

로봇 핸드핑거의 파지제어에 관한 연구 A Study on Grasping Control of Robotic Hand Fingers

심병균^{1*}, 정양근², 박인만², 황원준², 강언욱², 한성현³
Byoung-Kyun Shim^{1*}, Yang-Guen Jung², In-Man Park², Won-Jun Hwang²,
Un-Wook Kang², Sung-Hyun Han³

<Abstract>

This paper is the development of industrial robotic hand system and the design methods of industrial robot hand that can mimic human fingers motion. In order to overcome problems incurred during the reduction of the mobility, this study focuses on analyzing human hand structure and finger movements from an anatomical point of view. As a result, distinctive features that improve the discovered stability in constraints for range of motion in the fingers is reflected in this design concept. A 4-bar Linkage is used in robot finger structure. Lastly, there were experiments to inspect the developed robot hands performance. The developed robot hand has many potential applications and can be in many different fields.

Keywords : *Robotic hand, Grasping Control, 4-bar Linkage*

1. 서론

최근 과학기술이 급속도로 발전함에 따라 인간을 대신하여 사용될 수 있는 로봇의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 인간 손과 같이 동작할 수 있는 로봇의 핸드에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이는 단순한 작업의 반복만을 요구하던 기존의 산업용 로봇에 인간의 기능과 같은 고기능을 부가하여 복잡하고 정교한 부품의 조립, 유해환경에서의 숙련을 요구하는 작업 등과 같이 유연하고 능숙한 작업을 할 수 있는 로봇의 등장에 요구되고 있기 때문이다. 그러나 로봇의 핸드 시스템을 구성하는데 있어서 제한된 공간에 동력 전달장치와 많은 구동기기를 배치해야 하고 많은 수의 자유도는

로봇 핸드 시스템의 구조를 복잡하게 만드는 어려움을 가져온다. 이런 어려움을 극복하기 위해 많은 기술들이 시도 되었다. 첫 번째로 구동장치를 핸드 밖, 팔뚝에 설치하는 방법이 있다.¹⁾ 이것은 핸드의 구조가 간단하고 큰 출력을 낼 수 있으며 가볍다는 장점이 있는 반면 다른 로봇의 팔에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 다른 방법으로 모터나 공압 실린더를 대신 할 수 있는 출력이 크고 작고 가벼운 구동장치를 개발하려는 시도가 있다. 그리고 최근에 초음파 모터와 형상기억합금이 구동기로 사용된 예가 있다.^{2)~3)} 따라서 본 연구에서는 로봇 핸드핑거 시스템을 설계하는데 있어서 구형 및 실린더형 물체를 안정적으로 쥐기 위한 핑거 마디간의 구속 관계를 고려하였고 이를 위해서 인간 손

^{1*}정회원, 교신저자, 경남대학교 첨단공학과,
E-mail:shimbk@kyungnam.ac.kr

²정회원, 경남대학교 첨단공학과

³정회원, 경남대학교 기계공학부 교수, 工博

^{1*}Corresponding Author, Dept. of Advanced Engineering, Kyungnam University.

²Dept. of Advanced Engineering, Kyungnam University.

³Prof., School of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Ph. D.

가락 구조의 기하학적 특징을 로봇 핑거에 반영하였다.

본 연구의 목적은 안정적인 조임을 고려한 로봇 핸드핑거를 설계하고 시스템을 구성하는데 있다. 이를 위해 인간 손의 동작을 고찰하여 로봇의 핸드핑거 동작을 구현하였다.

2. 로봇 핸드 구조 설계

2.1 인간 손의 분석

Fig. 1은 인간 손의 동작범위를 기하학적 모습으로 나타내고 있다.

