

불확실한 환경에서 조립을 수행하는 두 대의 로봇 팔 제어

정성엽* · 강경대** · 이두용***
(2000년 6월 17일 접수)

Control of a Two-Arm Robot System for Assembly in Highly Uncertain Environment

Seong-Youb Chung, Kyung-Dae Kang and Doo Yong Lee

Key Words : Robotics(로봇공학), Assembly(조립), Fixtureless Assembly(고정구 없는 조립), Discrete Event System(이산이벤트시스템), Cooperative Control(협동제어)

Abstract

Assembly tasks are often performed by one robot with fixtures. This type of assembly system has low flexibility in terms of the variety of parts and the part-presentation the system can handle. This paper addresses assembly without fixtures using two-manipulator robot. An active method using force feedback is proposed for the peg-in-hole assembly in highly uncertain environment. Assembly states are defined as status having unique motion constraints and events are modeled as variation of the environmental force. The states are recognized through identification of the events using two 6-d.o.f. force/moment sensors. The proposed method is verified and evaluated by experiments with round peg-in-hole assembly.

1. 서론

일반적으로 조립 작업은 부품을 고정구로 테이블 위에 고정시키고 한 대의 로봇으로 다른 부품을 이동시켜 조립 하는 형태를 취하고 있다. 이러한 조립 시스템은 다룰 수 있는 부품의 종류나 부품 공급 방법 등에서 유연성이 떨어진다. 두 팔 로봇을 이용한 조립 시스템은 이러한 단점을 극복할 수 있다. 그러나, 닫힌 구조를 이루고 있지 않는 조립 작업은 모델링 및 제어가 어렵고 부품 오차, 센서 오차, 그림퍼에 의한 오차 등 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 그 장점에도 불구하고, 현재까지의 두 팔 로봇에 관한 연구는 무거운 물체 및 유연한 물체의 이동과 같이 비교적 오차가 작은 닫힌 구조를 갖는 작업에 편중되어 있다.^(1,2) 따라서, 상대적으로 조립 작업에 대한

연구는 적은 편이다. F. Caccavale⁽³⁾는 두 로봇의 compliance 를 이용하여 힘 제어 측면에서 펙인홀 조립을 수행하였으나 조립 작업에서의 불확실성을 다루지 않고 있으며, S. Sakakibara⁽⁴⁾ 역시 정밀한 두 팔 로봇 시스템을 구축하여 펙인홀 작업을 수행하였지만 조립 작업의 불확실성에 대해 언급하지 않았다. 본 논문에서는 불확실한 환경에서 두 팔 로봇을 이용하여 고정구 없이 펙인홀 조립 작업을 수행하는 방법을 다룬다.

대개의 경우에 펙인홀 작업은 hole 에 chamfer 를 두어서 RCC(Remote Compliance Center)와 같은 부가적인 장치를 사용하는 수동적인 방법을 이용하여 조립을 수행한다.⁽⁵⁾ 그러나, 이 방법은 조립 간극에 비해서 시스템 오차가 큰 경우에 사용할 수 없으며, jamming 이나 wedging 같은 오류를 피할 수 없다.⁽⁶⁾ 게다가, 수평으로 조립 작업을 해야 하는 경우에도 적용할 수 없어 유연성이 떨어진다.⁽⁷⁾ 반대로 능동적 방법은 센서를 통해 받아들인 힘과 모멘트 정보를 이용하여 이러한 문제들을 극복할 수 있으며, chamfer 가 없는 조립 작업에도 적용할 수 있다.^(6,8) 두 팔 로봇 시스템은 고정구를 사용하지 않기 때문에, 조립 위치를 마음대

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
** 한국과학기술원 기계공학과 석사과정
*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : leedy@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3229 FAX : (042)869-3210

로 바꿀 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 살리기 위해서는 수직으로만 조립 작업을 할 수 있는 RCC 같은 장치는 사용하지 말아야 한다. 또한, 그립퍼를 이용하여 hole 을 잡는 과정에서 많은 오차를 유발할 수 있기 때문에 조립 간극보다 위치 정밀도가 높은 로봇을 이용해도 수동적인 방법으로는 작업이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 능동적인 방법을 사용해서 조립 작업을 수행한다.

일반적인 능동적 방법은 다음과 같은 과정을 거쳐서 조립 작업을 수행한다. 우선 조립 과정을 세부 상태로 모델링 하고 조립 상태의 관계를 구한다. 그리고, 구해진 상태 관계에 기초하여 조립 상태 시퀀스를 계획하며, 이 시퀀스에 따라 조립 작업을 수행한다. 조립 작업을 하는 동안에 힘/모멘트 센서의 신호를 모니터링하여 현재 상태를 알아내고 다음 상태로 가기 위한 적절한 명령을 로봇이 수행하도록 한다.

일반적으로 픽인홀 작업을 수행하는 연구에서는 조립 상태와 접촉 상태를 함께 취급하였다.⁽⁶⁾ 그러나, 3 차원 픽인홀 작업의 경우에는 같은 접촉 상태라 하더라도 다음 상태로 이동하기 위해서 다른 제어 명령을 적용해야 하는 경우가 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 조립 상태를 유일한 제어 명령을 갖는 상태로 정의한다. 이렇게 상태가 정의되면 조립 과정에서 상태를 알아내는 것이 매우 중요한데, 센서 외란, 로봇 위치 오차 등으로 인하여 상태를 구분하는 것이 쉽지 않다.

