

본 논문은 한국과학재단 연구비 지원 (951-1009-056-2)에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

불확실 동적 환경에서 다각형 부품의 평행-턱 파지 계획

한인환*, 조정호**

Parallel-Jaw Grasp Planning of Polygonal Parts in Uncertain Dynamic Environments

Inhwan Han*, Jeongho Cho**

ABSTRACT

A sensorless motion planner which succeeds in grasping a polygonal part firmly into a desired orientation has been developed through the dynamic analysis. The analytical results on the impact process with friction are used for modeling the contact motion during the parallel-jaw grasp operation, which is composed of the pushing and the squeezing process. The developed planner succeeds in grasping a part into a specified orientation in the face of uncertainties of initial position and orientation of the part, motion direction of the finger, and the physical parameters such as the coefficients of friction and restitution. The motion planner has been fully implemented into a viable package on the computer system, and verified experimentally. The motion of parts is recorded using a high-speed video camera, and then compared to the results of the planner and the graphic simulation results that illustrate the simulated motion of the grasp operation.

Key Words : Parallel-jaw grasp(평행-턱 파지), Dynamic motion planning(동적 동작계획), Quasi-static(준정역학), Uncertainty(불확실성), Pushing(밀기), Squeezing(쥐기), Frictional impact(마찰 충돌)

1. 서론

유연생산 공정은 전형적으로 로봇트 매니플레이터와 많은 값비싼 전용 엔드이펙터를 갖추고 있다. 또한, 하나의 엔드이펙터를 가지고 다양한 물체를 안정되게 파지하기 위한 많은 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Shimoga⁽¹⁾는

로봇트 파지에서 중요한 특성을 다재성(dexterity), 평형, 안정도 그리고 동적 거동의 4가지로 분류하고, 이들 특성들을 성취하기 위한 알고리즘과 관련하여 최근까지 제안된 거의 모든 연구 결과들을 정리한 바 있다.

부품 파지를 포함한 부품처리(part manipulation) 동작을 위한 동작 계획(motion planning)은 부품의 초기

* 홍익대학교 기계설계학과

** 홍익대학교 대학원

위치와 방향에 대한 불확실성을 전제로 수립되는 것이 바람직하며⁽²⁾, 이러한 불확실성을 감소하는데 밀기(pushing) 동작은 효과를 발휘할 수 있다⁽³⁾. Mason⁽⁴⁾은 준정역학(quasi-static) 동작을 가정하여, 대상부품이 로봇트에 의해 밀림을 당한 뒤 취할 수 있는 동작을 정성적으로 예측할 수 있는 해석적 기법을 제시하였다. 그러나, 최근에 Lynch and Mason⁽⁵⁾은 무한 접촉 마찰을 가지는 밀기 동작에서의 미끄럼 거동을 동적 상황에서 해석하였고, Huang 등⁽⁶⁾은 밀기를 동적 상황에서 타격 동작으로 고려하여 원형 부품에 대한 동작 계획의 수립방법을 제시하였다.

Brost⁽⁷⁾는 Mason의 해석 결과⁽⁴⁾에 근거하여 평행-턱 파지(parallel-jaw grasp) 시스템에 대한 동작계획을 수립하였다. 그는 마찰 계수와 핑거 사이에서 다각형 부품의 위치에 대한 불확실성을 고려하여, 원하는 안정된 최종 파지 방향을 취할 수 있도록 하는 부품의 초기 방향과 핑거 운동 방향의 영역을 구할 수 있도록 하였다. Alexander와 Lakhani⁽⁸⁾는 평행-턱 파지를 통하여 부품을 원하는 방향으로 정렬하는, Mason의 마찰 모델에 근거한 로봇트 제어 정책을 제시하기도 하였다. 밀기나 파지 동작에 관한 많은 연구가 준정역학 가정이라는 토대 위에 진행되어 왔다. 그러나, 준정역학 가정이 성립하기 위해서는 속도 한계로 규정 지워지는 동작 범위가 존재한다. 동작 속도가 그 한계를 넘어서면, 준정역학 가정은 더 이상 유효하지 않을 수 있다⁽⁹⁾.

Brost⁽⁷⁾가 제시한 것처럼, 평행-턱 파지 동작은 어느 한 쪽 핑거가 부품에 먼저 접촉하여 밀림이 발생하는 밀기와 두 핑거가 동시에 접촉하여 부품을 잡기 시작하는 쥐기(squeezing)라는 두 개의 단위 동작이 연속적으로 이루어지는 것으로 파악할 수 있다. 본 논문에서는, 평행-턱 파지를 구성하는 밀기와 쥐기의 두 단위 동작에서, 종래의 해석과는 달리 동적 상황을 인정하여 충돌 접촉으로 설정하였다. 이러한 마찰력이 개재된 접촉으로부터, 충돌의 효과로 인한 부품의 회전 방향을 Han and Gilmore⁽¹⁰⁾에 의한 마찰 충돌 해석 결과에 근거해 결정하였으며, 핑거 사이에서 부품의 위치, 핑거의 운동 방향과 반발계수, 마찰계수 등에 대한 불확실성에 의한 영향도 아울러 고려하였다. 밀기 및 쥐기 동작에서 최종적인 상황을 결정하기 위한 안정도 결정은 해당 동작이 계속 작용해도 부품의 방향이 더 이상 변화하는가에 따라 정하였으며⁽¹¹⁾, 이는 기존의 준정역학적 해석 결과에 준하는 것이다. 밀기와 순수쥐기에서의 동작계획들을 논리적으로

로 결합하여 최종적인 파지 동작계획을 작성하는 방안을 제시하고, 실험을 통하여 그 결과를 확인하였다.

