

3 차원 Acceleration Convex Polytope 를 기반으로 한 로봇 손의 안정한 파지 분석

Analysis on Stable Grasping based on Three-dimensional Acceleration Convex Polytope for Multi-fingered Robot

장명언, 이지홍*
(Myeong-Eon Jang and Jihong Lee)

Abstract : This article describes the analysis of stable grasping for multi-fingered robot. An analysis method of stable grasping, which is based on the three-dimensional acceleration convex polytope, is proposed. This method is derived from combining dynamic equations governing object motion and robot motion, force relationship and acceleration relationship between robot fingers and object's gravity center through contact condition, and constraint equations for satisfying no-slip conditions at every contact points. After mapping no-slip condition to torque space, we derived intersected region of given torque bounds and the mapped region in torque space so that the intersected region in torque space guarantees no excessive torque as well as no-slip at the contact points. The intersected region in torque space is mapped to an acceleration convex polytope corresponding to the maximum acceleration boundaries which can be exerted by the robot fingers under the given individual bounds of each joints torque and without causing slip at the contacts. As will be shown through the analysis and examples, the stable grasping depends on the joint driving torque limits, the posture and the mass of robot fingers, the configuration and the mass of an object, the grasp position, the friction coefficients between the object surface and finger end-effectors.

Keywords : multi-fingered robot, stable grasping, three-dimensional acceleration convex polytope

I. 서론

안정한 파지는 로봇 손(multi-fingered robot)이 물체를 파지하고 조작하는데 중요한 요소이다. 로봇 손은 우주, 심해, 원자로 등 인간이 직접 작업할 수 없는 극한 환경에서 절실히 요구되고 있다. 로봇 손으로 인간의 손과 같이 정밀하고 다양한 작업이 가능하도록 하기 위해서는 안정한 파지가 선행되어야 한다. 안정한 파지에 대한 연구는 이와 같은 필요성 때문에 로봇 연구 초기부터 주요한 관심분야로 많은 연구자들이 수행하여 왔다[1-7].

로봇 손으로 원하는 작업을 수행하기 위해 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, 빠를 때는 동적 안정성을 고려하여야 한다고 정의하였다.

많은 연구들이 포텐셜에너지(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 포텐셜에너지 방법으로 안정성을 분석하였으며, 곡률을 가진 손가락이 더 안정성이 높

다는 것을 입증하였고, T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno 등 [3]은 3차원 스프링 모델의 포텐셜에너지를 이용하여 파지 안정성을 분석하였고, M. Kook, M. Jang, J. Lee [4]은 최근에 듀얼 공간을 이용하여 두 손가락 로봇의 파지 안정성을 분석하여 파지 안정성 지수를 정의하였으며, T. Yamada, T. Ooba, T. Yamamoto 등 [5]은 두 개의 물체를 동시에 파지할 때 2차원에서 포텐셜에너지를 이용하여 파지 안정성을 분석하였다. 하지만 포텐셜에너지와 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 [6]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 [7]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.

본 논문은 로봇이 물체를 파지할 때 제한조건인 물체의 형상조건, 로봇 손의 사양조건, 주어진 작업조건을 모두 반영하여 분석한다. 즉, 물체 동역학, 로봇 동역학을 기본 식으로 하고, 접촉조건에 따른 로봇 손과 물체 무게중심 사이의 힘과 가속도 관계 및 모든 접촉점에서 미끄러지지 않을 제한조건을 모두 조합하여 3차원 acceleration convex polytope를 구하였으며, 이를 이용하여 안정한 파지를 분석한다. 본 논문의

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 3. 27., 채택확정 : 2008. 9. 29.

이지홍 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단(jihong@cnu.ac.kr)

장명언 : 국방과학연구소(mejpcy@bclinc.com)

구성은 II 장에서 시스템의 동역학과 기구학을 이용하여 관계식을 구하고, III 장에서 로봇 손끝과 물체의 접촉점에서 발생하는 마찰원뿔을 선형으로 근사화하는 방법을 나타내며, IV 장에서 선형프로그램을 이용하여 acceleration convex polytope를 구하는 방법을 제시하고, V 장에서 제안된 방법의 유용성을 확인하기 위하여 예제를 적용하여 분석을 수행한다.

II. 시스템 동역학과 기구학

로봇 손이 물체를 파지할 때, 접촉점에 마찰력이 작용하면 각 손가락은 물체에 힘과 모멘트를 전달할 수 있다.

