

조립용 로봇 : 현황과 연구 동태

趙 螢 錫* · 高 炅 哲**

■ 차 례 ■

- | | |
|----------------|-------------|
| 1. 서 론 | 5. 수동적 보상방법 |
| 2. 조립용 로봇의 동향 | 6. 자동적 보상방식 |
| 3. 조립용 로봇의 유형 | 7. 맺는말 |
| 4. 조립 방법 및 문제점 | |

1. 서 론

지난 10년 이래로 미국, 일본을 비롯한 구미 각국에서는 산업용 로봇의 연구 및 개발에 많은 투자를 하고 있다. 이러한 경향은 몇차례 유류 파동을 거치면서 각국 기업의 경쟁력 강화 및 생산성 향상을 높이기 위한것에 기인한 것이다. 로봇(Robot)란 단어의 어원은 1920년 체코의 극작가 Karel Capek 의 "Rossum's Universal Robot"란 작품에서 유래된것으로 일종의 공상과학소설의 영웅적인 주인공에 불과 했다. 25년전까지만 해도 이러한 Robot 가 실제 인간을 위한 유용한 존재가 되리라는 생각은 불가능한 것처럼 여겨져 왔다. 그러나 G.C. Devol 이 소형 컴퓨터로 로봇의 팔을 제어하는 로봇을 개발하였는데 이것이 산업용 로봇의 시초였던 것이다. 이는 인간의 형태와 그 기능에는 거리가 멀었으나 점차 그들의 영역을 넓혀 인간 즉 노동자 (Blue color) 의 단순 노동과 위험하고 작업조건이 나쁜(불결, 소음, 공해) 환경에서 해방시켜 줄뿐 아니라 신체장애자의 의수, 의족의 역할까지 맡게 되었다. 근래에 와서 컴퓨터 (computer) 감지기 (sensor), 동작기 (actuator), 기계구조 (machine structure) 그

리고 시스템공학 (system engineering) 의 급속한 발전으로 산업용 로봇에 대한 기술과 지식은 점차 고도화되기 시작했다. 로봇의 응용 영역은 크게 산업계 (Industry), 뿐만 아니라 의학 (Biomechanism), 우주공학 및 해저탐사, 가정용 심지어 소방, 방법용까지 넓혀지고 있다. 엘빈 토플러의 "제 3의 물결 (The Third Wave)"에서 그는 이러한 로봇의 발전으로 현재의 노동자들은 근무시간의 구속에서 해방되어 우리는 우리의 가정에서 먼거리에서 통신 (communication table) 을 통해 작업 로봇을 원격 제어 (Remote control) 할 수 있는 시대가 올 것이라고 예측하고 있다. 로봇은 그 형태로 크게 3 가지로 분류할 수 있다. 즉, 인간의 형상을 갖춘 인류학적 로봇 (Anthropological Robot) 과 동물의 형상을 한 동물적 로봇 (animal-like Robot) 과 산업용 로봇 (Industrial Robot) 이 그것이다. 또한 기능적인 면에서

- (1) 수동 로봇 (Manual Manipulator)
- (2) 고정 시퀀스 로봇 (Fixed Sequence Robot)
- (3) 가변시퀀스 로봇 (Variable Sequence Robot)
- (4) 플레이 백 로봇 (Play back Robot)
- (5) NC 로봇 (Numerical Control Robot)
- (6) 인텔리전트 로봇 (Intelligent Robot)

* 韓國科學技術院 生産工學科 教授
 ** 韓國科學技術院 生産工學科

등 6 가지로 분류 된다. 이중 미국에서는 (4)~ (6) 까지만을 로봇의 분류에 넣는 반면 일본에서는 (1)~(6) 까지를 모두 로봇의 분류에 포함 시킨다. 산업용 로봇은 유형별로 공작물의 탈취작업 (loading and unloading), 용접(welding) 조립 (Assembly), 부품이송, 도장 (painting), 검사 (inspection) 등의 작업을 수행하며 각 분야에 대한 전문적인 연구가 현재 진행 중이다. 그러면 본고에서는 산업용 로봇에 의한 자동조립 (Automatic Assembly)에 초점을 맞추어 현재 조립 기술의 동향 및 이론 분석을 중심으로 간략히 소개 하기로 한다.

2. 조립 로봇의 동향

BRA (British Robotics Association) 조사에 의하면 현재 응용되고 있는 로봇의 수는 그림 1 과 같이 나와 있다. (1981년 기준). 이 결과에 의하면 일본이 가장 많은 로봇을 보

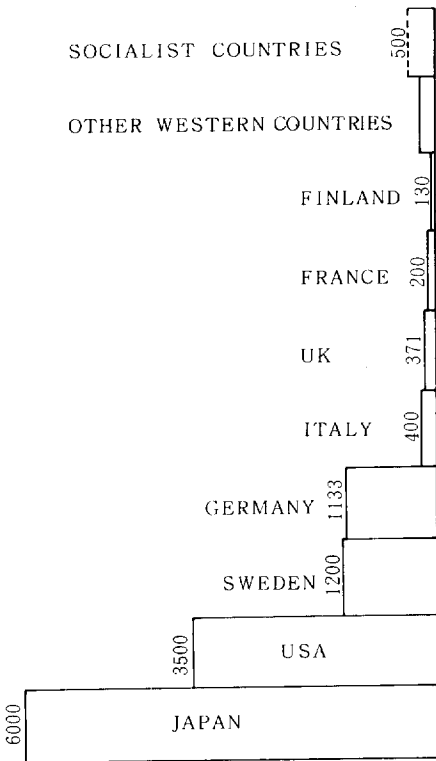


그림 1. 각국의 로봇 보유 현황

표 1. 응용분야별 로봇 대수 (%)

