

면취없는 부품의 조립을 위한 로봇 손목기구의 개발

권 대 갑*, 정 충 민**

Development of a Robot Wrist for the Assembly of Chamferless Parts

Dae-Gab Gweon*, Choong-Min Jung**

ABSTRACT

In this paper, a robot assembly wrist, which is able to assemble chamferless parts, has been developed. The RCC (Remote Center Compliance) structure is used as a basic structure. 5 position sensors and 4 pneumatic actuators are installed additionally to measure the deformation of RCC structure and correct the errors actively. Due to the restricted direction of actuation, a decision rule which selects the suitable actuator according to the position sensor signals is needed. For this purpose, a neural network is used and it is experimentally shown that the neural network overcomes system's nonlinearity. This paper presents fundamental experiment results for the insertion of parts with several clearance.

1. 서 론

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, 서보 제어장치의 오차, 점성마찰에 따른 오차, 로봇트 손에서의 상대오차, 조립될 부품의 상대오차 등 제반 이유 때문에 상당한 조립 위치오차가 발생한다.⁽¹⁾ 이러한 위치오차는 조립시 부품간의 반력을 발생시키며 경우에 따라 조립을 불가능하게 하고 로봇트에게도 치명적인 영향을 주게 된다. 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 컴플라이언스(compliance) 때문에 오차가 줄어드는 방향으로 작용하여 조립을 가능하게 하는 수동적 적응방법(passive accomodation)이 있다. 수동적 적응방법의 대표적인 예로서 미국 M I T 대학 C S D L(Charles Stark Draper Laboratory) 연구소에서 개발된 RCC (Remote Center Compliance)가 있다.⁽²⁾ 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.⁽²⁾ 다른 방법으로는 조립시 발생하는 오차나 그 반력을 측정하여 이를 귀환 제어 하는 방법인 능동적 적응(active accomdatin)방법이 있다. 능동적 적응방법을 이용한 예는 H. Van Brussel⁽⁵⁾ 등이 개발한 반력귀환 제어 방법과 일본 히다찌사에서 개발한 유연성과 감지성을 가진 HI-T HAND⁽⁶⁾⁽⁷⁾가 있다. 이러한

* 한국과학기술원 정밀공학과(정회원)

** 한국과학기술원 정밀공학과

방법들은 수동적 적응방법이 갖는 단점, 즉 과중한 조립반력을 줄일 수 있고 조립 허용오차의 범위를 확장시키는 등 장점을 가지고 있지만, 조립시간이 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. ¹⁾ 따라서 본 연구에서는 로봇 팔에 장착되어서 로봇 자체의 교정작업 없이, 단순히 손목기구의 작용에 의하여 면취없는 부품의 조립을 가능하게 하는 조립용 손목기구가 개발되었다.

2. 구조설계

본 연구에서 개발된 전체 시스템의 블록 선도가 Fig. 1에 도시되었다. 전체 시스템은 크게 조립을 직접 수행하는 손목기구부와 이에 대한 제어 알고리즘을 제공하는 제어기부로 구성되며 손목기구는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 기본적인 RCC 구조와 이의 변형량(tilting과 translation)을 측정하는 센서(optical fiber

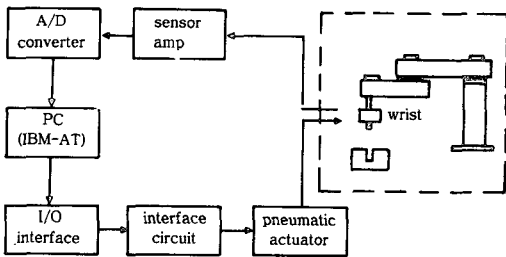


Fig. 1 System block diagram.

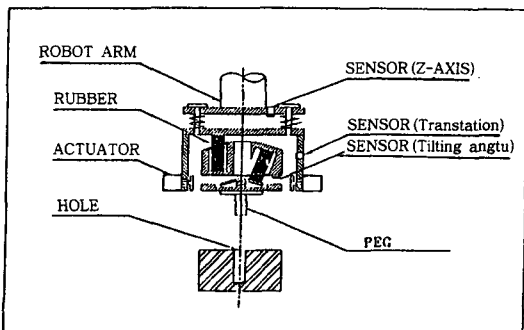


Fig. 2 Robot assembly wrist.

