

<논 문> SAE NO. 943769

형상 공간을 이용한 다관절 로봇의 충돌 회피 경로 계획

Collision-Free Path Planning of Articulated Robot using Configuration Space

김 정 훈,* 최 진 섭,** 강 희 용,** 김 동 원,** 양 성 모**
J. H. Kim, J. S. Choi, H. Y. Kang, D. W. Kim, S. M. Yang

ABSTRACT

A collision-free path planning algorithm between an articulated robot and polyhedral obstacles using configuration space is presented. In configuration space, a robot is treated as a point and obstacles are treated as grown forbidden regions. Hence path planning problem is transformed into moving a point from start position to goal position without entering forbidden regions. For mapping to 3D joint space, slice projection method is used for first revolute joint and inverse kinematics is used for second and third revolute joint considering kinematic characteristics of industrial robot. Also, three projected 2D joint spaces are used in search of collision-free path. A proper example is provided to illustrate the proposed algorithm.

주요기술용어 : Articulated Robot(다관절 로봇), Collision Avoidance(충돌 회피), Motion Planning(경로 계획), Configuration Space(형상 공간)

1. 서 론

로봇의 작업데이터를 생성하는 방법에는 teach pendant 등을 이용하여 로봇을 직접 보면서 온-라인(on-line)으로 교시(teaching)하는 방법과, 컴퓨터를 이용하여 작업데이터를 미리 생성한 후 로봇 컨트롤러에 전송하는 오프-라인(off-line)에 의한 방법이 있다. 오프-라인 프로그래밍을 위해서 해결해야 할 문제중의 하나는

효율적인 경로계획(path planning)을 하는 것이다. 특히 장애물과의 충돌을 미리 검색하여 안전한 경로를 생성하는 것은 중요한 문제이다.

충돌 회피를 위한 기존의 방법들에는 크게 시계 그래프(visibility graph)와 같이 경로를 추적하는 방법, 자유공간(free space)을 효율적으로 분할(cell decomposition)하여 이용하는 방법 그리고 위치장(potential field)을 이용한 방법이 있다. 시계 그래프에 의한 방법은 초기점, 목표점 및

* 현대자동차(주) 상용차연구부
** 전북대학교

다각형으로 표현된 모든 장애물의 꼭지점들중 서로 가리지 않고 보일 수 있는 두점을 연결시킨 선분들을 정의하고, 초기점에서 출발하여 이 선분들을 경유하여 목표점에 도달할 수 있는 모든 경로중 가장 짧은 경로를 선택하는 것이다.¹⁾ 자유 공간이란 로봇의 작업 영역(reachable workspace)에서 장애물이 점유하고 있는 공간을 제외한 공간을 의미한다. 자유 공간을 3각형 격자로 분할하여 해를 구한 경우도 있으나, 대부분 4각형 격자를 이용하여,^{1, 2, 3)} 초기점을 포함하는 격자로부터 목표점을 포함하는 격자까지 경로를 구한다. 위치장에 의한 방법은 장애물 주위에는 반력 위치장을 형성시키고 목표지점 주위에는 인력위치장을 형성시킨후 위치 별로 등위선을 생성하고 초기점에서 위치값이 낮은 쪽으로 목적점까지 탐색해 가는 방법이다. 이와같은 충돌 회피 방법들은 로봇을 면적 또는 부피가 없는 점으로 가정한 경우가 많으며, 실제 로봇의 형상을 고려한 경우에는 보완이 요구된다. 이 문제를 해결하기 위한 효과적인 방법은 형상 공간(configuration space)을 이용하는 것이다. 어떤 물체의 형상(configuration)이란 그 물체의 위치 및 방향을 정확하게 표현할 수 있는 변수들을 말하며, 형상 공간이란 형상들이 점유할 수 있는 모든 공간을 말한다.⁴⁾ 일정한 형상을 갖는 로봇의 충돌 회피를 위하여 Lozano-Pérez는 로봇을 점으로 가정하고 대신 장애물의 크기를 확장시킨 형상 공간을 이용하였다.¹⁾

