

다관절 손 기구의 설계 및 제어에 관한 연구

김철우*, 권대갑*

A Study on the Design and Control of an Articulated Hand

Cheol-Woo Kim*, Dae-Gab Gweon*

ABSTRACT

In many applications, the typical parallel-jaw end-effector of a robot arm has been remarkably satisfactory. But, it is not adequate for the applications such as complicated manipulation. Therefore, the development of a hand with dexterity is necessary.

In the study, a finger with 4 joints (so, having redundancy) was constructed to investigate the characteristics of an articulated hand. Each joint was driven by one actuator, and the motor torque was transmitted to each joint through a tendon-pulley system. In the context, major considerations for hardware design and the method to solve the inverse kinematics of a redundant manipulator were presented. Finally, the basic capabilities of an articulated hand were presented through experiments.

Key Words : 다관절 손 기구(Articulated Hand), 가상 역행렬(pseudo inverse matrix), 여유 자유도(redundant),

1. 서 론

로봇들은 생산 현장에서 세분화 된 제품들을 균일한 품질로 만들어 내는데 큰 역할을 담당하게 되었을 뿐 아니라, 인간이 작업하기 곤란한 환경, 즉 심해나 우주공간, 또는 원자로의 내부 같은 곳에서 인간을 대신하여 작업을 수행하게 되었다. 특히, 이런 작업들을 수행하기 위해서는 end effector의 유연성이 중요한 요소로 작용하게 된다. 이전까지 사용되었던 parallel jaw end effector는 기구학적인 형태로 인해 작업 동작이 한정되어 있고, 물체를 다룰 수 있는 범위가 제한되어 있다. 또한, 작은 동작을 위해서도 로봇의 팔 전체가 움직여야 하므로 좁은 작업 공간에서 이용하는데는

문제가 있었다. 따라서, 보다 유연하게 작업에 대응할 수 있는 장치의 개발이 필요하게 되었다(1).

이런 장치들은 기능 또는 구조적 특성으로 인해 artificial hand 또는 articulated hand 라고 하며, 인간의 손을 모방한 형태로 연구가 진행되고 있다. 이러한 장치들의 연구 예를 살펴보면 3개의 손가락과 11개의 축을 사용하여 평평한 물체와 구형 물체의 manipulation을 수행한 Okada Hand(1980), 3개의 손가락과 9개의 축을 tendon을 사용하여 제어한 Salisbury Hand(1982), 4개의 손가락과 19개의 축을 사용한 Utah/MIT Hand(1986) 등이 있다.

본 연구에서는 구조적인 면에서 이전의 연구들을 고찰하여 기초 실험 목적에 적합하고, 구현이 용이한 구

* 한국과학기술원 (정밀공학과)

조를 선택하여 한 개의 손가락을 설계 제작하여 실제 응용을 위한 기초 실험을 수행하였다.

2. 구조 설계

본 연구에서 제작한 장치는 4 자유도를 가진 1개의 손가락 구조로서 세 개의 축이 서로 평행하고 나머지 1개의 축이 이에 수직한 구조로 되어 있다.

각 링크(link)의 길이의 비는 대략 3 : 3 : 2 정도이며, tendon은 풀리(pulley)를 이용하여 각 축에 동력을 전달한다. 또한, 모터(motor)축에 직접 엔코더(encoder)가 연결되어, 이로부터 각 축의 회전각을 추정하며, torque를 측정하기 위한 tension sensor를 부착할 수 있도록 설계되어 있다(Fig. 1).