1. 물체의 동력학식

물체의 중심에 최종적으로 작용하는 힘과 모멘트인 Wrench(Q)는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$Q = I_o \ddot{u}_o + Q_o \quad (1)$$

여기에서 I_o 는 물체의 관성텐서(Inertia Tensor)이며, \ddot{u}_o 는 물체 중심의 가속도이고, Q_o 는 중력과 회전속도에 관련된 항이다.

2. 로봇의 동력학식

로봇 손은 몇 개의 손가락으로 구성되어 있고, 이 손가락 끝은 물체에 힘과 모멘트를 부가한다. 손가락 관절에 부가된 토크 (τ) 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\tau = M\ddot{q} + J^T F + h + c \quad (2)$$

여기에서 M 은 로봇 손의 관성항이고, \ddot{q} 는 손가락 관절의 각가속도를 나타내며, J 는 로봇 관절 공간과 물체 작업 공간의 선형 매핑 관계를 나타내는 자코비안 행렬이고, F 는 로봇 손끝에서 물체에 가하는 힘이며, h 는 전항력과 원심력이고, c 는 중력을 나타낸다.

3. 힘 관계식

로봇 손끝이 물체에 힘을 부가할 때, 로봇 손끝과 물체의 힘 관계는 다음과 같다[8].

$$Q = W S F \equiv W F_s$$

$$W = [W_1 \ \dots \ W_m] \in R^{6 \times 3m}$$

$$W_i = \begin{bmatrix} I_3 \\ P_i \end{bmatrix} \in R^{6 \times 3}, \quad P_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3} \quad (3)$$

$$S = \text{diag}[S_1 \ S_2 \ \dots \ S_m] \in R^{6m \times nm}$$

여기에서 W 는 물체의 중심이 받고 있는 Wrench(Q)와 로봇 손끝이 물체에 가하고 있는 힘(F) 사이의 관계를 나타내는 파지행렬이고, m 은 로봇 손가락 수이며, $p_i = [p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}]^T$ 은 물체 좌표계에서 i 번째 접촉점의 위치벡터이고, S 는 접촉 조건에 따른 선택행렬이다.(로봇 손끝이 마찰이 있는 점접촉을 고려하면 $S_i \equiv [I_3 \ 0_3]^T \in R^{6 \times 3}$ 와 같다). n 은 로봇 손끝이 물체에 부가하는 힘과 모멘트의 구성요소 수이다.

식 (1)과 식 (3)에서, 로봇 손끝에 작용하는 힘(F_s)에 대해

정리하면, 다음의 pseudo-inverse 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_s = W^\# (I_o \ddot{u}_o + Q_o) + N(W) \varepsilon \quad (4)$$

여기에서 $W^\#$ 는 W 의 pseudo-inverse이고, $N(W)$ 은 W 의 영 공간(null space)이며, ε 은 임의의 벡터를 나타낸다. 또한 $N(W) \varepsilon$ 은 접촉점에서의 내력(internal forces)을 나타낸다.

4. 가속도 관계식

로봇 손끝과 물체 사이의 가속도 관계식은 다음과 같이 나타낸다[9].

$$\ddot{u}_e = W^T \ddot{u}_o \quad (5)$$

여기에서 $\ddot{u}_e = [(\ddot{u}_{e1})^T \ \dots \ (\ddot{u}_{em})^T]^T$ 은 m 대 로봇 손끝의 가속도 벡터이다. 로봇 관절의 각 가속도와 로봇 손끝의 가속도 (\ddot{u}_e) 는 $\dot{u}_e = S J \dot{q} \equiv J_s \dot{q}$ 로 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{u}_e = J_s \ddot{q} + \dot{J}_s \dot{q} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)로부터, 물체의 가속도와 로봇 관절의 각 가속도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$W^T \ddot{u}_o = J_s \ddot{q} + \dot{J}_s \dot{q} \quad (7)$$

5. 로봇 손의 토크에 의한 가속도

식 (4)의 F_s 와 식 (7)의 \ddot{q} 을 식 (2)에 대입하면, 로봇 관절의 토크와 물체 가속도의 선형 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A \ddot{u} = B \tau + V$$

$$A = [W^T + J_s M^{-1} J_s^T W^\# I_o \quad J_s M^{-1} J_s^T N(W)],$$

$$\ddot{u} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_o^T & \varepsilon^T \end{bmatrix}^T, \quad B = J_s M^{-1}, \quad (8)$$

$$V = \begin{bmatrix} -J_s M^{-1} (J_s^T W^\# Q_o + h + c) + J_s \dot{q} \end{bmatrix}.$$

