



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

유연 양팔 매니플레이터를 이용한
펙인홀 작업

Peg-in-Hole Task
with Compliant Dual arm Manipulator

2014년 2월

서울대학교 융합과학기술대학원

융합과학부 지능형융합시스템전공

박 현 준

유연 양팔 매니플레이터를 이용한
펙인홀 작업

Peg-in-Hole Task
with Compliant Dual arm Manipulator

지도교수 박재홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2014년 2월

서울대학교 융합과학기술대학원
융합과학부 지능형융합시스템전공
박현준

박현준의 석사 학위논문을 인준함
2014년 2월

위원장 홍성수 (인)

부위원장 박재홍 (인)

위원 안정호 (인)

국문초록

최근에 이르러 로봇의 적용 범위는 공장의 생산라인과 가정까지 확대되고 있다. 로봇이 공장의 생산라인에서 단순 작업자를 대체하거나 가정에서 힘든일을 도울때 로봇이 주로 수행하는 업무는 조립작업이다.

로봇이 이러한 조립작업을 원활히 수행할 수 있도록 조립작업을 대표하는 껍인홀 작업에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 껍인홀 작업이란 특정 물체(peg)를 모양이 맞는 구멍(hole)에 끼워 맞추는 작업으로, 나사를 조립하거나, 톱니바퀴를 축에 고정하는 작업을 예로 들 수 있다. 로봇을 통한 껍인홀 작업은 먼저 홀의 위치를 파악하고 껍을 삽입하는 과정으로 진행되는데, 이러한 과정에서 홀의 정확한 위치정보는 필수적이다.

본 논문에서는 껍인홀 작업을 해결하기 위한 기존 방법들에 대해 분석하고, 비정형환경에서 껍인홀 작업을 수행할 수 있는 외부 센서를 사용하지 않는 방법에 대해 제안한다.

제안한 전략의 유효성을 검증하기 위하여 한국생산기술연구원 RSCL연구실의 양팔로봇을 이용하여 실험을 진행하였다. 먼저 한 팔 매니플레이터를 이용하여 껍인홀 실험을 진행하였고, 이를 확장하여 양팔로봇의 각 팔에 홀과 껍을 부착하여 그 전략을 검증하였다.

주요어 : 양팔로봇, 껍인홀, 컴플라이언스

학 번 : 2011-23991

목 차

I. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목표	3
1.3 논문 구성	4
II. 껍 인 흘	5
2.1 껍인흘 작업	5
2.2 일반적인 껍인흘 전략	6
2.2.1 비전정보 이용	7
2.2.2 F/T 센서를 이용한 흘 위치 추정	8
2.2.3 탐색전략 사용	9
2.2.4 능/수동 컴플라이언스	10
III. 껍인흘 전략 제안	12
3.1 나선-스크류 모션	14
3.2 센서리스 수동 컴플라이언스	16
IV. 시뮬레이션	18
4.1 시뮬레이션 환경	18
4.2 시뮬레이션 결과	19

V. 한팔 껍인홀 실험	21
5.1 실험 환경	21
5.2 전략 구현	24
5.3 한팔 껍인홀 실험 결과	27
5.3.1 원형 껍인홀 실험	28
5.3.2 사각 껍인홀 실험	32
VI. 양팔 껍인홀 실험	34
6.1 양팔로봇 시스템	34
6.2 양팔 껍인홀 실험 결과	36
VII. 결 론	40
참고문헌	42
Abstract	44

표 목 차

[표 1] 비전을 이용한 껍인홀의 장단점	7
[표 2] F/T센서를 통한 홀 위치 추정의 장단점	8
[표 3] 탐색전략을 통한 껍인홀의 장단점	9
[표 4] 컴플라이언스를 통한 껍인홀의 장단점	11
[표 5] 일반적인 껍인홀 방법들의 장단점	13
[표 6] 양팔로봇 특성 및 실험환경	22
[표 7] 타 연구들과의 껍 공차 비교	40

그림 목 차

[그림 1] 비전을 이용한 조립작업	7
[그림 2] F/T센서를 이용한 홀위치 추정	8
[그림 3] 탐색 경로의 예	9
[그림 4] 컴플라이언스를 위한 RCC 장치	10
[그림 5] 능동/수동 컴플라이언스 개요	11
[그림 6] 나선-스크류 모션	15
[그림 7] 팩의 작업공간 PD제어	16
[그림 8] 팩 위에 힘 생성	17
[그림 9] 팩 끝단 힘 생성의 중요성	17
[그림 10] 시뮬레이션 환경	18
[그림 11] 시뮬레이션 환경에서 나선-스크류 모션	19
[그림 12] 3차원 공간에서 팩의 위치 변화	20
[그림 13] 시간에 따른 팩 위치/방향 그래프	20
[그림 14] 생산기술연구원 RSCL연구실 양팔로봇	21
[그림 15] 팩과 홀 무게 측정	22
[그림 16] 양팔 로봇 중력 보상	23
[그림 17] 나선 모션의 목표 및 추정 경로	24
[그림 18] 나선-스크류 모션의 목표 및 추정 경로	25
[그림 19] 컴플라이언스 그래프	26
[그림 20] 한팔로봇 팩인홀 시스템	27
[그림 21] 3차원공간상에서 원형팩 경로	28
[그림 22] 원형 팩인홀 실험	29
[그림 23] 원형팩의 위치/방향 변화	30
[그림 24] 나선 모션만을 사용 시 팩 변화	31

[그림 25] 사각펙인홀 실험	32
[그림 26] 사각펙의 위치/방향 변화	33
[그림 27] 양팔로봇 좌표계 시스템	34
[그림 28] 양팔로봇의 펙인홀	36
[그림 29] 양팔펙인홀 펙과 펙의 위치 변화	38
[그림 30] 3차원공간상에서 홀과 펙의 위치 변화	39
[그림 31] 로봇핸드가 통합된 양팔펙인홀	41

I. 서 론

1.1 연구 배경

오늘날 산업현장의 생산라인은 로봇공학의 기술의 주요 적용 분야이다. 특히, 자동차 생산공정이나 전자제품 조립과 같은 조립공정 분야는 산업현장에서도 로봇이 가장 많이 활용되고 있는 분야이다. 로봇이 조립작업을 수행할 때, 부품을 끼워넣거나 빼내는 작업을 정해진 순서에 따라 자동적으로 반복하게 되는데, 이를 위해 필요한 것은 정형화된 환경이다. 이는 정해진 위치에 있는 물체들을 정해진 위치에 조립하기 위해서인데, 이러한 로봇은 작업 제품이 변경되면 일일이 라인을 변경해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 비정형 환경에서도 작업 가능한 로봇의 필요성이 꾸준히 증가하고 있다.

로봇이 비정형환경에서 조립작업을 수행하기 위해서는 환경을 인식하는 작업이 필수적인데, 수 μm 단위에서 이루어지는 정밀조립작업은 센싱 기술로 극복하기에는 그 한계가 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 제시되어져 온 해결책이 Mason이 제안한 컴플라이언스와 힘제어이다 [1,2]. 하지만 산업용로봇은 작업의 반복성과 정밀도를 최우선으로 제작되었기 때문에 로봇이 자체적으로 컴플라이언스 특성을 갖기에는 어렵다. 따라서 로봇의 물체를 잡는 그리퍼를 컴플라이언스 하도록 만들어주는 RCC(Remote Center Compliance) 장치[3]와 F/T센서(Force/Torque 센서)를 이용하여 능동적으로 컴플라이언스를 구현하는 알고리즘이 개발되어지고 있다[4,5]. 하지만, 컴플라이언스한 특성을 산업용로봇에 구현하기 위하여 이러한 F/T센서나 RCC장치를 부착하거나 능동적 제어를 도입하는 것은 쉽지 않은 현실이다. 따라서 추가적인 기구나 센서와 같은 특별한 장치를 로봇에 부착하지 않고 수동 컴플라이언스를 구현하여 작은 오차에서도 조립작업을 수행하고자 하였다.

이러한 특별한장치나 센서를 사용하지 않는 수동 컴플라이언스의 유효성을 검증하고자 조립작업을 대표하는 껍인홀 실험을 진행하였다. 껍인홀 작업은 특정 외형을 가진 물체(껍)을 같은 모양의 구멍(홀)에 끼워 맞추는 작업으로, 일반적인 껍인홀작업은 고정된 홀을 로봇을 이용하여 껍을 움직여서 삽입하는 것을 말한다.

로봇을 이용하여 껍인홀 작업을 수행하기 위해서는 대략적인 홀의 위치정보를 필요로 하는데 일반적으로 비전정보를 이용하여 홀의 위치를 탐색하고, 껍과 홀간의 위치오차를 극복하는 방법이 사용되어지고 있다 [6,7]. 하지만 이러한 비전정보를 이용하는 방법은 빛에 의한 영향을 많이 받기 때문에 빛이 너무 강한 야외나 빛이 없는 어둠속에서는 작업이 힘든 단점이 있다. 빛에 대한 의존성을 낮추고자 본 논문에서는 센서를 사용하지 않고 일정 범위를 정해진 경로를 따라 홀의 위치를 찾는 탐색 전략을 이용하였다[8].

이러한 센서를 사용하지 않는 탐색전략과 센서나 외부장치를 사용하지 않는 수동컴플라이언스를 이용하여 껍인홀 작업을 수행함으로써, 센서의 종합적으로 센서의 의존도를 낮추고자 하였다. 이는 향후 조립작업을 수행할 시 센서사용과의 시너지를 극대화시켜 비정형환경에서 로봇이 조립작업을 보다 정확하고 정밀한 수행을 가능케 할 것으로 기대된다.

1.2 연구 목표

본 연구의 목표는 산업현장의 생산라인에서 조립작업시 정형화된 환경에서 벗어나 불확정성, 비정형성을 갖는 환경에서도 적용가능한 조립 전략을 개발하는데 그 목표가 있다. 따라서, 조립작업을 대표하는 펙인홀 작업을 비정형환경에서도 가능하도록 전략을 개발하고 실험을 통해 그 유효성을 입증하였다.

먼저 펙인홀 작업을 로봇을 이용하여 수행할 때 일반적으로 사용되어진 방법들에 대해 조사하고 장단점을 비교하였다. 센서의 의존도를 최대한 낮추고자 비전센서나 F/T센서와 같은 매니플레이터 외부환경을 측정을 위한 추가적인 센서 등을 사용하지 않고 펙인홀 작업을 수행할 수 있는 전략을 세우는 것을 목표로 하였다.

먼저, 제안된 펙인홀 작업 전략을 시뮬레이션을 통해 유효성에 대하여 검증하고, 실제 로봇에 적용가능하도록 제어기 안정성을 평가하였다. 또한 생산기술연구원 RSCL 양팔로봇을 이용하여 실제 로봇 실험을 진행하였다. 먼저 홀을 임의의 위치에 고정하고 한팔 매니플레이터를 이용하여 원형 펙인홀과 사각 펙인홀 실험을 하였다. 최종적으로 양팔로봇의 한팔에는 홀을 부착하고, 다른팔에는 펙을 부착하여 펙인홀 실험을 진행하여 그 성능을 검증하였다.

1.3 논문 구성

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다.

먼저 2장에서는 껍인홀 작업의 정의와 필요성에 대해 논의하고, 로봇이 껍인홀 작업을 수행하기 위해 대표적으로 사용되는 4가지 방법에 대해 소개하였다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 외부환경을 측정하기 위한 센서와 특별한 장치를 사용하지 않는 껍인홀 전략에 대하여 소개하고 4장에서는 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다. 5장에서는 실제 로봇을 이용하여 껍인홀 실험을 진행하고자 하였다. 먼저 임의의 위치에 홀을 고정하고 한팔 매니플레이터로 제안된 전략을 이용하여 껍인홀 작업을 수행하였다. 원형뿔과 사각뿔 두가지 종류로 하였으며 그 결과를 나타내었다. 6장에서는 양팔로봇을 이용한 껍인홀 작업이 한팔로봇을 이용한 껍인홀 작업과의 차이점에 대하여 논의하고 설계한 제어기에 대하여 설명하였다. 왼팔과 오른팔 끝에 뿔과 홀을 부착하여 양팔 껍인홀을 실험하고 그 결과를 나타내었다. 끝으로 7장에서 전략의 성능 및 연구 기여도에 대해 논의하고 향후 과제에 대해 서술하였다.

II. 껍 인 흘

2.1 껍 인 흘 작업

조립작업을 대표하는 껍인흘 작업은 일반적으로 일정한 모양의 구멍에 같은 형상을 가진 물체를 삽입하는 작업을 말한다. 이러한 껍인흘 작업은 구멍에 볼트를 삽입하거나, 바퀴축에 바퀴를 고정하거나, 샤프트축에 기어나 베어링을 고정하는 등 공장의 생산라인에서 대부분의 작업의 기초가 되며, 가정에서도 물병에 뚜껑을 조립하거나 콘센트에 플러그를 삽입하거나 키를 열쇠구멍에 삽입하는 등의 많은 작업에서 그 예시를 찾아 볼 수 있다. 이러한 껍인흘 작업은 일반적으로 고정된 홀의 위치를 찾고 껍을 움직여 삽입하는 과정을 말한다.

로봇을 통해 껍인흘을 수행하기 위해서 선행되는 작업은 홀의 위치와 방향을 찾는 작업이다. 로봇이 껍을 잡고 그 위치와 방향을 제어하여 홀에 삽입하게 되는데, 홀에 대한 정보가 없으면 작업이 불가능하기 때문이다. 따라서 껍인흘 분야에서는 홀의 위치를 정확하게 파악하기 위해서 여러 가지 방법에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 그 대표적인 예로는 비전정보를 이용한 방법이 있다. 비전정보를 이용한 껍인흘 작업은 카메라를 이용하여 홀의 위치를 파악하고, 더불어 껍의 위치까지 파악하여 껍과 홀간의 위치오차를 줄이는 방향으로 껍인흘 작업을 수행한다. 하지만 비전정보의 사용은 실내로 한정되기 때문에 그 외에도 탐색경로를 이용하는 방법이나 매니퓰레이터의 손목에 부착된 F/T센서를 이용하는 방법, 컴플라이언스를 이용하는 방법 또한 연구되어져 왔다. 본 절에서는 이러한 껍인흘 작업을 수행하기 위한 방법들에 대해 살펴보고 이를 바탕으로 장단점을 분석하여 센서의 사용없는 껍인흘 전략 제안의 밑바탕이 되고자 한다.

