

참조표를 이용한 재파지 계획기

조경래***. 김문상*. 이종원*. 송재복**

(1999년 3월 17일 접수)

Regrasp Planner Using Look-up Table

Kyoungrae Cho, Munsang Kim, Chongwon Lee and Jae-Bok Song

Key Words : Regrasping(재파지), Manipulation Planning(조작 계획), Motion Planning(경로 계획), Grasp Planning(파지 계획)

Abstract

A pick-and-place operation in 3-dimensional environment is basic operation for human and multi- purpose manipulators. However, there may be a difficult problem for such manipulators. Especially, if the object cannot be moved with a single grasp, regrasping, which can be a time-consuming process, should be carried out. Regrasping, given initial and final pose of the target object, is a construction of sequential transition of object poses that are compatible with two poses in the point of grasp configuration.

This paper presents a novel approach for solving regrasp problem. The approach consists of a preprocessing and a planning stage. Preprocessing, which is done only once for a given robot, generates a look-up table which has information of kinematically feasible task space of end-effector through all the workspace. Then, using the table, planning automatically determines possible intermediate location, pose and regrasp sequence leading from the pick-up to put-down grasp. Experiments show that the presented is complete in the total workspace. The regrasp planner was combined with existing path

1. 서론

로봇 운동을 자동 생성하기 위한 로봇 조작 계획기(robot manipulation planner)의 개발은 인간의 자연스러운 운동을 가장 근사하게 모사하는 방법을 도출하는 데에 그 목적이 있다. 이에 대한 연구들이 다양하게 시도되어 많은 성과를 거두어 왔으며, 특히 서비스 로봇(service robot)과 같은 응용 분야에 적용하고자 하는 노력이 지속적으로 이어지고 있다. 이러한 로봇들은 하나 또는 그 이상의 조작부(manipulator)를 가지며, 대상 물체의 인식을 위한 시각 시스템이 장착되어 있다. 시각 시스템은, 주위 물체에 대한 정보가 입력되어 있는 상황에서, 주위 물체와 그 자세를 인식하며, 로봇은 많은 일을 수행하게 된다. 이러한 작업 중, 집기-놓기 작업(pick-and-place operation), 즉 원하는 물체를 잡고, 옮기고, 놓는 작업, 은 로봇과 인간이 수행하는 일 중 가장 일반적인 작업 중의 하나이다.

예를 들어 Fig. 1 과 같이 자세 A 에 있는 물체를 자세 B 로 이동시키는 집기-놓기 작업을 수행한다고 하자. 여기서, 자세(pose)는 물체의 위치(position)와 방위(orientation)를 동시에 지칭하는 용어이다. 그러나 Fig. 1 의 작업은 물체가 뒤집혀 있

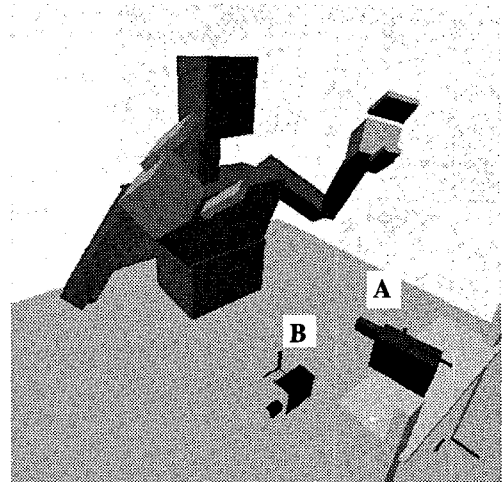


Fig. 1 Pick-and-place task

* KIST 휴먼로봇센터

** 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : jbsong@kucn.korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3363 FAX : (02)928-9769

어서 기하학 및 기구학적 제한 조건⁽¹⁾으로 말미암아, 한번의 파지로 물건을 옮길 수 있는 파지가 존재하지 않는다. 이러한 경우에는 재파지(regrasp)를 하여야 하는데, 크게 두 가지 방식으로 이 문제에 접근할 수 있다. 첫 번째 방식은, 물체가 작을 경우에 다관절 손가락으로 손 바닥 안에서 물체를 조작하여 다시 잡는 방식이다.^(2,3) 이를 위해서는 로봇 손이 인간 손과 같이 많은 자유도를 가져야 하며, 제어가 복잡하므로, 실현하기가 매우 어렵다. 두 번째 방식은, 물체를 집어서 일단 임시 위치로 옮긴 다음에, 다른 파지로 다시 잡아서 목표 위치로 옮기는 방식이다. 본 연구에서는 평행한 손가락을 갖는 로봇 손을 대상으로 하여, 두 번째 방식으로 접근하였다.

이 방식에 의한 재파지 계획은, 초기 자세와 목표 자세 모두에서의 파지가 가능한 물체의 중간 자세를 찾는 문제로 귀결되며, 대표적인 시스템으로 HANDEY 시스템⁽¹⁾이 있는데, 이는 집기-놓기 작업에 대해서 중요한 기여를 하였다. Röhrdanz⁽⁴⁾는 집기 부류, 놓기 부류, 그리고 재파지에 대하여 목적 함수를 설정하여 최적의 작업을 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. Sascha⁽⁵⁾는 연속적인 재파지 작업을 자동으로 생성할 수 있는 알고리즘을 제시하였는데, 소요되는 계산 시간에 따라 작업을 오프라인과 온라인의 두 단계로 구분하여 작업 셀에 적용하였다.

재파지 문제를 조작 계획⁽⁶⁾이라 불리는, 제한된 경로 계획(constrained path planning)의 측면에서 접근한 연구도 있었다. Alami, Simeon 과 Laumond⁽⁷⁾는 물건을 집고 놓는 부분을 경계로 하여, 로봇만이 움직이는 이동 경로(transit path)와 물건을 잡고 함께 움직이는 전송 경로(transfer path)로 나누어서, 이들을 연속적으로 혼합한 조작 경로를 생성하였다. Koga⁽⁸⁾는 이 방법을 복잡한 다중 로봇 조작 계획에 적용하여 신속하게 해를 찾는 결과를 얻었다. 한편, Ahuactzin, Gupta, Mazer⁽⁹⁾는 여유 자유도를 갖는 로봇(redundant robot)을 실질적인 문제에 적용하여, 해가 존재한다면 시간이 걸리더라도 결국은 해를 찾아내는 알고리즘을 제시하였다.