sensor) 그리고 오차를 교정할 수 있는 공압 액츄에이터로 구성된다. RCC 구조를 구현하기 위해 본 연구에서는 축 방향의 강성이 반경 방향의 강성보다 훨씬 커서 미소 운동의 경우 링크(link) 구조와 거의 같은 형태로 움직이는 고무로드가 사용됐다. 이러한 고무 로드는 윗 판과 평행이동부 사이에 3개가 120도 간격으로 평행하게 장착 되어져서 평행이동부가 윗 판에 대해 평행하게 움직일 수 있으며 평행이동부와 peg를 잡고 있는 아랫판 사이에도 고무 로드 3개가 비스듬히 장착되어 peg가 임의의 방향으로 잘 회전(tilting) 할 수 있도록 설계되었다. 또한 RCC 구조의 컴플라이언스 중심(compliance center)이 peg의 선단에 위치되어서 peg는 작은 조립반력에서도 쉽게 기울어진다. 또한 조립시 조립반력에 의한 RCC 구조에 발생하는 평행이동 변위와 tilting 변위가 측정 되어진다. 이를 위해 평행이동부의 이동량을 측정할 수 있도록 바깥 케이스에 센서 2개가 수평으로 장착되었으며 아랫판의 tilting량을 측정하기 위해 평행이동부에 센서 2개가 수직으로 장착되었다. 여기서 센서는 에널로그형(analog type)의 반사형 광섬유 센서가 사용되었으며 각 센서에서 측정된 거리 데이터는 A/D 변환기를 통해 제어기에 전송 된다. 또한 조립과정에서 가장 중요한 수직 방향의 반력을 계산하기 위해서 로봇 팔과 손목사이에도 센서가 부착되었다. 이를 통해 조립과정이 성공적으로 수행되고 있는지의 여부가 판단될 수 있다. 조립용 손목기구에 장착된 센서로부터 오차의 크기와 방향이 결정되더라도 조립용 로봇을 직접 구동하여 오차를 교정하는 방법은 로봇의 정밀도나 작업시간 등을 고려해 볼 때 효율적인 방법이 되지 못한다. 따라서 손목기구 자체에 구동부를 달아 로봇을 움직이지 않고도 오차를 스스로 교정할 수 있도록 할 필요가 있다. 이를 구현하기 위해 본 연구에서는 공압 실린더를 이용하였다. 공압 액츄에이터는 peg를 잡고 있는 아랫판을 움직일 수 있도록 바깥 케이스에 4 방향에서 장착되어진다. 이에 의해 아랫판을 원하는 방향으로 이동시킬 수 있게 된다. 실제로 공압 액츄에이터는 on/off 동작밖에 할 수 없으므로 오차 교정이 제한된 방향과 크기에 국한되지만 다음 장에서 설명할 위치교정 알고리즘에 의해 이 문제가 해결 되어질 수 있다.

3. 위치 교정 알고리즘

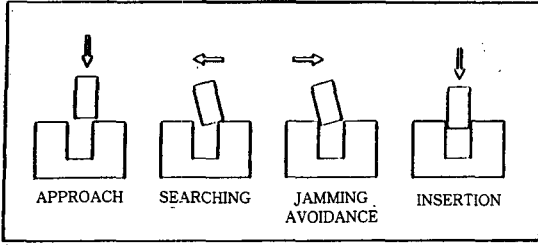


Fig. 3 Insertion operation.

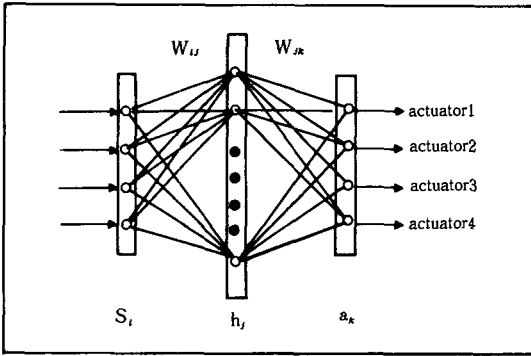


Fig. 4 Neural network.

