488 大韓機械學會論文集 第8卷 第5號, pp.488~497, 1984.

<論 文>

유연하고 감지성 있는 조립전용 로봇 손목의 개발에 대한 연구

조 형 석*·고 경 철**

(1984년 7월 4일 접수)

The Development of a Flexible and Sensible Robot Wrist for Assembly Processes

H. S. Cho and K. C. Gho

Abstract

In the assembling process by industrial robots, many difficulties stem from the fact that the assembly operation is impossible or the parts to be assembled can be damaged by reaction forces due to even little misalignment in part mating. In this paper a flexible and sensible robot wrist is developed to make possible the precision insertion operation. The flexibility of the developed wrist were evaluated both analytically and experimentally in actual insertion process. The results show that without the use of feedback control the wrist is capable of doing insertion operations with a small clearance at a low inserting force. For smaller clearance the assembly process was devised involving insertion force feedback and a control algorithm for this active accomodation was developed. The simulation results show that if the active feedback control is used the insertion action can be performed with much less force, as compared with a passive accommodation method.

1. 서 론

BRA (British Robotic Association) 조사[1](1981년 기준)에 따르면 로봇의 산업적 응용분야중에서 조립작업이 차지하는 비율은 0.5%에 불과한 것을 알 수 있다. 이처럼 로봇의 응용이 적은 이유는 용접, 도장, 탈착작업등에 비해 고도의 정밀성과 지능도를 요하기 때문이다[2]. 조립작업은 조립될 부품간에 약간의 오차만 있어도 매우 큰 반력들이 발생하여 조립이 불가능하게 되거나 부품이나 로봇에 치명적인 영향을 주게되는 어려움을 안고 있다. 지금까지 언급한 바와 같이 조립에 필요한 로봇의 기능은 다음 3가지로 볼 수 있다.

(1) 위치 정확도(positioning accuracy)
(2) 유연성(flexibility)
(3) 감지성(sensitivity)

현재 조립기술에 관한 동향을 살펴보면 다음과 같다 미국 MIT 대학의 CSDL 연구소에서는 로봇과 그리퍼(Gripper) 사이에 설치되는, 스프링구조물로 된 RCC (Remote Center Compliance)라는 유연한 손목을 개발하였는데[3,4], 이 원리는 조립시 조립을 방해하는 반

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과
** 한국과학기술원

력이 발생하여도, 오히려 이러한 반력이 RCC 손목에 변형을 두어, 로봇 핸드가 초기오차가 줄어드는 방향으로 움직이도록 되어있다.

그러나 이러한 유연성(flexibility)만으로는 아직도 조립시 무리한 힘을 받고, 조립이 허용되는 오차의 범위도 제한되는 단점을 안고 있다. 그리하여 Brusel[5,6]은 기존 로봇 핸드에 직접 힘 감지기를 설치하여 귀환제어 방식으로 오차를 수정하도록 하였다. 이에 대한 연구는 계속 발전되어, De Fazio[7]는 RCC 손목에 LED와 포토다이오드를 설치하여 RCC의 변형도를 측정하도록 하였는데 측정할 수 있는 변위의 한계가 작기 때문에 감지능력이 떨어진다는 단점을 안고 있다. 또한 일본 히다찌사에서는 Hi-Thand라 불리우는 T자형 스프링 구조의 손목에, 스트레인 게이지를 설치하여 감지성을 부여 하였는데 이는 유연성에 있어서는 RCC에 미치지 못하나 어느 정도의 유연성, 감지성을 동시에 지니고 있다는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 논문의 목적은 RCC와 같은 유연성을 그대로 유지하면서 동시에 고도의 감지성을 가질 수 있는 유연하고 감지성 있는 로봇 손목을 개발하는데 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 조립용 손목을 개발하였는데, 유연성의 구조는 RCC의 원리를 이용하고, 감지성은 Hi-Thand에서 채택한 스트레인 게이지 방식을 적용하였다. 이 조립용 손목의 성능실험은 조립될 부품간의 틈새율, 부품의 길이 그리고 오차의 크기에 따라 수행하였으며, 조립시 스트레인 게이지로부터 측정되는 반력들은 D.E. Whitney의 조립이론식[11]을 적용하여 구한 이론치와 비교하여 보았다. 반력을 측정하는 궁극적인 목적은 이 측정치를 이용하여 귀환제어함으로써 초기오차를 수정하는 것이기 때문에 귀환제어를 어떻게 하느냐에 따라 조립시 생기는 반력이나 조립시간이 달라진다. 따라서 귀환제어를 위한 제어 알고리즘을 개발하였고 조립시 발생하는 반력을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구해서 귀환제어 시키지 않을시 즉 수정적 방법에 의해서 조립할때에 발생하는 힘과를 비교 분석하였다.

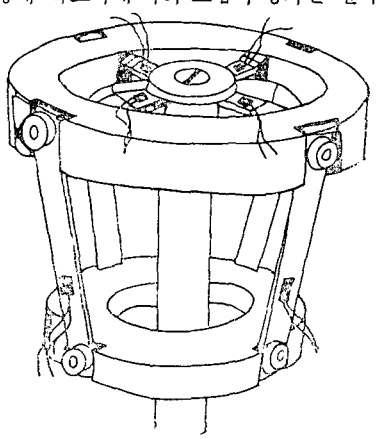


Fig. 1 Stucture of the flexible wrist

2. 조립 과정의 이론적 해석[11]

2.1. 조립과정의 모델

조립과정은 실린더 모양의 펙(peg)을 원형의 구멍에 삽입하는 과정으로 모델화한다. 펙은 로봇 그리퍼(Gripper)에 집어지고, 이 그리퍼는 조립용 손목을 거쳐 로봇에 지지된다. 이를 Fig. 2a와 같이 2차원 평면으로 표현한다. 조립용 손목은 회전중심 C_c를 가지며 이 점에서 수평방향 스프링상수 K_x와 회전방향 스프링 상수 K_θ를 갖는다. 조립초기에 발생된 부품간의 상대오차는 위치오차 ε_0와 각도오차 θ_0로 표현하며 삽입을 원활히 하기 위해 구멍의 원주위에 경사면(chamfer)을 내고 그 경사각은 α라 한다. 조립과정은 다음 4단계로 나누어 해석할 수 있다.