조립 상태를 알아내는 방법은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 준 정적인 힘을 이용하여 조립 상태를 직접적으로 알아내는 것이며,^(9,10) 두 번째 방법은 상태의 변화를 나타내는 이벤트를 판별함으로써 현재의 상태를 간접적으로 알아내는 것이다.^(11,12) 첫번째 방법은 준 정적인 운동, 매우 작은 마찰력, 무시할 만한 센서 외란을 가정하기 때문에 조립 공차에 비하여 오차가 매우 큰 시스템에 대해서는 적용할 수 없다.⁽¹¹⁾ 이에 비해서 두 번째 방법은 상태 변화 동안의 힘의 변화를 측정하여 이벤트를 판별하는 것으로 오차가 큰 경우에도 적용할 수 있다. 이 방법은 또, 크게 정성적인 힘의 변화를 이용하는 방법⁽¹²⁾과 상태가 변하는 동안의 힘의 프로파일을 학습하여 이벤트를 판별하는 방법⁽¹¹⁾으로 나눌 수 있다. 학습을 이용하는 방법은 홀이 고정되어 있는 경우에는 힘의 프로파일이 비슷하여 적용할 수 있으나 그렇지 않은 경우는 사용하기 힘들다. 로봇이 그립퍼를 사용하여 홀을 잡고 있는 경우는 그립퍼

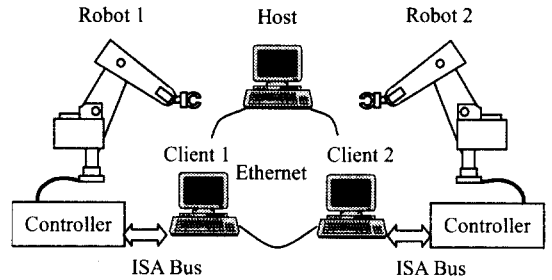


Fig. 1 Two-arm robot system

오차로 인하여 홀의 위치 및 홀 평면의 각도가 일정하지 않아서 학습에 의한 방법을 적용하기가 쉽지 않다. 따라서, 본 논문에서는 정성적인 힘의 변화를 이용한 방법을 사용하여 이벤트를 알아내도록 한다.

2. 두 팔 로봇 시스템

고정구 없는 불확실한 환경에서 조립 작업을 수행하기 위해서 본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 두 대의 클라이언트와 한 대의 호스트로 구성된 두 팔 로봇 시스템을 구축하였다. 각 클라이언트는 호스트에서 전달되어 오는 명령을 해석하여 5 자유도를 가지는 매니퓰레이터를 제어하고, 로봇에 전달되는 외부 힘을 손목에 부착된 6축 힘/모멘트 센서에서 받아들여, 로봇의 위치 정보와 함께 데이터 패킷을 만들어 호스트로 데이터를 전송한다. 호스트는 각 클라이언트로부터 데이터를 받아들여 이벤트가 발생할 경우 상태를 판별하고 각 상태에 맞는 명령을 클라이언트로 보낸다.

실제 실험은 로봇의 가용하중(payload)이 작아서 그립퍼를 이용하지 않고 힘/모멘트 센서에 조립 부품을 부착하여 수행하였다. 하지만, 본 논문에서 제시하는 방법은 불확실한 환경을 가정하기 때문에, 그립퍼를 사용하여도 똑같이 적용할 수 있다.

각 시스템은 실시간 운영 체제인 QNX 를 기반으로 하고 있으며, 호스트는 펜티엄 MMX166MHz 컴퓨터를 사용하였으며 클라이언트는 펜티엄 120MHz 컴퓨터를 이용하였다. 데이터 통신은 Ethernet 을 사용하여 구성하였다. 통신 방법으로는 동기 방식과 비동기 방식이 있다. 동기 방식은 데이터 전송 시에 송신부가 데이터를 전송할 때, 수신부 측의 대답을 받고 다음 명령을 처리하는 방식이다. 이 방법을 사용할 경우에 로봇 제어 사이클이 대기 시간에 영향을 많이 받게 되는

단점이 있어서, 대기 시간이 길어질 경우에는 제어 불능 상태에 빠질 우려가 있다. 이에 비하여, 비동기 방식은 수신부의 대답을 기다리지 않고 다음 일을 처리 할 수 있기 때문에, 대기 시간이 없어 제어 사이클에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 로봇을 제어하는 클라이언트가 호스트로 데이터를 전송할 경우에 비동기 방식인 UDP(User Datagram Protocol)를 이용하였다. 반면에, 호스트의 명령을 클라이언트는 즉각적으로 수신해서 로봇을 구동해야 한다. 따라서, 제어 사이클에 최소한의 영향을 주면서 호스트 명령에 즉각적으로 반응하기 위해서 두 개의 프로세스를 이용하여 클라이언트를 구성한다. 프로세스 1 은 로봇을 직접적으로 제어하고 센서로부터 데이터를 수집하여 로봇을 제어하는 동안에 주기적으로 호스트로 데이터를 보낸다. 프로세스 2 는 수신 블록 상태로 대기하면서 호스트로부터의 메시지 도착을 점검하고 메시지가 전송되면 데이터를 메모리에 옮긴 후 프로세서 1 에게 명령이 전달되었다는 것을 알려주고, 수신 블록 상태로 전환하여 프로세스 1 의 작업에 영향을 미치지 않도록 한다. 이렇게 두 개의 프로세스가 데이터의 송신과 수신 역할을 각각 수행하도록 해서 송신 대기시간 문제와 호스트의 명령에 즉각적으로 반응해야 하는 문제를 해결하였다.

