

축소 차원 형상 공간을 이용한 협조작업 두 팔 로봇의 충돌 회피 경로 계획

Collision-Free Path Planning for Two Cooperating Robot Manipulators Using Reduced Dimensional Configuration Space

최 승 문, 이 석 원*, 이 범 회**

* 서울대학교 제어계측공학과(Tel:02-880-6485-505, Fax:02-876-5414)

** 서울대학교 전기공학부(Tel:02-880-6485-511, Fax:02-880-5414)

Abstracts In this paper, we propose an efficient collision-free path planning method of two cooperating robot manipulators grasping a common object rigidly. For given two robots and an object, the procedure is described which constructs the reduced dimensional configuration space by the kinematic analysis of two cooperating robot manipulators. A path planning algorithm without explicit representation of configuration obstacles is also described. The primary steps of the algorithm is as follows. First, we compute a graph which represents the skeleton of the free configuration space. Second, a connection between an initial and a goal configuration to the graph is searched to find a collision-free path.

Keywords two cooperating robot manipulators, reduced dimensional configuration space, path planning algorithm without explicit representation of configuration obstacles

1. 서론 및 연구 배경

최근 로봇 성능의 발전으로 인하여 로봇이 할 수 있는 작업 영역이 확대되어 가고 있다. 따라서, 생산 공정에서 로봇의 사용량이 증대되어 같은 물론 그 사용 범위와 사용 방법도 매우 다양해지고 있고 있는 실정이다. 이러한 추세에 대응하여 다중 로봇 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 여러 대의 로봇을 이용하여 작업을 할 경우 단일 로봇으로는 할 수 없는 많은 작업을 가능하게 할 수 있기 때문이다. 다중 로봇 시스템에 대한 연구 중 많은 주목을 받고 있는 분야 중의 하나는 여러 대의 로봇이 동일한 작업 물체에 대해 협조작업을 하는 시스템이다. 이 시스템에 대해서는 작업 공간 상의 고정 장애물 뿐만 아니라 다른 로봇과 작업 물체 등의 잠재적 장애물을 모두 고려하여 로봇의 경로를 계획하는 충돌 회피 경로 계획, 여러 대의 로봇이 주어진 경로를 따라 하나의 작업 물체를 운반하기 위해 필요한 힘의 분배, 주어진 경로에 대해 로봇의 궤적을 설계하는 궤적 계획, 주어진 궤적을 추종하기 위한 제어기의 설계 방법 등이 현재 활발히 연구되고 있다. 이 중에서도 경로 계획은 다른 모든 문제에서 먼저 선행되어야 하므로 본 논문에서는 협조작업을 하는 2대의 로봇(two cooperating robot manipulators, TCRM)의 효율적인 무충돌 경로 계획 방법을 제안한다.

현재까지 동작 계획 분야에서는 여러 가지 종류의 문제들과 그 해결 방안이 연구되어 왔다[2][8]. Lozano-Perez[9][10]에 의하여 제시되고 발전된 형상 공간의 개념과 방법론은 충돌 제한 조건의 명확한 표현이 가능할 뿐 아니라 광범위한 로봇의 동작 계획 문제에 대한 효과적인 체계를 제공한다. 형상 공간은 작업 공간에서 로봇의 형상(configuration)을 표현할 수 있는 좌표 벡터로 이루어지는 공간이며 그 공간 내에서 로봇의 형상은 한 점으로 표현된다. 작업 공간에서는 모든 로봇의 링크들과 장애물과

의 충돌을 고려하여 각 로봇의 경로를 계획하여야 하나, 형상 공간에서는 작업 공간 상의 장애물을 형상 공간으로 대응시켜 형상 공간 장애물(configuration space obstacle)을 구하여 점으로 표현되는 로봇이 이를 피하도록 하면 된다. 따라서, 보통 TCRM과 같이 작업 공간상의 표현이 기하학적으로 매우 복잡한 경우에는 형상 공간상에서의 동작 계획의 방법에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 협조작업을 하는 다중 로봇에 대한 경로 계획에 관한 연구는 그 문제의 복잡성으로 인해 많은 연구가 진행되지 않은 비교적 새로운 분야이다. 이 경우 형상 공간의 그 차원이 매우 높아 탐색 공간이 방대해지고 형상 공간에 비연결 영역(unconnected region)이 존재할 뿐 아니라 형상 공간 장애물의 명시적인 구성이 매우 난해하므로 현재까지는 국소적 경로 탐색 방법(local path planning method)만이 적용되고 있다[3][7].

