

생리학적 수법을 이용한 로봇 핸드의 제어기술



김 일 환

(KIMM 자동제어실)

- '78~'82 서울대학교 공과대학 제어계측과(학사)
- '85~'88 서울대학교 공과대학 제어계측과(석사)
- '89~'93 일본 東北大學 기계공학과(박사)
- '82~현재 한국기계연구원 선임연구원



정 광 조

(KIMM 자동제어실장)

- '73~'77 연세대학교 공과대학 전기공학과(학사)
- '81~'83 연세대학교 공과대학 전기공학과(석사)
- '79~'83 한국과학기술원 연구원
- '83~현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

산업용 로봇은 생산현장의 자동화를 비롯하여, 우리 사회의 여러 분야에서 활약하고 있다. 산업용 로봇 연구에 있어서 manipulation이란, mechanical arm과 대상 물체와의 인터페이스(interface)를 다루는 것으로, 이 인터페이스를 엔드이펙터(end effector) 혹은 핸드(hand)라 한다. 그런데, 지금까지의 산업용 로봇의 응용은 스폿 용접, 위치 결정과 같은 단순 작업으로, 전용 엔드이펙터의 제작이 큰 비용부담이 되어 왔으며, 보다 복잡한 조립작업 등에 응용하기 위해서는 미세한 위치 및 힘 제어(fine position and force control)가 가능한 다관절형 핸드(multiple articulated hand)의 필요성이 증대되고 있다.

최초의 mechanical hand의 응용은 의수로서, 1509년 영국에서 전쟁도중 손을 잃어버린 기사를 위해 설계한 gripping 장치로 알려져 있다. 근래에는, 우주, 해양, 원자로와 같은 극한 작업환경에서 사람을 대신하여 작업하는 사람 손에 가까운 기능을 가진 핸드의 개발이 소개되고 있다. 즉, 사람은 안전한 장소에서 master-slave 혹은 teleoperation 시스템 방식을 이용하여 mechanical arm 및 핸드들을 원격조작하여 필요한 작업을 수행한다.

이러한 핸드의 연구에서 중요한 요소는 그림 1과 같이,

- (1) 핸드의 메카니즘 : 형상, 자유도, finger의 수, 재질 등
- (2) 센서 : 압각, 촉각, slip각, 온도각 등

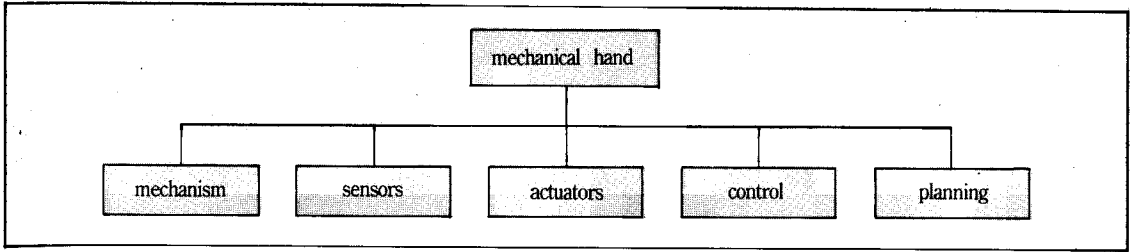


그림 1. mechanical hand의 요소 기술

(3) actuator 및 동력 전달기구 : 공기압, 유압, 전기모터, piezo소자 등

(4) 핸드의 제어 : 안정파지, 힘 제어 등

(5) planning : 파지를 위한 작업계획

등이다. 이와 같이 로봇 핸드는, 로봇 연구의 한 분야에 속하지만 실제로는 그 자체가 커다란 하나의 분야가 될 수 있다. 즉, 핸드는 여러개의 관절을 가진 finger의 합으로 구성되어, 수 많은 자유도를 가지며, 이를 고속, 고정도로 제어하기 위해서는 각 finger에 위치 및 힘 센서외에 촉각센서를 필요로 하며, 다양한 작업을 위한 planning 등의 연구가 필요하다.

