'90 韓國自動制御學術會議論文集 1990. 10.26~27

한양 로봇손 I 의 설계

°정 낙 영[1], 백 주 현[1], 이 수 진[1], 이 준 호[1], 서 일 홍[2], 최 동 훈[3]

[1]한양대학교 대학원,[2]한양대학교 전자공학과,[3]한양대학교 기계설계학과

Design of The Hanyang Robotic Hand I

Nak Young Chong[1], Joo Hyun Baek[1], Soo Jin Lee[1], Jun Ho Lee[1],
Il Hong Suh[2], Donghoon Choi[3]

[1] Graduate School, Hanyang Univ.
[2] Dept. of Electronics Engr., Hanyang Univ.
[3] Dept. of Mech. Design & Prod. Engr., Hanyang Univ.

Abstract

A multifingered robotic hand is designed for flexible automation by Hanyang University Robotics Laboratory. Overall architecture of the robotic hand and power transmission mechanism that contains tendons is presented. Also, the design of mechanical elements in detail is illustrated.

I. 서 론

오늘날, 생산성 증대와 품질 향상을 목적으로 산업용 로봇의 사용이 증대되면서 다양한 생산현장에서의 유연성과 적응성이 크게 요구되고 있는 실정이다. 그러나, 현재의 산업용 로봇은 end-effector의 dexterity의 부족으로 그 사용에 제한을 받고 있다. 이를 해결하기 위해 다지 (multi-fingered), 다관절 (articulated) 로봇손 (robotic hands)의 도입이 필요하게 되었는데 이는 전체 로봇시스템의 능력과 유연성을 증가시킬 수 있을 것이다.

현재의 Flexible Manufacturing Workcell은 보통 한 대의 로봇팔과 많은 특수 용도의 고가의 tool로 구성되어 있으나 일반적인 모든 작업에 제한없이 모두 적용하기는 매우 어렵다. 그러므로, 다지, 다관절 로봇손의 개발 및 그 지능 제어의 실현은 작업에 따르는 불필요한 tool의 교환을 방지하여 비용과 시간을 절약함으로써 생산성을 극대화시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Flexible Automation을 위한 다지, 다관절 로봇손의 설계 및 제작에 관한 방법을 제시하고자 한다.

II. 한양 로봇손의 전체적인 구조

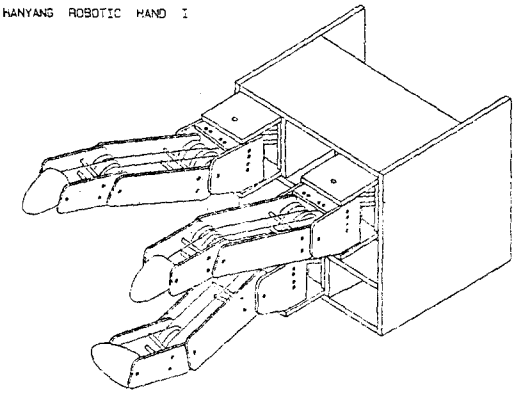


Fig. 1 The Hanyang Robotic Hand I

그림 1에서 보는 바와 같이 전체 손의 구조는 각 4 개씩의 자유도를 갖는 동일한 구조의 손가락 3 개로 이루어져 총 12개의 자유도를 갖고 있고 각각의 관절은 revolute joint이다. 1개의 자유도를 구동시키기 위해 Motor 1 개씩이 사용되며 2개의 tendon으로 정방향과 역방향의 운동을 조정하는데 Dead-zone을 막기 위하여 Pre-tension 을 가하게 된다.

전체 손가락의 길이는 150 ㎜ 이고 각 손마디의 길이는 각각 28 ㎜, 61 ㎜, 37 ㎜, 24 ㎜ 가 된다. 이 때, 손마디의 길이 비는 각 손가락의 작업공간을 최대로 한다는 의미에서 손마디(링크) 1과 2, 3의 길이의 비를 1:1 로 하고 전체적인 비는 Fibonacci

수에 따라 링크 1: 링크 2 : 링크 3 = 5: 3: 2의 비율로 했다.

