화 및 교정

로봇이 맞춤형 지그를 이용하여 서랍 손잡이를 견고하게 잡은 상태를 초기 자세로 설정한다. 파지 후 센서값 모니터링을 통해 초기 응력을 제거 (Zeroing)한 뒤 측정을 시작한다.



(a) TCP 위치 (베이스 프레임 기준)



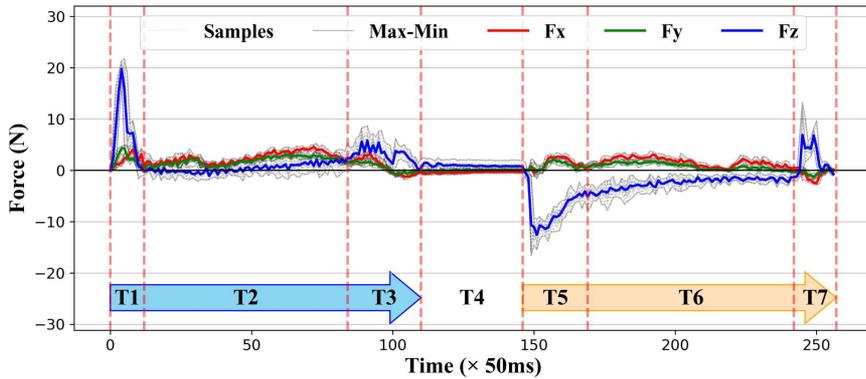
(b) TCP 속도 (베이스 프레임 기준)

[그림 4-9] TCP 위치 및 속도 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)

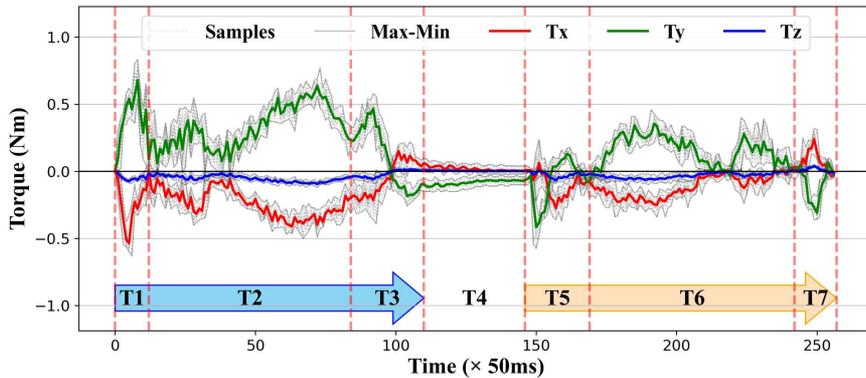
다. 실험 결과 분석 및 고찰

1) 데이터 후가공

수집된 시계열 데이터에서 로봇 TCP의 위치 변화량이 임계값을 초과하는 시점을 기준으로 유효 동작 구간을 분할하여 한다. 유효구간의 시간에 따른 힘/토크 프로파일은 [그림 4-10]과 같다. 이후 베이스 프레임 기준의 좌표 데이터를 서랍형 도어의 이동 축(TCP Z축 방향) 기준으로 변환하여, 인출 변위(Displacement)에 따른 힘/토크 프로파일을 도출한다. 주된 운동 방향 힘과 인출 변위 간의 힘 프로파일은 [그림 4-11]과 같다.

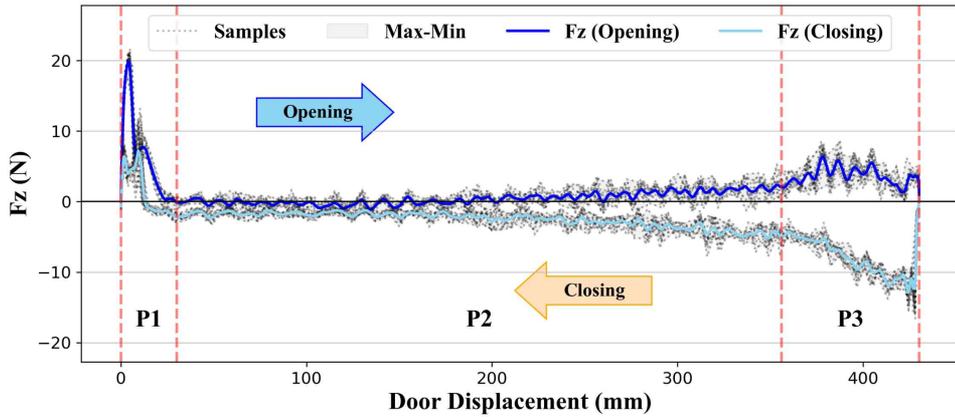


(a) 시간에 따른 3축 힘 프로파일



(b) 시간에 따른 3축 토크 프로파일

[그림 4-10] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)



[그림 4-11] 도어 변위에 따른 힘 프로파일 (냉장고 서랍형 도어)

[표 4-3] 최대/최소 힘 분포 (냉장고 서랍형 도어)

(a) 열림 과정 최대 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	21.7	5.3	8.6
Avg.(N)	20.4	3.9	7.7
Min.(N)	17.8	3.1	6.6
Std.(N)	1.0	0.5	0.6

(b) 열림 과정 최소 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	0.0	-1.1	1.3
Avg.(N)	-0.4	-1.6	0.6
Min.(N)	-1.7	-2.2	0.2
Std.(N)	0.5	0.3	0.4

(c) 닫힘 과정 최대 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	13.0	-0.4	0.9
Avg.(N)	10.0	-0.8	0.1
Min.(N)	7.2	-1.1	-0.9
Std.(N)	1.9	0.2	0.5

(d) 닫힘 과정 최소 힘 분포

	P1	P2	P3
Max.(N)	-1.6	-5.8	-12.3
Avg.(N)	-2.2	-6.6	-14.6
Min.(N)	-3.0	-7.8	-16.4
Std.(N)	0.5	0.6	1.3

2) 힘/토크 프로파일 고찰

서랍형 도어의 힘 프로파일은 기구적 특성에 따라 초기 개방 구간(P1), 중간 이동 구간(P2), 최대 개방 구간(P3)으로 세분된다.

가) 초기 개방 구간 (P1: 밀폐 및 분리 구간)

(1) 열림 과정: 자력(F_m), 정지 마찰력, 관성력뿐만 아니라 밀폐성을 높이기 위해 설계된 슬라이드 레일의 초기 경사(Gravity slope)를 극복해야 하는 구간이다. 분석 결과, 약 4.3mm 인출 지점에서 자력을 극복하기 위한 최대 분리력 약 20.4N이 측정되었다.

(2) 닫힘 과정: 닫힘 시에는 레일의 경사 구조로 인해 약 10.0N의 닫힘력이 자연스럽게 발생하며, 이후 자력에 의해 완전한 밀폐가 이루어진다.

(3) 소프트 클로징: 닫힘 완료 직전(마지막 10mm 구간)에서 닫힘력이 일시적으로 감소하며, 힘이 변화하는 구간을 포착하였다.

나) 중간 이동 구간 (P2: 구름마찰 구간)

(1) 마찰 특성: 롤러와 레일 사이의 구름마찰(Rolling Friction)이 지배적인 구간으로, 이상적인 상태인 경우 힘의 변화가 거의 없이 일정해야 한다. 본 실험에서는 운동 마찰력으로 인해 당기는 힘이 완만하게 증가하는 경향을 보였는데, 이는 레일의 경사가 의한 것으로 판단된다.

(2) 진동(Rattle): 프로파일 상에서 주기적인 힘의 스파이크(Spike)가 관측될 경우, 이는 레일의 이음매나 롤러의 편마모에 의한 진동으로 해석할 수 있다. 로봇 시스템은 이를 시각화하여 "덜덜거림"과 같은 감성 저하 요인을 정량적으로 검출한다.

다) 최대 개방 구간 (P3: 스톱퍼 및 멈춤 구간)

(1) 열림 과정: 서랍형 도어의 이탈 방지를 위한 엔드 스톱(End-stop) 구조와 레일 경사도 증가로 인해 저항력이 급격히 상승하며 멈추게 된다.

(2) 닫힘 과정(초기): 정지 상태에서 다시 운동을 시작하기 위해 정지 마찰과 관성력을 극복하는 힘(약 14.6N)이 필요하며, 이후 슬라이드 경사 구조에 따라 미는 힘이 급격히 감소하여 적은 힘으로도 쉽게 닫히는 특성을 보인다.

3) 냉장고 서랍형 도어 실험 요약

서랍형 도어 측정 실험을 통해 본 시스템은 단순 직선 운동뿐만 아니라 자기 개스킷에 의한 분리력, 슬라이드 경사 구조에 따른 저항력, 레일의 편마모, 댐퍼의 동적 성능 등 복합적인 품질 인자를 정량적으로 분해하고 시각화할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 오븐 드롭다운 도어 동적 특성 프로파일 측정

가. 실험 개요 및 핵심 메커니즘

본 실험은 오븐(모델명: LSIS6338FE)의 드롭다운 도어(Drop-down Door)를 대상으로 한다. 오븐 도어는 고열을 견뎌야 하는 두꺼운 유리와 단열재로 구성되어 무거울 뿐만 아니라, 하방으로 열리는(Drop-down) 구조 특성상 사용자가 도어의 하중을 온전히 감당해야 하는 위험성이 존재한다. 따라서 오븐 도어에는 카운터밸런스 힌지(Counter-balance Hinge)가 적용되어 도어의 무게(중력 모멘트)를 상쇄한다. 이는 사용자가 도어를 여닫는 데 필요한 조작력을 최소화하여 인체공학적 편의성과 화상 등의 안전사고를 방지하기 위한 핵심 기술이다.