로봇 핸드를 연구하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는, 핸드와 대상 물체와의 기구학적 성질을 연구하는 해석적인 방법이다. 다른 하나는, 사람의 손을 연구하는 생리학적 수법이다. 해석적인 방법에서는 파지의 물리적, 기구적인 성질을 연구한다. 즉, finger와 물체가 접촉시 slip현상, 파지의 안정성(stability), 위치 및 힘의 관계 등을 연구한다. 한편, 사람손은 간단한 물건을 잡는 일에서 피아노의 건반을 치는 것과 같이 아주 복잡한 작업을 수행할 수 있는 유능한 엔드이펙터이다. 고로, 사람 손과 같은 동작을 로봇 핸드로 실현하기 위해서는 사람의 파지 동작을 연구함으로써 로봇 핸드로 어떠한 작업을 수행하는데 있어서 파지 자세의 선택이나 효율적인 핸드의 설계에 도움이 될 것이다.

본고에서는, 로봇 핸드의 연구에 있어서 핸드의 메카니즘 설계 및 제어에 관한 연구방법으로, 사람 손의 동작을 분석하여 이를 로봇 핸드에 적용하는 생리학적 방법에 관한 연구를 소개하고자 한다.

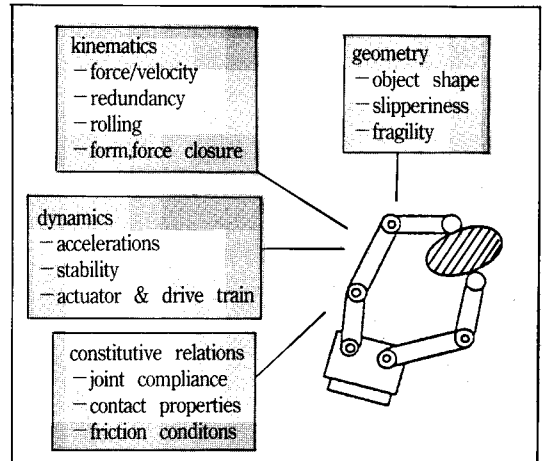


그림 2. grasping과 manipulation의 해석적인 연구내용

2. 해석적인 방법에 의한 파지 연구

로봇 핸드에 의한 파지(grasping) 혹은 manipulation은, 그림 2에서와 같이, open 및 closed kinematic chain의 조합, 여유 자유도(redundant degrees of freedom), 소프트 finger 및 전달기구와 actuator의 비선형 특성 등으로 아주 복잡하다. grasping에 관한 연구로서는, Salisbury[2],[3]가 screw theory를 이용하여 다관절 핸드의 설계에 지침이 되는 kinematic analysis를 제공하였다. 또한, manipulation 과정을 모델링하여, 해석적인 방법에 의해 grasp를 선택하는 연구도 소개되고 있다. Kerr와 Roth[1]는 그림 3에서와 같이, 수행할 작업, 대상 물체 및 로봇 핸드의 제약(constraints)을 만족하는 최적의 해를 구하는 방법을 제안하였다. Nakamura 등[11]은 finger의 internal force를 최소화 하는 grasp를

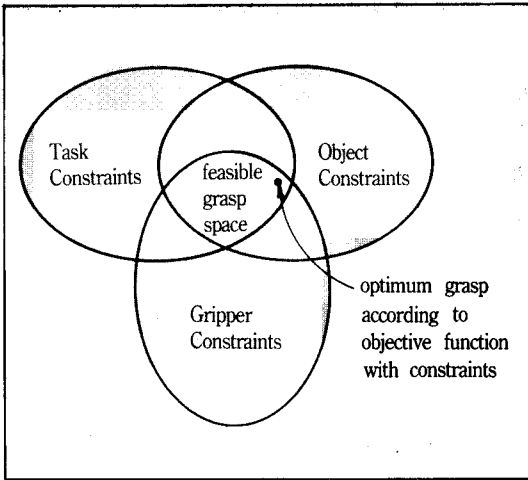


그림 3. 해석적인 방법에 의한 grasp의 선택

선택하는 방법을 소개하였다. 이 방식은 사람이 채택하고 있는 방식에 가장 비슷한 방식으로, slip을 방지하는데 필요한 최소의 힘을 결정하는 것이다.