여기에서 A 는 정방행렬이고, V 는 로봇 관절의 초기 각속도가 주어지면 상수가 되기 때문에 고정된 값의 행렬이 된다. 식(8)을 물체의 가속도 항에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{u}_o = S_o A^{-1} B \tau + S_o A^{-1} V \quad (9)$$

여기에서 S_o 는 가속도 항만을 추출하기 위한 선택행렬이다. 식 (9)는 로봇 관절의 토크 값을 알면, 가속도 값을 구할 수 있는 선형 방정식 형태가 된다.

III. 접촉점에서의 마찰원뿔 근사화

일반적으로 로봇 손끝과 물체 사이의 관계는 마찰 특성이 적용된다. 이 마찰특성은 Coulomb의 friction model로 표현될 수 있다. 접촉력은 수직방향 성분과 수평방향 성분으로 나눌 수 있다. Coulomb의 friction model은 일반적으로 각 접촉력이 마찰원뿔의 경계면 내부에 위치하는 것으로 정의되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\sqrt{f_{ix}^2 + f_{iz}^2} \leq \mu_i f_{iy} \quad (10)$$

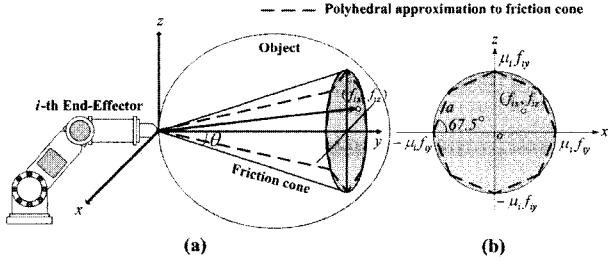


그림 1. 마찰원뿔의 근사화.

Fig. 1. The Approximation of friction cone.

여기에서 μ_i 는 i 번째 로봇 손끝과 물체 표면 사이의 마찰 계수이고, f_n 는 접촉력의 접선방향 성분이고, f_{n_x} 과 f_{n_y} 는 접촉력의 수직방향 성분이다. 그림 1(a)는 정적 마찰 구속조건과 마찰원뿔의 근사화를 기하학적으로 표현한 것이며, θ 는 마찰원뿔의 직각삼각형의 빗면과 y 축 사이의 각이다. 제약조건 식 (10)은 비선형 부등식 형태이기 때문에 용이한 분석을 위하여 마찰원뿔을 그림 1(b)와 같이 8각뿔 형태로 변환한다. 이 8각뿔은 선형 부등식 형태로서 표현할 수 있다. 예를 들어 그림 1(b)의 선분 a는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a : f_{ix} - \mu_i f_{iy} + (\sqrt{2} - 1) f_{iz} \leq 0 \quad (11)$$

$$(\tan 67.5^\circ = \sqrt{2} - 1)$$

이와 같은 방법으로 8각형의 선형 방정식을 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & -\mu_i & (\sqrt{2} - 1) \\ 1 & -\mu_i/(\sqrt{2} - 1) & 1/(\sqrt{2} - 1) \\ -1 & -\mu_i/(\sqrt{2} - 1) & 1/(\sqrt{2} - 1) \\ -1 & -\mu_i & (\sqrt{2} - 1) \\ -1 & -\mu_i & -(\sqrt{2} - 1) \\ -1 & -\mu_i/(\sqrt{2} - 1) & -1/(\sqrt{2} - 1) \\ 1 & -\mu_i/(\sqrt{2} - 1) & -1/(\sqrt{2} - 1) \\ 1 & -\mu_i & -(\sqrt{2} - 1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

마찰원뿔의 근사화는 다각형의 개수를 많게 할수록 원에 근접하여 더욱 정확한 값을 계산할 수 있다.

식(12)로부터, 선형 마찰 제약조건은 다음과 같이 표현된다.

$$CRF_s \leq 0 \quad (13)$$

$$C = \text{diag}[C_1 \ C_2 \ \dots \ C_m] \in R^{8m \times 3m}$$

여기에서 R 은 로봇 손끝의 마찰원뿔이 초기 좌표에서 작동점으로 전환된 회전행렬이다.

