# 가중치를 갖는 복합 파지 지수를 기반으로 한 물체의 최적 파지 계획

## Optimal Grasp Planning of Object Based on Weighted Composite Grasp Index

김 병 호, 이 병 주, 오 상 록, 서 일 홍
(Byoung-Ho Kim, Byung-Ju Yi, Sang-Rok Oh, and Il Hong Suh)

**Abstract** : When a robot hand grasp an object, the number of ways to grasp it stably are infinite and thus an optimal grasp planning is needed to find the optimal grasp points for satisfying the objective of the given task. In this paper, we first define some grasp indices to evaluate the quality of each feasible grasp and then a weighted composite grasp index by combining all of the grasp indices is also defined. Next, we propose a method to find the optimal grasp points of the given object by comparing the defined weighted composite grasp index for each feasible grasp points. By simulation results, we show the effectiveness of the proposed optimal grasp planning method and also discuss the trend of each grasp index as the grasp polygon.

**Keywords** : optimal grasp planning, weighted composite grasp index, robot hand

### I. 서론

로봇 손을 이용하여 물체를 파지할 때, 안정한 파지를 형성하는 파지점은 무수히 많은데, 여러 가지 불확실한 요소로 인한 파지 오차가 발생할 수 있기 때문에 파지점들이 불안정하기 쉬운 특이한 파지 다각형 형태에 가깝지 않도록 파지점을 결정하는 것이 중요하다. 또한, 로봇 손이 비록 안정한 파지를 취하고 있더라도 외란으로 인한 영향을 최소화할 수 있는 파지 다각형 형태를 형성하는 것이 바람직하다. 이와 같은 목적이외에도 주어진 작업에 따라 다양한 기준이 있을 수 있는데, 이러한 기준을 근거로 하여 각 파지점에 대한 평가 지수를 정의하고, 이를 평가함으로써 주어진 작업의 목적에 적절한 최적의 파지점을 설정할 수 있다. 로봇 손을 이용하여 물체를 유연하게 조작하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되고 있는데[1]-[5], 물체를 안정하게 조작하기 위해서는 먼저 원하는 목적에 따라 적절한 파지점을 찾는 과정이 필요하다[6]-[10].

이러한 연구 분야에서 Li [6] 등은 최적 파지점을 찾기 위하여 파지 행렬의 특이값(singular value)과 랜치 공간(wrench space)의 부피 및 작업 타원(task ellipsoid)을 사용하여 파지 지수를 정의하고 이를 최적화하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 사전에 주어진 작업을 위한 각 손가락 끝의 각 방향에 대하여 요구되는 최대 힘을 알아야 하기 때문에 작업에 대한 경험이 요구되는 등 파지 지수를 구하는 과정이 복잡한 단점이 있다. Cutkosky[7]는 파지 모델링 및 효과적인 파지 선택을 위한 다양한 파지 지수를 해석적으로 정의하였고, 주어진 작업과 파지 기하학을 고려하여 파지 형태를 계층적으로 분류하였다. 이 연구를 통하여 파지 형태에 따른 파지 특성 및 조작성이 다르다는 사실을 쉽게 파악할 수 있고, 주어진 작업에 따라 파지점을 신중하게 설정하여야 함을 알 수 있다. Park[8] 등은 힘 영역과 속도 영역을 모두 고려하기 위하여 힘 및 속도 전달비를 구하고, 이를 이용하여 주어진 작업의 적합성을 평가하는 파지 지수를 제안하였는데, 이 방법은 복합된 힘/위치 제어에 기반을 둔 방법이기 때문에 사전에 작업 공간의 특성을 정확히 알아야 하는 한계가 있다. 그리고 세 손가락 로봇 손을 이용하여 평면 다각형 물체를 안정하게 파지하기 위한 파지 알고리즘 연구[9]에서는 파지점의 모양에 따른 파지 형태를 분류하고, 인간이 경험할 수 있는 불확실성 요소를 근거로 한 목적 함수(Objective function)를 정의한 후, 이를 최소화하는 파지 형태를 최적의 파지로 설정하는 방법이 제시되었다. 그러나 이 방법은 최적의 힘 집중 파지 형태를 찾는 과정에서 손가락과 물체와의 수직 접촉(normal directional contact)만을 고려하였고, 물체의 모양과 손가락이 물체에 접촉하고 있는 기하학적 위치만을 고려하기 때문에 손가락이 3 개 이상인 경우나 3 차원 물체를 다루는 경우에 대하여 확장이 쉽지 않으며, 파지한 물체의 조작성에 관한 특성은 고려되지 않았다. 최근에는 로봇 손가락 관절의 자체 운동 변화를 근거로 한 파지점 검출이나 로봇 손가락의 접촉력 및 각 관절의 속도를 고려한 파지에 관한 연구가 진행되었다[10][11].

본 논문에서는 인간 손의 행위와 주어진 작업의 특성을 기반으로 파지 우량성을 측정하기 위한 파지 지수를 정의하고, 이를 바탕으로 한 가중치를 갖는 복합 파지 지수(Weighted Composite Grasp Index)를 정의한 후, 모든 파지점을 대상으로 하여 이를 비교함으로써 최적의 파지점을 결정하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 비교적 안정적인 파지가 가능한 세 손가락 로봇 손을 이용한 물체의 파지를 대상으로 시뮬레이션을 수

접수일자 : 2000. 5. 24., 수정완료 : 2000. 8. 8.
김병호 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부, 한국과학기술연구원 지능제어연구센터
이병주, 서일홍 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부
오상록 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

행하여 제안한 파지점 결정 방법의 효용성을 확인하고, 파지점에 따른 각 파지 지수의 경향을 보인다.

## II. 가중치를 갖는 복합 파지 지수

로봇 손을 이용한 파지 시스템에서 로봇 손이 물체를 파지할 때 형성되는 접촉 영역은 로봇 손 및 로봇 팔의 기구학적 동작 영역에 의해 단순히 접촉이 가능한 접촉 영역(Feasible Contact Region, FCR)과 마찰 원뿔을 고려하여 미끄러짐이 발생하지 않는 파지 영역(Feasible Grasp Region, FGR)으로 구분할 수 있다. 또한, 로봇 손이 파지할 물체의 파지면은 시각 정보 등을 이용하여 적절히 정해질 수 있으며[4][17][18], 파지 영역은 로봇 손 및 로봇 팔의 적절한 조정과 밀접한 관계가 있다. 로봇 손을 이용하여 물체를 안정하게 파지하고 원하는 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 먼저 적절한 파지점을 설정하는 것이 중요하며, 정해진 파지점을 안정하게 파지하고 조작하기 위해서는 파지점의 안정성이 유지될 수 있도록 로봇 손 및 로봇 팔의 적절한 조정이 필요하다[1]-[3]. 주어진 작업의 효율을 극대화하기 위해서는 최적의 파지 계획이 요구되며, 최적의 파지 계획은 그림 1 과 같이 주어진 작업의 조건(task constraints)과 물체의 기하학적 조건(object constraints) 및 로봇 손이 지녀야 할 조건(hand constraints)을 동시에 고려하여야 한다. 따라서 최적의 파지 계획은 주어진 물체의 모양과 로봇 손가락의 사양 및 파지된 물체의 제어 목적 등에 밀접한 관계가 있다.