관절들의 운동영역은 관절 0이 ± 30° 이고, 관절 1, 2, 3 은 모두 ± 135° 이다. 손 끝 (링크 3)은 force 센서가 부착되어 있고 원추형태로 이루어져 있으며 손마디 1과 2는 각각 두 개의 평판을 2 개의 rod 로 직접 연결한 형태이다.

III. 동력 전달 방법

3.1 Tendon 의 Routing 방식

장력의 유지를 위해서 tendon을 풀리에 한 바퀴씩 감는데, 이것은 전체 손가락의 폭을 결정하는 인자로 작용하게 된다. 관절 3 에서 관절 1 까지 제 3 tendon 군을 풀리군의 안쪽에 설치한 이유는 다음과 같다. 첫째, 기구적 (외형적)인 관점에서 보면, 제 3 풀리군을 관절 3에 내장시켜야 하는데 제 3 tendon 군을 외곽에 설치한다면 관절 3 의 크기는 더 큰 형태와 무게를 갖게 된다. 또, 역학적 관점에서는 가장 큰 구동장력을 필요로하는 제 1tendon 군을 termination rod의 지지점 쪽에 고정하는 것이 termination rod 내에 발생하는 굽힘모멘트를 작게 할 수 있다.

구체적으로 관절 0의 내부를 살펴보면 Guider 1은 tendon 이 제 1 관절축을 통과하고 제 0 관절축을 통과할 때 tendon 이 급하게 꺾이게 되면 풀리의 턱 높이를 고려해 볼 때 관절 구동시 tendon 이 풀리를 이탈할 수 있으므로 제 1 pulley 군을 따져 나온 tendon 들을 guider 1 까지는 평행하게 유도하는 역할을 한다. Guider 2 의 경우는 제 1 관절을 직접적으로 구동하며 가장 큰 장력이 걸리는 제 1 tendon 군을 급격적 덜 꺾어 guider 에 보다 작은 축하중이 작용하게 할 목적으로 guider 2 의 가장 외곽을 지나가도록 하였다. tendon 들이 모두 제 0 관절 [illegible] 지나가도록 한 이유는 그림에서 보는 바와 같이 관절축 0 을 중심으로 회전하는 경우 tendon의 초기 길이가 변하게 되므로 정확한 구동제어를 위해서는 이를 방지하여야 하므로 guide plate 를 제 0 관절축까지 돌출시켜 설치하였다.

Palm 내부에서의 guider 4, 5 의 역할은 guider 3 을 지나온 tendon 의 배열을 1, 2, 3, 3, 2, 1의 순서에서 1, 1, 3, 3, 2, 2 의 순서로 바꾸어 주고, tendon 의 배열작업을 palm 내부에서 끝내 손 바깥에서의 tendon 끼리의 간섭현상을 막아준다.

