

산업용 코일 포장을 위한 협동 양팔 로봇 시스템의 개발

Development of Collaborative Dual Manipulator System for Packaging Industrial Coils

이 해 성¹ · 이 용 희² · 박 재 흥[†]

Haeseong Lee¹, Yonghee Lee², Jaeheung Park[†]

Abstract: This paper introduces a dual manipulator system designed to automate the packaging process of industrial coils, which exhibit higher variability than other structured industrial fields due to diverse commercial requirements. The conventional solution involves the direct-teaching method, where an operator instructs the robot on a target configuration. However, this method has distinct limitations, such as low flexibility in dealing with varied sizes and safety concerns for the operators handling large products. In this sense, this paper proposes a two-step approach for coil packaging: motion planning and assembly execution. The motion planning includes a Rapidly-exploring Random Tree algorithm and a smoothing method, allowing the robot to reach the target configuration. In the assembly execution, the packaging is considered a peg-in-hole assembly. Unlike typical peg-in-hole assembly handling two workpieces, the packaging includes three workpieces (e.g., coil, inner ring, side plate). To address this assembly, the paper suggests a suitable strategy for dual manipulation. Finally, the validity of the proposed system is demonstrated through experiments with three different sizes of coils, replicating real-world packaging situations.

Keywords: Collaborative/Dual Manipulator, Motion Planning, Peg-in-Hole Assembly

1. 서 론

양팔 로봇 시스템(Dual manipulator system)은 단일 로봇 시스템(Single manipulator system)과 다르게 넓은 작업 공간과 협동 작업 능력 등을 바탕으로 그 활용 가능성이 매우 크다. 그 결과, 이러한 양팔 로봇 시스템을 적용한 연구는 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 산업 현장의 조립 공정에서 양팔 로봇을 사용한 협동 작업^[1]을 수행하였으며, 농업 분야에서는 사과 수확^[2]과 같은 작업에서 양팔 로봇의 협동 작업을 통

해 작업의 효율성을 높였다. 또한, 사람처럼 양팔로 물체를 조작하는 것이 가능함을 보여주었다^[3,4]. 이와 같이 양팔 로봇 시스템은 공업, 농업, 그리고 서비스업 등 다양한 사회 분야에서 높은 활용 가능성을 지니고 있다. 이러한 양팔 로봇의 작업 수행에 대한 잠재력은 공정 자동화가 중요하게 여겨지는 Industry 4.0의 핵심 요소 기술로서 그 역할을 수행할 수 있을 것이다^[5]. 특히 제조^[6,7], 분류^[8] 및 포장^[9,10] 등의 분야에서 양팔 로봇의 실 효성이 검증되었다.

산업용 금속 코일(Coil)은 제조업 분야의 핵심 원자재로서 상업적인 수요가 매우 크다. 이에 맞게 금속 코일의 포장을 위한 기술들이 연구되어 왔다. 하지만, 제안된 선행 기술에는 포장 공정을 위한 매우 큰 시설^[11]이 포함되거나, 주로 단일 로봇 시스템에 맞는 특수 그리퍼^[12] 및 부품 정렬 장치^[13]가 개발되는 등 작업 지향적인 환경 구축에 국한되어 있다. 또한, 코일 포장 과정은 고정된 크기의 부품을 가정하는 일반적인 공장 상황과는 다르게 변동성이 높다는 특징^[11]이 있다. 상업적인 수요 때문에 대상 물체인 코일의 크기가 빈번하게 달라지기 때문이다. 이러한 변동성에 대응하기 위한 기존의 방법은 조작자가 직접

Received : Feb. 14. 2024; Revised : Apr. 5. 2024; Accepted : May. 13. 2024

※ This work was funded by POSCO and partly supported by IITP grant funded by the Korea government [NO.2021-0-01343, Artificial Intelligence Graduate School Program (Seoul National University)].

1. Graduated Student, Department of Intelligence and Information, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea (lhs4138@snu.ac.kr)

2. Graduated Student, Interdisciplinary Program in Artificial Intelligence, Seoul National University, Seoul, Korea (henry9804@snu.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Graduate School of Convergence Science and Technology, ASRI, RICS, Seoul National University, Seoul, Korea and Advanced Institutes of Convergence Technology, Suwon 443-270, Korea (park73@snu.ac.kr)

로봇의 목표 자세를 알려주는 직접 교시(Direct teaching)방법^[14]이다. 직접 교시 방법은 그 적용이 쉽다는 장점이 있으나, 가변 환경에 대한 낮은 대응성과 사용자의 안전성 문제가 존재한다. 앞서 언급한 것처럼, 빈번하게 바뀌는 코일의 크기에 맞춰 사용자가 매번 로봇의 목표 자세를 수정해야 하므로 환경 변화에 적절하게 대응하기 힘들다. 또한, 직접 교시를 위해 코일과 같은 큰 물체가 있는 현장에 투입되는 조작자의 안전 문제가 발생할 수 있다.