이러한 시스템에서 6축 F/T 센서가 측정하는 사용자 조작 토크(T_{user}), 즉 힌지 축(Z축)에 대한 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$T_{user}(\theta) = T_{gravity}(\theta) - T_{spring}(\theta)$$

여기서, $T_{gravity}$ 는 도어의 자중에 의한 중력 모멘트, T_{spring} 은 힌지 내부의 스프링 및 캠 메커니즘이 생성하는 복원 토크이다. 즉, 측정되는 값 T_{user} 는 두 힘이 상쇄된 후 남는 잔여 토크(Residual Torque)이며, 이상적인 힌지 설계란 이 잔여 토크를 사용자가 의도한 수준(가벼움 또는 고정)으로 제어하는 것을 의미한다.

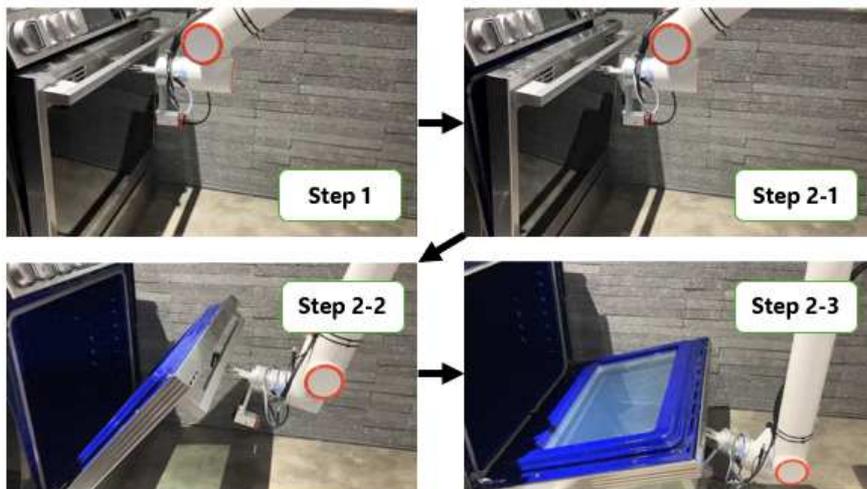
나. 실험 구성

1) 측정 시나리오 및 모션 생성

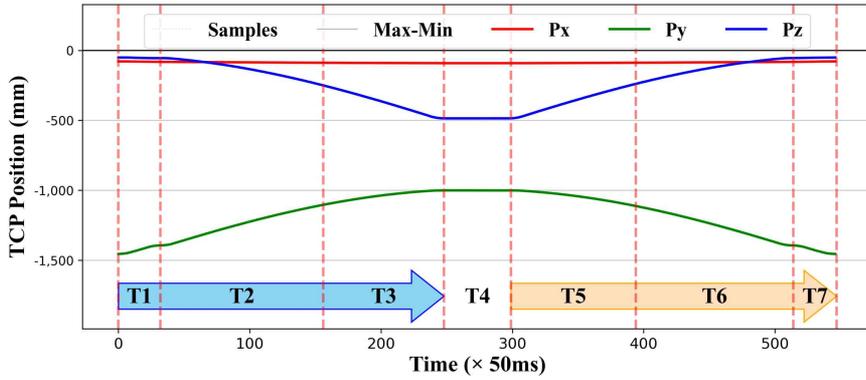
오븐 도어의 개방 동작은 힌지 메커니즘과 사용자 습관을 고려하여 [그림 4-12]와 같이 2단계 모션으로 구성한다. 일시 정지 후 폐쇄 동작은 2단계 모션을 역순으로 수행한다. 실험은 동일한 모션을 총 30회 반복 측정을 수행하며, 50ms 주기로 F/T 센서의 힘/토크 데이터를 동기화하여 수집한다.

가) Step 1 (초기 개방): 도어가 완전히 닫힌 상태에서 강한 저항력을 극복하고 움직임을 만들기 위해 수평 방향으로 당기는 동작을 수행한다.

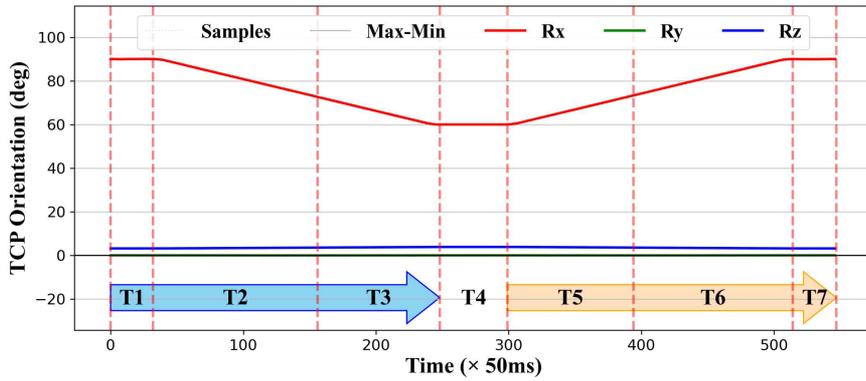
나) Step 2 (회전 개방): 초기 개방 이후 도어를 80° 까지 개방하는 회전 (Rotation) 동작을 수행한다. 이때 로봇은 힌지 축을 중심으로 원호 궤적을 그리며, [그림 4-13](c)와 같이 각속도를 일정하게 유지하는 사다리꼴 프로파일을 생성한다. 이전 냉장고 실험과 달리, 말단장치의 구조적 한계로, 오븐 도어 실험은 직선 운동과 회전 운동을 동시에 수행하는 복합 모션으로 구성한다.



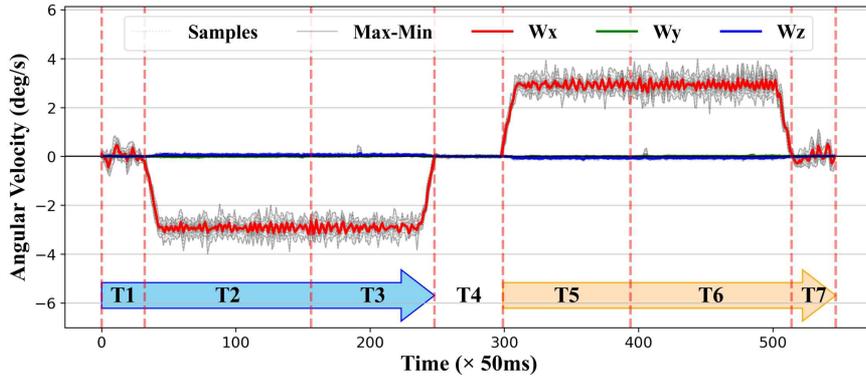
[그림 4-12] 프로파일 측정 실험 구성 (오븐 드롭다운 도어)



(a) TCP 위치 (베이스 프레임 기준)



(b) TCP 방향 (베이스 프레임 기준)

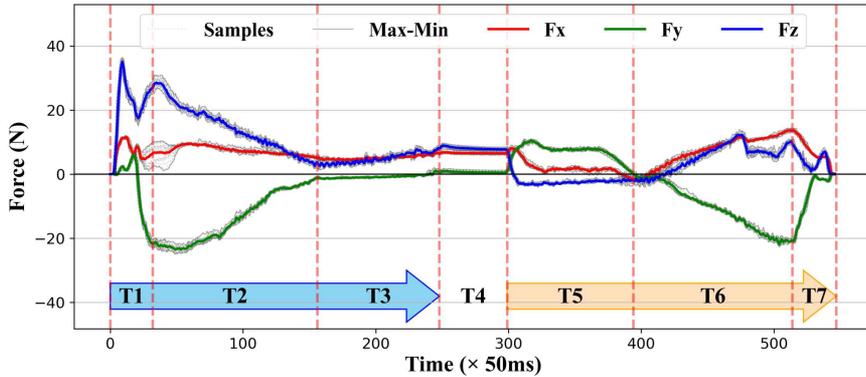


(c) TCP 각속도 (베이스 프레임 기준)

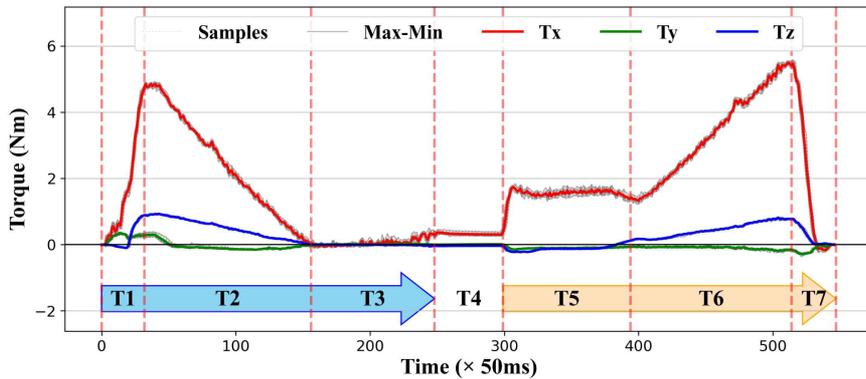
[그림 4-13] TCP 자세 및 각속도 프로파일 (오른 드롭다운 도어)

2) 데이터 수집 및 초기화

실험은 동일한 모션을 반복 수행하며, 시간에 따른 6축 힘/토크 데이터를 실시간으로 수집한다. 초기화 단계에서는 중력 보상을 통해 지그의 무게를 소거하여 순수 조작 토크만을 추출할 수 있으나, 본 실험에서는 지그로 인한 토크를 무시한다.