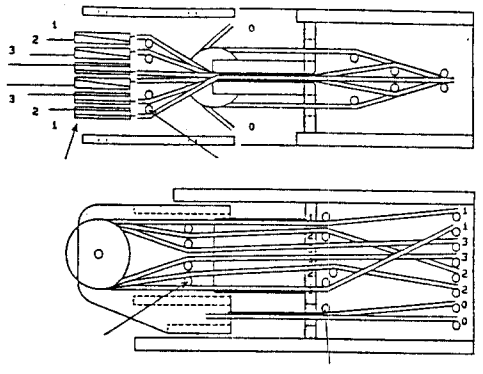


Fig. 3 Tendon Routing

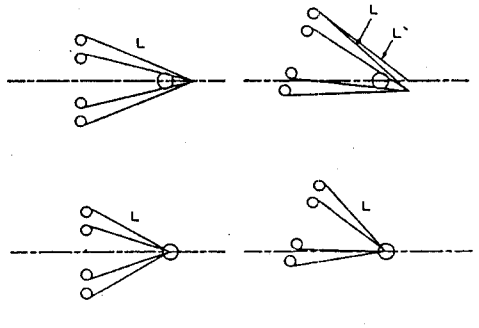


Fig. 4 Tendons Passing Through Joint Axis 0

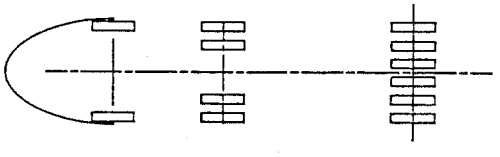


Fig. 2 Pulley Arrangement

3.2 Tendon 장력의 결정

로봇손과 같은 다중루프 구조 (multi-loop mechanism)의 위치와 힘 제어를 위한 구조는 조인트 토오크 시스템을 사용한 비연성 hand 제어기를 사용한다. 로봇손 제어는 joint-based 시스템을 채택하며, 특히 tendon-based 구동 방법을 제안하여 제어와 센싱(sensing)의 이점을 지니게 하였다. 즉 로봇손 제어계는 tendon수준의 제어에 기본을 두고 있다. 로봇손을 tendon형태의 시스템으로 구동할 때 tendon의 정확한 장력값을 알아야 접촉력, 최적 파지, finite motion을 행하기 위한 로봇손 제어를 할 수 있다. 따라서 tendon 장력은 각 손가락의 관절에 걸리는 토오크를 산출하여 결정한다. 로봇손 구조는 tendon이 풀리에 감기는 양만큼 풀어주는 형태로 8개의 tendon 장력에 상응하는 8개의 구동기가 필요하다. 그리고 tendon 장력의 유일해는 항상 양의 값을 가진다.

τ를 관절 토오크 벡터로 4×1 행렬, R을 풀리반경과 tendon termination으로 결정되는 4×8 상수 행렬이라할 때, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tau^T = R\,T \qquad (1)$$

$$T = R^+\,\tau^T \qquad (2)$$

즉, tendon의 장력은 로봇손이 임의의 중량을 갖는 물체를 쥐었을 때 각각의 조인트를 구동하기 위한 토오크를 구하여 (2)식에 대입하면 얻어질 수 있다. 이 때, A를 풀리반경, D를 풀리와 터미네이션되는 지점 까지의 거리라고 하면 상수 행렬 R은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A & A \\ -D^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & D^1 & 0 & 0 \\ 0 & -D^2 & 0 & 0 & D^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D^3 & -D^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

상기의 관계식으로 부터 풀리와 tendon간의 마찰계수를 0.1로 가정하면 다음과 같은 tendon의 장력값 T[N]을 얻을 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -16.21 \\ -8.65 \\ 4.61 \\ -4.61 \\ 8.65 \\ 16.21 \\ -50.56 \\ 50.56 \end{bmatrix}$$

tendon 값이 음수인 것은 tendon의 작용방향이 반대라는 것을 의미한다. 여기서 구한 tendon 장력은 감속되기 전의 최종치이다.

3.3 Tendon의 재질 및 형상

고강도 복합소재를 사용하면 재질이 철(steel)인 경우와 비교할 때, 강도, 경도 및 피로수명 등의 성질을 향상시킬 수 있다. 또, 파손(failure)이 일어날 때는 총체적 파손(total failure)이 아닌 점진적 파손(gradual failure)현상이 일어나므로 피로수명(fatigue life)을 향상시킬 수 있다. Tendon의 재질은 아라미드 계통의 케브라(Kevlar)49 이며, 완전취성인 카본(carbon)이나 Glass Fibres에 비해 성질이 우수하다. 특히, 케브라49는 比영계수가 Glass Fibres에 비해 약 2.9배 우수하기 때문에 변형율이

작아서 routing할 때의 장력(tension)변화가 미소하다. 즉, tendon이 일정한 장력을 유지할 수 있다.

또, tendon의 단면형상은 다음과 같은 이유에 의해서 원형으로 결정되었다. 동일한 굽힘모멘트에 대해서 장방형 등의 형태보다 원형이 단면계수(Section Modulus)가 커짐으로써 굽힘응력의 값이 작아질 수 있고, lateral compliance가 상당히 낮지만 사용할 때 구조가 간단해 지고 routing할 때 최소 면적을 유지하면서 고르게 접촉한다는 이점이 있다.