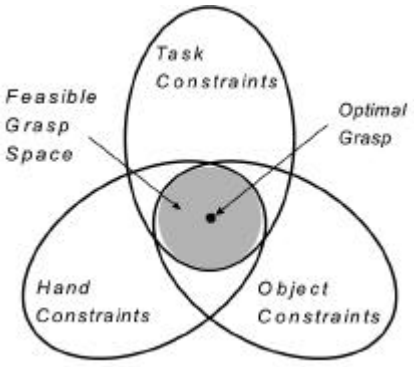



그림 1. 최적 파지.
Fig. 1. Optimal grasp.

본 논문에서는 로봇 손을 이용하여 물체를 조작하기 위한 첫 단계라고 할 수 있는 물체의 최적 파지점을 찾기 위하여 다음과 같은 파지 지수를 정의한다.

- 파지 지수(Stability Grasp Index, $I_S$),
- 불확실성 파지 지수(Uncertainty Grasp Index, $I_U$),
- 최대 힘 전달비 지수(Maximum Force Transmission Ratio Index, ${}^{o}s^{f}_{\max}$),
- 작업 등방성 지수(Task Isotropy Index, $s_I^T$),
- 강성 기반 파지 등방성 지수(Stiffness Mapping Based Grasp Isotropy Index, $s_I^S$),

그리고 이러한 지수들을 종합적으로 고려한 가중치를 갖는 복합 파지 지수(Weighted Composite Grasp Index, $I_{WCG}$)를 정의한 다음, 작업 물체의 모든 파지점을 대상으로 가중치를 갖는 복합 파지 지수를 비교하여 최적의 파지점을 찾는다. 본 논문에서는 손가락 끝만을 이용한 파지(fingertip grasp)와 마찰을 갖는 점 접촉(point contact with friction)을 가정하였다.

### 1. 안정성 파지 지수

안정성 파지 지수는 파지된 물체에 가해지는 외력에 저항하는 능력을 파지 다각형의 형태에 따라 정량적으로 나타내기 위한 지수로 정의된다. 예를 들어, 로봇 손이 임의의 L 자 모양의 물체를 파지할 때, 손가락의 파지점(o) 가 그림 2 와 같이 배치되어 있는 경우를 고려해 보자. 그림 2 에서 로봇 손가락과 물체와의 파지점 유형은 크게 그림 3 과 같이 세 가지 유형으로 분류할 수 있다[9].

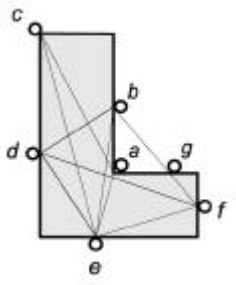



그림 2. L 자형 물체에 대한 손가락의 파지점.
Fig. 2. Grasp points for L-type object.


그림 3. 파지점 유형: (a) 면 (a) 볼록 꼭지점 (a) 오목 꼭지점.
Fig. 3. Types of grasp points: (a) edge (b) convex vertex (c) concave vertex.

로봇 손가락이 그림 3 (b)와 같이 물체의 볼록 꼭지점을 파지하게 되면, 손가락 끝의 위치 오차에 따라 안정성이 민감하게 영향을 받을 수 있고, 그림 3 (c)와 같이 물체의 오목 꼭지점을 파지하는 경우에는 손가락의 동작 범위가 비교적 제한될 수 있다. 따라서 그림 3 (b), (c)와 같은 파지점은 파지 계획 단계에서 제외하는 것이 바람직하다. 이와 같은 관점에서 세 손가락을 이용하여 물체를 파지하는 경우, 그림 2 에서 파지점 b,

d, e 를 잡는 경우가 파지점 a, c, e 를 잡는 경우보다 더 안정한 파지로 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 로봇 손가락이 물체의 면을 파지하는 경우를 대상으로 하여 파지점 i, j, k로 구성된 "파지 다각형 ijk"를 고려한다. 그림 2 에서 파지 다각형 bde 와 파지 다각형 bdf, 또는 파지 다각형 def 는 주어진 임무에 따라 어느 유형이 더 좋은 파지인지 쉽게 구분할 수 없다. 따라서 주어진 작업을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 파지 유형을 선택하기 위한 작업 적합성을 고려하여야 한다.

그림 4 는 세 손가락을 이용하여 팩의 세 면을 파지하고 구멍에 삽입하는 경우를 나타낸다. 이러한 작업에서 적절한 파지점을 찾는 문제는 효율적인 팩의 삽입을 위해 중요하다.

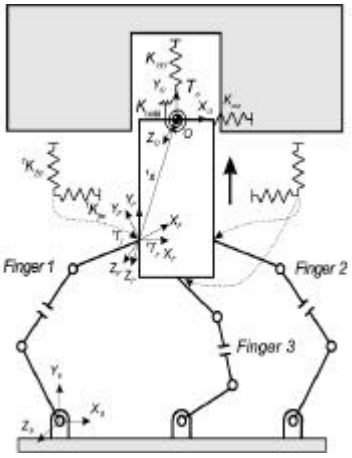



그림 4. 세 손가락 로봇 손을 이용한 팩인홀 작업.
Fig. 4. Peg-in-hole task by using three-fingered hand.

그림 5 는 그림 4 에서 각 로봇 손가락의 파지 영역내의 파지 위치에 따른 파지 다각형을 나타낸다. 여기서 각 파지점은 로봇 손/로봇 팔의 적절한 조정에 의해 마찰 구속 조건이 만족된다고 가정한다. 삼각형 구조의 파지를 위한 파지점의 최적 설정에 있어서 파지 다각형이 정삼각형에 가까울수록 보다 더 형상 집중 파지(form closure)에 근접하게 되기 때문에 파지된 물체의 구속이 강인해질 수 있다[9]. 이러한 관점에서 물체에 임의의 방향의 외란이 존재하는 경우에 파지 다각형이 정삼각형에 가까울수록 더 안정한 파지 형태로 볼 수 있다. 이러한 개념을 적용하여 안정성 파지 지수 $I_S$ 를 다음과 같이 정의한다.