(1) 초기접근단계(approach state)
(2) 챔퍼를 지나는 단계(chamfer crossing state)
(3) 한점 접촉 단계(one point contact state)
(4) 두점 접촉 단계(two point contact state)

2.2. 경사면 접촉단계(Chamfer Crossing State)

Fig. 2에서 점선으로 표시한 첨자가 붙지 않은 화살표는 움직이는 방향을 뜻한다.

Fig. 2b에서 보듯, 펙은 깊이 Z_0에서 경사면에 접촉하기 시작하여 Z까지 미끄러질 때, 경사면에서 수직반력 f_N과 마찰력 μf_N을 받으며 이 힘들과 평형을 이를 때까지 조립용 손목은 변형하게 된다. 손목의 회전중심 C_c의 초기위치상태(U_0, θ_0)와 z만큼 미끄러진 후의 상태(U, θ)와의 관계식은 다음과 같다.

$$U_0-U=\frac{Z}{\tan\alpha}+L_g(\theta_0-\theta) \tag{1}$$

여기서 L_g는 펙의 끝에서 회전중심(C_c)까지의 거리이다. 만약 γ을 펙의 반지름, μ를 마찰계수라고 하면 힘의 평형을 고려하여 평형조건식들을 구하면

$$Bf_N=K_x(U_0-U) \tag{2}$$

$$(L_gB-\gamma A)f_N=K_\theta(\theta-\theta_0) \tag{3}$$

$$F_z=Af_N \tag{4}$$

윗 식에서 A와 B는 다음과 같은 삼각함수로 주어진 함수들이다.

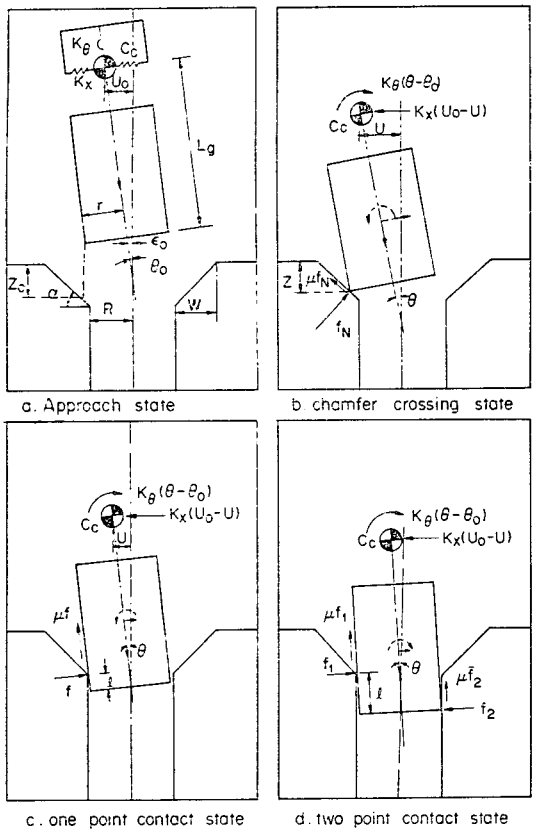


Fig. 2 Four states of assembling processes

$A \triangleq \cos\alpha + \mu\sin\alpha$

$B \triangleq \sin\alpha - \mu\cos\alpha$

회전중심 (C_c)의 기초위치(U_0, θ_0)와 Z 깊이만큼 미끄러진 상태의 위치(U, θ)와의 기하학적 조건식과 식 (2), (3)에서 f_N을 소거하여 얻은 식과 식 (1)에서부터 U와 θ에 대해 풀면 다음과 같다.

$$U = U_0 - \frac{K_\theta(Z/\tan\alpha)B}{(K_x L_g^2 + K_\theta)B - K_x L_g r A} \tag{5}$$

$$\theta = \theta_0 + \frac{K_x(z/\tan\alpha)(L_g B - rA)}{(K_x L_g^2 + K_\theta)B - K_x L_g r A} \tag{6}$$

그리고 회전중심에서 받는 반력과 모우멘트는 수평반력을 F_c, 수직반력을 F_z, 그리고 모우멘트를 M_c라 할 때 다음과 같이 주어진다.

$$F_c = K_x(U_0 - U)$$
$$M_c = K_\theta(\theta - \theta_0)$$
$$F_z = A\bar{B}K_x(U_0 - U) \tag{7}$$

2.3. 한점 접촉 단계(One Point Contact State)

Fig. 2c와 같이 핵은 경사면 끝을 지나 경사면의 한 점에 접촉하면서 진입된 상태이다. 이때 경사면 끝에서 수직반력 f와 마찰력 μf를 받으며 역시 손목에서의 스프링반력 F_c와 모우멘트 M_c와 평형을 이루게 된다. 만약 핵이 턱을 지나 l만큼 진입된 상태에서의 회전중심(C_c)의 위치를 U와 θ로 표시하여 기하학적 조건식을 사용하면

$$U_0 - U = \varepsilon_0^1 + L_g(\theta_0 - \theta) + l\theta \tag{8}$$

로 표시되는데 여기서 ε_0^1는 다음과 같이 표시된다.

