

6축 머니플레이터를 이용한 임피던스 제어 기반의 원형 펙 조립

김병상* · 김영렬* · 송재복*† · 손승우**

* 고려대학교 기계공학부, ** 현대중공업 기계전기연구소

Impedance-Control Based Peg-in-Hole Assembly with a 6 DOF Manipulator

Byeong-Sang Kim*, Young-Loul Kim*, Jae-Bok Song*† and Seung-Woo Son**

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

(Received May 20, 2010 ; Revised January 27, 2011 ; Accepted February 7, 2011)

Key Words : Force Control(힘제어), Impedance Control(임피던스 제어), Robotic Assembly(로봇 조립), Peg-in-Hole(펙인홀)

초록: 일반 산업용 로봇의 위치정밀도는 100 μ m 정도임에 반해, 정밀부품의 조립공차는 수십 μ m 이내이다. 또한, 조립공차가 작을 경우 미소한 위치/각도 오차에 의해 재밍 또는 웨징이 쉽게 발생하며, 위치제어 기반의 로봇인 경우 부품 조립 시 접촉력을 적절히 조절하지 못하여 조립물이 파손될 가능성이 크다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 접촉력에 능동적으로 반응할 수 있는 힘제어 기반의 로봇조립에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존의 산업용 로봇에 적용하기 용이하도록 위치제어 기반의 머니플레이터에 힘제어를 적용할 수 있는 시스템을 구현하였다. 머니플레이터에 어드미턴스 필터를 이용한 임피던스 제어를 적용하여 안정적인 접촉운동을 구현하였다. 또한, 임피던스 제어와 blind 검색을 적용하여 정밀부품을 조립할 수 있음을 검증하였다.

Abstract: The maximum accuracy of position control by using an industrial robot is about 100 μ m, whereas the maximum tolerated imprecision in the position of precision parts is about several tens of micrometers. Therefore, it is very difficult to assemble parts by position control only. Moreover, in the case of precision assembly, jamming or wedging can easily occur because of small position/orientation errors, which may damage the parts to be assembled. To overcome these problems, we investigated a force control scheme that provides proper motion in response to the contact force. In this study, we constructed a force control system that can be easily implemented in a position-controlled manipulator. Impedance control by using an admittance filter was adopted to perform stable contact tasks. It is shown that the precision parts can be assembled well by adopting impedance control and blind search methods.

1. 서론

산업용 로봇의 경우, 반복정밀도는 0.05 ~ 0.1mm 이고, 위치정밀도는 0.1mm 이상이다. 또한, 수직 다관절 로봇의 경우 말단점에서의 강성(1N/ μ m 이하)이 작기 때문에 무거운 부품을 조립할 경우 링크 및 조인트의 변형에 의한 위치오차가 0.1mm 이상 발생한다.⁽¹⁾ 반면에, 일반적인 기계부품 사이의 조립공차는 수 mm부터 작게는 수십 μ m이다.⁽²⁾ 따라서 정밀부품 조립 시, 머니플레이터를 이용하여 조립물을 조립위치에 정확하게 위치시키는 것

이 불가능하다. 뿐만 아니라, 머니플레이터가 조립 위치에 정확하게 위치하였더라도, 조립공차가 작은 부품의 경우 조립 시 조립물 사이의 위치 및 각도오차에 의해 재밍(jamming)이나 웨징(wedging)이 쉽게 발생하며, 이로 인하여 조립물에 과도한 힘이 작용하여 부품의 조립면이 파손될 수 있다.⁽³⁾ 따라서 기존의 위치제어 기반의 산업용 로봇을 이용하여 엔진 피스톤, 축, 베어링, 기어 등과 같은 정밀 부품을 조립하는 것이 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 조립 시 발생하는 접촉력에 대하여 유연하게 대응할 수 있어야 한다.