그러나, 이와 같은 수 많은 해석적인 방법은 manipulation이 복잡한 관계로 거의 대부분이 단순화한 가정을 전제로 하기 때문에, 실제적인 환경하에서 로봇 핸드가 독립적으로 어떤 물건을 집어 들고, 주어진 작업을 수행하기에는 아직도 해결해야 할 문제점이 많다.

3. 생리학적 수법을 이용한 파지 연구

사람 손의 기능을 닮은 로봇 핸드를 개발하기 위해, 수행할 작업과 선택한 grasp의 관계를 이해하기 위한 사람손을 분석한 연구가 아주 오래전부터 소개되고 있다.

먼저, 사람 손의 골격 구조를 그림 4에 나타낸다 [6]. 엄지의 경우, 손목 쪽에 가까운 carpometacarpal joint는 전후와 좌우 각각 약 90°의 움직임이 가능한 2 자유도를 가진다. 그 다음의 metacarpal-phalangeal joint는 전후로 약 60°, 그리고 interphalangeal joint는 전후로 약 90°의 움직임이 가능하다. 엄지를 제외한 4개의 손가락은 각3개의 관절로 이루어져, 전체의 자유도는 20~25로 알려져 있다.

한편, 사람 손은 손가락과 손바닥을 움직여 대

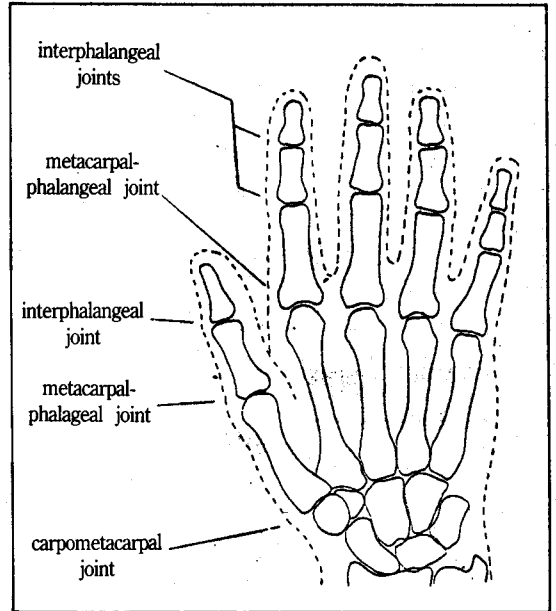


그림 4. 사람 손의 골격 구조

상물을 파지할 시에 대상물의 크기, 형태 및 작업 내용에 따라 수 많은 자세를 취할 수 있다. 이러한 사람의 파지 동작은 Schlesinger가 최초로 분류하였고, Taylor와 Schwart가 이를 요약하였다. 이 분류에서는 수행할 작업 내용보다는 대상물의 형태에 의존하고 있다. 즉, 사람의 파지 동작을 그림 5에서와 같이 cylindrical grasp, tip grasp, hook grasp, palmar grasp, spherical grasp 및 lateral grasp로 분류하고 있다[8].

Napier는, Taylor와는 달리, 사람의 파지 동작은 대상물의 형태에는 관계없고 단지 작업 대상에 의존하나, 가장 중요한 것은 안정성(stability)이라고 주장한다. 그래서, 안정성의 관점에서 power grip와 precision grip의 2가지로 분류하고 있다.