$$\varepsilon_0^1 = \varepsilon_0 - C_r R$$

식 (8)에서 ε_0는 핵과 구멍과의 초기 위치오차이며 R은 구멍(hole)의 반지름이며 C_r은 틈새율로 정의되는데 다음과 같이 주어진다.

$$C_r = \frac{R - r}{R}$$

그리고 힘의 평형 조건식은 다음과 같이 주어진다.

$$f = K_x(U_0 - U) \tag{9}$$

$$f(Lg - l - \mu r) = K_\theta(\theta - \theta_0) \tag{10}$$

$$F_z = f(\mu\cos\theta + \sin\theta) \tag{11}$$

윗 식들을 이용하면 θ와 U는 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta = \frac{C(\varepsilon_0^1 + Lg\theta_0) + K_\theta\theta_0}{C(Lg - l) + K_\theta} \tag{12}$$

$$U = U_0 - \frac{K_\theta(\varepsilon_0^1 + l\theta_0)}{C(Lg - l) + K_\theta} \tag{13}$$

식 (13)에서 l은 그림에서 표시된 바와 같이 경사 턱에서 핵의 끝간의 거리이며 변수 C는 아래와 같이 주어진다.

$$C = K_x(Lg - l - \mu r)$$

그리고 조립용 손목이 한점 접촉단계로 진입할때 회전중심 점에서 받는 힘과 모우멘트는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$F_c = K_x(U_0 - U)$$
$$M_c = K_\theta(\theta - \theta_0)$$
$$F_z = K_x(U_0 - U)\ (\mu\cos\theta + \sin\theta) \tag{14}$$

2.4. 두점 접촉 단계(Two Point Contact State)

Fig. 2d와 같이 핵이 경사면 턱에 접촉한 상태에서 핵의 끝이 구멍의 내면에 접촉한 상태이다. 이 두 접촉점에서 반력(f_1, f_2)과 마찰력(μf_1, μf_2)을 받으며 손목의 스프링 반력과 평형을 이룬다. 이 상태에서의 기하학적 조건을 생각해볼때 θ가 작은 값에 대해서는

$$\theta l = 2C_r R$$

이 되므로 이를 한점 접촉 단계의 기하학적인 조건식 (8)에 대입하면

$$U = U_0 - \varepsilon_0^1 - L_g(\theta_0 - 2C_r R/l) - 2C_r R \tag{15}$$

또한 힘과 모우멘트의 평형식은 아래와 같이 주어진다.

$$f_2-f_1=K_x(U_0-U)$$
$$(\mu\gamma-L_g)f_2+(L_g-l-\mu\omega)f_1=K_\theta(\theta-\theta_0) \quad (16)$$
$$F_z=\mu(f_1+f_2)$$

그리고 손목의 회전중심 (C_C)에서 받는 반력은

$$F_C=K_x(U_0-U)$$
$$M_C=K_\theta(\theta-\theta_0) \quad (17)$$
$$F_z=\frac{\mu}{l}[(2L_g-2\mu\gamma-l)K_x(U_0-U)-2K_\theta(\theta-\theta_0)]$$

이상과 같이 구멍의 내면을 지날때 손목의 회전중심 (C_C)에서의 수평변위와 회전변위 그리고 각 방향의 힘을 구할 수 있으며 $f_2\leq 0$ 될때에는 다시 한점 접촉상태로 돌아가게 된다. 식 (17)에서 보면 핏의 끝에서 손목의 회전중심까지의 거리 L_g가 작을 수록 수직반력 F_z는 작아짐을 알 수 있다. 조립과정중에서 이 두점 접촉단계에서 F_z는 최대가되며 조립을 불가능하게 하거나 부품이나 로봇에 손상을 주게 된다.

3. 조립용 손목의 구조와 원리

3.1. RCC 손목의 설계

앞에서 분석 하였듯이 조립용 손목의 유연성 구조는 그 회전중심이 자체구조물에서 멀리 떨어진 지점에 존재해야 되는데, 이를 원격중심(remote center)이라한다.

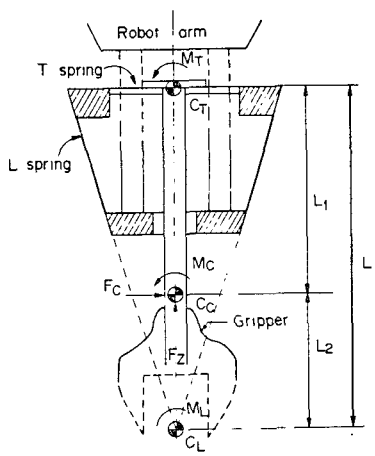


Fig. 3 Modeling of the flexible wrist

이러한 로봇 hand는 유연성을 갖게 되어서 초기오차의 수정 없이도 반력을 최소화하며 조립을 수행할 수 있다. 본 논문에서 사용된 RCC 구조물은 유연성과 감지기능을 동시에 지니고 있어야 하기 때문에 Fig. 3에 보인바와 같이 구조물 형상을 만들었다. 즉 4개의 판 스프링(plate spring)을 직각방향으로 C_T점에 모이게 하여(이후 "T스프링"이라 칭함) 그리퍼에 연결하고, 4개의 판 스프링이 C_L점을 향해 사선방향으로 모이게하여(이후 "L스프링"이라 칭함) 로봇 몸체에 연결되도록 하였다. 구체적인 구조와 각 부위의 치수는 참고문헌 (12)에 수록되어 있다. Fig. 3에서 C_T점과 C_L점은 각각 T스프링 과 L스프링의 회전중심이 되며, 이 두 가지 스프링 구조가 함께 작용할때의 전체 회전중심 (C_C)은 C_T점과 C_L점 사이에 존재하게되는 것이다. 이 C_C점이 바로 전체구조물의 원격중심이며 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$L_1=\frac{K_{\theta T}}{K_{\theta L}+K_{\theta T}}L \quad (18)$$