접촉력을 제어하기 위하여 1960년대 이후부터 다양한 힘제어 기법들이 제시되었으며,⁽⁴⁻¹⁶⁾ 1997년에 이르러서는 힘제어 기반의 로봇조립을 산업현

† Corresponding Author, jbsong@korea.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

장에 적용하기 위한 연구가 본격적으로 시작되었다. 이 시기에 FANUC과 Kawasaki는 임피던스 제어를 이용하여 AS4N Triple Clutch를 조립하는데 성공하였으며, Case Western Reserve University의 Newman은 고유 어드미턴스 제어를 바탕으로 조립작업에 적합한 힘제어 기능을 구현하였다.^(8,9) 힘제어에 관한 지속적인 연구 결과,⁽¹⁰⁾ 2007년 ABB는 힘제어기 기반의 조립 기능을 갖는 RobotWare Assembly FC를 상품으로 출시하였다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 실제 산업현장에서 필요로 하는 수준의 부품을 조립할 수 있도록 임피던스 제어 기반의 로봇조립을 구현하였다. 위치제어로 구동되는 머니플레이터에 힘센서를 장착하여 다양한 힘제어를 구현할 수 있도록 하였다. 또한, 프로그램 작성이 용이하도록 주 OS로 윈도우를 채택하였으며, 외부 타이머를 사용하여 윈도우 환경에서도 제어의 실시간성을 보장할 수 있도록 하였다. 그리고 안정적인 접촉운동을 구현할 수 있는 임피던스 제어를 적용하였으며, 블라인드 검색을 이용하여 최대 공차가 80 μ m (최소 40 μ m)인 원형 껍을 조립하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 원형부품 조립에 대한 기본 이론을 살펴봄, 3장에서는 로봇 시스템에 대하여 살펴본다. 4장에서는 조립 실험 결과를 보여 주며, 마지막으로 5장에서는 결론을 내린다.

2. 원형 부품의 조립

실제 조립은 3차원 공간에서 수행되지만, 원형 껍(peg)은 Fig. 1과 같이 2차원 모델로 단순화할 수 있다.⁽³⁾ ϵ_0 는 구멍의 중심축을 기준으로 껍의 중심이 얼마나 떨어져 있는지를 의미하는 위치오차이며, θ_0 는 구멍의 중심축을 기준으로 껍의 중심축이 얼마나 비틀어져 있는지를 의미하는 각도오차이다. 이 때, 위치오차 및 각도오차는 조립 난이도를 결정하는 중요한 요소가 되며, 초기 위치오차와 각도오차가 클수록 부품 조립이 어려워진다.

공차가 작은 부품을 조립할 경우, Fig. 2(a)와 같이 삽입력과 마찰력이 평형을 이루어 부품이 더 이상 조립되지 않는 재밍(jamming)이 발생할 수 있다. 재밍이 발생한 경우, 삽입력을 제거하면 마찰력이 사라지므로 부품을 쉽게 분해할 수 있다.

한편, Fig. 2(b)와 같이 조립 초기에 조립 방향과 다른 방향으로 큰 외력을 가하면 조립물체에 탄성변형(심한 경우 소성변형)이 발생한다. 이 경우, 삽입력을 제거하여도 마찰력이 완전히 사라지지 않

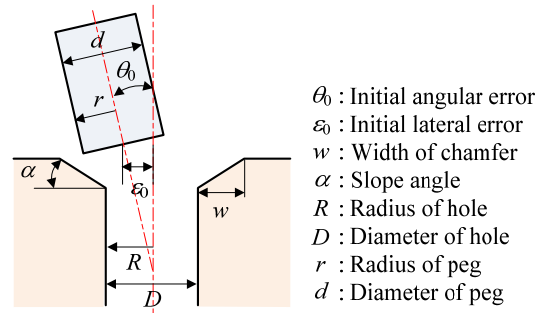


Fig. 1 Two dimensional model of peg and hole

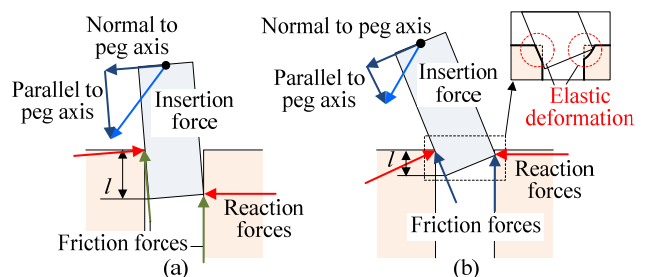


Fig. 2 Jamming and wedging: (a) jamming, and (b) wedging

아서 조립물이 쉽게 분해가 되지 않는 현상이 발생한다. 이를 웨징(wedging)이라 하며, 조립작업 중 발생할 수 있는 최악의 현상이라고 할 수 있다.