이상과 같은 기존의 연구들은 주로 관절이 없이 움직이는 로봇(moving robot)를 대상으로 하였으나 최근에는 움직이는 장애물(moving obstacle)이 있는 경우의 충돌 회피, 두대 이상의 로봇(multiple robots)를 위한 충돌 회피, 다관절 로봇(articulated robot)를 위한 충돌 회피에 관한 연구들이 행해지고 있다.⁴⁾ 특히 다관절 로봇은 실제 산업 현장에서 많이 이용되고 있기 때문에, 다관절 로봇을 위한 안전한 경로 계획에 대한 연구가 더욱 요구되고 있다. 산업용 다관절 로봇은 로봇이 도달할 수 있는 거리와 관계되는 영역 구조(regional structure, 1, 2, 3축)와 엔드 이펙터의 방향과 관계되는 방향 구조(orientation structure, 4, 5축 또는 4, 5, 6축)로 나뉘어 진다. 충돌 문제는 1차적으로 영역 구조와

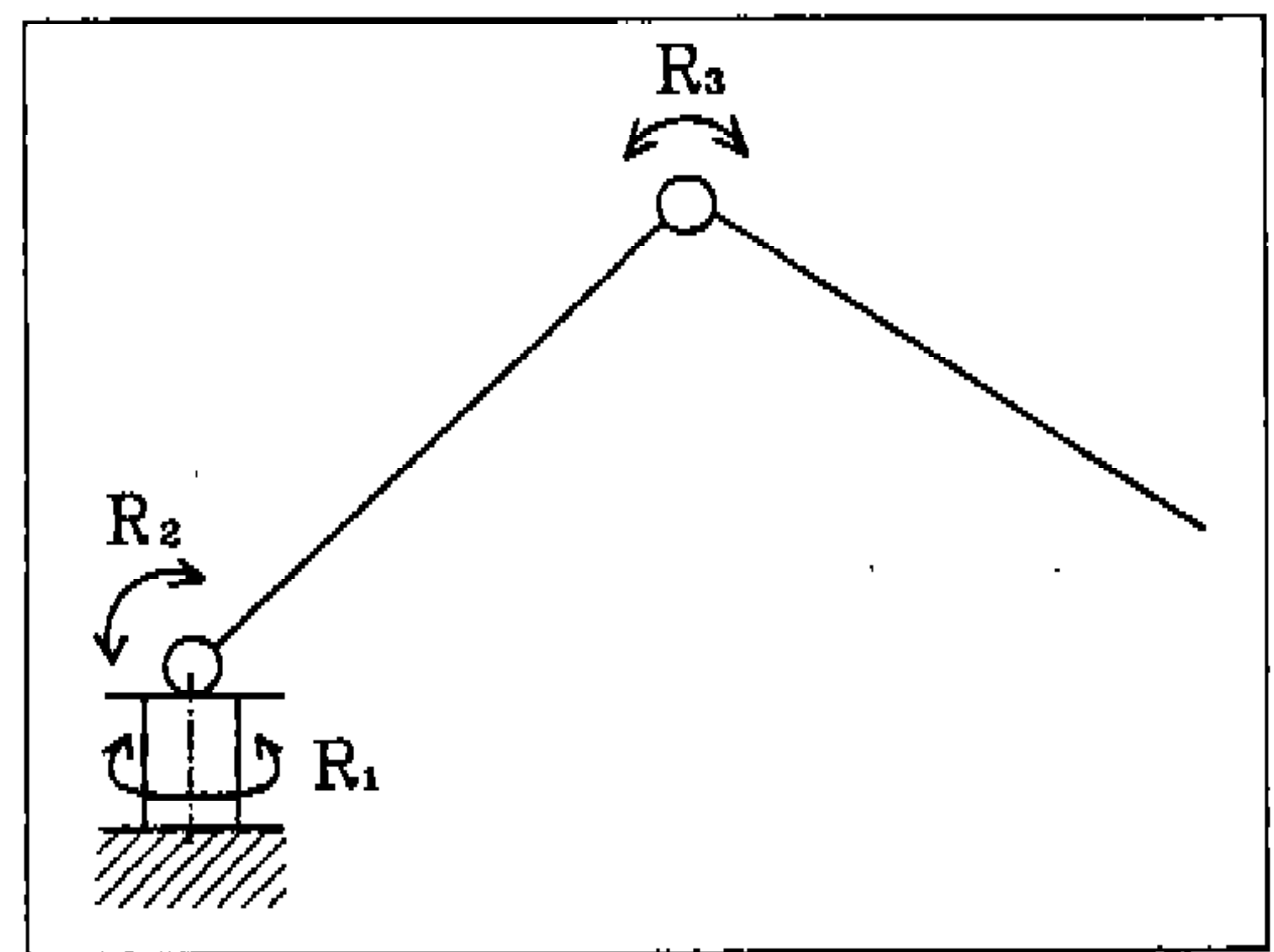


Fig.1 Regional structure of an industrial articulated robot.

Table 1 Comparison of existent literature on collision-free path planning.

Collision Free Path Planning Mapping to Configuration space	Visibility Graph	Cell Decomposition	Potential Field
No Mapping (Point Robot)	Rao (6)	Warren (7) Kant (8) Paden (9)	
Cartesian Space	Lozano (10)	Lozano (1) Ilari (11) Brook (3)	