Cutkosky와 Wright[19]는 일반적인 작업보다는 특수한 환경 즉, 기계 가공현장에 사용하기 위한 효율적인 로봇 핸드의 설계를 위하여, 기계공의 파지 동작을 분석하여 그림 6에서와 같이, 계층적인 구조(hierarchical tree)로 분류하고 있다. 이 그림에서, 왼쪽에서 오른쪽으로 갈 수록 보다 작은 힘으로 잡아 정교한 동작이 가능하나, 대상물의 크기는 작아진다. 한편, 위쪽에서 아래쪽으로 갈

수작업 작업 내용보다는 대상물에 의존하게 된다.

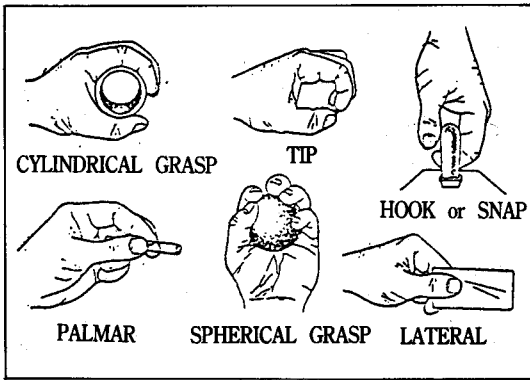


그림 5. Schlesinger가 분류한 6가지의 파지 자세

그러나, 지금까지의 대부분의 분류는 작업 내용에 따라 예외적인 파지 동작이 존재하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Iberall[18],[20]는, 실제 사람 손은 여러가지 파지의 조합을 사용한다는 사실에 착안하여, 손의 실제 구조와 대상물에 거의 무관한 virtual finger(VF)의 개념을 도입하여, 어떤 주어진 작업 내용에 대해 두 개의 VF를 사용하여 반대하는 힘(opposing force)을 인가하는 3가지의 기본적인 파지 자세를 정의하고 있다. 그림 7에서, Pad opposition은 엄지와 다른 손가락을 사용하므로 자세에 유연성과 정교한 동작이 가능하나 안정성이 부족하다. Palm opposition은 손바닥과 손가락을 이용하므로 안정성은