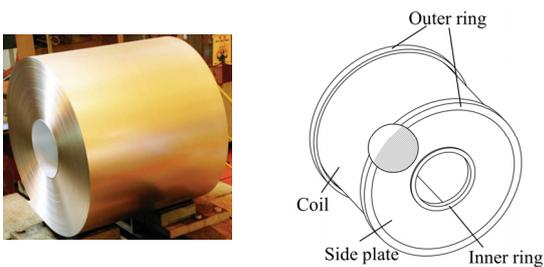
이러한 문제점을 극복하고자 본 연구에서는 다양한 코일의 크기에 대응하여 포장을 수행할 수 있는 양팔 로봇 시스템을 개발하였다. 제안하는 로봇 시스템은 두 단계를 거쳐 코일 포장을 진행한다. 첫 번째는 코일 포장을 위한 로봇의 동작 계획(Motion planning)이다. 이는 양팔 로봇이 포장수행에 필요한 여러 곳의 위치로 움직이는 것을 목표로 한다. 두 번째는 포장을 위한 조립을 수행(Assembly execution)하는 단계이다. 본 연구에서는 포장 과정을 팩인홀(Peg-in-Hole)과정으로 간주하였고, 양팔 로봇이 협동하여 코일 포장 과정을 수행하도록 하였다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 산업 현장 및 로봇을 활용한 코일 포장 과정에 대한 개괄적인 설명을 하고, 3장에서는 제안하는 코일 포장 과정에 대한 상세한 내용을 서술한다. 4장에서는 제안하는 로봇 시스템의 검증을 위한 실험 환경 구축 및 실험 결과에 대해 설명한다. 마지막 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 계획에 대해 서술한다.

2. 협동 양팔 로봇을 이용한 코일 포장

2.1 산업용 코일의 포장 과정

[Fig. 1]은 포장이 완료된 상태의 산업용 코일을 보여준다. 본 논문에서 언급하는 코일은 금속 소재의 얇은 판재를 감아놓은 형태를 의미한다. 포장 과정은 이렇게 감아진 코일에 3가지 부품을 사용하여 진행된다. 측판(Side plate)은 코일의 옆면을 보호하는 용도로 사용된다. 내주링(Inner ring)은 코일의 안쪽 모서리를 보호하는 용도로 사용되는 부품이다. 마지막으로 외



[Fig. 1] Industrial coil

주링(Outer ring)은 코일의 바깥쪽 모서리를 보호하는 용도이다. 각 요소 부품들은 코일 - 측판 - 내주링/외주링의 순서로 층을 이루며 위치하며, 벨트나 테이핑 작업을 통해 단단히 고정된다.

2.2 협동 양팔 로봇을 이용한 코일 포장의 과정

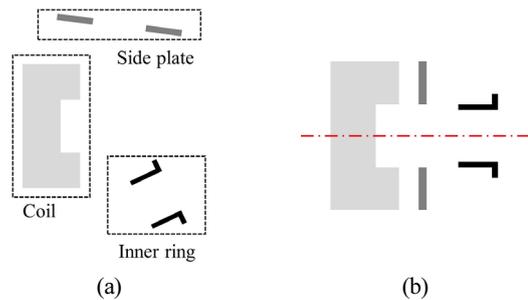
본 연구에서 제안하는 협동 양팔 로봇 시스템은 코일에 대해 측판과 내주링을 결속하는 것을 목표로 한다. 이 과정을 코일 포장을 위한 로봇의 동작 계획과 조립 수행으로 구분하였다.

2.2.1 포장을 위한 로봇의 동작 계획

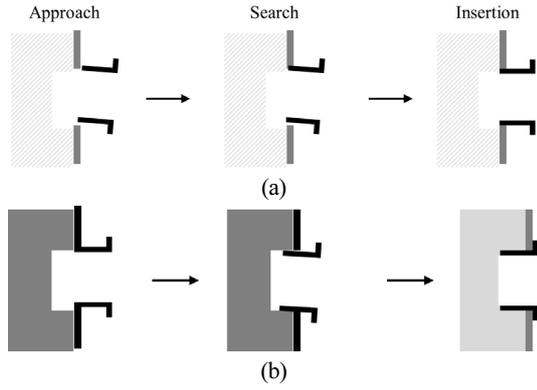
로봇의 동작 계획은 i) 부품을 파지하기 위해 움직이는 동작 계획, ii) 부품을 파지한 상태로 포장 위치까지 움직이는 동작 계획, 그리고 iii) 포장을 완료하고 초기 자세로 복귀하는 동작 계획으로 구성된다. [Fig. 2]는 로봇의 동작 계획을 도식화하여 나타낸 것을 보여준다. [Fig. 2(a)]는 양팔 로봇이 임의의 위치에 놓여진 측판과 내주링을 파지하기 전 상태를 의미하며, [Fig. 2(b)]는 양팔 로봇이 각 부품을 파지한 후 포장 수행을 위한 목표 자세로 움직인 결과를 나타낸 것이다. 포장이 완료된 후에, 다음 포장 과정을 위해 로봇은 초기 자세로 복귀한다.