(a) 시간에 따른 3축 힘 프로파일



(b) 시간에 따른 3축 토크 프로파일

[그림 4-14] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (오븐 드롭다운 도어)

다. 실험 결과 분석 및 고찰

1) 힘/토크 프로파일 고찰

[그림 4-14] 시간에 따른 힘/토크 프로파일을 살펴보면, 사용자가 느끼는 토크는 힌지의 축 방향과 같은 토크(T_x)이다. 따라서, 수집된 데이터를 기반으로 도어 개방 각도에 따른 힌지 축 방향 토크를 살펴볼 필요가 있다.

가) 초기 개방 구간: 수평 이동 구간인 T1 구간(최초)에서는 문의 저항력(F_z)와 토크(T_x)는 급격히 증가한다. 이는 최초 오븐이 의도적으로 잘 열리지 않도록 저항 구간이 설계된 것으로 판단된다.

나) 회전 운동 구간: 회전이 시작되는 T2 구간에서는 토크(T_x)가 점차 감소하는 것으로 보아 중력의 영향이 줄어들고 있음을 알 수 있고, 닫힘 과정의 대응되는 구간인 T6 구간은 열림 각도가 줄어들면서 중력의 영향이 다시 증가하고 있다.

다) 카운터밸런스 메커니즘: T3와 T5 구간을 살펴보면, 토크가 일정하게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, T3는 0에 수렴하고 있다. 이는 카운터밸런스 메커니즘이 작동하여 중력의 영향이 상쇄됨을 의미한다. 이때 사용자는 도어의 무게를 거의 느끼지 못하는 조작감을 경험할 수 있다.

2) 오븐 드롭다운 도어 실험 요약

오븐의 드롭다운 도어는 카운터밸런스 메커니즘을 통한 중력 보상 정도에 따라 사용자가 느끼는 조작감이 다를 수 있고, 이는 힌지 방향의 토크를 통해 확인하였다. 본 실험을 통해 축 방향의 토크를 측정할 수 있었으며, 이 동적 특성 데이터를 기반으로 카운터밸런스 메커니즘이 얼마나 넓은 구간에서 작동하고, 중력에 따른 문의 무게를 상쇄하는 효과의 크기를 정량화하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 나아가 이 데이터는 명확한 엔지니어링 스펙(Engineering Specification)으로 변환하여 제품 개발 및 품질 관리의 핵심 지표로 활용될 수 있다.

4. 세탁기 회전형 제어 노브 동적 특성 프로파일 측정

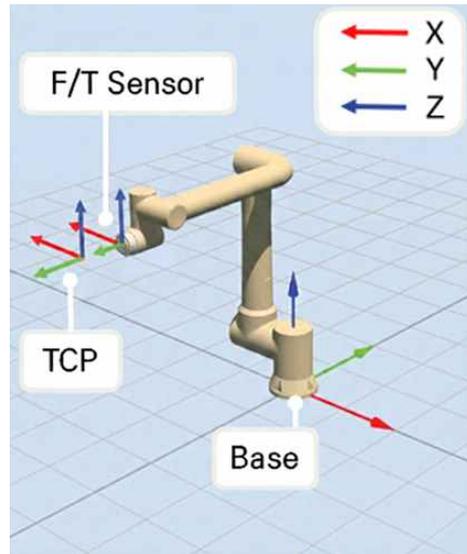
가. 실험 개요 및 핵심 메커니즘

본 실험은 세탁기(모델명:FX24VS)의 회전형 제어 노브를 대상으로 한다. 본 절에서는 앞서 다룬 대형 도어와 달리, 세탁기나 오븐의 노브(Knob)와 같이 작고 미세한 촉각적(Tactile) 피드백이 사용자 경험을 좌우하는 정밀 PUI를 분석한다. 세탁기 프로그램 선택 노브의 핵심 기술은 디텐트 메커니즘(Detent Mechanism)이다. 이 메커니즘은 연속적인 회전 운동을 명확히 구분되는 단계(Step)로 분할하여, 사용자에게 '딸깍'하는 명확한 촉각적 피드백과 함께 정확한 모드 선택을 보장하는 역할을 한다.

디텐트 구조는 일반적으로 스프링으로 지지가 되는 볼(Ball)이나 판스프링이 물결 모양의 캠(Scalloped Cam) 표면을 따라 이동하는 방식으로 구현된다. 로봇이 노브를 회전시킬 때, 접촉체가 캠의 굴곡을 넘어가면서 발생하는 저항력의 변화가 주기적인 회전 토크를 형성하며, 이것이 곧 사용자가 느끼는 조작감의 실체가 된다.



(a) 실험 대상(세탁기 노브)



(b) 초기 좌표계

[그림 4-15] 프로파일 측정 실험 구성 (세탁기 노브)

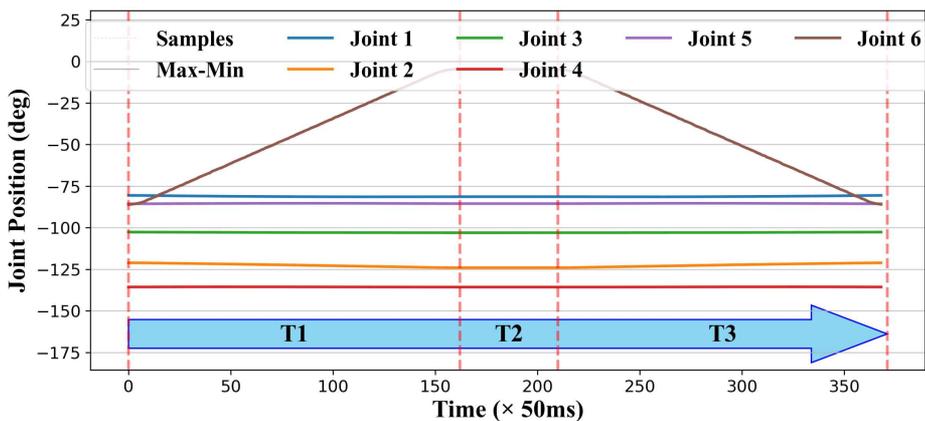
나. 실험 구성

본 실험은 노브 파지를 위해 핸드 그립퍼를 적용한다. 로봇 TCP의 Z축을 노브의 회전축과 정렬한 뒤 핸드 그립퍼로 노브를 잡는다. 이후 협동로봇의 6번 조인트의 회전을 이용하여 표준화된 측정 각속도로 회전시킨다. 실험은 동일한 모션을 3회 반복 수행하며, 시간에 따른 6축 힘/토크 데이터를 실시간으로 수집한다. 회전 구간에서 협동로봇 6번 조인트 각도와 회전 토크(T_2)와 데이터를 수집한다.

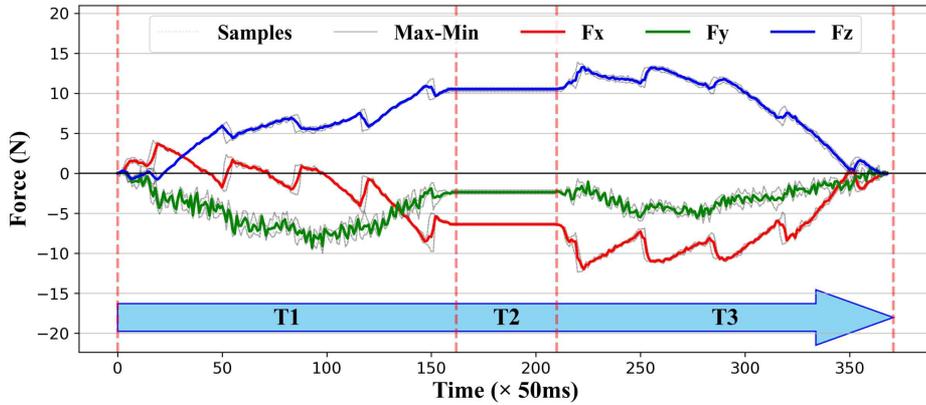
다. 실험 결과 분석 및 고찰

1) 시간에 따른 토크 프로파일

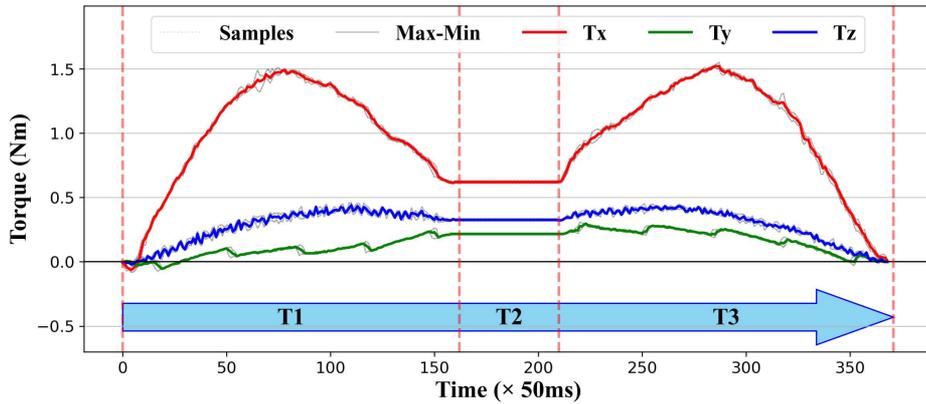
일정한 각속도로 전제로, 시간에 따른 토크 프로파일을 살펴보기로 한다. 토크 프로파일은 디텐트의 기계적 구조를 직접적으로 반영하는 톱니(Sawtooth) 또는 물결(Scalloped) 형태의 주기적인 프로파일을 나타낸다. 언덕(Peak) 구간은 디텐트의 돌출부를 넘기 위해 토크가 증가하는 구간으로 저항감이 상승하고 골(Valley) 구간 돌출부를 넘어 홈에 안착하며 토크가 급격히 감소하거나 '0'으로 수렴하는 구간이다.