조립 방향과 삽입력의 방향이 일치하지 않을 경우, 조립 깊이가 얇은 곳에서는 웨징이 발생하고, 조립 깊이가 일정 이상이 되면 재밍이 발생한다. 이와 같은 현상은 다음과 같이 삽입 깊이 l 과 구멍의 직경 D 의 비에 영향을 받는다.⁽³⁾

$$\text{Wedging condition: } l/D \leq \mu \tag{1}$$

여기서 μ 는 정지마찰계수이다. 예를 들어, 구멍 직경이 50mm, 껍 직경이 49mm, 조립물 사이의 마찰계수가 0.7이라고 가정하자. 이 때, 조립 깊이가 35mm (= 0.7 x 50mm)보다 작으면 웨징이 발생할 수 있으며, 조립 깊이가 35mm보다 깊으면 재밍이 발생할 수 있다. 재밍은 웨징만큼 치명적이지는 않으나, 웨징보다 넓은 영역에서 발생하므로 조립 시 주의해야 한다.

3. 임피던스 제어 기반의 로봇 시스템

3.1 로봇 시스템

본 연구에서는 로봇 조립을 위하여 Fig. 3과 같이 위치제어기 기반의 힘제어 시스템을 구성하였다. 위치제어 기반 시스템은 토크제어 기반 시스

템보다 구현하기 쉬울 뿐만 아니라, 복잡한 역동 역학을 풀지 않고도 안정적으로 로봇을 제어할 수 있는 장점이 있다. 그리고 일반 산업용 로봇의 경우 사용자가 직접 토크를 제어할 수 있는 방법이 없으므로, 본 연구에서 구현한 위치제어 기반의 제어기는 일반 산업용 머니플레이터에 매우 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁵⁾

연구실에서 자체 제작한 6축 머니플레이터는 5kg의 가반하중을 가지고 있으며, 최대 도달거리는 850mm이다. 각 조인트에는 Panasonic사의 AC 서보모터와 하모닉 드라이브 감속기가 장착되어 있다. 모터드라이버는 PC에 설치되어 있는 모션제어기(PCI-N804, AJINEXTEK)에 연결되어 있으며, 모션제어기는 PC로부터 지령을 받아 6개의 모터를 동기화하여 제어한다. PC는 각 모터에 장착되어 있는 엔코더 정보를 이용하여 로봇 기구학을 계산한다. 프로그램 작성이 용이하도록 주 OS로 윈도우를 선택하였으며, 윈도우가 보장하지 못하는 실시간성을 구현하기 위하여 외부 타이머를 이용하였다. 본 연구에서는 위치제어기 및 임피던스 제어기의 제어주기를 1ms로 설정하였다. 이 때,

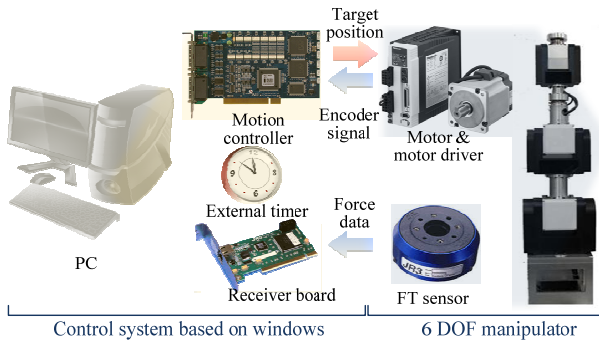


Fig. 3 Force control system based on position controller

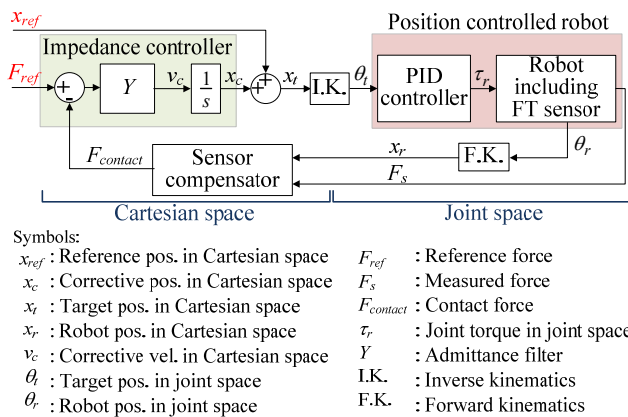


Fig. 4 Control block diagram based on position-controlled robot with impedance controller

50 μ s 이하의 지터(jitter)가 발생하였으며, 제어주기 오차는 약 1% 미만이다. 작업물에 발생하는 접촉력을 측정하기 위하여 머니플레이터의 손목에는 JR3 6축 힘/토크 센서(J409, JR3)를 장착하였으며, PC에 장착되는 PCI 방식의 리시버 보드(PCI-2184S)를 사용하여 힘센서로부터 최대 8kHz까지 데이터를 받을 수 있다.