따라서, 본 논문에서는 기구학적 분석을 통하여 최소 차원 형상 공간을 구성하고 형상(configuration)의 임의적 생성(random generation)을 이용한 전역적 경로 탐색 방법(global path planning method)을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 TCRM의 무충돌 경로 계획 문제를 엄밀하게 정의하며 3장에서는 축소차원 형상공간(reduced dimensional configuration space, RDCS)의 구성에 대해 기술한다. 4장에서는 RDCS에서의 무충돌 경로 탐색 기법에 대해 설명한다. 5장에서 모의실험 결과를 제시하며 6장에서 결론과 향후 연구 방향에 대해 기술한다.

2. 문제 정의

2.1 문제 정의

먼저, TCRM의 작업 환경에 대해 다음과 같이 가정한다.

가정 : TCRM의 작업 환경

(1) 각 로봇이 작업 물체를 잡고 있는 위치는 로봇의 이동 도

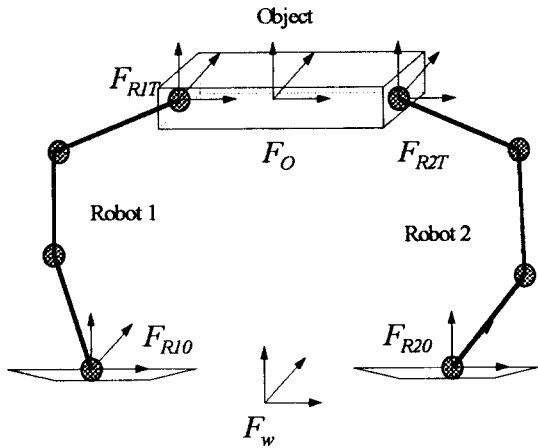


그림 1. 작업 공간의 좌표계 설정

Fig. 1. The assignment of coordinate frames in work space

중 변경될 수 없다.

(2) 작업 물체의 부피가 작업 공간에서 차지하는 영역을 무시하지 않는다.

(3) 작업 공간 내에 있는 모든 장애물의 위치와 기하학적 형태는 완전히 알려져 있고 시간에 따라 변하지 않는다. ■

이러한 가정 하에서 TCRM의 무충돌 경로 계획 문제는 작업 공간 내의 장애물과 충돌하지 않고 작업 물체의 초기 위치와 방향(orientation)으로부터 목표 위치와 방향까지 그것을 이동시킬 수 있는 각 로봇 매니퓰레이터의 연속적인 경로를 찾는 문제로 정의된다.

2.2 문제 기술

위와 같이 정의된 무충돌 경로 계획 문제는 다음과 같이 기술될 수 있다. 먼저 로봇과 작업 물체를 작업 공간에서 표현하기 위하여 다음과 같이 기호를 정의한다.

정의 1. 기호 정의 (그림 1, $i = 1, 2$)

- Ri : 로봇 i
- F_X : X 의 좌표계
- T_A^B : 좌표계 F_A 에서 F_B 로의 변환
- $q_{Ri} = (q_{Ri}^1, \dots, q_{Ri}^{m_{Ri}})^T \in R^{m_{Ri}}$: 로봇 Ri 의 형상
- $q_O = (x_O, y_O, z_O, \alpha, \beta, \gamma)^T \in R^6$: 작업 물체의 형상
- $q = (q_{R1}^T, q_{R2}^T, q_O^T)^T \in R^{m_{R1} + m_{R2} + 6}$: 전체 시스템의 형상
- m_{Ri} : 로봇 i 의 관절의 개수
- q_{Ri}^j : 로봇 i 의 관절변수($j=1, 2, \dots, m_{Ri}$)
- (x_O, y_O, z_O) : F_w 에 대한 F_O 의 원점의 좌표
- (α, β, γ) : F_w 에 대한 F_O 의 방향
- $A_{Ri}(q_{Ri})$: 로봇 i 가 q_{Ri} 일 때 차지하는 작업공간의 영역
- $O(q_O)$: 작업물체가 q_O 일 때 차지하는 작업공간의 영역
- B_k : k 번째 장애물이 차지하는 작업공간의 영역 ($k = 1, 2, \dots, p$)

가정을 만족하고 장애물과의 충돌을 회피하기 위해 TCRM이 만족해야 할 제한 조건을 구하면 다음과 같다.

