

면취없는 부품의 조립을 위한 로봇 손목기구의 개발 (Development of a robot wrist for the assembly of chamferless parts)

권 대 갑 (한국과학기술원 생산공학과 교수)
정 중 민 (한국과학기술원 생산공학과 학생)

요약문

본 논문에서는 chamfer가 없는 경우에도 조립이 가능한 로봇 조립용 손목기구를 개발하였다. 손목기구에서는 chamfer있는 경우에 우수한 적응능력을 가지는 RCC (Remote Center Compliance) 구조가 이용되었으며 위치측정용 sensor와 공압 actuator를 이용하여 조립시 생기는 RCC 구조의 변형을 측정하여 이로부터 능동적으로 오차를 교정하도록 하였다. sensor signal로부터 적절한 오차교정방향을 찾아내는 algorithm으로는 신경회로망을 이용하였으며 이 결과 손목기구의 비선형성에도 잘 적응함을 볼 수 있었다. 제작된 로봇 조립용 손목을 이용하여 chamferless part의 조립을 실험한 결과 clearance ratio가 0.002인 경우 eccentricity가 2 mm 까지 오차교정이 가능함을 볼 수 있었다.

1. 서론

만약 조립될 부품이 항상 동일하고 완전하게 가공되어 정확하게 놓여진다면, 조립은 항상 성공적이고 조립 반력은 발생되지 않을 것이다. 그러나 실제로는 로봇의 구조적인 오차, 보조 이송장치의 오차, 로봇트 조인트의 back lash 현상, 로봇트의 자유도의 부족, 시보 제어 장치의 오차, 점성마찰에 따른 오차, 로봇트 gripper에서의 상대오차, 조립될 부품의 상대오차 등 제반 이유 때문에 상당한 조립 위치 오차가 발생한다.⁽¹⁾ 이러한 위치오차는 조립시 부품간의 반력을 발생시키며 경우에따라 조립을 불가능하게하고 로봇트에도 치명적인 영향을 주게된다. 이러한 조립 작업에서 발생할 수 있는 오차를 줄이는 방법에는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 조립과정 중 부품간의

상대오차로 인해 조립을 방해하는 반력이 발생되어도 오히려 이 반력이 자체 뒤편라이언스(compliance) 때문에 오차가 줄어드는 방향으로 작용하여 조립을 가능하게 하는 수동적 적응방법 (passive accomodation) 이 있다. 수동적 적응방법의 대표적인 예로서 미국 MIT 대학 C S D L (Charles Stark Draper Laboratory) 연구소에서 개발된 R C C (Remote Center Compliance) 가 있다.⁽²⁾⁽³⁾ 이러한 수동적 적응방법은 조립비용이 적게 들고 조립시간이 빠른 반면 조립시 무리한 힘을 받을 수 있고 허용 가능한 부품간의 오차도 챔퍼 폭(chamfer width) 내에 들어야 하며 챔퍼가 없는 경우의 문제는 해결되지 않고 있다.⁽⁴⁾ 다른 방법으로는 조립시 발생하는 오차나 그 반력을 측정하여 이를 위한 제어 하는 방법인 능동적적응(active accomodation) 방법이 있다. 능동적 적응방법을 이용한 예는 H. Van Brussel⁽⁵⁾ 등이 개발한 반력기한 제어 방법과 일본 히다찌사에서 개발한 유연성과 감지성을 가진 HI-T HAND⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 가 있다. 이러한 방법들은 수동적 적응방법이 갖는 단점, 즉 과중한 조립반력을 줄일 수 있고 조립 허용오차의 범위를 확장시키는 등 장점을 가지고 있지만, 조립 시간이 길어지고 구조가 복잡해지며 조립비용이 많이드는 단점이 있다. 이와 같이 수동적 적응방법에서의 단점을 해결하기 위해서는 능동적 적응방법이 불가피하지만 현재 개발되어 있는 능동적 방법도 그 나름대로 단점들이 있어 보다 나은 방법을 찾기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 로봇트 팔에 장착되어서 로봇트자체의 교정 작업없이, 단순히 손목기구의 작용에의하여 chamferless parts의 조립을 가능하게하는 조립용 손목기구가 개발되었다.