조립시 발생하는 오차가 교정되기 위해서는 Fig. 3과 같이 peg를 hole 근처에 접근시키는 접근(approach) 단계와 peg 중심과 hole 중심을 일치시키기 위한 탐색(searching) 단계, jamming 회피단계와 이후의 삽입 단계를 거쳐야 한다. 또한 손목기구에서는 교정운동이 4 방향으로 작동하므로 현재의 오차 상태를 4 방향의 패턴(pattern)으로 분류시킬 필요가 있다. 그런데 고무로 만들어진 RCC 구조에서 힘과 위치의 관계가 비선형적이고 센서 신호가 거리에 대해 선형적이지 못하고 패턴의 분류가 쉽지 않다. 따라서 여기서는 센서양을 입력으로 하고 4 방향중 근접된 방향을 출력으로 내어주는 패턴 분류를 하기 위해서 신경회로망(neural network)이 이용되었다.¹⁰⁾ 신호처리 알고리즘에서 가장 핵심적인 부분은 4개의 센서 신호로부터 적절한 교정방향을 계산해 내는 신경회로망 부분으로서 지도 학습(supervised learning) 방식의 다층 퍼셉트론(multilayer perceptron)이 기억되어진다. 학습과정에서 중간층의 출력층의 각 노드 값들은 다음과 같이 계산된다.

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

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

여기서 i: 입력층 노드번호

j: 중간층 노드번호

k: 출력층 노드번호

여기서 S(x)는 시그모이드 함수(Sigmoid function)으로서 다음과 같이 정의된다.

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

입력층의 각 노드값(s_i)은 RCC의 x, y방향 tilting 변위량 θ_x , θ_y 와 x, y방향 수평 변위량 x, y이며 4개의 센서에서 감지된 값들이다. 다층퍼셉트론의 학습은 미리 알고있는 패턴을 입력으로 하였을 때 이에 대응하는 패턴이 출력층에서 출력 되도록 가중치(weight), W_{ij} , W_{jk} 를 교정해 나가는 과정이라고 할 수 있다. 이때 가중치는 출력 저장 패턴(output stored pattern)과 실제 패턴의 차이의 제곱으로 정의되는 오차 함수(error function)가 줄어드는 방향으로 점진적으로 교정되어 오차가 최소가 되는 점에서 교정작업은 정지하게 된다. 오차 함수 J는 다음과 같다.

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

여기서 d_k는 출력층 각 노드의 원하는 출력치이며 오차교정을 위해 작동되어야 할 액츄에이터 경우는 1 그렇지 않은 경우는 0이 된다. a_k는 실제 신경회로망을 통해 계산된 출력치이며 각 액츄에이터가 작동될 확률값으로 이해하면 된다. 각각의 가중치는 다음과 같이 교정된다.

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

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

여기서 t: 반복 횟수

η : 학습율(learning rate)

오차 함수 J가 최소값을 가지면 학습이 끝나게 되며 이때의 가중치가 저장된다. 실제 상황에서는 단지 입력 신호 θ_x , θ_y , x, y가 단순히 가중치에 곱해지는 연산만으로 현재의 입력이 각각의 저장 입력(stored input)에 얼마나 근접한가를 출력 노드로 출력하게 된다. 이 시스템에서는 입력으로 x, y, θ_x , θ_y , 4개가 이용되고

출력으로는 4개의 구동부가 작동되며 10개의 중간층 노드-드가 사용되었다. 신경회로망을 학습시키기 위해서는 먼저 전형적인 오차 상태들과 이를 해결하기 위한 적절한 오차 교정방향들이 조사되어야한다. 이렇게 조사된 각각의 오차상태와 오차 교정방향은 반복학습을 거쳐 하나의 저장 패턴으로 신경회로망에 저장된다. 학습된 신경회로망은 실제 조립작업시 peg 의 위치에 따른 센서 신호를 받아들여 이에 대한 가장 적절한 교정방향을 출력하게된다.

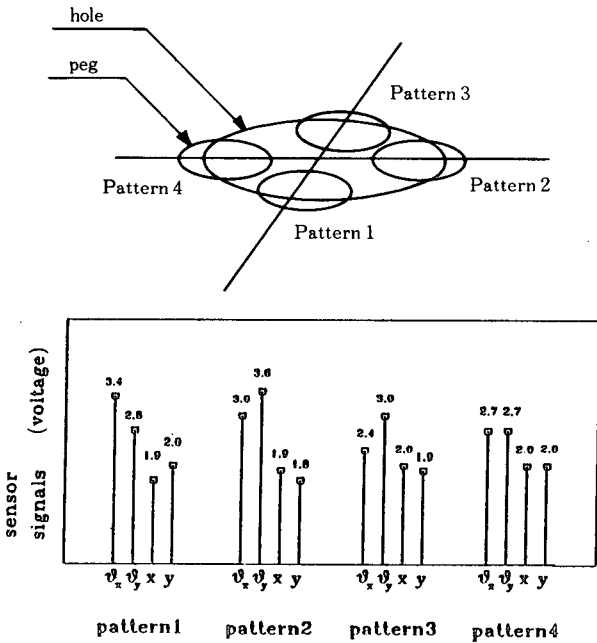


Fig. 5 Typical error patterns used in learning.