Joint Space		Lozano (2) Faverjon (12)	Warren (5)

관계되며 대부분의 영역 구조는 Fig.1과 같이 3개의 회전축(revolute joint) R_1, R_2, R_3 가 R_1 과 R_2 는 수직이고 R_2 와 R_3 는 평행인 관계를 유지하고 있다. 관절이 있는 로봇의 충돌 회피를 하는 방법은 관절 영역(joint space)을 형상 공간으로 이용하는 것이다. 관절 영역은 로봇의 위치 및 형상을 정확하게 표현할 수 있기 때문에 형상 공간으로 이용될 수 있다. 즉 관절 영역에서 로봇은 한개의 점으로 표현되고 장애물들은 관절 영역으로의 변형된 장애물들로 표현된다. 일단 관절 영역에서 로봇 및 장애물이 표현되면 충돌 회피를 위한 경로를 기존의 시계 그래프, 자유 영역 또는 위치장 등의 방법을 이용하여 생성한다. Table 1에 기존의 충돌 회피에 관한 연구가 비교되어 있다.

장애물을 로봇의 관절 영역으로 표현하는 방법에는 슬라이스 투영(slice projection)방법과 역기구학(inverse kinematics) 방법이 있다. 슬라이스 투영에 의한 방법이란 n 개의 관절을 가진 로봇에 필요한 n 차원 형상 공간을 $n-1$ 차원 슬라이스 투영들의 결합으로 표현하는 방법이다. Lozano-Pérez는 다관절 로봇의 영역구조의 충돌 회피를 위하여 슬라이스 투영 방법을 이용하여 관절 공간으로 표현한후 충돌 회피를 위한 경로 생성을 하였다.²⁾ 슬라이스 투영 방법은 간단하나 많은 계산시간과 기억용량을 필요로 하는 단점이 있다.³⁾ 관절 공간으로 변환시키는 또 하나의 방법은 장애물과 로봇이 접촉이 일어날 수 있는 모든 가능성을 로봇의 역기구학식을 이용하여 파악하는 것이다. Warren은 서로 평행한 2개의