Activities	% of total installations
1. Spraying and coating	22.3
2. Spot welding	18.3
3. Die casting machine unloading	14.8
4. Injection moulding machine unloading	14.8
5. Press work	12.4
6. Forging presses	7.4
7. Experimental setups	4.0
8. Arc Welding	3.1
9. De-burring	2.4
10. Assembly	0.5

유하고 있는 것으로 나타나 있는데 그렇다고 가장 선진 기술을 갖고 있다고는 볼 수 없는 것이다. 왜냐하면 얼마나 지능적인 로봇을 보유하고 있는지가 문제이기 때문이다. 이러한 산업용 로봇 중 조립용 로봇이 차지하는 비율은 불과 0.5%(표 1 참조)에 불과한데 이는 로봇에 의한 조립 기술이 많은 고도의 기술을 요하고 또한 해결하기 어려운 문제점을 내포하고 있기 때문이다. 아직도 산업용 로봇에 의한 성공적인 응용의 대부분은 인간이 명령하고 로봇은 이를 기억하여 수행하는 인간과의 대화작업(interaction)에 의존하고 있다. 이러한 입력(input)을 위한 주위환경을 제어(control)하는 것은 어렵지 않으며 이 부분에서 많은 진보가 있어 기본적으로 가능하지만 여기에는 경제적인 제약조건이 다르기 때문이다. 로봇의 능력(ability)은 품질 좋은 제품(right goodness)을 저렴한 비용과 빠른 시간(right cost)으로 자동화(automation)할 수 있는가에 달려 있으며 앞으로는 하드웨어요소(hardware element)와 제어장치(control device)의 급속한 발전으로 표 1에서 정밀작업으로 생각되는 아아크 용접, deburring 및 조립에 해당하는 어려운 작업들도 경제적 요건에 맞게 점차 응용될 전망이다. 자동조립에 관한 경제성 이론은 1976년 Lynch⁽¹⁾의 경제적 모델(economic model)에 의해 분석되었다. 그는 로봇과 같은 프로그램이 가능한 기계와 전용조립기계 그리고 수동조립에 대해 경제성을 비교 분석하였다.

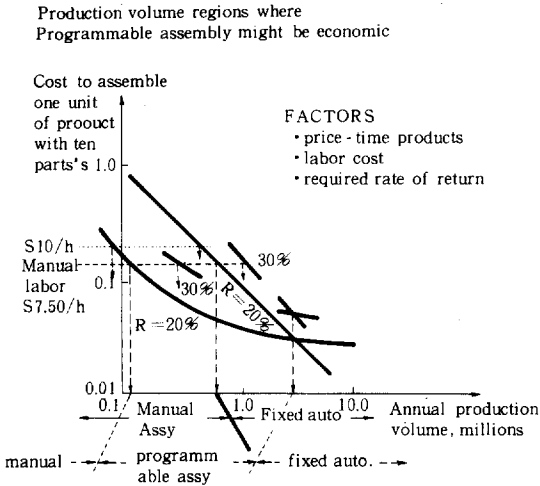


그림 2. 조립작업의 경제성 비교

그 결과는 그림 2에 나타나 있다. 이 모델은 비용시간량 (price-time product)의 관계식으로 이루어졌으며 이는 조립장치의 비용과 조립시간의 결과로 부터 산출되어진다. 예를 들어 B 조립기계의 비용은 \$ 100,000 이고 A 조립 기계의 비용은

\$ 50,000 일때 B의 경우 평균 조립 시간이 2초 이고 A의 경우 4초인 경우를 생각해 보자. 이 경우 A, B 모두의 비용 시간량은 \$ 200,000인 것이다. 또 이 경제 모델은 수동 조립기 보다 경쟁적일 수 있는 비용 생산량의 한계를 구할 수 있다. 자동조립장치가 매우 경제적이기 위해서는 생산라인에서 폭 넓게 응용되고 비용 생산량이 이 한계 이하 이어야 하는 것이다. 1976년을 기준으로 이 한계 비용 생산량 \$ 293,000로 측정 되었다. (그림 2)의 예에 따르면 노동자의 임금이 \$10/h 인 경우 연간 생산량이 5백만 단위 이하일때 로봇에 의한 자동 조립이 경제적인 것으로 분석되고 있다. 이와 같이 대량 생산에서 다품종 생산으로 변화하고 현재와 같이 점차 높아지는 고임금 추세에 미루어 볼때 산업용 로봇에 의한 자동 생산은 현실적으로 가능해 지기 시작한 것이다.

