

# 선형 트리플 껍인홀 조립을 위한 실패 복구 전략

## Failure Recovery Strategy for Linear Triple Peg-in-Hole Assembly

이상엽<sup>1</sup> · 이해성<sup>1</sup> · 김승연<sup>2</sup> · 박재홍<sup>3†</sup>

Sang Yup Lee<sup>1</sup>, Haeseong Lee<sup>1</sup>, Seungyeon Kim<sup>2</sup>, Jaeheung Park<sup>3†</sup>

**Abstract:** In this paper, we propose a failure recovery strategy for the linear triple peg-in-hole which is one of assembly tasks of autonomous furniture assembly. When the search surface is smaller than the search range, the assembly may fail by falling the part out of the search surface. The failure recovery strategy consists of a failure detection phase and a rotation phase to recover the status of the peg part to its pre-failure state. In the rotation phase based on torque control, the position of the part is compliant and the right peg of the part becomes the center of rotation. The proposed strategy is verified by assembling the back parts of the IKEA chair using a seven degree of freedom manipulator. In 100 trials, the parts were assembled 100 percent and the average assembly time was 6.44 seconds.

**Keywords:** Linear triple peg-in-hole, Assembly strategy, Failure recovery strategy

### 1. 서 론

껍(Peg)을 홀(Hole)에 끼워 넣는 껍인홀(Peg-in-Hole) 작업은 로봇의 조립 작업에서 대표적인 부품 조립 작업이다<sup>[1]</sup>. 이때 부품의 조립 시작 위치에는 비전 시스템의 오차, 로봇의 제어 오차 등으로 인한 위치 오차와 정렬 오차가 생긴다. 조립 전략은 이러한 위치 및 정렬 불확실성을 극복하고 부품을 조립하기 위해 필요하다.

멀티플 껍인홀 조립에 대해서는 듀얼 껍인홀을 중심으로 연구가 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 하지만 가구 조립 부품에는 듀얼 껍인홀이 아닌 멀티플 껍인홀 부품이 있다. IKEA 의자 등받이는 선형 트리플 껍인홀 형상으로, 선형으로 세 개의 껍과 홀이 위치한 형상이다. 멀티플 껍인홀은 듀얼 껍인홀 조립 전략의 연장선상에 있다고 알려져 있지만 실제 가구 조립의 멀티플 껍인홀 부품에 조립 전략을 적용하여 실험한 연구가 부족하다. 그리고 실제 부품에 조립 전략을 적용했을 때 조립에 실패하는 경우가 생긴다. 이는 실제 조립 부품의 바닥면이 협소

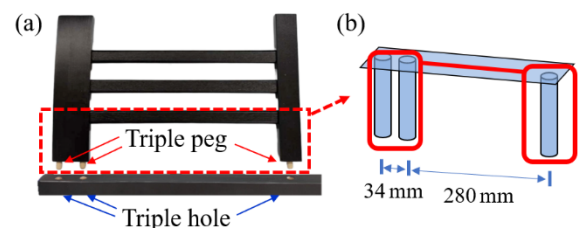
하다는 특성 때문이다. 따라서 선형 트리플 껍인홀 조립의 실패를 복구하는 전략에 대한 연구가 요구된다.

본 논문은 선형 트리플 껍인홀 실제 부품에 듀얼 껍인홀 조립 전략을 적용해보고 조립을 위한 실패 복구 전략을 제안한다. 그리고 실험으로 전략을 검증한 뒤 논문을 결론짓는다.

### 2. 본 론

#### 2.1 선형 트리플 껍인홀 형상과 조립 전략

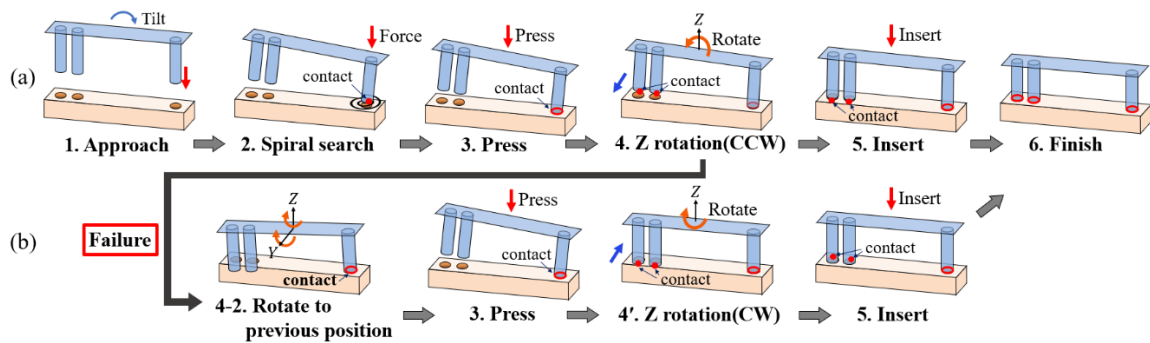
본 연구에서 조립을 목표로 하는 실제 부품은 가구 조립 부품이며 선형 트리플 껍인홀 형상인 IKEA 의자의 등받이다[Fig. 1-(a)]. 이는 듀얼 껍인홀 형상으로 동치화하여 단순화 할 수 있다[Fig. 1-(b)]. 따라서 기존 듀얼 껍인홀 조립 전략 아이디어를 가지고 모델 정보를 바꿔주면 [Fig. 2-(a)]와 같이 선형 트리플 껍인홀 조립 전략을 구성할 수 있다.