2.2 일반적인 껍인홀 전략

일반적인 껍인홀 전략을 대표하는 방법에는 크게 4가지가 있다. 가장 널리 쓰이는 방법은 비전정보를 사용하는 것으로, 비전정보를 이용하여 껍과 홀의 위치를 파악하고 껍과 홀의 위치정보 오차를 줄여 껍인홀 작업을 수행할 수 있도록 돕는다. 두번째 방법은 힘토크 센서 (Force / Torque sensor)를 사용하는 것으로 매니퓰레이터의 손목에 힘토크센서를 부착하여 껍과 홀의 충돌 정보를 이용하는 방법이다. 세 번째 방법은 탐색경로를 이용하는 방법으로 일정범위 내에 홀의 위치를 가정하고 경로를 따라 껍을 이동하며 홀을 찾는 방법이다. 마지막은 컴플라이언스 (순응, 유연)를 이용하는 방법으로 껍을 외부 힘에 순응하도록 제어하여 껍이 홀 근처에 있을 때 삽입 가능하도록 하는 방법이다. 이러한 방법 외에도 로봇과 인간과의 협조를 통해 껍인홀 작업을 수행하는 방법과 같은 여러 가지 방법이 제시되고 있지만, 본 절에서는 앞서 설명한 4가지 경우에 대해서만 자세히 알아보려고 한다.

2.2.1 비전정보 이용

비전정보는 팩인홀 작업에서 홀의 위치를 찾아내고, 팩과 홀간의 오차를 줄이는데 가장 널리 쓰이는 방법으로 카메라를 통한 비전정보를 이용하는 방법이다. 비전정보를 사용하는 이유는 홀 위치가 있는 것으로 추정되는 범위가 넓은 상황에서 홀의 위치를 찾아내는데 적합하고, 실제로 홀의 위치를 정확히 알고 있더라도 팩을 정확한 위치에 제어하는 것이 힘들기 때문이다. 비전정보는 홀뿐만 아니라 팩의 위치 정보를 알 수 있고, 홀과 팩간의 오차를 줄이는데 유용한 장점이 있다. 그러나 빛의 영향을 많이 받기 때문에 실내에서만 가능하고, 카메라와의 거리에 따라 오차가 발생하여 극히 작은 물체의 조립에는 어려움이 따른다. 그림 1은 비전정보를 이용하는 조립작업의 예로써, 볼트와 너트를 조립하는 양팔 로봇이다.

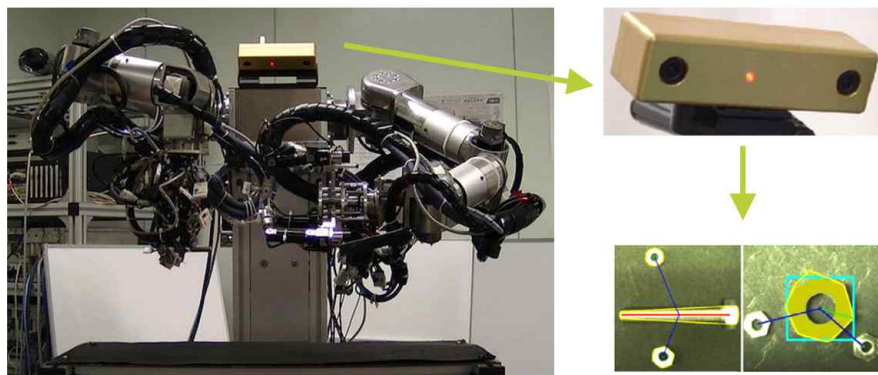


그림 1. 비전을 이용한 조립작업[7]

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> • 홀과 함께 팩의 위치 정보 피드백 가능 • 넓은 범위에서 탐색 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 실외에서 적용이 어려움 • 작은 오차 발생

표 1. 비전을 이용한 팩인홀의 장단점

2.2.2 F/T 센서를 이용한 홀 위치 추정

F/T 센서(Force/Torque sensor)는 주로 매니퓰레이터의 손목에 부착되어 외부와의 접촉 힘을 측정하거나 로봇 끝단의 모멘트를 측정하는 센서이다. F/T 센서를 이용한 홀 위치 추정의 개요를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 펙이 홀 근처와 충돌하게 되면, 펙이 홀안으로 기울게 되면서 모멘트가 발생하게 되는데, 이 때 발생한 힘과 모멘트를 측정하여 홀의 위치를 추정하는 것이다. 하지만 손목에 부착된 F/T 센서 정보는 End-Effector와 환경과의 충돌정보 외에 중력에 의한 영향, 움직임에 의해 발생하는 이너샤의 정보 등을 함께 포함하는데, 외부와의 접촉 정보만을 추출하여 실제로 사용하는데에는 어려움이 많다[9].

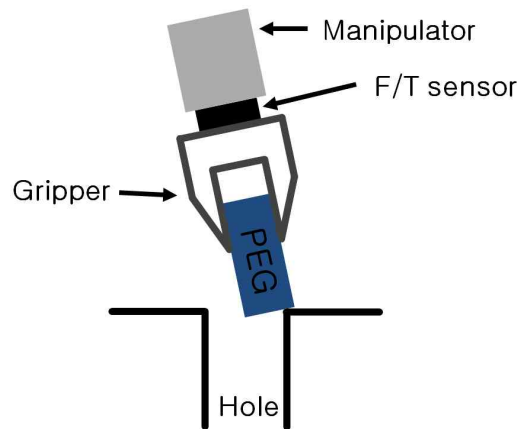


그림 2. F/T센서를 이용한 홀 위치 추정

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 공차와 크기가 작은 물체 조립 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 실제 환경에서 정확한 접촉 정보 계산에 어려움이 따름

표 2. F/T센서를 통한 홀 위치 추정의 장단점

2.2.3 탐색전략 사용

탐색경로를 이용한 껍인홀 전략은 홀의 위치를 정확하게 계산해서 찾아내는 방식이 아니라 일정 범위 안에 홀이 있다고 가정하고, 정해진 경로를 따라서 껍을 이동시켜가며 홀의 위치를 찾는 전략이다. 그림 3에 그 예시를 나타내었다. 기본적으로 탐색영역이 가정되어야 하기 때문에 사용이 제한적이고, 껍이 홀의 근처에 위치하였을 때 삼입을 가능케 하도록 추가적인 방법이 병행되어야 한다. 일반적으로 2.2.2 절에서 설명한 F/T 센서를 이용한 방법이나 2.2.4절에서 설명할 컴플라이언스를 이용한 방법이 병행되어진다.

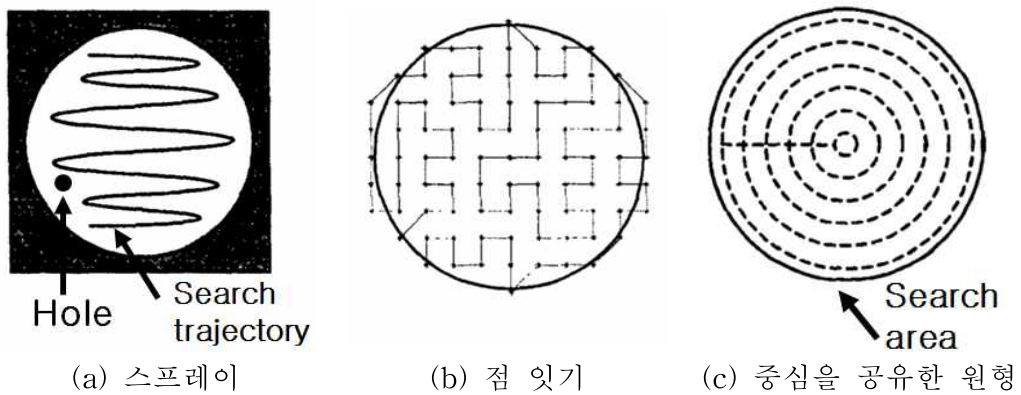


그림 3. 탐색 경로의 예[10]

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> • 카메라, 센서와 같은 외부 장치가 필요 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 탐색 범위가 필요함 • 추가 삼입전략이 필요함

표 3. 탐색전략을 통한 껍인홀의 장단점

2.2.4 능/수동 컴플라이언스

컴플라이언스는 순응 혹은 유연을 가르키는 용어으로써, 외부의 힘을 받아들이는 것을 가리킨다. 기존의 조립작업을 수행하는 산업용로봇은 정형화된 생산 라인에서 정해진 움직임대로 반복적으로 업무를 수행하게 되는데, 업무 수행 시 외부의 예기치 못한 영향에 의해 계획된 임무에 영향을 받지 않도록 매우 낮은 컴플라이언스 상태에서 제어되고 있다.

컴플라이언스를 이용하여 픽인홀 작업을 수행하는 원리는 그림 5와 같다. 매우 딱딱한 특성을 갖고 있는 산업용 로봇과 삽입할 물체 사이에 스프링의 역할을 하는 장치를 부착하여 픽을 부드럽게 만드는 것이다. 스프링에 의해 매니플레이터와 연결되어 있는 픽은 외부 힘의 영향을 쉽게 받게 되고, 구멍근처에서 발생하는 위치/방향 오차에도 삽입가능하게 되는 것이다. 이러한 역할을 하는 스프링장치를 RCC(Remote Center Compliance) 장치라고 하는데 그림 4에 나타내었다.

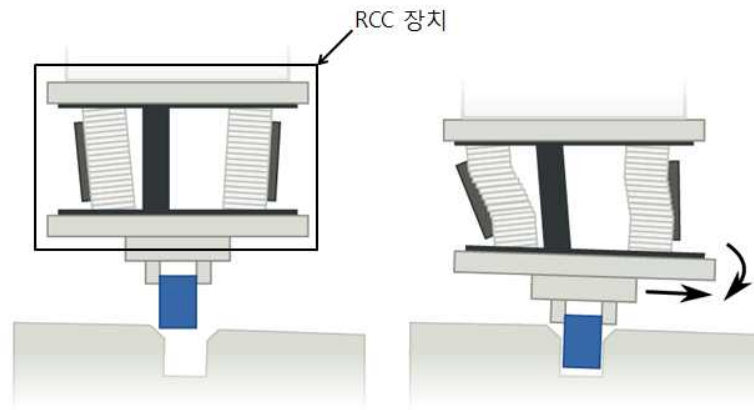


그림 4. 컴플라이언스를 위한 RCC 장치

이러한 컴플라이언스는 구현방법에 따라 능동 컴플라이언스와 수동 컴플라이언스로 나뉘는데 수동 컴플라이언스는 스프링과 같은 장치를 사용하여 고정된 컴플라이언스 특성을 가지는 것을 가리키고, 능동 컴플라이언스는 손목에 F/T 센서를 부착하여 외부 힘을 측정하여 그 힘에 대하여 순응하도록 제어하여 구현한 컴플라이언스를 가리킨다[12].

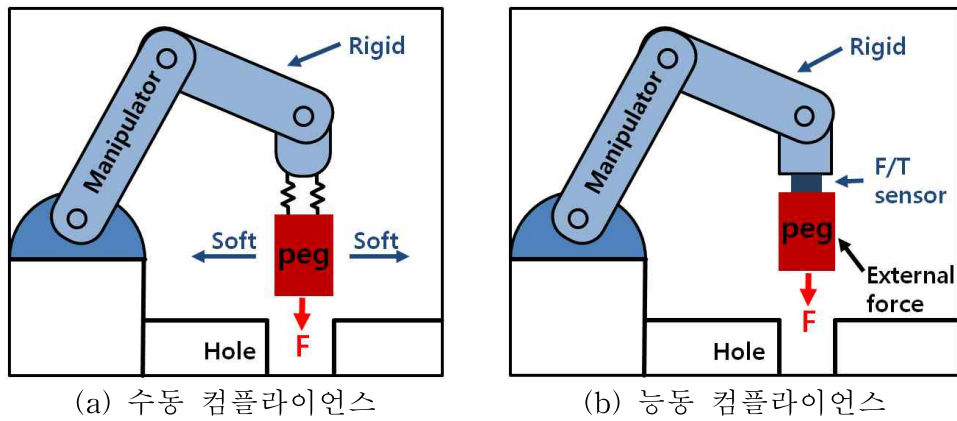


그림 5. 능동/수동 컴플라이언스 개요

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 작업 성공률이 높고 홀의 위치 오차 극복률이 높다. 	<ul style="list-style-type: none"> RCC장치 필요(수동) F/T 센서 필요(능동)

표 4, 컴플라이언스를 통한 껍인홀의 장단점

III. 껍인홀 전략 제안

3장에서는 2장에서 살펴본 대표적인 껍인홀 작업전략의 장단점에 대하여 분석하고, 본 논문에서 제안하는 껍인홀 전략에 대해 설명한다.