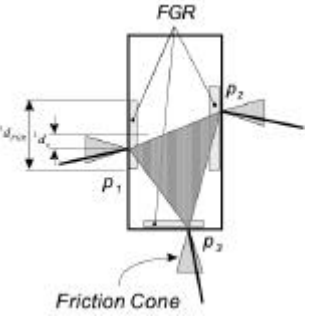
$$I_S = \frac{1}{q_{\max}} \sum_{i=1}^{n_f} \left| q_i - \bar{q} \right|, \qquad (1)$$

여기서

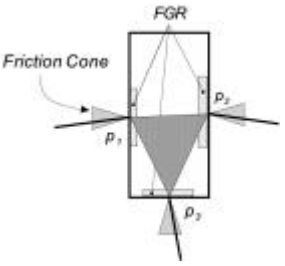
$$\bar{q} = \frac{180(n_f - 2)}{n_f},$$

$$q_{\max} = (n_f - 2)(180 - \bar{q}) + 2\bar{q}.$$

$n_f$ 는 손가락의 개수, $|\cdot|$ 는 절대값을 나타내고, $\bar{q}$ 는 파지점으로 구성된 파지 다각형에 대한 내각의 평균을 나타내며, $q_{\max}$ 는 파지 다각형의 내각과 평균값의 차에 대한 절대값을 합한 값으로서 가장 나쁜 경우의 파지 다각형을 의미한다. 따라서 파지 다각형이 정다각형을 이루게 되면 안정성 파지 지수는 0 이 된다.




(a)




(b)

그림 5. 파지점의 위치에 따른 파지 다각형: (a) 파지 영역내의 임의의 위치 (b) 파지 영역내의 중점.
Fig. 5. Grasp triangle as grasp location: (a) any point in FGR (b) center point in FGR.

파지 다각형의 각 꼭지점의 위치를 알면 내각은 항상 구할 수 있다. 여기서는 세 손가락을 이용하는 경우에 대하여 파지 삼각형의 내각을 구하면 다음과 같다.

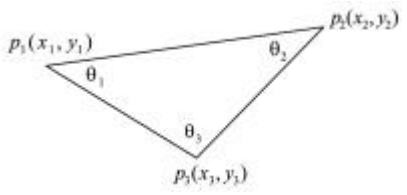



그림 6. 파지 삼각형.
Fig. 6. Grasp triangle.

그림 6 에서 $i$ 번째 꼭지점 $p_i(x_i, y_i)$ 와 $j$ 번째 꼭지점 $p_j(x_j, y_j)$ 를 연결하는 변의 길이 $\overline{p_i p_j}$ 는 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{p_i p_j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \qquad (2)$$

파지 삼각형의 내각 $q_i (i = 1,2,3)$ 는 삼각형에 관한 코사인(cosine)정리를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_1 = \cos^{-1}\left\{\frac{(\overline{p_1 p_2})^2 + (\overline{p_1 p_3})^2 - (\overline{p_2 p_3})^2}{2(\overline{p_1 p_2})(\overline{p_1 p_3})}\right\} \qquad (3)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left\{\frac{(\overline{p_1 p_2})^2 + (\overline{p_2 p_3})^2 - (\overline{p_1 p_3})^2}{2(\overline{p_1 p_2})(\overline{p_2 p_3})}\right\} \qquad (4)$$

$$q_3 = \cos^{-1}\left\{\frac{(\overline{p_1 p_3})^2 + (\overline{p_2 p_3})^2 - (\overline{p_1 p_2})^2}{2(\overline{p_1 p_3})(\overline{p_2 p_3})}\right\} \qquad (5)$$

2. 불확실성 파지 지수

안정성 파지 지수는 물체를 안정하게 파지하기 위한 지수인데, 이것은 파지 다각형과 밀접한 관련이 있으며, 동일한 파지 다각형은 무수히 많이 있을 수 있다. 그러나 파지 다각형이 비록 같은 모양을 갖는다 하더라도 각 파지점이 파지 가능 영역의 중심점으로부터 멀어지게 되면, 상대적으로 물체를 놓치게 될 가능성이 크다. 이러한 효과를 정량적으로 평가하기 위한 지수가 불확실성 파지 지수이다. 예를 들어, 그림 5 (b)는 파지 영역의 중점을 파지하기 때문에 그림 5 (a)의 경우에 비해 손가락의 위치 오차에 대한 영향이 적다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 위치 오차에 대한 영향을 최소화하기 위해 가능한 파지점은 각 파지면에 대하여 중점에 있도록 설정해야 한다. 따라서 불확실성 파지 지수 $I_U$ 는 위치 오차의 영향을 최소화하기 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$I_U = \frac{1}{n_f}\sum_{i=1}^{n_f} \frac{2 \mid {}^i d_e \mid}{{}^i d_{FGR}}, \quad {}^i d_{FGR} > 0, \qquad (6)$$

여기서 ${}^i d_{FGR}$ 와 ${}^i d_e$ 는 각각 그림 5 (a)에 나타낸 바와 같이 $i$ 번째 파지면에 대한 파지 영역의 길이 및 $i$ 번째 손가락이 접촉하고 있는 파지면의 위치와 그 파지면에 대한 파지 영역의 중점까지의 거리를 나타내며, 시각 정보를 이용하여 사전에 알 수 있다[4][17][18]. 즉, 각 손가락이 파지면의 중점을 잡는 경우에 불확실성 파지 지수는 0 이 된다.

3. 최대 힘 전달비 지수

로봇 손을 이용하여 물체를 조작하기 위하여 로봇 손가락 끝에서 필요한 힘은 물체를 안정되게 파지하기 위한 내력과 원하는 방향으로 물체를 조작하기 위해 요구되는 조작력 및 물체에 가해지는 외력에 대응하기 위한 반응력(reaction force) 등으로 구분할 수 있는데, 손가락의 끝 공간과 물체의 작업 공간간의 힘 전달비가 최대가 될 수 있도록 각 손가락의 파지점을 정할 필요가 있다. 또한 각 손가락의 관절 공간과 손가락의 끝 공간간에도 힘 전달비가 최대가 될 수 있도록 각 손가락의 자세를 유지하는 것이 필요하다. 이와 같이 로봇 손을 이용하여 물체를 조작할 때, 물체의 작업 공간과 로봇 손가락의 끝 공간의 힘 벡터간의 상호관계를 나타내기 위한 지수로서 최소 및 최대 힘 전달비를 정의할 수 있다. 물체의 작업 공간과 로봇 손가락의 끝 공간간의 힘 전달비 지수 ${}^o s_F$ 는 작업 공간에서의 힘 벡터 $T_o$ 의 크기 $\|T_o\|$ 와 손가락 공간에서의 힘 벡터 $T_f$ 의 크기 $\|T_f\|$ 의 비를 나타낸다. ${}^o s_F$ 를 구하기 위하여 $\|T_o\|$ 와 $\|T_f\|$ 를 구하면, 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|T_o\| = (T_o^T T_o)^{1/2}, \qquad (7)$$

$$\|T_f\| = (T_f^T T_f)^{1/2}, \qquad (8)$$

여기서

$$T_o = \left[\boldsymbol{G}_o^f\right]^T T_f \qquad (9)$$

이므로 $\|T_o\|$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\|T_o\| = (T_f^T [\boldsymbol{G}_o^f][\boldsymbol{G}_o^f]^T T_f)^{1/2}, \qquad (10)$$

여기서 $[\boldsymbol{G}_o^f]$ 는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)을 나타낸다.

