

# 로봇 손을 위한 인간 손가락의 관절간 운동특성 고찰

김병호<sup>#</sup>

## A Study on Characteristics of Inter-Articular Coordination of Human Fingers for Robotic Hands

Byoung Ho Kim<sup>#</sup>

### ABSTRACT

One of challenging topics for humanoid hands is to modulate a human-like motion of humanoid fingers handling an object. To this end, recognizing the motion behavior of human fingers is very important aspect. Based on this concept, this paper identifies the joint trajectories of human fingers for an operation of hand opening and closing, and specifies an empirical model that coordinates an inter-articular relationship of human fingers doing the given motion. It is expected that the inter-articular model presented in this paper is applicable for humanoid fingers to mimic the natural motion of human fingers.

**Key Words** : humanoid hand (휴먼로봇 손), human-like motion (인간형 운동), inter-articular relationship (관절간 연관성)

### 1. 서론

최근에 인간의 역할을 대신할 휴먼로봇을 개발하기 위한 연구가 세계적으로 다양하게 진행되고 있는데, 두 발로 걸을 수 있고 간단한 대화를 할 수 있는 등 팔목할만한 성과가 나오고 있다.<sup>1-3</sup> 이러한 휴먼로봇이 사회의 일원으로서 어떤 주어진 작업을 원활히 수행하기 위해서는 보다 자연스러운 운동기능을 구현할 수 있는 로봇 손의 개발 및 제어방법에 관한 연구가 필수적인 것으로 인식되고 있다.<sup>4-8</sup> 또한, 로봇 손을 이용하여 물체를 파지하고 조작하여 조립하는 등의 작업을 수행하기 위해서는 물체의 모양이나 크기 등의 기하학적인 인식도 중요하며, 기본적으로 안정된 파지 및 조

작을 위한 다양한 알고리즘이 요구된다.<sup>9-12</sup> 특히, 휴먼로봇이 인간과 유사한 동작을 수행하기 위해서는 인간의 다양한 개체(머리, 몸통, 다리, 팔, 손, 등)의 동작을 적절히 모방하여 장점을 활용하는 것도 필요하다.<sup>13,14</sup> 따라서, 인간이 손을 이용하여 물체를 조작하는데 있어서 나타나는 다양한 조작형태의 특징을 분석하는 것은 휴먼로봇 손의 자연스러운 동작을 구현하는데 있어서 매우 중요하게 여겨지고 있다.<sup>15,16</sup> 결국, 다지 손에 의한 물체의 조작은 관절공간에서의 관절운동에 의해 이루어지기 때문에 인간의 손 동작을 흉내내기 위해서는 인간 손가락의 운동경로에 대한 분석이 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 휴먼로봇 손으로의 응용을 위하여 인간 손가락의 자유운동에서

접수일: 2005년 8월 30일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

# 교신저자: 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부

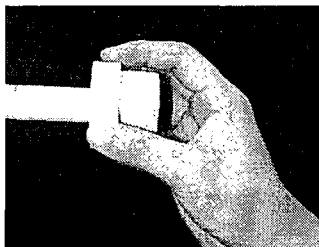
E-mail kimbh@ks.ac.kr Tel. (051) 620-4692

나타나는 손가락 관절간의 기구학적 연관성을 분석하고, 관절간의 운동에 관계된 수학적 모델링을 제시하고자 한다. 제시된 관절간의 연관성 모델링은 휴먼로봇 손의 운동기능을 보다 자연스럽게 만들기 위한 다양한 알고리즘에 유용하게 활용될 수 있다.

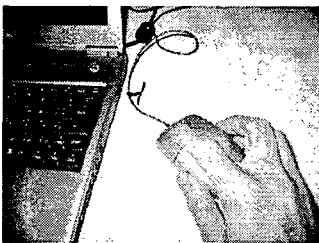
2 장에서는 인간 손가락의 자유운동에 의해 결정되는 손가락 끝점의 경로를 획득하는데 활용하기 위한 기구학 관계식을 기술한다. 3 장에서는 인간 손가락의 관절간 연관성에 관한 모델을 찾아내기 위한 실험결과를 제시하고, 4 장에서 결론을 맺는다.