또한 수립한 동작계획에서 발생할 수 있는 여러 문제점들을 보완하기 위해, 본 연구에서는 보조적인 파지 동작 시뮬레이션 도구를 활용하는 방안을 구하였다. 로봇트를 이용한 부품 파지 시스템은 예측하기 힘든 많은 불연속 동작을 가지는 비선형 동적 시스템이다. 그러한 시스템의 동적 거동을 파악하기 위해서는 다점 마찰 접촉을 가지는 다중 물체 시스템에서 발생할 수 있는 모든 문제들에 대한 완벽한 해석이 필요하다. 그런데, 로봇트 파지 동작에서의 부품의 동적 거동에 관한 연구는 그 중요성이나 필요성에도 불구하고, 관련된 연구 결과가 현재까지는 거의 발표되고 있지 않다⁽¹⁾. 정적 영역 및 동적 영역에서의 마찰 접촉 문제에 대한 일반적인 해석, 기구학적 구속조건의 변화에 대한 분류, 정형화 및 변화의 순간에 대한 예측 및 포착⁽¹²⁾, 마찰 충돌 해석⁽¹⁰⁾ 등 각 부분들에 대한 해석들이 예측하기 어려운 불연속 동작을 가지는 시스템의 해석을 위해 유기적으로 결합되어 하나의 패키지로써 역할을 수행하도록 한 결과가 본 논문 저자에 의해 발표된 바 있다. 본 연구에서는 이 패키지를 활용하여 파지 동작에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 대상 부품들의 동작을 고속 비디오 카메라로 촬영하고 컴퓨터로 영상처리한 결과와 프레임별로 정성적인 비교를 수행하였다.

2. 동적 밀기-충돌 접촉

밀기와 쥐기의 두단계로 이루어지는 평행-턱 파지의 첫 번째 단계인 밀기 동작에서, 종래의 해석과는 달리 동적 상황을 인정하게 되면 충돌 접촉 상황이 된다. 단일 핑거와 부품과의 1차 접촉에서 충돌의 효과로 인한 부품의 회전 방향을 결정하게 되는 데, 핑거의 운동 방향에 대한 불확실성을 고려한다. 밀기 동작에서 최종적인 상황을 결정하기 위한 안정도 결정은 밀기 동작이 계속 작용해도 부품의 방향이 더 이상 변화하는가⁽¹¹⁾에 따라 내린다.

밀기 동작계획 작성을 위해서는, 밀기 동작을 하는 핑거와 다각형 부품의 주어진 꼭지점이 접촉하는 해당 부품의 각변위 구간 즉, 접촉 구간(contact region)을 가장 먼저 구해야만 한다. 이는 다각형 부품의 각 꼭지각에 대한 정보로부터 쉽게 결정할 수 있다. 따라서, 부품이 밀림 동작을 받는 가능한 모든 초기 방향 즉 0°로부터 360°까지에 대한 핑거와의 접촉구간 다이어그램을 작성할 수 있다.

2.1. 회전방향 결정

본 연구에서는 핑거에 의한 밀기 동작의 출발을 충돌 접촉으로 고려한다. 따라서, 해당 접촉 구간 내에서 부품의 회전 방향을 결정하는 데, Han and Gilmore⁽⁴⁾가 발표한 마찰 충돌 이론을 이용한다. 강제 충돌에 관한 기존의 연구들은 마찰의 역할을 무시하거나 혹은, 쿨롱의 법칙을 그대로 적용하여 단순히 법선 역적의 값에 마찰계수 (μ)를 곱하여 접선 역적의 값으로 사용하였다. 그러나, Han 등은 강제역학의 범주 내에서, 역적-운동량 (impulse-momentum) 이론과 쿨롱의 법칙에 근거한 마찰 충돌 문제에 대한 해석을 전개하여, 가능한 충돌의 경우(impact case)를 분류하고 각 경우에 대한 법선 및 접선 역적들에 대한 해석적인 표현을 제시하였다. 충돌 경우는 충돌하는 물체들의 물성치, 기하학적 상대위치 및 충돌 접촉점의 상대속도 방향에 의해 결정된다.

우선, 부품의 방향, 핑거의 운동 방향 및 동적계수들의

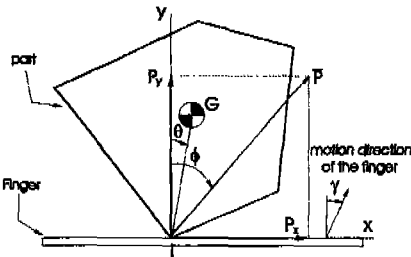


Fig.1 Dynamic pushing: a point-to-line impact (part: mass m , mass moment of inertia I)

불확실성을 접어둔 채 Fig. 1에 보여지는 상황에 대해 회전 방향을 결정할 수 있다. 부품과 핑거와의 충돌 접촉 상황에서 핑거의 운동이 부품과의 충돌에 의해 영향받지 않는 것으로 가정한다. Fig. 1에서 알 수 있는 것처럼, 접선 및 법선 성분을 가지는 역적이 해당 부품의 접촉 꼭지점과 무게중심을 연결하는 사선 우측에 존재하면 부품은 충돌의 효과로 반시계 방향으로 회전하게 되고, 좌측에 위치하면 시계 방향으로 회전하게 될 것이다. 이를 역적-운동량 방정식으로부터 해석적으로 구하면, 식(1)로 부품의 충돌후 회전 각속도를 나타낼 수 있다.

$$\frac{I}{r_i} \Omega = P_y \cos\theta \left(\frac{P_x}{P_y} - \tan\theta \right) \quad (1)$$

식(1)에서 접선 및 법선 역적 P_x, P_y 들의 값은 Han 등의 해석 결과로부터 구할 수 있다. 따라서 식(1)의 우변의 값이 0보다 크게 되면 반시계 방향, 0보다 작게 되면 시

계 방향 그리고 0이라면 병진 운동의 양상을 띄게 된다. 법선 역적 P_y 와 $\cos\theta$ 모두 늘 양수이므로 식(1)의 우변에서 괄호 안에 있는 항이 준정역학적 모델에서의 마찰 해석 결과⁽⁴⁾를 대체하는 조건이다. 부품의 주어진 방향 (θ)에 대해 두 역적 성분의 비가 회전 방향을 결정하게 되는 데, 이 비의 값은 물론 마찰 충돌의 경우를 분류하는 경계치들도 핑거 운동 속도의 크기와 관계가 없다. 즉, 핑거 운동 속도의 크기는 충돌후 부품의 회전 방향 결정과 무관하다. 부품의 방향, 마찰 계수 및 반발 계수와 핑거 운동 속도의 방향이 회전 방향을 결정하게 된다.