결과적으로 물체의 작업 공간과 로봇 손가락의 끝 공간간의 힘 전달비 지수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^o s_F = \frac{\|T_o\|}{\|T_f\|} = \left\{\frac{T_f^T [\boldsymbol{G}_o^f][\boldsymbol{G}_o^f]^T T_f}{T_f^T T_f}\right\}^{1/2} \qquad (11)$$

한편, Rayleigh 의 정리[12]를 이용하면, 물체의 작업 공간에서의 힘은 각 손가락 끝의 힘에 대하여 다음과 같은 구속 조건에 따라 한계를 갖는다.

$${}^o s_{\min} \|T_f\| \le \|T_o\| \le {}^o s_{\max} \|T_f\|, \qquad (12)$$

여기서 ${}^o s_{\min}$ 와 ${}^o s_{\max}$ 는 각각 $[\boldsymbol{G}_o^f][\boldsymbol{G}_o^f]^T$ 의 고유값의 양의 제곱근 중에서 최소값과 최대값을 나타낸다.

(12)를 다시 정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^o s^f_{\min} \|T_o\| \le \|T_f\| \le {}^o s^f_{\max} \|T_o\|, \qquad (13)$$

여기서

$${}^o s^f_{\min} = \frac{1}{{}^o s_{\max}}, \quad {}^o s^f_{\max} = \frac{1}{{}^o s_{\min}},$$

이고, ${}^o s^f_{\min}$ 과 ${}^o s^f_{\max}$ 를 각각 물체의 작업 공간과 로봇

손가락의 끝 공간간의 최소 및 최대 힘 전달비라고 한다. 즉, 최대 힘 전달비는 단위 크기의 힘이 물체의 작업 공간에 가해질 때 각 손가락의 끝 공간에서 필요로 하는 최대 힘의 크기를 나타내며, (13)으로부터 최대 힘 전달비가 작을수록 각 손가락 끝에 미치는 부하가 작아짐을 확인할 수 있다.

4. 작업 등방성 지수

로봇 손가락 중에 특이점(singular point)에 가까운 구조를 갖는 손가락이 있다면, 어떤 특정한 방향으로는 정확한 힘 또는 위치 제어가 어려워질 수 있다. 따라서 파지한 물체에 힘과 토오크를 보다 정확하고, 안정하게 분배하기 위해서는 정해진 파지점에 대하여 로봇 손가락의 구조를 최적화하는 문제와 파지한 물체의 작업점과 파지점들간의 기하학적 위치에 따른 작업의 효율성을 고려하여야 한다. 이러한 문제를 고려하기 위하여 자코비안(Jacobian)의 등방성 지수(isotropic index)를 사용할 수 있다[13]. 본 논문에서는 물체의 작업점과 파지점들간의 파지 등방성을 나타내기 위한 등방성 지수를 "작업 등방성 지수(Task Isotropy Index, $s_I^T$)"라 하고, 다음과 같이 정의한다.

$$s_I^T = \frac{s_{\min}^T}{s_{\max}^T} \tag{14}$$

여기서 $s_{\min}^T$ 과 $s_{\max}^T$ 는 각각 물체의 작업 공간과 로봇 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬의 자승 $[G_o^f][G_o^f]^T$ 의 고유값의 양의 제곱근 중에서 최소값과 최대값을 나타낸다. 즉, 작업 등방성 지수는 물체의 작업 공간과 로봇 손가락 끝 공간간의 속도 전달 분포를 나타내며, 그 값이 1.0 에 가까울수록 각 손가락의 동작에 따른 물체의 조작이 작업 공간의 모든 방향에 대하여 고른 속도 전달 분포를 지닌다는 것을 의미한다. 결과적으로 작업 공간내의 특이점에서의 등방성 지수는 0 이 된다.

5. 강성 기반 파지 등방성 지수

물체의 작업 공간에서 주어진 강성 행렬 $[K_o]$와 손가락 끝 공간에서의 강성 행렬 $[K_f]$간의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$[K_o] = [G_o^f]^T [K_f][G_o^f], \tag{15}$$

여기서 2 차원 공간에서의 $[K_o]$는 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{oxx} & K_{oxy} & K_{oxf} \\ K_{oyx} & K_{oyy} & K_{oyf} \\ K_{ofx} & K_{ofy} & K_{off} \end{bmatrix},$$

$[G_o^f]^T$ 는 $[G_o^f]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

2 차원 작업 공간에서 주어지는 3×3 강성 행렬 $[K_o]$ 를 생성하기 위하여 로봇 손은 최소한 세 개의 손가락을 지녀야 하는데, (15)를 벡터 형태로 재정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$K_{oo} = [B_f^o]\ K_{ff} \tag{16}$$

여기서

$$K_{oo} = \left[ K_{oxx}\ K_{oxy}\ K_{oxf}\ K_{oyy}\ K_{oyf}\ K_{off} \right]^T,$$

$$K_{ff} = \left[ {}^1K_{fxx}\ {}^1K_{fyy}\ {}^2K_{fxx}\ {}^2K_{fyy}\ {}^3K_{fxx}\ {}^3K_{fyy} \right]^T,$$

$[B_f^o]$ 는 로봇 손가락 끝 공간과 작업 공간간의 강성 관계 행렬을 나타낸다.

일반적으로 로봇 손은 다지 다 관절 시스템으로서 복잡한 상호 간섭(couplings)이 존재하기 때문에 이를 이용한 물체의 파지 및 조작 제어가 쉽지 않다. (16)은 이러한 상호 간섭을 제거한 형태의 강성 관계를 나타내며, 독립 손가락 및 독립 관절에 의해 작업 공간에서 원하는 컴플라이언스 특성을 생성할 수 있음을 의미한다. 따라서 로봇 손에 존재하는 상호 간섭으로 인한 제어의 어려움을 해결할 수 있다. (16)에서 $[B_f^o]$는 로봇 손가락의 파지점에 따라 다르고, 어떤 파지점에서는 랭크(rank)가 줄어드는 현상이 발생할 수 있으므로 이 행렬의 구성 요소를 기하학적으로 분석함으로써, 작업점에 주어진 강성 특성을 보다 효과적으로 생성할 수 있는 파지점을 찾을 수 있다. 이러한 관점에서 다음과 같은 강성 기반 파지 등방성 지수 $s_I^S$ 를 정의한다.

$$s_I^S = \frac{s_{\min}^S}{s_{\max}^S} \tag{17}$$

여기서 $s_{\min}^S$ 과 $s_{\max}^S$ 은 각각 파지된 물체의 작업 공간에 설정된 강성 특성과 각 로봇 손가락 끝 공간의 강성 특성을 나타내는 독립 강성 관계 행렬 $[B_f^o]$의 고유값 분해(singular value decomposition)과정에 의해 정해지는 고유값들 중에서 최소값 및 최대값을 나타낸다.