제한 조건(constraints)

(1) 기구학적 제한조건(kinematic constraint)

각 로봇의 관절각의 제한은 다음과 같다.

$$\min q_{Ri}^j \leq q_{Ri}^j \leq \max q_{Ri}^j \quad (1)$$

$$\forall i \in \{1, 2\} \text{ and } \forall j \in \{1, 2, \dots, m_{Ri}\}$$

(2) 협조작업 제한조건(cooperation constraint)

가정 (1)을 만족하면서 각 로봇이 작업 물체를 잡고 이동하는 것을 표현하는 제한 조건은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} T_w^O(q_O) &= T_w^{R1} T_{R1}^O(q_{R1}) T_{R1}^O \\ &= T_w^{R2} T_{R2}^O(q_{R2}) T_{R2}^O \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 충돌회피 제한조건(collision-free constraint)

로봇이 장애물과의 충돌을 일으키지 않으려면 작업 공간 상의 고정 장애물 뿐 아니라 로봇 링크 사이의 충돌도 피해야 하며 작업 물체도 고려해야 하므로 충돌을 회피하기 위한 TCRM의 조건은 다음과 같다.

$$A_{R1}(q_{R1}) \cap A_{R1}(q_{R2}) = \emptyset, A_{R1}(q_{R1}) \cap A_O(q_O) = \emptyset,$$

$$A_{R2}(q_{R2}) \cap B_i = \emptyset, A_O(q_O) \cap B_i = \emptyset, \quad (3)$$

$$\forall i \in \{1, 2\} \text{ and } \forall j \in \{1, 2, \dots, p\}$$

따라서, TCRM의 무충돌 경로는 다음과 같이 정의된다.

정의 2. 무충돌 경로

다음을 만족하는 함수 τ 를 작업물체의 초기 형상 $q_{O,init}$, 목표 형상 $q_{O,goal}$ 에 대한 무충돌 경로라고 정의한다.

$$\tau: s \in [0, 1] \mapsto q = (q_{R1}(s)^T, q_{R2}(s)^T, q_O(s)^T)^T$$

단, $q_O(0) = q_{O,init}$, $q_O(1) = q_{O,goal}$ 이고 제한조건을 만족한다. ■

3. 형상 공간의 구성

전술한 바와 같이 형상 공간을 이용한 경로 계획은 많은 장점을 가지고 있으므로 본 논문에서는 TCRM의 형상 공간을 구성하고 그 공간에서 경로 계획을 하는 방식을 취한다. 이번 장에서는 TCRM의 형상 공간의 구성에 대해 서술한다.

3.1 전차원 형상 공간

각 로봇과 작업 물체의 형상 공간은 일반적으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

정의 3. 형상 공간

로봇 1, 2, 작업 물체의 형상 공간을 각각 C_{R1} , C_{R2} , C_O 라고 표기하며 그 정의는 각각 다음과 같다.

$$C_{R1} = \{q_{R1}\}, C_{R2} = \{q_{R2}\}, C_O = \{q_O\} \quad \blacksquare$$

정의 3을 이용하여 TCRM의 전차원 형상 공간(full dimensional configuration space, FDCS)은 다음과 같이 정의된다.

정의 4. FDCS

FDCS를 C_{full} 이라고 표기하며 정의는 다음과 같다.

$$C_{full} = \{q_{full} : q_{full} = (q_{R1}, q_{R2}, q_O)\} = C_{R1} \times C_{R2} \times C_O$$

단, q_{full} 은 제한조건 (1), (2)를 만족하며, 이 때 q_{full} 을 전차원 형상(full dimensional configuration)이라고 정의한다. ■

여기서 FDCS는 $m_{R1} + m_{R2} + 6$ 차원의 매니폴드(manifold)의 식 (1), (2)를 만족하는 부분매니폴드(sub-manifold)이다. 하지만 일반적인 경우 FDCS의 차원이 너무 높아(2대의 6축 산업용 로봇의 경우 18차원이 된다) FDCS를 이용하여 경로 계획을 하는 것은 경로 탐색 공간이 방대해져 경로 탐색이 매우 힘들다. 따라서, 기구학적 분석을 통하여 FDCS의 차원을 줄이는 방법을 다음 절에서 제안한다.