[Fig. 1] Assembly part, linear triple peg-in-hole

1. Graduate Student, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea (sangyup8378, lhs4138@snu.ac.kr)
2. Researcher, Advanced Institute of Convergence Technology (AICT), Suwon, Republic of Korea (ksy0711@snu.ac.kr)
3. Professor, Corresponding author: Seoul National University, Seoul, Republic of Korea (park73@snu.ac.kr) and Advanced Institute of Convergence Technology (AICT), Suwon, Republic of Korea

\* This work was supported by Industrial Strategic Technology Development Program (No. 20004953) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (M, Korea).



[Fig. 2] (a) Assembly strategy and (b) Failure recovery strategy for linear triple peg-in-hole

## 2.2 실패 복구 전략

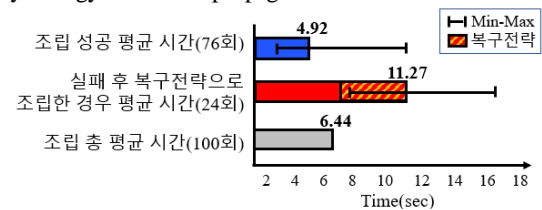
전략 단계 4에서 부품은 홀 탐색을 위해 아래로 힘을 주며 CCW(Counter Clock Wise) 방향으로 회전한다. 하지만 조립 중에 홀 위치에 대한 추가적인 인식이 없고 CCW 방향에 홀이 있지 않을 때, 탐색 범위가 탐색면을 넘어가며 부품의 왼쪽은 폭이 좁은 바닥면의 바깥으로 떨어진다. 홀 탐색에 실패한 부품은 단계 4-2 모양의 조립 실패 상태가 된다. 따라서 이 상태에서 조립에 성공하기 위한 실패 복구 전략이 필요하다.

실패 복구 전략은 [Fig. 2-(b)]의 순서로 이루어진다. 단계 4-2에서는 부품을 단계 3의 시작 상태로 되돌리기 위한 동작이 구현된다. 부품의 위치는 중력보상 상태로 두어 외력에 순응하고, 부품의 중심이 회전하면 가장 오른쪽 홀에 끼워진 껍을 고정점으로 한 회전 제약조건 안에서 부품이 회전한다. Y축 회전으로 왼쪽 껍이 바닥면 보다 더 높은 위치를 갖도록 부품이 기울고, Z축 회전으로 부품이 단계 3의 시작 위치에 돌아온다. 단계 4'은 단계 4에서와 반대 방향인 CW(Clock Wise) 방향으로 회전하여 홀을 탐색하고 조립을 완성한다.

## 3. 실험 결과

제안한 조립 전략을 검증하기 위하여 7 자유도 매니플레이터 Franka Panda를 사용하였고, 토크 제어로 구동되어 외부환경에 대해 순응 동작을 가진다. 이 로봇은 각 축에 토크 센서가 있어 말단장치에 가해지는 힘과 모멘트를 측정할 수 있다. 조립 목표 부품의 홀 직경은 10mm, 모따기가 된 껍의 하부 직경은 7mm, 홀의 깊이는 14mm이다. 인식된 홀의 위치 오차 최댓값이 6mm라고 가정하였고, 인식된 두 홀의 위치를 통해 생기는 정렬 오차의 최댓값은 2.3도이다. 그리고 조립 위치로부터 Z축 양의 방향 30mm 위치를 시작 위치로 뒀다.

조립 전략과 제안한 실패 복구 전략을 이용하여 부품 조립을 100회 실험했다. 홀 인식 오차 범위 안에서 조립 시작 위치를 무작위로 주었다. 그 결과, 조립 전략으로 조립에 성공한 경우가 76회이고 조립에 실패하여 실패



[Fig. 3] Results of the assembly experiments

패 복구 전략으로 조립에 성공한 경우가 24회로 최종 조립 성공률은 100%였다. 전자의 경우 조립 평균 시간은 4.92초, 조립 최단 시간은 2.89초, 조립 최장 시간은 11.03초였다. 후자의 경우 조립 평균 시간은 11.27초, 조립 최단 시간은 7.80초, 조립 최장 시간은 16.05초였다. 실패 인식 순간부터 복구와 조립에 걸린 시간의 평균은 3.67초였다[Fig. 3]. 복구 전략으로 조립한 경우는 실패하기까지 걸리는 시간의 영향때문에 조립 평균 시간이 상대적으로 길었다. 전체적으로 조립 시간에 차이를 만든 가장 큰 원인은 단계 2의 탐색 시간이었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 듀얼 껍인홀 조립 전략을 응용하여 선형 트리플 껍인홀 형상의 IKEA 의자 등받이 부품을 조립했으나, 이 부품은 바닥면이 좁아 조립 실패 상황이 발생했다. 이를 극복하기 위해 실패 복구 전략을 제안했고, 로봇을 사용한 100회의 실험 중 조립에 실패한 24회는 실패 복구 전략에 의해 조립됐고 성공률이 100%로 향상됐다. 100회 조립 평균 시간은 6.44초였다. 향후에 IKEA 의자의 다른 부품에도 실패 복구 전략을 세워 조립 성공률을 향상시키고자 한다.

## References

- [1] J. Xu, Z. Hou, Z. Liu, H. Qiao, "Compare Contact Model-based Control and Contact Model-free Learning: A Survey of Robotic Peg-in-hole Assembly Strategies," arXiv preprint arXiv:1904.05240, 2019.
- [2] J. Su, R. Li, H. Qiao, J. Xu, Q. Ai, J. Zhu, "Study on dual peg-in-hole insertion using of constraints formed in the environment," Industrial Robot: An International Journal 44.6, 2017