

듀얼 공간을 이용한 이차원 두 손가락 로봇의 파지 안정성 분석 및 최적 파지 계획

Grasp Stability Analysis in Dual-Space and Optimal Grasp Planning for Two-Fingered Robots in 2-D

국명호, 장명언, 이지홍*
(Myung-Ho Kook, Myeong-Eon Jang, and Jihong Lee)

Abstract : This paper addresses the problem of computing grasp stability of the object for two-fingered robots in two dimensions. The concepts of force-closure and dual space are introduced and discussed in novel point of view, and we transform friction cones in a robot work space to line segments in a dual space. We newly define a grasp stability index by calculating intersection condition between line segments in dual space. Moreover, we propose a method to find the optimal grasp points of the given object by comparing the defined grasp stability index. Its validity and effectiveness are investigated and verified by simulations for quadrangle object and elliptic objects.

Keywords : dual-space, grasp stability index, friction-cone, force-closure, optimal grasp planning

I. 서론

로봇 손으로 원하는 작업을 수행하기 위해서는 로봇 손가락으로 물체를 파지하여야 한다. 물체를 파지할 때 고려해야 할 제한조건으로는 물체의 형상조건, 로봇 손의 사양조건, 주어진 작업조건이 있으며, 물체의 파지를 분석하는 방법은 여러 가지가 있다. M. Cutkosky [1]는 안정성(stability), 추종성(compliance), 연결성(connectivity), 등방성(isotropy) 등 다양한 해석적인 지수를 정의하였고, 파지 기하학을 고려하여 파지 형태를 계층적으로 분류하였으며, 파지 안정성에 있어서 움직이는 속도가 느릴 때와 빠를 때를 구분하여 느릴 때는 전체 강성메트릭스(stiffness matrix)가 양이면 파지는 안정하고, 빠르면 동적 안정성을 고려하여야 한다고 정의하였다.

파지 안정성은 외부의 힘과 모멘트에 의해 외란이 있을 때, 로봇 손과 물체 사이의 마찰력에 의해 물체가 미끄러지지 않고 평형 상태를 유지할 수 있는 정도를 나타내며, 안정성이 높다는 것은 평형 상태를 잘 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 로봇과 물체 사이의 파지 관계는 외란으로부터 저항할 수 있는 능력인 안정성이 많은 영향을 미치기 때문에 많은 연구자들이 관심을 가지고 여러 가지 방법으로 안정성에 대한 연구를 진행하고 있다[2-12].

많은 연구들이 잠재에너지(potential energy)와 강성메트릭스를 이용하여 파지 안정성을 분석하고 있는데, Y. Funahashi, T. Yamada, M. Tate, Y. Suzuki [2]는 로봇 손가락과 물체의 접촉점에서 곡률(curvature)을 고려하여 잠재에너지 방법으로 안정성을 분석하였으며, 곡률을 가진 손가락이 더 안정성이 높다는 것을 입증하였고, P. Jenmalm, A. Goodwin, R. Johansson [3]은 곡률 변화에 따른 파지 안정성을 시험을 통하여 증명하였다. W.

Howard, V. Kumar [4]는 평형상태의 파지 범주를 분류하고 파지 안정성을 강성메트릭스로 분석하기 위한 일차원적인 구성 체계를 정리하였으며, T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno 등 [5]은 3차원 스프링 모델의 잠재에너지를 이용하여 파지 안정성을 분석하였고, 최근에 T. Yamada, T. Ooba, T. Yamamoto 등 [6]은 두 개의 물체를 동시에 파지할 때 2차원에서 잠재에너지를 이용하여 파지 안정성을 분석하였다. 하지만 잠재에너지와 강성메트릭스 방법은 파지한 후에 손가락에 작용하는 힘과 움직인 변위를 알아야 하기 때문에 작업에 대한 경험이 요구되고, 계산이 복잡한 단점이 있다.

B. Kim, B. Yi, S. Oh, I. Suh [7]은 여러 손가락으로 물체를 파지할 때 파지 다각형의 형태에 따라 유형을 분석하여 형상집중도로서 안정성을 정의하였는데, 이 방법은 형상집중도를 파지 각도만을 고려하고 파지 다각형의 크기는 고려되지 않았으며, 두 손가락으로 파지 시는 다각형이 형성되지 않아 안정성 분석을 할 수 없다.

D. Motana [8]는 로봇의 두 손가락으로 물체를 파지하는 경우에 안정성 지수를 물체 형상에 대한 곡률 메트릭스의 고유값(eigenvalue)으로 정의하였는데, 이 방법은 하나의 물체가 하나의 안정성 지수를 갖게 되므로 여러 물체 간의 안정성 비교는 가능하나, 한 물체에서 여러 파지점을 고려할 때는 각 파지점 간의 안정성 비교가 불가능하다.

또한 동적 안정성에 대해서도 많이 연구되었는데, G. Guo, W. Gruver [9]는 진동 모델을 이용하여 분석하였고, T. Li, S. Tso, Q. Meng [10]은 이론적이고 시뮬레이션 관점에서 분석하였으며, S. Arimoto, J. Bae, K. Tahara [11]은 롤링 접촉조건에서 반구 모양의 두 손가락 끝으로 Lagrange's 방정식을 이용하여 분석하였고, A. Shapiro, E. Rimon, J. Burdick [12]는 로봇손이 비선형적인 힘과 변위 관계에 있을 때를 분석하였다.

최근 듀얼 공간(dual-space)을 파지에 적용한, A. Sudsang, T. Phoka [13]는 힘닫힘(force-closure) 조건에서 물체의 파지 가능성을 판정할 수 있는 방법을 듀얼 공간을 이용하여 제시하였으나, 이 연구는 2차원 3 손가락에 한정되었고 물체의 파지

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 6. 11., 채택확정 : 2006. 8. 28.

국명호, 이지홍 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

(BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University)

(kook@cnu.ac.kr/jihong@cnu.ac.kr)

장명언 : 국방과학연구소(mejpcy@bclinc.com)

여부만을 연구하였다.

본 연구에서는 산업용 로봇에 사용할 수 있는 두 손가락 로봇을 대상으로 지면에 놓여 있는 물체를 파지하는 경우(2차원)이며, 로봇 손과 물체가 강직(rigid)하고, 관성 효과는 무시하며, 정적 안정성을 고려하고, 점접촉을 하며, 손가락의 힘은 양의 값을 갖고, 힘단힘 파지 상태로서 미끄러짐이 없는 것으로 가정한다.