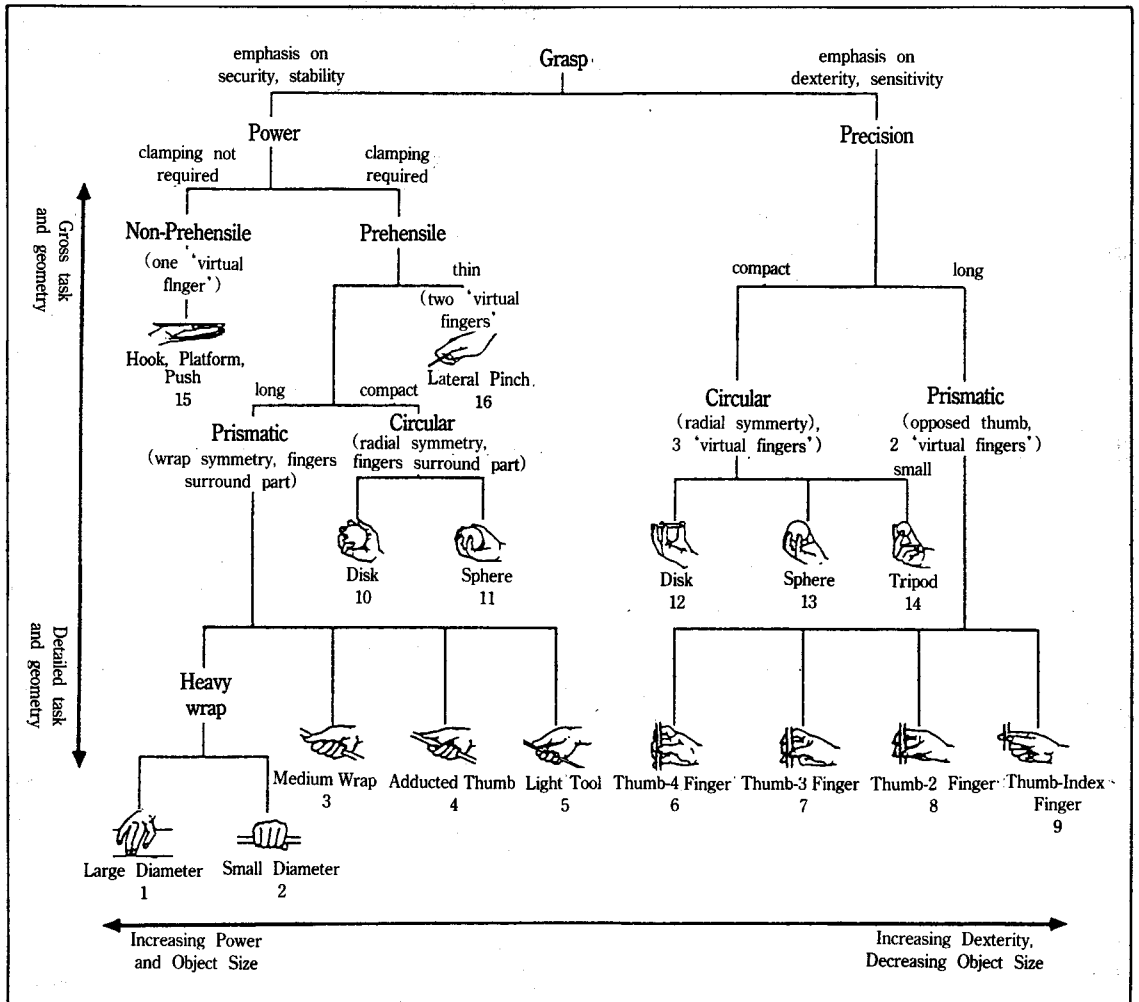


그림 6. Cutkosky 등의 기계 가공현장에서의 파지 자세 분류

증가하나 유연성이 부족하다. side opposition은 엄지와 검지의 옆면 혹은 다른 손가락의 옆면을 이용하므로 유연성과 정교성의 균형을 이루고 있다. 또, Lyons는 계산 모델(computational model)의 한 부분으로서 virtual finger 개념을 사용하여, Iberall과 마찬가지로 Encompass grasp, Lateral grasp 및 Precision grasp로 분류하고 있다.(그림 8.)

사람손의 파지에 관하여 지금까지 발표된 연구를 표 1에 나타낸다. 이러한 모든 분류는, 비록 제한된 환경하에서만 유용하고, 반드시 이상적인

파지 자세가 아니며, 또한 사람에 따른 차이 등이 존재하지만, 사람의 grasp를 code화가 가능하면, 로봇 핸드로 어떤 명시한 작업을 수행하고 안정된 파지를 달성하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

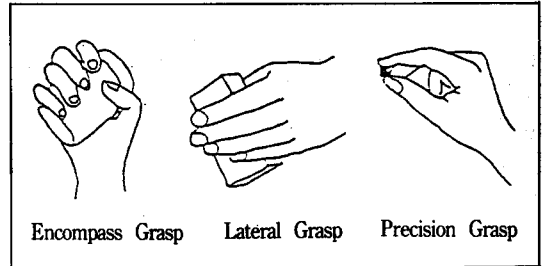


그림 8. Lyons의 분류

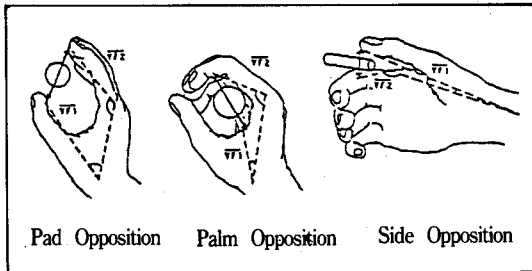


그림 7. Iberall의 분류

4. 다관절 로봇 핸드의 설계예

사람의 손에 가까운 기능 및 형상을 한 로봇 핸드의 대표적인 예로는, Stanford/JPL 핸드(1982)와 Utah/MIT 핸드(1983)가 소개되고 있다. 이들 핸드는, 핸드 자체의 무게와 volume를 줄이기 위하여 actuator를 핸드의 바깥 쪽에 놓고, 핸드와