그러나 이러한 접근 방식들은 경로 계획 자체가 많은 시간을 요구하며, 시간 단축을 위해 무작위 방법을 사용하는 경우에는 해를 찾지 못하는 경우가 발생할 수 있다는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 다루어지는 물체가 비교적 단순한 볼록 다면체로 모델링 될 수 있다는 가정하에서, 새로운 재파지 계획 방법을 제시하고자 한다.

이 방식에서는 참조표(look-up table) 및 물체의 초기 자세와 목표 자세의 차이를 이용하여, 기하

학 및 기구학적으로 호환되는 파지를 비교적 쉽게 추출한다. 본 연구에서 제시되는 재파지 알고리즘의 특징은 다음과 같다. 첫째, 주위 환경에 따라 재파지 자세를 연속적으로, 그리고 자동으로 결정한다는 점이다. 둘째 특징은 제시된 알고리즘의 완전도(completeness)에 있는데, 이 완전도는 실험적으로 증명할 수 있다. 셋째로, 이미 개발되어 있는 관절 공간에서의 충돌 회피 경로 계획기와 결합하여, 집기-놓기 작업을 자동으로 수행할 수 있는 경로 계획기를 제시할 수 있다는 점이다.

2. 재파지 작업의 기본

그러므로 파지하는 대부분의 물체는 비교적 단순한 형상을 갖는다. 또한 로봇 손의 모양, 잡을 수 있는 최대 너비·깊이와 물체의 형상·크기 등의 관계에 따라 잡을 수 있는 곳이 제한되고, 물체의 안정성 측면에서 놓을 수 있는 면도 제한된다. 예를 들어 Fig. 2(a)과 같이 주전자와 같이 비교적 복잡한 모양의 물체도 놓을 수 있는 면은 밑바닥과 잡을 수 있는 곳은 손잡이로 제한되어 있다. 이 물체를 놓을 수 있는 면과 잡을 수 있는 곳만을 중요시하고 나머지의 형상을 단순화하면 Fig. 2(b)와 같이 육면체로 나타낼 수 있다. 그런데 육면체의 모든 면은 잡을 수도 있고 놓을 수도 있으므로, 이 육면체를 집기-놓기 작업에서 손으로 잡을 수 있는 물체의 일반적인 형태라 간주할 수 있다.

2.1 손 좌표계와 물체 좌표계

파지를 수행하기 위해서는 먼저 파지의 기본이 되는 손좌표계와 물체좌표계를 설정해야 한다. Fig. 3(a)와 같이 손가락의 양 끝단의 중간점을 원점, 손가락의 운동 방향을 y_h 축, 손의 접근 방향을 z_h

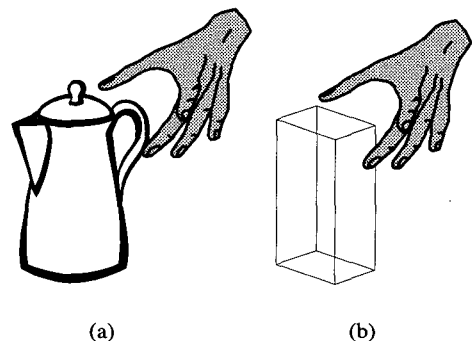


Fig. 2 Object modeling

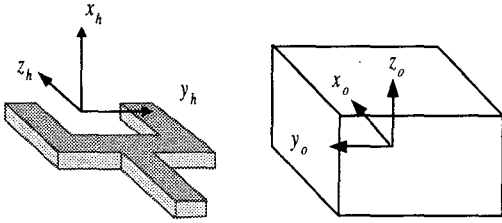


Fig. 3 Hand frame and object frame

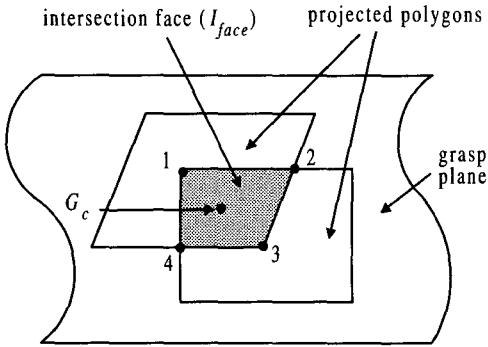


Fig. 4 Determination of grasp sites

축으로 하여 손 좌표계(hand frame)를 설정한다. 이 때 y_h 축을 파지 벡터(grasp vector)라 한다. 또한, 파지 대상이 되는 물체에는 Fig. 3(b)와 같이 물체 좌표계 $O_o-x_o y_o z_o$ 가 부여된다.

2.2 파지 부류와 파지 좌표계

먼저 다면체의 모든 평행한 쌍의 면들에 대해서 수직 벡터(normal vector)가 서로 반대 방향인지를 먼저 검색한 다음에, 이 두 면 사이의 거리가 양손가락의 최대 폭보다 작으면 이 두 면의 중간에 파지 평면(grasp plane)을 설정한다. Fig. 4와 같이 고려 중인 한 쌍의 면을 파지 평면에 투영하여 생긴 두 투영면이 겹쳐져서 교차면이 발생한다면, 이 한 쌍의 면을 파지 특징(grasp feature)이라 한다. 그러면 O'Rourke 모듈⁽¹⁰⁾을 이용하여 교차면의 정점(Fig. 4에서 점 1, 2, 3, 4)을 구하고, 이들 정점의 정보를 이용하여 교차면의 중심점(G_c)을 구한다.

이 때, 이 교차면은 하나의 파지 부류(grasp class) $G_i (i=1, \dots, n_i)$ 를 형성하는데, 파지 부류는 파지 평면과 G_c 에 의해 특징지어진다. 예를 들어, Fig. 3(b)와 같은 육면체의 경우 마주 보는 한 쌍의 면마다 하나의 파지 부류가 존재하므로, 총 3개의 파지 부류가 존재한다.