식 (18)에서 L_1은 C_T점에서 C_C점까지의 거리이며 L은 C_T점에서 C_L점까지의 거리이고 $K_{\theta T}$는 T스프링의 각 스프링 상수이며 $K_{\theta L}$은 L스프링의 각 스프링 상수이다. 그리고 원격중심 C_C에서 갖는 조립용 손목의 등가스프링 상수들(K_x, K_θ)은 다음과 같이 구해진다.

$$K_x=K_{\theta T}/L_1L$$
$$K_\theta=L_1K_{\theta L}/L \quad (19)$$

식 (18)과 (19)에 주어진 L_1, K_x와 K_θ등이 RCC 조립용 손목의 설계인자가 되며, 이 값들의 최적치를 구하는 것은 불가능하다. 그러므로 L_1은 로봇의 그리퍼길이와 조립할 부품의 길이를 고려하여 정하며, K_x와 K_θ는 그리퍼와 부품의 무게와 관성 모우멘트를 고려하여 정한다. 일단 이 값들이 정해지면, 식 (18)과 (19)로부터 $K_{\theta T}$, $K_{\theta L}$와 L등을 구하게되어, 결국 RCC의 재질과 크기가 정해지게 된다. 또한 $K_{\theta T}$와 $K_{\theta L}$값으로부터 L스프링의 설계를 다음식을 이용하여 구할 수 있다[12].

$$K_{\theta L}=\frac{8E_LI_L}{L_L^3}(L_L^2+3R_LL_L+3R_L^2) \quad (20)$$

E_L : L스프링의 영의 계수
I_L : L스프링의 2차 단면 계수
L_L : L스프링의 유효길이
R_L : L스프링의 회전 반경

마찬가지로 T스프링의 경우는

$$K_{\theta T}=\frac{8E_TI_T}{L_T^3}(L_T^2+3R_TL_T+3R_T^2) \quad (21)$$

를 사용하여 설계하면 된다.

3.2. Force 측정장치

조립할 부품간의 틈새율이 적은 초정밀조립이나 로봇의 부품간의 초기 오차가 큰 경우에는 귀환제어에의한 오차수정이 불가피하며 따라서 감지기능이 필요하

다. 힘과 모우멘트 감지기능을 갖게하기 위해 직각방향으로 설치된 4개의 판 스프링위에 스트레인 게이지를 부착하여 C_T점에서 받는 모우멘트(M_T)를 X-Y방향으로 측정할 수 있도록 하였다. 각 판스프링의 끝단을 베어링으로 지지하여 판스프링의 비틀림을 방지하고 게이지 출력을 X,Y 방향으로 분리시켰다. L스프링 구조도 스트레인 게이지를 부착할 수 있도록 직각방향으로 4개의 판스프링으로 만들었다. 역시 각 판스프링에 부착된 게이지는 C_L점에서 받는 모우멘트(M_L)를 X-Y 방향으로 측정하게 되며 판스프링 양단을 청동부시로지지로 하여 버클링을 피하고 게이지 출력을 X,Y 방향으로 분리시켰다. 또한 T스프링 구조에 한쌍의 스트레인 게이지를 추가로 부착하여 조립방향의 반력(F_Z)을 측정하도록 하였다. 이렇게 설계되어 만든 조립용 손목의 실제 형상은 Fig. 4와 같으며 이구조물의 재질은 두랄루민을 사용하여 가볍고 탄성도가 높도록 하였고 판스프링의 재질은 SK-5를 사용하였다.

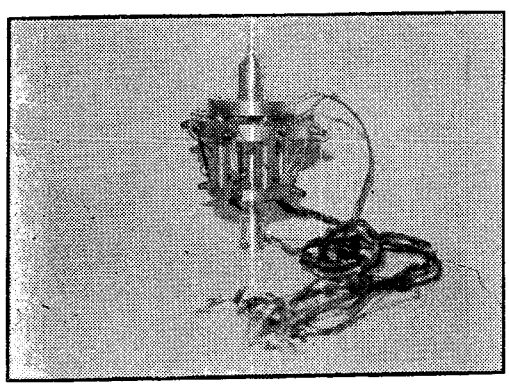


Fig. 4 Pictorial view of the flexible and sensible wrist

3.3. 출력 시그날의 분석

T스프링과 L스프링에 부착된 스트레인 게이지는 Fig. 5와 같이 반브리지회로로 구성되어 있다. 이때 회전중심 (C_C)에서 받는 모우멘트 M_C와 힘 F_C, F_Z와 스트레인 게이지 출력 전압 (V_T, V_L, V_Z)과의 관계식을 표시하면 다음과 같다.

$$V_T=K_T(F_CL_1+M_C)=K_TM_T$$
$$V_L=K_L(F_CL_2+M_C)=K_LM_L$$
$$V_Z=K_ZF_Z \qquad (22)$$

식 (22)에서 K_T는 T스프링에서 받는 모우멘트에 대한 출력의 비율이고 K_L은 L 스프링에서 받는 모우멘트에 대한 출력의 비율이며 K_Z는 Z 방향 힘에 대한

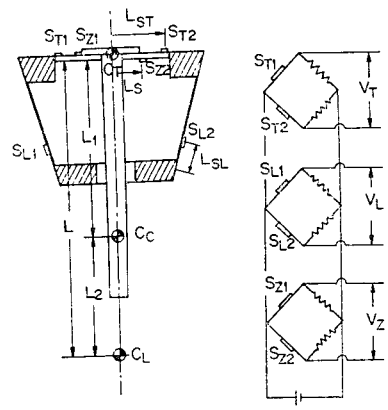


Fig. 5 Bridge circuit of strain gauges

출력의 비율이다.