3.2 임피던스 제어

다양한 힘제어 기법 중, 임피던스 제어는 안정적인 접촉운동을 구현하는 데 매우 효과적이다. 본 연구에서는 로봇 조립 시 안정적인 접촉운동을 구현함과 동시에 접촉력에 대하여 적절하게 반응할 수 있는 임피던스 제어를 구현하였다. Fig. 4와 같이 로봇 제어기는 위치제어기와 임피던스제어기, 그리고 센서 보상기로 구성되며, 내부 제어루프(위치 제어)와 외부 제어루프(임피던스 제어)로 이루어진 캐스케이드(cascade) 구조를 갖는다. 여기서 센서 보상은 부하동정(load identification) 및 중력 보상을 이용하여 센서 신호로부터 접촉력을 추출한다.⁽¹⁶⁾ 임피던스 제어는 Cartesian 좌표를 기준으로 하여 모든 연산을 수행하며, 로봇은 조인트 좌표를 기준으로 제어된다.

머니플레이터가 자유공간에서 운동을 할 경우, 기준힘 F_{ref} 및 접촉힘 $F_{contact}$ 는 0이 되고, 로봇의 이동 궤적은 기준위치 x_{ref} 와 동일하다. 이는 기존의 위치제어와 동일하다. 하지만 머니플레이터가 접촉운동을 할 경우, 로봇의 이동 궤적 x_t 는 다음 식과 같이 기준위치 x_{ref} 와 임피던스 제어기에 의한 위치보상값 x_c 의 합에 의하여 결정된다.

$$x_t = x_{ref} + x_c \quad (2)$$

여기서 위치보상값 x_c 는 다음과 같이 임피던스 제어기 내부에 있는 어드미턴스 필터 $Y (=s/(Bs+K))$ 와 $F_{contact}$ 에 영향을 받는다.

$$x_c = \frac{Y}{s} \cdot (F_{ref} - F_{contact}) = \frac{1}{(Bs + K)} \cdot (F_{ref} - F_{contact}) \quad (3)$$

이 때, B 와 K 는 머니플레이터 말단점에서 구현하고자 하는 감쇠 및 강성 효과를 나타낸다. 따라서 외력이 발생할 경우, 외력에 대하여 적절히 이동 궤적을 보상함으로써 사용자가 원하는 임피던스 효과(강성 및 감쇠)를 제공할 수 있다.

4. 부품 조립 실험

4.1 블라인드 검색 기반의 조립 전략

로봇 조립에 있어서 힘제어 못지 않게 조립전략 또한 중요하며, 조립전략에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.⁽⁹⁾ 조립전략은 조립위치를 검색하는 단계와 부품을 조립하는 단계로 나눌 수 있다. 조립위치를 검색하는 방법 중 블라인드 검색은 미리 정해진 경로를 따라 이동하며 조립물의 위치 변화 또는 힘 변화를 관찰함으로써 조립 위치를 찾는 방법이다. 이와 같은 방법은 매우 직관적이며, 펌과 같은 원형부품에 사용하기에 적합하다. 다음으로 부품을 조립하는 단계에서는 머니플래이더 말단점에서의 강성을 낮추어 위치/각도 오차 극복이 용이하도록 하는 것이 중요하다. 본 장에서는 두 가지 조립단계 중, 조립위치 검색단계에 해당하는 블라인드 검색에 대해서 보다 자세히 살펴보기로 한다.