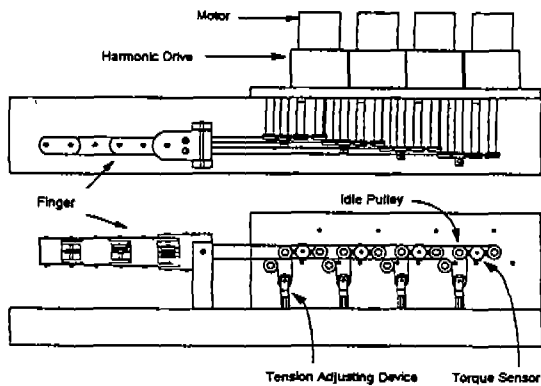


Fig. 1 손가락 구조물과 구동부

2.1. 각 축의 구동 및 tension 전달 방법

우선 Okada Hand와 같이 각 축을 하나의 구동 장치를 사용하여 구동하는 방법이 있다. 이 방법은 한 개의 축을 한 개의 구동 장치를 사용하여 구동하기 때문에 각각의 축을 제어하기는 용이하지만, torque가 작용할 때 한쪽 tendon이 장력을 잃는 것을 방지하기 위하여 초기 tension이 주어져 있어야 한다(Fig. 2(a)). 반면에 각 축을 2개 이상의 actuator를 사용하여 구동하는 방법이 있다. 이것은 다시 Salisbury Hand와 같이 n개의 축을 구동하기 위해 n+1 개의 actuator를 사용하는 방법(Fig. 2(b))과 Utah/MIT Hand와 같이 각 축마다 2개의 actuator를 사용하는 방법(Fig. 2(c)) 등이 있다. 전자는 각 축을 구동하기 위하여 여러 개의 구동장치가 동작해야 하며, 서로 균형이 맞기 위해 정

확하게 제어되어야 한다. 후자는 각 축에 대한 두 개의 구동 장치만 균형이 맞으면 되므로 전자에 비해 비교적 제어가 용이하지만 많은 수의 구동 장치가 필요하다(2)(3).

tension의 전달 방법에는 sheath(or conduit)를 이용한 방법(Fig. 2(a), (b))과 pulley를 이용한 방법(Fig. 2(c))이 있다. sheath를 이용한 방법은 간단한 전달 장치(transmission mechanism)의 구성이 가능하고, 구조적 제한 조건이 비교적 적은 방법으로 Okada Hand와 Sallisbury Hand에서 이용하고 있다. 그러나, 이런 시스템에서는 tendon과 sheath사이의 마찰과 tendon의 compliance로 인한 비선형성이 포함되므로 안정된 힘 서보 제어(force servo control)를 하기 위해서는 시스템에 관한 완전한 이해가 필요하다. 반면에 Utah/MIT Hand와 같이 pulley만을 이용하여 동력을 전달하면 마찰의 영향이 매우 작아지므로 비교적 모델링 오차가 작아져서 제어하기가 용이해진다. 그러나, 이 방법은 tendon이 손가락 내부의 pulley를 거쳐 routing되어야 하므로 구조적인 제약이 많은 단점이 있다(4).

본 연구에서는 구동 장치의 수를 줄이고 제어가 용이하도록 각각의 축을 한 개의 구동장치로 구동하고, 마찰의 영향을 최대한 줄이기 위해서 tendon은 pulley를 이용하여 routing하는 방법을 사용한다(Fig. 2(d)).

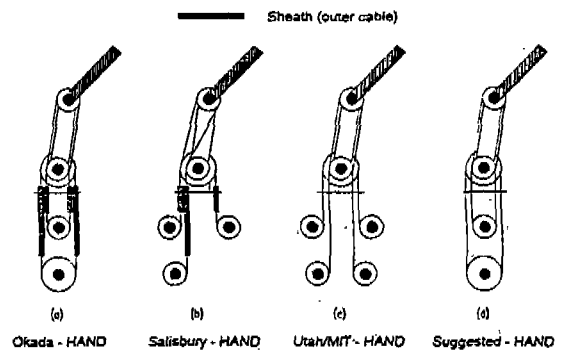


Fig. 2 장력의 전달 방법

2.2. torque sensor

robot hand가 물체를 잡을 때 손가락과 물체는 closed link system을 형성하게 되며 이런 시스템의 운동 제어(motion control)에서는 접촉점과 각 축에서

지나치게 큰 힘이 작용하지 않도록 힘 제어 또는 compliance 제어는 중요한 문제이다. 따라서, 세밀한 힘 제어를 하기 위해서는 힘 (또는 토크)의 궤환 없이는 불가능하다. 본 연구에서 설계된 torque sensor의 구조는 Fig. 3과 같다. T_1 과 T_2 를 각각 pulley A의

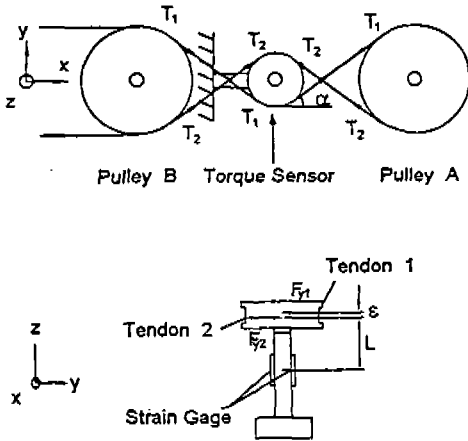


Fig. 3 Tension Sensor의 구조

양단에 작용하는 tendon의 tension의 크기, drive pulley에 작용하는 토크를 τ 라고 하면 strain gauge가 부착된 외팔보(cantilever beam)에 작용하는 모우멘트의 크기는