2.2.2 포장을 위한 조립 수행

조립 수행은 로봇이 코일에 측판과 내주링을 결속하는 단계를 의미한다. 본 연구에서는 코일의 포장 과정에 종이/천 재질이 아닌 금속 부품을 사용하므로, Peg-in-Hole로 묘사되는 조립 과정으로 간주하였다. 하지만 2개의 조작 부품 상황을 고려하는 기존 Peg-in-Hole 연구^[15-17]와는 다르게 코일 포장 과정에는 3개의 부품이 존재한다. 따라서, peg은 두개의 서로 다른 hole을 통과해야 하므로 [Fig. 3]과 같이 2번의 연속적인 조립 과정이 필요하다. 또한, 단일 로봇 시스템이 2개의 고정되지 않은 물체를 조작하려면, 이를 위한 특수 목적의 보조 장치^[12,13]가 요구된다. 따라서, 이러한 작업 지향적인 환경을 피하기 위해서 양팔 로봇 시스템을 활용하는 것이 유리하다.



[Fig. 2] Motion planning: (a) Initial state, (b) Ready for packaging



[Fig. 3] Assembly execution: (a) 1st step, (b) 2nd step

1단계는 측판과 내주링을 조립하는 과정이며 [Fig. 3(a)], 2단계는 측판과 내주링 결합체를 코일에 조립하는 과정이다 [Fig. 3(b)]. 이러한 조립 과정은 모두 동일하게 접근(Approach) - 탐색(Search) - 삽입(Insertion)의 3개의 하위 작업으로 구성된다^[18]. 접근 단계는 부품들 사이의 최초의 접촉을 만드는 과정이다. 탐색 단계는 돌출부(Peg)를 움직여 삽입부(Hole)의 위치를 찾는 과정이며, 삽입 단계는 Peg과 Hole의 위치 및 방위 정렬을 통해 사이의 단단한 결속을 만드는 과정이다.

3. 로봇의 동작 계획 및 조립 수행

3.1 포장을 위한 로봇의 동작 계획

로봇의 동작 계획을 위한 경로 생성을 위한 방법으로 RRT-Connect^[19]를 사용하였다. RRT 계열의 알고리즘은 복잡한 환경에서도 신속하게 목표 위치까지의 관절 경로를 계산하지만, 최적해(Optimal solution)를 찾기 위해서는 무한한 시간이 필요하다. 따라서, 한정된 시간내에서 찾은 경로는 불필요하게 긴 동작을 포함해 작업 시간의 지연을 유발할 수 있다. 이를 개선하고자, RRT-Connect의 결과로 얻어진 로봇의 관절 궤적을 평활(Smoothing)하는 과정^[20]을 추가하여 로봇의 작업 수행 속도를 높일 수 있도록 하였다.

[Algorithm 1]은 로봇의 동작 계획이 진행되는 순서를 나타낸다. RRT_CONNECT 함수는 주어진 로봇의 초기자세 \mathbf{q}_{init} 에서 목표 자세 \mathbf{q}_{goal} 까지 충돌이 없는 경로(Path) \mathcal{T} 를 획득하

[Algorithm 1] Smoothed path planning process

Input: \mathbf{q}_{init} , \mathbf{q}_{goal} , robot constraints \mathcal{C}

Output: smoothed trajectory \mathbf{u}

1. $\mathcal{T} \leftarrow \text{RRT_CONNECT}(\mathbf{q}_{init}, \mathbf{q}_{goal})$

2. $\mathbf{u} \leftarrow \text{SMOOTHING}(\mathcal{T}, \mathcal{C})$

3. **Return** \mathbf{u}

는 과정이다. 이 함수는 MoveIt^[21]에서 제공하는 Open Motion Planning Library^[22]를 활용하여 사용하였다. SMOOTHING 함수는 획득한 경로 \mathcal{T} 와 주어진 로봇 정보 \mathcal{C} 를 사용하여 짧고 부드러운 궤적(Trajectory) \mathbf{u} 를 생성하는 과정이다. 이때, \mathcal{C} 에는 로봇의 관절 범위, 최대 각속도 및 각가속도, 그리고 각속도 및 각가속도의 스케일 팩터(Scale factor)가 포함된다.

3.2 포장을 위한 로봇의 조립 수행

3.2.1 로봇 제어 프레임워크

N 자유도 로봇 팔에 대한 각 관절의 제어 입력을 아래와 같이 정의하였다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{m} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\tau}_g \quad (1)$$

이때, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ 은 토크 입력, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 은 로봇 좌표계($\{B_i\}$, $\{B_a\}$)에 대한 말단장치(End-effector)의 자코비안(Jacobian)행렬, \mathbf{f} 와 $\mathbf{m} \in \mathbb{R}^3$ 은 로봇 좌표계에 대한 말단 장치의 힘과 모멘트이고, $\boldsymbol{\tau}_g \in \mathbb{R}^n$ 은 중력보상 벡터이다.