IV. Acceleration Convex Polytope

1. 관절 토크의 제약 방정식

식 (7)을 식 (2)에 대입하고, 로봇 손끝의 작용력(F_s)에 관하여 정리하면 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$F_s = -\left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} W^T \ddot{u}_o + \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} J_s M^{-1} \tau - \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} \left(J_s M^{-1} (h+c) - \dot{J}_s \dot{q}\right) \quad (14)$$

식(9)의 \ddot{u}_o 를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$F_s = \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} \left(J_s M^{-1} - W^T S_b A^{-1} B\right) \tau - \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} \left(W^T S_b A^{-1} V + J_s M^{-1} (h+c) - \dot{J}_s \dot{q}\right) \quad (15)$$

식 (13)에 식 (15)를 대입하면, 로봇 관절의 마찰이 고려된 토크 제약 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha \tau \leq \beta$$

$$\alpha = CR \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} \left(W^T A^{-1} B + J_s M^{-1}\right), \quad (16)$$

$$\beta = -CR \left(J_s M^{-1} J_s^T\right)^{-1} \left(W^T A^{-1} V + J_s \dot{q} - J_s M^{-1} (h+c)\right)$$

2. 선형계획법 적용

각 관절 토크의 능력은 다음의 부등식으로 주어진다.

$$\tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max} \quad (17)$$

식 (16)의 근사화된 마찰 접촉 구속조건과 식 (17)의 관절 토크 능력을 모두 만족시킬 수 있는 최대 허용토크를 구하기 위해 상용의 선형계획법(LP, Linear Program)을 적용한다. 선형 계획법의 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\text{Objective Function : } \min f^T \times \tau$$

$$\text{Subject to: } \alpha \tau \leq \beta, \tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max} \quad (18)$$

$$f = \begin{bmatrix} -1 & \dots & -1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -1 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \in R^{nm \times 2^{nm}}$$

3. Acceleration Convex Polytope 산출

계산된 최대 허용토크를 식 (9)에 대입하면, 물체 무게중심이 낼 수 있는 가능한 가속도(\ddot{u}_o)를 구할 수 있다. 최종적으로 가능한 가속도를 모두 모아서 점점들을 연결하면 볼록한 다면체 형태가 구성된다. 이 다면체가 acceleration convex polytope이며, 접촉점에서 미끄러지지 않고 각 관절 토크의 영역 한도에서 로봇 손에 의해서 부가할 수 있는 물체 중심의 최대 가속도 영역이 된다.

4. Acceleration Convex Polytope 계산 및 분석

위의 방법을 이용하여 그림 2의 로봇을 분석하였다. 로봇과 물체의 매개변수는 표 1과 같다. 이 로봇은 3개의 손가락을 가지고 각각 3개의 회전 관절이 있으며, x-y축 상에서 120도 간격으로 구를 파지하고 있다 (z축 값은 0).

이 경우 식 (8)의 각 항은 다음과 같은 값을 갖는다.

$$A = \begin{bmatrix} 2.85 & -1.00 & 0.23 & -0.01 & 1.41 & 0.25 & -1.32 & 1.02 & -0.87 \\ -1.00 & 1.69 & -0.14 & -1.42 & 0.01 & 0.44 & 0.61 & -0.63 & 0.67 \\ 2.02 & -1.17 & 1.36 & -0.27 & -0.46 & 0 & -0.44 & 0.37 & -0.33 \\ 1.11 & 0 & 0 & 0 & 1.43 & -0.51 & -0.02 & -0.18 & 0.07 \\ 0 & 3.43 & 0.27 & -1.40 & 0 & 0 & 0.06 & -0.78 & -2.03 \\ 0 & 2.34 & 1.36 & 0.54 & 0 & 0 & 0.02 & -0.24 & -0.62 \\ 2.85 & 1.00 & -0.23 & 0.01 & 1.41 & 0.25 & 1.58 & 1.02 & 0.09 \\ 1.00 & 1.69 & -0.14 & -1.42 & -0.01 & -0.44 & 0.78 & 0.76 & 0.13 \\ -2.02 & -1.17 & 1.36 & -0.27 & 0.46 & 0 & -0.54 & -0.39 & -0.04 \end{bmatrix}$$