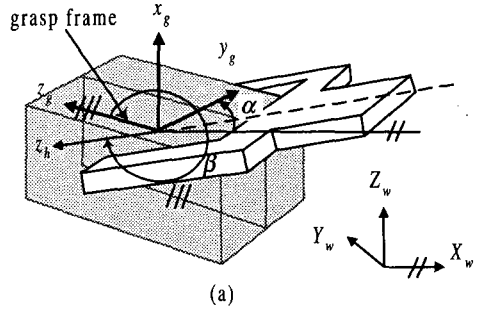


Fig. 5 Grasp frame, gripper orientation angle and grasp angle

이번에는 좌표계를 정의하기로 한다. Fig. 5에 정의된 파지 좌표계(grasp frame)는, 원점으로 G_c , 파지 평면의 수직 방향으로 y_g 축, $X_w Y_w$ 평면과 파지 평면이 만나는 교차선과 평행한 방향으로 z_g 축을 설정한 좌표계이다.

2.3 그리퍼 방위각과 파지각

로봇 손이 물체를 파지하고자 할 때, 파지 좌표계는 로봇의 손좌표계의 목표좌표계가 된다. 여기서 손좌표계가 파지좌표계와 일치하도록 하였을 때, 파지벡터(y_h)와 X_w 축 사이의 각을 그리퍼 방위각(hand orientation angle: α)이라 정의하며, 이는 파지 방향을 나타낸다. 또한, y_h 에 대하여 손이 물체 주위를 회전할 때의 회전각, 즉 z_g 로부터 z_h 까지의 각도를 파지각(grasp angle: β)이라 정의한다. 이때, 파지각은 물체의 자세와는 무관하게 설정된 파지 좌표계의 z_g 축으로부터 측정된다는 점에 주목해야 한다.

2.4 파지

일정 간격으로 파지각을 변화시켜 가면서 손과 작업 공간에서의 모든 장애물과의 충돌 검증⁽¹¹⁾을 수행하게 되는데, 이때 충돌하지 않는 파지를 기하학적으로 가능한 파지(geometrically feasible grasp: G_{gf})라 부른다. 만약, 어떤 특정한 파지각에서 충돌이 발생된다면 손은 $-z_h$ 방향으로 충돌이 없을 때까지 작은 간격으로 이동한다. 이때, 손 좌표계의 원점이 여전히 I_{face} 안에 있다면, 현재의 손 자세는 G_{gf} 에 속하게 된다. 한편, 어떤 파지에 대해서 로봇 손이 이동할 수 있는 로봇의 자세가 존재하면, 즉 역기구학 해가 존재하면, 이 파지를 기구학적으로 가능한 파지(kinematically feasible grasp: G_{kf})라 부른다. 이러한 파지각의 집합은 다음과

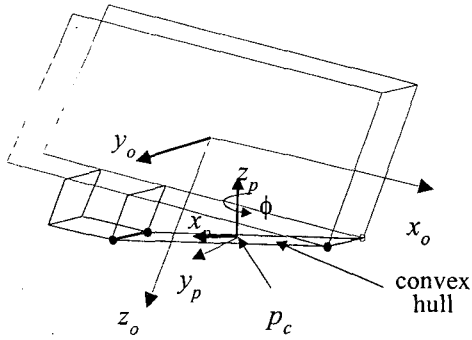


Fig. 6 Placement class and placement frame

같이 나타낼 수 있다.

$$B = \{\beta_j \mid \beta_j = 2\pi \times j / n_j, j = 1, \dots, n_j\} \quad (1)$$

만약 $n_j = 36$ 로 설정하면, 10° 간격으로 파지각을 변화시킨다는 의미이다. 한편, 파지 부류 G_i 와 파지각 β_j 에 의해서 결정되는 파지 G_{ij} 은 다음과 같이 나타낸다.

$$G_{ij} = (G_i, \beta_j), \text{ where } i = 1, \dots, n_i \text{ and } j = 1, \dots, n_j \quad (2)$$

2.5 놓기 부류와 놓기 좌표계

Fig. 6와 같이 테이블과 접하는 정점을 연결하여 생성되는 볼록 외피(convex hull)를 놓기 평면(placement plane)이라고 정의한다. 놓기 평면 위에 물체의 중심을 수직으로 투영한 점을 원점(P_c)으로 하고, 평면의 수선을 z_p 라 하면, 놓기 좌표계(placement frame)를 정의할 수 있다. 이때 물체의 형태에 따라 여러 놓기 평면이 존재할 수 있는데, Fig. 3(b)의 물체는 육면체이므로 6개의 놓기 평면이 존재한다.

놓기 부류(placement class) P_k ($k = 1, \dots, n_k$)는 놓기 평면과 원점 P_c 에 의해 특징지어진다. 각 놓기 부류마다 z_p 축에 대한 회전각인 놓기각(placement angle) ϕ 에 따라 많은 놓기 자세가 있을 수 있다. 놓기각의 집합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \{\phi_l \mid \phi_l = 2\pi \times l / n_l, l = 1, \dots, n_l\} \quad (3)$$

한편, 놓기 부류 P_k 와 놓기각 ϕ_l 에 의해서 결정되는 놓기 자세 P_{kl} 은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{kl} = (P_k, \phi_l), \text{ where } k = 1, \dots, n_k \text{ and } l = 1, \dots, n_l \quad (4)$$