[그림 4-16] 협동로봇 조인트 각도 프로파일 (세탁기 노브)



(a) 시간에 따른 3축 힘 프로파일



(b) 시간에 따른 3축 토크 프로파일

[그림 4-17] 시간에 따른 힘/토크 프로파일 (세탁기 노브)

2) 핵심 특징 추출

회전형 제어 노브의 시계열 프로파일은 고유의 동적 특성을 주관적인 감성 품질과 연결할 수 있는 다양한 분석이 가능하다. 토크 프로파일의 최대 토크(무거움), 최소 토크(고정 안정성), 토크 진폭(명확함과 부드러움), 각도 간격(단계 밀도), 토크 기울기(몽특함과 날카로움), 표준편차(일관성, 품질 신뢰도)와 같은 정량적 파라미터(Feature Vector)를 추출하여 객관적 데이터에 기반한 감성 품질 평가를 가능하게 한다.

제 3 절 함수적 주성분 분석(FPCA)를 이용한 동적 특성 추출

1. FPCA 이론적 배경

이전 절에서 측정된 6축 힘/토크 프로파일은 시간 또는 변위에 따라 연속적으로 변화하는 고차원의 시계열 데이터이다. 측정된 데이터를 있는 그대로 분석하는 것은 노이즈로 인한 과적합(Overfitting) 우려가 있으며, 데이터에 내재된 핵심적인 동적 특성을 직관적으로 파악하기 어렵다. 따라서 데이터의 차원을 축소하고 주요 특징을 추출하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA) 기법을 도입할 필요가 있다.

일반적인 PCA가 데이터를 서로 독립적인 이산적 변수의 집합으로 취급하는 것과 달리, 함수적 주성분 분석(Functional Principal Component Analysis, FPCA)은 데이터를 ‘연속적인 곡선(Curve)’으로 간주한다. 협동로봇이 가전제품의 문을 여닫을 때 발생하는 힘과 토크는 시간 또는 변위에 따라 독립적으로 존재하는 값이 아니라, 물리적 메커니즘에 의해 연속적으로 연결된 하나의 함수적 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 데이터의 연속성과 순서 정보를 수학적으로 보존할 수 있는 FPCA를 통한 분석 방법론을 제시한다.⁷⁰⁾

FPCA는 연속성과 순서 정보 보존 이외에도 노이즈 제거(Smoothing), 미분 정보 활용 면에서 장점이 있다. FPCA 분석 과정 중 기저 함수(Basis Function) 확장 과정을 통해 협동로봇 팔의 미세한 진동이나 센서 노이즈(고주파 성분)를 자연스럽게 제거하고, 센서 데이터 거동의 본질적인 형상만을 추출할 수 있다. 또한 미분 가능한 기저 함수의 성질을 이용하여 힘(Force)의 크기뿐만 아니라, 변위에 대한 힘의 변화율(Stiffness)이나 시간에 따른 가속도 변화율(Jerk)과 같은 동적 특성까지 반영하여 분석할 수 있다.

70) Wang, J. L., Chiou, J. M., & Müller, H. G. (2016). "Functional data analysis." Annual Review of Statistics and Its Application, 3, 257-295.

[표 4-4] Standard PCA와 Functional PCA 비교

구분	Functional PCA	Standard PCA
목적	· 데이터의 물리적 해석 및 정밀 동적 분석	· 단순 차원 축소 및 빠른 전처리
데이터 관점	· 데이터를 연속된 곡선(Curve)으로 취급	· 데이터를 이산적인 숫자 묶음(Vector)으로 취급
장점	· 노이즈에 강인함 · 미분값(변화율) 분석 가능	· 구현이 용이함 · 연산 속도가 빠름
활용 분야	· 감성 품질(부드러움, 뻑뻑함)의 물리적 원인 규명	· 딥러닝 모델의 입력 차원 축소 및 과적합 방지

2. FPCA 절차

FPCA 분석은 크게 데이터 전처리, 기저 함수 확장, 그리고 주성분 추출의 3단계로 진행된다. 앞서 [그림 4-7]에서 확인한 것과 같이, PUI의 동작 방식이 달라지는 경우 다른 메커니즘으로 볼 수 있으며, 서로 상이한 동적 특성을 갖는다. 본 절에서는 ‘냉장고 회전형 도어’의 열림 과정과 닫힘 과정에서의 힘/토크 프로파일을 대상으로 FPCA 분석을 수행하였다.

가. 데이터 준비 및 전처리 (Data Preprocessing)

F/T 센서를 통해 수집된 6축 힘/토크 프로파일 원시 데이터(Raw Data)를 분석이 가능한 형태인 함수형 데이터로 변환하기 위해 다음과 같은 전처리 과정을 수행한다.

1) 데이터 정렬(Warping) 및 구간 설정

각 측정 데이터는 TCP 위치 또는 각도, 협동로봇 조인트 각도 등의 변화량이 임계값 이상인 지점을 동작 구분 지점으로 설정할 수 있다. 이 구분 지점을 중심으로 데이터를 정렬하고, 분석 대상 동작의 시작과 끝을 설정하여 분석 대상 데이터를 추출한다.

2) 위치 기준 재구성(Interpolation)

시간 기준의 데이터를 각도 기준의 데이터로 변환한다. 변환된 데이터를 보간(Interpolation)한 후 각 측정 데이터를 동일한 간격(0.1°)으로 각도에 따른 힘/토크 데이터를 갖도록 재구성한다.

3) 데이터 행렬 구성 및 표준화

입력 데이터는 열림 세트와 닫힘 세트로 구분된다. 열림/닫힘 데이터 세트는 각각 30회 측정 데이터로 구성되며, 각 데이터는 900개의 각도 포인트에 대응한 6축 힘/토크 데이터로 구성된다. 측정 단위가 다른 힘(N)과 토크(Nm)를 동시에 분석하기 위해 Z-Score 정규화를 수행한다.

나. 기저 함수 확장(Basis Expansion)

이산적인 점(Discrete Points)들의 집합인 센서 데이터를 수식으로 정의된 연속 함수(Continuous Function)로 변환하는 단계이다. 각 i 번째 측정 데이터의 6개 축 데이터는 기저 함수와 계수의 선형 결합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{ij}(\theta) = \sum_{k=1}^K c_{ijk} \phi_k(\theta)$$

여기서 j 는 6개의 축 인덱스(F_x, \dots, T_z), $\phi_k(\theta)$ 는 기저 함수, c_{ijk} 는 기저 계수이다. 기저 함수는 문을 여는 초기 시점의 급격한 힘 변화(Peak)와 비주기적인 특성을 잘 표현할 수 있는 B-Spline 기저 함수를 사용한다. 기저 함수의 개수(K)는 과적합과 과소적합을 고려하여 20개로 설정하였다. 이를 통해 각 측정 샘플의 6축 힘/토크 데이터는 기저 함수와 계수의 선형 결합으로 표현된다. 이 과정을 통해 900개의 데이터 포인트는 20개의 기저 계수로 압축되며, 미분 가능한 함수 형태를 갖게 된다.

다. 다변량 주성분 분석

6축 힘/토크 센서 데이터는 축 간의 강한 상관관계(Coupling)를 가진다. 따라서 축별로 독립적인 분석(Univariate FPCA)을 수행하기보다는 6개의 축을 하나의 6차원 벡터 함수로 묶어서 분석하는 다변량 FPCA(Multivariate FPCA)를 수행한다.

1) 공분산 연산자 정의

6개 축을 결합한 벡터 함수 $X(\theta) = [F_x(\theta), \dots, T_z(\theta)]^T$ 에 대한 공분산 함수를 계산하여 축 간의 교차 상관성(Cross-correlation)을 반영한다. 단계별로 살펴보면, 기저 함수 확장을 통해 얻은 모든 함수화된 곡선들을 평균하여 평균 함수를 산출하는 단계, 각 함수화된 데이터에서 평균 함수를 빼는 중심화(Centering) 단계, 중심화된 다변량 함수 데이터를 이용하여 표본 공분산 함수를 구하는 단계 순으로 공분산 연산자를 정의할 수 있다.

2) 고유함수(Eigenfunction) 추출 및 FPC 점수(Score) 산출

데이터의 변동성을 가장 잘 설명하는 결합된 주성분(Joint Eigenfunctions)을 추출한다. 이를 통해 F_z 가 변할 때 T_y 가 어떻게 반응하는지와 같은 협응 동작의 패턴을 포착할 수 있다.