Fig. 5 에는 학습과정에서 사용된 전형적인 오차 패턴이 도시되었으며 Fig. 6에는 학습과정중 여러 함수의 수렴을 나타내었다. 조립작업의 순서도는 Fig. 7에 도시되었다. 그림에서 Z-TH는 jamming이 일어났을 때의 Z축 방향 센서량을 의미한다. 조립용 로봇가 교시된 위치에 도달하여 조립작업이 시작되면 peg과 hole의 상대오차에 의해 Z축 스프링이 압축되고 동시에 tilting이 일어나기 시작한다. 이때 z축 센서로부터 측정된 변형량이 일정한 값을 초과할 경우, 이것은 조립이 원만히 진행되고 있지 않다는 것을 의미하므로 이때부터 x, y, θ_x , θ_y 값이 각 센서로 부터 측정되고 이에 따라 교정작업이 진행된다. 또한 Z축 스프링의 변형량이 최대 임계치를 넘었을 경우 무리한 조립 반력을 유

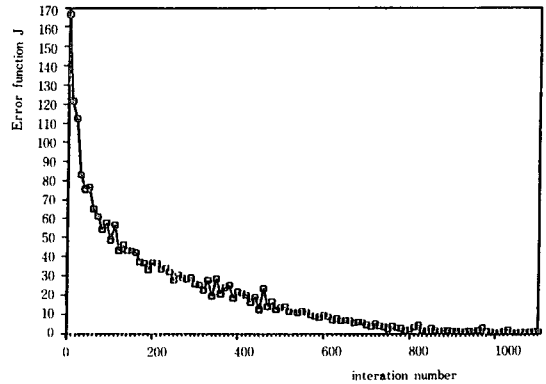


Fig. 6 Convergence of error function.

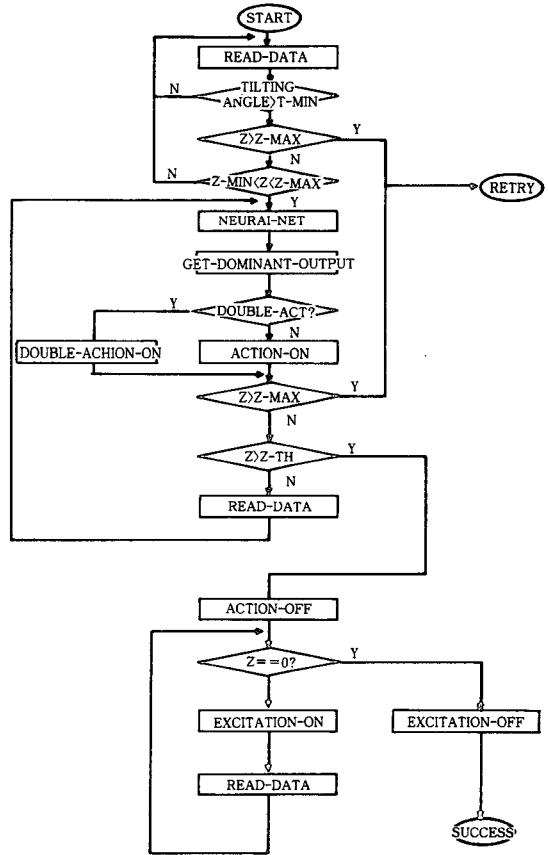


Fig. 7 Flow chart.

발할 수 있으므로 작업을 중단하고 처음 상태에서 다시 시작한다. 이러한 재시도를 3회까지 시행해 보아서 그때까지도 조립이 성공되지 못하는 경우는 조립이 불가능한 경우로 처리되고 다음 작업이 진행된다. 구체적인

오차교정작업은 다음과 같다. 조립오차에 의해 tilting과 병진 운동(translation)이 생기고 이 변형량은 신경회로망의 입력단으로 입력된다. 신경회로망을 거치면 출력단에서는 현재의 오차 상태가 이미 학습한 오차 패턴과 얼마나 유사한가가 출력되며 이 출력 패턴에 따라 작동해야될 공압 액츄에이터의 조합이 결정된다. 공압 액츄에이터에 의해 압축되었던 Z축 스프링의 변위가 급격히 변하게 되는데 이로부터 탐색 과정이 끝났음을 알 수 있다. 탐색 종료 직후 jamming이 발생하지 않았다면 Z축 스프링의 변형량이 남아 있게된다. 이 때 peg과 hole의 틈새율이 작은 경우에는 압력양이 매우작아 jamming 상태의 해결 방향을 찾아낼 수 없는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 경우 대부분 최종 교정방향의 반대방향으로 jamming이 생기게되며, 이러한 jamming은 조그마한 자극(excitaion)에 의해서도 풀리지 때문에 최종 교정의 반대방향으로 액츄에이터는 작동된다. jamming이 풀리면 peg는 z축 spring에 저장된 잔류 에너지와 자체 컴플라이언스에 저장된 에너지에 의해 hole속으로 삽입된다.