## 2. 휴먼로봇 손가락의 기구학

Fig. 1 에 나타낸 것과 같이 인간의 손은 다양한 모양의 물체를 파지하거나 조작하는 것이 가능하고, 여러 가지의 파지형태를 활용한다는 것이 알려져 있다.<sup>15,16</sup> 또한, 어떤 하나의 정해진 파지형태에 대하여 각 손가락의 형성구조는 다양하게 조합될 수 있다. 그런데, 인간의 손가락 움직임을 잘 살펴보면, 어떤 관절간에는 의존적 운동경향을 경험적으로 확인할 수 있다.



(a) Peg



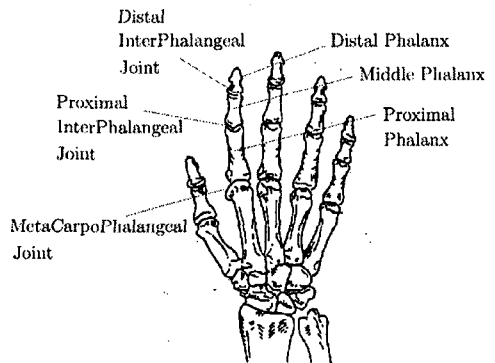
(b) PC mouse

Fig. 1 A human hand manipulating an object

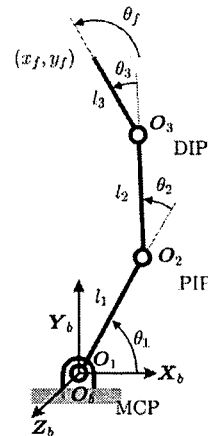
예를 들어, Fig. 1(b)와 같이 일상생활에서 흔히

볼 수 있는 컴퓨터 작업에서 사용되는 마우스를 조작하는 경우, 사용되는 인간의 손가락 움직임을 관찰해 보면 쉽게 알 수 있다. 특히, 마우스 조작을 위하여 집게 손가락의 끝점이 움직일 때 각 관절간에는 어떤 연관된 움직임을 확인할 수 있으며, 손가락의 자세도 항상 변화한다는 사실을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 휴먼로봇 손으로의 응용을 위하여 인간 손가락의 관절간 연관성을 확인하여 간단한 모델을 제시하는데 초점을 맞춘다. 이를 위하여 Fig. 2(a)에 제시된 인간 손가락의 골격구조를 살펴본다. 그리고 집게손가락(index finger)의 구조를 Fig. 2(b)와 같이 2 차원 평면에서 동작하는 휴먼로봇 손의 집게손가락(index finger)으로서 고려하고자 한다. 여기서 휴먼로봇 손은 정상적인 인간의 손가락 구조를 모방한 로봇 손가락을 지닌 손을 의미한다.



(a) Skeletal structure



(b) Planar structure of the index finger

Fig. 2 A structure of human fingers

Fig. 2(b)에 나타낸 손가락의 각 링크(link)  $l_i(i=1,2,3)$  는 각각 Fig. 2(a)에 나타내었듯이 인간 집게손가락의 근위지골(Proximal phalanx), 중지골(Middle phalanx), 원위지골(Distal phalanx)에 대응될 수 있다. 그리고 관절공간  $O_i(i=1,2,3)$  에 배치된 각 관절은 인간 손가락의 중수지절(MCP, MetaCarpophalangeal joint) 관절, 근위지절(PIP, ProximalInterPhalangeal joint) 관절, 원위지절(DIP, Distal InterPhalangeal joint) 관절로 고려될 수 있다. 이러한 구조는 가운데손가락(middle finger), 약손가락(ring finger), 새끼손가락(little finger)의 경우에도 동일하게 적용될 수 있다.<sup>17,18</sup> 한편, 엄지손가락의 경우는 조금 다르기 때문에 여기서는 다루지 않는다.

Fig. 2(b)에서 손가락의 기구학 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_f = l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} \quad (1)$$

$$y_f = l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123} \quad (2)$$

$$\theta_f = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (3)$$

여기서  $x_f$  와  $y_f$  는 각각 손가락의 MCP 좌표계를 중심으로 한  $x$  축과  $y$  축 방향의 위치를 나타내고,  $\theta_f$  는 손가락 끝점의 자세를 나타내며, 축약된 삼각함수 파라미터는 다음과 같다.

$$c_i = \cos(\theta_i), \quad c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j),$$

$$c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k), \quad s_i = \sin(\theta_i),$$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), \quad s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k).$$

위에서 기술한 기구학 관계식은 인간 손가락의 자유운동에 의해 결정되는 손가락의 관절정보로부터 손가락 끝점의 경로를 획득하는데 활용하게 된다.