프로세스 1 과 프로세스 2 의 데이터 전달은 shared memory 방식을 이용하였다. 이 방법은 같은 CPU 를 사용하는 프로세스의 데이터 전송 방법으로 많이 사용되는 것으로 메모리를 직접 접근하기 때문에 데이터 전송 시간이 매우 짧은 장점을 가지고 있다. Fig. 2 는 이와 같은 일련의 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

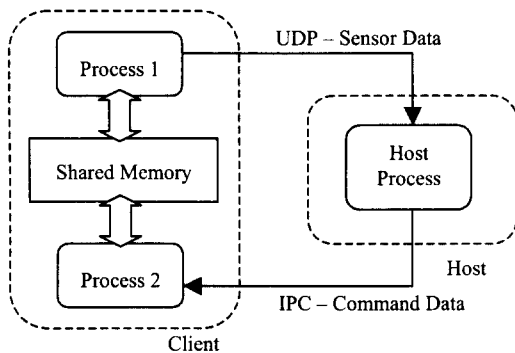


Fig. 2 Schematic diagram of communication between the client and the host

3. 원형 픽인홀의 모델링

3.1 조립 상태의 정의

조립 상태는 Fig. 3 과 같이 hole 의 중심을 지나 는 임의의 선을 기준으로 정의한다. 이렇게 하는 이유는 일단 상태가 모델링 되면, 원형 픽인홀 작업은 hole 의 축을 중심으로 대칭이기 때문에, peg 의 이동 방향이 결정되면, 처음 모델링 된 상태를 간단하게 대칭 이동시켜 적용할 수 있기 때문이다.

픽인홀 타입의 조립 작업에서는 일반적으로 조립 상태와 접촉 상태를 같이 취급한다. 그러나, 같은 접촉 상태라 하더라도 다른 제어 명령을 적용해야 하는 경우가 존재한다. 예를 들면, Fig. 4 와 같이 peg 가 hole 의 오른쪽에서 접근할 경우 로봇의 위치 오차로 인하여 같은 접촉 상태지만 두 가지 다른 상황이 발생한다. 첫 번째 경우는 peg 가 hole 의 가장자리 오른쪽 위에 접촉하게 되는 것이고, 두 번째 경우는 peg 가 hole 의 모서리 오른쪽 아래에 접촉하게 되는 경우이다. 첫 번째 경우에는 peg 를 아래 방향으로 이동시켜야 하며, 두 번째 경우는 peg 를 위 방향으로 이동시켜야 hole 의 안쪽으로 peg 가 들어가게 된다.

Fig. 4 는 topologically 동일한 상태이기 때문에 접촉 상태 모델링 관점에서는 같은 조립 상태로 모델링 된다. 그러나, 앞에서 설명한 바와 같이 로봇의 명령을 고려하면, 두 상태에 대해서 각각 다른 명령을 내려 주어야 하기 때문에 접촉 상태 모델링 방법을 직접 원형 픽인홀 작업에 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서, 하나의 접촉 상태를 더 세부적인 상태로 나누어 조립 작업을 모델링 하였고 이것을 조립 상태로 정의하였다.

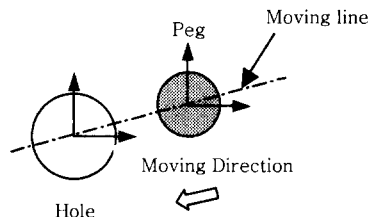


Fig. 3 A line used for definition of states

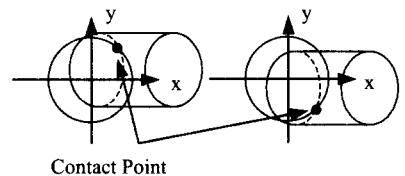


Fig. 4 States requiring different motion strategies

Fig. 4에서 적용하는 모션은 hole과 peg의 중심점 위치를 정확히 모르는 상황에서 두 중심점을 로봇의 진행방향과 일치시키기 위한 것이다. 만일 극좌표계를 사용한다고 할 경우에는 원점을 정확히 모르는 경우에 peg를 원점으로 이동시키는 것이다. 극좌표계를 r-θ로 생각할 때, Fig. 4의 각 조립 상태에서 -θ, +θ의 모션을 적용해야 peg의 진행방향을 좌표계의 원점으로 일치시킬 수 있다. 따라서, 극좌표계를 사용한다고 하더라도 Fig. 4의 경우는 다른 상태로 모델링해야 한다.