6. 가중치를 갖는 복합 파지 지수

본 논문에서는 로봇 손을 이용하여 물체를 파지할 때, 파지 우량성을 평가하기 위하여 외력에 대한 강인성을 나타내기 위한 안정성 파지 지수와 손가락의 위치 오차에 따라 각 파지면의 파지 영역을 벗어날 가능성을 나타내기 위한 불확실성 파지 지수, 손가락 끝 공간과 물체의 작업 공간간의 최대 힘 전달비, 작업 등방성 지수 및 강성 기반 파지 등방성 지수를 포함한 작업 적합성 파지 지수를 고려하는데, 이러한 지수들은 각각 단위와 물리적인 의미가 서로 다르기 때문에 임의로 표준화하여 결합하거나 가중치를 부여하는 방법은 적합하지 않다. 즉, 이러한 지수들이 하나의 공통된 영역으로 변환되지 않은 상태에서 정량적인 결합을 취하는 것은 의미가 없다. 따라서 이러한 지수들을 정성적인 개념을 적용하여 상대적인 크기를 갖도록 변환해 주는 과정이 필요하다. 이와 관련하여 Terano[15]

등과 Wood[16]는 각 지수에 대한 선호도 정보(prefer-ence information)를 부여하고, 각 지수값을 설정된 선호도 정보 영역으로 변환하여 0 과 1 사이의 값으로 표현하는 방법을 제시하였다. 여기서 각 지수에 설정된 선호도는 사용자에 따라 주관적으로 정해질 수 있고, 가중치에 의해 부여될 수 있으며, 원하는 목적에 따라 적절히 적용될 수 있다. 이와 같은 개념을 바탕으로 Yi[13] 등은 여러 가지 설계 지수를 원하는 비중에 따라 고려하기 위하여 가중치를 갖는 복합 설계 지수(composite design index)를 잉여 구동을 갖는 4 다리 6 자유도 병렬 매니퓰레이터의 최적 설계에 사용하였다.

본 논문에서는 Yi[13] 등이 사용한 복합 설계 지수 개념을 로봇 손을 이용한 물체의 파지에 적용하여 파지 우량성을 평가하기 위한 가중치를 갖는 복합 파지 지수 $I_{WCG}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} I_{WCG} &= (\%_S)^{w_1} \wedge (\%_U)^{w_2} \wedge (\%_{FTR})^{w_3} \wedge (\%_{TASK})^{w_4} \wedge (\%_{STIFF})^{w_5} \\ &= \min\{(\%_S)^{w_1}, (\%_U)^{w_2}, (\%_{FTR})^{w_3}, (\%_{TASK})^{w_4}, (\%_{STIFF})^{w_5}\} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $\wedge$는 "교집합 연산(Intersection Operator)"[15]을 나타내고, $\%_S$, $\%_U$, $\%_{FTR}$, $\%_{TASK}$ 및 $\%_{STIFF}$ 는 각 지수의 선호도(최소화 또는 최대화)에 대하여 표준화된 안정성 파지 지수, 불확실성 파지 지수, 최대 힘 전달비, 작업 등방성 지수 및 강성 기반 파지 등방성 지수를 나타낸다. 그리고 $w_i$, $i=1,2,\mathbf{L},5$ 는 각 지수에 대한 가중치를 나타내며, 클수록 중요도를 크게 부여함을 의미한다. 이러한 가중치는 비례 상수로서 1 보다 큰 값으로 정하며, 주어진 작업 및 제어 목적에 따라 상대적으로 중요한 지수에 대하여 큰 가중치를 설정함으로써 보다 더 최적화 시킬 수 있다.

(18)에서 각 지수를 선호도 정보에 따라 표준화하는 과정을 나타내면 다음과 같다. 안정성 파지 지수와 불확실성 파지 지수 및 최대 힘 전달비에 대한 선호도는 각 지수를 최소화하는 것이며, 다음과 같이 표준화 한다.

$$\%_S = \frac{I_{S,\max} - I_S}{I_{S,\max} - I_{S,\min}}, \quad (19)$$

$$\%_U = \frac{I_{U,\max} - I_U}{I_{U,\max} - I_{U,\min}}, \quad (20)$$

$$\%_{FTR} = \frac{({}^o s^f_{\max})_{\max} - ({}^o s^f_{\max})}{({}^o s^f_{\max})_{\max} - ({}^o s^f_{\max})_{\min}}. \quad (21)$$

작업 등방성 지수와 강성 기반 파지 등방성 지수에 대한 선호도는 각 지수를 최대화하는 것으로서 다음과 같이 표준화 한다.

$$\%_{TASK} = \frac{(s_I^T) - (s_I^T)_{\min}}{(s_I^T)_{\max} - (s_I^T)_{\min}}, \quad (22)$$

$$\%_{STIFF} = \frac{(s_I^S) - (s_I^S)_{\min}}{(s_I^S)_{\max} - (s_I^S)_{\min}}. \quad (23)$$

이와 같이 표준화된 각 지수들은 지수의 값이 클수록 더 좋은 파지를 나타낸다. 즉, 큰 $\%_S$를 갖는 파지점은 보다 안정한 파지점을 나타내고, 큰 $\%_U$는 손가락의 위치 오차에 따라 각 파지점이 각 파지면의 파지 영역을 벗어날 가능성이 작다는 것을 나타내며, 큰 $\%_{FTR}$ 은 손가락 끝 공간에서 작은 힘으로 파지 물체의 작업점에 가해진 큰 외력에 대한 부하를 견딜 수 있다는 것을 의미한다. 또한, $\%_{TASK}$가 클수록 설정된 파지점이 물체의 작업점에서의 운동을 보다 원활하게 할 수 있는 파지점이 됨을 나타내며, $\%_{STIFF}$ 가 클수록 작업점에 설정한 강성 특성을 보다 효과적으로 각 손가락으로 분배할 수 있음을 의미한다. 결과적으로 (18)에서 각 지수에 대한 교집합의 결과는 가장 작은 지수의 값으로 나타나게 되고, 이러한 연산을 모든 파지점 집합에 대하여 수행한 후, 가장 큰 값의 $I_{WCG}$을 갖는 파지점 집합를 찾으면 이것이 최적의 파지점이 된다.