2. 구조 설계

본 연구에서 개발된 전체 시스템의 블록 선도가 < 그림.1 > 에 도시되었다. 전체 시스템은 크게 조립을 직접 수행하는 손목기구부와 이에 대한 제어 알고리즘을 제공하는 controller 부로 구성되며 손목기구부는 < 그림.2 > 에 나타난 바와 같이 기본적인 RCC 구조와 이의 변형량 (tilting 과 translation) 을 측정하는 sensor (optical fiber sensor) 그리고 오차를 교정할 수 있는 공압 actuator로 구성된다. RCC 구조를 구현하기 위해 본 연구에서는 얇고 길게 제작된 고무 rod 를 사용한다. 이러한 고무 rod 는 두께가 얇고 길이가 길게 제작되어 축 방향의 강성이 반경 방향의 강성보다 훨씬 커서 미소 운동의 경우 link 구조와 거의 같은 형태로 움직이게 된다. 이러한 고무 rod 는 몇 판과 평행이동부 사이에 3 개가 120 도 간격으로 평행하게 장착되어져서 평행이동부가 몇 판에 대해 평행하게 움직일 수 있으며 평행이동부와 peg 를 잡고 있는 아랫판 사이에도 고무 rod 3 개가 비스듬히 장착되어 peg 가 임의의 방향으로 잘 회전 (tilting) 할 수 있도록 설계되었다. 또한 RCC 구조의 compliance center 가 peg 의 선단에 위치되어서 PEG는 작은 조립반력에서도 쉽게 tilting 이 일어난다. 또한 조립시 조립반력에 의한 RCC 구조의 발생하는 평행이동위와 tilting 변위가 측정되어진다. 이를 위해 평행이동부의 이동량을 측정할 수 있도록 바깥 case 에 sensor 2 개가 수평으로 장착되었으며 아랫판의 tilting 망을 측정하기 위해 평행이동부에 sensor 2 개가 수직으로 장착되었다. 여기서 sensor 는 analog type 의 반사형 optical fiber sensor가 사용되었으며 각 sensor 에서 측정된 거리 data 는 A/D converter 를 통해 controller 에 전송 된다. 또한 조립과정에서 가장 중요한 수직 방향의 반력을 계산하기 위해서 robot 팔과 손목사이에도 sensor 가 부착되었다. 이를 통해 조립과정이 성공적으로 수행되고 있는지의 여부가 판단될 수 있다. 조립용 손목기구에 장착된 sensor 로부터 오차의 크기나 방향이 결정되더라도 조립용 robot 을 직접 구동하여 오차를 교정하는 방법은 robot 의 정밀도나 작업시간등을 고려해 볼 때 효율적인 방법이 되지 못한다. 따라서 손목기구 자체에 구동부를 달아 robot 을 움직이지 않고도 오차를 스스로 교정할 수 있도록 할 필요가 있다. 이를 구현하기 위해 본 연구에서는 공압

실린더를 이용하였다. 공압 actuator 는 peg를 잡고 있는 아랫판을 움직일 수 있도록 바깥 case에 4 방향에서 장착되어진다. 이에 의해 아랫판을 원하는 방향으로 이동시킬 수 있게 된다. 실제로 공압 actuator 는 on/off 동작밖에 할 수 없으므로 오차 교정이 제한된 방향과 크기에 국한되지만 다음 장에서 설명할 위치교정 알고리즘에 의해 이 문제가 해결되어질 수 있다.