3.2 이벤트의 정의

상태가 변화할 때, 운동 구속 조건이 바뀌게 된다. 따라서, 외부에서 부품에 작용하는 힘이 불연속적으로 바뀌게 된다. 이러한 불연속 힘으로 인하여 힘/모멘트 프로파일에 큰 변화를 가져오게 되는데, 이와 같은 현상을 이벤트라고 정의한다.

$$E = \{(s_i, s_j) \mid s_i, s_j \in S, S = \text{set of states}, i \neq j\} \quad (1)$$

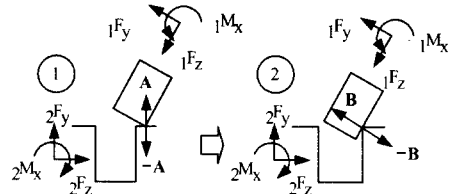
하나의 조립 작업에서 정의되는 이벤트의 집합은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

두 팔 로봇을 이용하여 조립 작업을 수행할 경우는 조립 자세 및 로봇의 위치와 힘/모멘트 프로파일의 정량적인 값이 작업마다 다르지만 힘/모멘트의 정성적인 변화의 경향은 비슷하다. 따라서, 발생한 이벤트를 판별하는데 힘과 모멘트의 정성적 변화량이 유용하게 사용될 수 있다. 임의의 변수 S의 정성적 수량을 [S]로 나타내며, Table 1과 같은 조건에 따라서 +, -, 0로 정의한다. Table 1의 Th는 센서 외란을 고려한 임계값이다. 즉, 센서 외란의 영향으로 0 근처의 센서 값은 신뢰할 수 없기 때문에 신호 S의 정성적인 값 0을 임계값의 범위 안에 있는 값으로 정의한다. 그리고, 정성적인 + 값은 양의 임계값보다 큰 값으로, 정성적인 - 값은 음의 임계값보다 작은 값으로 정의한다.

Fig. 5(a)를 보면 조립 상태가 1에서 2로 변할 때의 외부 힘이 A에서 B로 바뀌는 것을 알 수 있다. 두 힘의 방향이 상태 1에서 상태 2로 바뀌는 순간에 변화하기 때문에 센서에서 측정되는 힘과 모멘트에 큰 변화가 발생한다. r₁과 r₂를 각각 상태 1과 상태 2에서 센서 1의 좌표계의 원점에서 접촉점의 위치를 나타내는 벡터라고 할 때, 정성적인 힘과 모멘트의 변화량 [ΔF], [ΔM]을 구하면, 식 (2)와 같다.

Table 1 Qualitative value of signal S

Condition	+Th<S	-Th<S<+Th	S < -Th
[S]	+	0	-



(a) Environmental force at state 1 and state 2

$$\begin{aligned} [\Delta_1 F_y] &= +, [\Delta_2 F_y] = + \\ [\Delta_1 F_z] &= +, [\Delta_2 F_z] = + \\ [\Delta_1 M_x] &= -, [\Delta_2 M_x] = u \end{aligned}$$

(b) Qualitative modeling of an event (1,2)

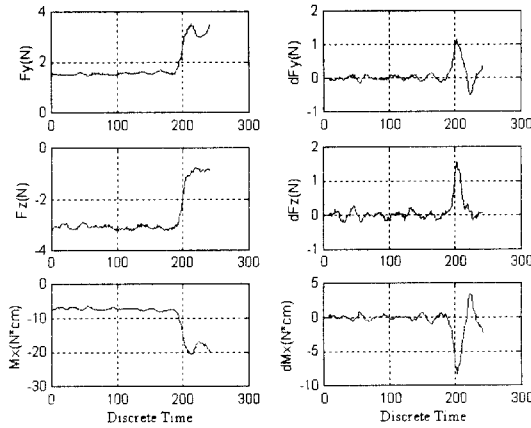
Fig. 5 An example of the change of states

$$\begin{aligned} [\Delta F] &= [B - A] \\ [\Delta M] &= [B \times r_2 - A \times r_1] \end{aligned} \quad (2)$$

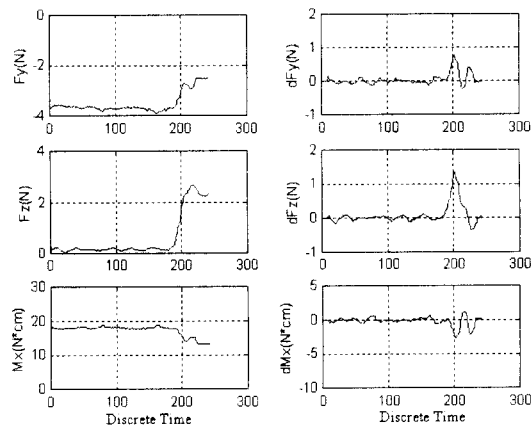
이 값은 peg와 hole의 중심축의 기울기가 비슷할 경우를 가정하면 구할 수 있으며, Fig. 5(b)와 같다. 여기서, [Δ₁F_y], [Δ₂F_y]는 센서 1과 센서 2의 y방향 힘의 정성적 변화량을, [Δ₁F_z], [Δ₂F_z]는 z방향 힘의 정성적 변화량을 나타내며, [Δ₁M_x], [Δ₂M_x]는 x방향 모멘트의 정성적 변화량을 의미한다.