3.2 축소 차원 형상 공간

가정에 의해 작업 물체가 작업 공간에서 차지하는 영역을 무시하지 않고 로봇의 이동 도중 로봇이 잡고 있는 작업 물체의 위치가 변하지 않을 경우 작업 물체를 의사 링크(pseudo link)로

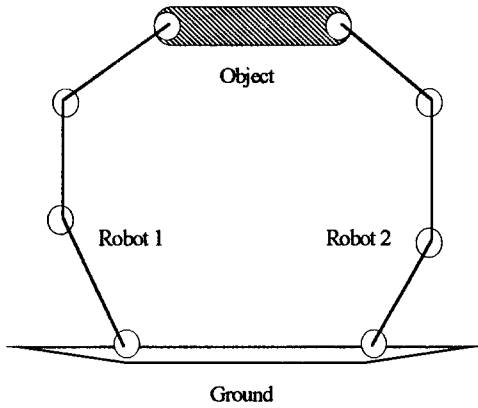


그림 2. 기구학적 폐사슬
Fig. 2. Kinematic Closed-Chain

간주하고 TCRM을 기구학적 폐사슬(kinematic closed-chain)로 모델링할 수 있다(그림 2). 그러면 Kunzbach Criterion[1]에 의해서 이 기구학적 폐사슬의 자유도를 구하여 TCRM을 공간에서 표현하기 위한 최소의 좌표의 개수를 알아낼 수 있다.

Kunzbach Criterion

$$F = (6 - m)(N - 1) - \sum (6 - k - m)p_k \quad (4)$$

여기서, F 는 자유도, N 은 링크의 수, p_k 는 자유도 k 인 기구쌍(kinematic pair)의 수, m 은 공간 기구의 형태에 따른 제한조건의 수($0 < m < 4$)로 각각 주어진다. 이 때, 로봇이 일반적인 산업용 직렬형(serial) 매니플레이터이면 식 (4)는 다음과 같이 간단해진다[11].

$$F = 6 \times (N - 1) - 5 \times N \quad (5)$$

예를 들면, 2대의 6축 산업용 로봇을 이용한 협조작업의 경우 전체 시스템은 Kunzbach Criterion에 의하여 8자유도의 기구학적 폐사슬로 모델링된다. 즉, 18개의 전차원 형상의 원소 중 8개의 원소만 결정되면 기구학, 역기구학을 이용해서 다른 변수들을 결정할 수 있다.

전차원 형상의 원소 중 F 개의 원소를 선택하고 이 선택된 원소들로 이루어진 벡터를 독립 형상(independent configuration)이라고 정의한다. 그 외의 원소들로 이루어진 벡터를 종속 형상(dependent configuration)이라고 정의하며, 독립 형상이 이루는 공간을 축소 차원 형상 공간(reduced dimensional configuration space, RDCS)이라 정의한다. 종속 형상은 독립 형상이 정해지면 기구학적 관계에 의해 결정된다. 이 때, F 개의 원소를 선택하는 방법이 문제가 되는데 본 논문에서는 경로 계획 단계의 효율성을 고려하여 작업 물체를 중심으로 대칭적으로 정의 5와 같이 선택한다.

정의 5. 독립 형상

독립 형상 q_{ind} 는 독립 형상의 원소들의 순서쌍으로 정의된다.

$$q_{ind} = (q_1, q_2, \dots, q_F)^T$$

여기서 $q_1 = a_{R1}^1, q_2 = a_{R2}^1, q_3 = a_{R1}^2, q_4 = a_{R2}^2, \dots$

정의 6. RDCS

RDCS는 C_{red} 로 표기하며 다음과 같이 정의된다.

$$C_{red} = \{ q_{ind} : q_{ind} = (q_1, \dots, q_F)^T \}$$

4. 경로 계획

일반적으로 무충돌 경로를 찾기 위해 전역적 방법을 사용한 경우 작업 공간의 장애물을 형상 공간 장애물로 변환시키는 과정이 필요하다. 이 작업은 주로 형상 공간 장애물의 경계 방정식을 구하거나 형상 공간을 이산화(discretization)하여 행해진다. 그러나, TCRM의 경우 작업 공간에서의 기하학적 형태가 매우 복잡하여 경계 방정식을 구성하는 것이 본질적으로 난해하다. 또한, RDCS를 구성하여도 다른 로봇 시스템에 비해 그 차원이 매우 높으므로 RDCS를 이산화하여 형상 공간 장애물을 구성하는 방식은 계산량과 메모리 면에서 구현하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 형상 공간 장애물을 명시적으로 구할 필요가 없는 전역적 무충돌 경로 계획 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘은 RDCS에서 수행되며 종속 형상은 필요할 때마다 기구학적 관계에 의해 독립 형상으로부터 결정된다. 이 알고리즘은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 무충돌 형상 공간의 골격을 표현하는 그래프를 생성하고 두 번째 단계에는 이 그래프와 초기 형상, 목표 형상과의 연결 경로를 찾아 무충돌 경로를 생성한다.