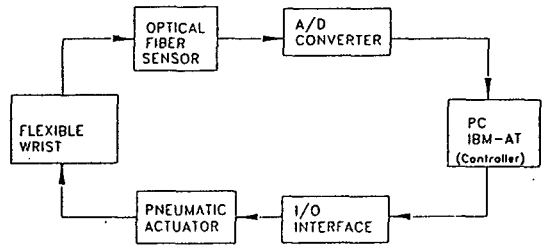


그림 1 시스템 블록 선도

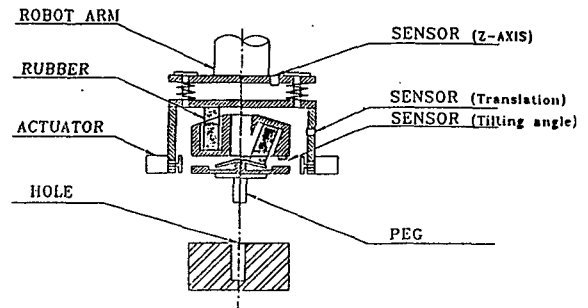


그림 2 손목기구부

3. 위치 교정 ALGORITHM

조립시 발생하는 오차가 교정되기 위해서는 < 그림.3 > 과 같이 peg 를 hole 근처에 접근시키는 approach 단계와 peg 중심과 hole 중심을 일치시키기 위한 searching 단계, jamming avoidance 단계와 이후의 insertion 단계를 거쳐야 한다. 또한 손목기구에서는 actuation 이 4 방향으로 작동하므로 현재의 오차상태를 4 방향의 pattern 으로 분류시킬 필요가 있다. 그런데 고무로 만들어진 RCC 구조에서 힘과 위치의 관계가 비선형적이고 sensor signal 이 거

리에 대해 선형적이지 못하여 pattern 의 분류가 쉽지 않다. 따라서 여기서 sensor 양을 입력으로 하고 4 방향중 근접된 방향을 출력으로 내어 주는 pattern 분류를 하기 위해서 신경회로망 (neural network) 이 이용되었다. (10) 신호처리 알고리즘에서 가장 핵심적인 부분은 4 개의 sensor signal로 부터 적절한 actuation 방향을 계산해 내는 neural network 부분으로서 supervised learning 방식의 multilayer perceptron이 선택되었다. <그림 4> Neural Network 을 구성하는 multilayer perceptron 의 구조는 input layer, hidden layer, output layer 로 구성되며 여기에는 미리 몇가지 기준 pattern (입력과 출력의 쌍) 이 기억되어진다. 학습과정에서 hidden layer와 output layer 의 node 값들은 다음과 같이 계산된다.

$$h_j = S \left(\sum_i W_{ij} s_i \right)$$

$$a_k = S \left(\sum_j W_{jk} h_j \right)$$

where i : input node number
j : hidden node number
k : output node number

여기서 S (x) 는 Sigmoid function 으로서 다음과같이 정의된다.

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

multilayer perceptron 의 학습은 미리 알고있는 pattern 을 입력으로 하였을 때 이에 대응하는 pattern 이 output layer 에서 출력되도록 weight (W_{ij} , W_{jk}) 를 교정해 나가는 과정이라고 할 수 있다. 이때 weight 는 output stored pattern 과 actual output 의 차이의 계급으로 정의되는 error function 이 줄어드는 방향으로 점진적으로 교정되어 error 가 최소가 되는 점에서 교정작업은 정지하게 된다. Error function J는

$$J = 1/2 \sum_k (d_k - a_k)^2$$

d_k : desired output
 a_k : actual output

이 된다. 이때 각각의 weight 는 다음과 같이 교정되며

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{ij}}$$

$$W_{jk}(t+1) = W_{jk}(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{jk}}$$