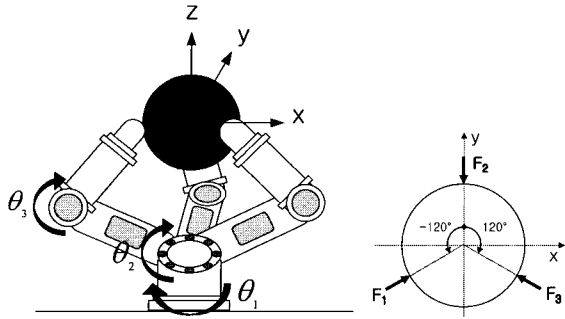


그림 2. 3손가락 3관절 로봇의 형상.
Fig. 2. The configuration of the robot which has three fingers with each three joints.

표 1. 로봇과 물체의 매개변수.
Table 1. Parameters of Robot and Object.

Robot Parameters		Finger 1	Finger 2	Finger 3
Joint Angle	θ_1	-120°	0°	120°
	θ_2	10°	10°	10°
	θ_3	81.47°	81.47°	81.47°
Mass of link (Kg)	$m_{1,2,3} = 0, 1, 1$			
Length (m)	$l_{1,2,3} = 0, 1, 1$			
Joint Torque Constraint (Nm)	$\ \tau_{1,2,3}\ _\infty \leq 30$			
Initial Angular Velocity ($^\circ/s$)	$\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = 0$			
Object Parameters				
Mass (Kg)	$m_o = 1$			
Diameter (m)	$D_o = 0.5$			
Initial Angular Velocity ($^\circ/s$)	$\omega = 0$			
Friction cone ($^\circ$)	$\theta = 30$			

$$B = \begin{bmatrix} 0.34 & -0.19 & -2.18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.60 & 0.11 & 1.26 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & -1.98 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.69 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.22 & -2.52 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.72 & -1.98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.34 & 0.19 & 2.18 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.60 & 0.11 & 1.26 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.72 & -1.98 \end{bmatrix}$$

$$V = [0.49 \quad -0.28 \quad -7.88 \quad 0 \quad 0.56 \quad -7.88 \quad -0.49 \quad -0.28 \quad -7.88]^T$$

식 (16)의 항은 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a3 & a1 & a2 \\ a2 & a3 & a1 \end{bmatrix} \in R^{24 \times 9}$$

$$\beta = [b1 \quad b1 \quad b1]^T \in R^{24 \times 1}$$

$$a1 = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.10 & -0.76 \\ 0.29 & 0.97 & -3.13 \\ -0.29 & 0.97 & -3.13 \\ -0.29 & 0.10 & -0.76 \\ -0.29 & -0.33 & 0 \\ -0.29 & -1.53 & 1.30 \\ 0.29 & -1.53 & 1.30 \\ 0.29 & -0.33 & 0 \end{bmatrix} \quad a2 = \begin{bmatrix} -0.12 & 0.22 & 0.15 \\ -0.37 & -0.07 & 0.67 \\ -0.10 & -0.60 & 0.51 \\ 0.16 & -0.31 & -0.01 \\ 0.32 & -0.19 & -0.26 \\ 0.86 & 0.15 & -0.94 \\ 0.59 & 0.68 & -0.78 \\ 0.05 & 0.35 & -0.10 \end{bmatrix}$$

$$a3 = \begin{bmatrix} -0.16 & -0.31 & -0.01 \\ 0.10 & -0.60 & 0.51 \\ 0.37 & -0.07 & 0.67 \\ 0.12 & 0.22 & 0.15 \\ -0.05 & 0.35 & -0.10 \\ -0.59 & 0.68 & -0.78 \\ -0.86 & 0.15 & -0.94 \\ -0.32 & -0.19 & -0.26 \end{bmatrix}$$

$$b1 = [1.73 \quad 11.78 \quad 11.78 \quad 1.73 \quad -2.72 \quad -14.15 \quad -14.15 \quad -2.72]$$