먼저 비전작업을 통한 껍인홀 작업은 빛의 영향을 크게 받기 때문에 외부환경에서 적용하기에 제한이 많다는 단점이 있다. 특히 빛이 너무 많거나 없으면 작업이 불가능에 가까운 점은 치명적이다. 손목에 부착한 F/T센서를 통해 홀의 위치를 추정하는 방법은 이상적인 환경에서는 상당히 높은 작업 정밀도와 정확도를 보증하지만 실제 환경에서 사용하기에는 어려움이 많다. F/T센서에서 추출한 정보는 껍의 충돌, 회전정보 외에도 End-Effector가 중력에 의해 받는 영향과 관성에 의해 발생하는 정보 등이 포함되는데, 이러한 정보들 중에서 필요한 센서값만 추출해내는 것은 큰 어려움이 있기 때문이다. 탐색경로를 이용하는 방법은 비전정보를 사용하는 방법에 비해 외부에서도 가능한 장점이 있지만, 넓은 범위를 탐색하는데 오랜 시간이 걸리고, 작업 성공 보장성도 떨어진다. 또한 작업 성공시간이 일정하지 못하다는 단점이 있다. 마지막으로 컴플라이언스를 이용한 방법은 능동/수동 컴플라이언스 방법 모두 컴플라이언스를 구현하는데 있어 RCC장치 혹은 F/T센서가 필요하다는 단점이 있다. 이러한 방법들의 장단점을 표 5에 간략히 정리하였다.

본 논문에서는 이러한 카메라, F/T센서, RCC장치와 같은 추가적인 장치의 사용없이 제어만을 통해 껍인홀 작업을 수행하는 것을 목표로 하고, 연구를 진행하였다. 이러한 외부장치의 도움없이 작업을 성공적으로 수행하고 나면 외부장치와 함께 작업했을 때 더 높은 성공률과 작업 정확성을 보일 것으로 기대한다.

먼저 제안하는 껍인홀 전략에서는 일정한 작업 성공 시간을 보증하지 못하지만 가혹한하고 비정형 환경에서 작업이 가능하기 때문에 탐색경로 전략을 사용하였다. 기존 여러 가지 탐색방법이 연구되어왔지만, 아르기

메데스 나선을 이용하여 추측되는 홀의 위치로부터 나선형을 그리며 바깥방향으로 홀의 위치를 탐색해 나가도록 하였다. 또한 홀의 위치를 찾기 위한 모션 외에 스크류 모션을 함께 사용하였다. 스크류 모션은 껍을 홀의 방향을 축으로 회전시키는 것으로, 나사와 같이 빗면이 있는 껍을 삽입하기에도 용이하지만 껍과 홀간의 공차가 작을 경우 두 물체간의 위치오차가 없어도 마찰 때문에 삽입이 힘든 점을 보완해 주는 모습을 보였다.

탐색경로외에 같이 사용한 방법은 RCC장치와 F/T센서와 같은 외부장치를 사용하지 않은 수동컴플라이언스이다. 기존 수동/능동 컴플라이언스는 앞 절에서 설명한 바와 같이 외부장치의 도움을 필요로 하는데, 본 연구에서는 유연 제어를 목표로 하여 수동 컴플라이언스를 구현하였다.

방 법	장 점	단 점
비전정보 사용	넓은 범위 탐색 가능	외부환경 작업 불가능
F/T센서 사용	작업 정확성이 높음	센서값 추출 어려움
탐색전략 이용	외부 도움이 필요없음	작업성공시간 불확실성
컴플라이언스 사용	복잡한 계산이 필요없음	특별한 장치 필요

표 5. 일반적인 껍인홀 방법들의 장단점

3.1 나선-스크류 모션

앞서 설명한 바와 같이 비전정보를 사용하지 않고, 외부환경에서 펙인 홀 작업의 성공을 높이고자 탐색경로 전략을 사용하였다. 본 논문에서 제안하는 탐색전략은 나선-스크류 모션으로 홀의 위치를 찾기 위한 나선 모션과 홀의 방향을 찾거나 마찰력감소를 위한 스크류 모션으로 구성되어있다.

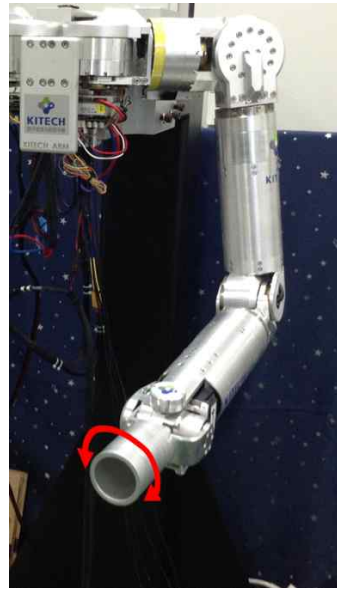
나선 모션은 홀의 위치를 찾기 위한 탐색경로로써, 아르키메데스 나선을 이용하여 추정되는 홀의 위치를 중심으로 나선형의 경로를 그리며 홀의 위치를 탐색하게 되며 일정범위를 탐색한 후에는 다시 원점으로 돌아와 같은 동작을 반복하도록 설계하였다.

스크류 모션은 크게 두가지 장점이 있는데, 첫째로 홀과 펙의 모형이 원형이 아닐 경우 방향을 일치시켜주는 역할을 한다. 만약 홀과 펙의 외형이 사각형일 경우 두 물체간의 위치오차만을 줄여서는 펙인홀 작업이 진행되기 어렵기 때문이다. 두 번째로 펙과 홀이 원형일 경우 마찰력 감소 역할을 하는데, 만약 공차가 작을 경우 두 물체간의 위치오차가 존재하지 않더라도 펙의 움직임이 잠시라도 멈추면 두 물체간의 마찰력은 정지마찰력이 작용하게 되어 끼임 현상이 발생하기 때문이다. 스크류 모션은 이러한 상황에서 홀의 방향을 축으로 CW, CCW방향으로 회전시켜 두 물체간에 꾸준히 운동마찰력이 작용하도록 하여 끼임 현상을 방지하는 역할을 한다.

그림 6은 이러한 나선-스크류 모션을 그림으로 설명한다. (a)는 나선형 모션을 나타낸 것으로 펙이 홀방향 벡터를 법선으로 하는 평면상에서 나선을 그리도록 하여 홀의 위치를 탐색하는 것을 나타낸다. (b)는 스크류 모션을 나타낸 것으로 펙이 홀 방향 벡터를 축으로 CW, CCW방향으로 회전하여 물체간의 방향오차를 제거하거나 마찰력 감소의 역할을 한다.



(a) 나선 모션



(c) 스크류 모션

그림 6. 나선-스크류 모션

3.2 센서리스 수동 컴플라이언스

일반적인 수동 컴플라이언스는 앞 절에서 설명한 바와 같이 RCC구조를 매니퓰레이터의 손목에 부착하여 구현하지만, 본 논문에서는 특별한 장치 없이 제어를 통해 수동 컴플라이언스를 제안한다. 매니퓰레이터는 작업공간에서 제어되었으며, 중력보상과 함께 Virtual spring-damper제어기(그림 7)를 사용하였다. 비교적 낮은 게인을 사용하여 수동컴플라이언스의 특성을 띄도록 하였고 각 관절마다 마찰보상을 하였다. 따라서 탐색 경로를 통해 궤과 홀의 위치오차가 낮을 경우 홀이 궤에 삽입 가능하도록 하였다.

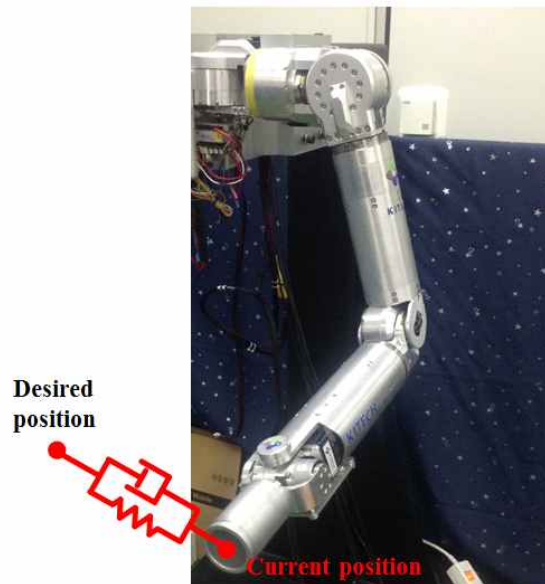


그림 7. 궤의 작업공간 PD제어

또한, 수동컴플라이언스제어와 함께 힘제어를 사용하였다(그림 8). 펙의 끝단에 홀 방향으로 일정한 힘을 생성시켜 펙과 홀의 위치오차가 없을 경우 삽입가능 할 수 있도록 하였다. 이때 힘의 생성은 펙의 끝 방향에 생성시켰으며, 실험적으로 펙의 앞쪽에 발생시켰을 때는 펙과 홀간의 방향오차가 커지는 결과를 볼 수 있었다(그림 9).

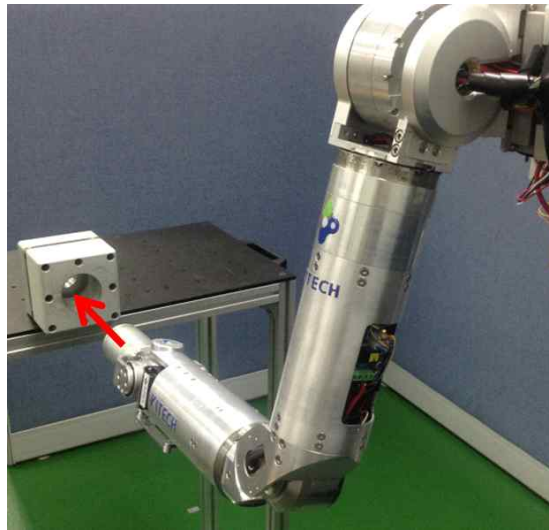
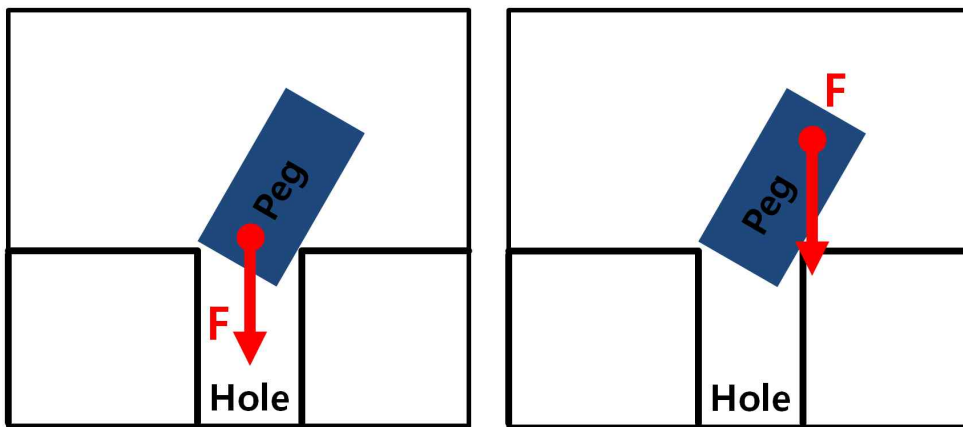


그림 8. 펙 위에 힘 생성



(a) 펙 끝에서의 힘생성

(b) 펙 앞단에서의 힘생성

그림 9. 펙 끝단 힘 생성의 중요성

IV. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

제안된 껍인홀 전략을 실험하기 위하여 먼저 시뮬레이션을 통해 전략의 유효성과 제어기의 안정성을 검증하고자 하였다. 안정성이 검증되지 않은 제어기를 가지고 실제 로봇을 제어할 경우, 큰 사고로 이어질 수 있기 때문이다.

시뮬레이션은 (주)심랩의 로보틱스랩을 이용하였으며[11], 로봇모델은 생산기술연구원 RSCL연구실의 양팔로봇 모델을 사용하였다. 시뮬레이션 환경에서 완벽한 마찰모델을 구현하기 어렵기 때문에 스크류모션의 성능을 검증하고자 사각형 껍과 홀을 사용하였으며, 껍과 홀간의 공차는 1mm를 주었다(그림 10).

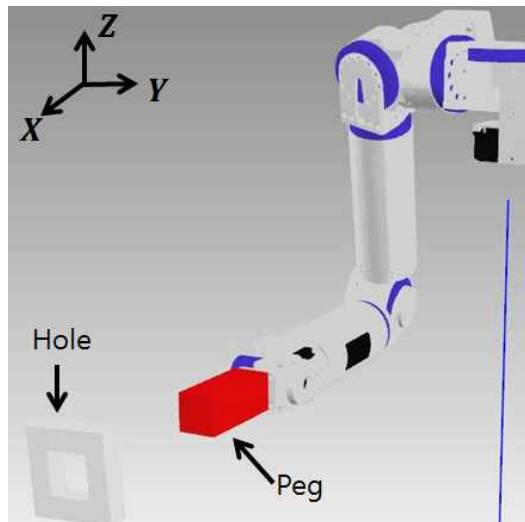


그림 10. 시뮬레이션 환경

4.2 시뮬레이션 결과

제안된 껍인홀 전략을 시뮬레이션하기 위하여 먼저 나선-스크류 모션을 구현하였다. 전략의 나선 모션은 추정하는 홀의 위치를 중심으로 생성되고, 실제 실험에서는 홀의 위치를 알 수 없지만, 시뮬레이션상에서 환경을 구축하는데 있어서 홀의 정확한 위치정보는 이미 공개되어 있기 때문에 나선형 모션 생성시 필요한 홀 추정위치에 랜덤오차를 주어 시뮬레이션하였다.

그림 11는 시뮬레이션 상에서 구현한 나선-스크류 모션이다. (a)에 위치 목표경로를 나타내었고, (b)에 방향 목표경로를 나타내었다.