### 3. 인간 손가락의 관절간 연관성 모델 : 실험 및 검토

#### 3.1 실험방법

인간의 손이 일반적인 물체의 파지나 조작작업을 수행할 때 손가락의 관절간에 어떤 연관성이 존재한다는 것을 경험적으로 알 수 있는데, 이러한 관찰을 바탕으로 본 논문에서는 손가락 관절간의

연관성을 실험적으로 고찰한다. Fig. 3 은 인간 손의 움직임을 통하여 각 손가락의 기구학적 운동경로를 분석하기 위한 PC 기반 CyberGlove 신호처리 시스템을 나타낸다. 여기서 사용된 CyberGlove 는 Immersion 사<sup>19</sup> 에서 개발한 것으로서, 이것을 Fig. 3 에서 보는 것과 같이 인간의 손에 장갑처럼 끼운 후 손가락을 움직이면, 손가락의 운동에 따른 각 손가락의 관절각 정보를 실시간으로 얻을 수 있다.



Fig. 3 A PC-based CyberGlove data acquisition system

본 논문에서 손가락의 관절간 연관성을 확인하기 위하여 주어진 일은 모든 손가락을 동시에 자유롭게 펼친 상태에서 주먹 쥐기 및 펴기 동작을 반복적으로 수행하는 것이다. 다양한 크기의 손가락에 대한 특성을 고찰하기 위하여 저자의 오른손가락 4 개에 대한 실험결과를 제시한다. 즉, 집게손가락, 가운데손가락 및 새끼손가락의 경로데이터를 분석한다. 엄지손가락의 경우는 지골구조 및 관절운동특성이 조금 다르기 때문에 다루지 않는다. 각 손마디의 길이는 Table 1 과 같이 측정되었으며, 일반적으로 정상적인 사람들에게 있어서 손가락의 길이는 가운데손가락의 길이가 가장 길고, 약손가락이 집게손가락보다 조금 길며, 새끼손가락의 길이가 가장 짧은 것으로 알려져 있다.

Table 1 Phalangeal parameters of the right hand of the author

Finger	Length (m)			
	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_1 + l_2 + l_3$
Index	0.050	0.030	0.025	0.105
Middle	0.058	0.035	0.028	0.121
Ring	0.055	0.032	0.025	0.112
Little	0.045	0.025	0.022	0.092