where t : iteration number
 η : learning rate

error function J가 최소값을 가지면 학습이 끝나게 되며

이때의 weight가 저장된다. 실제상황에서는 단지 input signal θ_x , θ_y , x, y 가 단순히 weight에 곱해지는 연산만으로 현재의 input이 각각의 stored input 에 얼마나 근접한가를 output node 로 출력하게된다. 이 시스템에서는 입력으로 x,y, θ_x , θ_y 4 개가 이용되고 출력으로는 4 개의 구동부가 작동되며 10 개의 hidden layer가 사용되었다. 신경회로망을 학습시키기 위해서는 먼저 전형적인 오차 상태들과 이를 해결하기 위한 적절한 오차 교정방향들이 조사되어야한다. 이렇게 조사된 각각의 오차상태와 오차 교정방향은 반복학습을 거쳐 하나의 stored pattern 으로 neural network 에 저장된다. 학습된 neural network 은 실제 조립작업시 peg 의 위치에 따른 sensor signal 을 받아들이어 이에 대한 가장 적절한 교정방향을 출력하게 된다. < 그림;5 > 에 조립작업의 순서도가 도시되었다. 조립용 robot 가 교시된 위치에 도달하여 조립작업이 시작되면 peg 과 hole 의 상대오차에 의해 z 축 spring 이 압축되고 동시에 tilting 이 일어나기 시작한다. 이때 z축 sensor 로 부터 측정된 변형량이 일정한 값을 초과할 경우, 이것은 조립이 원만히 진행되고 있지 않다는 것을 의미하므로 이때부터 x,y, θ_x , θ_y 값이 각 sensor로 부터 측정되고 이에따라 교정작업이 시작된다. 여기서 z 축 spring 의 변형량이 최소 임계치를 넘지 않았을 경우는 조립이 잘 진행되고 있다는 것을 의미하므로 교정작업이 필요치 않다. 또한 z 축 spring 의 변형량이 최대 임계치를 넘었을 경우 무리한 조립반력을 유발할 수 있으므로 작업을 중단하고 처음 상태에서 다시 시작한다. 이러한 재시도를 3회 까지 시행해 보아서 그 때까지도 조립이 성공되지 못하는 경우는 조립이 불가능한 경우로 처리되고 다음 작업이 진행된다. 구체적인 오차교정작업은 다음과 같다. 조립오차에 의해 tilting과 translation이 생기고 이 변형량은 신경회로망의 입력단으로 입력된다. 신경회로망을 거치면 출력단에서는 현재의 오차 상태가 이미 학습한 오차 pattern과 얼마나 유사한가가 출력되며 이 출력pattern 에따라 작동해야될 공압 actuator 의 조합이 결정된다.공압actuator의 작동에 의해 압축되었던 z 축 spring 의 변위가 급격히 변하게 되는데 이로부터 searching 과정이 끝났음을 알 수 있다. Searching 종료직 후 jamming 이 발생하지 않았다면 z 축 spring의 변형량은 없어지며 jamming 이 생겼을 경우에는 z 축 spring의 변형

량이 남아 있게된다. 이 때 peg 과 hole 의 틈새폭이 작은 경우에는 입력양이 매우작아 jamming 상태의 해결 방향을 찾아낼 수 없는 것이 일반적이다. 그러나 이러한경우 대부분 최종 actuation 방향의 반대방향으로 jamming이 생기게 되며, 이러한 jamming 은 조그마한 자극(excitation)에 의해서도 풀어지기 때문에 최종actuation의 반대 방향으로 actuator는 작동된다. Jamming이 풀리면 peg는 z축 spring 에 저장된 잔류energy와 자체 compliance 에 저장된 에너지에 의해 hole속으로 삽입된다.

4. 실험

손목의 passive accomodation성능을 평가하기 위해서 actuator를 작동시키지 않은 상황에서 자체compliance만으로 어느 영역까지 교정가능함을 평가하여 보았다. 또한 수동교정이 불가능할경우에 actuation을 취함으로써 교정하지 못했던 영역을 어느정도까지 확장시킬수 있는지 조사되었다. 이와같은 실험은 chamfer가있는 hole과 chamferless hole에서 각각 실행되었다. <그림 6>에는 각각의 경우에 대하여 오차교정이 가능한영역이 표시되었다. 여기서 내부의 영역은 교정작용이 없이 자체의 compliance만으로 교정이 가능한 영역이며, 외부 영역은 active method를 사용하여 교정이 성공한 영역이다. 실험에서는 허용 조립 반력을 1 kgf로 제한하여 무리한 조립 반력이 걸리지 않게하였다. 이 실험은 모든방향에 대하여 오차를 0.1mm씩 증가 시키며 행해졌고 이때 insertion speed는 5mm/sec 였다. 위 실험 결과에서 나타나듯이 chamfer가 있는 경우는 passive method만으로도 4.2mm의 오차가 수정가능 했으며 5mm까지의 오차가 active method로 수정가능 하였다. Chamferless hole 의경우는 0.4mm까지 passive method로 수정가능 하였으며 2 mm 까지 active method로 수정가능함을 볼 수 있었다. <그림 7>은 active method를 사용한 경우의 각 sensor signal 의 변화를 plotting 한것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 z축 sensor의 signal이 2.4 voltage (5mm 압축)가 되었을 때 4개의sensor signal θ_x , θ_y , x, y는 neural network의 입력단으로 입력되며 그 출력이