3. 조립용 로봇의 유형

현재 생산라인에서 수행되는 조립의 형태와 그 유형은 복잡하고 다양하다. 표 2에서 알 수 있

표 2. 각종 조립용 로봇의 비교

	Bendix PAX	Unimate 6000	Unimate 500	SIGMA	Shuttle manipulator
Kinematics	Cylindrical plus wrist	Elbow	Elbow	XYZ	Elbow
No. of axes	Six	Six	Five	Three-five	Six
Size	0.5m×0.5m×200°	~ 1.3m reach	~ 1m reach	~ 0.5m ³	~ 18 m
Actuators	Electric / gears, ball screw	Hydraulic/gears, ball screws	Electric /gears	Electric / ball screws	Electric, gears
Repeatability	~ 0.2 mm	~ 0.2 mm	~ 0.1 mm	~ 0.1 mm	5 cm
Weight of moving parts	200 kg ?	900 kg ?	60 kg	50 kg ?	500 kg
Payload	2 kg	10 kg ?	3 kg	?	32 tons

- NOTES : (1) PAX was a research effort by Bendix, now abandoned.
 (2) Unimate 6000 is a cooperative effort between Unimation, Inc. and Ford Motor Co.
 (3) Unimate 500 is being built to General Motor Co. specifications.
 (4) SIGMA is marketed by Olivetti, s. P. a.
 (5) The Shuttle Manipulator is being built by SPAR, Ltd, Toronto, Canada.
 (6) All data in this table are estimates by the author.

듯이 조립용 로봇의 제원과 그 특성이 현재 생산되는 조립용 로봇에 따라 분류되어 있다. 조립시 일어나는 부품간의 역학 및 그 특성은 로봇의 동적 특성과 조립유형에 따라 달라진다. 그래서 1976년 Kondolen¹⁾은 조립할 제품의 크기와 수량에 따라 10 가지 형태로 분류하였으며 작업방식에 따라서도 12 가지의 조립표준 모델을 분류하여 로봇이 생산조립에 이용될 때 필요한 데이터를 제시하였다.

실제 생산라인에서 수행되는 로봇에 의한 조립이 가능한 예는 실린더와 피스톤의 조립, 나사 조립, 베어링과 축 그리고 베어링과 베어링하우징의 조립, 밸브몸체 (valve body)와 스풀 (spool) 조립 그리고 판조립등을 들 수 있다. 과거³⁾에 이러한 작업에 로봇에 의한 자동조립이 실용화 될 수 없었던 이유는 상업적으로 생존할 수 없었고, 산업체의 요구를 충족시킬만한 기술이 부족했고, 생산라인상에서 조립부품의 정확한 규격화가 안되었으며, 부품의 설계가 자동화 하기에 용이하지 않았음을 들 수 있다. 이러한 문제점은 점차 해결되어 로봇에 의한 FMS (Flexible manufacturing system)화에 따라 본격적으로 연구되기 시작했다.

4. 조립 방법 및 문제점

산업용 로봇에서 그 수행능력을 평가하는 가장 중요한 인자는 복원력과 위치 정밀도이다. 그러나 로봇⁴⁾의 구조적인 동적오차, 부품 이송장치의 오차, 조인트 (joint)에서의 백래쉬 (backlash)현상, 로봇의 자유도 (degree of freedom)의 부족, 서보장치 (servo - valve or servo - motor)의 오차, 점성마찰 (coulomb friction)에 따른 오차 등으로 로봇의 gripper (end point)에서의 상대오차가 발생한다. 이 오차가 조립가능범위를 벗어날 때는 부품의 변형, 로봇의 동작부 (actuator)에 무리가 가해져서 조립이 불가능하게 되며 나중에 설명하게 될 재밍 (jamming)과 웨딩 (wedging)현상도 발생하게 된다. 물론 컴퓨터에 의한 오차보상 및 초정밀 구조 (mechanism)로 이러한 오차를 줄일수도 있겠으나 이는 생산비용이 비싸지는 원인이 되고 또한 기능적인 제약도 뒤따르게 된다.

조립과정은 첫째, 조립할 부품을 잡고 (pick up

phase), 둘째, 이 부품을 이송하여 (transport phase), 셋째, 위치오차를 보상하고 (fine positioning phase), 넷째, 구멍 (hole)에 삽입하며 (insertion phase), 다섯째, 이를 검사 (inspection)하는 5단계로 이루어진다. 부품을 잡는 데는 위치선정의 정밀도 (orientation)를 요하며 이송단계에서는 앞에서 언급한 로봇의 복원력에 따라 오차가 발생하므로 이 상대 오차를 조립이 가능한 범위내에서 보상해 주는 기술을 요한다. 이와 같은 보상 방법에는 수동적 보상 (passive accomodation)과 자동적 보상 (active accomodation)이라는 두 가지 방법이 있는데, 전자는 Whitney⁵⁾와 Watson⁶⁾에 의한 RCC (Remote Center Compliance)에 의해 feedback 없이 자체적인 위치상대오차를 보상해 주는 방법으로서 조립시간이 매우 빠르고 간단하므로 가격이 매우 저렴한 장점을 가진 반면, 보상오차에 한계가 있는 것이 단점이다.

반면 후자의 경우로는 일본 Hitachi 사^{7), 8), 9)}의 Hi-T-hand에 의한 정확한 부품 조립 (precision insertion)의 예를 들 수 있다. 이는 측정장치 (sensor)에 의한 귀환 제어 (feedback control)로 비교적 넓은 범위의 오차에서도 조립을 성공적으로 수행할 수 있는 반면 전자의 경우보다 조립시간이 늦고 고가의 장치인 것이 단점인 것이다. 자동조립에서 무엇보다도 중요한 마지막 단계의 작업으로는 검사 (inspection)과정인데 이것은 주로 visual sensor나 간격감지기 (proximity sensor)에 의해 수행된다.