표 1. 사람 손의 파지 동작 분류에 관한 연구

Researchers	Posture names		
Schlesinger(1919)	cylindrical grasp spherical grasp	palmar prehension tip prehension	hook prehension lateral pinch
McBride(1942)	whole hand grasping	thumb, finger grasping	palm, digits grasping
Griffiths(1943)	cylinder grip ball grip	pincer grip pliers grip	ring grip
Slocum and Pratt(1946)	grasp	pinch	hook
Napier(1956)	power grasp	precision grasp	hook grasp
Landsmeer(1962)	power grasp	precision handling	hook grasp
Iberall and Lyons(1984)	basic power modified power	basic precision/power basic precision	modified prec/power fortified prec/power
Lyons(1985)	encompass grasp	precision grasp	lateral grasp
Cutkosky and Wright(1986)	sm diam heavy wrap lrg diam heavy wrap medium wrap adducted thumb wrap light tool wrap	disk power spherical power hook 5 finger precision 4 finger precision	3 finger precision 2 finger precision disk precision spherical precision tripod precision lateral pinch

actuator간을 wire로 연결하는 tendon장력 제어형이다.

Stanford/JPL 핸드는 Salisbury 등[3],[25]이 개발한 것으로, 그림 9에서와 같이 각 3 자유도의 3개의 finger로 전부 9 자유도를 가지고 있다. actuator로서는 DC torque 모터를 사용하고 있으며, 유연한 관 속으로 wire를 배치함으로써, 관내의 마찰이 비교적 큰 단점이 있으나, 자유로이 관을 배치하는 것이 가능하며, 핸드를 compact하게 설계하는 것이 가능하다.

Utah/MIT 핸드[5]는 Utah대학의 Biomedical Design Center와 MIT대학의 Artificial Intelligence Lab. 이 공동으로 개발한 것으로, 지금까지의 핸드 가운데 가장 사람의 손에 가까운 핸드로 알려져 있다. 이 핸드는, 그림 10에서와 같이 각 4 자유도의 4개의 finger로 전부 16자유도이다. actuator로서는

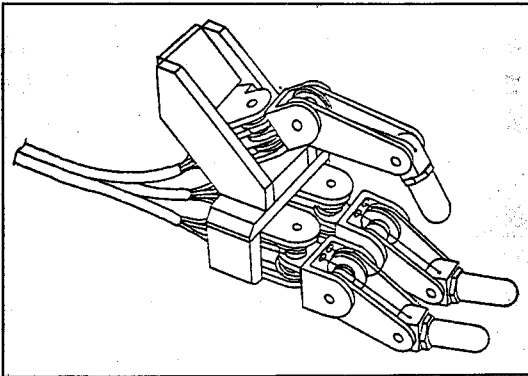


그림 9. Stanford/JPL 핸드

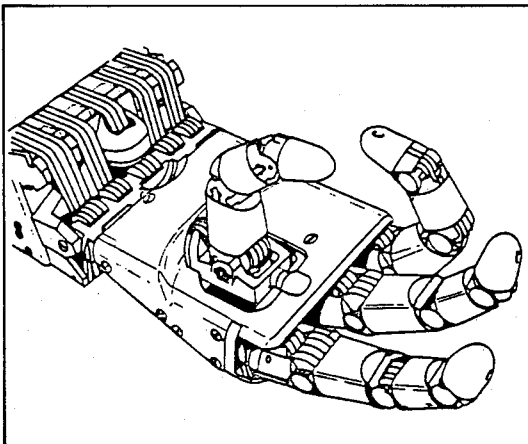


그림 10. Utah/MIT 핸드

공기압 실린더를 이용하여, pulley 전달기구를 사용하므로, 마찰이 작고 torque전달 특성이 좋은 반면, pulley 기구가 커서 핸드를 소형, 경량으로 설계하는 것은 어렵다. 핸드를 비롯한 전체 시스템의 구조를 그림 11에 나타낸다. 또, 그림 12에