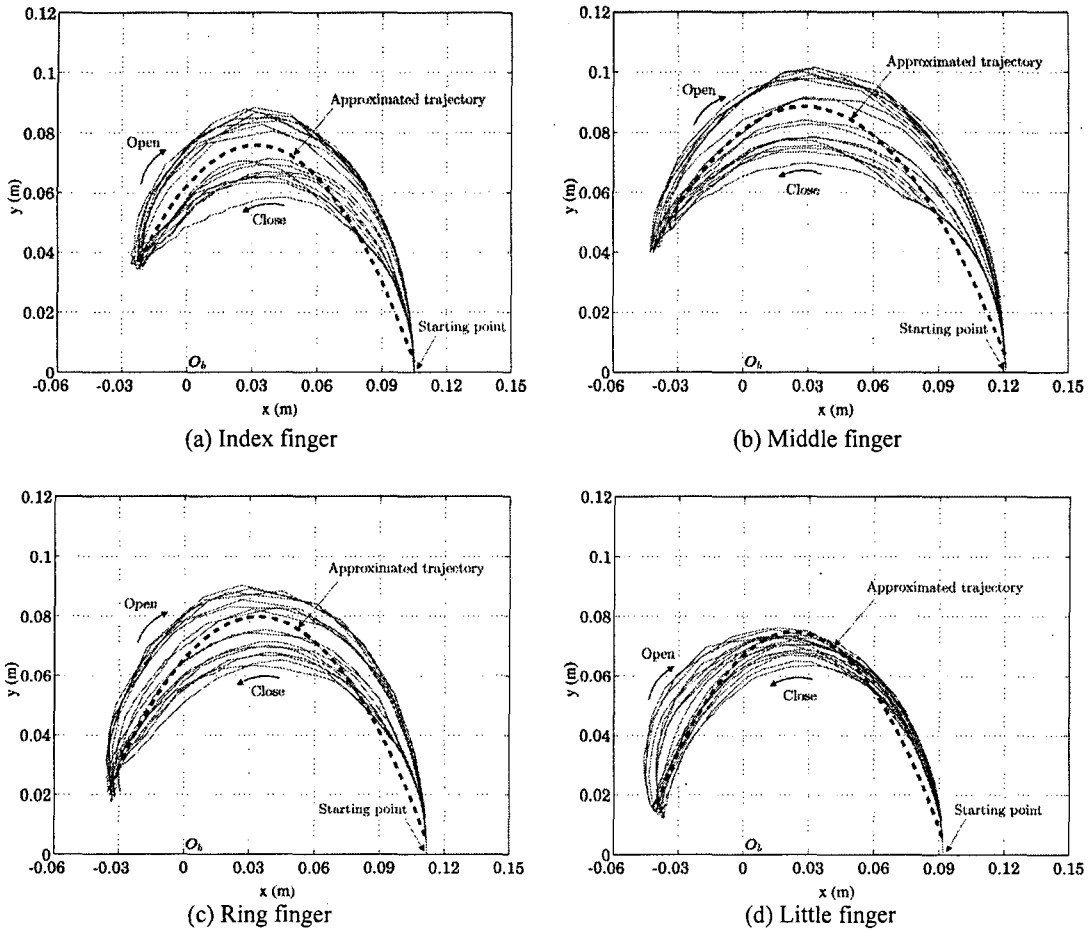


Fig. 4 Trajectory profile of each fingertip for hand opening and closing

### 3.2 손가락 끝점의 운동경로

Fig. 4 는 자유공간에서 모든 손가락을 동시에 자유롭게 펼친 상태에서 주먹 쥐기 및 펴기 동작을 반복적으로 수행하는 작업을 통하여 얻은 각 손가락 끝점의 운동경로를 나타내며, 식 (1)과 (2)를 이용하여 얻었다. Fig. 4 에 나타난 경로의 출발점(starting point)은 손가락을 펼친 상태를 나타내며, 이 점의 x 축 좌표는 Table 1 에 나타난 것과 같이 각 손가락의 길이에 상응한다. 손가락의 운동은 5 초 동안 반복적으로 진행하였다.

Fig. 4 에서 보는 것과 같이, 실험을 통하여 확인할 수 있는 각 손가락의 운동경로의 패턴은 주먹을 쥘 때와 펴는 동작간에 약간의 차이는 있지만, 전반적인 경로 패턴은 파선으로 표시된 경로와 같이 매우 유사하며, 개략적으로 다음과 같은 2 차

함수로 근사화될 수 있음을 알 수 있다.

$$y = a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (4)$$

여기서  $a_0$ ,  $a_1$  및  $a_2$ 는 MATLAB 을 이용하여 근사화한 2 차 함수의 계수를 나타내며, 각 손가락에 대한 계수는 Table 2 에 제시하였다.

Table 2 Parameters of the second-order function approximated by MATLAB

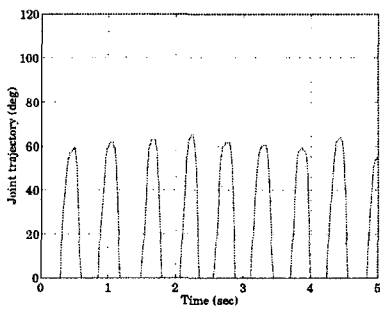
Finger	Coefficient			Remarks
	$a_2$	$a_1$	$a_0$	
Index	-13.5273	0.8612	0.0622	Fig. 4(a)
Middle	-9.7340	0.5567	0.0806	Fig. 4(b)
Ring	-12.3470	0.8406	0.0655	Fig. 4(c)
Little	-14.5773	0.6683	0.0670	Fig. 4(d)

결과적으로, 손가락에 따라 계수들이 다르게 나타남을 Table 2로부터 확인할 수 있는데, 이것은 각 손가락의 길이가 Table 1에서 보는 것과 같이 다르기 때문으로 분석할 수 있다.

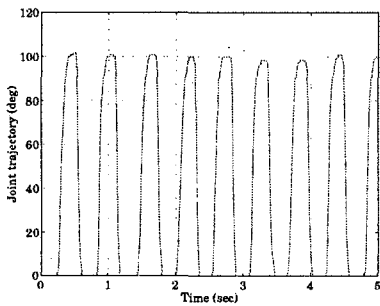
### 3.3 손가락의 관절경로 및 상대적 관절경로

다음은 Fig. 4에 나타낸 각 손가락 끝점의 운동 경로를 생성해내는 각 손가락 관절의 경로를 분석한다.