그런데, 핑거의 운동 방향이 핑거의 표면에 수직인 방향으로 진행할 때 ($\gamma = 0^\circ$), 충돌 해석의 결과는 준정역학적 마찰 해석 결과와 일치하게 된다. 핑거의 운동 방향이 접촉 표면에 수직인 방향인 정면충돌(direct impact)의 경우에, Han 등에 따르면 아래에 제시하는 것과 같이 충돌 접촉점 상대속도의 변화 양상에 따라 두가지 충돌 경우가 가능하며, 회전 방향은 동적계수들과 무관하게 결정된다.

· Forward Sliding (Impact Case 7)

이 경우의 충돌이 발생하기 위해서는 식(2)가 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} \tan\theta_1 &\leq \tan\theta \leq \tan\theta_2 \quad \text{for } \theta > 0 \\ \tan\theta_2 &\leq \tan\theta \leq \tan\theta_1 \quad \text{for } \theta < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tan\theta_1 = \frac{\rho_i^2 - \sqrt{\rho_i^4 - 4\mu^2(1 + \rho_i^2)}}{2\mu}$$

$$\tan\theta_2 = \frac{\rho_i^2 + \sqrt{\rho_i^4 - 4\mu^2(1 + \rho_i^2)}}{2\mu}$$

$$\rho_i = \frac{r_i}{\sqrt{I/m}}$$

$\theta > 0$ 일 경우 식 (1)의 우변 괄호안의 조건식을 구하면 식(3)과 같이 된다.

$$\frac{P_x}{P_y} - \tan\theta \leq \frac{P_x}{P_y} - \tan\theta_1 \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2\mu} \left[-(\rho_i^2 - 2\mu^2) + \sqrt{(\rho_i^2 - 2\mu^2)^2 - 4\mu^2(1 + \mu^2)} \right] < 0$$

따라서, $\theta > 0$ 일 경우에는 항상 시계방향의 회전이 발생한다. 한편, $\theta < 0$ 일 경우에는 조건식이 식(4)로 표현되므로 항상 반시계방향의 회전이 발생한다.

$$\frac{P_x}{P_y} - \tan \theta \geq \frac{P_x}{P_y} - \tan \theta_1 \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2\mu} \left[(\rho_i^2 - 2\mu^2) - \sqrt{(\rho_i^2 - 2\mu^2)^2 - 4\mu^2(1 + \mu^2)} \right] > 0$$

· Sliding and Sticking (Impact Case 6)

$\theta = 0$ 혹은 식(2)가 만족되지 않는 모든 경우에는 이 유형의 충돌이 발생한다. 이때 회전방향 결정조건은 식(5)로 나타난다.

$$\frac{P_x}{P_y} - \tan \theta = \frac{-(\tan \theta + \tan^3 \theta)}{1 + \tan^2 \theta + \rho_i^2} \quad (5)$$

식 (5)로부터 알 수 있는 것처럼, $\theta > 0$ 일 경우에는 항상 시계방향의 회전, $\theta < 0$ 일 경우에는 반시계방향의 회전이 발생한다. 한편, $\theta = 0$ 일 경우에는 병진 운동이 일어난다.

위 두 경우에서 보듯이 정면충돌의 결과는 준정역학적 마찰 해석 결과와 일치하며, 마찰계수, 반발계수 등의 동적계수와 무관하게 무게중심과 충돌 접촉점을 연결하는 사선과 핑거 표면에 대한 수직방향선과의 상대위치관계 (θ)로부터 회전방향이 결정된다는 것을 알 수 있다.

2.2. 운동방향 및 동적계수 불확실성

부품의 방향 (θ) 및 핑거 운동방향 (γ)에 대한 불확실성을 고려한 동작 계획을 작성하기 위해서는 이들의 변화에 따른 충돌 해석이 조직적으로 수행되어야 한다. 경사 충돌(oblique impact)의 경우, Han 등에 따르면 모두 5 가지 유형의 충돌이 발생할 수 있고 부품의 한 꼭지점에 대한 접촉구간내에서 이들의 영역을 해석적으로 구하는 것이 가능하며, Wang and Mason⁽¹³⁾이 제시했던 것처럼 $\theta - \gamma$ 공간에 도식할 수 있다. 그리고 충돌 유형의 각 해당 영역에서 식 (1)의 우변 괄호안에 나타나는 조건을 사용하여, 병진운동선과 회전방향의 구분이 가능하다. 이와 같이 하면, 부품 방향에 따른 회전방향의 변화를 핑거 운동 방향의 불확실성을 고려하여 구할 수가 있게 된다.

그러나, 이와 같이 해서 구하는 충돌 유형 경계 조건식들과 회전방향변화 즉 병진운동조건식들은 매우 복잡한 여러개의 비선형 방정식들로 나타난다. 따라서, 핑거운동 방향의 불확실성을 고려하여 부품 방향에 따른 동작계획을 작성하기 위해서는 많은 비선형 방정식들을 연립으로 푸는 효과적인 알고리즘이 있어야 하는데, 이는 실로 지

극히 어려운 작업이다. 따라서, 이들 변수들의 변화에 따른 정성적인 특성들을 추론하여, 컴퓨터를 이용한 반복 작업을 통해 회전방향을 결정하는 것이 보다 효율적이고, 안정적이라 여겨진다.

우선 부품 방향 불확실성에 대한 해석을 전개하면, 핑거의 운동 방향을 주어진 γ 로 설정한다. 이 때, 부품의 한 꼭지점에 대한 접촉 구간내에서 회전방향변화선은 기껏해야 한 번 밖에 있을 수 없다는 사실을 인정할 수 있다. 따라서, 주어진 γ 에 대해 접촉구간내에서 식 (1)의 우변 괄호안에 나타나는 조건에 근거한 이분법(bisection method)을 사용하여 병진 운동선 즉 회전방향변화선을 구할 수 있게 된다.