IV. 링크들의 재질

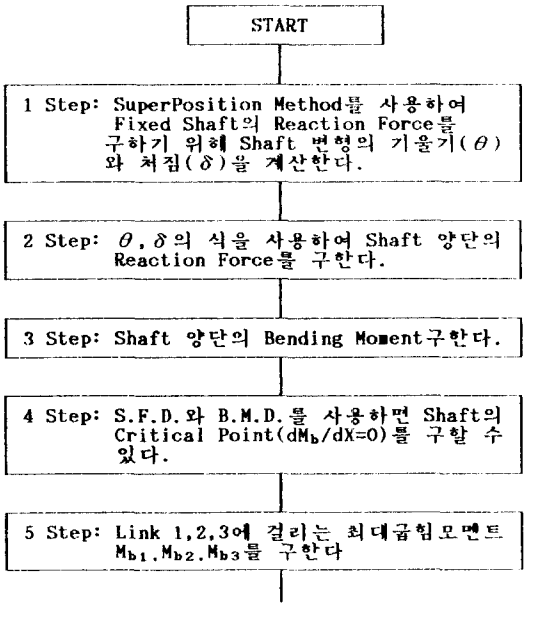
손가락 각 링크들과 관절축 등의 재질은 주로 쓰이는 알루미늄 대신에 경량이면서도 고강성, 고강도이고 내피로성이 우수한 복합소재를 사용했다. 이 때, 다음과 같은 점 때문에 탄소섬유 강화플래스틱인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)가 선택되었다. 첫째로 CFRP는 알루미늄에 비해 자기윤활성이 있으므로 Tendon을 Routing 할 때 발생하는 풀리와의 마모문제를 어느정도 줄일 수 있다. 둘째로, 탄성영역內에서 굽힘저항이 기타의 재질에 비하여 뛰어나다. 그 외에도, 재료의 고유진동수와 감쇠값이 매우 크므로, 빠른 속도로 움직이는 정밀기계의 부품 재료로 적합하다. 즉, 탄소섬유 복합재료나 Boron섬유 복합재료와 같은 높은 비탄성계수를 갖는 재료를 사용하여 제작하면 구조의 고유진동수를 철이나 알루미늄을 사용하는 것보다 2배 정도 증가시킬 수 있다. 이것은 구조의 고유진동수가 재료의 비탄성계수의 제곱근에 비례하므로, 재료의 비탄성계수가 철이나 알루미늄보다 4배 정도 큰 복합재료로 제작된 구조물의 고유진동수의 값은 철이나 알루미늄으로 제작된 구조의 고유진동수보다 2배 정도 높게 된다. 또한, 탄소섬유 복합재료는 철이나 알루미늄보다 감쇠값이 10배 정도 크므로 진동을 빨리 흡수해야 하는 고속정밀 기계의 부품으로 사용하면 동역학적 성질을 매우 향상시킬 수가 있다. 반면에, 철 또는 알루미늄과 비교할 때 내충격성, 내열성이 떨어지지만 로봇손을 구동할 때 충격이나 열에 대한 영향은 미소하다고 판단된다.

복합재료를 이용한 로봇팔의 제작은 1984년도에 M.I.T.에서 H. Asada가 맨 처음 시도하였는데, 이 연구에서 산업용 로봇의 forearm을 탄소섬유 복합재료를 사용하여 제작하였다. Asada가 제작한 로봇은 직접구동방식 로봇이었는데, 당시의 직접구동모터는 큰 토오크를 내기 위하여 무게가 매우 무거웠으므로, 작은 payload의 로봇도 매우 큰 구조를 가지고 있었다. 이 연구에서 Asada는 복합재료를 사용하여 로봇팔의 무게를 줄이고, 팔 구조의 고유진동수를 높일 수 있었다.

V. 각 부품들의 크기 결정

5.1 터미네이션 축 직경의 결정

다음의 그림은 링크 1, 2, 3을 연결하고 있고 동시에 tendon이 termination되는 축의 직경을 구하는 순서도이다.