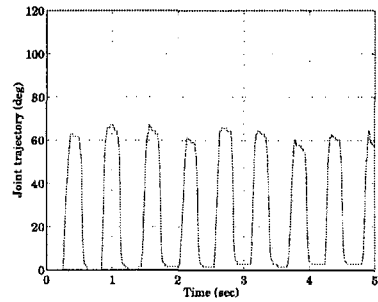
Figs. 5, 6, 7, 8은 Fig. 4에 나타낸 각 손가락 끝점의 경로에 따른 각 손가락의 관절경로를 보여주고 있다. 각 손가락 끝점의 경로를 살펴보면, 손가락을 오므렸다가 펴는 동작을 하기 때문에 관절경로의 경향이 전반적으로 정현적인 파형이 반복됨을 알 수 있다. 그런데, 각 관절의 신호파형의 크기가 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 물리적으로 각 관절의 운동범위가 다르다는 것을 의미할 뿐만 아니라 어떤 연관성을 포함하고 있다는 것을 예측할 수 있다. 따라서 이러한 물리적인 관절간의 움직임에 있어서 각 손가락의 관절간 경로 데이터를 비교 분석함으로써 어떤 연관성을 찾아내고자 시도하였다. 즉, 각 손가락의 관절간 상대적 운동경로를 고찰하였다.



(a) MCP joint

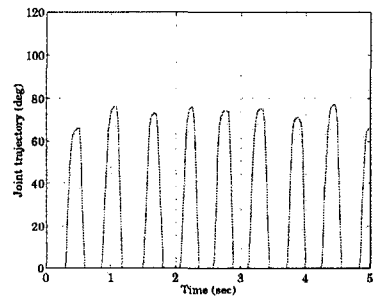


(b) PIP joint

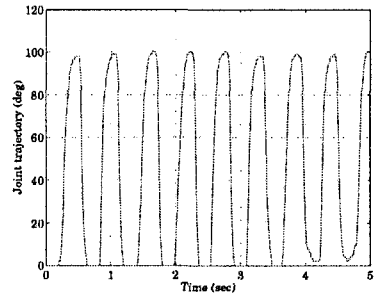


(c) DIP joint

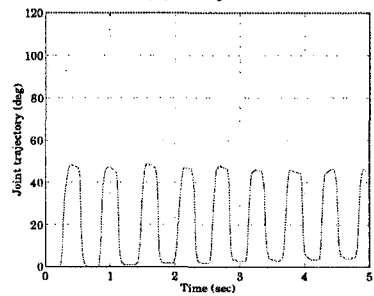
Fig. 5 Joint trajectories of the index finger



(a) MCP joint

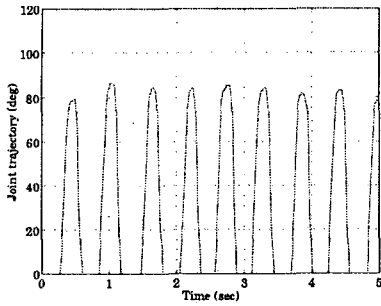


(b) PIP joint

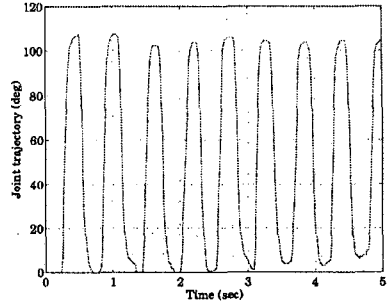


(c) DIP joint

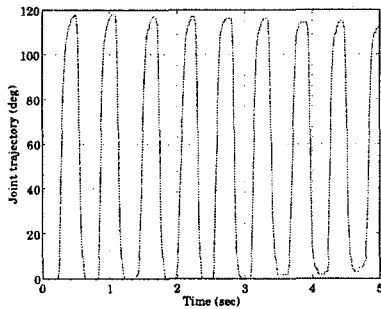
Fig. 6 Joint trajectories of the middle finger