본 연구는 파지 안정성을 새로운 방법인 듀얼 공간을 이용하여 분석하므로써, 손가락이 물체에 가해질 힘의 크기와 무관하게 물체의 형상 정보와 마찰계수만으로 물체의 파지 가능 여부와 파지 안정성 지수를 계산하여 최적의 파지점을 찾을 수 있는 장점이 있다.

본 연구의 구성은 II장에서 최근에 연구된 로봇 손과 물체의 마찰원뿔에 대한 듀얼 공간으로의 대응 방법을 소개하고, III장에서는 듀얼 공간을 이용하여 로봇의 물체 파지에 대한 필요충분 조건을 제시한다. 그리고 IV장에서는 로봇의 파지 안정성을 정량화하는 방법과 이를 이용한 파지 안정성 지수(Grasp Stability Index, GSI)를 정의하여 임의의 파지점에서 파지의 안정한 정도를 나타낼 수 있도록 한다. V장에서는 물체의 외부에서 외란이 있을 때 평형을 가장 잘 유지할 수 있는 최적 파지점을 결정하는 방법을 제안하며, VI장에서 비교적 간단한 예제인 사각형과 타원형의 물체를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 제안한 파지점 결정 방법의 적절성을 제시한다.

II. 연구 배경

1. 힘단힘(force-closure)

로봇 손이 물체를 파지할 때, 로봇 손가락과 물체 사이의 접촉 조건은 3가지(point-contact-with-friction model, soft-finger model, complete-constraint model)로 구분할 수 있다[14]. 본 논문에서는 이 중 마찰-점 접촉 모델(point-contact-with-friction model)을 가정하여 로봇 손과 물체의 접촉에서 이루어지는 상호작용을 표현한다. 마찰-점 접촉 모델은 접촉점에서 로봇이 가하는 힘만이 물체에 전달되고, 로봇 손가락의 회전력은 전달되지 않는다. 로봇 손이 물체에 가하는 힘과 모멘트를 렌치(wrench)라 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_i = (f_i, m_i)^T \in R^k \tag{1}$$

$$\text{단, } f_i \in C_i \tag{2}$$

f_i 는 i 번째 로봇 손가락이 물체에 가하는 힘이고, m_i 는 f_i 에 의해 물체에 가해지는 모멘트이다. C_i 는 i 번째 로봇 손가락과 물체의 접촉점에서 마찰원뿔 내부의 방향 벡터들의 집합이다. 그리고 마찰-점 접촉 모델을 만족시키기 위해서 로봇의 손가락이 가하는 힘이 접촉점의 마찰원뿔 내부에 있어야 한다. 그림 1은 로봇 손가락이 가하는 힘과 마찰원뿔 사이의 관계를 나타내고 있다.

그림 1에서 로봇이 물체와의 접촉면에 가하는 수직 방향의 힘이 절대값에 마찰계수를 곱한 값이 마찰력보다 크면 미끄러짐이 발생한다. 그래서 미끄러짐 없이 로봇이 물체를 잡고 있으려면 물체의 표면에 접하는 방향의 힘이 마찰력보다

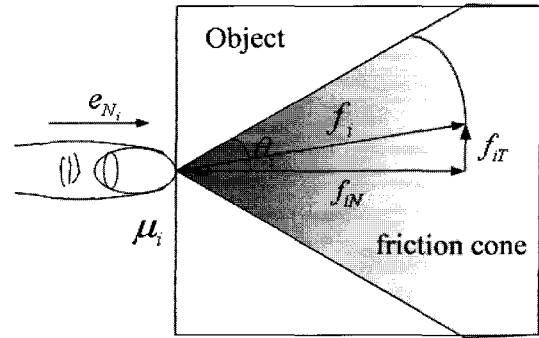


그림 1. 로봇 손가락과 마찰원뿔의 관계.

Fig. 1. Static frictional constraints.

크지 않아야 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_i \|f_{iN}\| \geq \|f_{iT}\| \tag{3}$$

위 식에서 f_{iN} 는 f_i 의 접촉면에 수직 방향 성분, f_{iT} 는 f_i 의 접촉면에 수평 방향 성분, μ_i 는 물체와 i 번째 로봇 사이에 최대 정지 마찰 계수이다. (3)으로부터 힘이 마찰원뿔 안에 있을 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\cos \theta_i \geq \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \tag{4}$$

그러므로 마찰계수 μ_i 를 알면 마찰원뿔의 각 θ_i 를 알 수 있다. 그리고 2차원 평면에서 $k=3$ ($f_i \in R^2, m_i \in R^1$) 이며 f_i 와 m_i 의 관계는 다음과 같다.

$$m_i = p_i \times f_i, \tag{5}$$

$$\text{단, } p_i = (p_{i1} \ p_{i2})^T \in R^2 \tag{6}$$

p_i 는 물체의 무게중심에서 접촉점까지의 거리 벡터이다.

d 개의 로봇 손가락이 물체에 접촉해 힘을 가하는 경우에는 물체가 받는 힘과 모멘트를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W = \sum_{i=1}^d w_i \tag{7}$$

정의 1: d 개의 로봇 손가락에 의해 발생하는 렌치들의 합인 W 가 어떤 R^k (k 차원 실수 벡터)도 만들 수 있을 때 파지는 힘단힘(force-closure)을 만족한다.

정의 1을 외란이 있는 경우에 대해서 고려해보면, 외부에서 물체에 가해지는 렌치와 손가락에 의해 발생하는 렌치들이 서로 상쇄되어 평형을 이루는 경우로 볼 수 있다. 이와 같은 경우는 일반적인 것이며, 외란이 없이 단순히 로봇 손가락에 의해서만 평형을 이루는 경우는 다음과 같이 정의된다.

정의 2: d 개의 로봇 손가락에 의해 발생하는 렌치들의 합이 0(zero)인 경우에 파지는 평형상태(equilibrium)를 만족한다.

힘단힘은 명백히 평형상태를 포함하고 있으며, 정의 2에 대해서 두 개의 손가락으로 물체를 파지하는 경우[15]와 세

손가락의 물체를 파지하는 경우[16]에 대해서 연구가 진행되었다. 그리고 본 논문도 정의 2와 같은 평형상태에 대해서 다룬다.