Fig. 5는 블라인드 검색을 이용하여 부품을 조립하는 과정을 보여 준다. 일단 로봇은 조립물의 위치를 찾기 위하여 조립물을 이동시킨다(approach). 그리고 조립물간의 접촉이 발생하여 힘센서에 일정 이상의 힘이 검출되면 로봇은 정지하고(contact detection), 이 위치를 조립방향에 대한 초기위치로 설정한다. 이후, 조립방향에 수직한 평면 상에서 일정한 궤적을 따라 이동하며 조립위치를 검색한다(search). 이 때, 조립위치를 검색하기 위해서는 지그재그 궤적, 사각궤적, 나선궤적 등을 적용할 수 있다. 조립위치를 검색하는 중, 조립물 사이의 접촉을 안정적으로 유지하기 위하여 일정한 접촉력을 유지한다. 따라서 조립물의 위치가 조립위치와 일치하는 순간 일시적으로 조립물은 구멍 속으로 삽입된다(hole detection). 즉, 조립물의 위치가 순간적으로 변하게 되며, 이 위치를 조립위치로 인식한다. 마지막으로 머니플래이더는 조립물을 구멍에 삽입하며(insertion), 삽입 중 재밍과 웨징의 발생을 방지하기 위하여 조립방향에 수직한 방향으로 주기적으로 힘을 인가한다.

4.2 블라인드 검색 기반의 조립 실험

조립실험을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같은 실험 환경을 구성하였다. 조립작업에 수행한 조립물은 Fig. 6(b)와 같이 펌의 직경은 50.00mm이고, 삽입 구멍의 직경은 최소 50.04 mm, 최대 50.08 mm이다. 펌은 스틸로 가공하였으며, 구멍은 두랄루민을 이용하여 가공하였다. 그리고 후처리로 연마가공을 하였으며, 펌과 구멍의 삽입부에는 C0.2 (= 0.2mm)

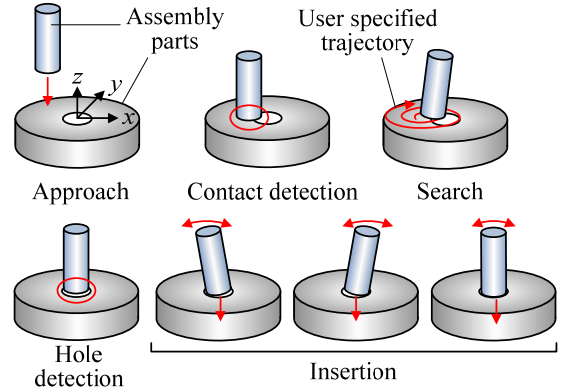


Fig. 5 Assembly strategy based on blind search.

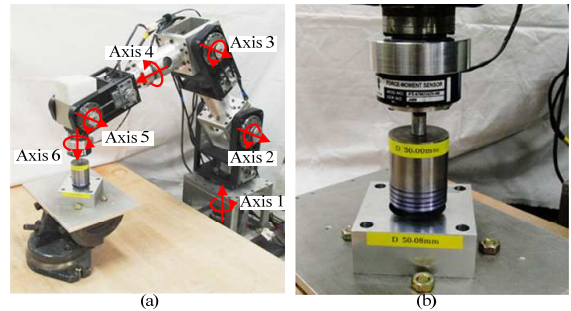


Fig. 6 Experimental setup: (a) configuration of manipulator, and (b) assembly parts

의 모따기를 하였다. 이와 같은 조건은 일반적인 기계부품의 정밀조립 조건과 상당히 유사하다.

조립 실험을 수행하기 위하여 머니플래이더의 말단점에 설정한 직교강성은 $K_x = K_y = 500 \text{ N/m}$, $K_z = 1000 \text{ N/m}$, 회전강성은 $K_{J,x} = K_{J,y} = K_{J,z} = 0.5 \text{ Nm}^\circ$, 직교댐핑은 $B_x = B_y = 350 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, $B_z = 600 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, 회전댐핑은, $B_{J,x} = B_{J,y} = B_{J,z} = 5 \text{ Nm}\cdot\text{s}^\circ$ 이다. 또한, 초기 위치에서 위치오차 및 각도오차는 각각 8mm, 3° 이내로 설정하였다. 그리고 실험 중, 접촉력이 30N 이상이 발생하거나, 또는 조립 위치가 검색되지 않는 경우 조립 실패로 간주한다.