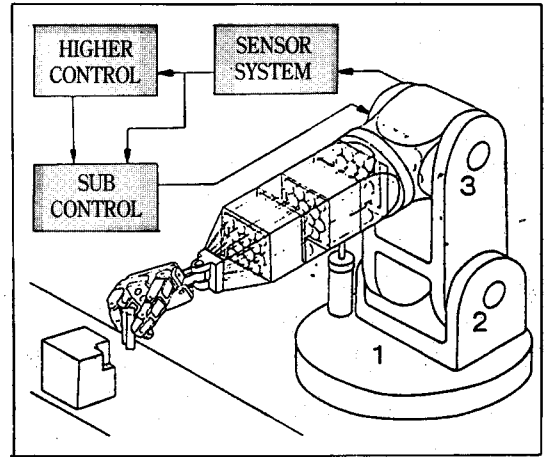


그림 11. Utah/MIT 핸드의 전체시스템

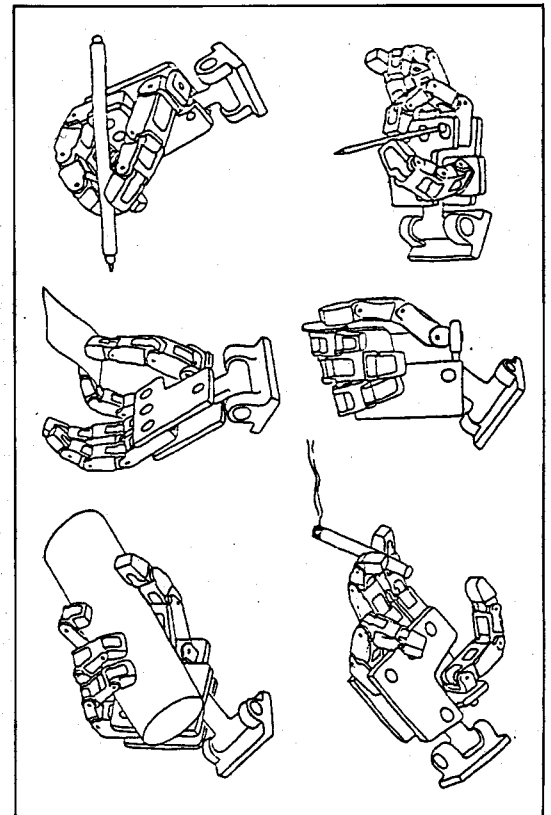


그림 12. Utah/MIT 핸드의 가능한 파지 자세

서는 이 핸드를 이용하여 사람손의 여러가지 파지 동작을 재현한 것이다.

한편, 일본에서는 의수에 관한 연구를 제외하면, Mori 등의 연구가 거의 선구적인 것으로, 그 이후 다수의 핸드가 제작되었다.

5. 결 론

본 고에서는, 로봇 핸드의 파지(grasping) 및 manipulation에 관한 연구로서 사람 손을 연구하는 생리학적 수법을 소개하였다. 로봇 핸드의 파지에 관한 해석적인 방법이 많이 소개되고 있지만, 로봇 핸드가 일반적인 환경하에서 독립적으로 어떤 물건을 집어 들고, 명시한 작업을 수행하기 위해서는 아직도 해결해야 할 점이 많다. 한편, 사람 손을 오랜 세월에 걸쳐 진화한 아주 유능한 엔드이펙터이므로, 사람 손의 다양한 동작을 분석하여, 이를 로봇 핸드의 기구 설계 및 제어에 응용하는 것이 가능할 것이다. 그러나, 사람 손의 모든 동작을 분류하는 것은 거의 불가능하므로, 사람의 동작을 흉내 내는 것 보다는, 작업 내용과 선택한 파지의 관계를 이해하여, 그 과정을 code화함으로써, 로봇 핸드의 파지 자세를 체계적인 방법으로 선택할 수 있을 것이다.