4. 실험

손목의 수동 교정(passive accomodation) 성능을 평가하기 위해서 액츄에이터를 작동시키지 않은 상황에서 자체 컴플라이언스만으로 어느 영역까지 교정가능한가를 평가하여 보았다. 또한 수동교정이 불가능할 경우에 교정운동을 취함으로써 교정하지 못했던 영역을 어느 정도까지 확장시킬 수 있는지 조사되었다. 본 실험에서는 면취가 있는 hole의 직경은 20mm였다. Fig. 8은 능동적 방법(active method)을 사용한 경우의 각 센서 신호의 변화를 도시한 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 z축 센서의 신호가 2.4볼트(5mm 압축)가 되었을 때 4개의 센서 신호 θ_x , θ_y , x, y는 신경회로망을 입력단으로 입력되며 그 출력이 액츄에이터를 작동시켜, 오차가 교정되므로 5개의 신호는 모두 원상태로 회복됨을 볼 수 있다. Fig. 9에는 유격(clearance)이 서로 다른 hole에 대하여 오차교정이 가능한 영역이 표시되었다. 이 경우는 각도 오차(tilting error)가 없는 경우에 대하여 교정 가능한 영역을 나타내었다. 여기서 내부의 영역은 교정작용이 없이 자체의 컴플라이언스만으로 교정이 가능한 영역이며, 외부 영역은 능동적 방법을 사용하여 교정이 성공한 영역이다. Fig. 10은 각도

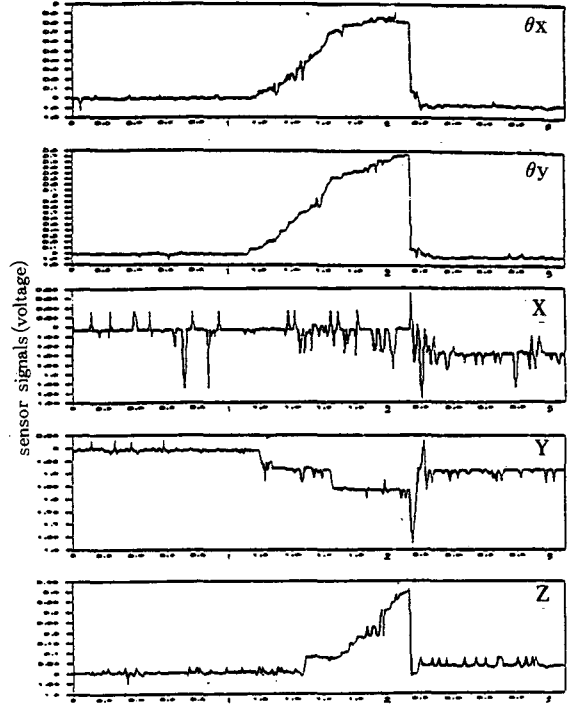
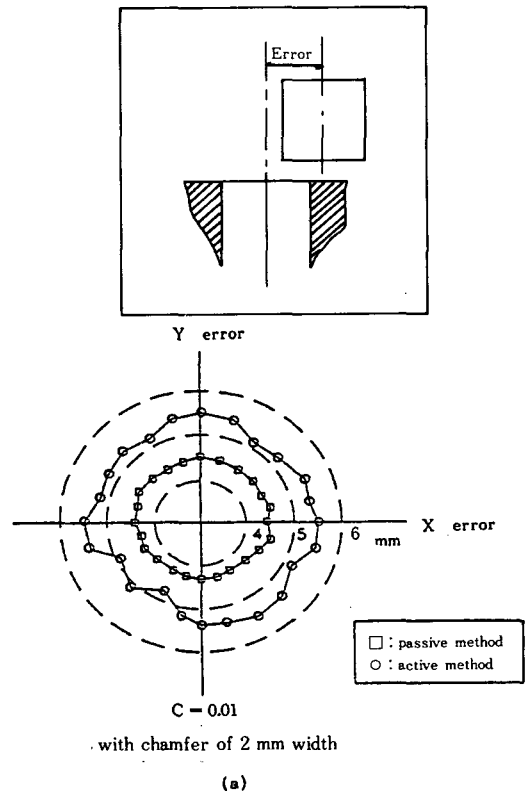


Fig. 8 Sensor signals during insertion process.