회전축을 갖는 로봇의 충돌 회피를 위하여, 로봇의 링크의 꼭지점이 장애물의 외곽선과 만나는 경우와 로봇의 링크의 외곽선이 장애물의 꼭지점과 만나는 경우로 분류하여 역기구학을 이용하여 관절 공간으로 변환하였다.⁴⁾ 역기구학에 의한 방법은 계산 시간이 단축되고 장애물과 접촉하는 관절각을 정확히 구할 수가 있으나 자유도의 증가에 따른 형상 공간값을 검색하기가 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 정지계에 놓여있는 산업용 다관절 로봇을 위한 효과적인 충돌 회피방법을 제안하고, 시뮬레이션 해 보고자 한다. R_2 와 R_3 만을 고려할 경우 로봇은 평면운동을 하게 되며 슬라이스 투영 방법 및 역기구학 방법을 모두 이용할 수 있겠으나, 계산시간을 단축하고 정확한 해를 구하기 위하여 역기구학 방법을 이용하기로 한다. 한편 R_1 까지 고려할 경우 로봇은 공간운동을 하게 되며, 3차원 장애물의 모든 표면(boundary)에 관하여 역기구학해를 구하는 작업은 쉬운일이 아니다. 따라서 R_1 에 대해서는 알고리즘이 단순한 슬라이스 투영 방법을 적용하기로 한다. 우선 2장에서는 서로 평행한 2개의 회전축을 갖는 로봇의 충돌 회피를 위한 경로 계획에 관하여 서술하였으며, 이를 바탕으로 3장에서는 3개의 회전축을 갖는 산업용 다관절 로봇의 충돌 회피를 위한 경로계획에 관하여 서술하였다. Table 2에 본 연구와 Lozano-Pérez의 연구²⁾ 및 Warren의 연구⁵⁾와의 비교가 정리되어 있다.

Table 2 Comparison of this research with existent literature

	This Research	Lozano(2)	Warren(5)
Joints	R_1, R_2, R_3 ($R_1 \perp R_2$), ($R_2 // R_3$)	R_1, R_2, R_3 ($R_1 \perp R_2$), ($R_2 // R_3$)	R_1, R_2 ($R_1 // R_2$)
Mapping Algorithm to Configuration Space	R_1 : Slice Projection R_2, R_3 : Inverse Kinematics	Slice Projection	Inverse Kinematics
Path Planning Algorithm for Collision avoidance	Visibility Graph	Free Space	Potential Field

2. 2차원 작업 영역에서의 충돌 회피

Warren은 로봇의 링크를 두께가 없는 선으로 가정하고 대신 장애물의 크기를 증가시키는 방법을 이용하였으나⁵⁾, 본 연구에서는 정확한 형상 공간으로의 변환을 위하여 로봇의 두께가 있는 경우의 역기구학식을 유도하였다. 로봇과 장애물이 접촉하는 경우를 다음과 같이 4가지 경우로 분류하여 각각에 대하여 역기구학식을 적용하였다. 각각의 경우 장애물을 허용오차만큼 외부로 오프셋(offset)을 시킨뒤 관절 공간으로 변환시키면 안전한 충돌 회피 경로를 생성할 수 있다.

경우 (a). 링크 2의 상단 꼭지점과 장애물의 외곽선이 접촉하는 경우(Fig.2).
접촉점의 좌표값을 (x, y) , 링크 2의 길이를 l_2 , 링크 두께를 t 라 할 때 다음이 성립한다.

$$\phi = \text{Atan2}(t/2, l_2), \quad l_2' = \sqrt{l_2^2 + (t/2)^2}$$

$$\cos q_2' = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2'^2}{2l_1 l_2'}$$

위 식으로부터 4개의 관절각의 해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_1 = l_1 + l_2 \cos q_2', \quad K_2 = l_2 \sin q_2'$$

$$q_1 = \text{Atan2}(y, x) \pm \text{Atan2}(K_2, K_1)$$

$$q_2 = q_2' \pm \phi$$

경우 (b). 링크 2의 양쪽 외곽선과 장애물의 꼭지점이 접촉하는 경우(Fig.3).

$$l_2' = \sqrt{d + t/2}, \quad \phi = \text{Atan2}(t/2, d)$$

를 경우 (a)에 적용시켜 해를 구할 수 있다.

경우 (c). 링크 1의 상단 꼭지점과 장애물의 외곽선이 접촉하는 경우(Fig.4).

$q_1' = \text{Atan2}(y, x)$, $\phi = \text{Atan2}(t/2, l_1)$ 에 의해 $q_1 = q_1' \pm \phi$ 로 되고 이때의 모든 q_2 값은 금지 구역으로 된다.