Fig. 7은 펌을 구멍에 조립 및 분해하는 과정을 보여 주며, 실험결과 안정적인 조립 및 분해 작업을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)의 점선은 조립방향에 대한 펌의 목표위치이고, 실선은 펌의 실제위치이다. 그리고 Fig. 8(b)는 조립 중 발생한 접촉력을 나타낸다. I 구간은 펌이 조립물에 접근하는 구간이며, 약 5s 부근에서 5N 이상의 접촉력이 검출되면 머니플래이더는 정지한다. 이후, 머니플래이더는 5N의 접촉력을 유지한 상태에서 나선궤적을 따라 이동하며 조립위치를 검색한다. 이 때, 머니플래이더의 목표 위치와 실제위치

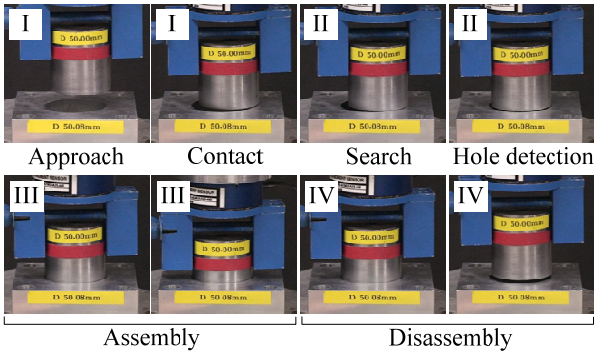


Fig. 7 Sequence of robotic assembly (peg-in-hole)

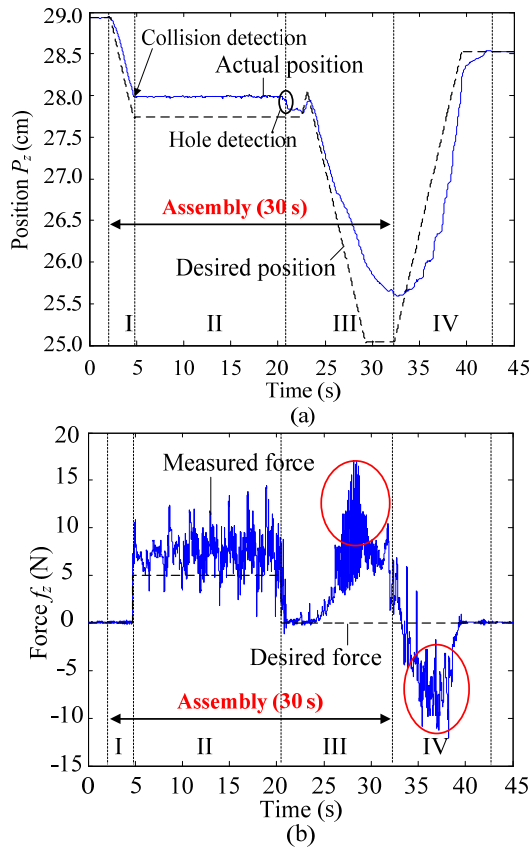


Fig. 8 Experimental results on peg-in-hole: (a) position of manipulator during assembly, and (b) contact force in z -direction

사이에는 약 5mm의 위치오차가 발생하며, 이는 z 방향으로 5N의 힘을 인가하기 위한 것이다. 조립 위치의 검색 중, 실제 측정된 힘은 5~10N 사이의 힘이 측정되었는데, 이는 검색방향으로 존재하는 마찰력이 외란으로 작용하기 때문이다. 그리고 홀 가공이 되어 있는 조립물을 지그에 고정할 때 수평방향에 대한 각도오차가 발생하며, 이와 같은 각도오차 또한 z 방향의 접촉력에 영향을 준다.

약 21s 부근에서 궤의 위치가 순간 28.0cm에서

27.8cm로 이동하는 모습을 볼 수 있으며, 이는 궤의 위치와 조립위치가 일치하는 순간을 의미한다. 조립위치를 검출한 후, 머니플레이터는 III 구간과 같이 궤를 구멍에 삽입한다. 조립 시 궤와 구멍 사이에 발생한 마찰력으로 인하여 25s부터 30s까지 힘이 15N까지 증가하는 것을 볼 수 있으나, 30s 이후에는 오히려 마찰력의 영향이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 일시적으로 발생한 재밍의 영향이다. 32s 부근에서 조립작업은 완료된다. 한편, 분해 작업 중 약 35초 부근에서 약 -10N의 접촉력이 발생하였으며, 이 또한 접촉력에 의해 일시적으로 발생한 재밍의 영향으로 볼 수 있다. 하지만 27s 이후에 재밍이 사라지면서 접촉력은 감소하는 것을 볼 수 있으며, 약 40s 부근에서 분해가 완료되었다.