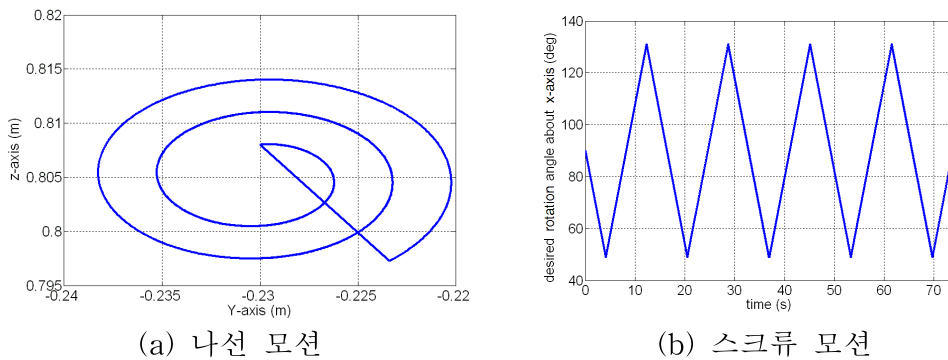


그림 11. 시뮬레이션 환경에서 나선-스크류 모션

구현된 나선-스크류 모션과 수동 컴플라이언스 제어를 통하여 시뮬레이션의 결과를 그래프를 통해 그림 12, 13에 나타내었다. 그림 12는 껍의 작업공간상에서의 위치를 3차원 공간에 나타낸 것으로 시작지점에서 출발하여 껍의 근처에서 충돌한 뒤 지정된 경로를 추정하며 홀의 위치를 탐색한 후 삽입 완료됨을 보여준다. 그림12는 껍의 위치/방향 정보에 대하여 좀 더 상세히 나타낸 그래프로써, (a)그래프는 껍이 X축 방향으로 증가하다가 일정시간동안 진행을 멈추고 홀에 삽입되면서 값이 증가함을 좀 더 명확히 보여준다.

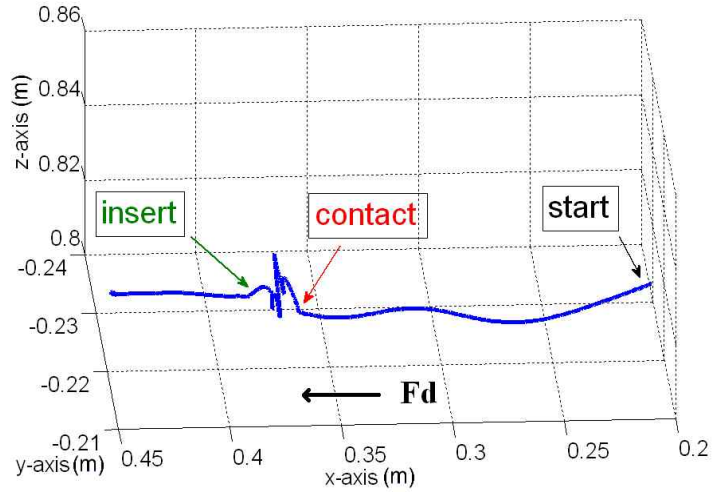
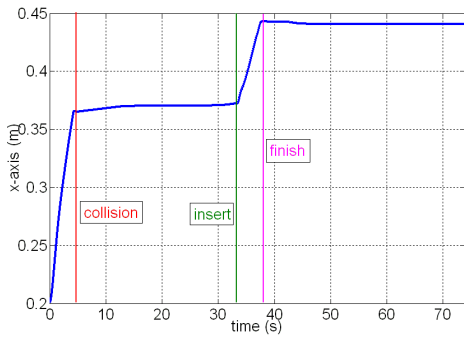
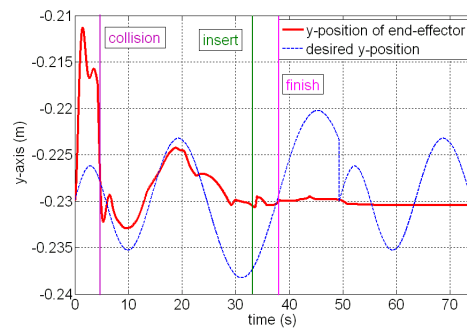


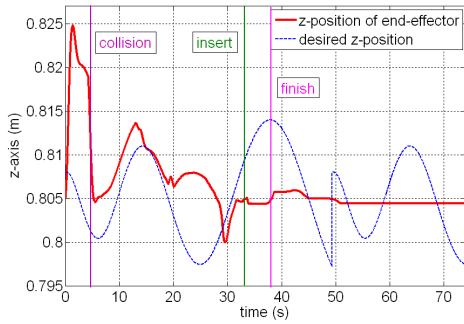
그림 12. 3차원 공간에서 펌 위치 변화



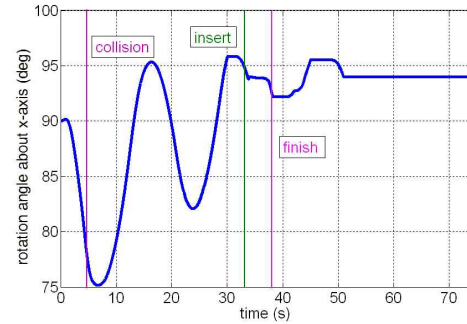
(a) 펌의 X축 위치변화



(b) 펌의 Y축 위치변화



(c) 펌의 Z축 위치변화



(d) 펌의 X축 회전변화

그림 13. 시간에 따른 펌 위치/방향 그래프

V. 한팔 껍과 홀 실험

5.1 실험 환경

5장에서는 4장에서 검토한 제어기 안정성 및 전략 유효성 결과를 바탕으로 실제 로봇을 통해 실험한 내용을 서술하였다.

실제 실험은 5장에서 먼저 한팔 매니플레이터를 이용하여 고정된 홀에 원형 및 사각껍을 삽입하는 것을 목표로 진행한 뒤, 6장에서 양팔 매니플레이터의 각 팔에 껍과 홀을 고정하여 진행하였다.

실험은 한국생산기술연구원 RSCL연구실의 양팔로봇을 통해 진행하였다. 실험에 사용된 양팔로봇은 총 16자유도를 가지고 있으며, 각 팔은 2.5kg의 물체를 들어올릴 수 있다. 역구동 관절구조를 지니고 있으며, 절대 엔코더를 사용하여 각 관절 각도를 측정할 수 있다.

먼저 실험을 진행하기 앞서 껍과 홀 두 물체의 질량을 측정하여(그림 15) 양팔 매니플레이터의 중력보상에 반영하였고, 그림 14와 같이 양팔로봇의 좌표계를 설정하였다. 양팔로봇의 상세 특성내역과 껍과 홀의 크기와 같은 환경정보는 표 6에 나타내었다.

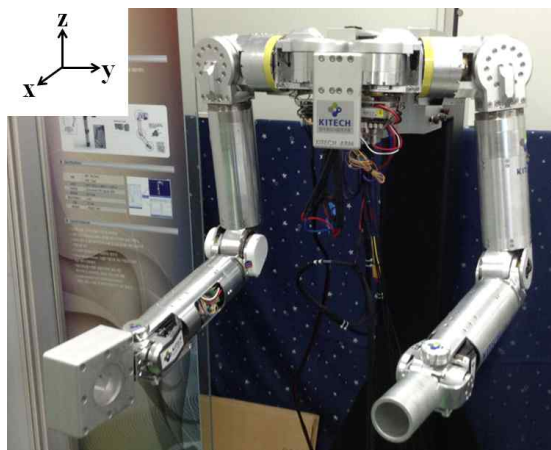
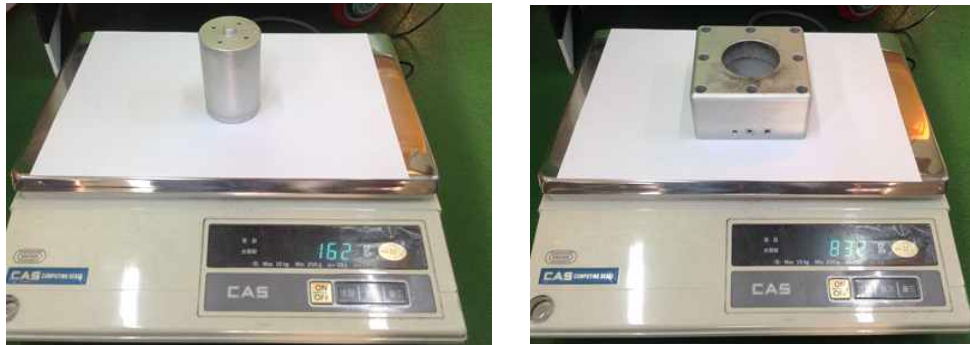


그림 14. 생산기술연구원 RSCL연구실 양팔로봇

그림 16에 양팔로봇에 펙과 홀의 무게를 반영한 중력보상 그래프를 나타내었다. 처음자세에서 임의의 외란에 의해 펙과 홀의 위치가 변하여도 외란 입력 후 자세를 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

양팔로봇	자유도	16-DOF(각 8-DOF)
	Payload	각 2.5kg
	무게	각 8kg
	통신방식	CAN통신
	카메라	없음
	F/T sensor	없음
펙과 홀	원형 홀 지름	40.0mm
	원형 펙 지름	39.9mm
	사각 홀 변 길이	40.0mm
	사각 펙 변 길이	39.9mm

표 6. 양팔로봇 특성 및 실험환경



펙 무게 : 162g

홀 무게 : 832g

그림 15. 펙과 홀 무게 측정

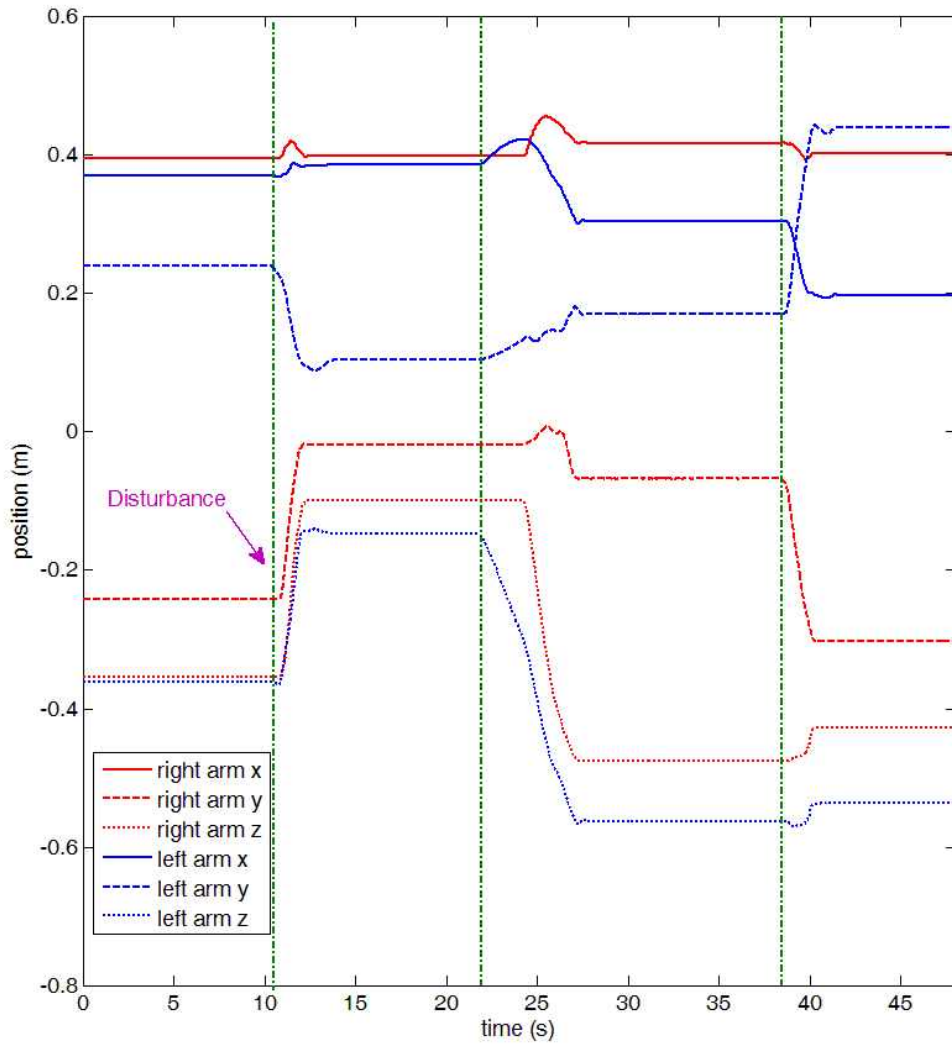
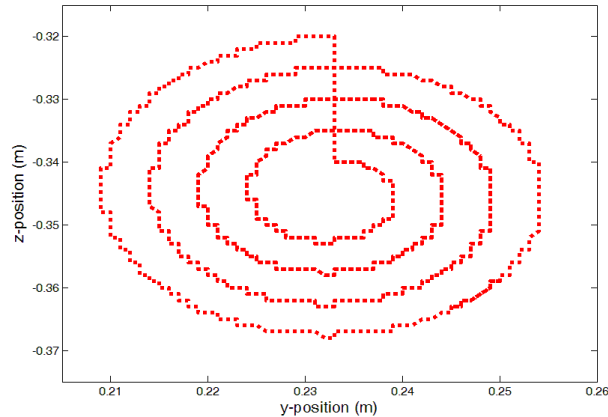


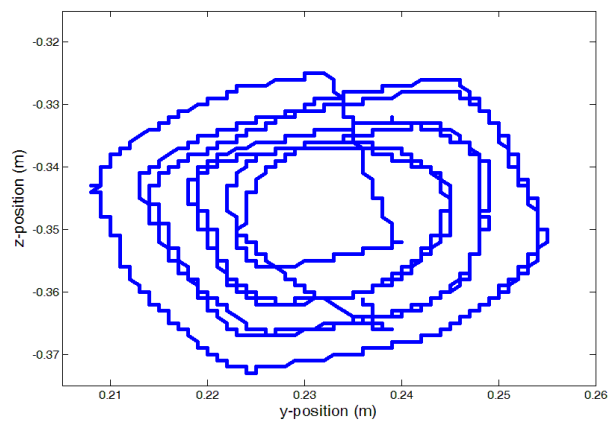
그림 16. 양팔 로봇 중력 보상

5.2 전략 구현

먼저 나선-스크류 모션을 실제 로봇에 구현하였다. 나선형 모션의 탐색범위는 지름 40mm의 원 안에서 그 내부를 나선형을 그리며 탐색할 수 있도록 설계하였고, 스크류모션은 +30도 ~ -30도의 범위에서 일정속도로 회전하도록 하였다. 그림 17 (a)는 설계한 나선 탐색 경로를 나타내고, (b)는 실제 로봇이 추정한 경로를 y-z 평면에서 그래프로 나타낸다. 그림 18 (a),(b)는 이러한 나선형 탐색경로를 시간에 따른 y, z축상에서 그래프로 나타내었고, (c)는 스크류 모션의 목표경로와 추정경로를 그래프로 나타내고 있다.