조립공정은 원래 두가지의 기본작업 즉 1) 두 개 혹은 여러개의 부품을 동시에 결합하는 part mating, 작업과 2) 이러한 part mating작업을 해서 하나의 완전한 제품을 조립하는 작업으로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 조립과정중에서 가장 많이 하는 작업의 유형으로서는 주조나 가공된 부품의 원형구멍에다 금속부품을 끼워넣는 소위 "peg-hole" 삽입작업을 들 수 있는데 여기에 대해 연구를 많이 수행한 결과 부품 유형별로 조립조건을 분류하기에 이르러 있다. 일반적으로 조립작업을 훌륭히 수행하기 위해서는 조립과정중 발생하는 공학적인 문제를 해석하여 조립에 관련된 변수를 파악하고 이것들이 조립작업에 어떠한 영향을 미치는가를 규명하는 것이 무엇보다도 중요하다.

part mating 작업을 하는데 중요한 인자는 1) 부품의 기하학적인 형상 2) 부품을 잡고 있는 gripper의 stiffness 3) 조립될 제품사이의 마찰로 볼 수 있는데 이러한 세가지 인자가 조립작업에 미치는 영향을 간단히 소개하기로 한다. 그림 3은 로봇의 gripper가 피조립물(peq)을 잡고 조립하기 위해서 구멍(hole)으로 접근할때의 기하학적인 관계를 나타낸다. peq가 hole에 진입할 때 로봇을 positioning 하는 데도 정밀도의 한계가 있기 때문에 초기에 ϵ_0 의 수평방향의 상대위치 오차와 θ_0 의 각 변위 오차를 가질 수가 있다. 이 상태에서 peq가 hole에 접근하여 그림 4(a) & (c)와 같이 경사면 부분을 지나면서 한 점에서 접촉하기 시작하면 또는 4(b) & (d)와 같이 두 점에서 접촉하게 되면 마찰력 F_u (마찰이 있는 경우)와 반력 F_N 을 받게 된다. Whitney⁵⁾는 이러한 기하학적인 관계와 힘의 평형상태를 수학적으로 분석하여 조립할 수 없는 경우를 유도하였는데

- (1) peq와 hole 중심간의 위치오차 ϵ_0 가 경사면(chamber) 폭 w 보다 클 경우
- (2) hole에서의 반력 및 마찰력, 로봇 gripper에 작용하는 삽입력과 gripper의 스프링 탄성형에 의해 힘의 평형상태가 이루어지는 경우: 이 경우는 peq의 위치를 보정해 주어야만 삽입할 수 있는 상태인데 재밍(jamming)현상이라 한다.
- (3) peq를 hole에 삽입하는 과정에서 peq나 hole이 탄성변형되어 꺾여서 처음부터 삽입을 다시 시작해야만 조립할 수 있는 경우: 이 경우를 웨징(wedging)현상이라 한다.

Whitney⁵⁾는 위에서 언급한 jamming과 wedging 현상을 피하기 위한 조건식을 x 방향과 z 방향의 hole에서의 반력성분의 힘 즉 F_x 와 F_z , 반력 모우먼트 M , 마찰계수 u , peq의 반경 r 의 함수로 유도하였다. 또한 wedging 현상도 최초의 각변위오차(θ_0), 중심간의 수평변위오차(ϵ_0), 틈새율 c (clearance ratio = $\frac{R-I}{R}$: R 은 hole의 반경), gripper가 갖는 등가스프링 상수, 즉 회전 각 스프링상수 k_θ , x 방향의 스프링상수 k_x , peq의 끝부분에서 gripper의 회전중심까지 거리 L_g 의 함수로 유도하여서 조립시 필요로 하는 설계변수를 제시하였다. 여기서 gripper를 flexible

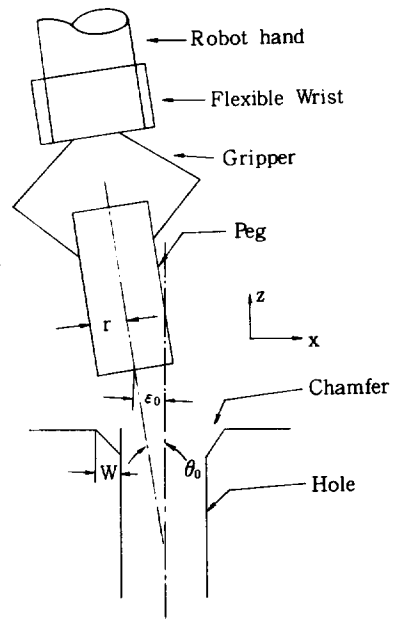
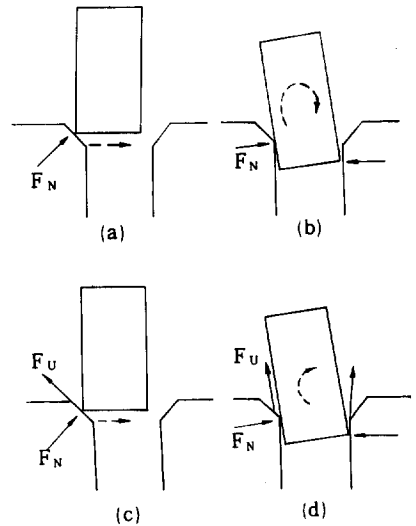


그림 3. Peg와 Hole삽입초기의 기하학적 관계



(a), (b): 마찰력이 없는 경우
(c), (d): 마찰력이 있는 경우

그림 4. 조립시의 삽입과정

system으로 본 것은 견고한 peq 보다는 gripper 및 지지장치들이 더 유연한 구조물을 갖고있다고 볼 수 있기 때문이다.

