

여유구동을 이용한 5관절 휴먼핑거의 개발

Development of a Five-bar Finger with Redundant Actuation

이재훈, 이병주*, 소병록*, 오상록**, 김병호**

*한양대학교 제어계측공학과(Tel: 0345 400-5218; Fax: 0345 406-6639; E-mail: bj@hyunpl.hanyang.ac.kr)

**한국과학기술원 정보전자부(Tel: 02 958-5757; Fax: 02 958-5709; E-mail: sroh@amadeus.kist.re.kr)

Abstracts In order to develop a human hand mechanism, a 5-bar finger with redundant actuation is designed and implemented. An optimal set of actuator locations and link lengths for the case of one redundant actuator is obtained by employing a composite design index which simultaneously consider several performance indices such as workspace, isotropic index, and force transmission ratio. Each joint is driven by an compact actuator mechanism having ultrasonic motor and a gear set with potentiometer, and controlled by VME Bus-based Control system.

Keywords : 5-bar Finger, Redundant Actuation, Isotropic Index, Force Transmission Ratio, Optimum Design, Ultrasonic Motor

1. 서론

로봇의 보다 다양한 작업을 위하여 말단 장치(end effector)로 사용하는 로봇 손은 사람의 손을 기본 모델로 하여 설계되어 왔으나 대부분 인체의 모양만이 고려되었기 때문에 사람 손이 지니는 다양한 성능을 충분히 발휘하지 못하였다. 또한 동력 전달을 위하여 텐던(tendon)을 사용하여 왔으나 마찰 등의 이유로 정밀한 제어를 할 수 없는 단점이 있었다.

본 논문에서는 초소형 고풍력 초음파 모터(ultrasonic motor)를 사용하여 관절을 직접 구동하며 인체 시스템과 같이 여유구동 모드를 지니는 5관절 휴먼 핑거의 최적 설계를 수행하고 개발한다. 어느 특정한 시스템의 모든 위치에서의 운동을 제어하는데 필요한 최소한의 파라미터의 개수를 모빌리티라고 하며 다음과 같은 관계식으로 정의된다.

$$M = N(L - 1) - \sum_{i=1}^J (N - F_i) \quad (1)$$

여기서, N , L , J , 그리고 F_i 는 각각 시스템의 작업 지점에서의 운동자유도, 시스템의 링크의 개수, 시스템의 관절의 수, 그리고 각 관절의 운동자유도를 나타낸다. 또한, 모빌리티 보다도 많은 액츄에이터로 시스템을 구동하는 경우를 여유구동(redundant actuation)된 상태라고 칭하며, 일반적인 인체 시스템은 이러한 구동모드를 지님을 살펴볼 수 있다[3, 4]. 여유구동 시스템의 경우, 구동 장치를 부착하는 위치와 개수에 따라 시스템의 성능이 달라진다. 따라서, 휴먼핑거의 최적설계는 구동장치의 개수와 위치 및 링크의 길이를 결정하는 문제로 귀결된다.

본 논문에서는 여유구동을 이용한 5관절 휴먼핑거의 최적설계를 수행하고 초음파모터를 사용하여 VME-Bus 기반의 시스템을 개발한다.

2. 기구학 모델링

2.1 5관절 휴먼핑거의 내부 기구학

5절 휴먼핑거의 형태를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 5관절 휴먼핑거는 모빌리티가 2이므로 두 개의 액츄에이터로 구동 가능하다. 그림 1의 모델은 변수 a 의 길이가 0인 형태로 많이 활용되고 있으며 지면에 연결된 두 개의 관절에 액츄에이터를 부착하는 것이 일반적인 경우이다. 그러나, 나머지 세 개의 유효관절들에도 액츄에이터를 부착하는 여유구동의 경우에

는 두 개의 독립관절들과 나머지 세 개의 종속관절들 간의 기구학적 연관관계에 대한 이해가 필요하다. 독립관절(θ_a)과 비독립관절(θ_b) 간의 일차기구학 관계식은 아래와 같이 주어지며[5],

$$\theta_b = [G_a^b] \theta_a \quad (2)$$

여기서 $[G_a^b]$ 는 독립관절들과 종속관절들 간의 일차 기구학적 영향계수를 나타낸다. 마찬가지로 방식으로 일차기구학적 영향계수 $[H_{aa}^b]$ 이 구해진다[1].