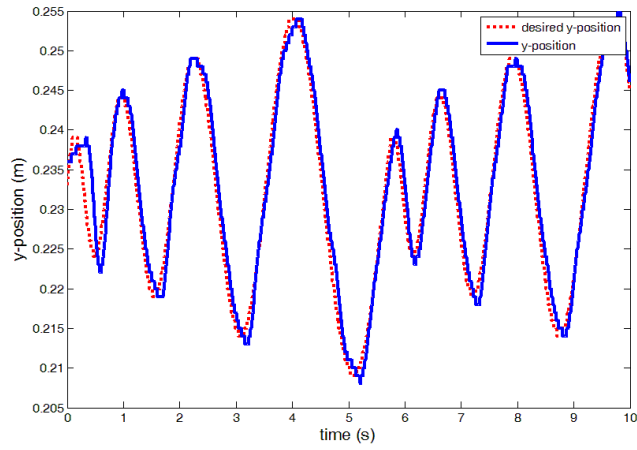


(a) 나선 모션의 위치 목표 경로

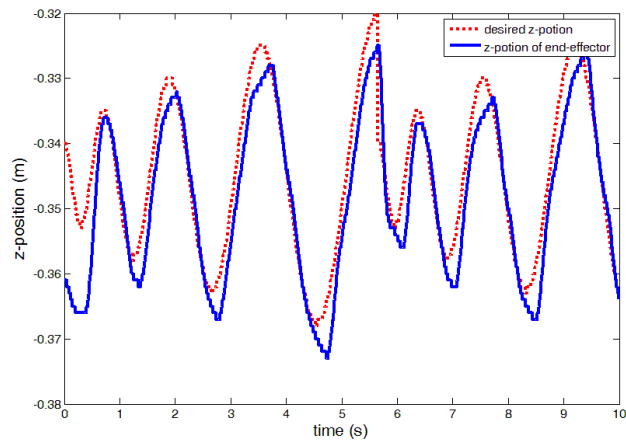


(b) 실제 로봇의 추정 경로

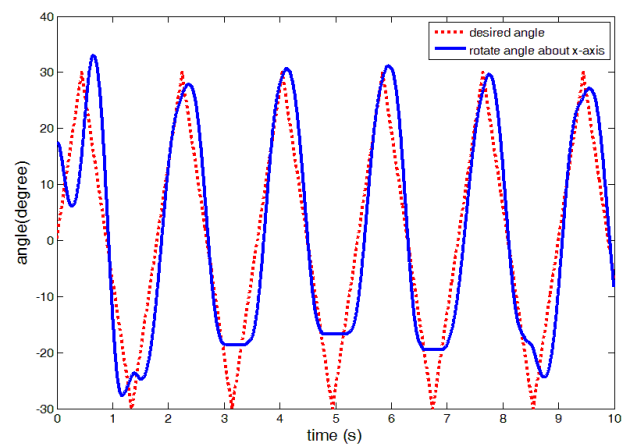
그림 17. 나선 모션의 목표 및 추정 경로



(a) 나선 모션의 y축 변화



(b) 나선 모션의 z축 변화



(c) 스크류 모션의 x축 회전 변화

그림 18. 나선-스크류 모션의 목표 및 추정 경로

그림 19는 컴플라이언스를 나타낸 그래프로써, 매니플레이터 끝단에 고정된 픽의 작업공간상에서의 좌표를 그래프로 나타낸 것이다. 0초에서 일정한 위치를 유지하고 있는 End-effector는 1초부터 대략 1초간 발생한 외란에 대하여 임의의 위치로 이동하였다가 외란이 사라진 이후 원래 위치로 돌아온 것을 알 수 있다. 이로써 End-effector는 작업공간상에서 정확한 위치를 유지할 수 있도록 제어되면서 동시에 컴플라이언스 특성을 띄어 외부 힘에 순응하는 특성을 보임을 알 수 있다.

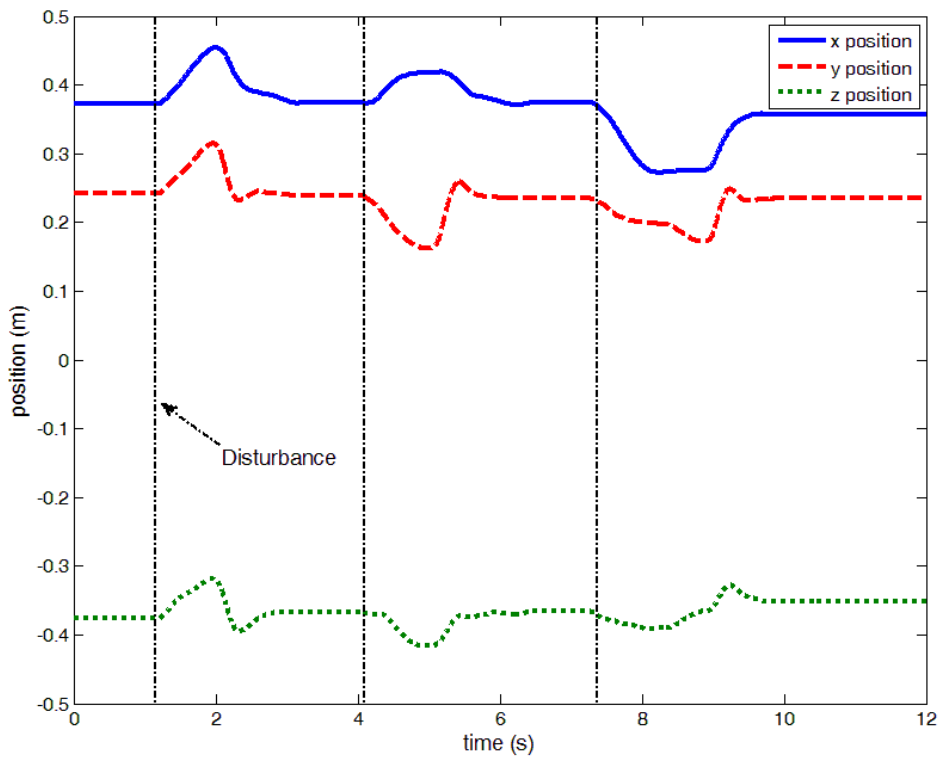


그림 19. 컴플라이언스 그래프

5.3 한팔 껍인홀 실험 결과

제안한 껍인홀 전략을 한팔 매니플레이터를 이용하여 실험을 통해 그 유효성을 검증하고자 하였다. 먼저 홀을 임의의 위치에 고정시키고 껍을 매니플레이터의 한팔에 고정시켜 실험하였다(그림 20).

매니플레이터의 제어기는 식 (1)과 같이 설계하였다. τ_l 는 왼팔 입력토크, J_v^T, J_w^T 는 각각 velocity, angular 자코비안, G_l 는 왼팔 중력보상벡터이다. F 는 홀을 향해 생성하는 힘이고, e_y, e_z 는 나선 모션을 따라가기 위한 에러이다. $d\Phi_l$ 는 스크류 모션을 위한 오리엔테이션 에러이다[13].

$$\tau_l = J_v^T \begin{bmatrix} F \\ k_p e_y \\ k_p e_z \end{bmatrix} + J_w^T k_w d\Phi_l + G_l \quad (1)$$



그림 20. 한팔로봇 껍인홀 시스템

5.3.1 원형 껍질 실험

원형 껍질과 홀을 가지고 실험을 진행하여 그 결과를 그림 22에 나타내었다. 그림 21은 껍질의 작업공간상에서의 좌표변화를 3차원 그래프로 나타낸 것으로 시뮬레이션 결과와 비슷하게 x축으로 나선을 그리며 증가하다가, 홀의 근처에서 홀의 위치를 찾을때까지 탐색경로를 따라 이동하고, 끝내 홀에 삽입되는 것을 확인할 수 있다.

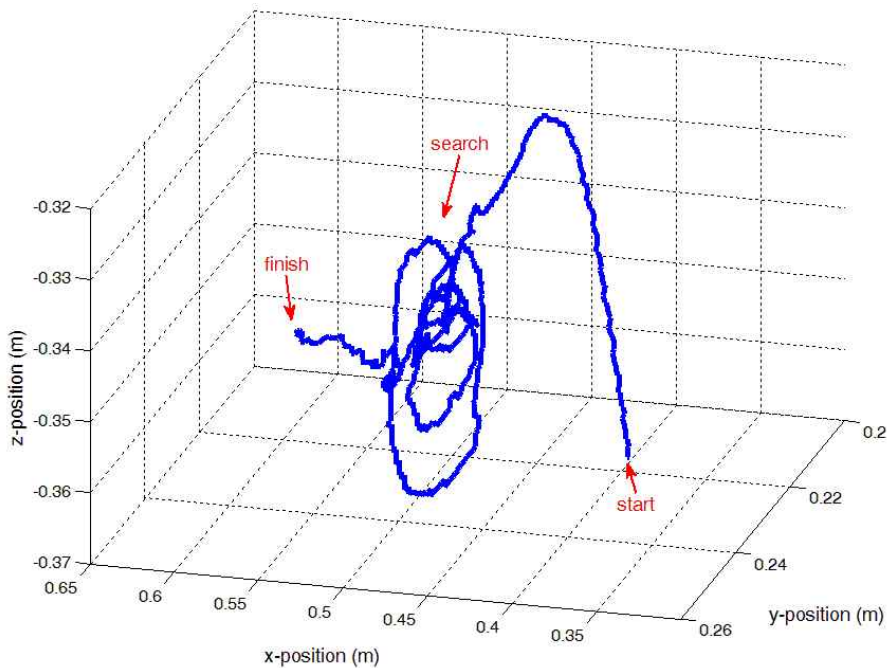


그림 21. 3차원공간에서 원형껍질 경로

실험의 세부그래프를 그림 23, 24에 첨부하였다. 그림 23의 x축 좌표변화를 살펴보면, 0.5초동안 홀의 근처를 향해 증가한 후, 8초까지 증가하지 못하다가 12초가 되어 삽입 완료된 것을 알 수 있다. 특히 0초에서 8초 사이에서의 y축, z축 그래프를 살펴보면 홀 근처에서 나선을 그리며 움직이다가 8초에서 홀의 위치를 찾고 끝내 삽입 성공한 것을 볼 수 있다.

그림 25는 스크류모션을 사용하지 않고 나선형 모션만을 사용했을 때의 그래프이다. x축 그래프를 살펴보면 0.5초 동안은 이전 그래프와 같이 홀을 향해 증가함을 알 수 있고, 4초에서 홀의 위치를 찾음으로써, y축과 z축 그래프의 변화가 없으나 홀과 픽간의 마찰에 의해 삼입이 되지 않는 것을 알 수 있다.