\mathbf{f} 와 \mathbf{m} 은 조립 수행을 위한 말단 장치의 동작을 생성하는 역할을 하며 motion/force hybrid control^[23,24]을 바탕으로 작성되었다. 예를 들어, motion 성분은 탐색(translation) 및 방위 정렬(orientation)에 해당되는 말단 장치의 x_{ee} 및 y_{ee} 축 성분으로 정의하였고, force 성분은 삽입과 관련된 말단 장치의 z_{ee} 축의 위치와 방위로 정의하였다. 따라서,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ee} \\ \mathbf{m}_{ee} \end{bmatrix} \quad (2)$$

으로 정의된다. 이때, \mathbf{f}_{ee} 와 $\mathbf{m}_{ee} \in \mathbb{R}^3$ 은 말단 장치에 대한 힘과 모멘트이며, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 로봇 좌표계에 대한 말단 장치의 회전행렬이다.

3.2.2 제안하는 조립 전략

기존 연구^[25,26]에서는 양팔 로봇을 Leader/Follower 관계로 정의하였다. 이때, Follower arm의 순응적인 동작의 중요성을 강조하여 조립을 수행하였다. 이러한 순응 동작은 코일 포장의 2단계에서 유용하게 사용될 수 있지만, 코일 포장 1단계의 탐색 과정에서 측판과 내주링의 위치 불확실성을 높일 수 있으므로 적합한 방법이 될 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 양팔 로봇의 관계를 기존 연구와 다르게 Task arm과 Assist arm으로 명명하여 역할을 부여하였다. Task arm은 탐색과 삽입을 주도적으로 수행하는 역할을 하며, Assist arm은 Task arm의 동작을 보조

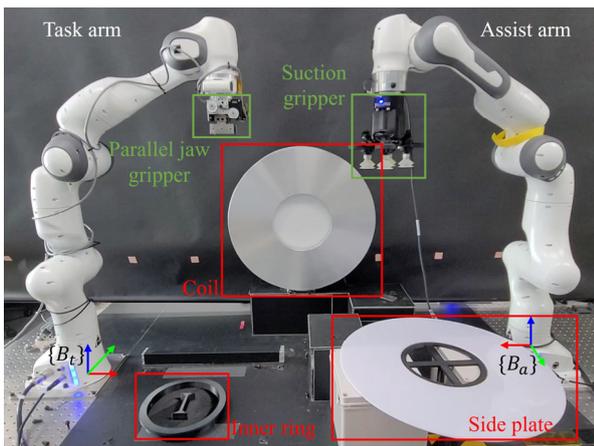
하여 수월한 조립이 이뤄지도록 하는 역할을 한다. 이때, Assist arm은 포장 과정 1단계에서 motion 성분에 대해 높은 위치제어 게인(gain)을 사용하여 현재 위치를 강하게 유지하는 동작(stiff motion)을 생성한다. 반면에, 포장 과정 2단계에서는 motion 성분에 대해 낮은 위치제어 게인으로 Task arm의 탐색 동작^[27,28]에 순응할 수 있는 동작(compliant motion)을 생성하도록 하였다.

4. 실험 환경 구축 및 검증

4.1 실험 환경 구축

제안하는 로봇 시스템의 검증을 위해 [Fig. 4]와 같이 코일 포장 상황을 묘사하는 모의 실험 환경을 구축하였다. 실험 환경에는 Franka Emika의 7자유도 로봇, panda, 2대와 자체 제작한 parallel jaw gripper 그리고 Robotiq의 Epick gripper를 사용하였다. 코일, 측판 그리고 내주링을 형상화한 부품을 각각 알루미늄, 아크릴, 그리고 3d 프린터를 사용하여 제작하였다.

코일 포장 현장의 현실성 반영을 위해 제작한 부품의 크기는 실제 코일 포장 환경과 연구실 실험 환경의 비율을 바탕으로 결정하였다. 산업용 로봇과 협동 로봇의 평균적인 크기가 각각 3 m 내외, 1 m 내외라는 점을 고려하면 축소 스케일은 3이 된다. 따라서, 평균적인 코일의 크기가 1.5 m이므로, [Fig. 4]에 나타난 코일의 크기는 0.5 m이다. 또한 다양한 코일의 크기를 반영하기 위해 0.5 m를 기준으로 서로 다른 3종의 모형을 제작하였



[Fig. 4] Experiment setup

[Table 1] Dimension of components

Type	Coil / Side plate	Inner ring
Small	0.4 m	0.16 m
Standard	0.5 m	0.2 m
Large	0.6 m	0.24 m

고, 그 치수는 [Table 1]과 같이 정리하였다. 로봇 제어용 PC는 Ubuntu 20.04로 작동하며, PC와 로봇 사이의 통신은 Robot Operating System (ROS)을 사용하여 구성하였다.

4.2 로봇의 동작 계획의 검증

서로 다른 크기의 3종의 모형에 대해 수행한 motion planning의 결과를 [Table 2]에 정리하였다. 각 크기별로 10회씩(총 30회) 시도하였으며, smoothing 유무에 따른 구간별 로봇의 동작 시간의 평균을 정리하였다. 3장에서 언급한 것과 같이, 로봇의 동작 구간을 크게 3가지 영역으로 구분하였다. 첫번째는 측판과 내주링을 파지하기 위한 과정(i), 두번째는 포장을 준비하기 위한 자세로 이동하는 과정(ii), 그리고 세번째는 포장 종료 후 초기 자세로 돌아오는 과정(iii)이다.