actuator를 작동시켜, 오차가 교정되므로 5개의 signal 은 모두 원상태로 회복됨을 볼 수있다. 두 방향의 동시교정이 필요한지의 여부를 결정짓는 임계조건은 신경회로망의 출력 중 두번째 큰값이 0.6 이상일때였다. <그림 8>에는 $C=0.002$ 인 경우 insertion speed 변화에따른 교정가능영역이 도시되었다. Insertion speed가 30 mm/sec 이상인 경우에는 교정작용이 체 이루어지기 전에 z축 spring 의 변위가 최대 임계치를 넘어서 무리한 조립반력이 발생되었다. <그림 9>는 tilting compliance의 stiffness를 변화시켜가면서 실험한 결과이다. <그림 10>은 실험장치 전경이며 <그림 11>은 조립용 손목기구와 시편의 상세사진이다. 본 실험에서는 삼성전자의 FARA 로봇프가 사용되었다.

5. 결론

본 논문에서는 RCC구조를 사용하여 조립할 때 생기는 변형량을 측정함으로써 위치를 교정하는 손목기구가 개발되었다. 조립 변형량으로부터 오차교정 방향을 결정하는 방법으로는 신경회로망이 이용되었으며 이로써 시스템의 비선형성이 극복되었다. 또한 이러한 신호처리방법은 기존의 복잡한 sensor signal processing algorithm 보다 간단하며 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 조립기구를 이용하면 비교적 큰 위치오차에서도 chamferless parts의 정밀조립이 가능함이 입증되었다.

6. 참고 문헌

1. K.E.Miles, "Factors affecting the Manipulation of pieceparts for Automated Assembly", Industrial Robot, 1978, pp. 14
2. Whitney, D.E., "Quasy-static Assembly of compliantly supported Rigid parts", ASME trans. Vol. 104,
3. Watson, D.C, "Remote Center Compliance System" U.S Patent No. 4,098,001, field Oct. 13, 1976

4. H. McCallion, G.R. Johnson and D.T. Pham, "A compliant device for inserting a peg in a hole" *The Industrial Robot*, June 1979, pp. 81
5. H. Van Brussel, J. Simons "Automatic Assembly by Active Force feedback Accommodation" *Proc. The 8th Int. sym. on Industrial Robot*
6. K. Takeyasu, T. Goto, T. Inoyama, "Precision Insertion Control Robot and Its Application" *ASME of J. of Engineering for Industry* pp. 1313-1318 Nov. 1976
7. Tasuo Goto, Kiyoo Takeyasu, T. Inoyama, "Control of Algorithm of Precision Insertion operation Robots" *IEEE, Trans. Vol. SMC-10 No. 1 Jan. 1980*
8. Thomas Luca De Fazio "Displacement-state monitoring for the Remote Center Compliance(RCC)-Realizations and Application" *Proc. 10th ISIR, Milan, Italy, 1980, pp. 559-569*
9. H. Van Brussel, H. Thielemans, J. Simons "Further Developments of the Active Adaptive Compliance Wrist(AACW) for Robot Assembly" *Proc. 11th. Int. Symp. on Industrial Robot, pp. 377-384, 1981. Jap. Tokyo.*
10. Yoh-Han Pao "Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks"