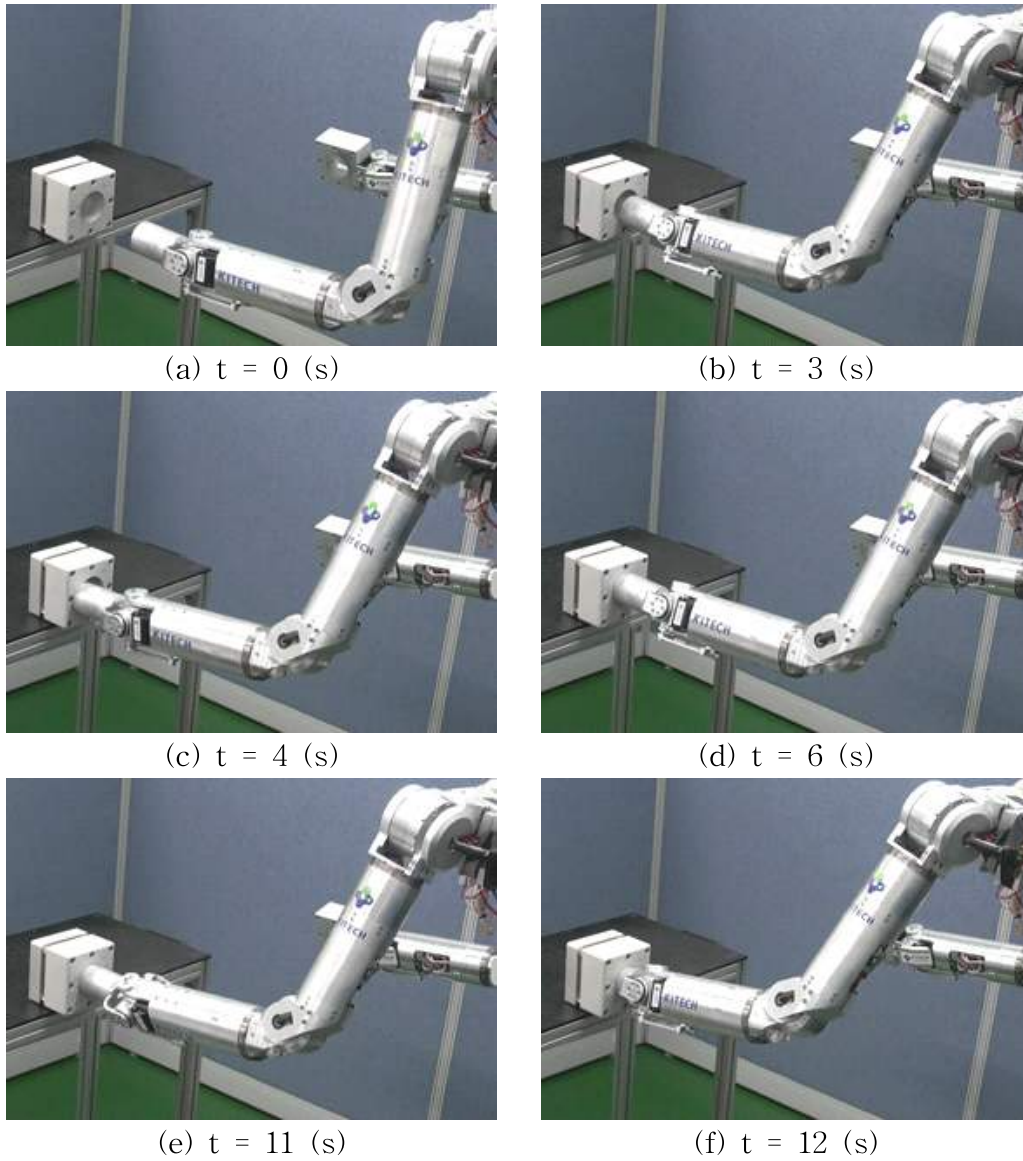


그림 22. 원형 픽인홀 실험

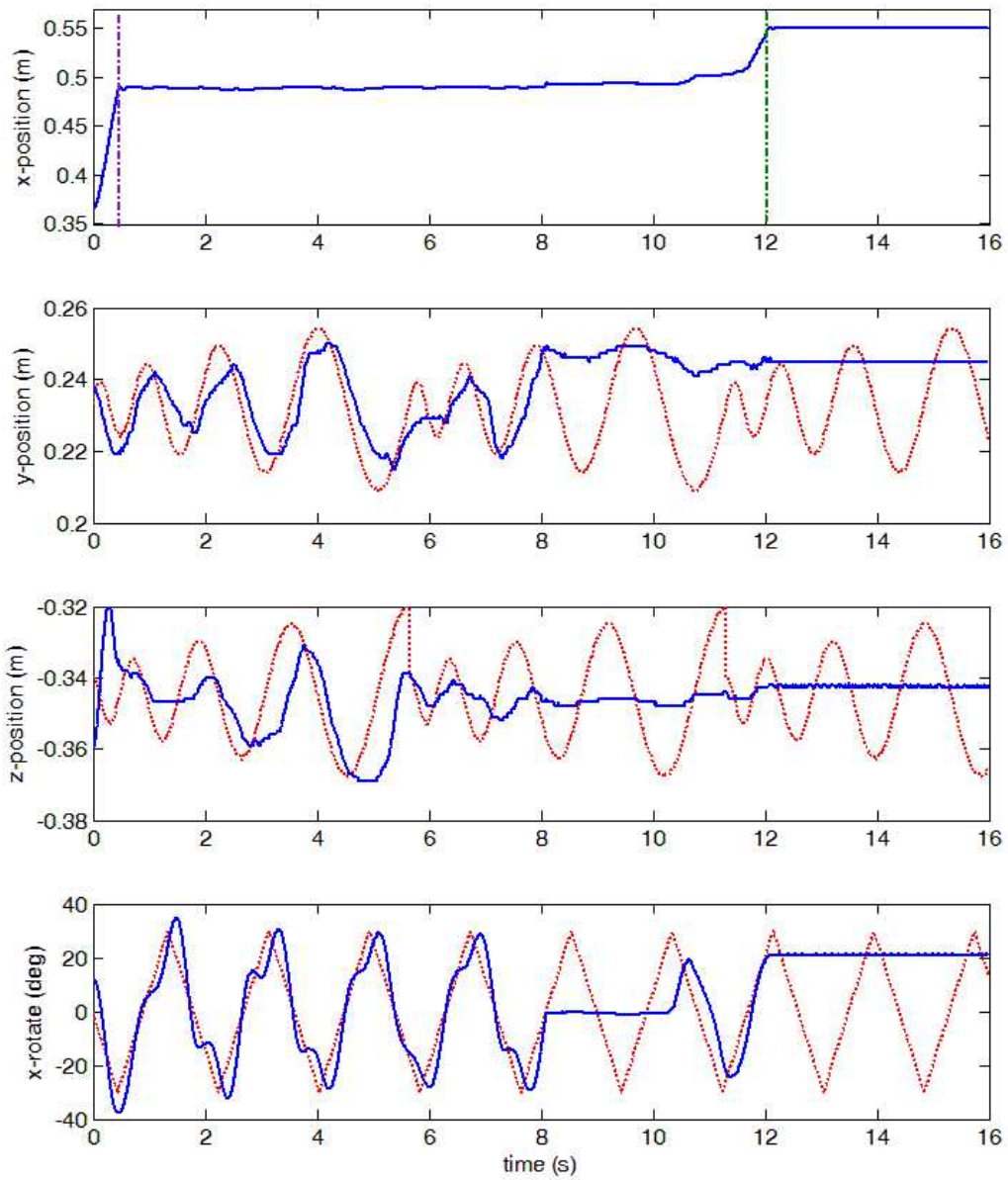


그림 23. 원형체의 위치/방향 변화

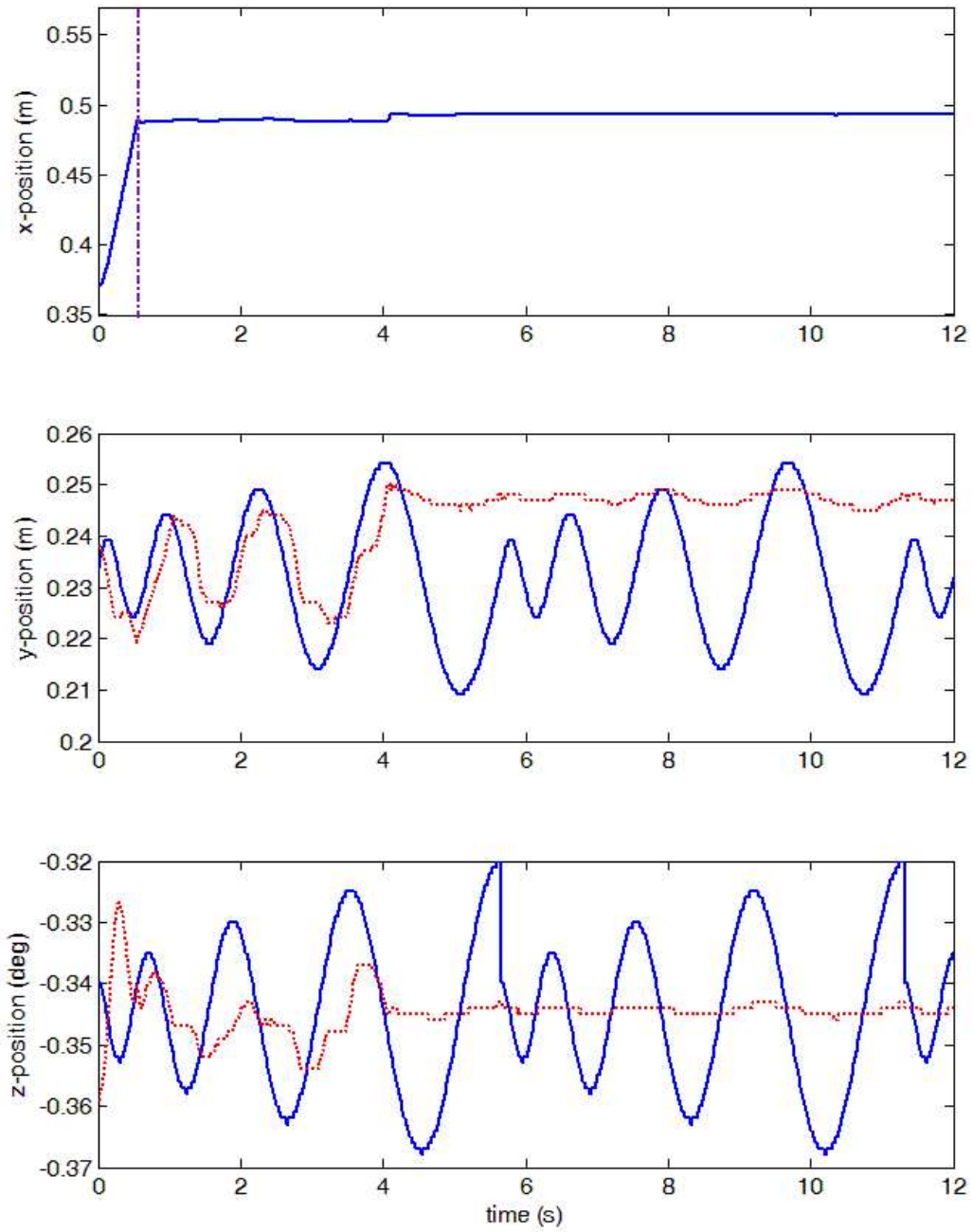


그림 24. 나선 모션만을 사용 시 궤 변화

5.3.2 사각 꺾인홀 실험

5.3.1절에서 진행한 원형 꺾인홀 실험과 같은 조건에서 사각꺾, 사각홀로 꺾과 홀의 외형을 바꾸어 실험을 진행하였다. 사각 꺾인홀은 원형꺾인홀과 달리 꺾의 방향까지 일치해야 삽입되는 조건이 있지만, 스크류 모션에 의해 방향오차까지 극복하며 꺾인홀 작업이 수행되는 것을 확인할 수 있었다(그림 25). 그림 26의 마지막 꺾의 x축에 대한 회전각도 변화 그래프를 살펴보면, 원형꺾과 달리 삽입완료 후에는 각도변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