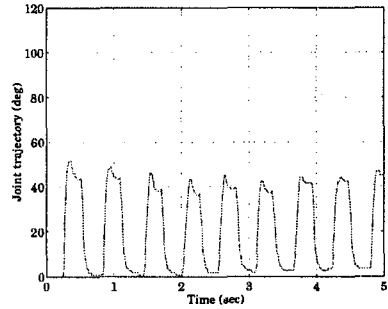
(a) MCP joint



(b) PIP joint

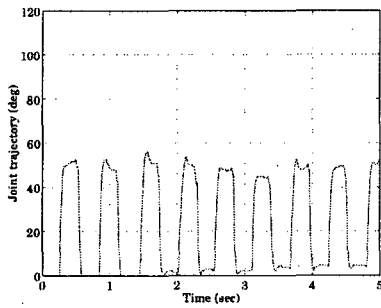


(b) PIP joint



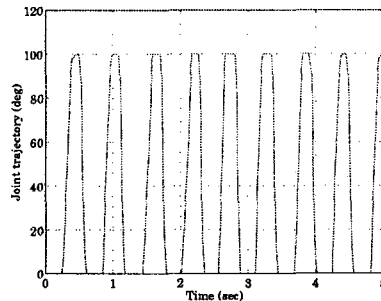
(c) DIP joint

Fig. 8 Joint trajectories of the little finger



(c) DIP joint

Fig. 7 Joint trajectories of the ring finger



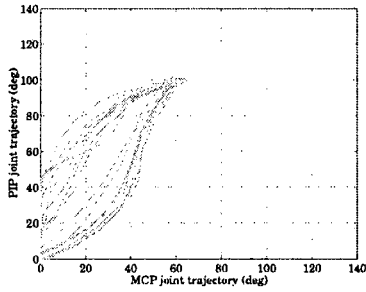
(a) MCP joint

Figs. 9, 10, 11, 12 에는 각 손가락의 관절간 상대적 운동경로를 나타내었다. 여기서 보는 바와 같이 각 손가락의 중수지절(MCP) 관절과 근위지절(PIP) 관절 그리고 중수지절(MCP) 관절과 원위지절(DIP) 관절간에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않는다. 한편, Fig. 9(c), Fig. 10(c), Fig. 11(c), Fig. 12(c)를 살펴보면, 파선으로 표시된 근사화된 손가락의 운동경로와 같이 각 손가락의 PIP 관절과 DIP 관절간의 운동경로에는 어떤 일정한 비례관계가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것을 수학적으로 근사화하면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

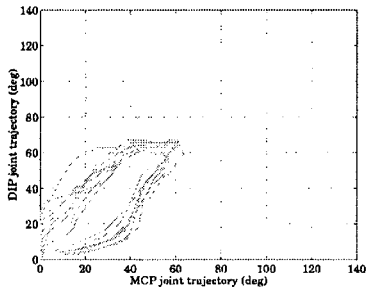
$$\theta_3 = b_1\theta_2 + b_0 \quad (5)$$

여기서  $b_0$ 와  $b_1$ 은 MATLAB 을 이용하여 근사화한 1 차 함수의 계수를 나타내며, Table 3 에 제시하였다.

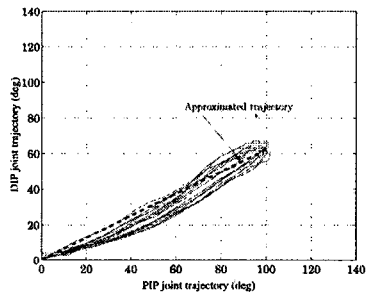
물리적으로 이러한 경향은 인간 손가락의 운동에 있어서 원위지절(DIP) 관절의 운동은 근위지절(PIP) 관절의 운동에 어느 정도의 비율로 의존적임을 의미하며, 정상적인 사람들의 손가락 운동을 경험적으로 관찰함으로써 쉽게 확인할 수 있다.



(a) MCP vs PIP

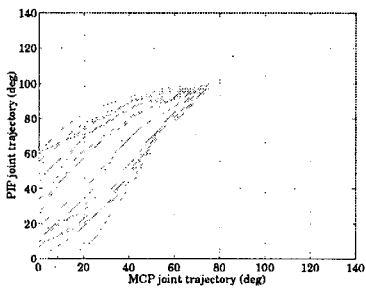


(b) MCP vs DIP

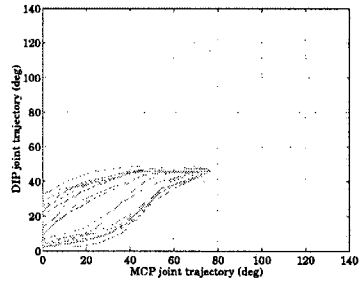


(c) PIP vs DIP

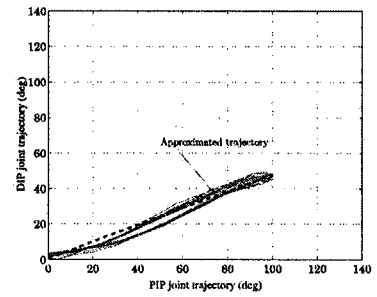
Fig. 9 Inter-articular joint trajectories of the index finger