예를 들어, 로봇 2의 센서 좌표계를 생각할 때, 상태 1에서는 y축 힘은 - 값이고 상태 2에서는 거의 0에 가깝다. 따라서, y축 힘의 정성적 변화값, [Δ₂F_y]는 +가 된다. 그러나, 힘과 모멘트 정성적 변화 값을 항상 구할 수 있는 것은 아니다. [Δ₂M_x]은 상태 1에서나 상태 2에서나 x축 모멘트는 + 값을 가지기 때문에 정성적인 변화를 예측할 수 없다. 이와 같은 경우에 본 논문에서는 u (unknown)라는 문자를 이용하여 그 값을 표현하고, 실제 이벤트의 판별에 사용하지 않도록 한다.

정성적 변화를 상태 변화 판별에 이용할 수 있는 지 알아보기 위해 조립상태를 1에서 2로 반복적으로 변화시키며 힘과 모멘트의 프로파일을 살펴봐왔다. 이때, peg의 각도 오차를 고려하기 위해 hole 평면과 이루는 각을 임의로 바꿔 실험을 수행하였다. 실험 결과 힘과 모멘트의 프로파일의 경향은 Fig. 6과 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 예상했던 것처럼, [Δ₂M_x]를 제외한 다른 값들의 변화는 + 또는 -로 명백한 것을 알 수 있었다. 따라서, 힘과 모멘트의 정성적 모델은 이벤트 판별에 사용될 수 있다는 것을 확인하였다. Fig.



(a) Force/moment signal at robot 1



(b) Force/moment signal at robot 2

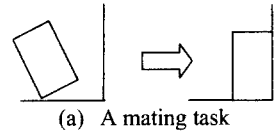
Fig. 6 Force/torque profiles of transition from state 1 to state 2

6(b) 에서도 알 수 있듯이 $[\Delta_2 M_x]$ 의 정성적 변화는 뚜렷하지 않았으며, 실험에 따라 0 에서 -로, 0 에서 +로, 또는 거의 0 에 가까운 값을 가지며 변화하기도 하였다. 따라서, 이 값은 이벤트 판별에는 사용하지 않는다.

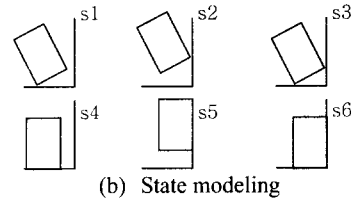
그림에서 가로축은 이산적인 시간 k 를 의미한다. 이산적인 시간 간격은 전체 제어 루프 한번을 실행하는 시간과 일치하며, 따라서, 가로축이 10 이라는 것은 제어 루프를 10 번 실행했다는 것을 의미한다. 한번의 제어 루프에서 센서로부터 힘과 모멘트 값을 읽어 들이고 array 에 저장하기 때문에, 가로축은 센서 데이터를 저장한 array 의 인덱스와 일치한다.

3.3 조립 명령

일단 두 부품이 접촉하게 되면 불확실한 요소를 줄이기 위해서 접촉을 유지하면서 로봇이 세부



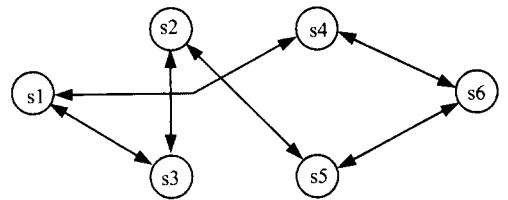
(a) A mating task



(b) State modeling

- (e1,m1) = s1→s3, (e2,m2) = s1→s4
- (e3,m3) = s2→s3, (e4,m4) = s2→s5
- (e5,m5) = s3→s1, (e6,m6) = s3→s2
- (e7,m7) = s4→s1, (e8,m8) = s4→s6
- (e9,m9) = s5→s2, (e10,m10) = s5→s6
- (e11,m11) = s6→s4, (e12,m12) = s6→s5

(c) Relation of states



(d) State transition network

Fig. 7 Example of a simple assembly

적인 운동 명령을 수행하게 된다. 접촉을 유지하면서 부품을 이동시키기 위해서는 접촉힘을 접촉면의 수직인 방향으로 제어하고 수평방향으로는 위치 제어를 수행한다. 구축된 조립 시스템에서는 하드웨어의 제한 때문에 직접적인 힘 제어를 수행할 수 없다. 따라서 위치 제어를 이용하여 접촉힘을 일정하게 유지하도록 한다.