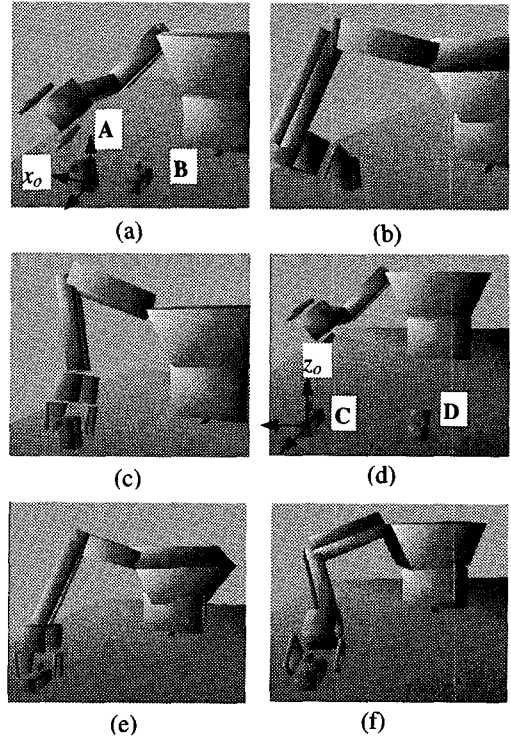


Fig. 7 Compatible and incompatible grasps

2.6 재파지 작업

물체의 초기 자세(start pose: P_s), 목표 자세(goal pose: P_g) 및 환경 정보가 주어진 집기-놓기 작업에서는, P_s 와 P_g 모두에서의 기하학 및 기구학적 제한 조건을 고려하여 파지를 결정하여야 한다. 예를 들어, Fig. 7(a)에서 자세 A에 있는 물체를 물체 좌표계의 x_o 축에 대해 90° 회전되어 있는 자세 B로 이동시켜야 하는 경우를 고려해 보자. 이 경우에 (b)의 파지로는 물체를 이동시킬 수 있으나, (c)의 파지로는 P_g 에서 손이 책상과 충돌하므로 기하학적으로 불가능하게 된다. 또 하나의 예로, (d)에서 자세 C에 있는 물체를 자세 D로 이동시키고자 할 때, (e)의 파지로는 가능하지만, (f)의 파지로는 P_g 에서 로봇이 도달할 수 없는 기구학적으로 불가능하게 된다. 이러한 예와 같이 P_s 에서는 가능하지만 P_g 에서는 불가능한 파지가 존재하게 된다. 그러므로 파지의 선택시에는 목표 자세에서의 파지도 고려하여 선택하여야 한다.

만약, P_s 및 P_g 에서 호환 가능한(compatible) 파지가 없는 경우에는 재파지 계획을 수행하여야 한다. 즉, 재파지 문제는 P_s 에서 P_g 로 연결하여 줄 수 있는 파지가 존재하는 물체의 중간 자세(intermediate pose: P_{im})를 찾는 문제로, 다음과 같

이 정리할 수 있다.

정리 1) 집기 파지(pickup grasp: G_{pu})가 다음의 조건을 만족한다면, 기하학 및 기구학적으로 놓기 파지(putdown grasp: G_{pd})와 호환 가능하다.

$$\exists \beta_i \in B \text{ s.t. } G_{pu|gk} \cap G_{pd|gk} \neq \emptyset, \quad (5)$$

where $G_{pu|gk} \neq \emptyset$ and $G_{pd|gk} \neq \emptyset$.

정리 2) 물체의 중간 자세가 다음의 조건을 만족한다면, 집기 자세와 놓기 자세는 기하학 및 기구학적으로 호환 가능하다.

$$\exists \phi_l \in \Phi \text{ s.t. } \{G_{pu|gk} \cap G_{im|gk} \neq \emptyset \text{ and } G_{im|gk} \cap G_{pd|gk} \neq \emptyset\}, \text{ where} \quad (6)$$

$G_{pu|gk} \neq \emptyset, G_{im|gk} \neq \emptyset$ and $G_{pd|gk} \neq \emptyset$

3. 재 파지 알고리즘

본 연구에서 제시하는 재파지 알고리즘은 전처리(preprocessing)와 계획(planning)의 두 단계로 나눌 수 있다. Fig. 8은 물체의 집기 자세(P_{pu})와

놓기 자세(P_{pd})가 주어진 상황에서 각 단계에서의 주요 모듈과 데이터의 흐름을 보여준다. 이 중에서 5장에서 취급할 경로 계획을 제외하고, 나머지 각 단계에 대해서 자세히 살펴보기로 한다.

3.1 전처리 단계

우선 대상 물체에 대해 가능한 놓기 부류를 설정한 다음, 기구학적으로 가능한 모든 파지 G_{allkf} 를 검색한다. Fig. 9과 같이 로봇의 작업 공간을 세계 좌표계(world coordinate system) X_w, Y_w, Z_w 상에서 일정 간격으로 분할하여 노드를 생성한 다음, 각 노드에 세계 좌표계에 평행한 노드 좌표계를 설정한다. 이 때, 각 노드에 대해서 파라미터 α 를 일정 간격으로 변화시키면 여러 파지 좌표계가 대응된다. 또한, 주어진 α 에 대해서 β 를 일정 간격으로 변화시키면 여러 손 좌표계가 대응된다. 그러면 주어진 노드와 α 에 대해서, 기구학적으로 가능한 모든 β 를 찾은 다음, 노드, α 및 β 의 조합을 참조표(look-up table)에 저장한다.

3.2 계획 단계

Fig. 8과 같이 물체의 회전과 파지각의 회전과의 상관 관계와 전처리 단계에서 작성한 참조표를 이용하여, P_{pu} 와 P_{pd} 에서 호환 가능한 파지의 목록을 작성한다. 이 목록에서 선택된 파지로 물체의 파지를 위해 이동하는 경로와 물체의 파지 후에 이동하는 경로를 생성한다. 만약 이 목록이 비어 있거나, 이동시킬 수 있는 경로가 존재하지 않을 경우에는, 재파지 알고리즘에서 중간 자세(즉, 위치와 방위)를 자동으로 결정하게 된다.