(a) MCP vs PIP

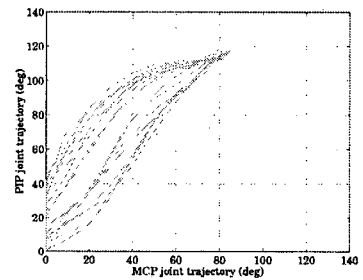


(b) MCP vs DIP

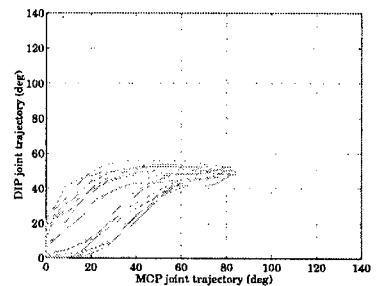


(c) PIP vs DIP

Fig. 10 Inter-articular joint trajectories of the middle finger



(a) MCP vs PIP



(b) MCP vs DIP

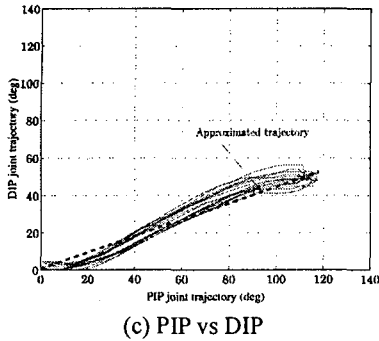
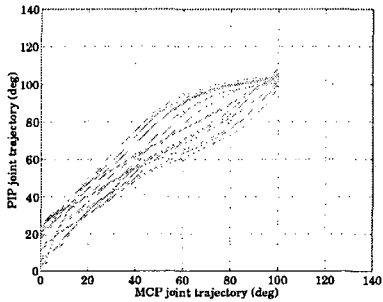
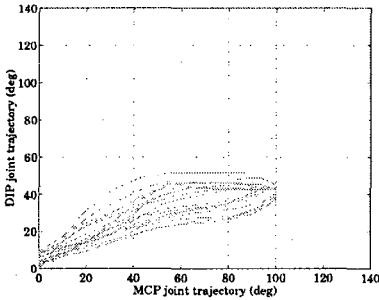


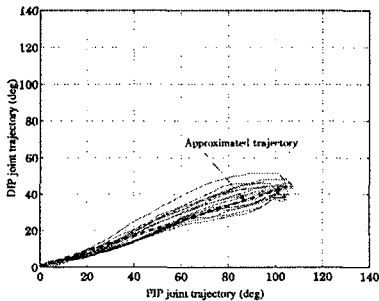
Fig. 11 Inter-articular joint trajectories of the ring finger



(a) MCP vs PIP



(b) MCP vs DIP



(c) PIP vs DIP

Fig. 12 Inter-articular joint trajectories of the little finger

Table 3 Parameters of the linear function approximated by MATLAB

Finger	Coefficient		Remarks
	$b_1$	$b_0$	
Index	0.6175	0.4199	Fig. 9(c)
Middle	0.4715	0.7023	Fig. 10(c)
Ring	0.4390	0.7336	Fig. 11(c)
Little	0.4143	0.5665	Fig. 12(c)

Table 3 을 살펴보면, 원위지절(DIP) 관절과 근위 지절(PIP) 관절간의 물리적인 운동연관성비를 의미 하는  $b_1$  파라미터의 값이 손가락에 따라 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, 이것은 Table 1 에서 보는 것과 같이 각 손가락의 물리적인 길이가 서로 다르기 때문에 일어날 수 있는 현상으로 분석된다.