임의의 조립 상태에서 제어하고자 하는 접촉력 $F_{n_desired}$ 와 접촉면에 수직 방향 힘의 센서 측정값 $F_{n_feedback}$ 에 대해, 비례 제어 이득(control gain)을 K 라고 하면, 수직 방향의 위치 제어 입력 $\Delta P_{n_desired}$ 은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta P_{n_desired} = K \times (F_{n_desired} - F_{n_feedback}) \quad (3)$$

3.4 상태 천이 네트워크

조립 상태와 이벤트, 그리고 로봇 명령에 대한 모델링이 완성되면 상태 천이 네트워크를 구할 수 있다. 예를 들어 Fig. 7(a)와 같이 사각형 부품을

모서리에 위치 시키는 단순한 작업의 경우에, 조립 상태는 Fig. 7(b)와 같이 모델링 할 수 있으며, 조립 상태의 상관 관계는 Fig. 7(c)와 같이 구할 수 있다. 그림에서 $(ek, mk) = si \rightarrow sj$ 는 조립 상태를 si 에서 sj 로 만들기 위해서는 제어 명령 mk 를 수행해야 하며, 명령 수행 중 이벤트 ek 가 발생할 경우에 조립 상태가 sj 로 된다는 것을 의미한다.

모델링 된 조립 상태의 상관 관계를 도식적으로 나타내면 Fig. 7(d)와 같은 상태 천이 네트워크를 구축할 수 있다. 만일 초기 상태를 $s1$, 목적 상태를 $s6$ 라 하고, 현재 상태를 $s5$ 로 가정하면, 조립 상태를 목적 상태로 만들기 위해서는 사각형 부품을 수직으로 내려야 하고, 운동을 하는 동안 수직 방향의 힘이 크게 작용하게 되면 조립 상태가 $s6$ 로 변화되었다고 생각할 수 있다.

만일, 접촉하고 있던 면이 떨어지게 되면, 조립 상태가 $s2$ 가 되었다고 생각할 수 있다. 상태에 따라 적용해야 할 운동과 발생 가능한 이벤트에 관한 정보는 상태 천이 네트워크를 살펴보면 쉽게 알 수 있다. Fig. 7(c)의 $(e10, m10) = s5 \rightarrow s6$ 와 $(e9, m9) = s5 \rightarrow s2$ 로부터 $s5$ 에서 목적상태로 가기 위해 적용해야 할 로봇의 운동은 $m10$ 이고 로봇이 운동을 하는 동안 이벤트 $e9$ 과 $e10$ 이 발생할 수 있으며, 이벤트 $e9$ 가 발생한다면 조립 상태는 $s2$ 가 되고, 이벤트 $s10$ 이 발생한다면 조립 상태는 원하는 상태인 $s6$ 가 된다.

3.5 조립 계획

상태 천이 네트워크를 기반으로 초기 상태에서 최종 목적 상태에 이르는 조립 시퀀스를 계획한다. 조립 시퀀스를 참조하여 현재 상태에서 다음 상태로 가기 위해 로봇에 명령을 전달하며, 이벤트 발생이 감지되면, 현재 상태에서 발생 가능한 이벤트들에 대하여 힘/모멘트 프로파일의 정성적인 변화량을 적용하여 발생한 이벤트를 판별한다. 판별된 이벤트를 이용하여 변화된 상태를 알아낸다. 만일에 변화된 상태가 주어진 상태 시퀀스 내에 있으면 다음 운동을 적용하고, 그렇지 않다면 목적 상태까지 새로운 시퀀스를 계획한다. 이러한 과정을 거쳐 조립 상태가 목적 상태에 이르게 되면 조립 작업이 끝나게 된다.

복잡한 형상의 조립 작업은 발생 가능한 조립 상태가 매우 많아 모든 상태를 고려할 수 없다. 그러나, 이런 경우라도 경로계획에 의한 방법으로 이동경로를 구할 수 있기 때문에, 이것을 기반으로 센서 오차를 고려하여 주요한 조립상태 만으로 상태 천이 네트워크를 구성한다. 따라서, 모든 상

태를 고려하지 않아도 조립 시퀀스를 계획할 수 있다. 또한, 상태 천이 네트워크에 낮은 불확실성 또는 최소의 상태 변화와 같은 목적함수를 정의하여 탐색 알고리즘을 적용하면 최적의 조립 시퀀스를 구할 수 있다.

4. 실험 및 결과

Fig. 8은 3차원 원형 팩인홀 작업을 도식적으로 나타내는 것으로 조립 작업은 로봇 1이 *peg*의 윗부분을 잡고, 로봇 2가 *hole*의 옆을 잡고 수행한다. 조립 작업 시 *peg*를 *hole*의 오른쪽 가장자리에 접촉시켜 Fig. 8의 moving direction을 따라 점차적으로 목적상태에 도달하도록 한다.