첫번째 구간에서는 smoothing을 적용한 로봇 동작의 시간이 13.94%(0.57 s)증가한 것으로 나타났다. 이러한 시간증가의 원인은 RRT-Connect의 초기 결과에 있다. 초기 궤적에 불필요한 동작의 요소가 거의 없기 때문에 smoothing 효과가 미미하며, smoothing 계산 시간까지 포함되어 있기 때문에 전체 소요 시간이 증가한 것이다. 이러한 예시는 [Fig. 5(a)]에서 확인이 가능하다. 하지만, 그 외 구간에서는 smoothing을 적용한 로봇 동작의 소요 시간이 각각 42.29%(2.96 s)와 20.33%(1.11 s)로 매우 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 첫번째 구간에 비해 나머지 구간의 짜임새 공간(Configuration space)이 복잡하여 초기 RRT-Connect의 결과에 불필요한 동작 경로가 매우 크게 나타났기 때문이다. [Fig. 5(b)]와 [Fig. 5(c)]는 이에 대한 예시를 보여준다.

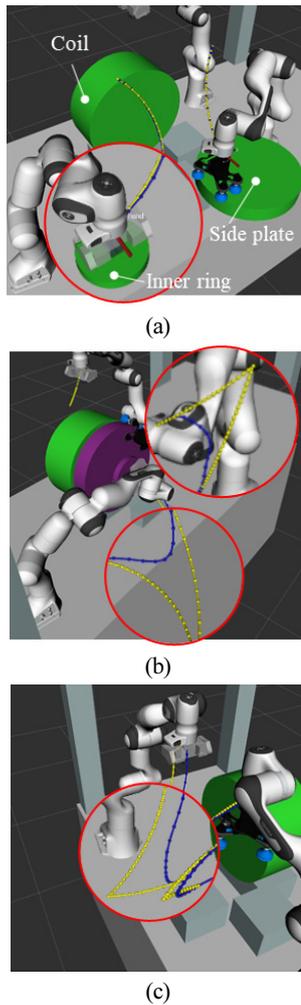
(i) ~ (iii)의 전체 구간에서 소요된 시간을 보면, smoothing에 의해 16.54 s에서 13.06 s로 20.04%(3.48 s) 감소한 결과를 보인다. 궁극적으로 smoothing 과정에 의해 불필요한 동작이 개선되어 전체 소요 시간이 감소한 결과를 보여준다.

4.3 로봇의 조립 수행 검증

각각의 다른 치수의 3종의 형상에 대해 15회씩 포장 과정을 반복하여 수행하였다. 제안하는 양팔 로봇 시스템의 강건성을 위해 목표 위치에 대해 무작위로 위치 오차를 최대 ±5.0 mm까지 부여하였다.

[Table 2] Time consumption without/with smoothing

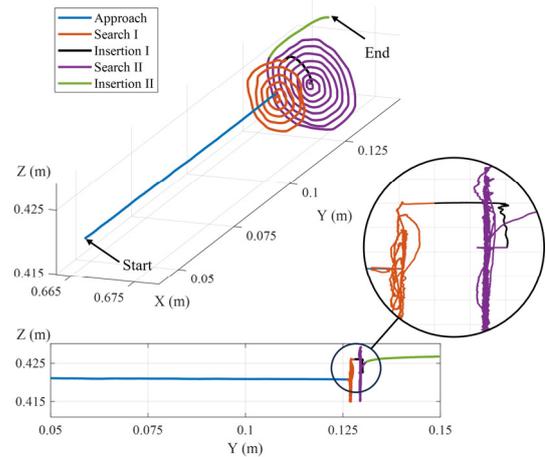
Phase	w/o smoothing	w/ smoothing	Reduction
(i)	4.09 s	4.66 s	-13.94% (0.57 s ↑)
(ii)	7.00 s	4.04 s	42.29% (2.96 s ↓)
(iii)	5.46 s	4.35 s	20.33% (1.11 s ↓)
Total	16.54 s	13.06 s	20.04% (3.48 s ↓)



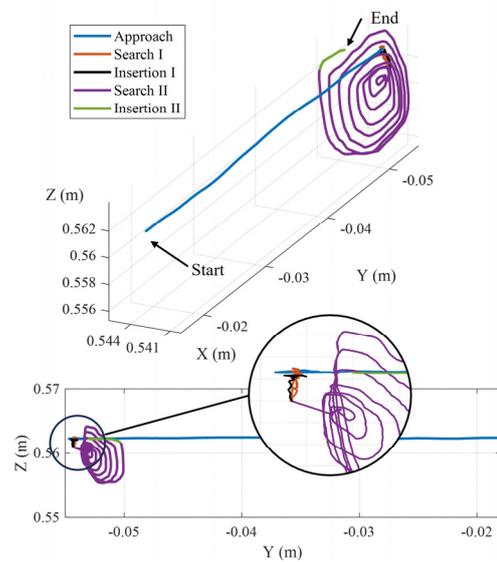
[Fig. 5] Motion planning result with smoothing: Planning to (a) grasp objects, (b) assembly execution, and (c) the initial pose. Yellow-colored trajectory represents the end-effector trajectory without smoothing, while blue-colored trajectory is the corresponding result with smoothing

Assist arm이 현재 위치를 강하게 유지해야 하는 1단계에서는 P gain와 D gain을 각각 1000, 30 등으로 높게 할당하였다. Task arm의 동작에 순응하는 2단계에서는 P gain와 D gain을 각각 100, 1 등으로 낮게 설정하였다.