식 (22)에서

$$\begin{bmatrix} F_C \\ M_C \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1/K_TL & 1/K_LL \\ L_2/K_TL & -L_1/K_LL \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_T \\ V_L \end{bmatrix} \qquad (23)$$

결국 V_T, V_L, V_Z를 측정함으로써 원격중심에서의 수평힘 (F_C), 모우멘트 (M_C),와 수직힘 (F_Z)를 구할수 있다. 이렇게 구한 F_C와 M_C와 관계식 (7)을 사용하면

$$\begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta\theta \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \frac{1}{K_x} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_\theta} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_C \\ M_C \end{bmatrix} \qquad (24)$$

여기서 ΔU와 $\Delta\theta$는 각 초치기 U_0와 θ_0에서 변형된 양을 나타낸다. 즉 $\Delta U=U_0-U$이고 $\Delta\theta=\theta_0-\theta$이므로 RCC 손목의 변형도를 구할수 있다. 식 (23)과 (24)의 계산은 디지틀 컴퓨터나 애널로그 회로를 이용하여 온라인으로 수행할 수 있다.

4. 조립실험

4.1. 측정실험(Calibration)

제작된 조립용 손목의 실제적인 스프링상수들 K_x, K_θ 및 원격중심의 위치 L_1을 실험적으로 구하였다. 실험방법은 조립용 손목에 질량과 도르레를 사용하여 모우멘트 M을 증가시키면서 가했으며 게이지로부터 T스프링과 L 스프링의 스트레인을 측정하였다. 이실험치를 이용하여 출력전압과 모우멘트 및 힘의 비율을 최소자승법(least square method)으로 구하여 관계식 (22)에 나와있는 비례상수를 구하였다. 그 결과 K_T=0.4 (N.mm/mV), K_L=0.1 (N.mm/mV), K_Z=6.3×10^{-3} (N/mV)로 측정되었다. 또한 모우멘트와 스트레인의 비를 알면 관계식 (20)과 (21)로부터 K_L과 K_T

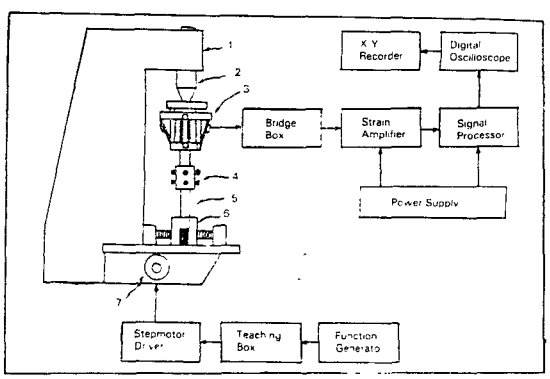
를 유추해 낼수 있으며 이로부터 관계식 (18)과 (19)를 이용하면 C_T점에서 C_C점 까지의 거리 L_1과 C_C점에서의 수평방향 스프링 상수 K_x와 회전방향 스프링 상수 K_θ를 실험적으로 구할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

L_1=91.8mm, K_x=1.25N/mm, K_θ=12920N.mm.

4.2. 조립실험

Fig. 6은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 조립실험은 로봇 대신 정확한 상대오차를 설정하는데 편리한 N/C 밀링기계를 사용하였다. 조립 대상은 내경 16.04mm의 원형구멍을 사용하였다. 펙은 시린더 모양으로하여 외경을 15.85mm, 15.90mm와 15.95mm의 세 종류로하고 각각에 대해서 길이를 30mm, 50mm, 80mm로 변화시켜 도합 9가지 종류를 사용하였다. 조립오차, 틈새율, 회전중심에서 펙의 끝까지의 거리 등을 변수로 하여 실험을 행하였다. N/C밀링기계는 3축제어 이어서 θ 방향으로 제어할 수 없기 때문에 초기 조립오차중 각도오차는 없는 것으로 펙을 위치시킨 다음, 대신 위치 오차를 1mm, 2mm, 3mm 주어서 조립시 발생하는 반력 F_Z과 반력모우멘트 M_T, M_L등을 측정하였다. 조립용 손목은 등방성이 있으므로 X 방향의 오차에 대해서만 실험하였고, 같은 방법으로 X-Y방향으로 확장시킬 수 있다.

실험방법은 조립용 손목을 밀링머시인의 콜릿(collet)에 부착하고 조립할 펙을 조립용 손목에 삽입시킨후 베이스에다 구멍을 가진 원통을 설치하였다. 그리고 펙과 원통사이에 위치오차로 준 후, N.C 밀링머시인을 움직여 삽입하면서, 조립용 손목에서 나오는 데이터 즉, 반력과 모우멘트를 측정하였다.