5. 수동적 보상방식

위에서 설명한 조립상의 문제되는 jamming 과 wedging 현상을 피하고 peg 와 hole 사이의 틈새가 작은 경우도 훌륭히 조립을 수행하기 위해서는 peg 를 잡고 있는 부분인 gripper 자체에 유연성을 부여하여 peg 의 위치를 적절히 보정해주는 방법을 생각할 수 있다. Watson¹⁰⁾은 이러한 점을 착안하여 RCC (Remote Center Compliance) 라는 유연한 손목(flexible wrist)을 고안하였다. 이 flexible 시스템은 로드 스프링 (rod spring) 이나 원판 스프링 (diaphragm) 또는 코일 스프링의 구조로 되어 있기 때문에 gripper 로 하여금 peg 의 위치를 보정할 수 있게끔 움직일 수 있는 장치이며 로봇트 팔과 gripper 의 중간에 위치한다. (그림 3 참조) 결국 peg 가 hole 에 삽입되면서 마찰력과 반력을 받게되면 이 힘들은 gripper 와 peg 사이에 장치된 손목(wrist)으로 하여금 상대운동을 일으키게 하여 최초의 오차가 줄어들면서 peg 가 hole에 삽입하게 되는 것이다. (그림 4 참조)

수동적 보상방법에 의한 조립은 경제적이고 신속하여 아직 flexible wrist 에 대한 연구가 진행중에 있다. 그림 5는 복동(復動) spring 을 이용한 6자유도 (degree of freedom) 를 갖는 유연한 wrist 를 나타내는데 McCallion²⁾ 등에 의해 개발되었다. 이외에도 실린더 스프링 대신에 공기압래 (pneumatic ram)을 사용하는 wrist 도 있고, 자동 조심형 베어링과 3개의 코일 스프링을 이용한 Belforte¹³⁾ 등에 고안된 self - adaptive guided assembler 등이 있다.

6. 자동적 보상방식

자동적 보상방식은 수동적 보상방식이 갖는 단점, 즉 조립시 무리한 힘을 가하게 되고 또한 대단히 작은 틈새 (peg 와 hole의 틈새)이 있을 시는 조립이 불가능하다는 점을 보완하기 위해서 고안된 귀환제어 (feedback control) 방식이다. 즉 감지기 (sensor)로 힘이나 위치등의 변수를 측정하여 귀환제어 시켜서 controller 가 구동장치로 하여금 gripper 의 위치오차를 보상해 주는 방식

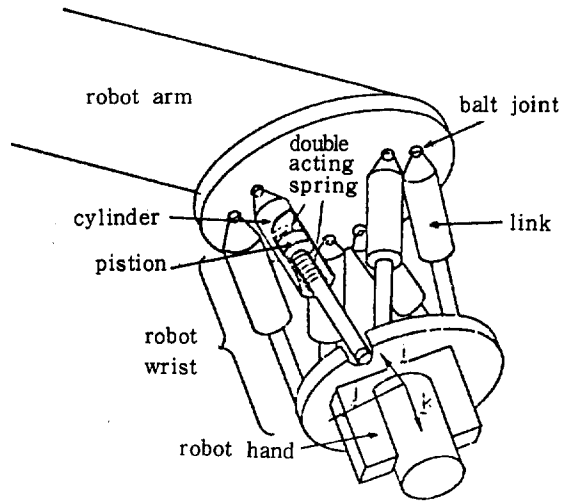


그림 5. Flexible wrist

이다. 이 방식은 1) 어떤종류의 감지기 (sensor)를 사용하여 어떤 방식으로 감지 할 것인가 2) 감지된 신호를 어떤 방식으로 처리하여 로봇트의 위치를 제어할 것인가 하는 두가지 문제로 귀착될 수 있다. 로봇트의 gripper 가 peg를 잡아서 hole에 삽입할때 어떤 정보를 이용하느냐에 따라 힘귀환제어 (force feedback)와 위치귀환제어 (position feedback)으로 나눌 수 있는데 force 귀환제어 시스템은 peg 와 hole 에 진입시 생기는 반력을 측정하여 반력과 wrist 의 변위오차와의 관계를 얻어서 controller 에 정보를 줌으로서 gripper 의 위치오차를 보상해 주는 방식인 반면에, 위치 귀환제어 시스템 (position feedback 은 유연손목 (flexible wrist)에, 변위 측정장치를 부착하여 peg 와 hole 간의 상대 위치를 알아냄으로써 controller 로 하여금 gripper 의 위치를 보상하게 해주는 방식이다.

Force feedback system

그림 6은 Brussel 과 Simmons¹⁸⁾에 의해 고안된 force feedback 조립 장치를 도식적으로 나타낸 것이다. gripper 끝의 peg 가 hole 에 삽입되는 과정에서 생기는 위치오차에 의한 반력은 3 방향의 힘을 측정할 수 있는 스트레인게이지 type 의 감지기에 의해 측정되며 감지된 신호는 디지털신