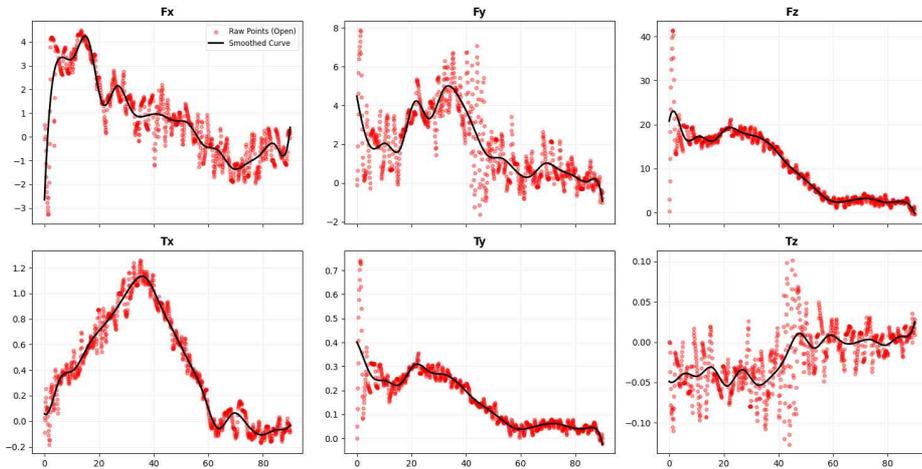
각 실험 시도가 추출된 주성분 패턴을 얼마나 강하게 포함하고 있는지를 나타내는 점수(Score)를 계산한다. FPC 점수는 고차원 데이터를 추출된 주성분(고유함수)에 대응하는 가중치(계수)인 몇 개의 숫자(Score Vector)로 표현하여 차원 축소한 결과이다.

3. FPCA 결과 및 고찰

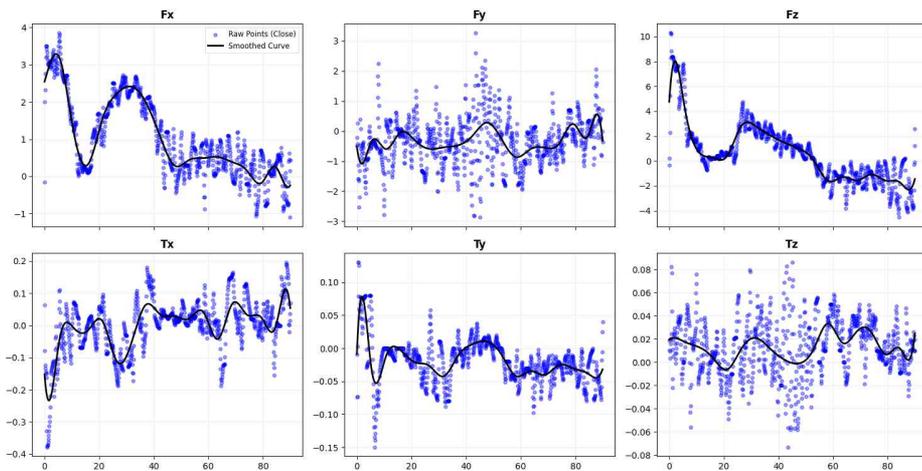
이전 절에서 측정된 냉장고 회전형 도어의 열림 과정과 닫힘 과정의 6축 힘/토크 프로파일 데이터를 이용하여 FPCA를 수행한 결과는 다음과 같다. 이전 절에서 데이터 분할($0 \sim 90^\circ$) 및 정렬(0° 기준)이 완료된 데이터를 기준으로 데이터 행렬을 구성한 후 정규화를 수행하였다.

가. 기저 함수 변환 결과

[그림 4-18]은 이산적인 측정 데이터에 B-Spline 기저 확장($K=20$)을 적용한 샘플을 보여준다. 데이터의 전반적인 경향성을 유지하면서 고주파 노이즈가 제거된 부드러운 곡선 형태를 얻을 수 있었다. 원시 데이터의 산포도 대비 B-Spline으로 변환된 평활화된 곡선 그래프(검은색)를 확인할 수 있다.

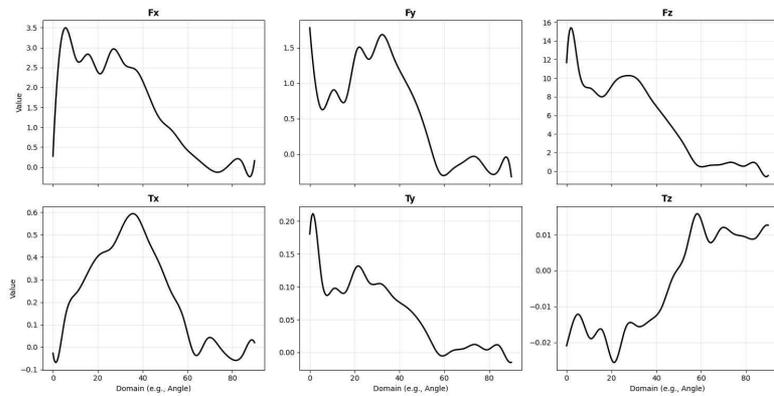


(a) 열림 과정의 기저 함수 확장

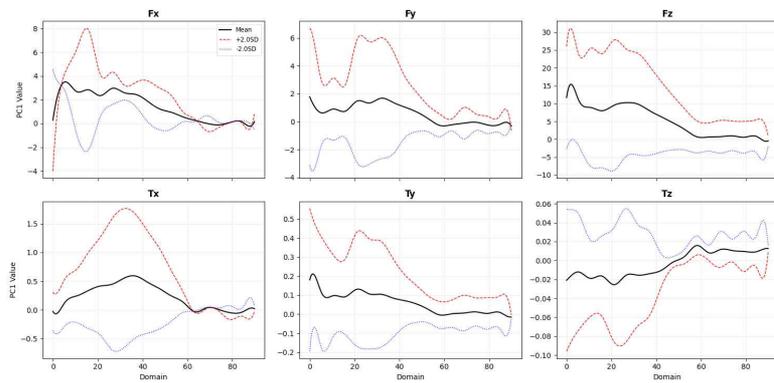


(b) 닫힘 과정의 기저 함수 확장

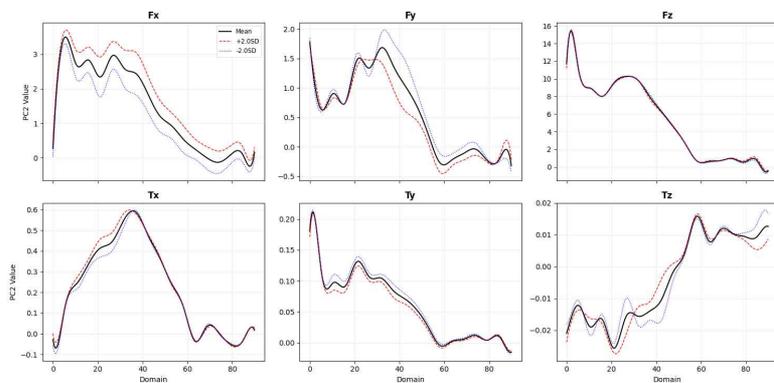
[그림 4-18] 열림/닫힘 과정의 기저 함수 전개 예시



(a) 평균 함수
(Mean \pm 2.0*Std Variation)



(b) PC1 변동 모드(± 2 표준편차)
(Mean \pm 2.0*Std Variation)



(c) PC2 변동 모드(± 2 표준편차)

[그림 4-19] 열림/닫힘 과정의 평균 함수 및 주성분 변동 모드

나. 다변량 FPCA 분석 결과

[그림 4-19]는 열림/닫힘 과정의 6축 힘/토크 통합 데이터에 대한 다변량 주성분 분석 결과이며, 추출된 평균 함수(a), 제1주성분 변동 모드(b), 제2주성분 변동 모드(c)를 각각 나타낸다.

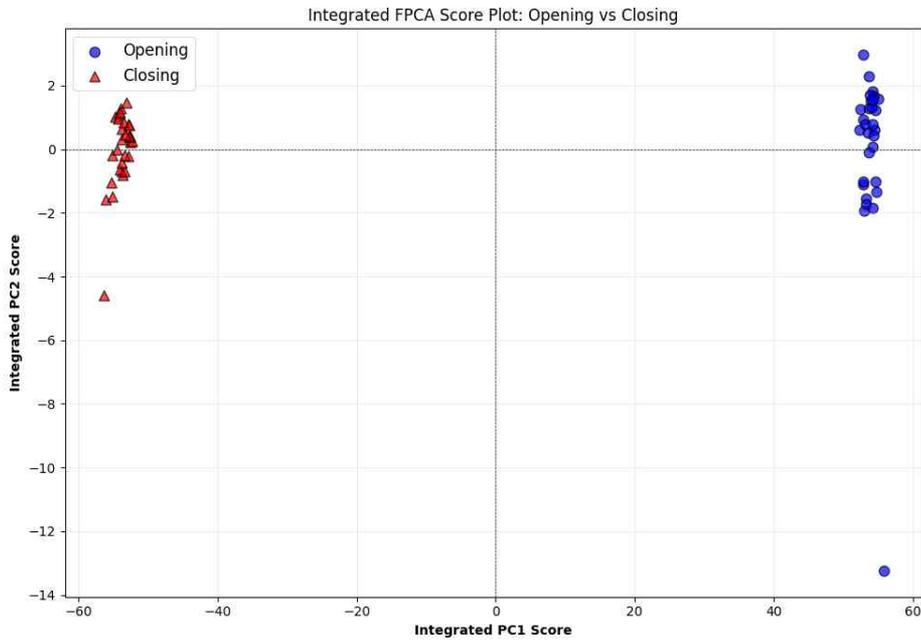
평균 함수(a)는 열림/닫힘 전체 데이터들이 공통적으로 가지고 있는 표준 동작 패턴을 나타낸다. FPCA 분석은 평균 함수를 기준으로 한 변동을 분석하는 것으로, 평균 함수는 주성분의 영향을 해석하는 기준선이 된다.