2. 듀얼 공간

2.1 마찰원뿔의 듀얼 공간으로 대응

일반적으로 로봇 손이 물체를 파지 할 때 힘단힘의 만족 여부는 접촉점에서 손가락이 가하는 힘과 마찰원뿔의 기하학적 표현에 의해서 판단 가능하다. 그러나 Sudsang 등은 2차원 마찰원뿔의 기하학적 모형을 듀얼 공간으로 대응시켜 힘단힘을 판단하는 연구[11]를 하였다. 로봇 작업공간에 있는 2차원 원뿔을 듀얼 공간으로 대응시키는 과정을 보면 그림 2와 같다

그림 2(a)와 같이 로봇 작업 공간에서 로봇 손가락이 물체와 접촉해 있을 때, 마찰 원뿔을 x-y 평면에서 표현할 수 있으며, 마찰원뿔의 경계는 두 개의 일차식으로 나타낼 수 있다.

$$a_1x + b_1y = 1 \tag{8}$$

$$a_2x + b_2y = 1 \tag{9}$$

두 일차식 (8), (9)을 듀얼 공간인 a-b 평면으로 대응시키면, 그림 2(b)와 같이 (a_1, b_1) , (a_2, b_2) 으로 대응된다. 이와 같은 방법으로 x-y평면에서 마찰원뿔의 내부 영역에 해당되는 $(a_px + b_py = 1)$ 을 듀얼 공간으로 대응시키면, a-b평면에서 두 점 $((a_1, b_1)$, $(a_2, b_2))$ 을 잇는 선분 상에 있다. 따라서 로봇 작업 공간의 마찰원뿔을 듀얼 공간으로 대응시키면 하나의 선분으로 대응된다.

2.2 원점 제약조건

로봇 작업 공간의 마찰원뿔은 듀얼 공간으로 대응시키기 위해서 원점을 포함하지 않아야 한다. 만약 로봇 작업 공간에서 마찰원뿔을 나타내는 일반식 $(ax + by = 1)$ 이 원점을 지나면 y절편값 $(1/b)$ 이 0이 되어야 하기 때문에 b가 무한대가 되어 듀얼 공간으로 대응이 불가능하다. 그러므로 로봇 작업 공간에서 마찰원뿔이 원점을 포함하는 경우를 피해야만 듀얼 공간으로 표현이 가능하다.

2.3 듀얼 공간의 장점

로봇 작업 공간의 마찰원뿔을 듀얼 공간으로 대응시켜 힘단힘을 판단하는 방법은 그림 2에서 보는 바와 같이 2차원의 마찰원뿔이 1차원의 선분으로 대응되기 때문에 차원 감소효

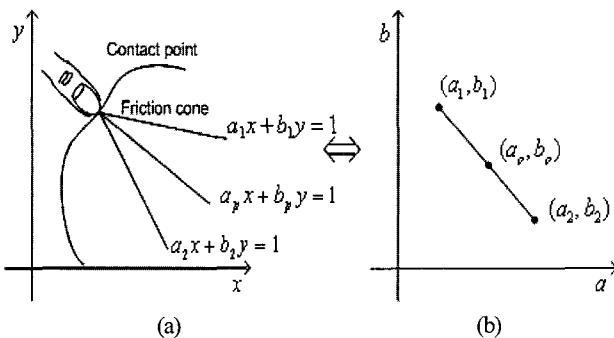


그림 2. 로봇 작업 공간과 듀얼 공간의 대응.
Fig. 2. Mapping between robot work space and dual space.

과를 가져오는 장점이 있다. 또한 듀얼 공간에서 두 선분의 기하학적 관계로 파지 가능 여부를 용이하게 판별할 수 있다. 이에 대한 내용은 III장에서 확인 할 수 있다.

III. 로봇의 물체 파지 조건

1. 로봇 작업 공간

로봇 작업 공간에서 물체의 파지 가능 여부를 판단하기 위해서는 파지점의 마찰원뿔 영역을 이용할 수 있다. 그림 3은 로봇 작업 공간에서 두 개의 손가락이 사각형 물체 (그림의 어두운 부분)를 파지하는 경우이다.

그림 3에서 R점(좌표: 0, 5)은 두 개의 로봇 손가락 중 하나의 손가락에 의한 기준 파지점(기준점)이며, 표시된 점선은 기준점 R에서 손가락 끝에 의해서 만들어진 마찰원뿔의 경계선이다. 그리고 A, B, C, D, E점(좌표: 2, 6.5 ~3.5)들은 다른 하나의 손가락에 의한 이동 파지점(이동점) 들이다.

두 개의 손가락으로 파지하는 경우에 기준점과 이동점이 상대편의 마찰원뿔 내부에 존재하면 파지가 가능하다. 즉 그림 3에서 보는 바와 같이 기준점 R의 마찰원뿔 내부에 이동점이 B(2, 5.73)부터 D(2, 4.27) 사이에 있고, 이동점 B부터 D까지 마찰원뿔 내부에 기준점 R이 있으면 파지가 가능하다.

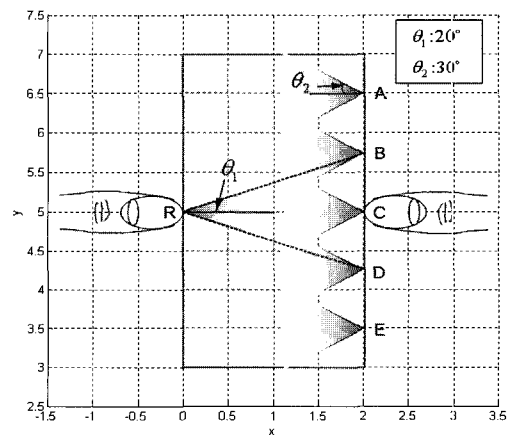


그림 3. 로봇 작업 공간에서 물체 파지.
Fig. 3. Grasping the object in a robot work space.

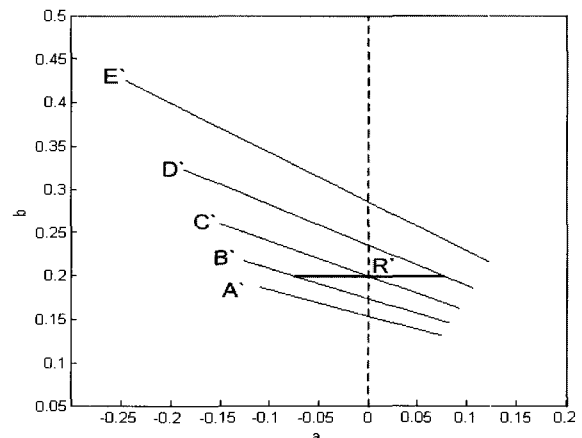


그림 4. 듀얼 공간에서 물체 파지.
Fig. 4. Grasping the object in a dual space.

2. 듀얼 공간

그림 3에서 표현된 로봇 작업 공간의 마찰원뿔들을 듀얼 공간으로 대응시키면 그림 4와 같이 표현된다.