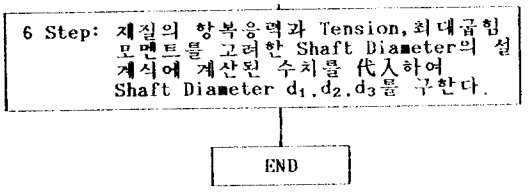


Fig. 5 Flow Chart for Determination of Diameter of Termination Shaft

다음 그림은 터미네이션 축의 F.B.D. 를 나타낸다.

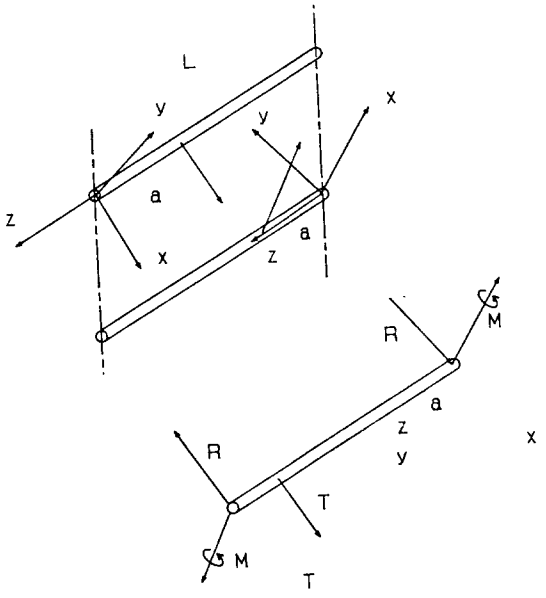


Fig. 6 Free Body Diagram of Termination Chart

해석의 간편함을 위하여 회전좌표를 사용하였다. 일반화시킨 터미네이션 축에 중첩법(Superposition Method)을 적용하면 다음과 같다.

< 1 단계 >

평형조건 : $R_a + R_b + T = 0$

$M_a = T\,a + R_b\,L - M_b$

< 2 단계 >

기하학적 적합성 : $-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 = 0$

$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$

$R_a = -T\,(L^3 + 2\,a^3 - 3\,a^2\,L)/L^3$

$R_b = T\,a^2\,(2\,a - 3\,L)/L^3$

$M_a = T\,a\,(a^2 - 2\,a\,L + L^2)/L^2$

$M_b = T\,a^3\,(1 - L/a)/L^2$

각 링크의 최대 굽힘모멘트를 구하면 링크 1은 24.42 Nmm, 링크 2는 8.84 Nmm, 링크 3은 1.97 Nmm 이다. 최종적으로 각 링크의 축 직경을 위의 절차를 따라서 살펴보면 다음과 같다. 굽힘모멘트만 작용하는 경우의 축 직경의 일반식은 $d = (32\,Mmax/\pi\sigma)^{0.33}$ 이다. 축의 재질을 T-300 Fiber-Epoxy 복합소재로 할 때 각 링크의 직경은 약 1mm이다. 실제 제작할 때 링크 1,2,3에 사용되는 풀리의 직경은 같으므로 여기서는 계산된 링크의 최대직경을 사용한다. 축에 걸리는 반력과 굽힘모멘트를 도식화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

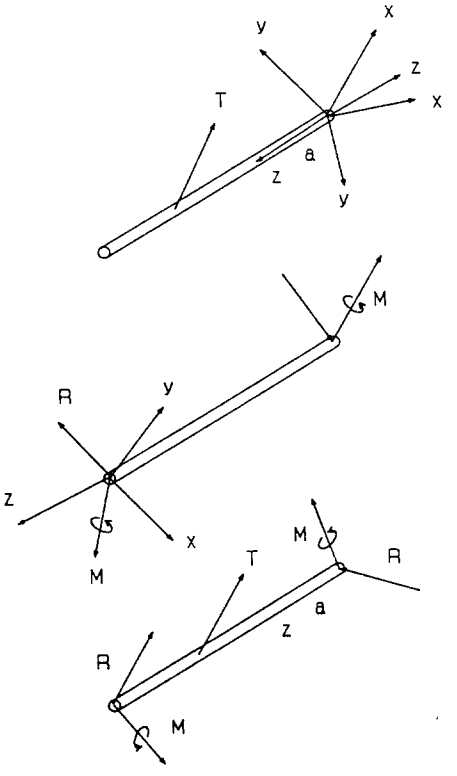


Fig. 7 Reaction Forces and Bending Moments of the Shaft

5.2 풀리축 직경의 결정

다음의 순서도는 풀리축의 직경을 결정하는 것으로 관절축 1,2,3에 모두 적용된다.