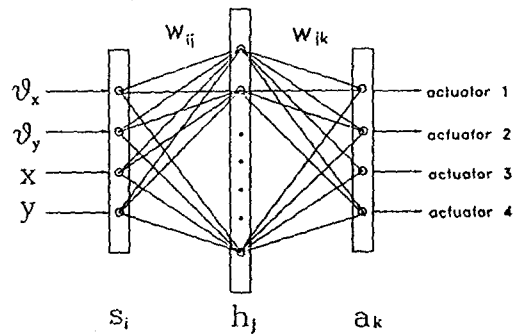


그림 4 신경 회로망

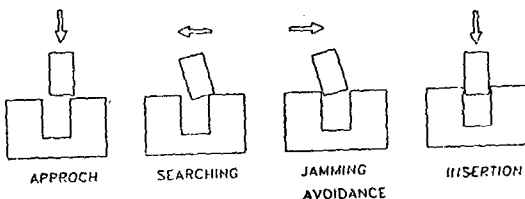


그림 3 조립 과정

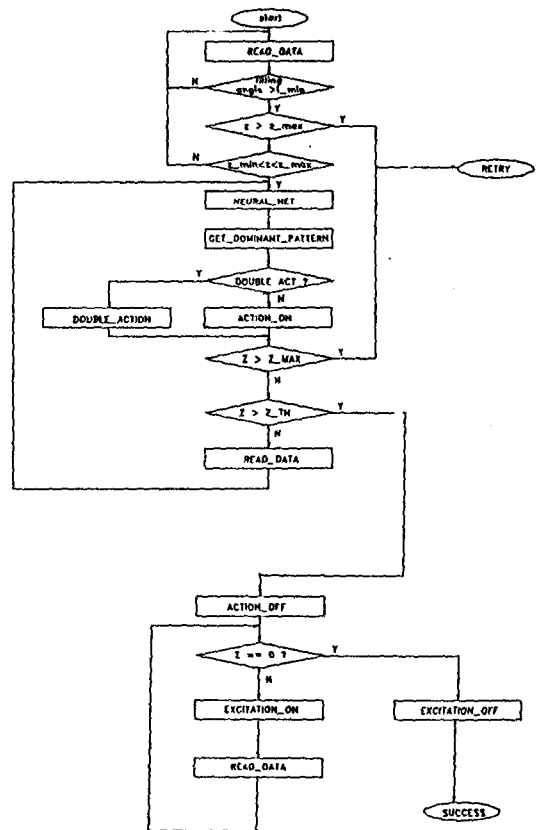
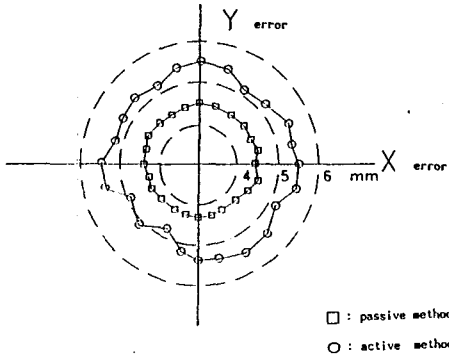
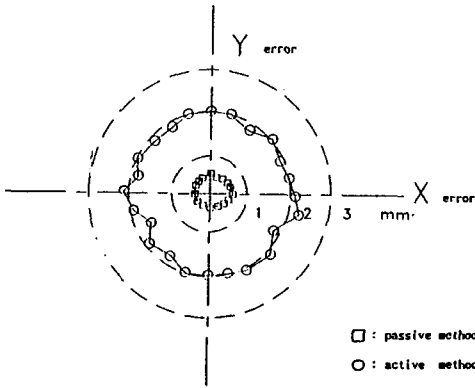