4.1 단계 1

단계 1은 다음과 같은 소단계들을 순차적으로 수행함으로써 이루어진다. 이 단계는 전체 알고리즘의 수행 시간의 대부분을 차지하며 TCRM의 작업 환경이 변하지 않으면 다시 수행할 필요가 없다.

단계 1-1. RDCS에 제한 조건 (1), (3)을 만족하는 M 개의 형상을 임의로 발생시킨다. 이 M 개의 형상으로 가중 무방향 그래프(weighted undirected graph)를 생성한다.

단계 1-2. 단계 1-1에서 구한 M 개의 형상 q_{ind} 마다 다음의 과정을 수행한다. 가장 가까운 거리를 가지는 N 개의 형상의 집합을 구한다. 이 때, 각 형상의 거리는 물리적 의미를 부여하기 위하여 다음의 1-메트릭(1-metric)을 사용한다.

$$d(q, q') = \sum_{i=1}^F |q_i - q'_i|, \quad q, q' \in C_{red} \quad (6)$$

이 N 개의 형상 중 q 와 직선으로 연결했을 때 그 직선을 따라 충돌이 발생하지 않는 형상들을 그래프에서 간선(edge)으로 연결하고 그 거리를 간선의 가중치(weight)로 선정한다. 이 때 충돌의 감지는 q 로부터 종속 형상까지 구하여 [5][6]에서 제안한 방법을 사용한다.

단계 1-3. 단계 1-2에서 생성된 그래프의 노드에 너비 우선 탐색(breadth first search)를 반복적으로 실행하여 그래프의 연결 요소(connected component)들을 찾는다.

단계 1-4. 단계 1-3에서 생성된 각 연결 요소의 연결 가능성 여부를 [11]에서 제시된 난반사 기법을 이용하여 찾는다. TCRM의 형상 공간은 본질적으로 비연결 영역이 존재하므로 난반사를 K 번 실시하여 연결 요소간의 연결 경로를 찾지 못하면 두 연결 요소는 연결될 수 없는 것으로 판단한다. K 번 내에 연결 경로를 찾을 경우 두 연결 요소를 찾은 연결 경로로 연결한다.

4.2 단계 2

단계 1에서 생성한 그래프를 이용하여 작업 물체의 초기 형상, 목표 형상에 대한 경로 탐색을 실시한다.

단계 2-1. 제한조건 (1), (2)와 TCRM의 기구학적 관계를 이용하여 초기 형상, 목표 형상에 해당되는 독립 초기 형상, 독립 목표 형상을 구한다.

단계 2-2. 독립 초기 형상, 독립 목표 형상에 대하여 단계 1에서 생성된 그래프의 형상 중 직선으로 연결될 수 있고 최단 거리를 가지는 형상을 각각 구한다. 이 때 찾아진 그래프의 형상들이 각각 연결되지 않은 연결 요소에 속하면 경로를 찾을 수 없다고 판단하고 알고리즘의 수행을 끝낸다. 그렇지 않으면 독립

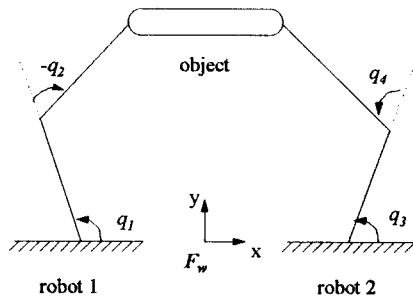


그림 3. 모의 실험 대상 로봇

Fig. 3. Planar robots and object for simulation

초기 형상, 독립 목표 형상을 그래프에 삽입한다.

단계 2-3. 그래프에서 A* 알고리즘[8]을 사용하여 독립 초기 형상으로부터 독립 목표 형상까지 최단 거리의 경로를 찾는다. 식 (6)의 거리의 정의에 의하여 이 경로는 그래프에서 찾을 수 있는 경로 중 각 독립 관절각의 변화량의 합을 최소로 하는 경로이다.

단계 2-4. 단계 2-3에서 구한 독립 형상의 경로에서 종속 형상의 경로를 구하여 모든 TCRM의 관절각의 경로를 생성한다.

5. 모의 실험

제안된 알고리즘에 의한 2대의 평면 2축 로봇에 대한 모의 실험 결과는 다음과 같다. 로봇의 각 링크의 길이는 1.5m, 작업 물체의 길이는 2m, 월드 좌표계에 대한 각 로봇의 베이스 좌표계의 위치는 각각 (-1.5m, 0), (1.5m, 0)이다(그림 3).