$$M = \kappa \tau \quad (1)$$

$$\kappa = 2 L \sin \alpha / r \quad (2)$$

이고, 여기서 L 은 sensor beam의 길이이고, r 는 pulley의 반지름이다(5). 윗식으로부터 민감도(sensitivity) κ 와 함께 strain gauge의 출력이 drive pulley에 작용하는 토크에 비례하고, 센서 빔의 길이가 길수록, tension 각이 클수록, pulley의 반지름이 작을수록 같은 크기의 토크로부터 더 큰 모우멘트가 발생하는 것을 알 수 있다.

3. Hand의 역 기구학

본 연구에서 제안된 Hand는 여유 자유도를 가지는 구조이며, 이 구조의 역 기구학 해를 구하기 위하여 task decomposition을 이용한 방법을 사용하였다. 이

방법에서는 주어진 task를 우선권을 가지는 몇개의 subtask로 나누어 pseudo inverse를 이용하여 해를 구한다. 여기서는 실험을 여유자유도가 존재하는 평면 3자유도에 대해서만 수행하였으므로 이에 대하여 해를 유도하여 본다.

3.1. 첫번째 subtask를 만족시키는 해

우선 joint variable을 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ 로 정의한다. 다음으로 첫번째 subtask를 손가락 끝점이 주어진 경로를 만족시키도록 각 joint의 각 속도를 결정하는 것으로 정의하고, 손가락 끝의 world coordinate r 을 forward kinematics 관계식으로부터 θ 의 함수로 나타내면

$$\begin{aligned} r &= f(\theta) \quad (1) \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다. 여기서, l_i 는 i 번째 링크의 길이이고, θ_i 는 i 번째 링크와 $i-1$ 번째 링크 사이의 상대각도이다. 첫번째 subtask를 만족하는 joint velocity는 (1)식을 미분하여 얻을 수 있다.

$$\dot{r} = J \dot{\theta} \quad (2)$$

여기서, $J = \partial f(\theta) / \partial \theta$ 는 r 의 θ 에 대한 자코비안 매트릭스(Jacobian matrix)이다. 이때, desired velocity r_d 가 주어지면 θ 의 일반해는

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{r}_d + (I - J^+ J)k \quad (3)$$

이고, 여기서, J^+ 는 자코비안 매트릭스(Jacobian matrix)의 pseudo inverse이고, k 는 3차원의 임의의 vector이다. 이때, 우변의 첫번째 항은 desired trajectory를 만족하는 joint velocity를 나타내며, 이것은 여러가지 해 중에서 θ 의 Euclidean norm $\|\theta\|$ 을 최소화 시키는 해이고, 정확한 해가 존재하지 않을 경우에는 norm $\|\dot{r}_d - J\dot{\theta}\|$ 를 최소화 시키는 근사해를 제공해 준다.

3.2. 두번째 subtask를 만족시키는 해

두번째 subtask는 manipulability measure를 증가시키는 방향으로 각 joint를 구동하는 것으로 정의한다. 여기서, r에 대한 manipulability measure는 다음과 같이 정의되며

$$m = \sqrt{\det JJ^T} \quad (4)$$

이것은 손가락 끝점의 운동의 자유도를 나타낸다. 두번째 subtask를 만족하기 위해서 식(3)의 k값을 다음 같이 정의한다.

$$k = \xi k_p \quad (5)$$

여기서, $\xi = \left[\frac{\partial m}{\partial \theta_1}, \frac{\partial m}{\partial \theta_2}, \frac{\partial m}{\partial \theta_3} \right]^T r$

$$\frac{\partial m}{\partial \theta_l} = \frac{1}{2} \sqrt{\det JJ^T} \sum_{i,j=1}^3 q_{ij} (J_{ii} J_{jj}^T + J_{jj} J_{ii}^T),$$

$$l = 1, 2, 3$$

$$k_p = \text{양의 상수} \quad (6)$$

이다. 또한 q_{ij} 는 (JJ^T) 의 inverse matrix의 (i, j) 요소, J_{ij} 의 i번째 row vector, 그리고, J_{ij} 은 J_i 의 θ_i 에 대한 부분 미분 계수(partial differential coefficient)이다.

식(5)과 같이 k값을 정의했을 때, 식(5)는 다음과 같이된다(6).