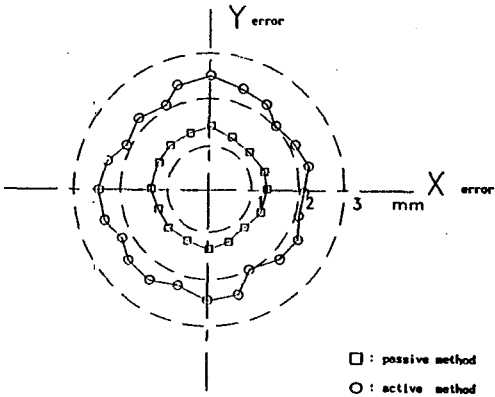
그림 5 조립 작업 순서도



(a) WITH CHAMFER C = 0.001
CHAMFER WIDTH 2mm



(b) WITHOUT CHAMFER C = 0.001



(c) WITHOUT CHAMFER C = 0.002

그림 6 오차교정 가능영역

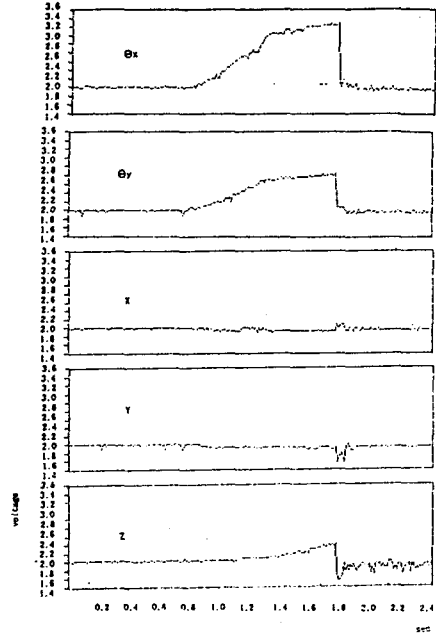


그림 7 SENSOR SIGNALS DURING INSERTION PROCESS

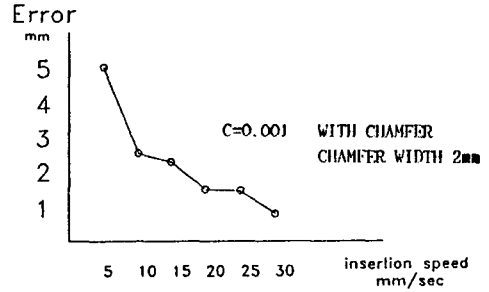


그림 8 INSERTION SPEED에 따른 교정가능 영역

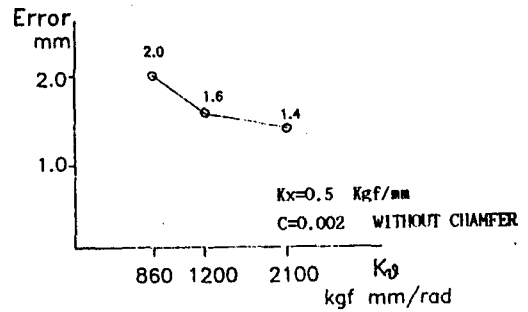


그림 9 TILTING COMPLIANCE 의 STIFFNESS
변화에 따른 교정가능영역

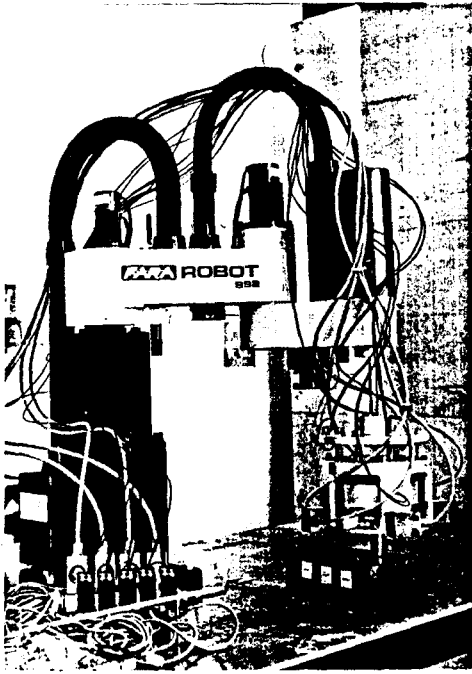


그림 10 전체 시스템

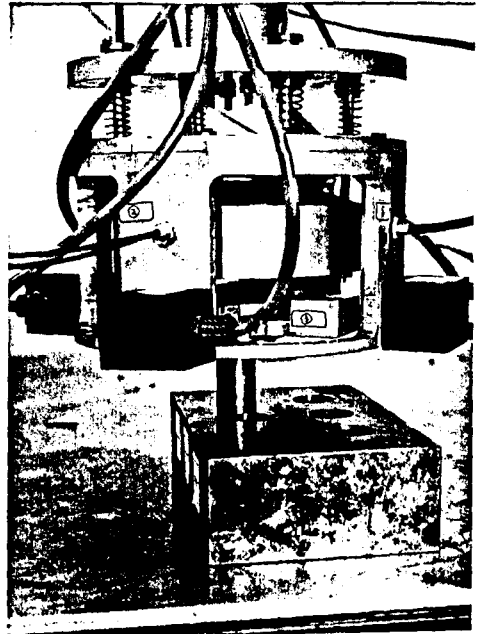


그림 11 손목기구부