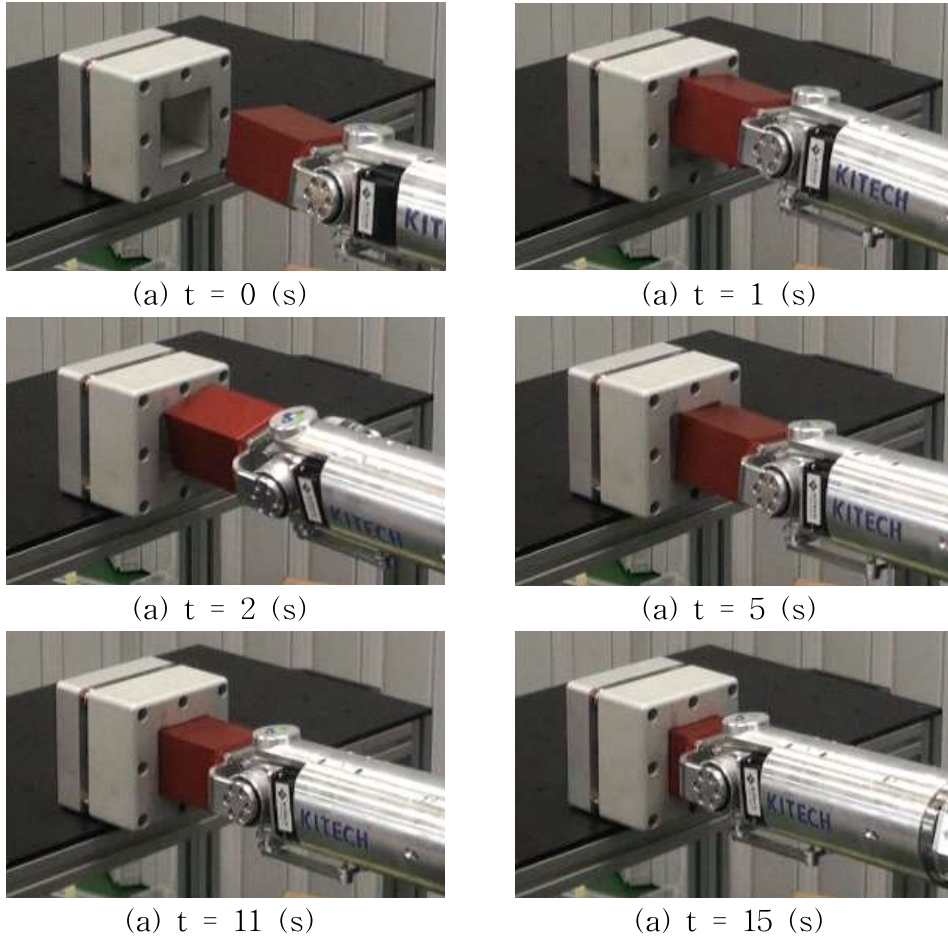


그림 25. 사각꺾인홀 실험

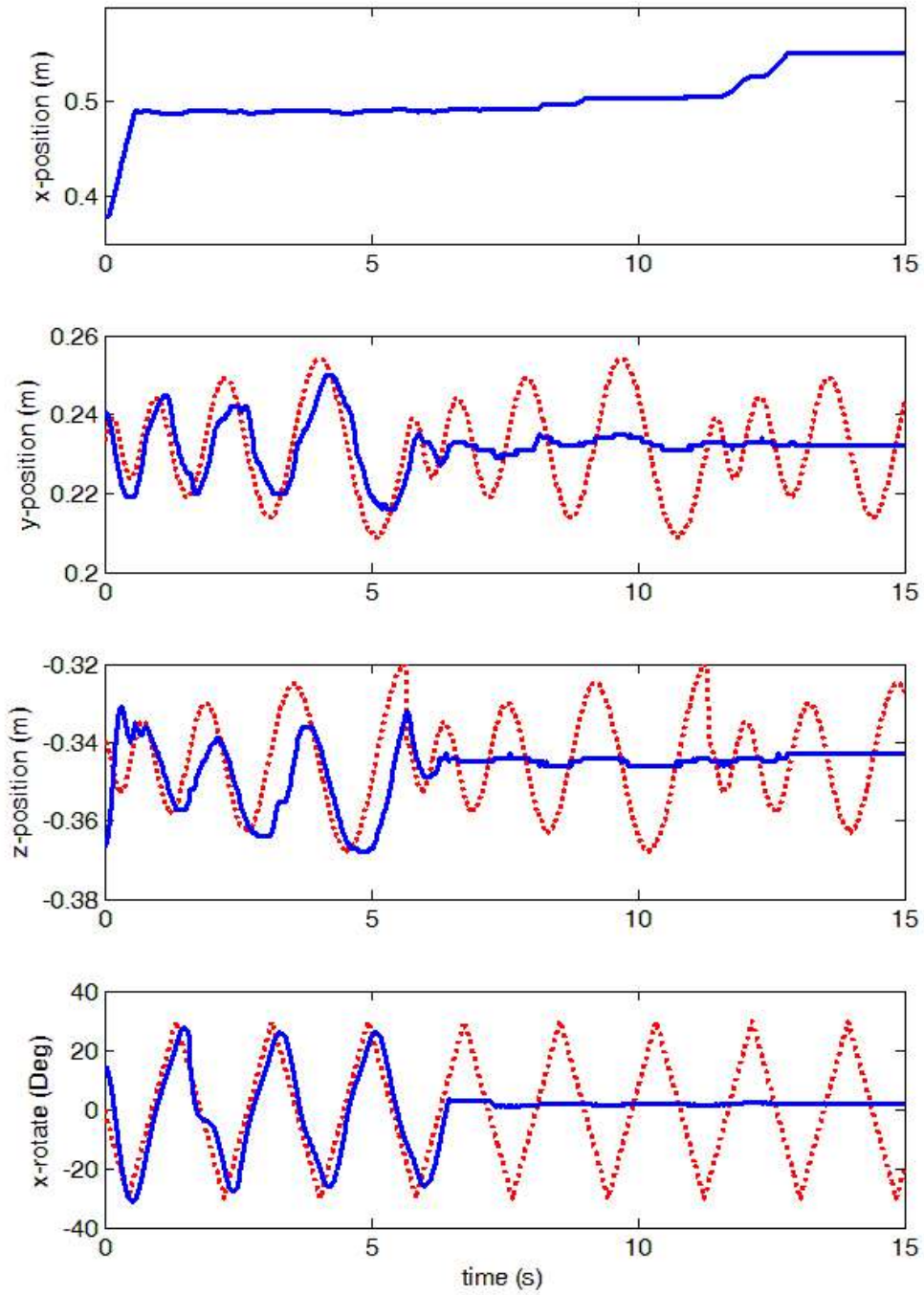


그림 26. 사각뿔의 위치/방향 변화

VI. 양팔 껍인홀 실험

6.1 양팔로봇 시스템

양팔로봇의 각 팔에 껍과 홀을 부착한 껍인홀 작업은 한팔로봇과 달리 정방향 기구학 정보를 통해 홀의 위치와 방향정보를 알 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 껍인홀 작업에 사용되는 관절 갯수가 기존한팔 8개에서 16개로 늘어남에 따라 관절정보오차에 의한 껍과 홀의 위치어러가 보다 크게 발생할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 비정형환경에서 적용가능하도록 제안된 전략이 이러한 오차를 극복 가능한지 실험을 통해 증명해보고자 하였다[14].

양팔로봇을 이용한 껍인홀 실험시, 껍과 홀의 로컬좌표계는 그림 27과 같다.

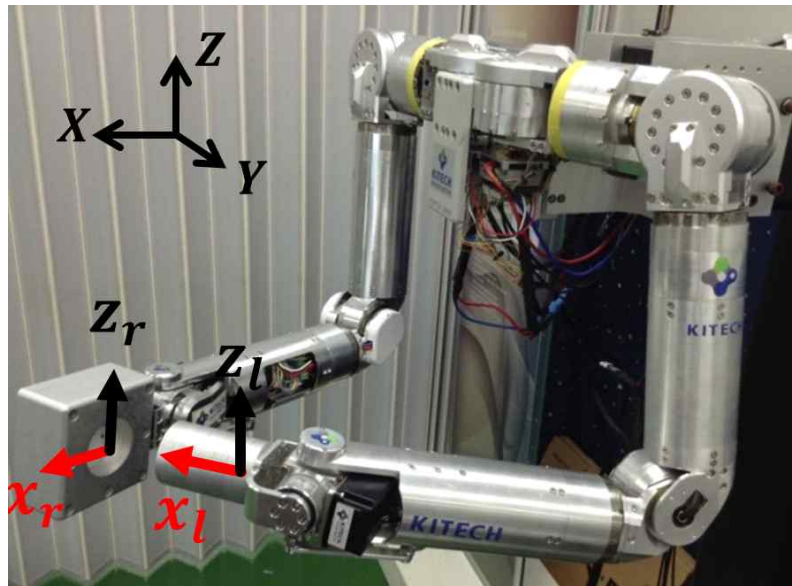


그림 27. 양팔로봇 좌표계 시스템

양팔로봇의 왼팔, 오른팔의 제어기는 식 (2),(3)에 나타내었다.

$$\tau_r = J_v^T k_v (x_d - x_r) + J_w^T k_w d\Phi_r + G_r \quad (2)$$

τ_r 는 오른팔 입력 토크, J_v^T, J_w^T 는 각각 velocity, angular 자코비안, G_r 는 중력보상 벡터이다. x_d 는 임의의 홀 위치로써, 홀을 임의의 위치, 방향에 고정하도록 제어하였다.

$$\begin{aligned} \tau_l &= J_v^T R_l \begin{bmatrix} F \\ k_p y_e \\ k_p z_e \end{bmatrix} + J_v^T k_v \Omega_1 (x_r - x_l) + J_w^T k_w d\Phi_l + G_l \\ d\Phi_l &= [s_{1d} \times s_{1r} + s_{2d} \times s_{2r} + s_{3d} \times s_{3r}] \\ [s_{1d} s_{2d} s_{3d}] &= R_l R_z(-90) R_e \\ [s_{1r} s_{2r} s_{3r}] &= R_r \\ \Omega_1 &= [100; 000; 001] \end{aligned} \quad (3)$$

τ_l 는 왼팔 입력토크, J_v^T, J_w^T 는 각각 velocity, angular 자코비안, G_l 는 각각 왼팔 중력보상벡터이다. Ω_1 는 selection matrix로써 왼팔의 껍이 오른팔의 홀의 위치를 향하도록 한다. $d\Phi_l$ 는 껍이 홀의 방향을 축으로 회전하며 스크류 모션을 생성시키는 역할을 한다.

6.2 양팔 껍인홀 실험 결과

6.1절에서 설계한 제어기를 이용하여 양팔로봇을 제어하여 껍인홀 전략을 실험하였다.

양팔로봇의 경우, 한팔로봇과 고정된 홀과의 껍인홀 실험과 달리 홀도 컴플라이언스 특성을 갖기 때문에 껍인홀 성공의 평균시간이 한팔 껍인홀보다 짧은 결과가 나타났다(그림 28).



(a) $t = 0$ (s)



(b) $t = 0.5$ (s)



(a) $t = 4.5$ (s)



(a) $t = 5$ (s)

그림 28. 양팔로봇의 껍인홀

양팔로봇을 통한 껍인홀 전략 성능 검증 실험 결과를 그림 29, 30에 그래프를 통해 나타내었다. 먼저 그림 29의 홀의 위치변화를 x축상에서 살펴보면, 0.5초에 껍과홀이 접촉하면서 껍이 홀을 향해 발생시키는 힘에 의해 증가하였다가, 4.5초에 껍이 홀에 삽입되면서 다시 원래 자리로 돌아감을 알 수 있다. y축상에서의 위치변화도 역시 비슷하게 나타나는데, 껍과의 충돌과 함께 껍의 진행방향으로 위치값이 감소하였다가 삽입과 동시에 다시 증가함을 알 수 있다. z축상의 위치변화는 한팔 껍인홀 실험과 큰 차이점이 나타나는데, 일정한 위치를 유지하도록 제어되고 있던 홀이 껍의 움직임에 의해 영향을 받아 같이 움직임을 볼 수 있다. 이는 홀 또한 컴플라이언스를 가지고 있음으로 해서 나타나는 특징이다.

그림 30은 껍과 홀의 위치변화를 3차원 공간상에서 그래프로 나타낸다. (a)에서 껍은 홀을 향해 진행하다가 충돌한 후 탐색경로를 따라서 움직이다가 삽입됨이 보다 명확히 나타나고, (b)에서는 홀이 껍에 의해 밀린 후 따라서 움직이다가 삽입되면서 다시 제자리를 향해 움직임이 나타난다.

하지만, 그림 30의 (a)와 (b)의 그래프의 좌표축을 자세히 비교해보면 충돌이 일어나고, 껍과 홀이 조립작업이 이루어진 후에도 좌표간의 거리가 있는 것을 알 수 있다. 그림 29의 y축상의 그래프에서 보다 명확히 나타나는데, 껍이 홀보다 y축상에서 위에 있어야 하지만 좀 더 낮은 위치에서 그래프가 나타난다. 이는 양팔간의 forward kinematics 에러에서 나타나는 것으로 로봇이 인식하는 껍과 홀의 위치와 실제 작업공간상에서의 껍과 홀의 위치가 차이가 있음을 알 수 있고, 이러한 비정형 환경에서도 껍인홀 작업이 원활히 수행됨은 제안하는 전략의 가장 큰 장점으로 볼 수 있다.

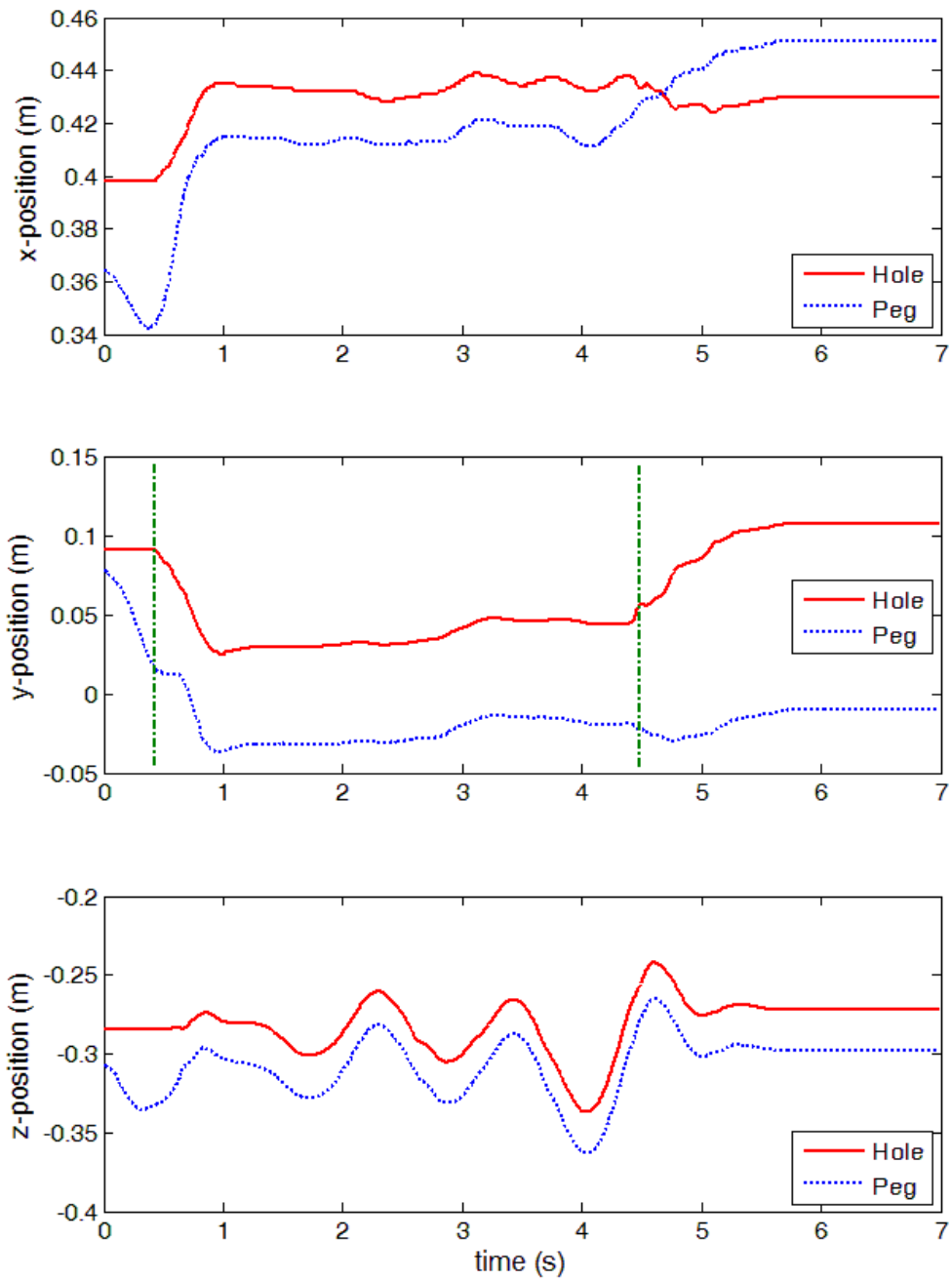
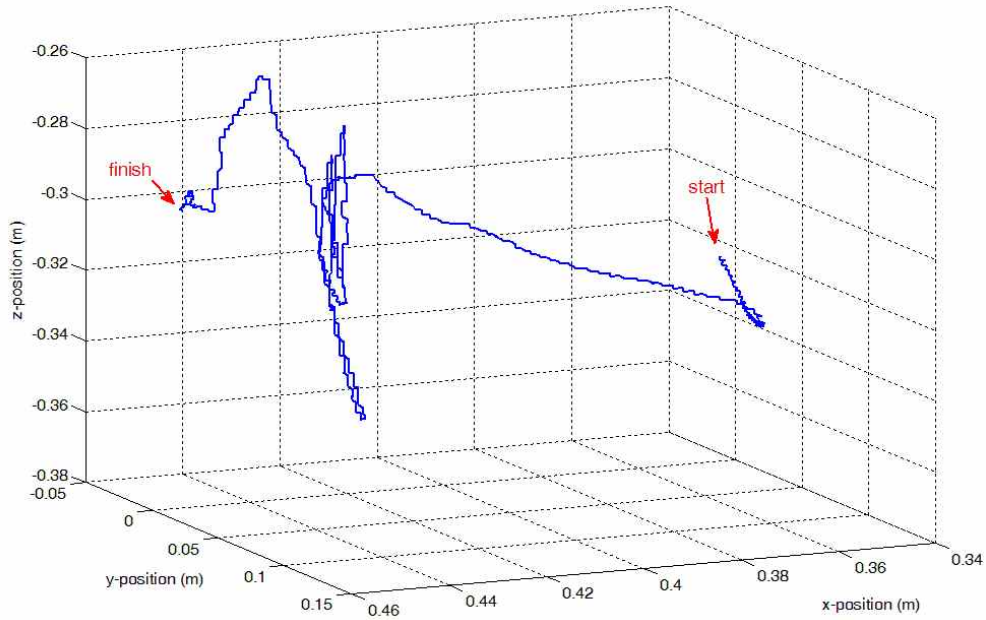
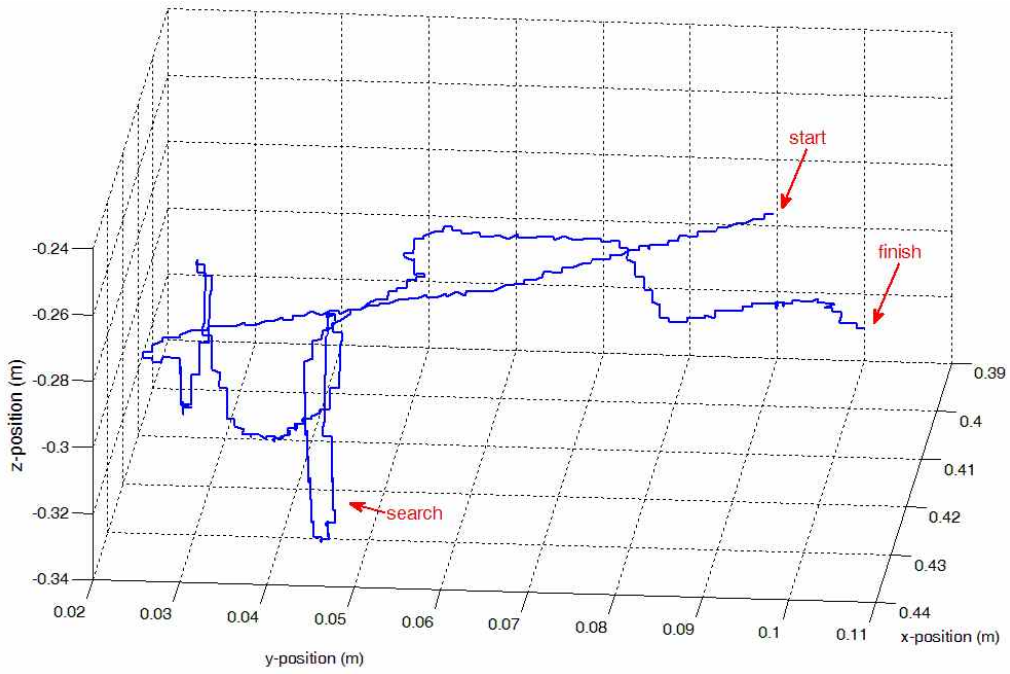