## III. 최적 파지점 결정을 위한 시뮬레이션

본 장에서는 II 장에서 제안한 복합 파지 지수를 사용하여 그림 4 와 같이 세 손가락을 이용한 팩인홀(peg-in-hole) 작업에서 팩의 안정된 파지 및 원활한 조작을 위한 최적의 파지점 결정에 관한 시뮬레이션을 수행한다. 본 시뮬레이션에서는 각 로봇 손가락에 주어진 파지 영역에 대하여 각 면에서 추출된 파지점 집합에 대하여 정의한 파지 지수를 구하고, 이를 바탕으로 최적의 파지점을 찾는다. 각 로봇 손가락의 파지 영역은 표 1 과 같고, 여기서 $x, y$ 축에 대한 초기 및 최종 좌표는 그림 4 에서 물체의 작업 공간 $O$ 로부터 $i$ 번째 손가락의 파지점까지의 거리를 나타낸다.

표 1. 로봇 손가락의 파지 영역 (단위: m).
Table 1. Grasp region of robot fingers (unit: m).

| 로봇 손가락 | $x$ 축 | | $y$ 축 | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 초기 | 최종 | 초기 | 최종 | |
| 1 | –0.03 | –0.03 | –0.07 | –0.03 | 그림 4 |
| 2 | 0.03 | 0.03 | –0.07 | –0.04 | |
| 3 | –0.02 | 0.02 | –0.1 | –0.1 | 그림 8 |

그림 4 에서 물체의 작업 공간에서 주어진 강성 특성과 손가락 끝 공간간의 강성 관계는 (15)와 (16)을 이용하여 구할 수 있는데, 물체의 작업 공간과 각 손가락간의 자코비안 $[G_o^f]$ 는 다음과 같다.

여기서 $x_i$와 $y_i$는 각각 물체의 작업점 $O$ 로부터 $i$ 번째 손가락의 파지점까지의 거리를 나타내는 양의 변수

이고, $x_3$ 의 부호를 나타내는 $s$ 는 세번째 손가락의 파지점이 작업 공간의 2,3 사분면에 있으면 (−)이고, 1,4 사분면에 있으면 (+)이다.

$$[G_o^f] = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & y_1 \\ 0.0 & 1.0 & -x_1 \\ 1.0 & 0.0 & y_2 \\ 0.0 & 1.0 & x_2 \\ 1.0 & 0.0 & y_3 \\ 0.0 & 1.0 & sx_3 \end{bmatrix}, \qquad (25)$$

먼저 로봇 손가락의 모든 파지 영역에 대하여 제안한 복합 파지 지수를 적용하여 최적의 파지점을 찾는다. 그리고 파지점에 따른 각 파지 지수의 경향을 확인하기 위하여 최적 파지점과 임의로 선정된 파지점에 대하여 표준화된 파지 지수값을 비교 분석하고자 한다. 여기서 $x, y$ 축에 대한 각 파지점의 샘플링 거리는 각 손가락의 파지 영역을 10 등분하여 사용하였고, 복합 파지 지수의 가중치는 $w_1 w_2 w_3 w_4 w_5$ 는 각각 1.0, 1.5, 1.0, 1.0, 1.0 으로 설정하였다. 따라서 파지점을 정할 때 불확실성 파지 지수에 대하여 가장 큰 중요도가 적용되고, 나머지 파지 지수는 동일하게 고려하였다.

시뮬레이션을 통하여 얻은 모든 파지점에 대한 가중치를 갖는 복합 파지 지수값의 동향은 그림 7 과 같고, 1149 번째 파지점이 가장 큰 파지 지수값(0.62799)을 갖게 되어 최적 파지점이 된다.

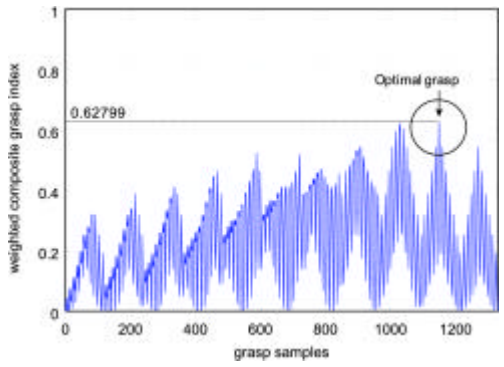



그림 7. 모든 파지점에 대한 가중치를 갖는 복합 파지 지수.
Fig. 7. Weighted composite grasp index for all grasp points.

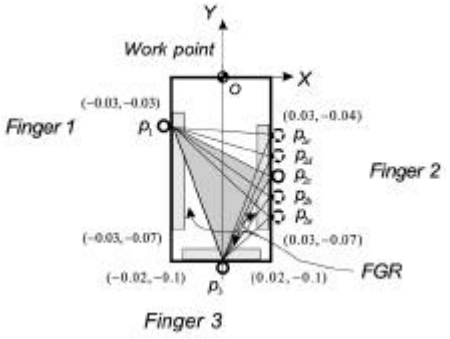



그림 8. 파지점 및 파지 삼각형.
Fig. 8. Grasp points and triangles.

표 2. 로봇 손가락의 파지점의 좌표 (단위: m).
Table 2. Locations of grasp points (unit : m).

| 파지 삼각형 | 파지점 좌표 $x, y$ | | | 복합 파지 지수 | 파지점 번호 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 손가락 1 | 손가락 2 | 손가락 3 | | | |
| $P_1P_{2a}P_3$ | -0.03, -0.034 | 0.03, -0.061 | 0.01, -0.1 | 0.46476 | 1127 | 그림 7 그림 8 |
| $P_1P_{2b}P_3$ | -0.03, -0.034 | 0.03, -0.058 | 0.01, -0.1 | 0.54433 | 1138 | |
| $P_1P_{2c}P_3$ | -0.03, -0.034 | 0.03, -0.055 | 0.01, -0.1 | 0.62799 | 1149 | |
| $P_1P_{2d}P_3$ | -0.03, -0.034 | 0.03, -0.052 | 0.01, -0.1 | 0.54433 | 1160 | |
| $P_1P_{2e}P_3$ | -0.03, -0.034 | 0.03, -0.049 | 0.01, -0.1 | 0.46476 | 1171 | |

그러면 파지점에 따른 각 파지 지수의 경향을 분석하기 위하여 그림 8 에 나타낸 최적 파지점 주변의 파지점들을 고려해 보자. 그림 8 에서 각 파지 삼각형의 파지점 좌표 및 시뮬레이션에 의한 복합 파지 지수는 표 2 와 같다. 여기서 각 파지점 좌표는 그림 8 에서 물체의 작업점 $O$ 로부터 $i$ 번째 손가락의 파지점까지의 거리를 나타낸다.