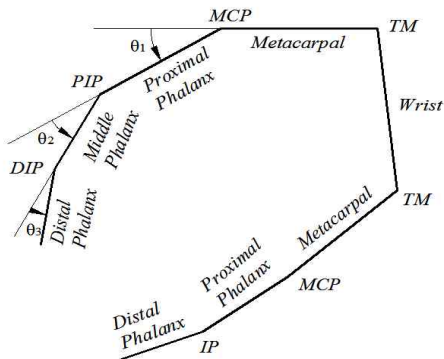


Fig. 1. Geometry of a human hand (θ_1, θ_2 and θ_3 are joints rotation angle of MCP, PIP and DIP)

Fig. 1에 표시된 인간 손가락의 동작범위는 손의 기하학적 결과에 의해 제한된다. 이 정적 구속은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} 0^\circ &\leq \theta_{MCP_F} \leq 90^\circ \\ 0^\circ &\leq \theta_{PIP_F} \leq 110^\circ \\ 0^\circ &\leq \theta_{DIP_F} \leq 90^\circ \\ -15^\circ &\leq \theta_{MCP_AA} \leq 15^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 식(1)로 모델링 되는 인간 손의 기하학적 특징을 로봇 핸드의 동작에 적용하기 위해 로봇 핑거의 각 마디간의 회전 각도를 인간 손가락의 동작범위에 맞추어 설계할 수 있다.

또한 인간 손가락은 작은 동작에도 구속을 받게 되는데 이를 동적구속이라 한다. 가령 DIP 관절을 구부리기 위해서는 외력이 작용하지 않는 이상 이에 해당되는 PIP 관절 또한 따라서 구부러지게 된다. 이 DIP 관절과 PIP 관절 사

이의 관계는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{DIP_F} = \frac{2}{3}\theta_{PIP_F} \quad (2)$$

식(2)에서 DIP 관절의 회전각이 PIP 관절의 회전각보다 작다는 사실을 알 수 있다. 이는 두 마디가 구속되어 DIP 관절이 과도하게 회전한다면 손가락의 중간 마디는 파지되는 물체와 접촉하지 못하게 된다. 물체의 모양과 크기에 따라 파지의 접촉 조건은 변화되기 때문에 두 관절 사이의 관계식은 결정되지 않는다.

2.2 로봇 핸드의 설계 개념

로봇 핸드를 설계하기 위해서 핑거의 횡운동은 무시되었고 중간과 끝마디는 첫째마디와 구속되었다. 핑거 마디 사이의 구속조건을 생성하기 위해 4절링크를 사용한다. 링크는 안정적인 성능을 내고 간단한 구조를 가지는 장점에 비해 비선형적인 동작을 하고 동작 위치에 따라 전달되는 토크가 변화하는 단점이 있다. 하지만 비선형적인 동작이나 토크의 변화는 기구학적 해석을 통해 예측 가능하다. 이는 Table 1과 같이 각 로봇 핑거 마디의 동작범위는 안정성을 높이기 위해 기하학적 결과들을 고려하여 결정하였고 각 손가락의 MCP 관절은 손바닥에 고정된다고 가정하였다.

Table 1. Designed movable ranges of phalanges

	MCP	DIP	PIP
로봇 핑거	0~80	0~90	0~85

2.3 로봇 핸드의 구조 해석

Fig. 2는 4절링크를 보여주고 있다. 링크0은 손의 프레임에 부착되고 링크1은 구동장치에 연결된다. 손가락의 다음 마디는 링크3을 통해 첫 번째 마디와 구속되어있다. 점 A에 중심을 두고 있는 원은 링크1에 고정되어있는 타이밍 풀리를 나타낸다. 여기서 링크1은 첫 번째 마디 프레임을 의미하고 링크2는 프레임 안에서 운동하는 막대를 나타낸다. 그리고 링크5는 두 번째 손가락 마디를 의미한다. 이 구조에서 결정되어야 할 파라미터들은 링크2의 길이 l_2 와 링크0이 x_1 축과 이루는 각 γ_1 이 된다. l_0 와 l_3 는 베

어링이나 폴리 등과 같은 기계요소들의 크기에 의해 결정되고 l_1 은 손가락 첫째 마디의 길이가 된다.