로봇 작업 공간에서 마찰원뿔이 y축 위에 위치하고 파지점의 수직 벡터와 y축이 수직을 이루는 경우, 듀얼 공간에 대응된 선분은 a축과 평행하며 b축에 대하여 대칭이 된다. 따라서 그림 3의 파지점 R의 마찰원뿔은 그림 4의 듀얼 공간에서 (0, 0.2)를 중점으로 하는 a축에 평행한 선분(R') (기준점 대응 선분)으로 대응된다. 그리고 A, B, C, D, E점의 마찰원뿔들은 그림 4의 듀얼 공간에서 각각 선분(A', B', C', D', E') (이동점 대응 선분)로 대응된다. 이와 같은 대응관계에서 다음과 같은 사실을 유추할 수 있다.

Fact 1: 듀얼 공간에서 두 선분이 교차하면 물체를 파지하는 것이 가능하다.

위 절의 로봇 작업 공간에서 기준점 R과 이동점 B(또는 C, D)가 파지 가능하고, 그림 4에서 선분(R')과 선분(B') (또는 C', D')이 이와 대응하기 때문에 파지가 가능함을 알 수 있다. 그러나 기준점 R과 이동점 A (또는 E)가 파지 불가능하고, 듀얼 공간의 선분(R')과 선분(A') (또는 E')은 이와 대응하기 때문에 파지가 불가능 함을 알 수 있다. 따라서 듀얼 공간에서 두 선분이 교차하는 영역인 선분(B')와 선분(D') 사이에 이동점 대응 선분이 있으면, 미끄러짐 없이 물체를 파지할 수 있다.

즉, 파지 가능 여부를 듀얼 공간에서 판단하는 것이 로봇 작업 공간에서 판단하는 것보다 시각적으로 표현(선분의 교차)되기 때문에 쉽다.

3. 원점 제약조건 해결 방안

로봇 작업 공간의 마찰원뿔이 원점을 포함하는 경우 앞 절에서의 원점 제약조건에 따라 듀얼 공간으로 대응이 불가능하다. 그러므로 원점 제약조건을 해결하는 방법으로 물체의 위치를 y축에 따라 적절하게 평행 이동시켜야 하며, 이러한 평행 이동 후에도 선분 길이(a,b)가 일정한 비율을 유지해야 한다. 평행이동 방법은 다음과 같다.

- 1) 물체의 외곽선에 기준점을 선정한다.
- 2) 기준점의 수직벡터와 로봇 작업 공간의 y축이 수직이 되도록 물체를 위치시킨다.
- 3) 이동점의 마찰원뿔이 원점을 포함하는 경우 물체를 이동시킨다. 이동점의 수직벡터가 y축의 양의 방향을 향하면 물체를 y축의 음의 방향으로 평행 이동시키고, y축의 음의 방향을 향하면 양의 방향으로 평행이동시킨다. 단, 기준점은 원점이 되어서는 안 된다.

그림 5는 물체가 y축 방향으로 평행이동 하더라도 a와 b의 비율이 항상 일정함을 보여 주고 있다.

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = h \tag{10}$$

그림 5의 (a)에서 물체는 y축 방향으로 4만큼 이동시켰으며, 이에 따르는 듀얼 공간의 a, b 값은 $a_1 = 0.5774$, $b_1 = 1$ 에서 $a_2 = 0.1155$, $b_2 = 0.2$ 로 변화되었지만 (10)의 h 값은 0.5774로 일정하다.

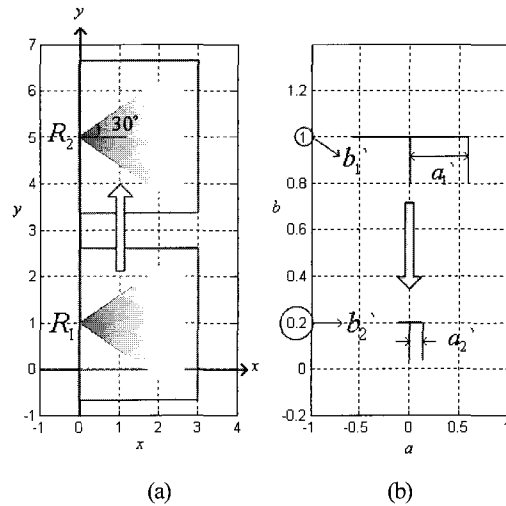


그림 5. 원점 변경 시 듀얼 공간으로 대응.
Fig. 5. Mapping to dual space about changing the origin.

IV. 듀얼 공간을 이용한 안정성 지수 정의

앞 장에서 듀얼 공간으로 대응 시 두 선분이 교차하면 파지 가능함을 확인하였다. 그러나 두 선분이 교차하여 파지가 가능하더라도, 교차점의 위치에 따라 파지 안정성이 크게 달라진다. 본 장에서는 로봇의 파지 안정성을 정량화하기 위하여 듀얼 공간을 이용한 안정성 지수를 정의한다.

Fact 2: 파지 안정성은 기준점의 마찰원뿔에 대응되는 선분과 이동점의 마찰원뿔에 대응되는 선분의 분할 비율이 안정성에 중요한 요소가 된다.

그림 3의 로봇 작업 공간에서 이동점 C는 물체를 가장 안정적으로 잡을 수 있으며, 이를 듀얼 공간으로 대응시킨 그림 4에서는 선분(R')이 선분(C')에 의해서 이동분될 때이다.

또한 로봇 작업 공간에서 이동점 B, D점은 파지 가능한 경계점이며, 이를 듀얼 공간으로 대응시키면 선분(R')의 좌측 끝점은 선분(B')와 접하고, 우측 끝점은 선분(D')과 접한다. 그리고 파지가 가능한 이동점 B와 D 사이의 마찰원뿔들은 듀얼 공간에서 선분(B')과 (D') 사이의 선분들로 대응된다. 가장 안정적으로 잡을 수 있는 C점에서 B점 (또는 D점)으로 파지점이 이동 할 때 로봇 손은 점차 물체를 불안정하게 파지하게 되며, 이때 듀얼 공간에서 선분(R')과 이동점 대응 선분의 교차점은 이동분되는 중앙에서 점차 끝으로 이동한다. 따라서 기준점의 선분이 이동분될 때 파지 안정성이 최대이며, 선분의 양 끝에서 접할 때 최소이다.

물체를 y축 방향으로 평행이동시킬 때 기준점에 대응되는 선분의 분할 비율은 일정하지만, 이동점에 대응되는 선분의 분할 비율은 일정하게 유지되지 않는다. 따라서 이를 일정하게 유지시키기 위해서 다음과 같은 변환 과정을 제시한다.