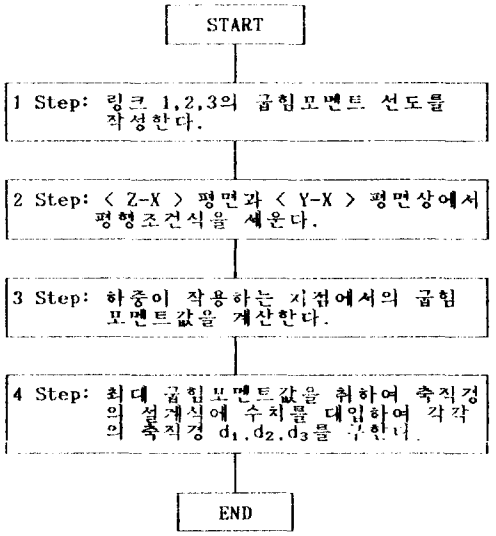


Fig. 8 Flow Chart for Determination of Diameter of Pulley Shaft

위의 선도를 통해 계산한 최대굽힘모멘트의 값은 링크1의 경우 122.6 Nmm, 링크2는 32.3 Nmm, 링크3은 9.3 Nmm이다. 풀리축 직경의 설계식은 터미네이션 축의 설계식과 동일하며, 이 때 소경 볼 베어링의 최소내경은 1mm이므로 축직경을 선정할 때 주의를 요한다.

5.3 링크 폭의 결정

링크 2와 3은 hole의 직경에 비해 그 길이가 충분히 크기 때문에 무한평판으로 가정할 수 있다. hole은 특히 단면이 급변하는 부위로 국부적으로 큰 응력이 발생할 수도 있는데 이 응력집중의 정도를 완화시켜주는 방법은 실험에 의한 여러 방식이 알려져 있다. 현재 plate의 두께는 재질이 알루미늄인 경우 2 mm로 설계하였다. 알루미늄은 1 mm^2당 20N의 하중을 지지할 수 있는데, hole에 작용하는 하중의 크기는 미소하므로 축에 걸리는 하중의 영향에 의하여 plate의 좌굴이나 휨의 현상은 일어나지 않는다. 또, Bearing을 Mounting할 때의 영향도 충분히 견딜 수 있으리라 고려되는데 엄밀해를 얻기 위해서는 4개의 hole에 굽힘 모멘트와 힘이 작용하는 plate를 유한요소법으로 해석하는 것이 필요하다.

References

[1] Jeffrey R. Kerr,"Analysis of Multi-fingered Hand," Ph.D. Dissertation, Stanford Univ., Stanford, CA, Dept. of Mech. Engr., Dec. 1984

[2] Matthew T. Mason and J. Kenneth Salisbury, Robot Hands and the Mechanics of Manipulation. Cambridge, MA: MIT Press, 1985

[3] 이대길,김기수,임창영,곽윤근, " SCARA 형 D.D. 로보트를 위한 복합재료 팔의 최적 Winding 각도 계산," 한국복합재료학회지 제1권, 제1호, 1988년 12월

[4] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, K. B. Biggers, E. K. Iversen, " The Version I Utah/MIT Dextrous Hand," Proc. of 2nd. Int. Symposium of Robotics Research, MIT Press, 1984

[5] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, K. B. Biggers,"The Utah/MIT Dextrous Hand: Work in Progress," Int. J. Robotics Research,Vol. 3,No.4,Winter,1984

[6] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. F. Knutti, R. T. Johnson, K. B. Biggers, "Design of The Utah/MIT Dextrous Hand," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1986