남아 있는 문제는 γ 의 불확실성을 고려하는 것이다. Wang 등⁽¹³⁾이 제시한 결과나 혹은 병진운동선을 $\theta - \gamma$ 공간에 도식해 보면 알 수 있는 것처럼, 병진운동선은 $|\gamma|$ 가 증가함에 따라 $|\theta|$ 가 증가하는 방향으로 이동하거나 혹은 변화가 없게 된다. 그러므로, γ 가 $\Delta\gamma$ 의 불확실성을 가지고 있다고 할 때, $(\gamma - \Delta\gamma)$ 와 $(\gamma + \Delta\gamma)$ 에서 병진운동점을 구해보는 것으로 충분하게 된다. 이와 같이 γ , $(\gamma - \Delta\gamma)$, $(\gamma + \Delta\gamma)$ 의 세 값에서 회전 방향을 결정하여, 회전방향이 달라지는 구간은 밀기-안정 다이나그램상에서 핑거 운동방향의 불확실성으로 인한 모호 구간으로 남게 된다. 마찰계수 및 반발계수들의 크지 않은 불확실성에 대해서도 동일한 방법으로 모호 구간을 구하게 된다.

2.3. 밀기-안정도 결정

준정역학적 상황에서의 밀기와는 달리 동적 밀기 동작인 충돌 접촉에서는 통상적인 경우 부품과 핑거와의 1차 접촉후 부품이 회전을 하면서 핑거로부터 분리될 것이다.

그런데, 두 핑거사이에서 부품 위치의 불확실성을 염두에 둔다하더라도 파지 동작 초기에 두 핑거 사이의 거리가 부품의 크기에 비해 많이 크지는 않을 것이라는 사실을 고려하게 된다. 대개의 경우, 1차 접촉후 부품이 분리되면 곧 1차 접촉한 핑거와 다시 2차 접촉이 발생하게 된다. 이때, 충돌 상대속도는 1차에 비해 현저하게 저하될 뿐만 아니라 부품의 회전운동이 진행중에 있으므로 부품이 핑거로부터 분리되지 않는 준정역학적 밀림 상황이 되며 1차 충돌시 결정된 회전 방향이 대체로 유지된다. 또는, 1차 충돌후 다른 핑거와 2차 충돌이 발생하게 되는 경우에는 거의 동시에 쥐기 동작이 수행되게 된다. 따라서, 1차 충돌 접촉에 의한 회전 방향에 근거한 준정역학

적 밀기-안정도 결정이 유효할 것으로 고려하였다.

밀기에서 안정도 결정은 밀기동작이 계속 작용해도 부품의 방향이 더 이상 변화하는가에 따라 내리게 되는 데, 안정 상태는 다각형 부품의 어느 한 면이 핑거에 닿을 때 발생할 수 있다. 따라서, 접촉 구간의 경계선만이 안정 방향이 될 수 있다. 그리고, 이 접촉 구간의 경계선이 안정 방향이 될 수 있는지의 여부는, 인접 영역에서의 회전방향으로부터 결정할 수 있다. 즉, 그 경계선으로 회전 방향이 모일 때만이 안정방향이 된다. 만약, 회전 방향이 그 경계선에서 흩어질 때는, 비록 면 접촉 상황이지만 불안정 상태로 간주한다. Fig. 2에서 보여지는 밀기-안정 다이어그램에 굵게 표현된 선이 안정 방향이다. 또한, 동적 계수 및 핑거 운동 방향에서의 불확실성으로 인한 모호 구간이 빗금으로 표시되어 있다. 이 다이어그램이 밀기 동작에서의 동작계획을 의미하는 것이다. 이 밀기-안정 다이어그램으로부터 용이하게 추론할 수 있는 것처럼, 어느 한 접촉구간이라도 그 구간내에 회전방향변화선이 없는 경우에는 불안정한 면 접촉 상황이 반드시 발생하게 된다.

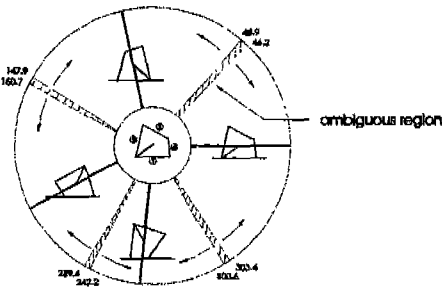


Fig. 2 Push-stability diagram

3. 쥐기

밀기에 의해 회전되거나 이동되어진 물체는 또 다른 핑거에 의해 접촉되어 쥐기가 일어나게 된다. 우선, 두 핑거가 동시에 접촉하는 순수 쥐기(pure squeezing)를 가정하여 동적인 상황에 대해 동작계획을 작성하여 쥐기-안정 다이어그램을 작성한다. 그러나, 실제 두 핑거가 동시에 접촉하는 경우는 거의 없기 때문에 밀기에서 작성된 동작 계획과 순수쥐기에서의 동작계획을 논리적으로 결합하여 최종적인 파지 동작계획을 작성하는 방안을 제시한다. 부품이 두 핑거사이에서 쥐기 동작이 발생할 때, 썩기현상(wedging)이 발생하거나 혹은, 회전이 이루어져 부품의 한면 혹은 두면이 핑거의 평행면과 정렬이 되어, 쥐기가

진행되도 더 이상 회전이 이루어지지 않는 안정 상태⁽¹¹⁾에 이르게 된다. 이러한 안정 상태에 대한 판정은 밀기에서와 마찬가지로 준정역학적 해석에 준하는 것인데, Shimoga⁽¹¹⁾에 따르면 최근까지 제안된 모든 파지 안정도에 관한 연구 결과는 모두 준정역학적 가정에 근거하고 있다.

쥐기 동작계획 작성을 위해서는, 밀기 동작에서와 마찬가지로 상측 및 하측 핑거와 접촉하는 부품의 꼭지점들을 구분하기 위한 접촉 구간을 가장 먼저 구해야 한다.

3.1. 동적 쥐기

동적 밀기에서 충돌 접촉과 유사하게, Fig. 3에서 보여지는 것처럼 쥐기를 2점 외부충돌 접촉으로 고려한다.