독립관절들과 종속관절들 간의 힘평형 관계식은 식 (2)의 속도 관계와 힘관계의 이중관계로부터

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = [G_a^b]^T \begin{pmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

와 같이 주어지며, 이러한 시스템이 모든 관절 액츄에이터로 여유구동된 경우에는 독립관절에 대하여 표현된 전체 구동력은 다음과 같이 표현된다.

$$T_a^* = T_a + [G_a^b]^T \begin{pmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} = [G_a^b]^T T_b \quad (4)$$

여기서

$$[G_a^b] = \begin{bmatrix} I \\ [G_a^b] \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_a = (T_1 \ T_2)^T, \quad T_b = (T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5)^T \quad (6)$$

2.2 5관절 휴먼핑거의 외부기구학

말단장치의 위치와 페루프 체인의 독립 관절과의 관계를 나타내는 외부기구학에 대하여 살펴본다. 페루프 체인의 Open-Tree Structure에서의 r번째 직렬형 매니플레이터 체인의 관절들(${}^r\phi$)은 종속 관절과 독립 관절로 이루어져 있기 때문에 다음과 같이 시스템 전체의 독립 관절의 향으로 표현될 수 있다.

$${}^r\phi = [{}^rG_a^b] \phi_a \quad (7)$$

여기서 $[{}^rG_a^b]$ 는 $[G_a^b]$ 의 요소들로 구성되며, 식 (7)을 r번째

직렬 체인의 속도관계식에 대입하여 말단장치와 독립 관절과의 관계를 다음과 같이 구한다.

$$\dot{u} = [G_u^a] \dot{\phi}, \dot{\phi} = [G_u^a]^{-1} [G_u^a] \dot{\phi}_a = [G_u^a] \dot{\phi}_a \quad (8)$$

여기서, $[G_u^a]$ 는 입출력의 차원이 동일할 때에는 유일하게 존재하는 함수이나 여유구동(즉, 입력이 출력보다 많을 경우)의 경우에는 유일하게 정의되지 않고 여러 가지 경우가 존재한다.

3. 여유구동 휴먼핑거의 기구학적 최적설계

3.1 민감도 해석

여유구동에 따른 기구학적 설계인자로서 구동크기, 링크길이 및 구동기의 위치 등이 있으나 본 절에서는 구동기의 개수와 링크길이의 변화가 기구학적 성능지수에 미치는 영향을 살펴본다. 전체 작업공간에서의 성능지수의 산술평균을 대표값으로 하여 인자들의 변화에 따른 대표값의 변화를 해석한다. 첫 번째와 두 번째 관절에 구동기를 장착한 경우와 비교하여 두 번째 관절을 제외한 나머지 관절에 구동기를 장착한 경우에 각각의 최대 힘 전달비의 평균값이 $\Sigma_{F_{av}} = 2.89$ 에서 $\Sigma_{F_{av}} = 1.469$ 로 낮아졌으며 구동기의 개수가 많을수록 최대 힘 전달비가 향상됨을 알 수 있다. 또한 (1,3,4,5)관절에 구동기를 부착시킨 경우에 있어 l_1 과 a 를 변화시킬 때의 작업영역 내부에서 최대 힘 전달비의 변화를 살펴보면 지면의 두 관절간의 거리인 a 가 커질수록 최대 힘 전달비가 낮아짐으로 성능이 향상됨을 알 수 있었으며, 이는 지면의 기초가 넓을수록 말단의 힘에 대하여 관절의 구동기에 걸리는 부하가 작아짐을 나타낸다.