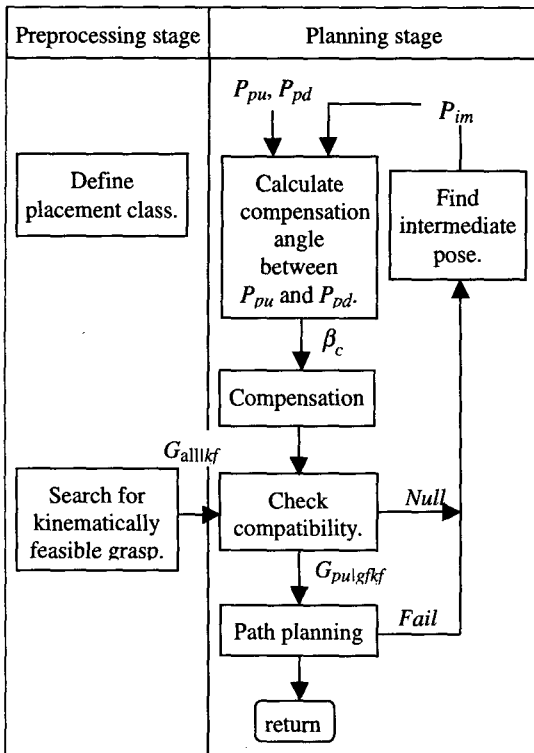


Fig. 8 Outline of regrasp planning algorithm

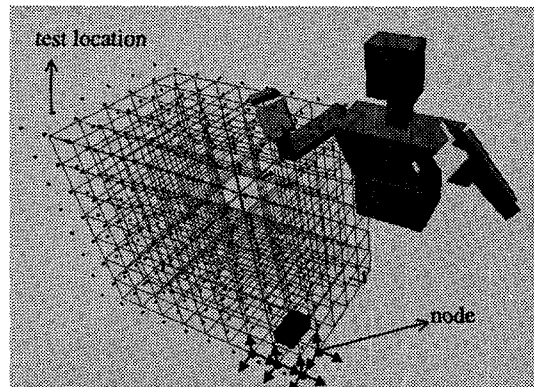


Fig. 9 Nodes and test locations

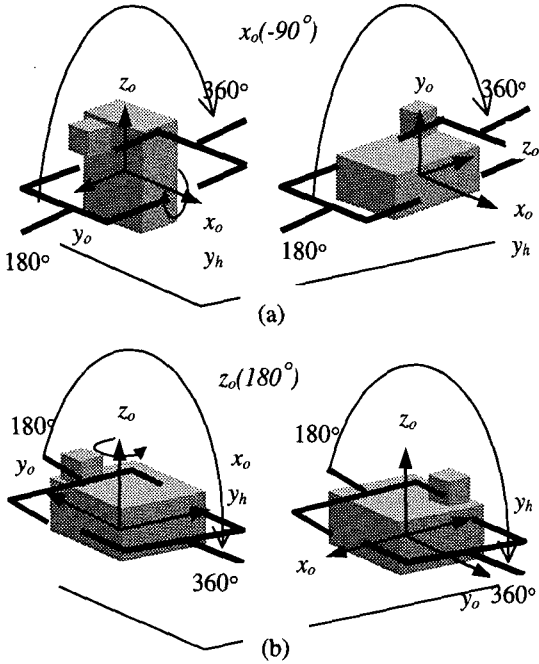


Fig. 10 Computation of compensation angle

3.2.1 보상각의 계산

Fig. 10의 (a)와 (b)는 Fig. 7의 (a)와 (d)를 확대한 그림이다. Fig. 9(a)에서는 집기-놓기 자세 사이에 물체 좌표계의 x_0 축, 즉 파지 벡터(y_h)에 대하여 -90° 의 회전이 수행되었다. 이 때, P_{pu} 와 P_{pd} 에서 가능한 파지각 β 의 범위는 각각 $180^\circ \sim 360^\circ$ 이다. 그러나 파지각은 물체의 자세와는 상관 없이 파지 좌표계의 z_g 축을 기준으로 측정되므로, P_{pu} 와 P_{pd} 에서의 가능한 파지각의 범위 $180^\circ \sim 360^\circ$ 는 각기 물체의 다른 면을 나타내고 있음을 쉽게 알 수 있다. 따라서 P_{pd} 에서의 파지각의 범위를 P_{pu} 를 기준으로 환산하여 나타내면 편리한데, 이렇게 보상된 파지각의 범위를 가지는 파지를 G^*_{pdgfkf} 라 나타내기로 한다. 상기의 예에서, P_{pu} 를 기준하였을 때, P_{pd} 는 P_{pu} 로부터 파지 벡터에 대하여 -90° 회전한 것이므로, P_{pd} 의 파지각을 P_{pu} 로 환산하면 보상된 파지각의 범위는 $270^\circ \sim 450^\circ$ (즉, 90°)가 된다. 이 파지 벡터에 대한 회전값, 즉 -90° 를 보상각(compensation angle: β_c)이라 한다.

이에 반하여, Fig. 10(b)의 경우는 파지 벡터에 대한 물체의 회전이 없으므로, 파지각을 보상할 필요가 없게 된다. 즉 β_c 는 0° 가 된다.

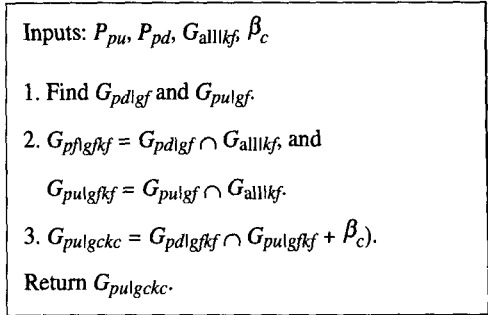


Fig. 11 Flow chart for compatibility verification

3.2.2 호환 가능한 파지의 검증

호환 가능한 파지의 검증 과정은 Fig. 11의 3단계로 나눌 수 있다. 단계 1에서는 기하학적으로 가능한 파지 G_{pulgf} 및 G_{pdlgkf} 를 검색한다. 단계 2에서는 G_{pulgf} , G_{pdlgkf} 와 G_{allkf} 의 파라미터 α, β 를 비교하여 기구학적으로 가능한 파지 $G_{pflgfkf}$, $G_{pulgfkf}$ 를 추출해낸다. 단계 3에서는 보상각 β_c 를 $G_{pdlgfkf}$ 의 β 에 보상한 후에, $G_{pulgfkf}$ 의 β 와 비교함으로써 호환 가능한 파지 $G_{pulgckc}$ 를 찾는다. 예를 들어, Fig. 10에서 보상된 파지 $G^*_{pdlgfkf}$ 의 파지각($270^\circ \sim 90^\circ$)과 $G_{pulgfkf}$ 의 파지각($180^\circ \sim 360^\circ$)을 비교하면, 공통적인 파지각은 270° 에서 360° 이 된다.