제1주성분 변동 모드(b)와 제2주성분 변동 모드(c)는 평균 함수에서 ± 2 표준편차만큼 변동한 곡선으로, 약 95%의 데이터 수준의 통계적인 분포 범위를 시각화한 것이다. 제1주성분(PC1) 함수는 데이터 곡선들이 평균 함수로부터 가장 크게 벗어나는 형상적 특징을 나타내며, 열림과 닫힘 과정 사이의 힘/토크 프로파일 형태 차이를 나타낸다. 이는 자기 개스킷의 히스테리시스 특성과 도어 방향에 따른 힌지 캠 형상 차이에서 기인한다.

분석 결과, 제1주성분(PC1)과 제2주성분(PC2)은 전체 데이터 변동의 대부분(99% 이상)을 설명할 수 있음을 확인하였다. PC1의 설명력(99.39%)이 압도적으로 높은데, 이는 앞서 설명한 히스테리시스와 힌지 특성으로 인해 열림/닫힘 과정의 동적 특성이 명확히 다른 패턴을 보이기 때문이다. PC2는 0.16%의 설명력을 가지며, PC1으로 설명되지 않는 미세한 동적 특성이나 측정 간 변동을 반영한다.

다. 군집 분석 (Clustering) 결과

군집 분석을 통해 앞서 확인된 열림 동작과 닫힘 동작 간의 명확한 동적 특성 차이를 시각적으로 더 명확히 확인할 수 있다. 산출된 PC1과 PC2 점수를 2차원 평면에 투영하여 산점도(Scatter Plot)로 시각화하였다. 기계적 메커니즘이 상이한 열림과 닫힘 과정 데이터가 서로 다른 영역에 군집(Cluster)을 형성하며 명확히 구분되었다. 이는 FPCA를 통해 물리적 특성의 차이를 수학적으로 명확히 분별할 수 있음을 의미하며, 향후 감성 품질의 목표 기준 설정 및 이상 탐지를 위한 지표로 활용될 수 있음을 시사한다.



[그림 4-20] 열림/닫힘 과정의 주성분 점수(PC Score) 산점도

4. FPCA 요약 및 인공지능 모델과의 연계

본 연구에서는 고차원 시계열 데이터인 힘/토크 프로파일에 FPCA를 적용하여 6축 데이터의 상호 연관성(Coupling)과 시계열적 연속성을 보존하면서 차원을 크게 축소하였고, 단순한 최대 힘 비교를 넘어 제품의 동적 특성을 정량화된 지표로 변환하였다. 특히, 주성분 점수(PC Score) 산점도를 통해 제품군 간의 물리적 특성 차이를 시각화하였다. [표 4-5]와 같이, FPCA를 통해 얻은 정보는 인공지능 모델 경량화, 노이즈 제거 및 과적합 방지, 데이터 증강, 이상 탐지 및 품질 판정 등에 활용될 수 있다. 특히, FPCA를 통해 추출된 주성분 점수는 향후 딥러닝 기반 감성 품질 평가 모델의 고품질 입력 피처(Feature)로 활용될 수 있다.

[표 4-5] FPCA 활용 분야

활용 분야	주요 내용
모델 경량화	<ul style="list-style-type: none"> · (Batch, N, 6) 형태의 방대한 원시 데이터 대신 (Batch, K) 형태의 FPC Score를 입력으로 사용하여, 모델의 학습 속도를 높이고 연산 비용을 절감할 수 있다.
과적합 방지 및 노이즈 제거	<ul style="list-style-type: none"> · 원시 데이터의 노이즈가 제거된 주요 특징(Principal Components)만을 학습함으로써, 적은 데이터셋으로도 딥러닝 모델의 일반화 성능을 확보할 수 있다.
데이터 증강	<ul style="list-style-type: none"> · 주성분 축 방향으로 데이터를 수학적으로 변동(Perturbation)시킨 후 역변환(Inverse PCA)함으로써, 물리적으로 타당한 가상의 불량/정상 데이터를 생성하여 학습 데이터를 확충할 수 있다.
이상 탐지 및 품질 판정	<ul style="list-style-type: none"> · 정상 제품의 PC Score 분포(Cluster)를 학습하여, 이 범위를 벗어나는 데이터를 힌지 결합이나 조립 불량으로 자동 판정하는 시스템 구축이 가능하다.

제 5 장 결 론

제 1 절 연구 요약 및 시사점

본 연구는 제품의 물리적 사용자 인터페이스(PUI)가 갖는 동적 특성을 객관적으로 평가하고 관리하기 위한 새로운 방법론을 제시하였다. 기존의 수동 측정 방식이 내포한 작업자 주관성, 낮은 재현성, 데이터의 단편성 등의 한계를 극복하기 위해, 협동로봇과 6축 힘/토크 센서를 융합한 자동화 측정 시스템을 설계 및 구축하고 표준 측정 프로토콜을 정립하였다. 본 연구를 통해 냉장고, 세탁기, 오븐 등의 가전제품 PUI를 대상으로 실험을 수행한 결과, 제안된 시스템이 재현성, 객관성, 진단 능력 측면에서 기존 방식 대비 우수한 성능을 보유하고 있음을 실증하였다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다.

첫째, 정밀하고 반복 가능한 측정 플랫폼을 구축하였다. 협동로봇의 정밀 제어와 고해상도 6축 센싱 기술을 결합하여, PUI 조작 시 발생하는 3차원 힘/토크 프로파일을 연속적으로 획득할 수 있는 시스템을 구현하였다. 이는 정적인 수치에 머물던 기존 데이터를 시계열 기반의 동적 프로파일로 확장함으로써, 감성 품질 예측을 위한 고신뢰성 기초 데이터를 확보했다는 데 의의가 있다.

둘째, 협동로봇 측정 시스템의 효용성을 입증하였다. 로봇의 유연한 궤적 제어와 6축 센싱을 통해, PUI의 복합적인 기구적 특성을 입체적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 특히 ISO 안전 규격을 준수하는 협동로봇의 활용은 산업 현장에서의 즉각적인 적용 가능성을 보여주었다.

셋째, 데이터 기반 분석 방법론을 제시하였다. 함수적 주성분 분석(FPCA)과 같은 통계적 기법을 통해 시계열 데이터에서 동적 특성을 결정짓는 핵심 인자(Key Factors)를 추출하고, 인공지능 모델을 통해 감성 품질 예측, 이상 탐지 및 품질 판정 등에 활용할 수 있는 구체적인 방안을 제시하였다.

제 2 절 기대 효과 및 활용 방안

본 연구를 통해 가전제품 PUI의 감성 품질 관리 패러다임 전환이 기대된다. 수동 측정 방식이나 전용 측정 장비에 의존해 왔던 측정 방식의 한계를 넘어 협동로봇이 측정한 정량적 데이터를 기반으로 동적 특성을 객관화할 수 있다. FPCA를 통해 도출된 주성분 점수(PC Score)는 각 가전제품 고유의 동적 특성을 압축적으로 정의할 수 있게 한다. 이는 단순한 수치를 넘어 제품의 동적 거동 형상 자체를 표준화하는 것으로, 데이터의 무결성과 높은 반복 재현성을 바탕으로 더욱 엄격하고 신뢰성 있는 품질 관리 체계를 구축할 수 있는 기준이 될 것이다.

또한, 가전제품 PUI의 연구 개발의 효율성을 극대화하고 제조 경쟁력을 강화할 수 있다. 협동로봇 기반 측정 시스템을 통해 확보한 가전제품 PUI의 정량적인 데이터를 바탕으로 설계 초기 단계에서 문제점을 조기에 발견하고 수정함으로써 전체적인 제품 개발 기간을 단축할 수 있다. 여기에 FPCA의 역변환(Inverse PCA) 기법을 활용한 데이터 증강(Data Augmentation) 기술을 접목하여 물리적으로 타당한 다양한 조건의 데이터를 가상으로 생성하여 검증함으로써, 시제품 제작 및 테스트 과정에서의 시간과 비용을 감소시키는 효과를 거둘 수 있다.

그리고, 본 연구는 인공지능 및 디지털 트윈과의 연계성을 가진다. 협동로봇 기반 측정 시스템을 통해 축적된 고품질의 표준화된 데이터는 향후 딥러닝 기반의 감성 품질 예측 모델을 개발하기 위한 핵심 데이터셋으로 활용될 수 있다. 또한, 정상 제품의 PC Score 군집(Cluster)을 벗어나는 데이터를 즉각적으로 식별하는 이상 탐지(Anomaly Detection) 알고리즘을 적용하여 PUI의 조립 불량이나 이음, 진동 등을 실시간으로 진단하는 지능형 자동화 검사 솔루션으로 활용할 수 있다. FPCA를 통해 고차원의 시계열 데이터는 저차원의 주성분 점수로 압축할 수 있고, 이는 인공지능 모델 경량화를 가능하게 하는 한편, 방대한 시계열 데이터를 연산하는 부하 낮추고 실시간으로 품질 이상을 확인하는 방안이 될 것이다.

제 3 절 향후 연구 과제

본 연구는 가전제품 PUI의 물리적 특성 계측과 기구적 해석에 집중하였다. 이를 바탕으로 진정한 의미의 정량적 감성 공학을 실현하기 위해 다음과 같은 후속 연구를 제안한다.