최대 허용토크 (τ) 와 최대 가속도 (\ddot{u}_o) 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \begin{bmatrix} -30.00 & -30.00 & 30.00 \\ 21.68 & 23.87 & 30.00 \\ -0.77 & -0.40 & 30.00 \\ -30.00 & -30.00 & 30.00 \\ 21.68 & \dots & 30.00 \dots 30.00 \\ -0.77 & -0.80 & 30.00 \\ -30.00 & -18.39 & 30.00 \\ 21.68 & 30.00 & 30.00 \\ -0.77 & -0.17 & 30.00 \end{bmatrix} \in R^{9 \times 512}$$

$$\ddot{u}_o = \begin{bmatrix} 0.53 & -7.15 & -0.13 \\ -1.46 & -4.04 & -1.11 \\ -30.19 & -10.18 & 12.06 \end{bmatrix} \in R^{3 \times 108}$$

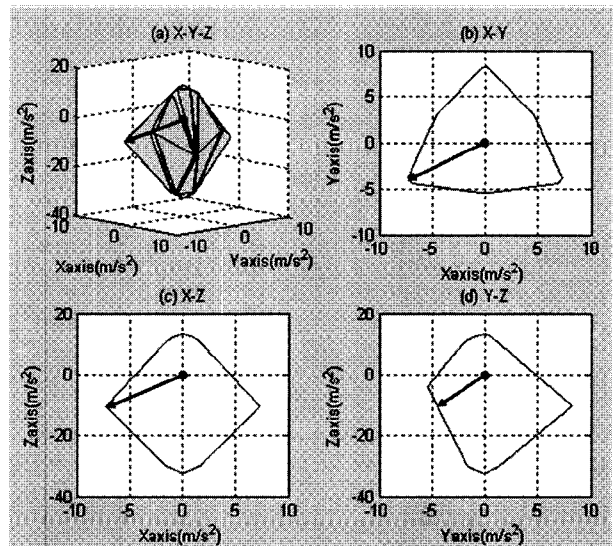


그림 3. Acceleration Convex Polytope 결과.
Fig. 3. The result of Acceleration Convex Polytope.

결과적으로 그림 3(a)에 3차원 acceleration convex polytope를 구하였다. 이는 다면체의 볼록 정점들로 구성되어 있다.

그림 2의 로봇 파지 형상은 y축에 대하여 좌우대칭이다. 그림 3(b) x-y축의 결과에서도 y축에 대하여 좌우대칭을 확인할 수 있다. 또한 각 파지점에서 정점을 이루고 있어 파지 형상과 잘 일치함을 알 수 있다. 3방향의 최대 가속도는 각각 8.21 m/s^2 이다. 그림 3(c) x-z축에서 z축의 최대 음의 절대값(-30.19 m/s^2)이 최대 양의 절대값($+12.06 \text{ m/s}^2$)보다 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이는 중력에 의한 효과로 직관과 잘 일치한다.

3차원의 위치 관계를 확인하기 위하여 최대 가속도 경계면 중의 한 벡터 $P(x, y, z) = [-7.15, -4.04, -10.18]$ 를 그림 3에 표시하였다.

V. 적용 예제

앞 장의 응용 예로부터 여러 파지점의 결과를 확인하기 위하여 힘 F_2 의 파지점은 고정하고, 힘 F_1, F_3 의 파지점은 ①에서 ⑤로 이동하는 경우를 고려하였다. 로봇의 형상은 앞 장의 응용 예와 같고, 로봇과 물체의 매개변수는 표 2의 손가락 1, 3의 관절각 θ_1 의 변화를 제외하고는 표 1과 같다. 그림 5에 3차원 acceleration convex polytope를 구하였고, 그림 6에 그 결과를 x-y축, x-z축, y-z축으로 각각 분석하였다. 그림 6 (a) x-y 축에서 모든 acceleration convex polytope가 y축에 대하여 좌우대칭이다. 그림 6 (c) y-z 축에서 파지점 ⑤의 acceleration convex polytope는 원점을 포함하지 않고 있다. 이는 물체를 파지할 수 없음을 뜻한다.

Acceleration convex polytope는 관절 토크한계, 로봇 손의 자

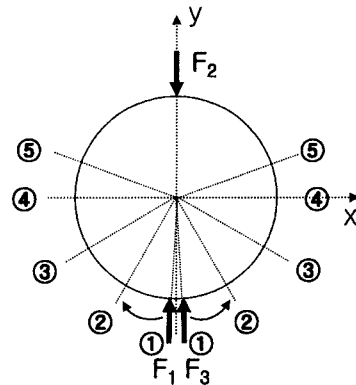


그림 4. 적용예제의 로봇의 파지 형상 변화.