3.2 최적화 기법

본 연구에서 수행한 최적화는 구속조건이 있는 다변수 최적화 문제이다. 따라서, 구속조건이 없는 최적화 문제로 만드는 데 Exterior Penalty Function Method를 사용하였고, Powell's Method로 이것의 해를 구하였다. Powell's method에서 단일 방향으로의 최소화는 Quadratic Interpolation Method를 사용하였다.[7]

3.3 기구학적 설계지수

기구학적 최적설계에 사용한 설계지수는 작업공간의 면적, 자코비안(Jacobian)의 등방성지수(Isotropic Index), 최대 힘전달비(Force Transmission Ratio)이다. 작업공간은 매니플레이터의 목적에 따라 충분한 영역을 확보할 수 있어야 하며 논문에서는 핑거의 용도에 필요한 특정 부위를 설정하여 핑거의 끝점이 도달할 수 있는 영역의 넓이를 W 로 표기한다.

자코비안의 등방성지수(Isotropic Index)는 다음과 같이 정의한다.[2]

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (9)$$

여기서 σ_{\max} , σ_{\min} 는 자코비안 $[G_u^a]$ 의 최대, 최소 특이값이다. $[G_u^a]$ 의 특이값은 $[G_u^a][G_u^a]^T$ 의 고유값의 양의 제곱근이다. 등방성지수는 Manipulability Ellipsoid에서 최장축 대 최단축의 비로서 설명되는데 이 값이 1에 가까워질수록 Manipulability Ellipsoid는 원에 가까워진다. 이는 그 지점에서 핑거 끝점이 모든 방향에 대하여 고른 속도분포를 지닌다는 것을 의미한다. 반대로 작업공간내의 특이점에서는 등방성지

수가 0이 된다. 전 작업공간에 걸쳐서 분포된 등방성지수의 대표값으로 전역 등방성지수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Sigma_I = \frac{\int_W \sigma_I dW}{\int_W dW} \quad (10)$$

다음은 최대 힘 전달비(Maximum Force Transmission Ratio) σ_F 이다. 정적상태에서 σ_F 는 말단장치에서의 힘벡터 T_u 의 크기 $\|T_u\|$ 와 구동장치에서의 힘벡터 T_A 의 크기 $\|T_A\|$ 의 비이다. $\|T_A\|$ 와 $\|T_u\|$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\|T_A\|^2 = T_A^T T_A \quad (11)$$

$$\|T_u\|^2 = T_u^T T_u \quad (12)$$

$$T_u = [G_u^A]^T T_A \quad (13)$$

따라서,

$$\|T_u\|^2 = T_A^T [G_u^A] [G_u^A]^T T_A \quad (14)$$

$$\frac{\|T_u\|}{\|T_A\|} = \left\{ \frac{T_A^T [G_u^A] [G_u^A]^T T_A}{T_A^T T_A} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

이며, Rayleigh Quotient에 의하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\sigma_{\min} \|T_A\| \leq \|T_u\| \leq \sigma_{\max} \|T_A\| \quad (16)$$

따라서, 힘 전달계수 σ_F 는 다음과 같은 범위에 존재하게 된다.

$$\frac{1}{\sigma_{\max}} \leq \sigma_F = \frac{\|T_u\|}{\|T_A\|} \leq \frac{1}{\sigma_{\min}} \quad (17)$$

윗 식에서 힘전달계수의 최대값 $\frac{1}{\sigma_{\min}}$ 을 최대 힘전달비(Force Transmission Ratio)라 한다. 힘 전달계수는 말단장치에서의 힘을 버티기 위해서 구동장치가 어느 정도의 힘을 내어야 하는지를 나타낸다. 즉, 최대 힘전달비는 단위크기의 힘이 말단장치에 가하여질 때 구동장치에서 필요로 하는 최대의 힘의 크기를 나타낸다. 그러므로, 최대 힘전달비가 작을수록 구동장치에 부가되는 부하가 작아진다고 할 수 있다. 작업공간 전체의 최대 힘전달비를 대표하는 전역 최대 힘전달비 Σ_{F} 는 등방성지수와 마찬가지로 다음과 같이 구한다.