[Fig. 6]과 [Fig. 7]은 Task arm (i.e., 내주링)과 Assist arm (i.e., 측판)의 포장 과정에서의 말단 장치의 움직인 궤적을 각각의 기준으로 나타낸 그래프이다. 조립 과정을 2단계로 나눠 수행하는 방법을 제안하였기 때문에, Task arm이 서로 다른 2개의 탐색 동작과 삽입 동작을 통해 조립을 시도하는 것을 볼 수 있다. Assist arm은 1단계에서 stiff motion을 생성하였고 2단계에서 compliant motion을 생성하였기 때문에, Search I 과정에서의 위치 변화가 Search II에서 비해 현저히 작은 것을 볼 수 있다.



[Fig. 6] Trajectory of the task arm during the coil packaging



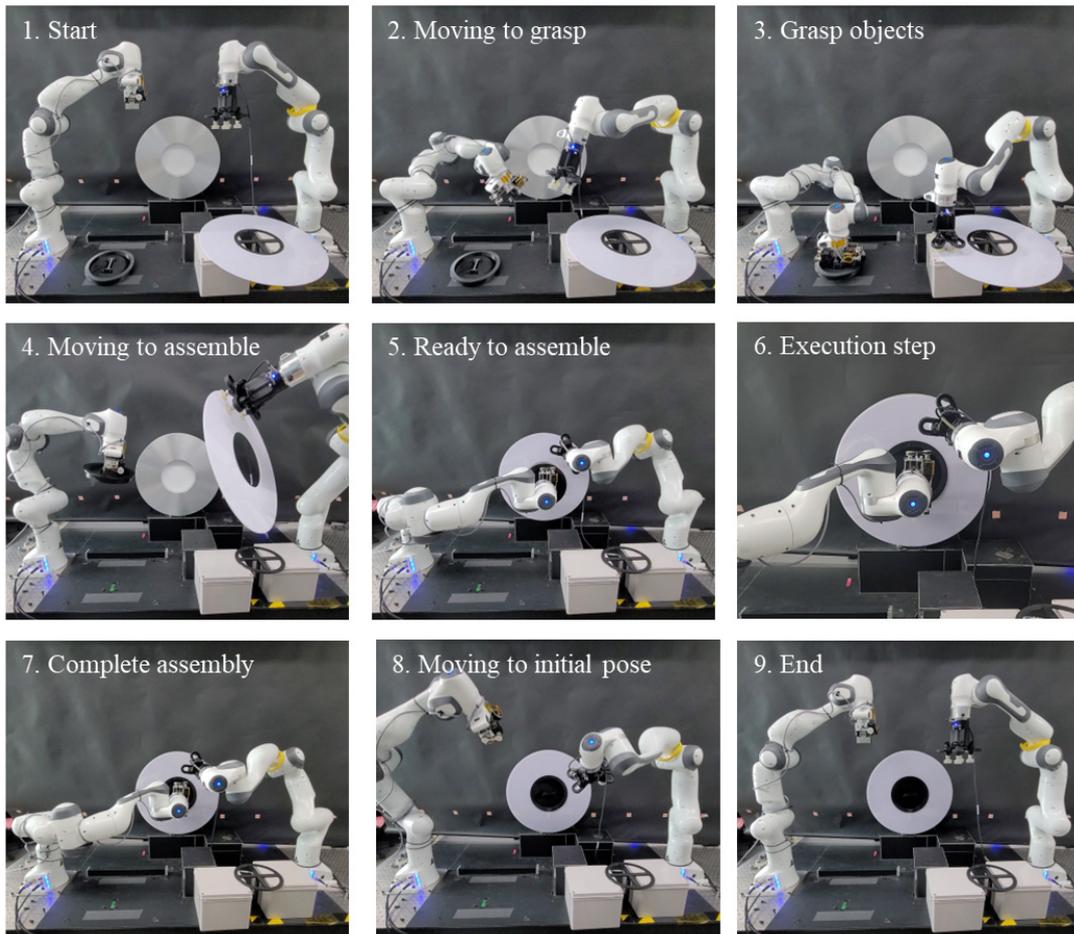
[Fig. 7] Trajectory of the assist arm during the coil packaging

총 45회의 시도 중 44회를 성공하여 97.78%의 성공률을 달성하였다. 실패한 경우는 큰 위치 오차로 인해 탐색 시간이 오래 소요되면서 내주링과 코일 사이의 접촉상태를 부정확하게 인지하여 조립에 실패한 상황에 해당된다.