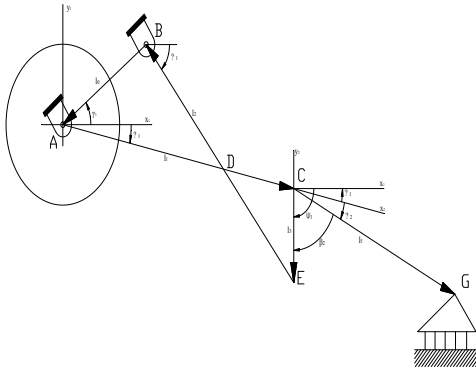


Fig. 2. Geometry of a 4-bar linkage with static reaction

한편, 기구학적 관계로부터 링크2와 3의 위치는 독립변수인 θ_1 에 대한 함수로 나타내어진다. 만약 다음 손가락 마디인 링크5의 상대적 위치를 θ_2 로 나타낸다면 두 마디 관절각 사이의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta_2 = \psi_1 - \beta_2 - \theta_1 \quad (3)$$

그리고 Fig. 2에서 링크2와 링크3의 절대 위치를 나타내는 ϕ_1 과 ψ_1 각은 다음의 식으로 결정된다.

$$\psi_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2^2 - C_3^2}}{C_2^2 + C_3^2} \quad (4)$$

$$\phi_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{D_1 + \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - D_3^2}}{D_2^2 + D_3^2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_1 = 2l_1l_3 \sin \theta_1 + 2l_0l_3 \sin \gamma_1 \\ C_2 = 2l_1l_3 \cos \theta_1 - 2l_0l_3 \cos \gamma_1 \\ C_3 = l_2^2 - l_0^2 - l_1^2 - l_3^2 + 2l_0l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} D_1 = 2l_1l_2 \sin \theta_1 + 2l_0l_2 \sin \gamma_1 \\ D_2 = 2l_1l_2 \cos \theta_1 - 2l_0l_2 \cos \gamma_1 \\ D_3 = -l_3^2 + l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 + 2l_0l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases}$$

식(3)에서 β_2 는 초기 위치에서 각 손가락 마디를 직선상에 놓이도록 하기 위한 상수가 되

도 파라미터의 변화에 따라 다르게 설정되어야 한다. 다음 손가락 마디로 전달되는 토크의 값을 최대로 만드는 값을 찾아야 한다.

2.4 로봇 핑거 설계

첫째마디와 둘째마디는 각각 4절링크로 구성되어 있고 셋째마디는 둘째마디의 링크에 연결된 하나의 링크로 이루어져 있다. MCP, PIP 그리고 DIP 관절의 상대적 회전각들을 각각 θ_1, θ_2 그리고 θ_3 로 표시할 때 θ_2 와 θ_3 는 독립변수 θ_1 에 대한 함수들로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_{MCP-F} \\ \theta_2 = \theta_{PIP-F} = \psi_1 - \beta_2 - \theta_1 \\ \theta_3 = \theta_{DIP-F} = \psi_2 - \beta_3 - \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 3은 개발된 로봇의 핑거 형상구조를 나타낸다.