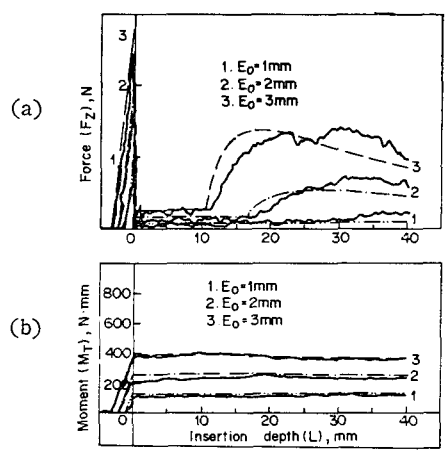


1. N.C. milling m/c
2. Collet
3. Flexible wrist
4. Gripping device
5. Peg
6. Hole
7. Step motor

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup

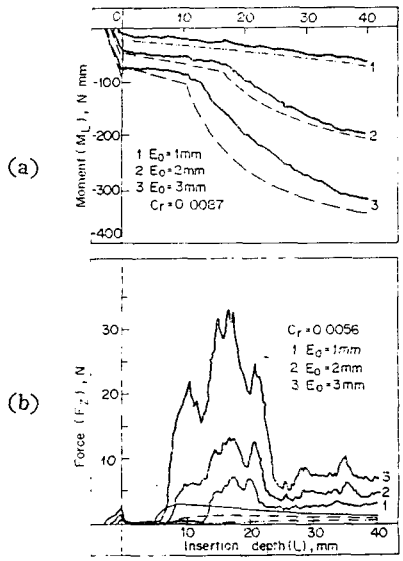
4.3. 결과 및 고찰

조립실험에서 측정한 스트레인 게이지 출력전압(V_Z, V_T, V_L)과 측정실험에서 구한 비례상수(K_Z, K_T, K_L)를 곱하여 힘(N) 또는 모우멘트(N. mm)의 단위로 환산하여, 삽입깊이(l)에 따른 반력(F_Z)과 모우멘트(M_T, M_L) 선도를 구하였다. Fig. 7~Fig. 9는 50mm 길이의 펙을 0.0087의 틈새율($C\gamma$)을 가진 구멍에 삽입할때, 초기 위치오차를 E_0=1mm, 2mm, 3mm로 각각 변환시켜가면서 수동적인 방법으로한 결과이다. 굵은 실선이 실험치이고 가는 점선이 whitney의 조립이론[11] 해석에 따른 이론치이다. Fig. 7(a)는 삽입깊이에 따른 조립반력(F_Z)선도인데 이론치와 실험치가 거의 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이 선도에서 보면 경사면 접촉단계에서 F_Z은 급격히 증가하다가 한점 접촉단계에서 급격히 떨어지며, 두점 접촉단계에서 다시 증가하기 시작하여 조립이 완료될 무렵 서서히 감소함을 알 수 있다. 초기 오차가 작을 수록 조립반력은 감소하고 E_0=1mm의 경우에는 두점 접촉이 일어나지 않음을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 T스프링이 받는 모우멘트(M_T) 선도이고, Fig. 8(a)는 L스프링이 받는 모우멘트(M_L) 선도이다. 이 그림에서 살펴보면 T스프링은 경사면 접촉단계에서 주로 변형하고 L스프링은 두점 접촉단계에서 주로 변형함을 알 수 있다. 그 이유는 T스프링은 수평반력에 민감하고 L스프링은 모우멘트에 민감하기 때문이다.



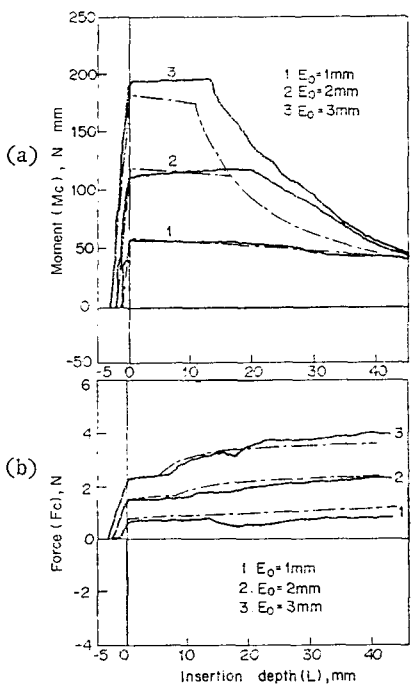
(a) F_Z-L diagram (b) M_T-L diagram

Fig. 7 Variation of the force and moment with the insertion depth



(a) M_L-L diagram (b) F_Z-L diagram

Fig. 8 Variation of the force and moment with the insertion depth



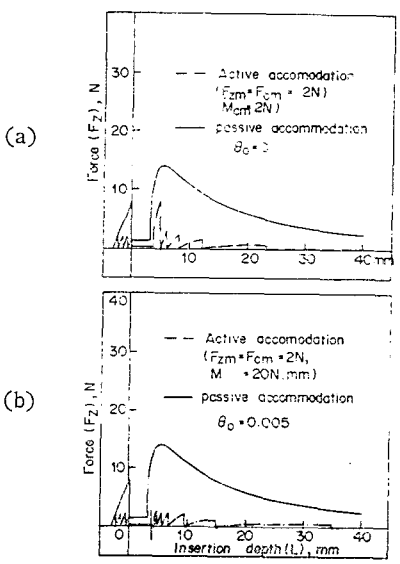
(a) M_C-L diagram (b) F_C-L diagram

Fig. 9 Force and moment at the remote center

Fig. 8(b)는 틈새율이 좀 더 작은 경우(C_r=0.0056)의 삽입깊이 조립반력선도인데 이론치보다 매우 큰 차이로 실험치가 크게 나타나고 있다. 이는 이론적 해석에서 고려를 하지 않은 웨징(wedging)현상 때문인데, 틈새율이 작은 정밀조립의 경우 구멍과 핏이 두점 접촉시 탄성변형을 일으켜 마찰각이 불규칙하게 변하기 때문이다. 이 웨징현상은 조립을 방해하는 큰 원인이며 이를 줄이기 위해서는 초기 오차수정이 불가피한 것이다. 이 웨징 현상을 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션 한다면 이론치가 실험에 많이 접근할 수 있다[12]. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 Fig. 7에서 얻은 T스프링의 모우멘트 M_T와 Fig. 3(a)에서 얻은 L스프링의 모우멘트 M_L을 애널로그 회로를 통해 (22)와 (23) 식들을 연산하여 구한, 원격중심 (C_C)에서의 수평반력 (F_C)와 모우멘트 (M_C)의 선도인데 실험치와 이론치가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이밖에도 핏의 길이와 틈새율을 변화하여 실험한 결과, 핏의 길이가 길수록 틈새율이 작을수록 조립반력(F_Z)이 현격히 증가함을 확인하였다[12].