전체 시스템의 자유도가 3이므로 독립 형상 $q_{ind}=(q_1, q_2, q_3)^T$ 로 잡았다. 제안된 경로 계획 방법에서 필요한 각 파라메타는 $M=1000, N=5, K=100$ 으로 정하고 모의 실험을 하였다. 모의 실험은 펜티엄 100MHz 컴퓨터에서 윈도우즈 95 하에 수행되었다.

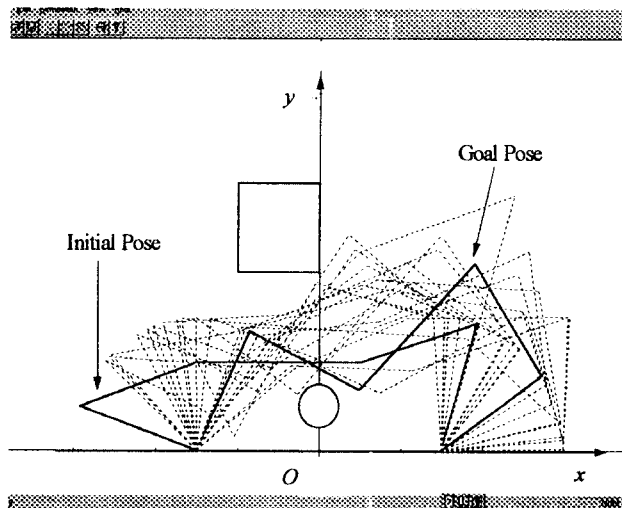


그림 4. 모의 실험 결과
Fig. 4. Simulation Result

작업 물체의 초기 형상이 $(-0.7m, 1.5m, 0^\circ)$, 목표 형상이 $(1.2m, 1.5m, 45^\circ)$ 일 때의 모의 실험의 결과는 그림 4와 같다. 두꺼운 실선이 초기 형상과 목표 형상을 표현하고 가는 점선이 두 로봇과 작업 물체의 경로를 표현한다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 TCRM의 무충돌 경로를 찾기 위한 경로 계획 방법을 제안했다. TCRM의 기구학적 분석을 통하여 RDCS를 구성하는 과정을 제시하였고 형상 공간 장애물의 명시적인 표현이 필요 없는 전역적 경로 계획 방법을 제시하였다.

앞으로 연구 결과를 2대의 산업용 6축 로봇에 적용하여 알고리즘의 실용성을 검증하고 TCRM이 작업 물체를 도구(tool)을 이용하여 잡고 있지 않은 경우에 대한 연구도 진행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A. G. Erdman, Modern Kinematics : Developments in the Last Forty Years, John Wiley & Sons, Inc., 1993
- [2] Yong K. Hwang, Narendra Ahuja, "Gross Motion Planning - A survey", *ACM Computing Surveys*, vol. 24, No. 8, September 1992, pp. 220 - 291
- [3] Max Fischer, "Efficient Path Planning Strategies for cooperating manipulators in environment with obstacles", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp. 2418-2423, 1994
- [4] E. G. Gilbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthim, "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space", *IEEE Trans. Robot. and Automat.*, vol. 4, no. 2, pp. 193-203, April 1986
- [5] E. G. Gilbert and Chek-Peng Foo, "Computing the distance between general convex objects in three dimensional space", *IEEE Trans. Robot. and Automat.*, vol. 6, no. 1, pp. 53-61, February 1990
- [6] Th. Horsch, F. Schwarz, and H. Tolle, "Motion planning with many degree of freedom - Random Reflections at C-Space Obstacles", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp. 3318-3323, May 1994
- [7] Y. Koga and J. C. Latombe, "Experiments in dual-arm manipulation planning", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp. 2238-2245, May 1992
- [8] J. C. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991, Boston/Dordrecht/London
- [9] T. Lozano-Perez, "Spatial planning : A configuration space approach", *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-32, pp. 108-120, Feb. 1983
- [10] T. Lozano-Perez, "A simple motion planning algorithm for general robot manipulators", *IEEE Trans. Robot. and Automat.*, vol. RA-3, no. 3, pp. 224-238, June 1987
- [11] T. J. Tarn, A. K. Bejczy and X. Yun, "Design of dynamic control of two cooperating robot arms : Closed chain formulation", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp. 7-13, 1987