본 실험에서 사용한 로봇은 하드웨어 제약 때문에 y 축에 대한 회전 운동을 할 수 없다. 이러한 운동의 제약은 로봇 2를 이용하여 *hole*을 z 축

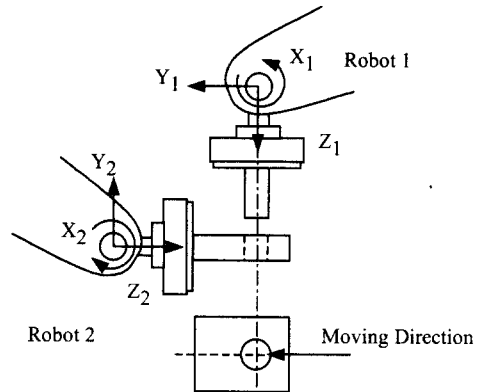


Fig. 8 Two arms performing round peg-in-hole assembly

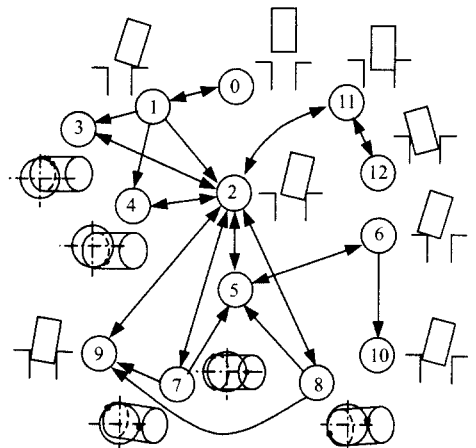


Fig. 9 State model and state transition network

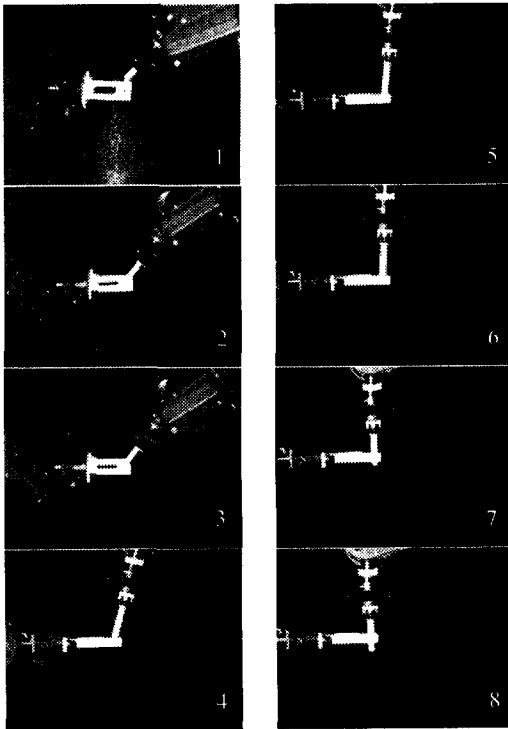


Fig. 10 Pictures of assembly process

을 중심으로 회전해서 상대적으로 peg 가 y 축에 대하여 회전한 것처럼 하여 해결할 수 있다. 이렇게 두 로봇의 운동을 조합하면 peg 와 hole 의 모든 상대 운동을 만들어 낼 수 있다. 그림 상에 나와 있는 좌표계는 센서 좌표계이다. Fig. 9 는 Fig. 8 의 조립 작업에 대한 상태 모델링과 상태 천이 네트워크를 나타낸다.

본 논문에서 사용한 찍인홀 작업의 조립 간극은 0.1mm 이며 로봇의 위치 오차는 3mm 이다. 따라서, 위치 오차 대 조립 간극 비가 30 이나 된다. 이런 경우에 peg 를 hole 에 집어넣는 것은 매우 어려운 작업이다. 일단 peg 가 홀에 들어가면 로봇 힘 제어에서 많이 사용하는 impedance control 과 같은 제어 법칙을 이용하여 조립을 완성하면 된다.⁽³⁾ 따라서, 상태 천이 네트워크에서 최종 목적 상태는 9, 10, 11 또는 12 로 생각할 수 있다. 초기 상태를 0 이라 하면 최종 상태까지 가기 위한 최단 조립 시퀀스는 0-1-2-9 또는 0-1-2-11 이다. 상태 2 에서 +z_i 방향으로 직선운동을 적용하면, 상태 9 가 되고 회전 운동을 적용하면 상태 11 이 된다.

Fig. 10 은 초기 상태에서 목적 상태까지 조립이 완성되는 과정을 보여주며, Fig. 11 은 조립 작업을 수행하는 동안에 발생한 힘과 모멘트 및 상태 변화 그래프이다.

Fig. 11(a)는 센서 1 에서 측정된 힘과 모멘트의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 11(b)는 센서 2 에서 측정된 힘과 모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 이벤트를 판별하기 위한 힘과 모멘트의 정성적인 값을 구하기 위해 사용한 임계값은 실험을 통해서 결정하였다. 마지막으로 Fig. 11(c)는 조립작업을 수행하는 동안 거처온 상태의 변화를 나타낸다. 조립 상태가 목적 상태에 있을 경우에 상태 9 와 상태 11 을 반복하게 되는데, 이것은 로봇이 직선운동과 회전운동을 peg 에 적용하여 hole 안으로 밀어 넣는 과정을 나타낸다. 그림퍼를 이용할 경우를 가정하여 홀의 기울기를 10 도까지 변화시켜 작업을 수행해 보았다. 기울기를 0 으로 했을 때 사용한 조립 계획 및 조립 알고리즘을 변화시키지 않고도 각도에 오차가 존재하는 조립 작업을 수행할 수 있음을 알았다. 그러나, 제어하는 힘 외의 다른 방향에 힘이 크게 걸리는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 두 팔 로봇을 이용하여 고정구 없이 조립 작업을 수행할 경우에 대해서 위치 오차, 그