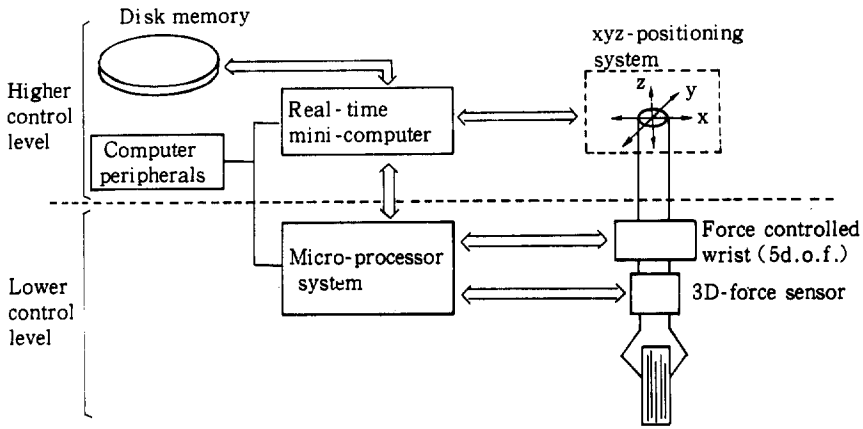


그림 6. Force feedback 에 의한 조립

호로 변환되어 마이크로 프로세서로 feedback 된다. 마이크로프로세서에서는 입력으로 받은 force signal 을 분석하여 peg 와 hole 간의 상대위치오차를 계산한다. 이 결과를 실제 로봇의 움직임을 제어하는 미니 컴퓨터로 보내게 되는데 미니 컴퓨터는 구동장치에 신호를 보내어 위치오차를 보상해 주도록 되어 있다.

Position feedback system

De Faxio¹⁰⁾ 는 5 자유도 (3 방향회전과 2 방향 선형 운동)을 갖는 수동적오차보상 장치인 기존의 flexible wrist 에 무접점 감지기인 eddy current proximity sensor 를 부착하여 삽입과정시 발생하는 wrist 의 변형에 따른 변위를 측정할 수 있도록 하여 이로부터 peg 와 hole 의 상대위치를 계산함으로써 자동조립할 수 있는 position feedback 조립시스템을 개발하였다. 이 장치의 controller 로는 마이크로 컴퓨터를 사용하였다. 이 개념을 발전시켜 Seltzer 는 경사면이 없는 hole 에 peg 를 조립하기 위해서 4개의 간격측정장치 (proximity sensor) 와 photo diod array 장치를 이용한 flexible wrist 를 개발하였다. 이는 처음부터 hole 의 중심선에 대해 10° 기울인 상태로 hole 에 접근하여 pge 의 경사면을 따라 hole 안으로 삽입시키는 방식을 채택하였다.

Active adaptive compliant wrist

AACW (active adaptive compliant wrist) 시스템은 위에서 언급한 자동보상시스템과는 달리, 그림 7 과 같이 peg 의 초기위치는 로봇트 arm-controller 에 의해 선정해 주고 sensor 시그널에 의한 오차보정은 6 자유도를 갖는 wrist 구동장치에 의해 peg 의 위치를 보정해주는 시스템을 말하며, 이는 Brussel 과 Simmons¹⁴⁾ 에 의해 개발되었다. Sensor 로서는 스트레인지지를 사용하였다. 그러나 이러한 오차보정방식도 peg 와 hole 간의 최초의 위치오차가 hole 의 경사폭 (chamfer width) 보다 크거나 경사면이 없는 구멍에 조립할시는 현재 개발된 소프트웨어로는 적합하지 않은 것이 판명되었다.

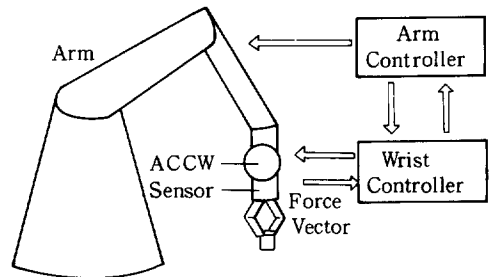


그림 7. Active adaptive compliant wrist 를 이용한 조립용로봇 시스템

Hi-T hand

최근 일본의 Takeyasu^{7), 8), 9)}의 연구에 의해 히타치 (Hitachi) 회사가 개발한 Hi-T expert II 라는 조립전용로봇 시스템을 개발하였다. 이는 그림 8과 같은 구조를 갖고 있는데 관절형이 아닌 직각좌표형의 Main 로봇가 peg를 잡고 hole에 삽입하는 역할을 하고 보조로봇은 구멍이 있는 부품을 이송해서 조립할 수 있도록 잡고

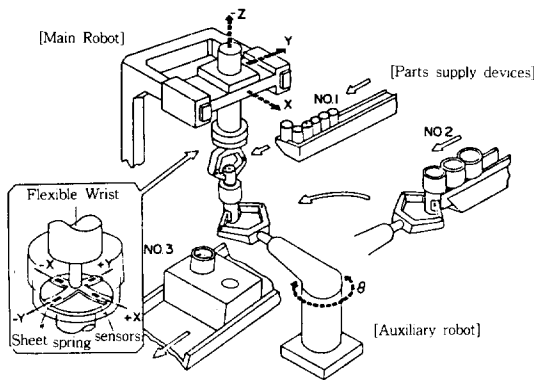


그림 8. Hi-T hand에 의한 조립공정도

있다가 조립이 완성되면 조립완성품을 이송하는 역할을 한다. 이때 peg와 hole의 삽입과정은 1) 접근단계 (approach stage) 2) search stage 3) 한점접촉단계 (one point contact stage) 4) 두점접촉단계 (two point contact stage)의 4단계로 나누어진다. 종래의 경사면 (chamfer) 통과단계 대신에 search stage로 대체된 셈인데, 접근단계에서 peg가 상대오차를 갖고 hole에 접근하여 접촉하게 되면 어떤힘을 받게 되는데 최대허용힘 F_m 을 미리 선정하여 이 이상의 힘을 받을 때에는 search 단계를 넘어가 누르는 힘은 증가시키지 않고 이미 마이크로 프로세서 ROM에 기억된 adaptive pattern selection 작업에 의해 구멍을 찾게 되어 직접 삽입가능범위에 들어오면 search를 중단하고 삽입과정을 밝게 된다. 여기서 사용된 flexible wrist의 sensor (스트레인 게이지)는 x, y, z 방향의 반력을 감지하게 된다.