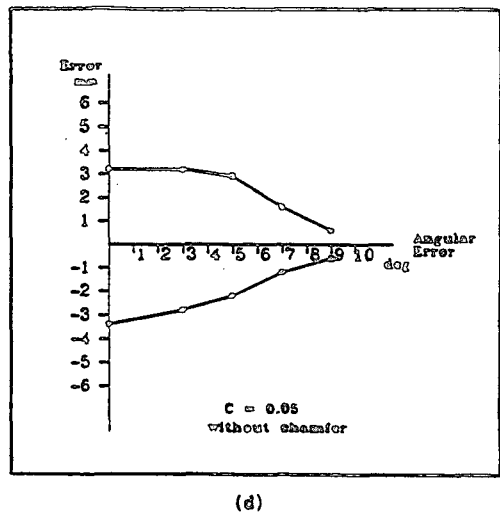
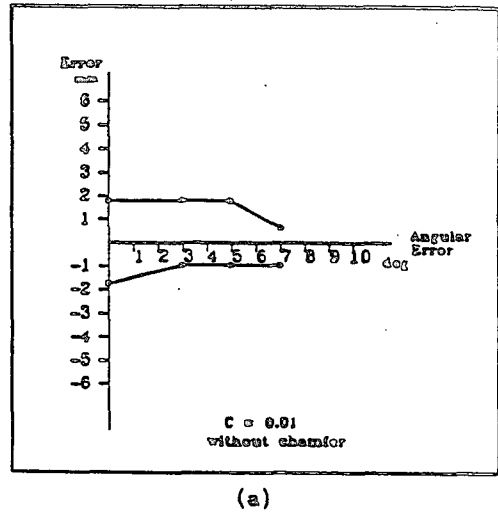
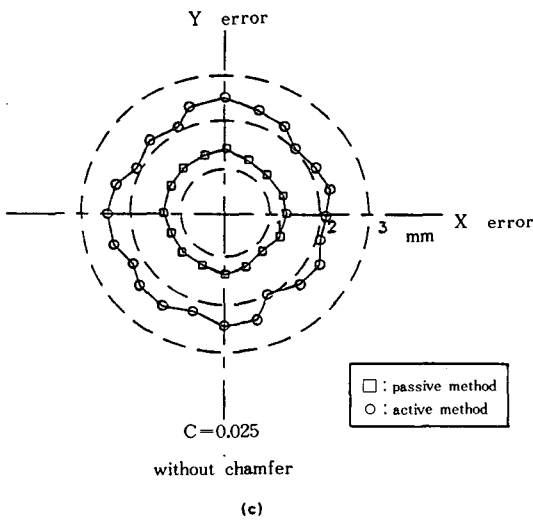
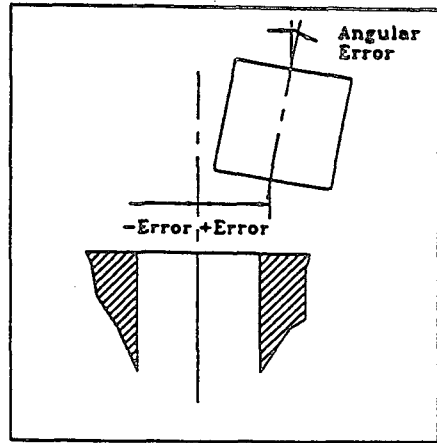
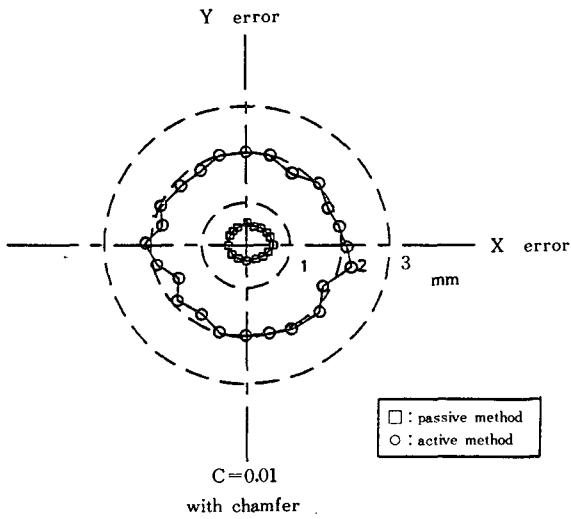
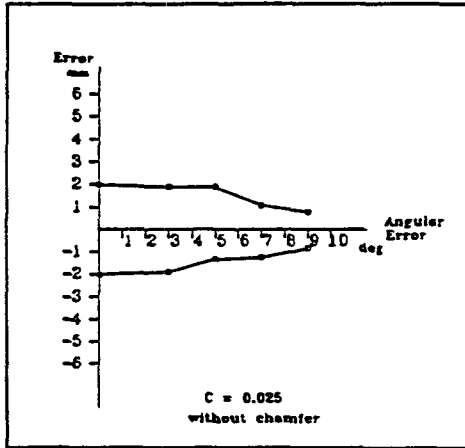
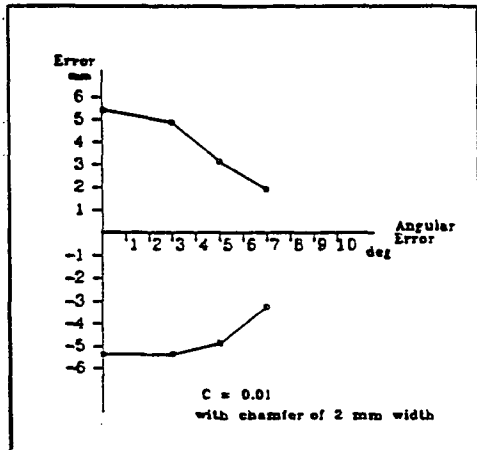