Proposition 1: 이동점 대응 선분을 기준점 대응 선분의 일직선 상에 위치시켜 표준화된 선분으로 나타낸다.

그림 6은 이동점 ①의 대응 선분을 기준점 R의 대응 선분의 일직선 상에 위치시켜 안정성 지수를 정의할 수 있도록 표준화된 선분으로 나타낸 것이며, 이동점 A와 B에 대응되는 선분은 경계에 해당된다. 듀얼 공간에서 이동점에 의한

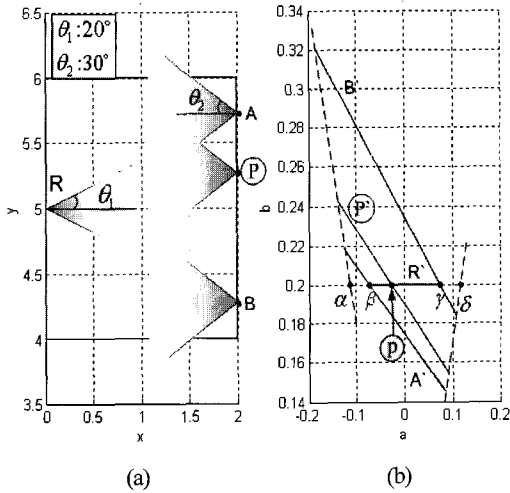


그림 6. 이동점 대응 선분을 표준화된 선분으로 변환.
 Fig. 6. Transforming an inclined segment into a standardized segment.

선분 양 끝점의 자취의 방정식은 직선의 형태로 나타나며, 선분(R)의 연장선과의 교차점 (α), (δ) 을 구할 수 있고, 여기서 선분($\overline{\alpha\delta}$)는 이동점의 표준화된 선분이다.

로봇 작업 공간의 기준점에서 마찰원뿔의 각도(θ)는 듀얼 공간의 a축 좌표값과 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{좌표값 } a_0 = |\tan \theta| \quad (11)$$

(단, b축의 값이 1일 때)

그러므로 마찰원뿔의 각도가 커질수록 듀얼 공간에서 기준점 대응 선분의 길이는 길어진다. 위와 같은 과정들을 거쳐 파지 안정성 지수(GSI)를 다음과 같이 제안한다.

Proposition 2: 파지 안정성 지수(GSI)

$$GSI = \left(\frac{\text{기준점과 이동점의 대응선분}}{\text{대응선분 중첩길이}} \right) \times \left(\frac{\text{기준점 대응선분}}{\text{내분비율}} \right) \times \left(\frac{\text{이동점 대응선분}}{\text{내분비율}} \right)$$

첫 번째 항은 기준점과 이동점의 대응선분이 중첩되는 파지 가능한 영역의 길이이며, 두 번째 항은 기준점 대응 선분이 내분되는 비율이고, 세 번째 항은 이동점 대응 선분이 내분되는 비율이다.

그림 7은 안정성 파지 지수를 구하기 위하여 그림 6의 $\alpha \sim \delta$ 점의 구간을 확대해서 그린 것으로 이동점 대응 선분을 표준화된 선분으로 표시한 것이다. Proposition 2의 파지 안정성 지수를 그림 7에서 정의된 길이로 표현하면

$$GSI(R, P) = \left(\frac{L_0}{2b_0} \times \frac{L_{p1}}{(L_1/2)} \times \frac{L_{p2}}{(L_2/2)} \right) \quad (12)$$

이고, 여기서 각 선분의 정의는 다음과 같다.

- $L_1 = \overline{\beta\gamma}$ (기준점 대응 선분의 길이)
- $L_2 = \overline{\alpha\delta}$ (이동점 대응 선분의 표준화된 길이)
- $L_0 = \overline{\beta\gamma}$ (L_1, L_2 가 중첩되는 선분의 길이)

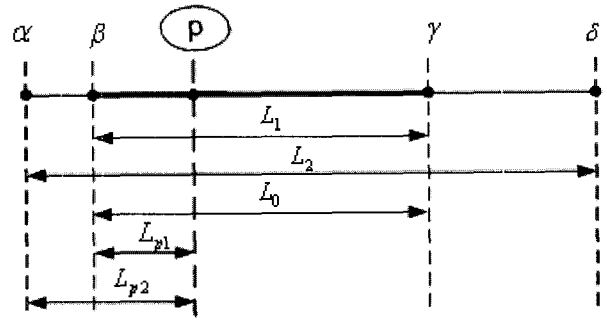


그림 7. 듀얼 공간상의 표준화된 선분 표시.
 Fig. 7. Representation of standardized segments in dual space.

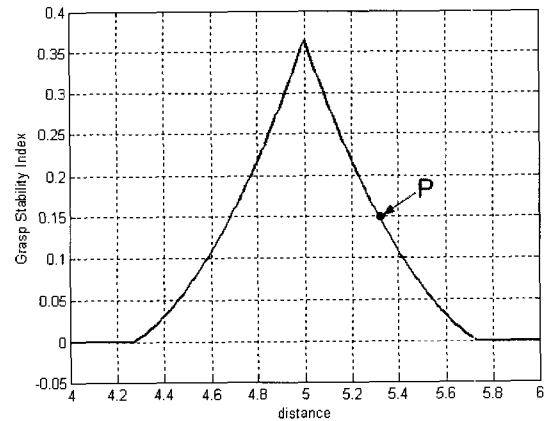


그림 8. 사각형 물체에 대한 파지 안정성 분포곡선.
 Fig. 8. GSI about the quadrangle object(Fig. 6).

$$L_{p1} = \overline{\beta P} \text{ (} L_1 \text{의 양 끝점에서 p점까지 짧은 선분의 길이)}$$

$$L_{p1} = \begin{cases} L_{p1} & \text{for } L_{p1} \leq \frac{L_1}{2} \\ L_1 - L_{p1} & \text{for } L_{p1} > \frac{L_1}{2} \end{cases} \quad (13)$$

$$L_{p2} = \overline{\alpha P} \text{ (} L_2 \text{의 양 끝점에서 p점까지 짧은 선분의 길이)}$$

$$L_{p2} = \begin{cases} L_{p2} & \text{for } L_{p2} \leq \frac{L_2}{2} \\ L_2 - L_{p2} & \text{for } L_{p2} > \frac{L_2}{2} \end{cases} \quad (14)$$

b_0 : 듀얼 공간에서 b축의 값 (그림 6의(b)에서는 0.2)