표 2 에서 파지 삼각형 $p_1p_{2}p_3$ 는 최적 파지점이 되는데, 파지 삼각형 $p_1p_{2a}p_3$ 와 $p_1p_{2e}p_3$ 의 복합 파지 지수가 동일하고, 파지 삼각형 $p_1p_{2b}p_3$ 와 $p_1p_{2d}p_3$ 의 복합 파지 지수가 동일하게 나타남을 알 수 있고, 그림 7 에서도 확인할 수 있다. 따라서 각 파지 삼각형에 대한 표준화된 파지 지수의 상대적인 분포를 비교하기 위하여 그림 9 와 같이 방사형 그래프를 도시하였으며, 각 파지 삼각형에 대한 파지 지수값을 표 3 에 제시하였다.

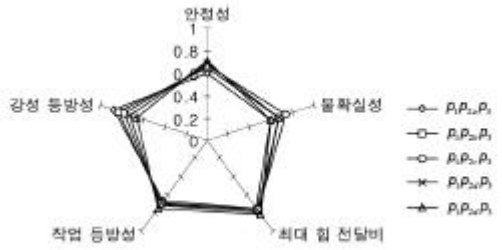



그림 9. 파지점에 따른 표준화된 파지 지수.
Fig. 9. Normalized grasp indices as the grasp points.

표 3. 파지 삼각형에 대한 파지 지수값.
Table 3. Grasp index value for each grasp polygon.

| 파지 삼각형 | 안정성 | 불확실성 | 최대 힘 전달비 | 작업 등방성 | 강성 등방성 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_1P_{2a}P_3$ | 0.59366 | 0.60000 | 0.74582 | 0.67116 | 0.86803 | 그림 8 그림 9 |
| $P_1P_{2b}P_3$ | 0.64743 | 0.66667 | 0.75548 | 0.68259 | 0.83139 | |
| $P_1P_{2c}P_3$ | 0.66225 | 0.73333 | 0.76876 | 0.69837 | 0.78242 | |
| $P_1P_{2d}P_3$ | 0.68249 | 0.66667 | 0.78548 | 0.71843 | 0.72346 | |
| $P_1P_{2e}P_3$ | 0.70757 | 0.60000 | 0.80545 | 0.74269 | 0.65770 | |

인할 수 있다. 또한 파지 삼각형 $p_1p_{2a}p_3$와 $p_1p_{2c}p_3$, 그리고 파지 삼각형 $p_1p_{2b}p_3$와 $p_1p_{2d}p_3$에서 비록 복합 파지 지수는 동일하게 나타나지만 각 파지 지수의 분포는 다르게 나타남을 알 수 있고, 불확실성의 파지 지수가 동일하게 나타나고 있다. 결과적으로 이러한 경향은 불확실성에 대한 가중치를 다른 파지 지수에 비해 더 크게 설정함에 의해 불확실성 파지 지수의 중요도가 커진 결과로 판단된다.

다음은 그림 10 과 같은 L 자 모양의 팩을 구멍에 삽입하는 경우를 고려해 보자. 여기서는 각 손가락에 주어진 파지 영역에 대하여 파지 지수에 따른 최적 파지점의 동향을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

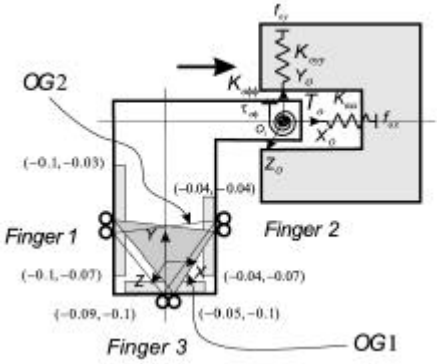



그림 10. L 자 모양 물체의 팩인홀 작업.

그림 9 와 표 3 으로부터 파지 삼각형 $p_1p_{2c}p_3$의 경우가 다른 파지 삼각형에 비해 전반적으로 균형있는 파지 지수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 파지 삼각형 $p_1p_{2b}p_3$의 경우, 두 번째 손가락의 파지점이 가장 중심부에 위치하므로 파지점의 위치 오차와 관련이 있는 불확실성 파지 지수가 가장 크게 나타나고 있음은 자연스러운 결과로 받아들여진다. 한편, 파지 삼각형 $p_1p_{2a}p_3$의 경우와 파지 삼각형 $p_1p_{2c}p_3$의 경우를 비교해 보면, 강성 등방성의 경우는 파지 삼각형 $p_1p_{2a}p_3$의 경우가 크지만, 다른 파지 지수는 파지 삼각형 $p_1p_{2c}p_3$의 경우가 크거나 비슷하게 나타나고 있음을 확

Fig. 10. Peg-in-hole tasks with L-type object.

그림 11 과 12 는 각 파지 지수에 대한 가중치를 변화시킨 경우에 대한 대한 복합 파지 지수의 동향을 나타낸다. 그림 11 에서는 불확실성 파지 지수에 대한 가중치를 다른 파지 지수에 비해 크게 설정한 경우이며, 700 번째 파지점(OGI)에서 복합 파지 지수의 값(0.43908)이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 상황에서 파지 안정성에 대한 가중치를 증가시키면, 그림 12 와 같이 전반적으로 복합 파지 지수값이 그림 11 에 비해 저하되고, 복합 파지 지수값의 크기가 그림 12 의 *A* 영역에서 보는 것과 같이 비슷한 파지점들이 여러 개 존재함을 확인할 수 있으며, 아주 근소한 차이로 최적 파지점(OG2)을 찾을 수 있다. 이러한 현상은 안정성 파지 지수의 중요도를 크게 설정함에 따라 비슷한 모양의 파지 다각형이 여러 개 존재할 수 있음을 의미한다. 이러한 경우 그림 11 에서 보았듯이 최적 파지점을 찾는 과정에서 불확실성 파지 지수가 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

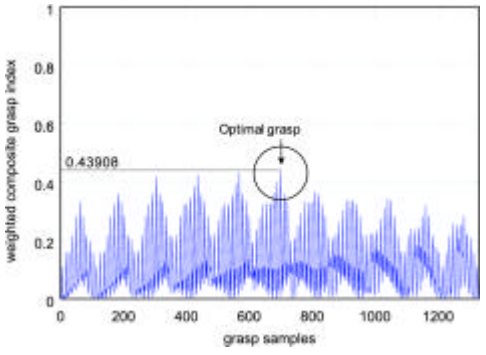



그림 11. 가중치를 갖는 복합 파지 지수, $w_1w_2w_3w_4w_5(1.0,2.0,1.0,1.0,1.0)$.
Fig. 11. Weighted composite grasp index with weighting factors, $w_1w_2w_3w_4w_5(1.0,2.0,1.0,1.0,1.0)$.