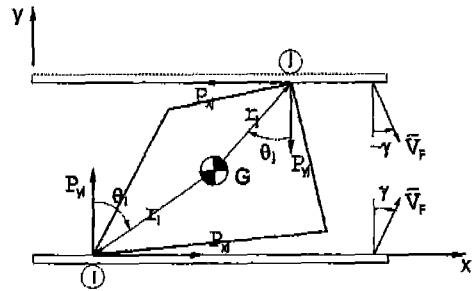


Fig. 3 Dynamic squeezing: two-point external impact

이때, 부품의 회전 방향은 두 곳의 충돌 접촉점에서의 역적과 부품의 기하학적 위치에 따라서 결정할 수 있게 된다. 충돌후 부품의 회전 각속도를 역적-운동량 방정식으로부터 해석적으로 구하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$I\Omega = [P_{x1}r_i \cos\theta_i - P_{y1}r_i \sin\theta_i + P_{x2}r_j \cos\theta_j - P_{y2}r_j \sin\theta_j] \quad (6)$$

식(6)에서 접선 및 법선 역적들은 Han 등의 해석 결과⁽¹⁰⁾로부터 구할 수 있다. 따라서 식(6)의 우변의 값이 0보다 크게 되면 반시계방향, 0보다 작게 되면 시계방향 그리고 0이라면 병진 운동의 양상을 띄게 된다. 동적 쥐기에서도 동적 밀기에서와 같이 회전방향을 결정하는데 있어 핑거 운동 속도의 크기가 관계가 없음을 주목해야 한다.

부품 방향 불확실성에 대해서는, 동적 밀기에서와 동일하게 주어진 γ 에 대해 접촉구간내에서 식(6)의 우변에 나타나는 조건에 근거한 이분법(bisection method)을 사용하여 병진 운동선 즉 회전방향변화를 구할 수 있게 된다. 핑거 운동방향, 마찰계수 및 반발계수들의 불확실

성에 대해서도 동적 밀기에서와 동일한 방법으로 모호 구간을 구할 수 있다. 쥐기 접촉구간의 경계선이 안정방향이 될 수 있는지의 여부는 회전방향으로부터 결정할 수 있다. 즉, 그 경계선으로 회전 방향이 모일 때만이 안정방향이 된다. 만약, 회전 방향이 그 경계선에서 흩어질 때는, 불안정 상태로 간주한다.

각 접촉구간 경계선에 대해 안정도를 판별한 후에는, 준정역학적 쥐기에서와 같은 방법으로 썩기구간을 설정하고, 안정구간을 결정할 수 있게 된다.

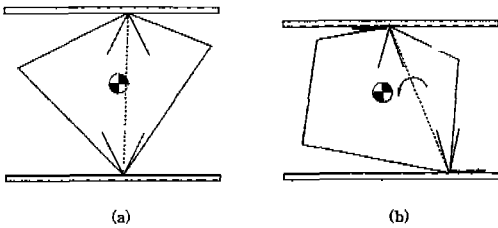


Fig. 4 Wedging in pure-squeezing

Fig. 4(a)는 Brost⁽⁷⁾가 제시한 썩기 조건을 요약하고 있다. 부품과 두 핑거와의 접촉꼭지점을 연결한 가상선이 접촉마찰원추안에 놓여 있는 조건은 썩기현상이 발생하기 위한 필요조건이 된다. 그리고, 이러한 상황에서는 썩기 현상이 발생할 수 있으므로 동작계획에서 제외해야 할 것이다. 만일, 두 접촉점을 연결하는 가상선이 마찰원추 바깥에 놓여 있다면, 부품의 정적 평형을 이루기 위한 접촉 반력은 구할 수 없게 되므로 부품은 접촉 핑거위에서 미끄러지며 회전하게 된다. 따라서, Fig. 4(b)에서 보는 것처럼 가상선이 하측 핑거 접촉마찰원추 좌측 바깥에 존재하게 되면 반시계방향으로의 회전이 이루어지게 된다.

이와 같이 하여, 접촉 구간 각각에 대해 해당 접촉점에 대한 마찰원추의 경계선을 고려하여 썩기현상이 발생할 가능성이 있는 썩기구간을 설정할 수 있게 된다. 물론, 어떤 접촉 구간에서는 썩기구간이 없을 수도 있다. 마찰계수의 불확실성을 고려하면, 썩기구간은 마찰계수가 증가함에 따라 넓어지게 될 것이므로 최대마찰계수(μ_{max})에 대해 설정해야 할 것이다. 또한, 접촉구간 경계선은 마찰계수가 작아질수록 안정이 불안정 상태로 바뀔 수 있으므로 μ_{max}, μ_{min} 각각에 대해 안정도를 판단하여 안정 상태가 달라지는 경우에는 안정 접촉구간 경계선이라고 결정했을 때 그에 수렴하는 해당 안정 구간 모두가 모호구간으로 설정되어야 할 것이다.

준정역학적 쥐기와 비교할 때, 충돌 효과로 인한 안정 회

전방향 경계의 차이는 쥐기 동작계획에 영향이 아주 없게 되는 경우가 많다. 그러나, 극단적인 경우에는 그 준정역학적 쥐기에서의 안정구간이 모두 소멸될 가능성은 있다.

이와는 달리 불안정 회전방향 경계의 차이는 대부분의 경우 안정구간의 범위를 직접 변경시키게 된다.

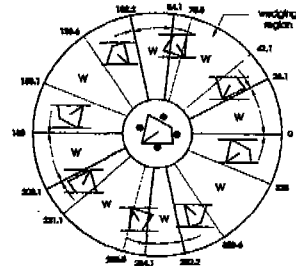


Fig. 5 Squeezing-stability diagram

Fig. 5가 순수 쥐기에서 결정된 쥐기-안정 다이어그램이며, 순수쥐기에서의 동작계획을 나타내고 있다.

3.2. 통합 파지동작계획

실제 두 핑거가 동시에 접촉하는 경우는 거의 있을 수 없고, 먼저 한쪽 핑거와 부품이 접촉하여 회전 중에 다른 쪽 핑거와 닿게 되므로, 순수쥐기에서 수립한 동작계획을 반영하는 쥐기-안정 다이어그램은 밀기에서 결정된 밀기-안정 다이어그램에서 제시된 부품의 회전 방향에 근거하여 수정되어지게 된다. 수정작업의 결과로 안정 구간이 축소되고, 모호 구간을 포함하여 썩기 구간이 확대될 것이다. 이는 핑거사이에서 부품의 위치에 대한 불확실성을 고려하기 때문이다.