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{r}_d + (I - J^+ J) \xi k_p \quad (7)$$

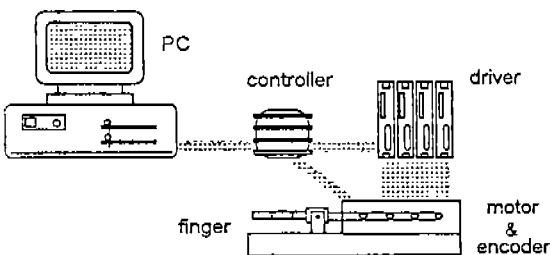


Fig. 4 전체 시스템의 구성

이와 같이 구해진 θ 에 관한 식(7)은 두 개의 subtask를 만족하는 것으로, 이 식의 적분으로부터 redundant manipulator의 매 순간의 joint angle,

θ_d 를 구할 수 있다.

이와 같은 task decomposition에 의한 방법은 손가락의 끝점이 정확하게 위치를 추종하면서, singular point를 회피하는 동시에 각 순간에서 가장 큰 manipulability를 제공한다.

4. 제어 시스템

전체 시스템은 Fig.4에서 보는 바와 같이 PC, axis controller, finger 구조물 등으로 구성되어 있다. PC에서는 수행할 작업을 정의하고, 이에 따라 손가락을 동작시키기 위한 역기구학해를 계산한다. axis controller에서는 PC로부터 주어진 지령값, θ_d 와 엔코더(encoder)로부터 얻어진 값, θ_a 를 비교하여 PD 제어 법칙에 의해 모터 드라이버에 속도입력을 계산해 낸다(Fig.5) finger 구조물에서는 드라이버에 주어진 입력에 따라 모터가 구동되어 최종적으로 손가락이 원하는 작업을 수행하게 된다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1. 실험 장치와 실험 방법

출력 20W, 정격 torque 0.75kgf·cm의 모터, PWM주파수가 15kHz, 속도 변화율은 0.1% 이하의 드라이브와 감속비 50 : 1의 Harmonic drive를 사용하였다.

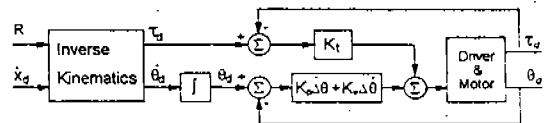


Fig. 5 제어 시스템의 block diagram

실험은 여유 자유도가 존재하는 평면(즉, 2차원 3자유도)에 대해서만 수행하였으며, 한개의 축에 대한 추종성 실험으로 부터 적절한 parameter를 설정하고, 이를 바탕으로 여유 자유도의 유무에 따라 기본적인 작업에 대해 정확하게 추종하는지 실험하였다.

5.2. 실험 결과

물체의 형상 또는 안정성으로 인해 마지막 링크(link)

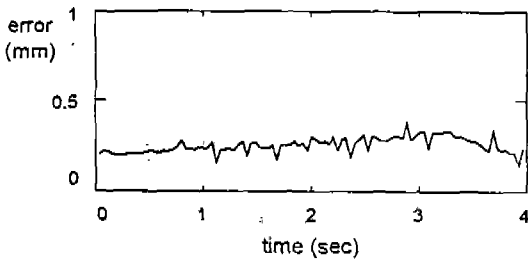
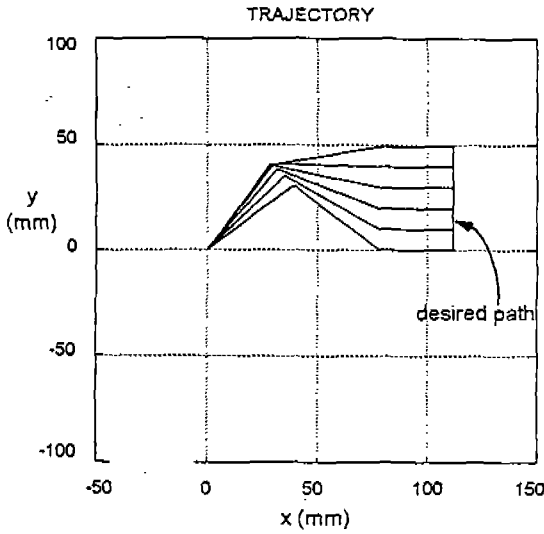