5. 자동 조립 방법의 개발

앞에서 언급한 바와 같이 RCC와 같이 원격중심을 갖는 유연한 손목에 의해 오차수정없이 수동적으로 조립을 하는 방식을 수동적응법(passive accommodation)이라 하며, 감지기능을 이용하여 귀환함으로써 조립시 발생하는 오차를 수정하는 방식을 자동적응법



(a) Initial angular error θ_0=0°
(b) Initial angular error θ_0=0.005°

Fig. 10 Force variation of the active accommodation

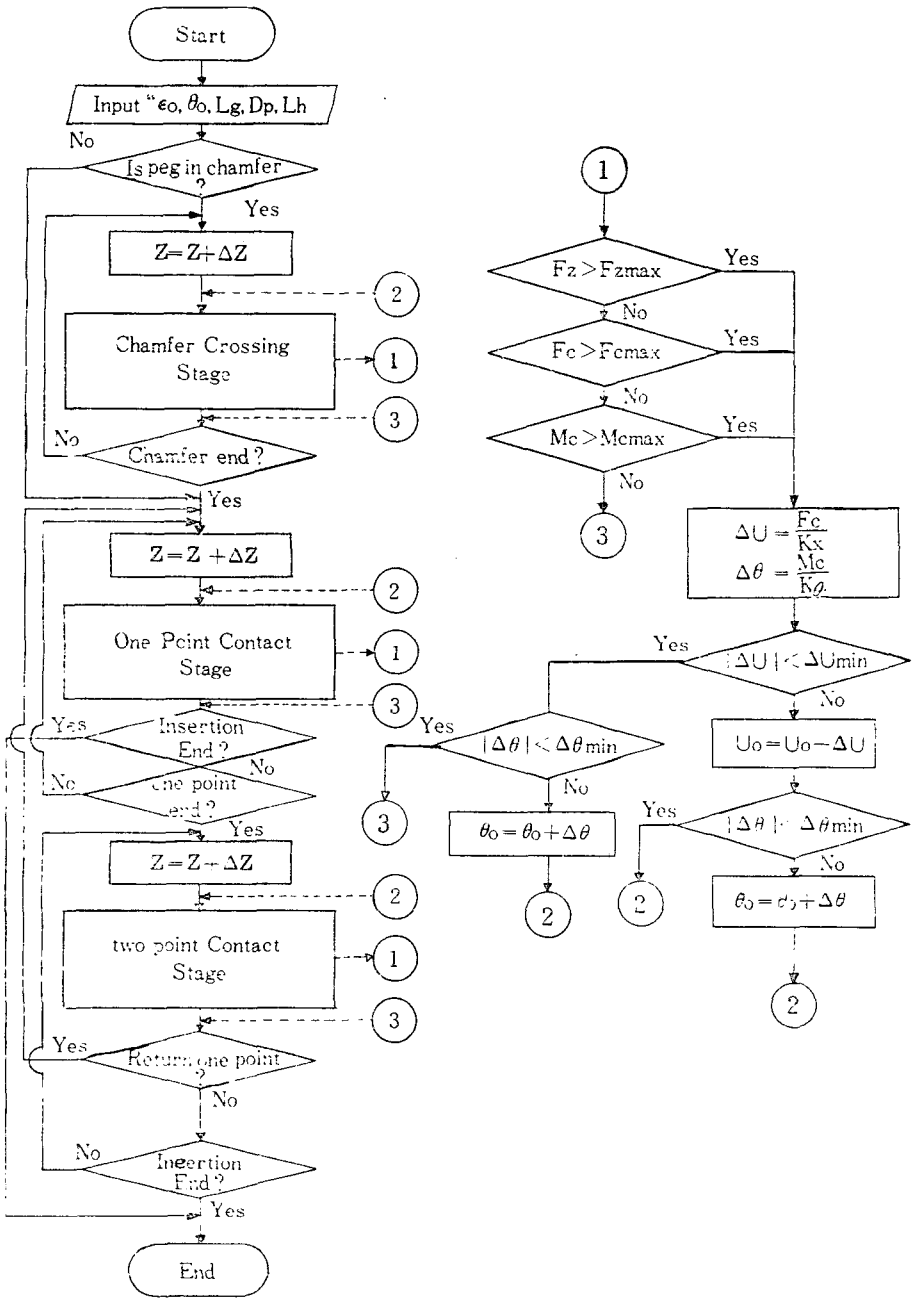


Fig. 11 Flow chart

(active accommodation)이라 한다. 이러한 귀환제어방법을 위해 개발된 제어알고리즘은 다음과 같다(flow chart 참조 Fig. 11). 최대허용 조립반력 및 모우멘트를 정하여 이 허용치 이하에서는 그대로 수동적응법으로 조립하고, 허용치를 넘어설때는 그때 감지된 F_c와 M_c로부터 식 (24)를 통해 구한 손목의 변형량 ΔU와 $\Delta\theta$를 귀환시켜 손목의 변형량을 없애주는 방향으로 손목의 위치 U와 θ를 변화시켜 오차를 수정해 주었다. 이 때 로봇이 위치수정을 해줄 수 있는 최소한의 값 ΔU_{min}과 $\Delta\theta_{min}$을 설정하여서 감지된 F_c와 M_c가 허

용치를 넘어선다 하더라도 ΔU와 $\Delta\theta$가 ΔU_{min}과 $\Delta\theta_{min}$보다 작을 경우에는 수정을 하지 않고 그대로 조립이 진행되도록 하였다. 조립반력이나 모우멘트가 허용치 이하로 줄어들면 다시 수동적 적응법으로 조립하고 위 과정을 반복하면서 조립을 완료하도록 하였다.