[Fig. 8]은 제안하는 로봇 시스템이 코일을 포장하는 전체 과정을 스냅샷 형태로 나타낸 것이다. 전체 영상은 <https://youtu.be/QULDMJcQoSsk>^[29]에서 확인이 가능하다.

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 협동 로봇을 사용하여 산업용 코일을 포장하기 위한 양팔 로봇 시스템을 개발하였다. 포장 과정을 로봇의 동작 계획과 조립 수행으로 구분하였다. 로봇의 동작 계획은 포



[Fig. 8] Snapshots of entire packaging process. 1-3 depict the initial pose for grasping the side/inner rings. 4-5 show the planning result to target pose toward the coil. 6 illustrates the execution of assembly strategy, including approach, search, and insertion. 7-9 show the planning result to the initial pose

장을 위해 로봇이 특정 자세로 움직이는 과정이다. 이를 위해 RRT-Connect를 사용하여 충돌이 없는 궤적을 생성하였고, smoothing을 통해 불필요한 움직임을 줄여 로봇의 동작 시간을 감소시킬 수 있었다. 조립 수행은 로봇이 포장을 수행하는 과정을 의미한다. 본 연구에서는 코일의 포장과정을 peg-in-hole 문제로 간주하여 접근하였다. 해당 과정은 3개의 조작물이 존재하는 상황으로 2개의 조작물을 다루는 기존의 peg-in-hole 연구와는 다른 방법이 필요한 상황이다. 이를 위해, Task /Assist 관계로 양팔 로봇을 정의하여 포장을 위한 양팔 로봇의 제어 전략을 제시하였다. 결과적으로 97.78%의 성공률을 보였다.

RRT-Connect를 바탕으로 한 동작 계획의 경우, 로봇의 동작 시간 최소화, 조작도(Manipulability)를 고려한 목표자세 최적화(Goal optimization) 등을 통해 그 성능을 개선할 예정이다. Peg-in-hole 문제로 정의한 조립 수행 과정의 경우, 강건한 접촉 상태 예측으로 포장을 수행할 수 있도록 조립 제어기 및 조립 전략을 고도화시킬 예정이다.

[Fig. 1]에서와 같이, 코일 포장을 위해서는 외주링의 사용도 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 내주링과 측판을 포장하는 것에 그쳤다. 따라서, 향후에는 외주링 결합 및 부품 사이의 테이핑을 사용한 고정 등 코일 포장의 전체에 걸친 과정을 자동화할 수 있는 양팔 로봇 시스템을 제안할 것이다. 이러한 시스템의 개발은 기존에 산업 현장에서 많이 사용되는 직접 교시 방법의 단점을 보완할 수 있는 대체 방법으로 사용될 것이라 기대할 수 있다.

References

- [1] P. Tsarouchi, S. Makris, G. Michalos, M. Stefanos, K. Fourtakas, K. Kaltsoukalas, D. Kontrovakis, and G. Chryssoulouris, "Robotized assembly process using dual arm robot," *Procedia CirP*, vol. 23, pp. 47-52, Dec., 2014, DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.078.
- [2] J. R. Davidson, C. J. Hohimer, C. Mo, and M. Karkee, "Dual robot coordination for apple harvesting," *2017 ASABE annual*