3.2.3 중간 물체 자세의 검색

재파지 계획에서는, 기하학 및 기구학적으로 호환 가능한 물체의 중간 위치 뿐만 아니라 중간 위치에서의 방위를 찾는 것도 중요하다. 중간 위치는 물체와 주위 환경이 충돌하지 않는 장소이어야 하며, 중간 자세는 재파지 횟수가 최저가 되는 자세이어야 한다. Fig. 12은 중간 위치를 찾는 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 먼저, G_{allkf} 에서 β 의 범위가 가장 큰 순서대로 평가하고, 이 중에서 주위 물체와 충돌하지 않는 위치만 추출한다. 두 번째로는 현재의 놓기 부류의 수직 벡터와 수직인 수직 벡터를 갖는 다른 놓기 부류 $P_k (k=1, \dots, n_k)$ 를 찾은 후, 세 번째는 일정 간격의 놓기각 $\phi_l (l=1, \dots, n_l)$ 를 정하여, 모든 중간 놓기 자세를 정한다. 마지막으로, 이러한 놓기 자세들 중에서 P_{pu} 와 P_{pd} 에서의 파지와 호환 가능한 파지가 존재하는 놓기 자세(P_{im})를 참조표를 이용하여 찾는다.

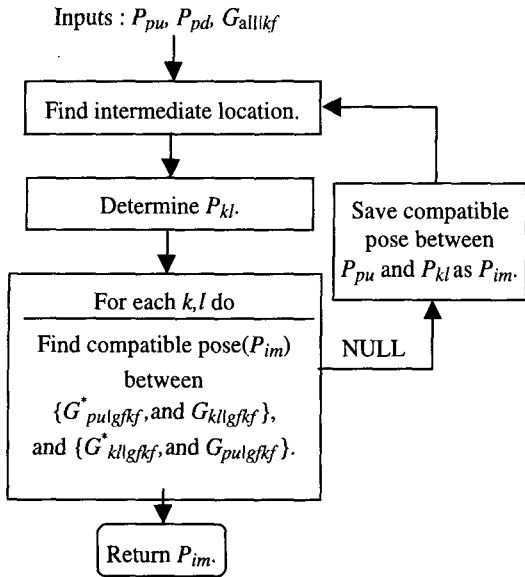


Fig. 12 Flow chart of finding intermediate object pose

상기 과정에서 만약 놓기각 간의 간격이 작다면, 모든 가능한 중간 자세를 찾을 수 있을 것이다. 만약, 호환 가능한 자세가 존재하지 않을 경우에는, P_{pu} 와 호환 가능한 파지가 존재하는 물체의 자세를 P_{kl} 중에서 하나 찾아서, 중간 자세(P_{im})로 정한다. 그리고 이 자세를 다시 초기 자세로 설정하고, 최종 목표 자세 P_{pd} 로 옮길 수 있는 중간 놓기 자세를 연속적으로 찾아 간다.

4. 경로 계획

집기-놓기 작업과 관련된 경로 계획은, 로봇 손이 물체를 잡기 위해서 이동하거나 물체를 파지한 채로 놓기 위치로 이동하는 데 이용된다. 본 연구에서는 SANDROS⁽¹²⁾라는 관절 공간에 기초한 충돌 회피 경로 계획기를 사용하였는데, 이 SANDROS는 다 해상도(multi-resolution), 계층적 검색 방법을 사용한다.

로봇의 현재의 손좌표계를 초기 좌표계(start frame: f_s)로 설정하고, 로봇 손이 목표 좌표계(goal frame: f_g)로 이동하는 경우를 고려해 보자. 이때, 로봇의 손의 초기 관절 변수 q_s 는 알고 있지만, 목표 관절 변수 q_g 는 알지 못하며, 그 해는 무한히 존재할 수 있다. 그러나 SANDROS는 목표 관절 변수값이 주어지야만 충돌 회피 경로를 계획할 수 있다.

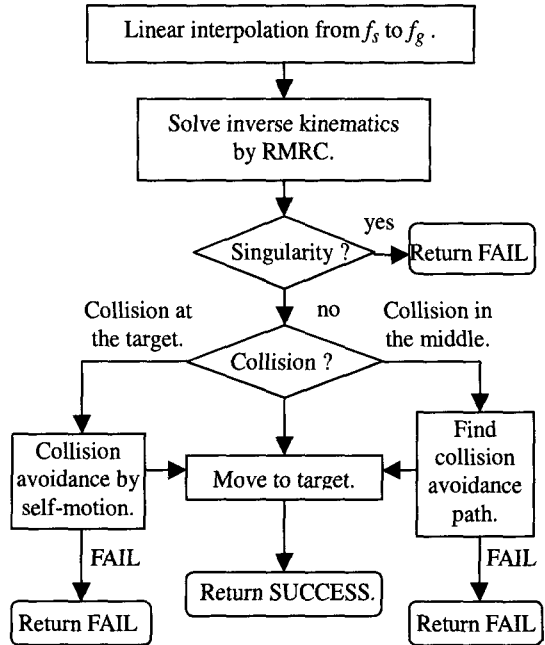


Fig. 13 Flow chart of path planning

이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 Fig. 13의 흐름도로 나타내었다. 먼저, 좌표계 f_s 에서 f_g 까지 손의 궤적을 직선 보간으로 잘게 나누어서 역기구학 계산 및 충돌 검사를 수행한다. 이때, f_g 까지 충돌이 없는 역기구학 해가 존재하면, 로봇의 손은 목표 좌표계에 도달하는 해를 찾은 것이다.