이러한 자동조립방법을 사용하여 조립할때 생기는 조립반력 F_z를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 구했으며 이 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 이 경우는 틈새율을 줄여 $C\gamma=0.0025$로 하였고 초기오차(E_0), 3mm, 회전중심(C_c)에서 펙의 끝부분까지의 길이(Lg), 40mm로 택하여 시뮬레이션 하였다. 실선은 수동적응방법의 F_z이고 점선은 자동조립방법의 F_z를 나타낸다. 자동조립의 경우 조립반력(F_z)과 손목의 수평반력(F_c)의 최대허용치를 각각 2 N으로 정했으며 손목의 최대허용 모우멘트 $(M_c)_{max}$를 20 N.mm로 제한하였다. 그림에서 알 수 있듯이 4단계의 전조립과정을 통해서 수동적응방법으로 조립할때가 훨씬 큰 반력이 생긴다는 것을 볼 수 있다. 이에비해 자동조립시는 훨씬 적은 반력으로 조립이 진행되다가 펙의 길이가 약 23mm정도 구멍에 들어간 다음 부터는 거의 반력을 받지 않고 조립됨을 알 수 있다.

6. 결 론

조립을 원활히 수행하기 위해 본 논문에서는 기존의 RCC와 같은 유연성을 지니고 있으면서도 동시에 감지기능을 갖춘 flexible wrist를 설계·제작하였다. Whitney의 조립이론을 토대로 수동적으로 조립할때 조립과 정시 발생하는 반력을 구하였고 이를 실험결과와 비교 분석하였다. 또한 조립반력을 줄이기 위한 목적으로 자동 조립을 컴퓨터 시뮬레이션 방법으로 얻은 결과를 수동조립 방법으로 얻은 실험결과와 비교하였다. 중요 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

(1) 조립품간의 틈새율 $C_r=0.0087$ 부품(펙)의 길이 50mm, 초기 위치오차 3mm인 경우를 수동적인 방법으로 조립실험을 해 본 결과 조립반력이 3 N이하로도 조립이 가능하였고 실험치와 이론치가 잘 일치하였다. 이 경우 손목의 중심(C_c)에서 받는 수평방향의 분력(F_c)과 모우멘트 (M_c)도 실험과 이론이 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) 틈새율이 더 작은 경우 $C_r=0.0056$이하에서나 부품의 길이 80mm 이상에서는 웨징(wedging)현상이 발생하여 조립반력이 30 N이상으로 증가하였다. 따라서 이 경우는 자동보상 방법으로 조립해야만 조립이 가능함을 확인했다.

(3) 자동보상방법으로 조립한 경우는 틈새율 $C_r=0.0025$ 초기오차 (E_0), 3mm, 회전중심(C_c)에서 펙의 끝부분 까지의 길이 (Lg), 40mm로 하여 시뮬레이션 하였는데 수동보상방법보다 훨씬 적은 반력으로 조립이 가능함을 확인하였다. 위의 결과를 검토해 볼때 본 논문에서 개발한 로봇의 손목을 사용하면 유연성을 지니고 있어서 수동적 적응방법으로 조립이 용이함을 확인하였고 또한 감지기능이 있기 때문에 자동 보상 방법을 사용하면 적은 반력으로도 조립할 수 있는 가능성을 확인하였다.

References

(1) J.L. Nevins and D.E. Whitney, "Assembly Research", Automatica, Vol. 16, p. 595, 1980

(2) K.E. Miles, "Factors Effecting the Manipulation of Piece Parts for Automated Assembly", Industrial Robot, p. 14, 1978

(3) P.C. Watson, "Remote Center Compliance System", U.S. *Patent No. 4,098,0001, field Oct.13,* 1976

(4) S.H. Drake, P.C. Watson and S.N. Simunovic, "High Speed Robot Assembly of Precision Parts Using Compliance Instead of Sensory Feedback", Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robots, Tokyo, Japan, pp. 87~98, Oct. 1977

(5) H. Van Brussel,H. Thielemans and J. Simons, "Futher Development of the Active Adaptive Compliant Wrist (AACW) for Robot Assembly", Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robot, Tokyo, Japan, pp. 377~384, 1981

(6) H. Van Brussel and J. Simons, "Automatic Assembly by Active Force Feedback Accommodation", Proc. 8th Int. Symp. on Industrial Robots, Stuttgart, West Germany, pp. 181~193, 1978

(7) T.L. De Fazio, "Displacement-State Monitoring for the Remote Center Compliance (RCC) Realizations and Application", Proc. 10th Int. Symp on Industrial Robots, Milano, Italy, pp. 559—569 1980

(8) T. Golo, T. Inoyama and K. Takeyasu, "Precise Insert Operationby Tactile Controlled Rob-

ot", Industrial Robot, Sept. 1980.

(9) K. Takeysu, T. Goto and T. Inoyama, "Precision Insertion Control Robot and Its Application", ASME of J. of Engineering for Industry, pp. 1313~1318, Nov. 1976

(10) T. Goto, K. Takeyasu and T. Inoyama, "Control of Algorithm of Precision Insertion Operation Robots", IEEE, Trans., Vol. SMC-10, No. 1, Jan. 1980

(11) D.E. Whitney, "Quasi-static Assembly of Compliantly Supporzed Rigid Parts", ASME Trans., Vol. 104, pp. 65~77, March, 1982

(12) K.C. Koh "The Design and Development of Flexible and Sensible Wrist of Robot for Assemblying Process", M.S. Thesis Department of Production Engineering, KAIST, 1984