Fig. 6 마지막 link가 고정된 경우의 실험 예

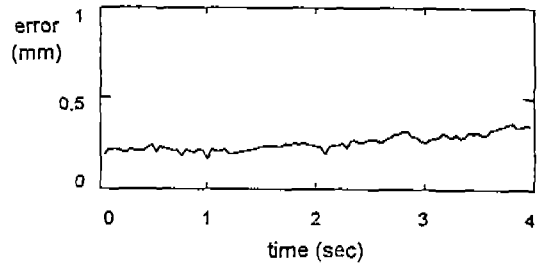
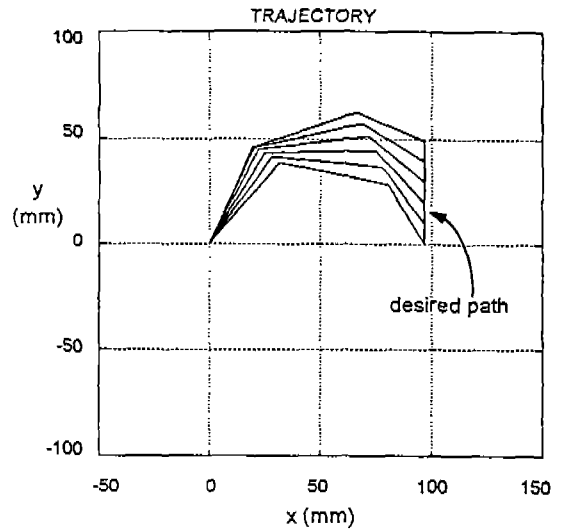


Fig. 7 마지막 link가 자유로운 경우의 실험 예

의 면 접촉이 있을 때 수평과 수직 직선을 등속도로 따라가도록 입력을 주었을 때의 응답을 Fig. 6과 도시하였다. 손가락의 끝점의 위치만이 중요한 경우, manipulability를 최대화 시키면서 수평과 수직 직선을 등속도로 이동하도록 입력을 주었을 때의 응답을 Fig. 7에 도시하였다. 손가락의 끝단에서 각 축의 오차가 누적되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 시스템을 구성하고 있는 각 요소의 개발을 통하여 오차의 크기는 줄여나갈 수 있을 것으로 기대된다.

시스템에 존재하는 마찰과 tendon의 compliance 등으로 인한 오차를 줄이기 위해 실제로 측정해야 할 위치에 부착할 수 있는 위치 sensor와 힘 sensor의 개발이 필요하다.

또한, 설계된 구조의 크기, 무게 등을 고려하여 원활한 동력 전달이 가능하고 진동을 최소화하는 강성을 가지는 전달 장치의 개발이 필요하다. 필요한 구동 장치 부품의 갯수 및 크기를 줄여 손 구조 또는 arm 내부에

장착되어야 할 것이다.

6. 결 론

인간을 대신하여 복잡한 작업을 수행하거나, 위험한 상황에서 작업하는 로봇의 end effector로서 손가락을 가진 손 구조의 개발은 필수적이다. 또한, 정교한 작업을 위해서는 여유 자유도를 가지는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 이전 연구들을 바탕으로 주요 문제에 대해 고찰해 보고, 이를 바탕으로 여유 자유도를 가지는 손가락 구조물을 제작하고, 이를 구동하여 실험 결과로부터 기초적인 지식을 습득하였다.

참고문헌

1. F. R. Erskine Crossley and F. G. Umholz, 1977, "Design for a Three-fingered Hand",

- Mechanism and Machine Theory, Vol. 12, pp.85~93.
2. K. Yokoi, K. Tanie, N. Imamura, T. Kawai and K. Agou, 1991, "Design and Control of a Seven -degrees-of-freedom Manipulator Actuated by a Coupled Tendon-driven System", IROS '91, pp.737~742.
 3. Shugen MA, Hiroshi YOSHINANA, Taku YAMAZAKI, Shigeo HIROSE, 1991, "Development of Coupled Tendon-driven Multijoint Manipulator", Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.725~730.
 4. Makoto Kaneko, Tadashi Yamashita and Kazuo Tanie, 1991, "Basic Consideration on Transmission Characteristics for Tendon Drive Robots", fifth Int. Conf. on Advanced Robotics, Vol. 1, pp.827~832.
 5. Makoto Kaneko and Nobuaki Imamura, 1991, "Development of a Tendon-Driven Finger with Single Pulley-Type TDT Sensors", IROS '91, pp.752~757.
 6. Tsuneo Yoshikawa, 1990, "Foundations of Robotics : Analysis and Control", MIT Press.
 7. J. Kenneth Salisbury and John J. Craig, 1982, "Articulated Hand : Force Control and Kinematic Issues", The International Journal of Robotics Research, Vol. 1, NO. 1, pp.4~17.