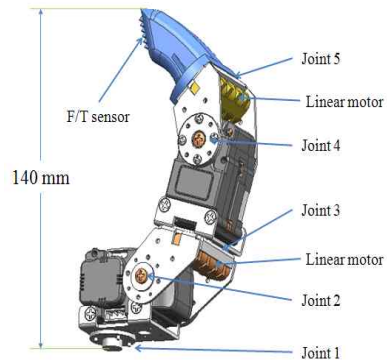


Fig. 3. The structure of the robot hand-finger

3. 성능실험

로봇 핸드의 성능을 실험하기 위해서 세가지의 실험을 하였다. 첫 번째 성능실험은 로봇 핸드 핑거를 초기 위치에서 최종 위치까지 구부리는데 걸리는 최소 시간을 측정하는 성능실험이 실시되었다. 로봇 핸드의 핑거 반응속도는 0.3초가 소요되었고 성능실험에서 측정된 핑거의 속도는 사람의 손가락이 움직일 수 있는 최대 속도와 비슷한 값을 보였다. 두 번째 성능실험은 로봇 핑거를 $0^\circ \sim 20^\circ$ 의 범위에서 움직이게 하여 주파수 응답 실험을 하였다. 성능실험의 결과 로봇 핸드 핑거가 안정적으로 따라갈 수

있는 가장 높은 주파수는 6Hz로 이는 로봇 핸드의 핑거가 아주 민첩하게 반응 할 수 있다는 것을 보여준다. Fig. 4은 설계개념에서 의도되었던 다양한 파지 동작들을 보여준다. 그리고 Fig. 5는 로봇 핸드 핑거를 초기 위치에서 최종 위치까지 구부리는데 걸리는 최소 시간 성능실험의 결과이고 Fig. 6는 주파수 응답 성능실험 결과이다.

로봇에 핸드 시스템을 장착하여 구형의 물체를 집어 옮기는 실험을 500회 반복 실험하였다. 그 결과 99.8%의 높은 성공률을 나타내었다. 이는 로봇 핸드 시스템이 물체를 안정적으로 파지할 수 있다는 것을 보여준다. Fig. 7은 로봇 핸드 시스템의 파지제어 실험장면을 나타내었고, Table 2는 로봇 핸드시스템의 파지제어 실험결과를 나타내고 있다