$$\Sigma_F = \frac{\int_W \sigma_F dW}{\int_W dW} \quad (18)$$

다음으로는 여러 설계지수들을 하나의 지수로 포함시키는 방법을 설명한다. 여러 개의 전역설계지수(Global Design Index)들을 하나로 묶어주기 위해서는 설계지수들의 크기를 상대적으로 같게 만들어주는 설계지수의 무차원화가 필요하다. 이들을 각각 GDI_{\max} , GDI_{\min} 이라 하면, 설계지수를 최대화시키려는 경우, 무차원화된 설계지수는

$$\tilde{GDI} = \frac{GDI - GDI_{\min}}{GDI_{\max} - GDI_{\min}} \quad (19)$$

으로 정의되고, 최소화시키려는 경우는

$$\tilde{GDI} = \frac{GDI_{\max} - GDI}{GDI_{\max} - GDI_{\min}} \quad (20)$$

로 정의된다.[7] '~'는 무차원화되어 그 값이 0과 1사이에 존

제한하는 것을 의미한다. 복합설계지수(Composite Global Design Index)는 다음과 같이 주어진다.[7]

$$CGDI = \min\{\widehat{GDI}_1^\alpha, \widehat{GDI}_2^\beta, \dots\} \quad (21)$$

여기서 α, β 는 가중치들로 1보다 큰 값을 가진다. 상대적으로 중요한 설계지수에 대하여 큰 가중치를 주어 다른 설계지수보다 더 많이 최적화시킬 수 있다. 이렇게 구하여진 복합설계지수의 최대값을 구하면 그때의 설계인자의 값들이 우리가 구하고자 하는 최적화 문제의 해이다.

기구학적 최적설계에서 사용한 세가지 설계지수는 설계인자의 구속조건을 만족하는 범위 내에서 최대값과 최소값을 가지는데 이 값을 사용하여 다음과 같이 무차원화 한다.

$$\tilde{W} = \frac{W - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \quad (22)$$

$$\tilde{\Sigma}_I = \frac{\Sigma_I - \Sigma_{I\min}}{\Sigma_{I\max} - \Sigma_{I\min}} \quad (23)$$

$$\tilde{\Sigma}_F = \frac{\Sigma_{F\max} - \Sigma_F}{\Sigma_{F\max} - \Sigma_{F\min}} \quad (24)$$

기구학적 복합설계지수(Kinematic Composite Design Index) $KCDI$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$KCDI = \min\{\tilde{W}^\alpha, \tilde{\Sigma}_I^\beta, \tilde{\Sigma}_F^\gamma\} \quad (25)$$

위의 $KCDI$ 값이 최대일 때의 설계인자들의 값이 우리가 원하는 최적설계의 해이다.

3.4 기구학적 최적설계

본 연구에서 대상으로 삼은 기구학적 설계인자는 그림 1과 같으며 다음과 같은 구속조건을 두었다.

$$l_1 + l_2 = 0.3m \quad (26)$$

$$l_3 \geq 0.07m \quad (27)$$

$$l_4 \geq 0.07m \quad (28)$$

$$l_5 \geq 0.02m \quad (29)$$

l_1, l_2 로 이루어진 첫 번째 체인의 각 링크의 길이는 최소한의 작업영역을 보존하기 위하여 일정한 값을 유지하며, l_2 는 (26)식에 의하여 독립된 설계인자의 집합에서 제외되어 l_1 에 따라 결정되게 하였다. 또한 l_3, l_4 는 링크 내부에 구동기가 장착되어야 하므로 최소길이의 구속조건을 둔다. l_5 는 손가락 끝지점에 관절을 설치하기 위한 공간으로 최소길이의 구속조건을 둔다. 대상 작업영역은 손가락의 작업을 고려하여 아래와 같이 정한다.