그림 29. 양팔팩인홀 팩과 홀의 위치 변화



(a) 3차원 공간에서의 픽 위치 그래프



(b) 3차원 공간에서의 홀 위치 그래프

그림 30. 3차원공간상에서의 홀과 픽의 위치 변화

VII. 결 론

본 논문에서는 조립작업을 대표하는 껍인홀 작업의 일반적인 4가지 방법에 대해 알아보고, 센서를 사용하지 않는 수동컴플라이언스와 나선-스크류모션을 통해 껍인홀 작업을 제안하였다. 기존에 수동 컴플라이언스는 RCC와 같은 특별한 장치가 필수였지만, 제어를 통하여 구현함으로써 센서의 의존도를 제거하였고, 홀의 위치를 찾기 위한 나선-스크류 모션을 사용하여 카메라의 의존도를 제하였다. 이러한 센서의 도움없이 껍인홀 작업의 성공은 카메라와 F/T센서와 같은 로봇을 통한 조립작업에 필수적인 장비의 사용과 더불어 높은 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대된다.

또한 기존에 껍인홀 연구분야에서 컴플라이언스의 사용은 껍인홀 작업의 궁극적인 해결책이 될 것이라고 예상되어져 왔는데, 이러한 이론을 실제 로봇을 통한 껍인홀 실험을 성공함으로써 그 이론을 입증하였다.

실험결과에서도 나타나듯이 타 대학기관과 연구기관의 껍인홀 공차에서도 큰 차이가 없거나 훨씬 작은 공차에서도 작업을 성공하여 그 성능을 입증하였다.

방법	껍 크기	공차	껍 크기 / 공차
F/T sensor[15]	25mm	0.05mm	500
Compliant[4]	50mm	1mm	50
F/T sensor[16]	25mm	0.25mm	100
F/T sensor, learning[17]	2.5mm	0.1mm	25
본 논문	39.9mm	0.1mm	399

표 7. 타 연구들과 껍 공차 비교

향후에는 나선형 탐색경로 외에 다양한 탐색경로에 대하여 실험하고 보다 빠른 껍인홀 작업이 이루어 질 수 있도록 최적화에 대하여 연구하고, 기존 껍과 홀을 양팔로봇에 고정했던 실험에서 로봇핸드가 부착된 양팔로봇을 통해 물체에 대한 정보를 인식하기 힘든 환경에서 껍인홀 작업을 수행할 예정이다. 이러한 경우 껍과 홀이 로봇에 고정되지 않았기 때문에 두 물체의 위치와 방향정보가 정확하지 않고, 자코비안 및 기타 제어에 필요한 정보들도 부정확하게 된다. 향후에는 이러한 부정확한 정보들을 이용해서 껍인홀 작업을 수행 할 수 있도록 연구를 진행할 예정이다.

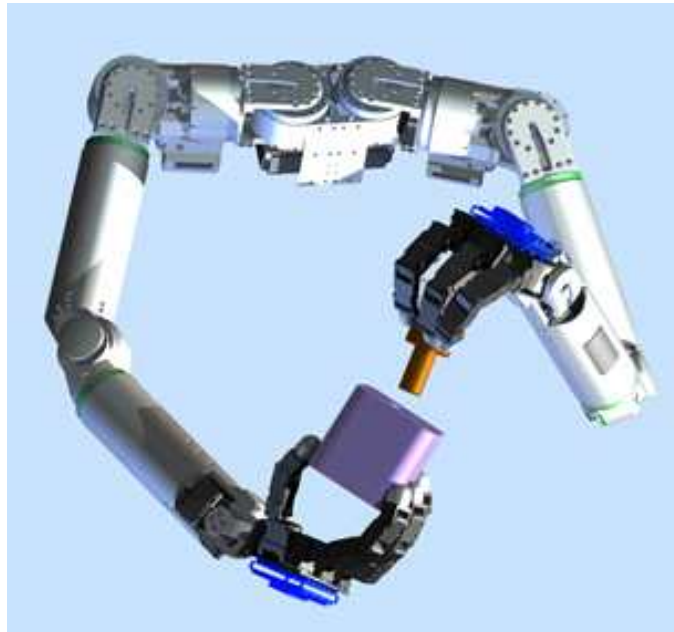


그림 31. 로봇핸드가 통합된 양팔껍인홀

참 고 문 헌

- [1] M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 11, no. 6, pp. 418 - 432, 1981.
- [2] SK.Yun, "Compliant Manipulation for Peg-in-Hole: is Passive Compliance a key to Learn Contact Motion?", International Conference on Robotics and Automation 2008
- [3] H. McCallion, G.R. Johnson and D.T. Pham, "A compliant device for inserting a peg in a hole", Industrial Robot: An International Journal 1979, Vol. 6 Iss 2, pp81-87
- [4] W.S. Newman, Y. Zhao, and Y-H. Pao: "Interpretation of force and moment signals for compliant peg-in-hole assembly," IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 571-576, 2001.
- [5] H. Qiao and S. Tso, "Three-step precise robotic peg-hole insertion operation with symmetric regular polyhedral objects," International Journal of Production Research, vol. 37, no. 15, pp. 3541 - 3563, 1999.
- [6] M. Peña-Cabrera, I. Lopez-Juarez, R. Rios-Cabrera, and J. Corona-Castuera, "Machine Vision Approach for Robotic Assembly," Assembly Automation, vol. 25, no. 3, pp. 204 - 216, 2005
- [7] J. Miura and K. Ikeuchi, "Task-oriented generation of visual sensing strategies in assembly tasks," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 20, pp. 126 - 138, 1998.
- [8] R.L.A. Shauri and K. Nonami, "Assembly manipulation of small objects by dual-arm manipulator," Assembly Automation 2011, Vol. 31, pp.263-274

- [9] G. Bätz, B. Weber, M. Scheint, D. Wollherr, and M. Buss, “Dynamic contact force/torque observer: Sensor fusion for improved interaction control,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 4, pp. 446–457. 2013.
- [10] S. R. Chhatpar and M. S. Branicky, “Search Strategies for Peg-in-Hole Assemblies with Position Uncertainty”, *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001
- [11] M. A. Peshkin, “Programmed compliance for error-corrective manipulation,” *IEEE Transactions on Robotics and automation*, vol. 6, no. 4, pp. 473 - 482, 1990.
- [12] Simlab inc., Roboticslab, Available at: <http://rlab.co.kr/>.
- [13] J. Y. S. Luh, M. W. Walker, and R. P. C Paul, “Resolved acceleration control of mechanical manipulators,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-25, no. 3, pp. 468–474, 1980.
- [14] C. Smith, Y. Karayiannidis, L. Nalpantidis, X. Gratal, and P. Qi, “Dual arm manipulation - A survey,” *Robotics and Autonomous Systems* 60(2012),1340–1353
- [15] D.I. Park, C. Park, H. Do, T. Choi, and JH. Kyung, “Assembly phase estimation in the square peg assembly process“, 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems.
- [16] S. R. Chhatpar, and M. S. Branicky. “Particle Filtering for Localization in Robotic Assemblies with Position Uncertainty“, *Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3610–3617.
- [17] I. Lopez-Juarez, and M. Howarth, “Knowledge acquisition and learning in unstructured robotic assembly environments“, *Information sciences* 145(2002) pp.89–111

Abstract

Peg-in-Hole Task with Compliant Dual arm Manipulator

Hyeonjun Park

Department of Transdisciplinary Studies

Graduate School of Convergence Science and Technology

Seoul National University

Recently, application area of a robot is widely extended to an assembly line of a factory and house. When the robot substitutes a factory worker or helps people house chore, the mainly task of the robot is an assembly work.

In order for the robot to achieve these works, a peg-in-hole task which represents the assembly work has been actively researched. The peg-in-hole work is the task that insert particular object (peg) to the same shape hole like assembling a screw bolt and nut, inserting the wheel to the shaft, and plugging in an outlet. The peg-in-hole task with the manipulator has the stage: first step is the finding a position of a hole. Second step is the inserting a peg to the hole. so as to achieve this work, the exact information about hole position is obviously required.

In this paper, the method which has been used in peg-in-hole problem is analyzed and the new method which does not use external

sensor and valid in unstructured environment is proposed.

In order to verify a feasibility of the proposed peg-in-hole strategy, the hardware experiment is implemented using dual arm manipulator that belongs to RSCL Lab, KITECH. First experiment that peg-in-hole task with fixed hole and controlled peg using single-arm is implemented and the second that peg-in-hole task with controlled hole by right-arm and controlled peg by left-arm is implemented.

keywords : Dualarm, peg-in-hole, compliance

Student Number : 2011-23991

감사의 글

먼저 저를 지도해주신 박재홍 교수님께 진심으로 감사의 말을 드립니다. 다이로스 연구실에서 공부 할 수 있다는 것은 제게 너무나도 큰 행운입니다. 학문적인 부분뿐만 아니라 많은 것을 배우고 있습니다. 또한 논문지도에 도움을 주신 홍성수 교수님, 안정호 교수님께도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

앞으로 많은 날을 함께할 다이로스 식구들에게도 감사드립니다. 원종석 부장님, 오창근 박사님, 세호형, 원제형, 피터형, 민성이형, 주희누나, 이수, 민호, 용태, 순욱, 지민, 영민, 민곤, 상현, 수민, 진규, 주완, 혜진, 재민 대성에게 감사의 말을 전합니다. 모두들 잘해주셔서 연구실 생활이 즐겁습니다.

재미있는 주제로 바르게 연구할 수 있도록 물심양면으로 도와주시는 생산기술연구원의 백문홍 박사님, 배지훈 박사님, 박재한 연구원님, 성호형, 용득형, 가람형, 재식에게도 이 자리를 빌어 감사의 말을 전하고 싶습니다. 더욱 열심히 하겠습니다.

또한 로봇을 계속하며 도움이 필요할 때 큰 힘이 되는 은찬이, 동욱이, 민기, 윤식이, 현우, 용호, 승재, 찬규 외 로봇 식구들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 모두 앞날에 좋은 일만 있길 기원합니다.

오랜시간동안 항상 옆에서 저를 응원해주고 긍정적으로 만들어주는 미래의 와이파이 소명에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

마지막으로, 늘 제가 하고 싶은 대로 결정해도 항상 저를 믿어주시고 뒷바라지 해주시는 부모님과 동생에게 감사의 인사를 전합니다.

앞으로 좀 더 열심히 노력하겠습니다. 모두 고맙습니다.

2014년 2월
박현준 올림