Fig. 9 Effect of clearance and chamfer (continued).

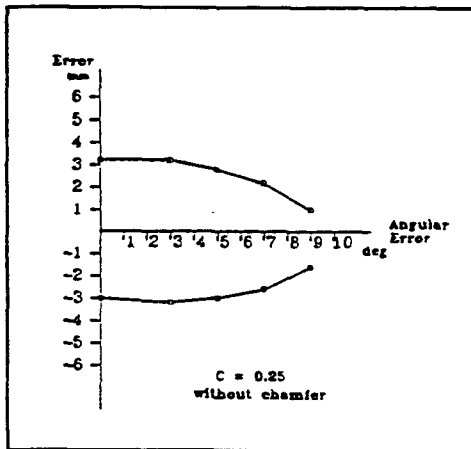
오차에 대한 교정가능 영역을 나타낸다. 실험에서는 허용 조립 반력을 1kgf로 제한하여 무리한 조립 반력이 걸리지 않게 하였다. 이 실험은 모든 방향에 대하여 오차를 0.1mm씩 증가 시키며 행해졌고 이때 삽입 속도는 5mm/sec였다. 위 실험 결과에서 나타나듯이 면취가 있고 titing 오차가 없는 경우는 수동적 방법만으로도 4.2mm의 오차가 수정가능 했으며 5mm까지의 오차가 능동적 방법으로 수정가능 하였다. 면취 없는 hole의 경우는 0.4mm까지 수동적 방법으로 수정가능 하였으며 2mm까지 능동적 방법으로 수정가능함을 볼 수 있었다.



(c)



(d)



(e)

Fig. 10 Effect of clearance and chamfr(continued).

두 방향의 동시 교정이 필요한지의 여부를 결정짓는 임계조건은 신경회로망의 출력 중 두번째 큰값이 0.6 이상 일때였다. Fig. 11에는 $C=0.025$ 인 삽입 속도 변화에 따른 교정가능 영역이 도시되었다. 삽입 속도가 30mm/sec 이상인 경우에는 교정작용이 채 이루어지기 전에 z축 스프링의 변위가 최대 임계치를 넘어서 무리한 조립 반력이 발생되었다. Fig. 12는 손목기구의 컴플라이언스 강도(compliance stiffness)를 변화시켜 가면서

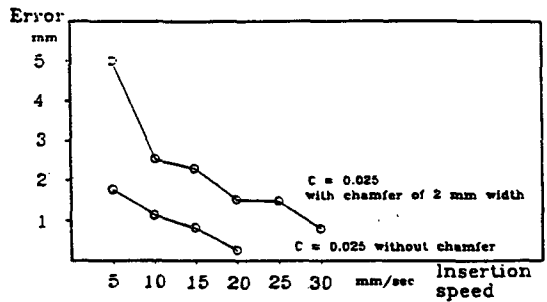


Fig. 11 Effect of insertion speed.