이 조립시스템의 조립능력은 peg와 hole사이의 초기의 상대오차가 ± 2 mm범위내에 있을때도

조립수행시간이 1.07초 밖에 걸리지 않을 정도로 빨리 수행할 수 있다는 실험결과를 얻었다. 이러한 조립시스템은 현재 일본의 무인화 공장 (unmanned factory)에 응용되고 있다.

위에서 언급한 자동오차보상방식 외에도 Cutkosky와 Wright⁴⁾의 자동조절 flexible wrist (Automatically adjustable instrumented remote-center compliance), Kasai와 Takeyasu¹⁵⁾ 등의 sensory table, Piller¹⁶⁾의 조립용 6자유도 force sensor, Dombre와 Borell¹⁷⁾ 의한 compliant manipulator joint 등이 개발되었으며 최근 TV 비디오 카메라를 이용한 조립 (23, 28, 30)에 대해서도 연구가 많이 진행되고 있다.

앞에서 언급한 이론 및 기술을 종합하여 볼때 자동조립시스템의 조립수행능력은 위치정밀도, 민감성 (sensitivity) 및 가변성 (flexibility)에 따라 평가될 수 있다. 또한 조립시간 및 조립시에 로봇의 동적 안정성도 성능인자 (performance factor)로 꼽을 수 있다. 로봇 동특성을 고려하여 위치제어 Algorithm을 개발하고 있는 사람은 Stokic과 Vukbratovic^{19), 20), 23)}이 있으며 이외에도 조립할시에 생기는 로봇 운동의 동적 안정성을 연구하여 안정성을 보장하는 알고리즘을 개발한 Kulakov²¹⁾ Whitney²²⁾와 Erric²⁶⁾등도 이 분야에 많은 연구를 하고 있다.

7. 맺는말

관련문헌을 토대로하여 로봇트를 응용한 조립기술의 현황을 간단히 소개해 보았다. 앞에서 기술한 바와같이 로봇트의 조립기능은 점차 고도로 지능화 되고 있지만 아직도 초보적인 단계이어서 제품형상이 복잡해서 복잡한 조립공정을 요하는 제품이나, 제품재질이 유연하여 쉽게 손상이가기 쉬운제품, 초정밀을 요하는 제품을 조립하기 위해서는 상당한 연구 노력을 기울여야 할 것으로 생각된다. 본고에서 소개한 조립 대상품이 비교적 제일 간단한 형상의 제품이라는 것을 감안할때 앞으로 조립분야에서의 연구과제는 산적해 있다고 보아도 과언이 아닐것 같다. 로봇트에 의한 제품조립은 수동적 보상방식에서 측정장치가 부착된 flexible wrist를 이용한 자동적보상방식으로, 감지기 (sensor)의 형태도 접촉 감지기 (tactile sen-

sing)에서 시각 감지기 (visual sensing) 방식으로 발전되고 있으며, 구동장치도 유 공압에서 직류 서보모터에 한 구동시스템으로 바뀌어가고 있는 추세이다. 로봇산업의 선진국들은 이제 소프트웨어 (software) 개발에 주력하고 있으며 아직도 좀 더 민감한 인간공학적인 로봇의 꿈을 실현시키기 위해 많은 연구와 투자를 하고 있다.³²⁾ 앞으로 남은 과제는 새로운 로봇의 팔 및 구조의 개발과 무게와 크기를 소형화하고 좋은 기능을 갖는 동작기 (actuator)의 개발, 저렴하고 신빙성있는 감지기의 개발, 유연한 로봇 핸드의 개발, 그리고 software 에 의한 좀더 완벽한 조립기능을 개발하는 것이다.

이러한 선진외국의 로봇에 대한 첨단기술 개발 추세와는 달리 우리나라 기업에서는 아직 로봇을 생산라인에 적극적으로 활용하는 사례조차도 별로 없는 것으로 필자는 알고있다. 그러나 외국 시장에서의 경쟁력을 강화하기 위해서는 생산자동화를 통한 생산 효율의 증대 및 생산가격의 저렴화를 꾀하지 않을 수 없음을 감안하여 불매 로봇을 활용하는 생산체제로 서서히 전환하지 않을 수 없을 것 같다. 특히 조립비용이 전체 생산 단가에 많은 비중을 차지하고 있는 우리나라 기업의 실정에 비추어 불매 조립기술의 필요성을 빨리 인식하여 이에 대한 연구개발을 서서히 추진해야 할 시기인 것 같다.