만약, 보간 경로의 중간에서 충돌이 발생하고, f_g 에서는 발생하지 않는다면, f_g 에서의 관절 변수 q_g 를 저장하고, SANDROS를 이용하여 관절 변수 q_s 에서 q_g 까지의 경로를 찾는다. SANDROS는 Fig. 14과 같이 먼저 관절 공간을 잘게 나누어 여러 개의 사각형 셀을 구성하며, 전위 필드 계획기(potential-field planner) 등과 같은 간단한 국부 경로 계획기를 이용하여 q_g 까지 갈 수 있는 모든 경로를 찾는다. 만약, 해가 존재하지 않으면 존재할 때까지 셀을 더 잘게 나누어 검색하는데, 이때 셀은 사용자가 설정한 해상도까지 나눌 수 있다.

또한, 여유 자유도 로봇을 사용할 경우, 중간에서는 충돌이 발생하지 않지만, f_g 에서 로봇과 주위 물체와의 충돌이 발생할 경우에는 여유 자유도를 이용한 자가 운동(self-motion)으로 충돌하지 않는 자세를 찾도록 하였다.

5. 결과 및 고찰

제시된 재파지 알고리즘을 사용하여 다양한 시물레이션을 수행하였으며, 실제 매니퓰레이터에도 적용하였다. 이때 Indigo2 120MHz 워크스테이션을 사용하였다. 또 매니퓰레이터는 KIST에서 개발한 인간형 로봇 CENTAUR를 선택하였는데, 3개의 손가락은 2개/1개로 나누어서 그리퍼로 모델링하였다.

전처리 단계에서는 Fig. 9과 같이 기구학적으로 가능한 모든 손 자세를 검색하여, 각 노드의 위치와 파라미터들을 참조표에 저장한다. 이때 작업공간을 10cm의 간격으로 나누어 노드를 설정하였으며, 파라미터의 샘플링 각도는 10°로 하였다. 이러한 과정은 주위 환경과는 무관하게 주어진 로봇에 대해 단지 한 번만 수행하면 된다.

알고리즘의 완전도(completeness)를 검증하기 위해 다음과 같은 시물레이션을 수행하였다. 먼저 Fig. 9과 같이 장애물이 없는 작업공간에서, 노드와는 다른 점에 시험 위치(그림에서 점으로 표시됨)를 여러 개 설정하고, 여기에 취급하고자 하는 물체를 위치시킨다. 만약, 이 물체가 육면체 형태이고, 놓기각의 샘플링 각도를 90°로 설정하면, 시험 위치에 놓이는 물체의 초기 자세는, 6개의 놓기 부류와 4개 놓기각에 의해서 생성되는 24개 자세 중 하나가 된다. 이 모든 시험 위치의 24개 자세로부터 주어진 목표 자세로 옮기는 작업을 수행하였다. 이때 검색하는 중간 놓기 부류 P_k 의 개수는 4개이며, 놓기각 ϕ_i 를 90°간격으로 4개 설정하였으므로 총 16개의 자세를 대상으로 재파지가 가능한 중간 놓기 자세(P_{im})를 찾고자 하였다.

수행한 결과는 Table 1에 나타나 있다. 총 5,779번의 집기-놓기 작업을 수행하였는데, 물체가 어떠한 초기 자세(즉, 위치/방위)로 있더라도 몇 번의 재파지 과정으로 모두 목적자세로 옮기는데 성공하였다. 이 중에서 약 50%가 되는 3,064번의 다소 많은 작업이 재파지 과정을 필요로 하였으며, 특히 재파지 횟수가 2번인 작업이 459개 존재하였다. 이렇게 많은 재파지를 필요로 하는 이유는

지금까지 언급되어진, 호환 가능한 파지 $G_{pulgckc}$ 가 존재하지 않을 경우 외에도 다음의 두 가지 이유가 더 있을 수 있다.

첫째는, 존재한다고 하더라도, 물체를 잡기 위한 경로 혹은 옮기는 경로에서 특이점이 발생하는 경우이다. 본 연구에서 사용한 역기구학 계산 방법은 RMRC (Resolved Motion Rate Control)⁽¹³⁾인데, 이 방법은 시작하는 초기 자세에 따라 목표 좌표계로 갈 수 있는 해의 존재 여부가 다르다. 즉, 초기 자세가 특이점 근처에 있어서 중간 경로에서 특이점을 지나 갈 경우 목표 위치에서는 해가 존재한다고 하더라도 그 경로를 찾을 수 없다는 단점이 있다. 그러므로, 전처리 단계에서는 고정된 초기 자세에서 각 노드까지의 지정된 목표 좌표계까지의 역기구학 해를 찾았지만, 실제 상황에서는 이전 작업의 마지막 로봇 자세가 초기 자세로 설정하여 계산하므로 중간 경로에서 특이점이 발생할 경우 그 해를 찾을 수 없다.

둘째는 검색된 모든 파지 (G_{gckc})_{pu}로는 충돌 회피하는 경로를 찾을 수 없는 경우이다. 이 경우는 설정된 해상도가 커서 해를 찾지 못할 경우이다. 해상도를 더 작게 설정하면 해를 찾을 수 있으나 계산 시간이 너무 오래 소요될 수 있으므로, 계산 시간과 해상도 사이에 트레이드-오프가 필요하다.

그러나, 시물레이션에서는 장애물이 없는 환경에서 수행되었기 때문에 재파지를 수행해야 하는 원인은 $G_{pulgckc}$ 가 존재하지 않을 경우와 상기의 첫번째 경우에 있다. 만약 능숙도 지수 (manipulability index) 등을 이용한 특이점을 회피하

Table 1 Simulation results

No. of Total tasks	No. of regrasp Sequence	No. of tasks
6,384	0	3,064
	1	2,256
	2	459

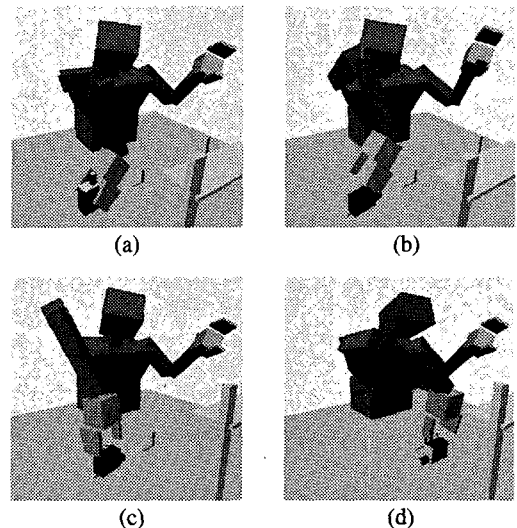


Fig. 14 Graphic simulation results

는 역기구학 알고리즘을 사용한다면, 상기 후자의 원인으로 인하여 유발되는 재파지를 줄일 수 있을 것이다.