$$0.01m \leq x, y \leq 0.3m \quad (30)$$

이상의 구속조건과 작업영역에 대하여 $\alpha = 1, \beta = 4, \gamma = 1$ 로 등방성비에 가중치를 준 경우와 $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 4$ 로 최대 힘 전달비에 가중치를 준 경우에 대하여 최적화를 수행하였다. 그림 2와 그림 3은 최적설계 전후의 작업영역에서의 등방성비의 분포를 나타내며 그림 4와 그림 5는 최적설계 전후의 최대 힘 전달비분포를 나타낸다. 각각의 경우에 있어서 등방성비는 높아지며 최대 힘 전달비는 낮아지는 성능의 향상을 볼 수 있다. 표 1은 초기상태 즉, 각 링크의 길이를 단위길이로 하였을 때의 각 성능지수와 최적설계를 수행한 이후의 결과를 비교한다. 하나의 여유구동이 있는 경우들에 대한 분석을 한 결과는 345관절에 구동기를 장착한 경우가 등방성비나 최대 힘 전달비 두 경우에 있어 모두 가장 우수한 성능을 지님을 나타낸다. 반면에 두 개의 여유구동을 지닌 경우를 살펴보면, 예를 들어서 1345관절에 구동기를 장착한 경우는 345관절에 구동기를 장착한 경우에 비하여 성능이 향상된다는 보장을 할 수 없음을 보여준다. 따라서, 많은 수의 구동기를 장착하는 것이 반드시 좋은 성능을 나타내는 것은 아님을 알 수 있다.

4. 여유구동 휴먼핑거의 개발

4.1 휴먼핑거의 구조

그림 6은 본 연구에서 개발한 휴먼 핑거의 외형을 나타낸다. 다섯 개의 관절 중 첫 번째와 두 번째 관절을 제외한 나머지 세 개의 관절에 구동기를 장착하였으며, 이들 중 지면의 관절은 바닥에 구동기를 부착하였고 네 번째, 다섯 번째 관절은 링크에 구동기를 삽입하였다. 기존의 텐던 구동 방식과는 달리 초음파 모터를 기어박스 및 포텐쇼미터와 함께 장착하여 관절을 직접 구동하므로 텐던으로 인한 마찰 등의 문제점을 극복하였다.

4.2 초음파 모터의 특성

휴먼핑거의 구동 장치로 사용한 초음파 모터는 초음파 진동에너지를 이용하여 모터의 회전자와 고정자의 마찰력을 회전력으로 변환시키는 모터로서 크기 대 토크 비가 크고 가벼우며 자계의 영향을 받지 않는 등의 장점을 지니며 정량적인 특성은 표 2에 기술하였다.[6]

5. 결론

본 논문에서는 여유구동을 지니는 5절 휴먼 핑거의 최적 설계를 수행하고 이를 근거로 하여 시스템을 구현하였다. 최적 설계의 결과로 구동기의 개수와 부착위치 및 링크의 길이가 기구학적 성능 변화에 중요한 변수가 됨을 알 수 있었다. 실제 메카니즘을 초음파 모터를 구동기로 사용하여 제작하였다. 향후 연구 과제로는 여유구동의 특성을 활용한 강성제어와 주파수제어 및 다지손가락의 휴먼 핸드로의 확장 및 적용등이 있다.

6. 후기

본 논문은 KIST 휴먼로봇 프로젝트 연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Yi, B.-J. and Freeman, R. A., Geometric analysis of antagonistic stiffness in redundantly actuated parallel mechanisms. *Special Issues on Parallel Closed-Chain Mechanism, Journal of Robotic systems* Vol. 10, pp. 581-603 (1993).
- [2] Yi, B.-J. and Tesar, D., 1991, "On the Optimal Design of a Redundantly Actuated 4-Legged Six Degree of Freedom Manipulator", Internal Report, Robotics Group, the University of Texas at Austin.
- [3] Spence, P. A., *Basic human anatomy*. The Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc. (1986).
- [4] Yi, B.-J. and Freeman, R. A., Modeling and control of impedance properties in biomechanical systems. *Proceeding of ASME WAM, Advances in bioengineering BED-Vol. 20*, pp. 521-524 (1991).
- [5] Kang, H. J., Yi, B.-J., Cho, W. and Freeman, R. A., Constraint-embedding approaches for general closed-chain system dynamic in terms of a minimum coordinate set. *The 1990 ASME Biennial Mechanism Conference, DE-Vol. 24*, pp. 125-132 (1990).

[6] 김병호, 유범재, 오상록, 서일홍, 박종오, 이종원, 초음파 모터를 이용한 다관절 로봇 손가락의 개발, 제어 자동화 로보틱스 종합 학술대회, 1996.