그림 6에서 이동점을 (2, 4)에서 (2, 6)까지 파지 안정성 지수 정의에 따라 값을 산출하여 안정도 분포곡선을 그리면, 그림 8과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그림 8의 가로축은 그림 6(a)이동점의 y값이며, 세로축은 파지 안정성 지수(GSI)이다. GSI가 가장 큰 점은 y값이 5일 때이며, 그 값은 0.37이다. 즉 두 파지점이 마주 볼 때이다. 그리고 점 P에 해당하는 GSI는 0.15이다. 그림 9(a)는 그림 6(a)와 비교하여 파지하고자 하는 물체의 우측면이 20°기울어져 있다. 그리고 (b)는 이동점이 물체의 우측면에 존재하는 경우에 대해서 듀얼 공간으로 대응시킨 결과이다. GSI를 구하기 위해서 그림 9(b)를

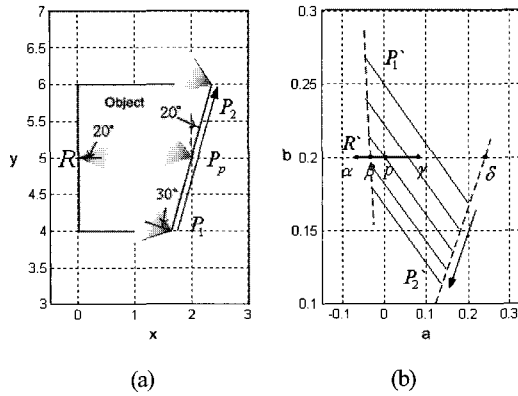


그림 9. 사다리꼴 모형의 파지.
Fig. 9. Grasping the trapezoid object.

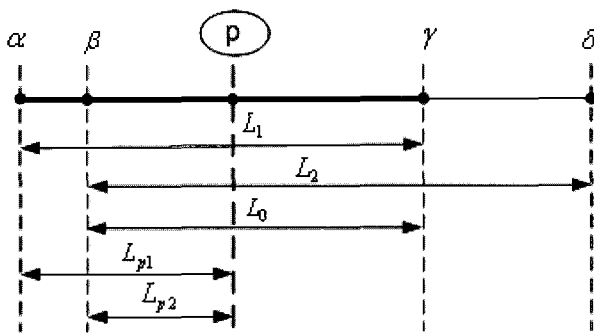


그림 10. 사다리꼴 물체의 파지에 대한 듀얼 공간상의 표준화된 선분 표시.
Fig. 10. Representation of standardized segments in dual space for grasping the trapezoid object.

확대하면 그림 10과 같다. 두 선분의 중첩길이(L_0)를 계산하면, 0.1456(그림 7)에서 0.1080(그림 10)으로 줄어든다. 이와 같이 파지면이 경사지게 되면 중첩길이가 줄어들어 GSI가 작아지는 요인이 된다.

V. 안정성 파지 지수에 따른 최적 파지 계획

앞장에서 제안된 안정성 파지 지수를 이용하여 로봇 손이 물체를 가장 안정되게 파지 하기 위한 최적 파지 계획을 제안한다. 먼저 물체의 최적 파지 계획을 위해 필요한 기호를 다음과 같이 정의한다.

$P(s_0)$ 는 파지 안정성을 산출하는 기준점이며, $P(s)$ 은 이동점으로 파지점 위치, 수직 벡터 및 최대 정지 마찰계수의 정보를 포함하며, 다음과 같이 정의된다.

$$P(s_0) = [0 \quad p_y(s_0) \quad n_x(s_0) \quad 0 \quad \mu(s_0)]^T \quad (15)$$

$$P(s) = [p_x(s) \quad p_y(s) \quad n_x(s) \quad n_y(s) \quad \mu(s)]^T \quad (16)$$

$$0 \leq s \leq S \quad (17)$$

$p_x(s)$, $p_y(s)$ 는 로봇 작업 공간에서 파지점의 위치 벡터 이고, $n_x(s)$, $n_y(s)$ 는 파지점의 물체 형상의 접선에 수직인 방향벡터이며, $\mu(s_i)$ 는 파지점의 마찰계수 이다. S 는 물체

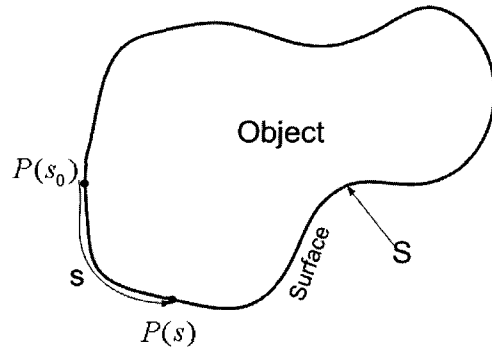


그림 11. 파지할 물체와 파지점의 정의.
Fig. 11. Definition of an object and grasping point.

외곽의 둘레 길이이며, s 는 기준점에서부터 임의의 파지점 까지 물체의 둘레를 따라 돌아가는 길이이다.

두 점 $P(s_0)$, $P(s)$ 에 대한 파지 안정성 지수는 다음과 같이 수식으로 정의 할 수 있다.

$$GSI(s_0, s) = P(s_0)\Theta P(s) \quad (18)$$

(18)에서 Θ 는 두 점($P(s_0)$, $P(s)$) 사이의 파지 안정성 지수를 산출하는 연산 기호이며, 앞의 GSI 정의에 의하여 산출한다. 그리고 다각형 물체와 곡선 물체에 대하여 GSI를 구하는 절차는 동일하다. 그러한 이유는 GSI를 산출하기 위한 파지점의 정보는 접촉점의 위치 벡터와 그곳의 수직벡터, 마찰 계수만으로 이루어지기 때문이다. 다만 차이점이 있다면 다각형 물체의 각 변에서는 파지점의 수직벡터가 일정하고, 곡선 물체는 모든 점에서 수직벡터 값이 달라진다. 그러므로 곡선 물체의 어느 한 접촉점은 그 접촉점에 수평한 방향으로 변을 갖는 다각형 물체의 접촉점과 동일하다.

다음은 최적의 파지점을 구하는 수식이다.

$$Optimal \ Grasp \ Index = \max(GSI(s_0, s)) \quad (19)$$

$$for \ 0 \leq s_0 \leq S, \ 0 \leq s \leq S \quad (20)$$

최적의 경우는 어느 한 기준점을 중심으로 모든 이동점에 대하여 GSI를 구하고, 또 다른 기준점을 중심으로 반복하여 GSI를 구하면 최대 GSI를 산출할 수 있다. 즉 모든 파지점에 대하여 GSI가 최대가 되는 파지점을 탐색하는 것이다.