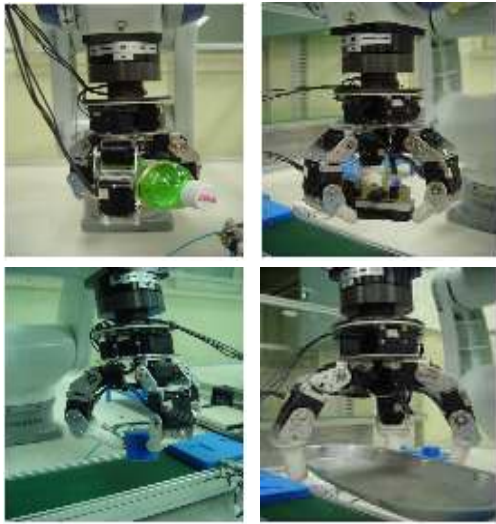


Fig. 4. Various grasping posture

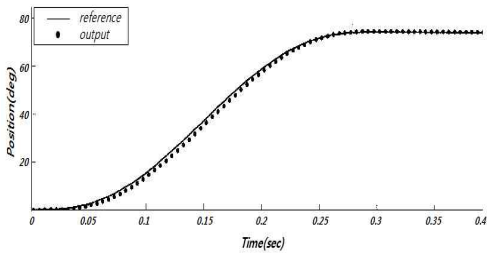


Fig. 5. Experiment result of robot hand-finger

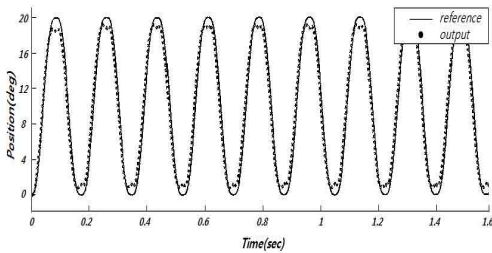


Fig. 6. Frequency response of robot hand-finger

세 번째 성능실험은 산업용 6축 수직다관절

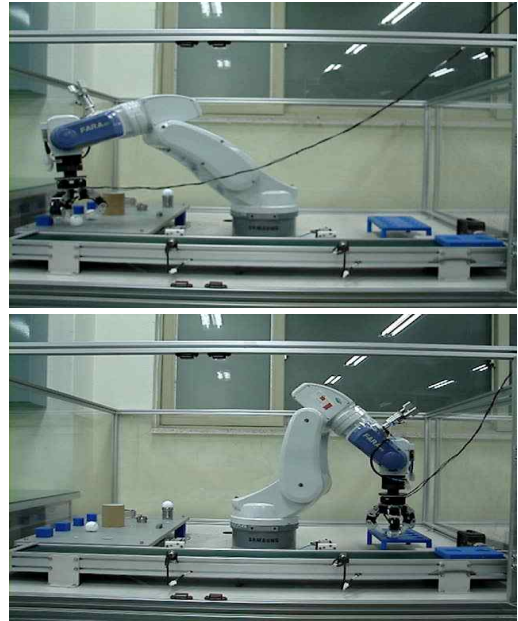


Fig. 7. Experiment of grasping control for robot hand system

Table 2. Result of Grasping control for robot hand system

실험횟수	결과
1차	성공
2차	실패
⋮	⋮
499차	성공
500차	성공
성공률	99.8%(성공 499회, 실패 1회)

성능실험에서 나타난 대로 자연스럽게 안정적으로 쥐는 동작들이 구현되었으며, 이것은 인간 손가락의 움직임에 대한 기하학적 데이터와 기구학적 분석에 근거한 설계가 로봇의 핸드를 제작하는데 있어서 효과적이라는 사실을 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업현장의 노동인력 대체용으로 인간 손가락 동작을 고찰하여 사람 대신에 로봇의 핸드가 작업을 할 수 있도록 하기 위해 산업용 로봇의 핸드핑거 시스템의 개발과 설계 방법을 제시하였다. 인간 손의 구조와 손가락의 동작을 기하학적 관점에서 분석하여 자유도를 줄이는데 발생하는 문제점을 극복하였고 그 결과 손가락 관절의 운동범위에 대한 구속 조건에서 발견된 안정성을 높이는 데에 기여하는 특징을 설계개념에 반영되었다. 손가락의 구조에는 4절링크가 사용되었고 마지막으로 개발된 핸드핑거의 성능을 검증하기 위한 로봇 핸드핑거의 파지제어 실험이 수행되었다. 결과적으로 개발된 로봇의 핸드핑거는 인간이 일상 생활에서 사용하는 대표적인 모양의 물체들 중 구형과 실린더형의 물체들을 자연스럽게 안정적으로 파지할 수 있었다. 앞으로 개발된 로봇 핸드핑거 시스템을 응용할 수 있는 부분은 많이 있다고 말할 수 있다.

참고문헌

- 1) Jacobsen S. C., Iverson E. K., Knutti D. F., Johnson R. T. and Biggers K. B., Design of the Utah/M.I.T. Dexterous Hand, Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Applications, pp. 1520-1532. (1986)
- 2) Maeno T. and Hino T., Miniature Five-fingered Robot Hand Driven by Shape Memory Alloy Actuators, Proceedings of the 12th LASTED international Conference Robotics and Applications, pp. 174-179. (2006)
- 3) Butterfass J., Grebenstein M., Liu H. and Hirzinger G., DLR-Hand II : Next Generation of a Dexterous Robot Hand, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 109-114. (2001)
- 4) Lovchic C. S., Diftler M. A., The Robonaut Hand :A Dexterous Robot Hand for Space, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 907-912. (1999)
- 5) Yamamo I. and Maeno T., Development of a Robot Finger for Five fingered Hand Ultrasonic Motors and Elastic Elements, Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and System, pp. 2648-2653. (2003)
- 6) Cutkosky M. R., On Grasp Choice, Grasp Models, and the design of Hands for Manufacturing Tasks, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 3, pp. 269-279. (1989)

(접수:2013.09.05, 수정:2013.10.10, 게재 확정:2013.11.22)