금 후의 연구과제로서는, 핸드의 기구 설계 및 제어 문제 이외에 센서와 actuator에 관한 연구를 생각할 수가 있다. 이미 개발된 촉각 센서가 많이 소개되고 있지만, 감도(sensitivity), 정도(resolution) 및 기하학적 구조 등의 개선이 필요하다. 또한, actuator 및 힘 전달기구는 핸드의 성능을 개선하는데 가장 큰 영향을 미치는 요소로, 보다 효율적이고 마찰이 작은 전달기구의 개발이 요구되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Kerr and B. Roth, "Analysis of Multifingered Hands," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 4, No. 4, pp. 3-17, 1985.
- [2] J. K. Salisbury and B. Roth, "Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands," Jour. of MTAD Trans. of ASME, Vol. 105, pp. 35-41, 1983.
- [3] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated Hands : Force control and Kinematic Issues," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [4] M. R. Cutkosky and P. K. Wright, "Friction, Stability and the Design of Robotic Fingers," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 5, No. 4, pp. 20-37, 1986.
- [5] S. C. Jacobsen et al., "The UTAH/M.I.T. Dextrous Hand : Work in Progress," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
- [6] H. R. Nicholls and M. H. Lee, "A Survey of Robot Tactile Sensing Technology," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 8, No. 3, pp. 3-30, 1989.
- [7] R. S. Fearing and J. M. Hollerbach, "Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 4, No. 3, pp. 40-54, 1985.
- [8] B. Mishra and N. Silver, "Some Discussion of Static Gripping and Its Stability," IEEE Trans. on S. M. C., Vol. 19, No. 4, pp. 783-796, 1989.
- [9] R. A. Grupen, T. C. Henders and I. D. Mccammon, "A Survey of General-Purpose Manipulation," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 8, No. 1, pp. 38-62, 1989.
- [10] V. Nguyen, "Constructing Stable Grasps," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 5, No. 1, pp. 26-37, 1989.
- [11] Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa, "Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms," Int. Jour. of Rob. Res., Vol. 8, No. 2, pp. 44-61, 1989.
- [12] H. Hanafusa and H. Asada, "Stable Prehension

- by a Robot Hand with Elastic fingers," Proc. of 7th Int. Symposium on Industrial robots, pp. 361-368, 1977.
- [13] T. Yoshikawa and K. Nagai, "Manipulation and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 1, pp. 67-77, 1991.
- [14] G. P. Starr, "Experiments in Assembly Using a Dextrous Hand," IEEE Trans. on R. A., Vol. 6, No. 3, pp. 342-347, 1990.
- [15] Y. C. Park and G. P. Starr, "Optimal Grasping using a Multifingered Robot Hand," Proc. IEEE Int. Conf. on R. A., pp. 689-694, 1990.
- [16] Y. C. Park and G. P. Star, "Finger Force Computation for Manipulation of An Object by A Multifingered Robot Hand," Proc. IEEE Int. Conf. on R. A., pp. 930-935, 1989.
- [17] M. R. Cutkosky, "On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks," IEEE Trans. on R. A., Vol. 5, No. 3, pp. 269-279, 1989.
- [18] T. Iberall, J. Jackson, L. Labbe and R. Zampano, "Knowledge-Based Prehension : Capturing Human Dexterity," Proc. IEEE Int. Conf. on R. A., pp. 82-87, 1988.
- [19] M. R. Cutkosky and P. K. Wright, "Modeling Manufacturing grips and Correlations With the Design of Robotic Hands, Proc. IEEE Int. Conf. on R. A., pp. 1533-1539, 1986.
- [20] T. Iberall, "The Nature of Human Prehension : three Dextrous Hands in One," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 396-401, 1987.
- [21] R. Tomovic, G. A. Bekey and W. J. Karplus, "A Strategy for Grasp Synthesis with Multifingered Robot Hands," Proc. IEEE Intenational Conference on Robotics and Automation, pp. 83-89, 1987.