[7] Lee, S.H., Yi, B-J., Kwak, Y.K., Optimal Dynamic Design of Anthropomorphic Robot Module with Redundant Actuators. KSME Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 265-276 (1996)

134 actuation	W_{area}	Σ_I	Σ_F
initial case	5.76	0.3920	1.5632
isotropic opt.	2.78	0.5713	1.2562
force opt.	4.30	0.4598	1.1634
234 actuation	W_{area}	Σ_I	Σ_F
initial case	5.76	0.3053	1.9618
isotropic opt.	6.05	0.5172	1.5416
force opt.	4.07	0.4888	1.2885
345 actuation	W_{area}	Σ_I	Σ_F
initial case	5.76	0.3740	1.8138
isotropic opt.	6.17	0.6560	1.3368
force opt.	4.37	0.4975	1.1462
1345 actuation	W_{area}	Σ_I	Σ_F
initial case	5.76	0.3723	1.4693
isotropic opt.	5.37	0.6122	1.0725
force opt.	4.60	0.5243	1.0394

표 1. 최적설계 결과

Driving Frequency	50KHz
Drive Voltage	110Vrms
Maximum Torque	0.1Nm(1Kgf · cm)
Rated Speed	250rpm
Weight	20g

표 2. 초음파 모터의 특성

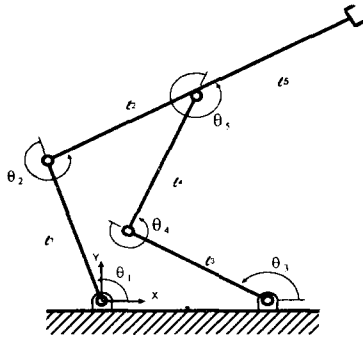


그림 1. 5관절 휴먼핑거

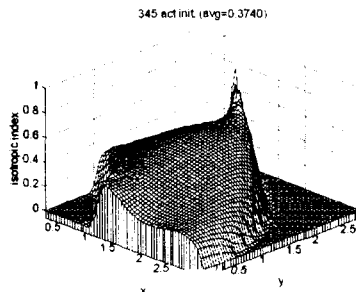


그림 2. 초기의 등방성비

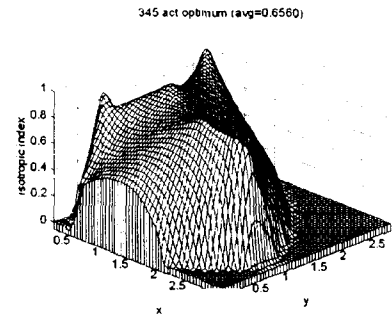


그림 3. 최적설계후의 등방성비

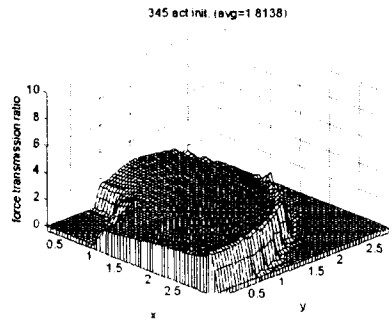


그림 4. 초기의 최대 힘 전달비

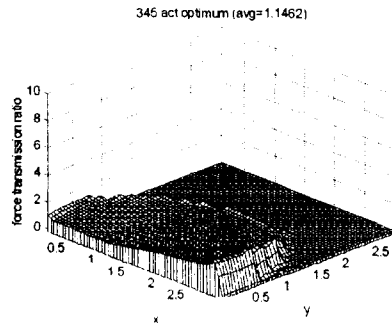


그림 5. 최적설계 후의 최대 힘 전달비

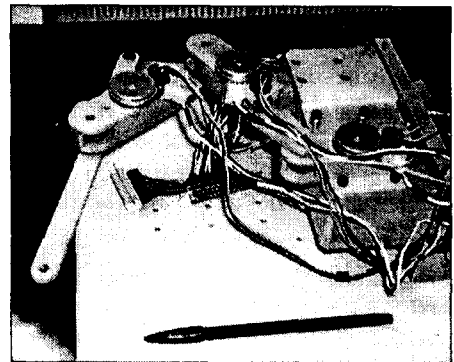


그림 6. 5관절 휴먼핑거의 사진