Fig. 4. The changes of grasp configuration of the robot of example.

표 2. 적용예제의 로봇의 매개변수.

Table 2. Parameters of robot of example.

Robot Parameters				
		Finger 1	Finger 2	Finger 3
Joint Angle	θ_1	① -179°	0°	179°
		② -150°	0°	150°
		③ -120°	0°	120°
		④ -90°	0°	90°
		⑤ -70°	0°	70°
	θ_2	10°	10°	10°
	θ_3	81.47°	81.47°	81.47°

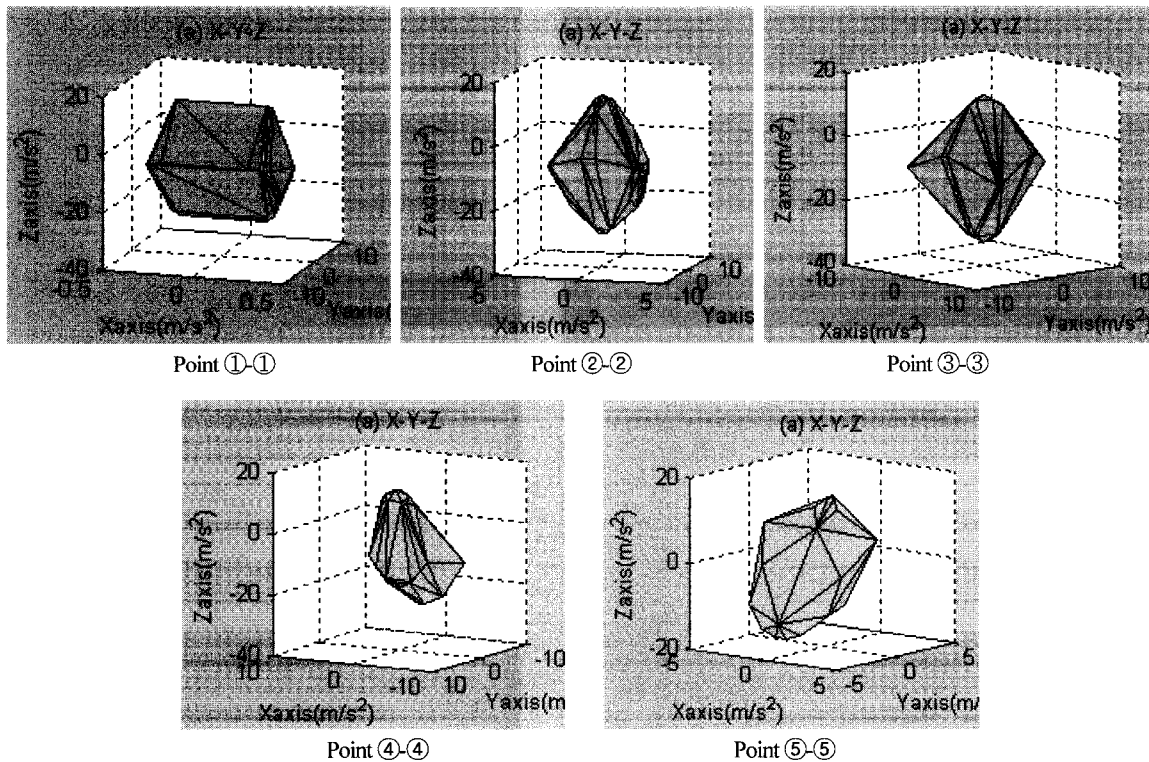


그림 5. 적용예제의 3차원 Acceleration convex polytope.

Fig. 5. Three-dimensional acceleration convex polytope as the results of example.