결과적으로 인간 손의 주먹 쥐기 및 펴기 동작에 있어서 각 손가락의 관절간에 적절한 기구학적 운동비가 존재함을 확인할 수 있다. 휴먼로봇 손가락으로의 응용 측면에서 볼 때, 근위지절(PIP) 관절의 운동에 의해 원위지절(DIP) 관절이 운동하는 범위를 간접적으로 결정해 줄 수 있는 것이기 때문에 손가락의 운동경로 계획 단계에서 유용하게 이용될 수 있다. 이러한 관계식을 경로계획에 도입하면, 휴먼로봇 손가락의 운동패턴이 정상적인 인간의 손가락 운동 패턴과 매우 유사하게 계획될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 인간 손의 주먹 쥐기 및 펴기 동작을 통하여 손가락 관절간의 연관성을 실험적으로 고찰하였다. 결과적으로 손가락을 모두 펼친 상태에서 주먹을 쥐었다 펴는 동작을 반복적으로 수행할 경우, 손가락 끝점의 운동경로 패턴은 2 차원 함수로 근사화할 수 있음을 확인하였으며, 모델 변수는 손가락의 길이에 따라 다르게 나타날 수 있음을 확인하였다. 또한, 인간의 손가락 운동에 있어서 각 손가락의 근위지절(PIP) 관절과 원위지절(DIP) 관절간의 기구학적 운동연관성이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었으며, 비례관계식으로 근사화할 수 있음을 보였다. 이러한 연구결과는 휴먼로봇 손가락의 운동경로 계획단계에서 유용하게 이용될



수 있고, 이러한 관계식을 경로계획에 도입함으로써, 휴먼로봇 손가락의 운동패턴이 정상적인 인간의 손가락 운동 패턴과 매우 유사하게 계획될 수 있다. 추가적으로 휴먼로봇 손으로의 응용을 위해서는 정해지는 손가락의 길이에 따라 적절히 관절간의 연관성 파라미터를 사전에 결정해 주는 방법에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2005 학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. and Takenaka, T., "The development of Honda humanoid robot," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.
2. Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N. and Fujimura, K., "The intelligent ASIMO: system overview and integration," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483, 2002.
3. Kim, J. Y., Park, I. W., Lee, J., Kim, M. S., Cho, B. K. and Oh, J. H., "System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1443-1448, 2005.
4. Jacobsen, S., Iversen, E., Knutti, D., Jhonson, R. and Biggers, K., "Design of the Utah/MIT dextrous hand," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1520-1532, 1986.
5. Lovchik, C. S. and Diftler, M. A., "The Robonaut Hand: A dextrous robot hand for space," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 907-912, 1999.
6. Butterfass, J., Grebenstein, M., Liu, H. and Hirzinger, G., "DLR-Hand II: Next generation of dextrous robot hand," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 109-114, 2001.
7. Ueda, J., Ishida, Y., Kondo, M. and Ogasawara, T., "Development of the NAIST-Hand with vision-based tactile fingertip sensor," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2343-2348, 2005.
8. Yamano, I. and Maeno, T., "Five-fingered robot hand using ultrasonic motors and elastic elements," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2684-2689, 2005.
9. Cutkosky, M. R. and Kao, I., "Computing and controlling the compliance of a robotic hand," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 2, pp. 151-165, 1989.
10. Yoshikawa, T. and Zheng, X. Z., "Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object," Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 12, No. 3, pp. 219-230, 1993.
11. Shimoga, K. B., "Robot grasp synthesis algorithms: a survey," Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 15, No. 3, pp. 230-266, 1996.
12. Kim, B. H., Yi, B. J., Oh, S. R. and Suh, I. H., "Independent finger and independent joint-based compliance control of multi-fingered robot hands," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 19, No. 2, pp. 185-199, 2003.
13. Lin, J., Wu, Y. and Huang, T. S., "Modeling the constraint of human hand motion," Proc. of IEEE Human Motion Workshop, pp. 121-126, 2000.
14. Moldenhauer, J., Boesnach, I., Beth, T., Wank, V. and Bos, K., "Analysis of human motion for humanoid robots," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 312-317, 2005.
15. Cutkosky, M. R., "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, 1989.
16. Iberall, T., "Human prehension and dextrous robot hands," Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 16, No. 3, pp. 285-299, 1997.
17. Nordin, M. and Frankel, V. H., "Basic biomechanics of the musculoskeletal system," Lippincott Williams & Wilkins press, pp. 358-387, 2001.
18. Norkin, C. C. and Levangie, P. K., "Joint structure & function - A comprehensive analysis," F. A. Davis co., 1992.
19. <http://www.immersion.com/>, Immersion Co., USA.