Fig. 14은 Fig. 1의 문제에 대한 시뮬레이션 결과이다. 2번의 재파지 (b)와 (c)를 거쳐 목표 자세에 물체를 놓을 수 있었다. 실제 로봇으로 적용한 예는 Fig. 15에서 보여 준다. 막대기와 테이블과의 충돌을 피하고, 한 번의 재파지 과정을 통해 물체는 목표 자세로 옮겨졌다. 수행 시간은 100초를 넘지 않았으며, 거의 대부분의 시간은 충돌 회피를 위한 경로 생성에서 소요되었다

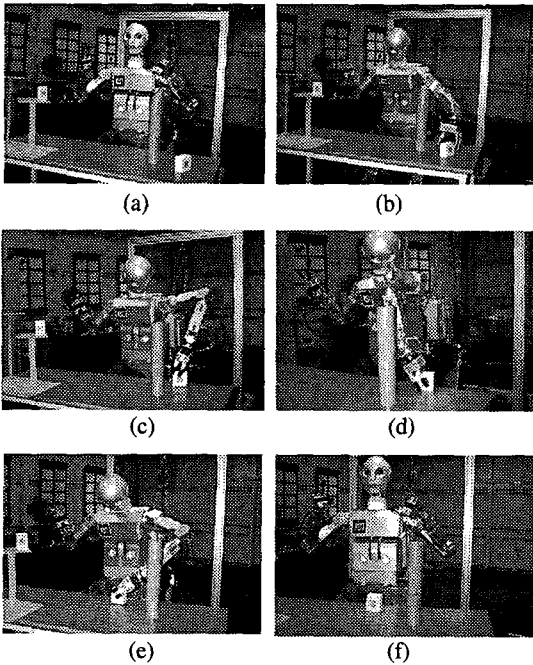


Fig. 15 Photos showing experimental results

6. 결론

참조표를 이용하여 재파지 해를 찾으며, 연속적인 재파지를 자동으로 생성할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한, 이미 개발된 충돌 회피 경로 계획기와 결합하여, 집기-놓기 작업을 원활하게 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 주어진 샘플링 데이터 내에서 해가 존재하면, 해를 완전하게 찾는다는 점을 실험적으로 보여주었다. 또한, 참조표를 이용하여 몇 개의 파라미터 값만 비교하여 재파지 계획을 수행하기 때문에, 한 번의 재파지를 찾는 데 소요되는 시간은 거의 걸리지

않으므로, 실시간을 요구하는 작업에 사용되어 질 수 있을 것이다. 또한, 빠른 충돌 회피 경로 계획기를 사용한다면, 온라인에서도 적용할 수 있을 것이다. 또한, 기구학적인 특이점이 작은 조작부를 사용하고, 또는 이를 회피하는 역기구학 알고리즘을 사용한다면 재파지 횟수가 줄게 되므로, 계산 시간을 더 줄일 수 있을 것이다.

앞으로는 오목한 형태를 비롯한 좀 더 다양한 형상을 다룰 수 있는 파지 계획기의 개발에 중점을 둘 것이며, 또한 직선 경로 생성 시에 조작부의 여유자유도를 이용하여 충돌 회피를 할 수 있는 국부 경로 계획기를 포함시킬 예정이다.

참고문헌

- (1) Tournassoud, P., Lozano-Perez, T., and Mazer, E., 1987, "Regrasping", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1924~1928.
- (2) Martin, B. and Thomas, S., 1997, "Transition from Enveloping to Fingertip Grasp: A Way of Reorientation by a Multi-fingered Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1004~1009.
- (3) Erkmén, A. M. and Durna, M., 1998, "Genetic Algorithm-Based Optimal Regrasping with the Anthrobot 5-fingered Robot Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3329~3334.
- (4) Röhrdanz, F. and Wahl, F. M., 1997, "Generating and Evaluation Regrasp Operations," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2013~2018.
- (5) Sascha, A. S., Stephan V., Nikolaos P. P. and Heiko M., 1999, "Planning of Regrasp Operations," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 245~250.
- (6) Latombe, J. C., 1991, *Robot Motion Planning*. Boston, Kluwer Academic.
- (7) Alami, R., Siemion, T., and Laumond, J. P., 1990, *A Geometrical Approach to Planning Manipulation Tasks: The case of Discrete Placements and Grasps*, in *Robotics Research 5*, edited by Miura H. and Arimoto, S., The MIT Press, Cambridge, pp.453~463.
- (8) Koga, Y. and Latombe, J. C., 1994, "On Multi-Arm Manipulation Planning," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 945~952.
- (9) Ahuactzin, J. M., Gupta, K. and Mazer, E., 1998, "Manipulation Planning for Redundant Robots: A Practical Approach," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 7, pp. 731~747.
- (10) O'Rourke, J., *Computational Geometry in C*, New York: Cambridge University Press, pp. 233~269.
- (11) Gilbert, E. G., Johnson, D. W. and Keerthi, S. S., 1998, "A Fast Procedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space," *IEEE Journal of Robotics and Automation*,

- Vol. 4, No. 2, pp. 193~203.
- (12) Chen, P. C. and Hwang, Y. K., 1998, "SANDROS: A dynamic Graph Search Algorithm for Motion Planning," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 3, pp. 404~416.
- (13) Whitney, D. E., 1972, "The Mathematics of Coordinated Control of Prostheses and Manipulators," *Journal of Dyn. Sys., Meas., Contr*, Vol. 4, No. 94, pp. 303~309.