VI. 적용 예제

본 장에서는 앞장에서 제안한 안정성 파지 지수를 이용하여 사각형 물체와 타원형 물체에 대한 최적 파지점 계획에 관한 시뮬레이션을 하며, 기준점(s_0)을 고정된 한 점에 대해서만 한다.

첫 번째 시뮬레이션은 그림 12와 같은 사각형 물체를 파지 하는 경우로서 마찰원뿔이 30°인 경우이다.

그림 13은 최적 파지 계획의 결과로서 파지가능 위치와 GSI를 나타낸 그림이다. 그래프의 가로축은 기준점으로부터 반시계 방향으로 물체의 윤곽을 따라 이동한 거리값이며, 전체 거리는 19.3320이다. 그리고 최대 파지점은 거리가 7.6217 일 때이다.

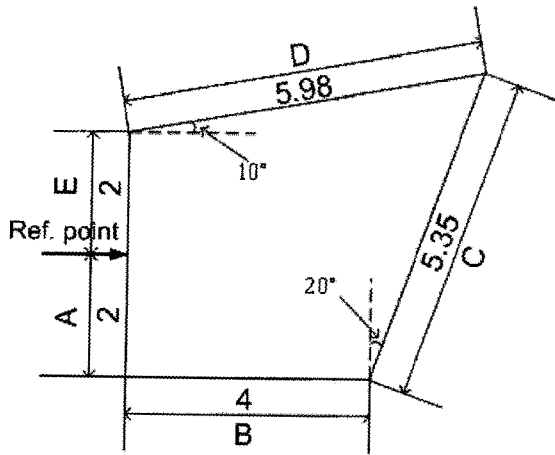


그림 12. 사각형 물체의 파지.
Fig. 12. Grasping the quadrangle object.

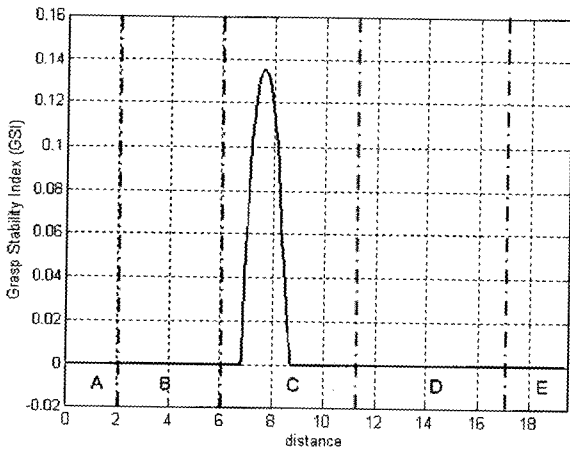


그림 13. 사각형 물체의 파지 안정성 분포곡선.
Fig. 13. GSI about the quadrangle object in friction cone's 30° angle.

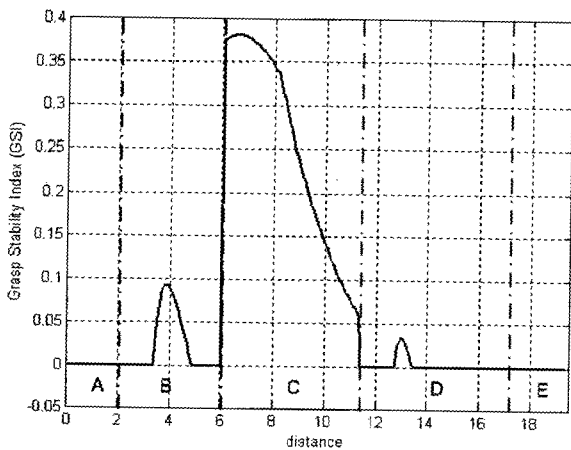


그림 14. 사각형 물체의 파지 안정성 분포곡선.
Fig. 14. GSI about the quadrangle object in friction cone's 60° angle.

그림 14는 물체에서 기준점과 이동점의 마찰원뿔이 60°인 경우에 최적 파지 계획의 결과이다. 사각형의 상단, 우측면,

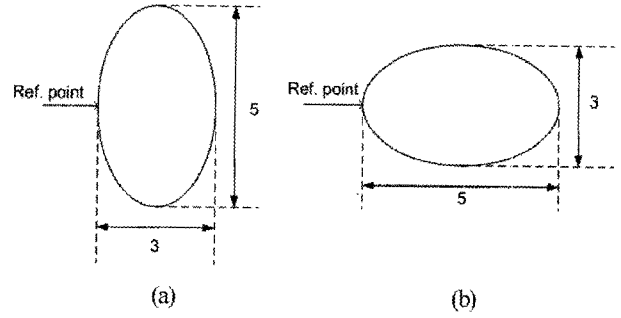


그림 15. 타원형 물체의 파지.
Fig. 15. Grasping an elliptic object.

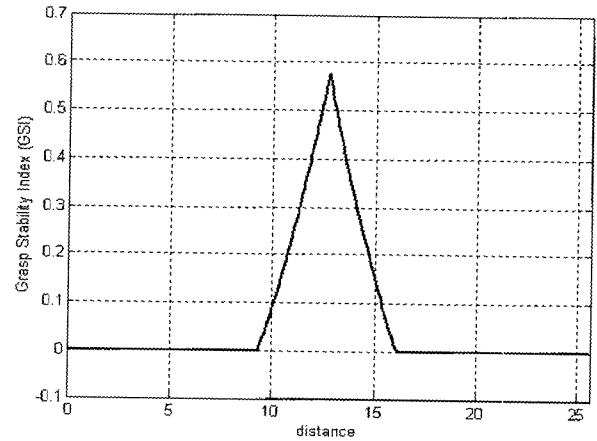


그림 16. 타원형 물체(그림 15의 a)의 안정성 분포곡선.
Fig. 16. GSI of the elliptic object at a point of minor axis.

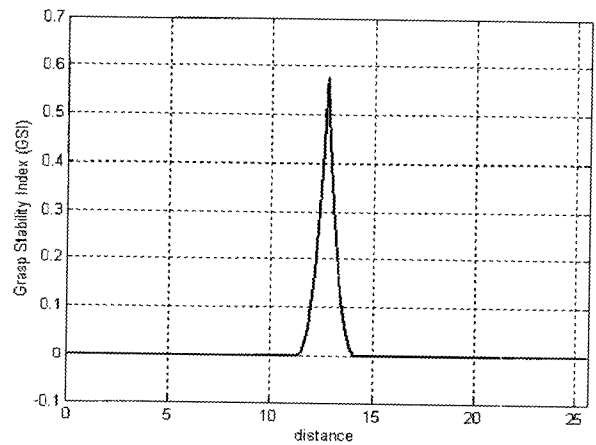


그림 17. 타원형 물체(그림 15의 b)의 안정성 분포곡선.
Fig. 17. GSI of the elliptic object at a point of major axis

하단에서 모두 파지 가능한 영역이 존재하며, 최적 파지점은 기준점으로부터 거리가 6.5406이고, 이때 GSI는 0.3808이다.