실험결과 최소 40 μ m, 최대 80 μ m의 조립공차를 갖는 조립물을 안정적으로 조립할 수 있었으며, 조립 시간은 약 30s 이내였다. 최대 접촉력은 15N이며, 이 값은 조립 실패로 설정한 힘의 절반에 해당한다. 초기 위치 및 각도 오차가 8mm, 3° 이하 일 때, 10번의 연속 조립실험에 대하여 10번 모두 조립에 성공하였다. 이로부터 로봇조립에 임피던스 제어를 적용할 경우, 매우 안정적으로 조립작업을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 조립성능은 머니플레이터에 설정하는 강성 및 감쇠에 직접적으로 영향을 받았다. 검색 과정에서는 xy 방향에 대한 직교강성이 높은 경우, 그리고 조립 과정에서는 xy 방향에 직교강성이 낮은 경우 조립이 안정적으로 수행되는 것을 관찰할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 위치제어 기반의 힘제어 구현이 가능한 제어 시스템을 구성하고, 이를 이용하여 임피던스 제어를 적용하였다. 또한, 로봇 조립 실험을 수행하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 제시된 시스템은 기존의 위치제어기 기반의 산업용 로봇에 힘제어 기능을 적용하기 용이하다.
- (2) 임피던스 제어를 이용하여 80 μ m의 조립공차를 갖는 궤를 30s 이내에 안정적으로 조립할 수 있다.

엔진 실린더 블록과 피스톤의 조립, 베어링과 축의 조립 등 실제 부품조립은 원형 궤를 조립하는 것과 동일하거나 또는 매우 유사하다. 따라서 본 연구결과를 이용하여 실제 산업현장에서 필요

로 하는 다양한 부품 조립에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 과제는 지식경제부의 산업원천기술개발사업인 고밀도 혁신 제조공정용 로봇기술개발 사업과 한국산업기술진흥원의 융복합형 로봇전문인력 양성사업의 지원으로 자율지능형 머니플레이션 연구센터를 통하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Pan, Z., Zhang, H., Zhu, Z. and Wang, J., 2006, "Chatter Analysis of Robotic Machining Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp.301~309.
- (2) ABB, 2009, *IRB 2400 Industrial Robot Data Sheet*, ABB Robotics.
- (3) Whitney, D. E., 2004, *Mechanical Assemblies*, Oxford University Press, pp.253~292
- (4) Whitney, D. E., 1985, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3~14.
- (5) Siciliano, B. and Viliani, L., 1999, *Robot Force Control*, Kluwer Academic Publishers.
- (6) Hogan, N. 1985, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory, II-Implementation, III-Application," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 1~24.
- (7) Anderson, R. J. and Spong, M. W., 1988, "Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulator," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 5, pp. 549~556.
- (8) Gravel, D. P. and Newman, W. S., 2001, "Flexible Robotic Assembly Efforts at Ford Motor Company," *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 173~182.
- (9) Glosser, G. D. and Newman, W. S. 1994, "The Implementation of a Natural Admittance Controller on an Industrial Manipulator," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1209~1215.
- (10) Chen, H., Zhang, G., Zhang, H. and Fuhlbrigge, T. A., 2007, "Integrated Robotic System for High Precision Assembly in a Semi-structured Environment," *Assembly Automation*, Vol. 27, No. 3, pp.247~252.
- (11) ABB, 2007, *The Heart of Robotics: RobotWare Assembly FC-Force Control for Assembly*, ABB Automation Technologies.
- (12) Kim, H. J., Back, J., H. and Song, J. B., 2009, "Direct Teaching and Playback Algorithm for Peg-in-Hole Task using Impedance Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 538~542.
- (13) Jeon, H. W. and Jung, S., 2009, "Implementation of an Embedded System for an Interaction between Robot Arm and Human Arm Based on Force Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 15, No. 11, pp. 1096~1101.
- (14) Jeon, P. W. and Jung, S., 2005, "Implementation and Control of Crack Tracking Robot Using Force Control: Part II. Force Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 11. No. 4, pp.337~343.
- (15) Freund, E. and Pesara, J. 1998, "High-bandwidth Force and Impedance Control for Industrial Robots," *Robotica*, Vol. 16, pp. 75~87.
- (16) Atkeson, C. G., An, C. H. and Hollerbach, J. M. 1986, "Estimation of Inertial Parameters of Manipulator Loads and Links," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 101~119.