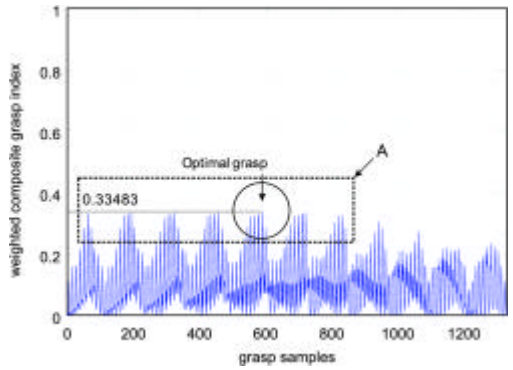



그림 12. 가중치를 갖는 복합 파지 지수, $w_1 w_2 w_3 w_4 w_5(1.5,2.0,1.0,1.0,1.0)$.

Fig. 12. Weighted composite grasp index with weighting factors, $w_1 w_2 w_3 w_4 w_5(1.5,2.0,1.0,1.0,1.0)$.

결론적으로 이러한 해석을 통하여 파지 물체의 기하학적 조건에 따라 파지 지수의 크기에는 상호 배반적인 관계(trade-off)가 존재함을 알 수 있으며, 적절한 가중치를 고려함으로써 원하는 목적에 알맞은 최적의 파지점을 찾을 수 있다. 한편, 물체의 파지 영역이 대칭일 경우에는 복합 파지 지수값이 비슷한 파지점이 여러 개 나올 수 있는데 이러한 경우에는 로봇 손가락의 구조를 참조하여 최적 파지점을 선택하는 방법이 있을 수 있고, 작업의 특성에 따라 파지 지수의 가중치를 적절히 설정함으로써 유일한 최적 파지점을 찾을 수 있다. 또한 로봇 손을 이용한 물체의 조작에서 일반적으로 각 손가락의 동작 범위는 매우 작기 때문에 작업 영역과 작업의 특성을 고려하여 로봇 팔을 적절히 함께 사용하면서 최적의 파지 조건을 만족시키기는 것이 중요하다. 따라서 로봇 손 및 로봇 팔의 적절한 조정 방법에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

## IV. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 이용하여 물체를 안정하게 파지하기 위한 최적의 파지점을 찾기 위하여 다양한 파지 지수를 정의하였고, 이러한 파지 지수들을 종합적으로 고려하기 위하여 가중치를 갖는 복합 파지 지수를 정의한 후 이를 모든 파지점에 적용하여 최적의 파지점을 결정하는 방법을 제안하였다. 세 손가락을 이용한 물체의 파지를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 제안한 최적 파지점 결정 방법의 효용성을 보였으며, 파지 다각형의 형태에 따른 파지 지수의 경향을 분석하였다. 결과적으로 제안한 최적 파지점 결정 방법이 로봇 손을 이용한 물체의 파지 및 조작을 위한 파지점 결정에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 또한 파지 물체의 기하학적 조건에 따라 각 파지 지수 간에는 상호 배반적인 관계가 존재함을 확인 할 수 있었고, 적절한 가중치를 고려함으로써 원하는 목적에 알맞은 최적의 파지점을 찾을 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

[1] Z. Li, P. Hsu, and S. Sastry, "Grasping and cordinated manipulation by a multi-fingered robot hand," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 8, no. 4, pp. 33-49, 1989.

[2] T. Yoshikawa and X.-Z. Zheng, "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.

[3] K. Nagai and T. Yoshikawa, "Grasping and manipulation by arm/multifingered-hand mechanisms," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1040-1047, 1995.

[4] T. Hasegawa, T. Matsuoka, T. Kiriki, and K, Honda, "Manipulation of an object by a multi-fingered hand with multi-sensors," *Proc. of Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 174-179, 1996.

[5] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoria, "Dynamic grasping force control using tactile feedback for grasp of multifingered hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2462-2469, April, 1996.

[6] Z. Li and S. Sastry, "Task Oriented Optimal Grasping by Multifingered Robot Hands," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 389-394, 1987.

[7] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *Trans. on Robotics and Automation,* vol. 5, no. 3, June 1989.

[8] Y. C. Park and G. P. Starr, "Optimal grasping using a multifingered robot hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 689-694, 1990.

[9] Y. C. Park and G. P. Starr, "Grasp synthesis of polygonal objects using three-fingered robot hand," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 11, no. 3, pp. 163-184, 1992.

[10] M. Kaneko and K. Tanie, "Contact point detection for grasping an unknown object using self-posture changeability," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 3, pp. 355-367, June, 1994.

[11] J.-H. You, J.-H. Park, D. –H. Choi, and N. Y. Chong, "Optimal grasp design of a multi-fingered robot hand based on manipulability and stability," *Tans. of KSME(A),* vol. 22. no. 7. pp. 1367-1374, 1998.

[12] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1988.

[13] B.-J. Yi and W.-K. Kim, "Optimal design of a redundantly actuated 4-legged six degree of

freedom parallel manipulator using composite design index," *KSME Int. Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 385-403, 1994.

[14] B.-H. Kim, B.-J. Yi, I. H. Suh, and S.-R. Oh, "A biomimetic compliance control of robot hand by considering structures of human finger," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3880-3887, 2000.

[15] T. Terano, K. Asai, and M. Sugeno, *Fuzzy Systems Theory and Its Applications*, Academic Press, Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 1992.

[16] K. L. Wood, "A method for the representation and manipulation of uncertainties in preliminary engineering design," Ph. D. Dissertation, Dept. of Mechanical Eng., California Institute of Technology, 1989.

[17] K. Stanley, J. Wu, A. Jerbi, and W. A. Gruver, "A fast two dimensional image based grasp planner," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 266-271, 1999.

[18] A. Hauck, J. Rüttinger, M. Sorg, and G. Färber, "Visual determination of 3D grasping points on unknown objects with a binocular camera system," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 272-277, 1999.

**김 병 호**

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공대 전자공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사), 1995년 현재 한양대 전자컴퓨터공학부(박사과정) / 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 학생연구원. 관심분야는 biomimetic compli ance control, multi-fingered robot hand mechanisms and applications to artificial hand, multiple arm control, macro/micro mechanism, industrial applications of $m$-processor, and intelligent control.

**오 상 록**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 6 권, 제 4 호, 참조.

**이 병 주**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 6 권, 제 7 호, 참조.

**서 일 홍**

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 6 권, 제 4 호, 참조.