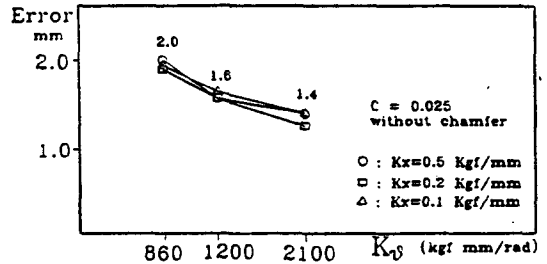


Fig. 12 Effect of compliance stiffness.



- (1) Robot assembly wrist
- (2) Solenoid valves
- (3) Sensor amp, and interface circuit
- (4) Robot assembly wrist controller (PC)

Fig. 13 Photograph of experimental apparatus.

참고문헌

실험한 결과이다. tilting 컴플라이언스 강도가 작을수록 교정가능 오차가 커짐을 알수 있다. 그러나 너무 작으면 손목기구가 불안정해진다는 점에 유의해야 한다. 한편 수평 컴플라이언스 강도 값에는 큰 영향을 받지 않음을 알수 있다. Fig. 13은 실험장치 전경이며 Fig. 14은 조립용 손목기구와 시편의 상세사진이다. 본 실험에는 삼성전자의 FARA 로봇트가 사용되었다.

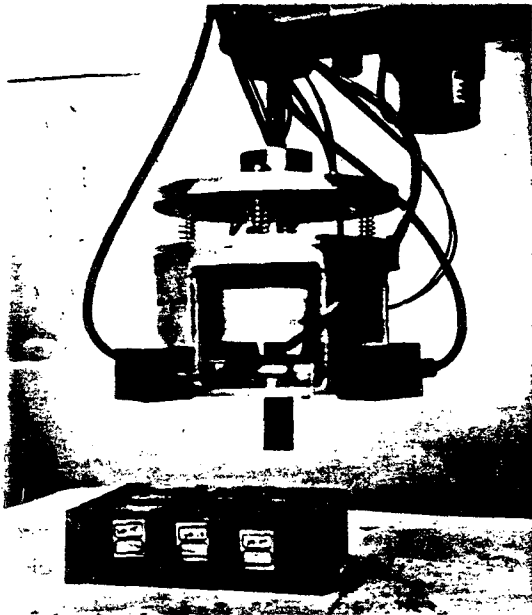


Fig. 14 Photograph of robot assembly wrist and workpiece.

5. 결 론

본 논문에서는 RCC 구조를 사용하여 조립할 때 생기는 변형량을 측정함으로써 위치를 교정하는 손목기구가 개발되었다. 조립 변형량으로부터 오차 교정 방향을 결정하는 방법으로는 신경회로망이 이용되었으며 이로써 여러가지 이유로 인해 센서 신호가 위치오차에 비례하지 않는 시스템의 비선형성이 극복되었다. 또한 신경회로망에 의한 신호처리 알고리즘은 보간 기능을 갖고 있으므로 학습시키지 않은 상황에 대한 대처능력이 뛰어나므로 작업상황을 많은 경우로 나눌 수 밖에 없는 기존의 복잡한 신호처리 알고리즘 보다 간단하며 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 조립기구를 이용하면 비교적 큰 위치오차에서도 면취 없는 부품의 정밀 조립이 가능성이 입증되었다.

1. K. E. Miles, "Factors affecting the Manipulation of piecparts for Automatde Assembly", *Industrial Robot*, 1978, pp.14.
2. Whitney, D. E., "Quasy-static Assembly of compliantly supported Rigid parts", *ASME trans.* Vol. 104, pp.65-77, March, 1982.
3. Watson, D. C., "Remoto Center Compliance Syteme" U. S Patent No. 4, 098, 001, filed 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 1971, pp. 81.
5. H. Van Brussel, J. Simons "Automatic Assembly by Active Force Feedback Accommedation" *Proc. The 8th Int. sym. on Industrial Robot* pp.181-193 Stuttgart, West Germany.
6. K. Takeyasu, T. Goto, T. Inoyama, "Precision Insertion Control Robot and its Application" *ASME 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) -/Reallizations and Application" *Proc. 10th ISIR, Milia, Italy*, 1980, pp. 559-569.
9. H. Van Brussel, H. Thielemans, J. Simons "Further Developments of the Active Adaptive Compliance rist (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", Addison-Wesley Pubulising Company, Inc., 1989.