- international meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2017, DOI: 10.13031/aim.201700567.
- [3] O. Kroemer, H. van Hoof, G. Neumann, and J. Peters, "Learning to predict phases of manipulation tasks as hidden states," *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, pp. 4009-4014, 2014, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907441.
- [4] J. Umlauf, D. Sieber, and S. Hirche, "Dynamic Movement Primitives for cooperative manipulation and synchronized motions," *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, pp. 766-771, 2014, DOI: 10.1109/IC-RA.2014.6906941.
- [5] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee, and B. Yin, "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505-6519, 2018, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2783682.
- [6] C. Park and K. Park, "Design and kinematics analysis of dual arm robot manipulator for precision assembly," *2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Daejeon, Republic of Korea, pp. 430-435, 2008, DOI: 10.1109/INDIN.2008.4618138.
- [7] J. F. Buhl, R. Grønhoj, J. K. Jørgensen, G. Mateus, D. Pinto, J. K. Sørensen, S. Bøgh, and D. Chrysostomou, "A dual-arm collaborative robot system for the smart factories of the future," *Procedia manufacturing*, vol. 38, pp. 333-340, 2019, DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.043.
- [8] K. Harada, T. Foissotte, T. Tsuji, K. Nagata, N. Yamanobe, A. Nakamura, and Y. Kawai, "Pick and place planning for dual-arm manipulators," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, pp. 2281-2286, 2012, DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224780.
- [9] L. Gracia, C. Perez-Vidal, D. Mronga, J.-M. de Paco, J.-M. Azorin, and J. de Gea, "Robotic manipulation for the shoe-packaging process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 1053-1067, 2017, DOI: 10.1007/s00170-017-0212-6.
- [10] H. M. Do, T.-Y. Choi, and J. H. Kyung, "Automation of cell production system for cellular phones using dual-arm robots," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, pp. 1349-1360, 2016, DOI: 10.1007/s00170-015-7585-1.
- [11] T. Doi, H. Fukuchi, N. Takeda, Y. Nakai, M. Miyawaki, and Y. Jitsukata, "Development of automatic packaging systems for sheets and coils," *NIPPON STEEL CORP*, Tokyo, Japan, [Online], www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/5713.pdf.
- [12] POSCO M-TECH CO., Ltd, "Apparatus for attaching side protector and inner-ring for coil packing," KR Patent 1011898500000, Oct., 4, 2012, DOI: 10.8080/1020100057864.
- [13] POSCO M-TECH CO., Ltd, "Apparatus for aligning side protector and inner-ring for coil packing," KR Patent 1011520520000, May, 24, 2012, DOI: 10.8080/1020100057865.
- [14] C. Park, K. Park, D. I. Park, and J.-H. Kyung, "Dual arm robot manipulator and its easy teaching system," *2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, Seoul, Republic of Korea, pp. 242-247, 2009, DOI: 10.1109/ISAM.2009.5376963.
- [15] R. Li and H. Qiao, "A survey of methods and strategies for high-precision robotic grasping and assembly tasks—some new trends," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 2718-2732, Dec., 2019, DOI: 10.1109/TMECH.2019.2945135.
- [16] J. Jiang, Z. Huang, Z. Bi, X. Ma, and G. Yu, "State-of-the-art control strategies for robotic PiH assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, pp. 101894, Oct., 2020, DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101894.
- [17] M. Suomalainen, Y. Karayiannidis, and V. Kyrki, "A survey of robot manipulation in contact," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 156, pp. 104224, Oct., 2022, DOI: 10.1016/j.robot.2022.104224.
- [18] S. Park, H. Lee, S. Kim, J. Baek, K. Jang, H. C. Kim, M. Kim, and J. Park, "Robotic furniture assembly: task abstraction, motion planning, and control," *Intelligent Service Robotics*, vol. 15, no. 4, pp. 441-457, May, 2022, DOI: 10.1007/s11370-022-00427-5.
- [19] J. J. Kuffner and S. M. LaValle, "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning," *2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH 37065)*, San Francisco, CA, USA, pp. 995-1001, 2000, DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.
- [20] K. Hauser and V. Ng-Thow-Hing, "Fast smoothing of manipulator trajectories using optimal bounded-acceleration shortcuts," *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, AK, USA, pp. 2493-2498, 2010, DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509683.
- [21] D. Coleman, I. Şucan, S. Chitta, and N. Correll, "Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study," *Journal of Software Engineering for Robotics*, vol. 5, no. 1, pp. 3-16, May, 2014, DOI: 10.6092/JOSER_2014_05_01_p3.
- [22] I. A. Sucas, M. Moll, and L. E. Kavraki, "The Open Motion Planning Library," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 72-82, Dec., 2012, DOI: 10.1109/MRA.2012.2205651.
- [23] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 43-53, Feb., 1987, DOI: 10.1109/JRA.1987.1087068.
- [24] H. Park, J. Park, D.-H. Lee, J.-H. Park, M.-H. Baeg, and J.-H. Bae, "Compliance-Based Robotic Peg-in-Hole Assembly Strategy Without Force Feedback," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6299-6309, Aug., 2017, DOI: 10.1109/TIE.2017.2682002.
- [25] M. Suomalainen, S. Calinon, E. Pignat, and V. Kyrki, "Improving dual-arm assembly by Leader-Follower compliance," *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, pp. 8676-8682, 2019, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793977.

- [26] M. P. Polverini, A. M. Zanchettin, S. Castello, and P. Rocco, "Sensorless and constraint based peg-in-hole task execution with a dual-arm robot," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, pp. 415-420, 2016, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487161.
- [27] H. Lee, S. Y. Lee, K. Jang, S. Kim, J. Ko, and J. Park, "Search trajectory with twisting motion for dual peg-in-hole assembly," *Intelligent Service Robotics*, vol. 14, pp. 597-609, Sept., 2021, DOI: 10.1007/s11370-021-00382-7.
- [28] H. Lee, S. Park, K. Jang, S. Kim, and J. Park, "Contact state estimation for peg-in-hole assembly using gaussian mixture model," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 3349-3356, Apr., 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3146949.
- [29] Dual Manipulator System for Coil Packaging, [Online], <https://youtu.be/QUldMjcQoSsk>, Accessed: Jul. 10, 2024.



이 해 성

2019 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과(학사)
 2019~현재 서울대학교 지능정보융합학과 석사, 박사 통합과정

관심분야: Contact-rich Manipulation, Contact State Estimation



이 용 희

2023 서울대학교 전기정보공학부(학사)
 2023~현재 서울대학교 협동과정 인공지능 전공 석사, 박사 통합과정

관심분야: path planning



박 재 흥

1995 서울대학교 항공우주공학과(공학사)
 1997 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)
 2006 Stanford University Aero/Astro, (공학박사)
 2009~현재 서울대학교 융합과학기술대학원 교수

관심분야: Robot-environment Interaction, Multi Contact Control, Whole body Control