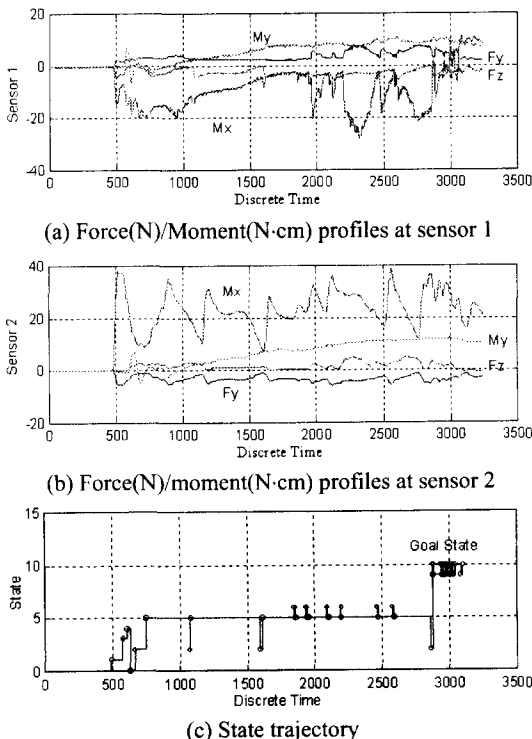


Fig. 11 Force/moment signal profiles and the state changes

립과 오차, 센서 외란과 같은 불확실성을 다룰 수 있는 능동적 조립 방법을 제시하였으며 또한, 이 방법으로 기존의 수동적 방법으로 해결하기 어려운 chamfer 없는 조립 작업을 수행할 수 있다.

제시된 방법에서는 조립 상태를 유일한 제어 명령을 갖는 상태로 정의하였으며, 상태 변화시 발생하는 이벤트는 힘과 모멘트의 정성적인 변화로 모델링 하였다. 상태 천이 네트워크로부터 발생 가능한 이벤트에 대해 센서 신호를 적용하여 이벤트를 판별하고, 이렇게 판별된 이벤트를 통하여 다음 상태를 알아내며, 계획된 조립 시퀀스를 추종하도록 각 상태에서 정의된 운동을 로봇에 적용한다. 제안된 방법을 검증하기 위해서 두 대의 5 축 매니퓰레이터와 6 축 힘/모멘트 센서를 이용하여 두 팔 로봇 시스템을 구축하였으며, 조립 간극이 로봇의 위치 오차보다 크며 chamfer 가 없는 3 차원 원형 팩인홀 작업을 대상으로 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 보였다. 앞으로 제시된 이론을 바탕으로 다중 팩인홀 작업에 대한 적용을 연구할 것이다.

참고문헌

(1) Bonitz, R. G. and Hsia, T. C., 1996, "Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, pp. 78 ~ 89.
 (2) Jarrah, O. A., Zheng, Y. F., and Yi, K. Y., 1995, "Efficient Trajectory Planning for Two Manipulators to Deform Flexible Materials with Experiments," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 312 ~ 317.
 (3) Caccavale, F., Natale, C., Siciliano, B., and Villani, L., 1998, "Control of Two Industrial Robots for Parts Mating," *IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp. 562 ~ 566.

(4) Sakakibara, S., 1996, "A Two-Armed Intelligent Robot Assembles Mini Robots Automatically," *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 1879 ~ 1883.
 (5) Trong, D. N., Betemps, M., and Jutard, A., 1995, "Analysis of Dynamic Assembly using Passive Compliance," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1997 ~ 2002.
 (6) McCarragher, B. J., 1997, "Adaptive Discrete Event Control for Assembly: Theory and Industrial Implementation," *Int. Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 21, pp. 323 ~ 339.
 (7) Haskiya, W., Qiao, H., and Knight, J. A. G., 1997, "A New Strategy For Chamferless Peg-Hole Assembly," *IEEE Int. Sym. on Assembly and Task Planning*, pp. 90 ~ 95.
 (8) Kim, I. W., Lim, D. J., and Kim, K. I., 1999, "Active Peg-in-hole of Chamferless Parts using Force/Moment Sensor," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 948 ~ 953.
 (9) Desai, R. S. and Volz, R. A., 1989, "Identification and Verification of Termination Condition in Fine Motion in Presence of Sensor Errors and Geometric Uncertainties," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 800 ~ 809.
 (10) Mosemann, H., Raue, A., and Wahl, F., 1998, "Classification and Recognition of Contact States For Force Guided Assembly," *Proc. IEEE Int. Conf. on System, Man and Cybernetics*, pp. 3400 ~ 3405.
 (11) Hovland, G. E. and McCarragher, B. J., 1997, "Combining Force and Position Measurements for the Monitoring of Robotic Assembly," *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 654 ~ 660.
 (12) McCarragher, B. J. and Asada, H., 1993, "Qualitative Template Matching Using Dynamic Process Models for State Transition Recognition of Robotic Assembly," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol. 115(2A), pp. 261 ~ 275.