그림 14에서 기준점으로부터 거리가 6일 때와 11.3516일 때 불연속적으로 값이 바뀌는 것은 물체의 형상에 의한 단절로 그림 12에서 우측 하단과 상단의 모서리에 해당되는 부분이다.

두 번째 시뮬레이션은 타원형의 물체를 파지하는 경우이다. 각각 기준점과 이동점의 마찰원뿔은 30°이며, 그림 15이

(a)는 타원 단축의 한 점을 기준점으로, (b)는 장축의 한 점을 기준점으로 GSI를 산출하였다.

그림 16은 그림 15(a)와 같이 파지 기준점을 잡았을 때의 파지 안정성 분포 곡선을 나타낸 것으로, 지수가 최대가 되는 지점은 기준점으로부터 12.7514일 때이며, GSI가 0.5774이다.

그림 17은 그림 15(b)의 경우로, 최대 지수가 되는 점은 기준점으로부터 12.7514일 때이며, GSI는 0.5774이다.

두 경우 모두 GSI 최대값은 동일하나, 파지 가능 길이는 그림 15의 (a)에서는 6.8488, (b)에서는 1.5354이므로 (a)의 경우가 더 긴 구간에서 파지 가능함을 알 수 있고, 최대값 근처의 GSI 기울기도 (a)가 더 완만하여 파지 위치의 오차가 발생할 때 (a)가 (b)보다 안정성이 높음을 알 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 로봇의 두 손가락을 이용하여 물체를 파지할 때, 로봇 작업 공간에서 로봇 손가락과 물체 사이의 접촉점에서 형성된 마찰원뿔을 듀얼 공간으로 대응시켜 파지 가능 여부를 판단하고, 듀얼 공간상의 선분의 길이를 이용하여 파지 안정성 지수를 제안하였다. 이러한 지수를 기반으로 최적의 파지 지점을 결정할 수 있었다. 그러므로 기존 연구에서 파지 안정성을 로봇 작업 공간에서 분석하던 것을 본 연구에서는 듀얼 공간으로 대응시켜 파지 가능 여부를 보다 용이하게 분석할 수 있었고, 파지 안정성 지수(GSI)를 구체적으로 정량화 하여 제안할 수 있었다. 그리고 비교적 간단한 형태인 사각형과 타원형 물체를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방법을 적용하였으며, 그 결과 안정성 파지 지수의 효용성을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 2차원만을 분석하였으나, 실제로 물체를 파지할 때는 3차원이므로 차후에는 3차원의 로봇 작업 공간을 듀얼 공간으로 대응시켜 파지 가능여부를 판단하고, 안정성 파지 지수를 산출하는 연구가 추가적으로 필요하다.

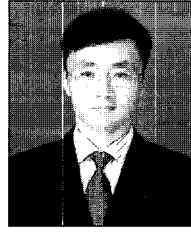
참고문헌

- [1] 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.
- [2] Y. Funahashi, T. Yamada, M. Tate, and Y. Suzuki, "Grasp stability analysis considering the curvatures at contact points," *Proc. Of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1996.
- [3] P. Jenmalm, A. Goodwin, R. Johansson, "Control of grasp stability when humans lift objects with different surface curvatures," *Journal of Neurophysiology*, 1998.
- [4] W. Howard and V. Kumar, "On the stability of grasped objects," *IEEE Tran. On Robotics and Automation*. 1996.
- [5] T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno, N. Mimura, and Y. Funahashi, "Stability analysis of 3D grasps by a multifingered hand," *Proc. of the 2001 IEEE Int. Con. on Robotics & Automation*, 2001.
- [6] T. Yamada, T. Ooba, T. Yamamoto, N. Mimura, and Y. Funahashi, "Grasp stability analysis of two objects in two dimensions," *Proc. of the 2005 IEEE Int. Con. on Robotics & Automation*, 2005.
- [7] B. Kim, B. Yi, S. Oh, and I. Suh, "Optimal grasp planning of object based on weighted composite grasp index," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 6, no. 11, 2000.
- [8] D. Montana, "Contact stability for two-fingered grasps," *IEEE Trans. On Robotics & Automation*, 1992.
- [9] G. Guo, and W. Gruver, "Dynamic grasp planning of multifingered robot hands based on asymptotic stability," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetic*, vol. 26, no. 5, 1996.
- [10] Y. Li, S. Tso, and Q. Meng, "Grasping force measurement for dynamic grasp stability assessment," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1998.
- [11] S. Arimoto, J. Bae, and K. Tahara, "Stability on a manifold: simultaneous realization of grasp and orientation control of an object by a pair of robot fingers," *Proc. of the 2003 IEEE Int. Con. on Robotics & Automation*, 2003.
- [12] A. Shapiro, E. Rimon, and J. Burdick, "On the mechanics of natural compliance in frictional contacts and its effect on grasp stiffness and stability," *Proc. of the 2004 IEEE Int. Con. on Robotics & Automation*, 2004.
- [13] A. Sudsang and T. Phoka, "Geometric reformulation of 3-fingered force-closure condition," *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 2005.
- [14] J. K. Salisbury and B. Roth, "Kinematic and force analysis of articulated mechanical Hands," *ASME J. Mech. Design*, vol. 82-DET-13, 1982.
- [15] V-D. Nguyen, "Constructing force-closure grasps," *International Journal of Robotics Research*, (3):3-16, June 1988.
- [16] J. Ponce and B. Faverjon. "On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(6):868-881, December 1995.



국명호

1979년 10월 2일 출생. 2005년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 2005년~현재 동대학원 석사과정. 관심분야는 로봇틱스, 이동로봇, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리.



장명언

1965년 2월 28일 출생. 1987년 전남대 기계공학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업. 2005년~현재 충남대 메카트로닉스공학과 박사과정. 1989년~1993년 럭키석유화학㈜ 근무. 1993년~현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 로봇틱스, 이동로봇.



이지홍

1960년 4월 21일 출생. 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사. 1983년~1988년 현대중공업 로봇사업부 연구원. 1991년 한국과학기술원 연수연구원.

1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템.