우선, 순수쥐기의 안정구간 내에서 밀기 동작에 의한 부품의 회전방향을 조사한다. 그 구간내에 밀기 회전방향 경계선이 존재하고 회전 방향이 모이는 안정 방향일 때, 그 안정구간은 유지되고 다만, 밀기에서 결정되는 불안정 회전방향 경계선의 유무에 따라 그 구간이 축소될 수 있다. 만일 불안정 회전방향 경계선이 안정 구간 내부에 존재하면, 그 불안정 회전방향경계선이 안정구간의 새로운 경계가 되고 그 바깥 영역은 인접한 썩기영역으로 흡수된다. 만일 안정구간내에 밀기에서 결정되는 안정 회전방향 경계선이 없으면, 회전 방향에 따라 인접한 썩기 영역으로 모두 흡수되게 된다. 이는 부품의 밀기 회전중 언제 쥐기가 시작될 지 알 수 없기 때문에 안정 구간은 축소되고 경우에 따라서는 많은 안정 구간이 소멸될 수도 있다. 이

는 해당 부품에 대한 안정된 파지가 불가능하다는 의미가 아니고, 핑거 사이에서 부품의 위치에 대한 불확실성을 전제로 한 확실한 동작계획의 작성이 불가능하다는 것을 의미한다.

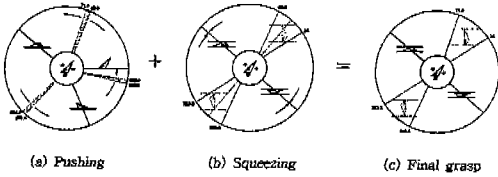


Fig. 6 Combining the pushing and squeezing plans

Fig. 6은 밀기에서의 밀기-안정 다이어그램과 순수 쥐기-안정 다이어그램을 결합하여 통합 파지계획을 수립하는 과정을 보여주며, 그 결과가 최종적인 통합 파지 다이어그램이다.

4. 실험 및 파지 동작 시뮬레이션

이미 제시한 동작계획 알고리즘들은 유기적으로 결부된 하나의 패키지로 컴퓨터 시스템에 설치되었으며, 부품의 기하학적 형상, 핑거 운동 방향 및 동적 계수 등에 관한 정보만 입력되면 밀기, 쥐기 등 각 단계 별 결과를 포함하여 최종적인 동작계획 다이어그램을 자동으로 제시한다. 이와 같이 수립한 동작계획의 유효성을 입증하기 위하여 실험을 수행하였다. 또한, 비교적 고속으로 파지동작이 수행되는 경우에 고려하지 못했던 동역학적 효과가 발생하므로, 동역학적 동작계획을 보완하는 역할을 수행할 수 있는 시뮬레이션 프로그램의 유용성도 실험에 의해 확인하였다.

4.1. 실험에 의한 유효화

삼각형, 사각형 및 오각형 등 여러 형상과 목재, 플라스틱 등 여러 재질의 부품을 가지고 실험을 수행하였다. 본 논문에서 그 결과를 제시하는 대표적인 두 부품은, 사각형의 형상을 가지고 있고 동역학적 충돌 효과를 높이기 위해 비교적 반발계수가 높은 재료로 부품을 제작하였으며, 관련된 동적 계수들의 값은 Table 1에 요약되어 있다.

Fig. 7에 보여지는 것처럼 부품과 동일한 재질의 플라스틱으로 제작된 두 평행턱 핑거는 공압 실린더에 의해 구동되도록 제작하였고, 그 핑거의 운동방향 및 속도가 조절 가능하도록 하였다. 두 핑거사이 임의의 위치에 부품을 놓았

Table 1. Physical parameters

part parameter	Quadrilateral Part A	Quadrilateral Part B
γ	$-20^\circ \pm 2^\circ$	$+8^\circ \pm 2^\circ$
μ	0.25 ± 0.07	
e	0.63 ± 0.05	

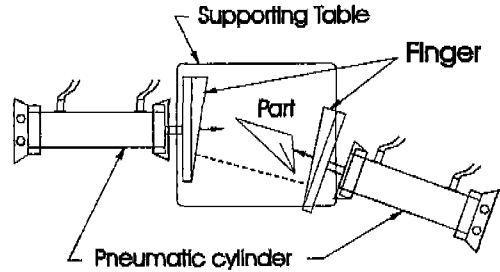


Fig. 7. Experimental apparatus for parallel-jaw grasp

으나, 하측 핑거가 먼저 접촉하도록 하고 부품 방향을 바꿔가며 각 방향에서 여러번 파지동작을 수행하였다.

그리고, 핑거의 운동 속도 V_f 를 0.1m/s 로부터 0.23m/s 까지 변화시켜가며 파지 동작을 수행하여 동작계획에서 생성되는 다이어그램들과 동일한 형태로 그 결과를 구하였다.

Fig. 8은 사각형 부품 A를 대상으로 한 최종 파지 동작계획 및 실험 결과를 보여주고 있다. 부품 A는 의도적으로 순수 쥐기에서 단지 두 개의 가능한 안정 방향만을 가질 수 있도록 제작하였다. 동작 계획과 실험 결과는 좋은 일치를 보여주고 있다. 또한, 실제 실험결과를 보면, 핑거의 운동 속도가 빠를수록 썩기 구간이 축소되는 경향을 보였다. 이는, 속도가 빠를수록 관성력에 의한 효과가 정적 힘의 균형을 무너뜨려 결국, 썩기 현상을 극복할 수 있게 하는 것으로 여겨진다. 동작계획에서 설정된 썩기 가능 구간은 실제 실험에서의 썩기 구간을 모두 포함하고 있으나, 여러 가지 불확실성의 존재로 말미암아 과도하게 설정되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서 그 결과를 보여주고 있는 사각형 부품 B는 부품 A에 비해 방향을 정렬하여 파지하기가 훨씬 어려운 기하학적 형상을 가지고 있으며, 순수 쥐기에서 모두 8개의 가능한 안정된 방향을 가지고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있는 것처럼, 비록 잘못된 결과를 나타내고 있지는 않더라도 동작계획 결과는 최종 파지에서의 안정 영역을 실험 결과에 비해 훨씬 적게 제시하고 있다. 이러한 안정 영역의 대폭적인 축소는 핑거 운동 방향이나 동적계수 등의 불확실성에 의한 것도 원인이 되지만, 대부분 핑거 사이에서 부품 위

치의 불확실성에 기인한다. 밀기 동작 중 언제 쥐기가 시작될 지 모르기 때문에, 어떤 경우에도 확실한 안정 영역만을 동작계획에서 제시할 수 있도록 엄격히 제한되기 때문이다.