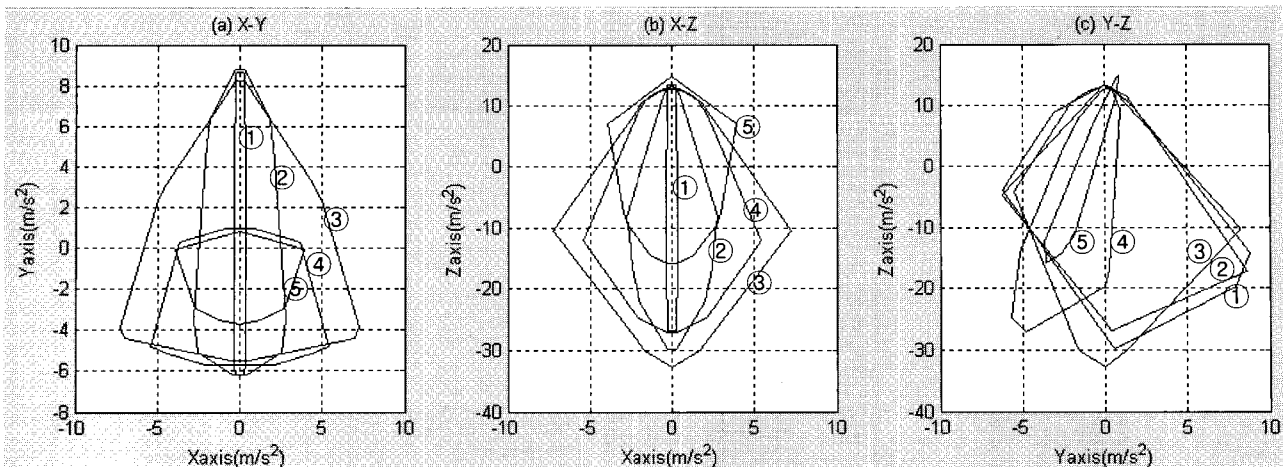


그림 6. 적용예제의 3차원 Acceleration convex polytope 분석.
 Fig. 6. Analysis of acceleration convex polytope as the results of example.

세와 질량, 물체의 형상과 질량, 파지 위치, 물체의 표면과 로봇 손끝에서의 마찰계수 등에 의존한다. Acceleration convex polytope가 가속도 영역으로 표현되기 때문에 물체의 질량을 곱하면 힘의 영역이 된다. 물체에 외력이 가해질 때 이 힘은 저항력이 되므로 이것으로 안정한 파지를 표현할 수 있다.

그림 4의 로봇 파지 형상으로부터 파지점 ③이 가장 안정하다는 것을 알 수 있다. 그림 6의 결과에서 파지점 ③의 acceleration convex polytope가 원점으로부터 최소가 되는 거리가 가장 멀리 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 Liebig의 ‘최소소용의 법칙’에 의해 가장 불안정한 값이 전체의 안정도를 나타내게 된다.

VI. 결론

본 논문에서는 물체와 로봇의 동력학과 기구학을 이용하여 관절 토크한계, 로봇 손의 자세와 질량, 물체의 형상과 질량, 파지 위치, 물체의 표면과 로봇 손끝에서의 마찰계수 등이 모두 적용된 3차원 acceleration convex polytope를 구하는 방법과 이를 이용하여 안정한 파지를 분석하였다. 제안된 방법은 적용예제를 통하여 그 결과로부터 유용성을 확인하였다.

향후 제안된 분석 방법을 이용하여 외력을 극복할 수 있는 안정한 파지의 정량적인 지수인 저항력에 대하여 추가적인 연구가 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] 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.
 [4] M.Kook, M. Jang, and J. Lee, "Grasp Stability Analysis in Dual-Space and Optimal Grasp Planning for Two-Fingered Robots in

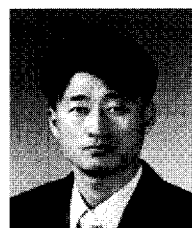
2-D," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 12, no. 11, pp. 1102-1110, Nov. 2006.

[5] 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.
 [6] 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.
 [7] D. Montana, "Contact Stability for Two-Fingered Grasps," *IEEE Trans. On Robotics & Automation*, 1992.
 [8] Y. Nakamura, *Advanced Robotics Redundancy and optimization*, Addison-Wesley Publishing Company. 1991.
 [9] F. Lee, J. Lee, and B. Jeon, "Analysis of Acceleration Bounds and Mobility for Mulyiple Robot Systems Based on Null Space Anaysis Method," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 497-504. 2006.



장명언

1965년 2월 28일 출생. 1987년 전남대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1990). 2005년~현재 충남대 대학원 박사과정. 1989년~1993년 ㈜리키석유화학. 1993년~현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어.



이지홍

1960년 4월 21일 출생. 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사(1985). 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사(1991). 1983년~1988년 현대중공업 로봇사업부 연구원. 1991년 한국과학기술원 연수연구원. 1994년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어, 전자파 차폐, 컴퓨터 기반 신호처리 시스템.

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