첫째, 가상 햅틱 검증 시스템의 구축이 필요하다. 측정된 동적 프로파일 데이터를 햅틱 디스플레이 장치로 전송하여, 가상환경에서 실제 제품의 조작감을 그대로 재현하는 시뮬레이터를 개발해야 한다. 이는 시제품 제작 없이도 디자인 초기 단계에서 조작감을 검증하고 수정할 수 있는 혁신적인 디지털 트윈 기반 프로세스를 가능하게 할 것이다.

둘째, 감성 예측 AI 모델의 개발이 요구된다. 본 연구에서 획득한 고정밀 물리 데이터와 실제 사용자를 대상으로 수행한 대규모 관능 평가 결과를 매칭하여 데이터셋을 구축해야 한다. 이를 기반으로, 물리적 신호만 입력하면 사용자가 느낄 감성 점수를 추론하는 딥러닝 기반의 회귀모델을 개발할 필요가 있다. 나아가, 제품 설계 단계에서 목표로 하는 감성 품질을 입력하면 이를 구현하는 데 필요한 최적의 기구 설계 변수를 역으로 제안하는 AI 기반 역설계 모델로의 발전도 기대된다.

셋째, 멀티모달 감성 분석 확장이 필요하다. 사용자의 감성은 촉각뿐만 아니라 청각적 요소에도 크게 영향을 받는다. 따라서 PUI 조작 시 발생하는 힘/토크 데이터와 동기화된 음향 및 진동 데이터를 통합 수집하고, 이를 융합 분석하는 멀티모달 감성 평가 시스템으로 확장해야 한다. 이를 통해 다양한 감각 간의 상호작용의 효과를 심층적으로 규명하고, 총체적인 감성 품질을 만족시키는 설계를 도출할 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 협동로봇 기반 PUI 측정 시스템은 단순한 계측 장비를 넘어, 감성 품질 차별화를 통한 새로운 경쟁력을 확보하고 제품의 가치를 제고하는 데 기여하는 핵심적인 엔지니어링 인프라가 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 김옥기, 연지영, 안상형. (2013). 감성 품질과 브랜드 품질이 고객 만족과 추천 의도에 미치는 영향에 관한 연구. 『경영논집』, 47, 21-50.
- 김휘연, 윤재득, 정용호. (2014). 비선형 캠과 스프링을 이용한 오븐 렌지 도어의 열림 감성 품질 향상 메커니즘 개발. 『한국산학기술학회논문지』, 15(2), 616-624.
- 서만철, 김권희. (2016). 자동귀환 서랍의 감성품질에 대한 설계인자 영향 분석. 『한국정밀공학회지』, 33(8), 655-660.
- 서상원, 이창구. (2010). 드럼세탁기의 감성품질 측정 시스템. 『한국산학기술학회논문지』, 11(3), 821-826.
- 연경수, 이경복, 노광현. (2025). 협동로봇 기반 가전제품 문 개폐 프로파일 측정 시스템에 관한 연구. 『한국산업융합학회논문집』, 28(5), 1423-1432.
- 이경복, 남상준, 노광현. (2025). 휴대용 로봇 캘리브레이션 장치 개발 및 TCP 캘리브레이션 수렴성 개선과 정확도 향상에 관한 연구. 『한국산업융합학회논문집』, 28(3), 799-807.
- 전차수, 추현성, 박세형, 김래현, 신상균. (2010). 햅틱 장치의 프로파일 측정 및 감성 평가. 『한국CDE학회 논문집』, 15(3), 222-233.
- 정현원, 나건. (2007). 감성 평가를 위한 감성의 의미 재정립과 어휘 체계에 관한 연구. 『대한인간공학회지』, 26(3), 17-25.
- 최아영, 우은택. (2005). 감정 분석을 위한 생체 신호 특징 추출. 『한국 HCI 학회 학술대회』, 624-629.
- 최재호. (2013). 감성의 이해를 통한 감성품질의 구조적 접근 방법에 관한 연구. 『대한산업공학회지』, 39(1), 73-77.

2. 국외문헌

- Abu-Dakka, F. J., & Saveriano, M. (2020). Variable impedance control and learning—a review. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 590681.
- Abu-Dakka, F. J., Nemeč, B., Jørgensen, J. A., Savarimuthu, T. R., Krüger, N., & Ude, A. (2015). Adaptation of manipulation skills in physical contact with the environment to reference force profiles. *Autonomous Robots*, 39(2), 199–217
- Ahmadi, R., Rasoulıan, S., Veisari, S. F., Parsaei, A., Heidary, H., Herzog, W., & Komeili, A. (2024). A machine learning approach for predicting pedaling force profile in cycling. *Sensors*, 24(19), 6440.
- Andrade Chavez, F. J., Traversaro, S., & Pucci, D. (2019). Six-axis force torque sensor model-based in situ calibration method and its impact in floating-based robot dynamic performance. *Sensors*, 19(24), 5521.
- Awan, M. I., & Jeon, S. (2025). Estimating Perceptual Attributes of Haptic Textures Using Visuo-Tactile Data. *IEEE Access*.
- Awan, M. I., Raza, A., Hassan, W., Kyung, K. U., & Jeon, S. (2025). Quantifying Haptic Affection of Car Door through Data-Driven Analysis of Force Profile. *IEEE Access*.
- Beyeler, F., Muntwyler, S., & Nelson, B. J. (2009, May). Design and calibration of a microfabricated 6-axis force-torque sensor for microrobotic applications. In 2009 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 520–525). IEEE.
- Bi, Z. M., & Zhang, W. J. (2001). Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*, 39(13), 2867–2894.
- Bohannon, R. W. (2005). Manual muscle testing: does it meet the

- standards of an adequate screening test?. *Clinical rehabilitation*, 19(6), 662–667.
- Canal, R., Bonomo, J. P. A., de Carvalho, R. S., & Gracioli, G. (2024). Torque regression using machine learning techniques in automotive ECUs. *Design Automation for Embedded Systems*, 28(3), 219–243.
- Chen, H., Lu, C., Liu, Z., Shen, C., & Sun, M. (2022). Multi-response optimisation of automotive door using grey relational analysis with entropy weights. *Materials*, 15(15), 5339.
- Chen, X., Barnes, C. J., Childs, T. H. C., Henson, B., & Shao, F. (2009). Materials' tactile testing and characterisation for consumer products' affective packaging design. *Materials & Design*, 30(10), 4299–4310.
- Chung, Y., & Bang, M. S. (2025). A Psychophysical Methodology for Determining Manufacturing Tolerance of Feature Lines on Automotive Outer Panels. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(10), 324.
- Dale, A. M., Rohn, A. E., Patton, A., Standeven, J., & Evanoff, B. (2011). Variability and misclassification of worker estimated hand force. *Applied ergonomics*, 42(6), 846–851.
- Eid, M. A., & Al Osman, H. (2015). Affective haptics: Current research and future directions. *IEEE Access*, 4, 26–40.
- El-Khalili, N., Alnashashibi, M., Hadi, W., Banna, A. A., & Issa, G. (2019). Data engineering for affective understanding systems. *Data*, 4(2), 52.
- Emgin, S. E., Aghakhani, A., Sezgin, T. M., & Basdogan, C. (2018). Haptable: An interactive tabletop providing online haptic feedback for touch gestures. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(9), 2749–2762.

- Falco, J. A., Marvel, J. A., & Norcross, R. J. (2012). Collaborative robotics: Measuring blunt force impacts on humans. *Chest*, 140(210), 45.
- Ferrise, F., Graziosi, S., Furtado, G. P., Bordegoni, M., & Bongini, D. (2013). Re-engineering of the Haptic Feedback of a Dishwasher Door. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(6), 995-1006.
- Giraud, F., Amberg, M., & Lemaire-Semail, B. (2013). Design and control of a haptic knob. *Sensors and Actuators A: Physical*, 196, 78-85.
- Graziosi, S., Ferrise, F., Phillips Furtado, G., & Bordegoni, M. (2014). Reverse engineering of interactive mechanical interfaces for product experience design: This paper proposes a method for guiding the redesign of product interfaces based on a reverse engineering approach. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(2), 65-79.
- Hayami, Y., Wan, W., Koyama, K., Shi, P., Rojas, J., & Harada, K. (2021, January). Error identification and recovery in robotic snap assembly. In *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (pp. 46-53). IEEE.
- Ikejima, T., Mizukoshi, K., & Nonomura, Y. (2024). Predicting Sensory and Affective Tactile Perception from Physical Parameters Obtained by Using a Biomimetic Multimodal Tactile Sensor. *Sensors*, 25(1), 147.
- International Organization for Standardization. (1998). *Manipulating industrial robots—Performance criteria and related test methods (ISO 9283:1998)*.
- International Organization for Standardization. (2011). *Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1:*

- Robots (ISO Standard No. 10218-1:2011).
- International Organization for Standardization. (2016). Robots and robotic devices — Collaborative robots (ISO/TS Standard No. 15066:2016).
- Jafari, N., Adams, K. D., & Tavakoli, M. (2016). Haptics to improve task performance in people with disabilities: A review of previous studies and a guide to future research with children with disabilities. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 3, 2055668316668147.
- Jain, A., & Kemp, C. C. (2013). Improving robot manipulation with data-driven object-centric models of everyday forces. *Autonomous Robots*, 35(2), 143-159.
- Jiang, H., Kwong, C. K., Liu, Y., & Ip, W. H. (2015). A methodology of integrating affective design with defining engineering specifications for product design. *International Journal of Production Research*, 53(8), 2472-2488.
- Jin, B. S., & Ji, Y. G. (2010). Usability risk level evaluation for physical user interface of mobile phone. *Computers in Industry*, 61(4), 350-363.
- Kapadia, M. N., Sonawane, P. D., & Marhatta, A. (2019). Experimentation & analysis of door sag for refrigerator. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2).
- Kim, W. (2021). A study on the subjective feeling affecting tactile satisfaction of leather in automobile: A structural equation modeling approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 84, 103167.
- Kobayashi, D., & Suzuki, Y. (2017). F5-4 Study on Haptic Texture of Buttons for User Interfaces. *The Japanese Journal of Ergonomics*, 53(Supplement2), S568-S571.

- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 1439–1459.
- Leslie, O., Bulens, D. C., & Redmond, S. J. (2023). Design, Fabrication, and Characterization of a Novel Optical 6–Axis Distributed Force and Displacement Tactile Sensor for Dexterous Robotic Manipulation.
- Li, Z., Tian, Z. G., Wang, J. W., Wang, W. M., & Huang, G. Q. (2018). Dynamic mapping of design elements and affective responses: a machine learning based method for affective design. *Journal of Engineering Design*, 29(7), 358–380.
- López, Ó., Murillo, C., & González, A. (2021). Systematic literature reviews in kansei engineering for product design—a comparative study from 1995 to 2020. *Sensors*, 21(19), 6532.
- Mengoni, M., Cavalieri, L., & Raponi, D. (2015, July). A haptic knob as an innovative user interface for visually-impaired. In *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction* (pp. 127–138). Cham: Springer International Publishing.
- Nadeau, N. A., Bonev, I. A., & Joubair, A. (2019). Impedance control self-calibration of a collaborative robot using kinematic coupling. *Robotics*, 8(2), 33.
- Nagamachi, M. (2008). Perspectives and new trend of Kansei/affective engineering. *The TQM Journal*, 20(3), 290–298
- Pagani, R., Nuzzi, C., Ghidelli, M., Borboni, A., Lancini, M., & Legnani, G. (2021). Cobot user frame calibration: Evaluation and comparison between positioning repeatability performances achieved by traditional and vision-based methods. *Robotics*, 10(1), 45.
- Pakkanen, T., Raisamo, R., Raisamo, J., Salminen, K., & Surakka, V. (2010, March). Comparison of three designs for haptic button

- edges on touchscreens. In 2010 IEEE Haptics Symposium (pp. 219–225). IEEE.
- Pérez–Ubeda, R., Zotovic–Stanisic, R., & Gutiérrez, S. C. (2020). Force control improvement in collaborative robots through theory analysis and experimental endorsement. *Applied sciences*, 10(12), 4329.
- Pradanawati, S. A., Harnany, D., Riyandwita, B. W., Ikhtiar, A. R., Sasongko, D. W., Khoiruddin, A. I., ... & Widodo, R. S. (2024). Strength and Deformation Analysis on Car Door Design for Energy Saving Contest. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 3(1), 45–56.
- Puttero, S., Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2025). Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–37.
- Rempel, D. (2025). Biomechanical Models for Estimating Hand Forces When Manually Moving Inert Objects. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1–12.
- Shin, G. W., Park, S., Kim, Y. M., Lee, Y., & Yun, M. H. (2020). Comparing semantic differential methods in affective engineering processes: a case study on vehicle instrument panels. *Applied Sciences*, 10(14), 4751.
- Siciliano, B., & Villani, L. (1999). *Robot force control*. Springer Science & Business Media.
- Silva, B., Costelha, H., Bento, L. C., Barata, M., & Assuncao, P. A. A. (2019, July). Subjective evaluation of haptic feedback technologies for interactive multimedia. In *IEEE EUROCON 2019–18th International Conference on Smart Technologies* (pp. 1–6). IEEE.
- Srinivasan, M. A. (1995). What is haptics. *Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab*, Massachusetts Institute of

Technology, 1–11.

- Stylidis, K., Wickman, C., & Söderberg, R. (2015). Defining perceived quality in the automotive industry: An engineering approach. *Procedia CIRP*, 36, 165–170.
- Taesi, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT applications—recent advances and challenges. *Robotics*, 12(3), 79.
- Tiseo, C., Ivan, V., Merkt, W., Havoutis, I., Mistry, M., & Vijayakumar, S. (2021, May). A passive navigation planning algorithm for collision-free control of mobile robots. In 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 8223–8229). IEEE.
- Tran, T. H., Phan, T. P., Chao, P. C. P., Wang, Y. J., & Wang, C. C. (2017, August). A Six-DOF Force/Torque Sensor for Collaborative Robot and its Calibration Method. In *Information Storage and Processing Systems* (Vol. 58103, p. V001T07A010). American Society of Mechanical Engineers.
- Tu, T. K., Tsai, I. H., Yen, J. Y., Tsao, T. C., & Tsai, M. C. (2021). Improved haptic transparency of bilateral control using torque-measured magnetic coupling. *Machines*, 9(8), 172.
- Verner, L. N., & Okamura, A. M. (2009, March). Force & torque feedback vs force only feedback. In *World Haptics 2009—Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (pp. 406–410). IEEE.
- Wang, J. L., Chiou, J. M., & Müller, H. G. (2016). "Functional data analysis." *Annual Review of Statistics and Its Application*, 3, 257–295.
- Wu, B., Klatzky, R. L., & Hollis, R. L. (2011). Force, torque, and stiffness: Interactions in perceptual discrimination. *IEEE*

transactions on haptics, 4(3), 221–228.

- Wurzelbacher, S. J., Lampl, M. P., Bertke, S. J., & Tseng, C. Y. (2020). The effectiveness of ergonomic interventions in material handling operations. *Applied ergonomics*, 87, 103139.
- Yang, H., Acar, A., Xu, K., Deguet, A., Kazanzides, P., & Wu, J. Y. (2025). An effectiveness study across baseline and learning-based force estimation methods on the da vinci research kit si system. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*.
- Yu, G., Cheng, S., & Zhang, X. (2007, December). Application of haptics in reverse engineering based on physical objects. In *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages (DMAMH 2007)* (pp. 147–151). IEEE.

ABSTRACT

A Study on Collaborative Robot-based Measurement Method for Evaluating Dynamic Characteristics of Physical User Interfaces in Home Appliances

Yeon, Kyung-Su

Major in Smart Convergence Product

Dept. of Smart Convergence Consulting

The Graduate School

Hansung University

The paradigm of the home appliance market is shifting as functional performance reaches a high level of standardization and consumer interest in affective elements grows. Amidst this trend, the haptic quality provided by the Physical User Interface (PUI) has emerged as a core competitive factor. While the affective quality intuitively perceived by consumers during operation exerts a decisive influence on purchasing decisions, conventional measurement methods employed to enhance this quality have faced fundamental limitations in securing data repeatability and reliability due to their dependence on operator proficiency and subjectivity. Furthermore, fixed automation equipment dedicated to specific products suffers from insufficient flexibility, rendering it unsuitable for rapid quality evaluation and R&D within high-mix low-volume production systems.

To overcome these limitations and quantify subjective affective quality into objective dynamic characteristic indices, this study proposes a flexible PUI dynamic characteristic measurement system that integrates a 6-axis collaborative robot (cobot) and a 6-axis force/torque (F/T) sensor. The proposed system is designed to flexibly adapt to various forms of PUIs through precise motion generation that mimics human arm movements using the collaborative robot. The 6-axis F/T sensor captures the multi-dimensional interactive forces and torques generated throughout the entire process of the robot manipulating the PUI. Additionally, a standardized measurement protocol was established to ensure the consistency of the measurement data.

To verify the system's performance, empirical experiments were conducted to quantify the dynamic characteristics derived from the operating mechanisms of PUIs in representative home appliances, such as refrigerators, ovens, and washing machines. In the refrigerator rotating door experiment, force/torque profiles for the entire opening and closing process were continuously acquired, including the initial breakaway force caused by the magnetic gasket, the auto-closing zone driven by the hinge system, and friction characteristics. In the refrigerator drawer experiment, the resistance force due to rail inclination, rolling friction, vibration, and the soft-closing zone were quantitatively characterized. In the oven drop-down door experiment, the gravity compensation torque of the counterbalance hinge was measured to analyze the weight perceived by the user. Furthermore, the washing machine knob experiment demonstrated the system's precise measurement capability by finely capturing the periodic torque patterns generated by the detent mechanism.

In this study, Functional Principal Component Analysis (FPCA) was applied to the 6-axis force/torque data measured during the opening and closing process of the refrigerator rotating door. The results of the

multivariate FPCA confirmed that the model possesses high explanatory power regarding the dynamic characteristics contained within the time-series data. Additionally, by confirming that the mechanical differences between the opening and closing processes were clearly distinguished as separate clusters in the Principal Component (PC) score space, the differences in mechanical characteristics were visually elucidated.

In conclusion, the collaborative robot-based measurement system and data analysis methodology established in this study successfully overcame the limitations of conventional manual measurement methods and secured highly reliable time-series data with excellent reproducibility and objectivity for the quantification of affective quality. The obtained high-resolution haptic profile data can be utilized as a key dataset for developing AI-based affective quality prediction models in the future, and is expected to contribute to enhancing the quality competitiveness of home appliances from the early stages of product development to mass production quality control.

【Keywords】 Physical User Interface (PUI), Collaborative Robot, 6-axis Force/Torque Profile, Functional Principal Component Analysis (FPCA), Affective Quality Quantification