Fig. 8에서의 결과와는 달리 Fig. 9에서의 동작계획 결

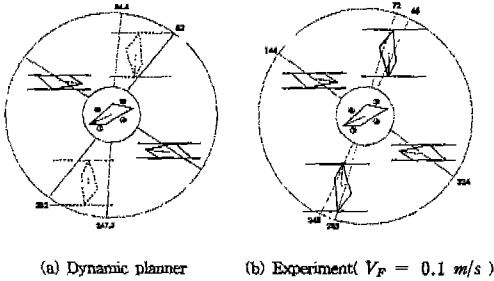


Fig.8 Final grasp diagram for quadrilateral part A

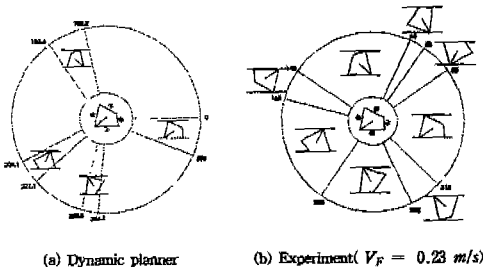


Fig.9 Final grasp diagram for quadrilateral part B

과는 상측 핑거가 부품의 면과 접촉하는 안정 영역을 제시하고 있지 않다. 이는, 실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 그러한 경우가 불가능하다는 것은 아니고, 불확실성을 고려한 밀기와 쥐기 동작계획의 통합 알고리즘의 특성에 의해 해당되는 확실한 안정 영역을 제시할 수 없다는 것을 의미한다. 제시한 파지 동작은 항상 하측 핑거가 부품에 먼저 접촉하도록 설정하였는데, 실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 상측 핑거에 부품의 면이 닿는 안정 영역은 하측 핑거에 부품의 면이 닿는 안정 영역에 비해 훨씬 적게 나타나고 있다. 만일, 어느 쪽 핑거가 부품에 먼저 접촉할 지 모른다는 불확실성까지 고려한다면, 동작계획은 삼각형을 제외한 대부분의 다각형 부품에 대해 최종 파지에서 안정 영역을 전혀 제시하지 못하는 결과를 초래하여, 동작계획으로서의 역할을 하지 못하게 될 수 있다. 따라서, 최소한 어느 핑거가 부품에 먼저 접촉하는 지는 알아야 하는 조건이 본 연구에서 제시하는 동작계획에서 필수적이다.

어느 쪽 핑거가 먼저 부품에 접촉할지는 안다는 전제 조

건하에서, 본연구에서 제시하는 동역학적 동작계획은 정확한 결과를 제시한다는 것을 많은 부품을 가지고 한 실험을 통해 확인하였다. 또한, 준정역학적 동작계획과 비교할 때, 두 동작계획이 거의 대부분의 경우에 유사한 결과를 보여주나, 부품과 핑거 사이의 반발계수가 비교적 크고 핑거의 운동 방향이 특정 구간내에 있을 때는 두 동작계획의 결과에서 차이가 발생하게 되고 동역학적 동작계획이 실험 결과에 보다 근접하게 되는 것을 확인하였다.



Fig.10 Robot grasping system

실제 작성된 동작계획의 활용성을 입증하기 위하여, Fig.10에서 보는 바와 같이 평행-턱 핑거를 장착한 5관절 로봇 시스템(SCORBOT ER VII)을 가지고 실험을 수행하였다. 통상적인 평행턱 파지의 경우에 그러하듯이 이 경우에도 핑거는 그 표면에 수직인 방향($\gamma = 0^\circ$)으로 0.08 m/s의 속도로 운동하게 되나, 실험에 의해 측정된 불확실성(2°)을 운동 방향에 부과하여 동역학적 동작계획을 작성하고 파지 동작을 수행하였다. 실험 결과는, 동작계획에서 판단된 결과에 근거하여 안정된 파지에 거의 100%에 가깝게 성공하였다.

4.2. 파지 동작 시뮬레이션

실제 파지 동작에서 핑거의 운동 속도가 비교적 큰 동적 상황에서는 본 논문에서 제시하는 바와 같은 몇가지 규칙에 의해 해석이 불가능한 많은 복잡한 현상이 발생하게 된다. 또한, 전절에서 이미 언급했던 바와 같이, 췌기 가능구간이 과도하게 설정되며 안정 구간이 지극히 협소하게 제시되어 동작의 유연성을 저하하게 된다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해, 본 연구에서는 보조적인 파지 동작 시뮬레이션 도구를 활용하는 방안을 구하였다. 본 논문 저자에 의해 개발^[12]된 이 시뮬레이션 프로그램은, 정적 영역 및 동적 영역에서의 마찰 접촉 문제에 대한 일반적인 해석, 기구학적 구속조건에 변화에 대한 분류, 정형화 및 변화의 순간

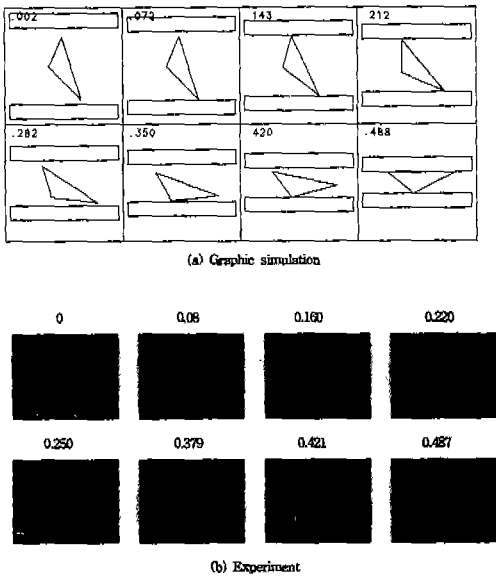


Fig.11 Simulation & Experimental results for Robot Grasping ($\theta = 246^\circ$)