감사의 말

필자가 82년도 미국자동제어학회 (82' American Control Conference) 및 로봇 워크숍 (Robotics Workshop)에 참석할 수 있도록 재정적으로 많은 후원을 해준 과한재단에 대해 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. L. Nevins and D. E. Whitney; "Assembly research" Automatica vol.16, pp.595, 1980
- 2) H. McCallion, G. R. Johnson and D. T. Pham; "A compliant device for inserting a peg in a hole" The industrial Robot, June 1979, p.81
- 3) K. E. Miles; "Factors affecting the manipulation of pieceparts for Automated Assembly" Industrial Robot 1978, p.14
- 4) M. R. Cutkosky and P. K. Wright; "Position sensing wrists for industrial manipulators" Proc. 11th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, 1981, pp.427—434
- 5) Whitney, D. E.; "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts" ASME trans. vol.104, pp.65—77, March, 1982
- 6) Watson, D. C.; "Remote center compliance system" U. S. Patent No. 4,098,001, field Oct. 13, 1976
- 7) T. Goto, T. Inoyama, and K. Takeyasu; "Precise insert operation by tactile controlled robot", Industrial Robot, Sept. 1980
- 8) K. Takeyasu, Goto, T. Inoyama; "Preci-T. sion insertion control robot and its application," ASME of J. of engineering for Industry pp.1313—1318, Nov. 1976
- 9) Tatsuo Goto, Kiyoo Takeyasu, T. Inoyama; "Control of algorithm of precision insertion operation robots," IEEE, Trans. vol. SMC-10, No.1 Jan. 1980
- 10) Thomas Luca De Fazio; "Displacement-state monitoring for the remote center compliance (RCC)-realizations and application" Proc. 10th International Symposium on Industrial Robots, Milia, Italy, 1980 pp.599—569
- 11) M. S. Ohwovoriole; "On the theory of single and multiple insertions in industrial assembly" Proc. 10th Int. Sym. on Industrial Robot, Milia, Italy, 1980, pp.545—558
- 12) Samuel H. Drake, Paul C. Waston and Sergio N. Simunovic; "High speed robot assembly of precision parts using compliance of sensory feedback" Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robot, Oct. 1977, Tokoy, Japan, pp.87—98
- 13) G. Belforte, N. D'Alfio, A. Romiti; "A self-adaptive guided assemble" Robot IV, Conf. Proc. Mar 2—4, 1982, pp. 544—551
- 14) H. van Brussel, H. Thielemans, J. Simons; "Further developments of the active adaptive

- compliant wrist (AACW) for robot assembly” Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robot, pp.377—384, 1981, Jap. Tokyo
- 15) M. Kasai, K. Takeyasu; “Trainable assembly system with an active sensory table processing 6 axes” Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robot. 1981. Jap. Tokyo
 - 16) Gerald Pillier; “A compact six-degree of freedom force sensor for assembly robot” Proc. 11th Int. Symp. on the Industrial Robot, pp.121—129, Tokyo Japan, 1981
 - 17) A. Liegeois, E. Dombre and P. Borrel; “Learning and control for a compliant computer controlled manipulator,” IEEE Trans. on Automatic Control, vol.AC-29, No.6, Dec. 1980, pp.1097—1980
 - 18) H. Van Brussel, J. Simons; “Automatic assembly by active force feedback accomandation” Proc. The 8th. Int. Sym. on Industrial Robot pp.181—193, Stuttgart, West Germany
 - 19) D. Stokic, M. Vuko Bratoric; “Simulation and control synthesis of manipulator in assembling technical Parts pp.332—338, ASME, Trans. vol.101, Dec. 1978
 - 20) M. Vukobratovic, D. Stokic; “Control of manipulator robots” Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
 - 21) F. M. Kulakov, “On the ways of Robot control in assembling Operations” Pro. the 11th -Int. Sym. on Industrial Robot, pp.385—392
 - 22) Daniel E. Whitney “Force Feedback Control of Manipulator fine motion” Trans. vol.102, pp.128, June 1981
 - 23) S. S. M. Wang and P. M. Will “Sensors for Computer Controlled Mechanical Assembly” The Industrial Robot, Mar. 1978
 - 24) M. Salmon, “Assembly Robots” Industrial Robot, June 1977
 - 25) H. McCallion, P. C. Wong, “Some thoughts on the Automatic Assembly of a Peg and a Hole” Industrial Robot 1977, July
 - 26) Eric G. R. Gerelle B. A. “Force Feedback Control” Proc. 8th Int. Symp. on Industrial Robot, 1978, pp.194—205, Stuttgart, West Germany, vol.12
 - 27) Richard Paul, “Compliance and Control” IFAC pp.694—699
 - 28) W. B. Heginbotham, D. F. Barnes, D. R. Purdue, D. J. Law “Flexible Assembly Module with Vision Controlled Placement Device” the 12th Int. Symp. on Industrial Robot, 1982, pp.479—488, Paris, France
 - 29) Ryosuke Masuda and Kensuke Hasegawa “Total Sensory System for Robot Control and its Design approach” 11th Int. Symp. on Industrial Robot, 1981, pp.159—166, Tokyo, Japan
 - 30) Micho Takashi, Michinaga Kohno “An assembly Robot System with Twin Arms and Vision” The 11th Int. Symp. on Industrial Robot, 1981 pp.111—120, Tokyo, Japan
 - 31) Vukobratovic M., Hristic D “Dynamic control of Manipulators and some Project of Industrial Apprication” Proc. The 7th Int. on Industrial Robot, 1977, pp.138—138, Tokyo, Japan
 - 32) W. B. Heginbotham “Present Trends, Applications and Future prospects for the use of Industrial Robot” IM & CHE, vol.195, 1981