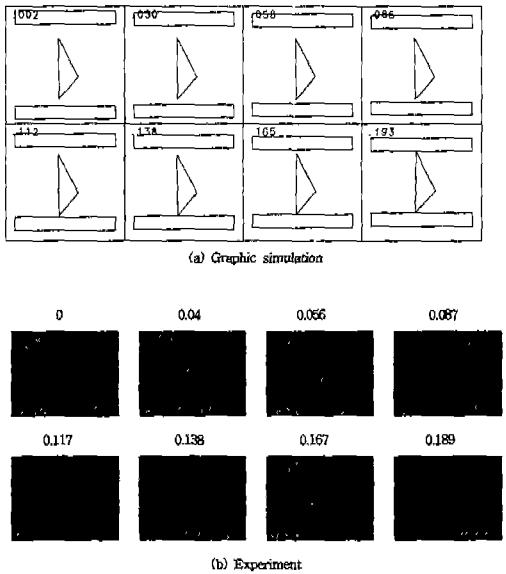


Fig.12 Simulation & Experimental results for Robot Grasping ($\theta = 50^\circ$)

에 대한 예측 및 포착, 마찰 충돌 해석 등 각 부문들에 대한 해석들이 예측하기 어려운 불연의 해석을 위해 유기적으로 결합되어 하나의 패키지로써 역할을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 이 패키지를 활용하여 파지 동작에 대한

시물레이션을 수행하여, 대상 부품들의 동작을 고속 비디오 카메라(FASTCAM-Rabbit)로 촬영하고 컴퓨터로 영상처리한 결과와 프레임별로 정성적인 비교를 수행하였다.

Fig. 11(a)는 그래픽 시물레이션에서 보여지는 프레임별 파지동작이고, Fig. 11(b)는 고속카메라에 의해 촬영된 동작이다. Fig. 11에서 보여지는 부품의 초기 방향은, 파지 동작계획의 결과에 따르면 안정구간의 경계점으로 부품의 최종 파지 방향을 예측하기가 곤란하다. 그러나, Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼, 안정된 최종 파지 방향을 가짐이 시물레이션 프로그램에 의해 예측이 가능하며, 이는 실험 결과와도 동일하다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 결과와 시물레이션 결과는 좋은 일치를 보여주고 있다.

Fig. 12에서의 부품의 초기 방향은 동역학적 동작계획에 따르면 썩기 가능 구간에 포함되어 있으나, 실제 파지 결과를 예측하기는 불가능하다. 그러나, Fig. 12에서 볼 수 있는 것처럼 썩기 현상을 보여주는 시물레이션 결과는 실제 실험 결과를 정확히 반영하고 있다.

5. 결론

본 논문에서 제시한 동작계획 알고리즘들은 유기적으로 결부된 하나의 패키지로 컴퓨터 시스템에 설치되었으며, 부품의 기하학적 형상, 핑거 운동 방향 및 동적 계수 등에 관한 정보만 입력되면 밀기, 쥐기 등 각 단계 별은 물론이고 최종적인 동작계획을 자동으로 제시한다.

어느 쪽 핑거가 먼저 부품에 접촉할지는 안다는 전제 조건하에서, 본연구에서 제시하는 동역학적 동작계획은 정확한 결과를 제시한다는 것을 많은 부품을 가지고 한 실험을 통해 확인하였다. 동작 계획을 안전하게 운용하기 위해, 파지 동작 시물레이션 도구를 활용하는 방안을 구하였다. 파지 동작에 대한 그래픽 시물레이션 결과와 대상 부품들의 동작을 고속 비디오 카메라로 촬영한 결과를 프레임별로 정성적인 비교를 함으로써, 시물레이션 패키지를 본 연구에서 제시한 동작계획의 보완적인 도구로 유효하게 사용할 수 있음을 입증하였다.

로보트에 주어지는 외부 환경에 대한 정보와 로봇트가 주어진 동작을 정확히 수행하는 능력에는 항상 불확실성이 존재한다. 현재의 접근 방법은 로봇트의 주변 환경에 대한 정확한 정보를 획득(측정)하려 하거나 혹은, 로봇트를 정밀하게 제어함으로써 문제를 해결하고자 하는 노력이 대부분이다. 그러나, 이는 비용도 많이 들고 전반적으로 비효율적이 될 수 있으므로, 로봇트의 매니플레이션

동작으로부터 불확실성을 제거하려 노력하는 대신에 불확실성에 둔감한 동작들을 개발하면 문제의 해결이 훨씬 용이해 질 수 있다.

참 고 문 헌

1. Shimoga, K.B., "Robot Grasp Synthesis Algorithms : A Survey," *The Int'l Journal of Robotics Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 230~266, 1996.
2. Han, I., Gilmore, B.J., Ogot, M.M., "Synthesis and Experimental Validation of Dynamic Parts-Orienting Devices," *Proc. of ASME Design Automation Conference (Advances in Design Automation)*, pp. 83~93, 1992.
3. Balorda, Z., "Reducing Uncertainty of Objects by Robot Pushing," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1051~1056, 1990.
4. Mason, M.T., "Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 53~71, 1986.
5. Lynch, K.M., Mason, M.T., "Pulling by Pushing, Slip with Infinite Friction, and Perfectly Rough Surfaces," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 174~183, 1995.
6. Huang, W.H., Krotkov, E.P., and Mason, M.T., "Impulsive Manipulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 120~125, 1995.
7. Brost, R.C., "Automatic Grasp Planning in the Presence of Uncertainty," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 3~17, 1988.
8. Alexander, H., Lakhani, H., "Robotic Control of Sliding Object Motion and Orientation," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3336~3342, 1996.
9. Mason, M.T., "On the Scope of Quasi-Static Pushing," *Robotics Research: the Third Int. Symp.*, MIT Press, Cambridge, pp. 229~233, 1986.
10. Han, I., Gilmore, B.J., "Multi-Body Impact Motion with Friction -Analysis, Simulation and Experimental Validation," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 412~422, 1993.
11. Montana, D.J., "Contact Stability for Two-Fingered Grasps," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 4, pp. 421~430, 1992.
12. Han, I., Gilmore, B.J., Ogot, M.M., "The Incorporation of Arc Boundaries and Stick/Slip Friction in a Rule-Based Simulation Algorithm for Dynamic Mechanical Systems with Changing Topologies," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 423~434, 1993.
13. Wang, Y., Mason, M.T., "Two-Dimensional Rigid-Body Collisions with Friction," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635~642, 1992.