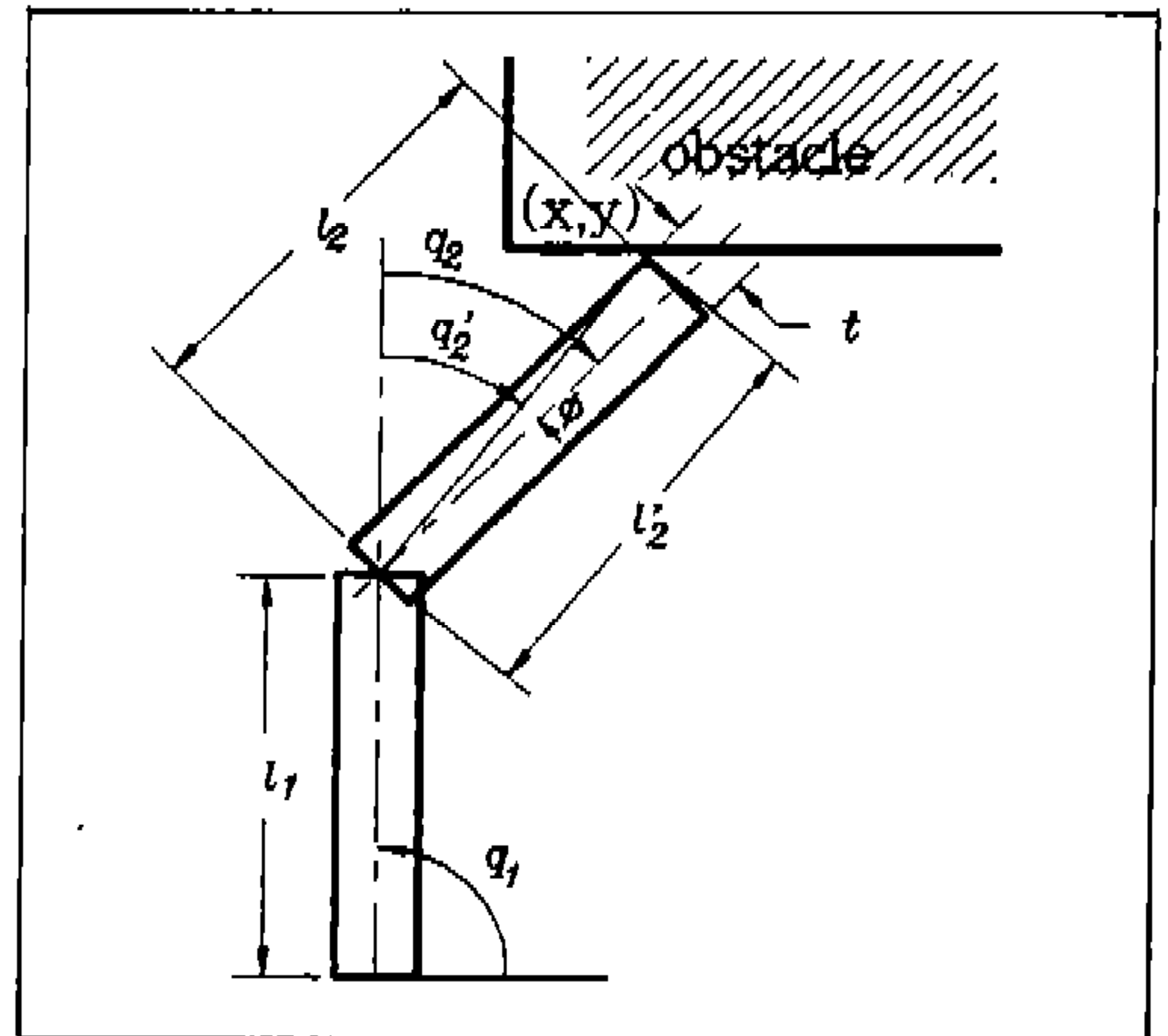


Fig.2 A vertex of link 2 contacts an edge of obstacle.

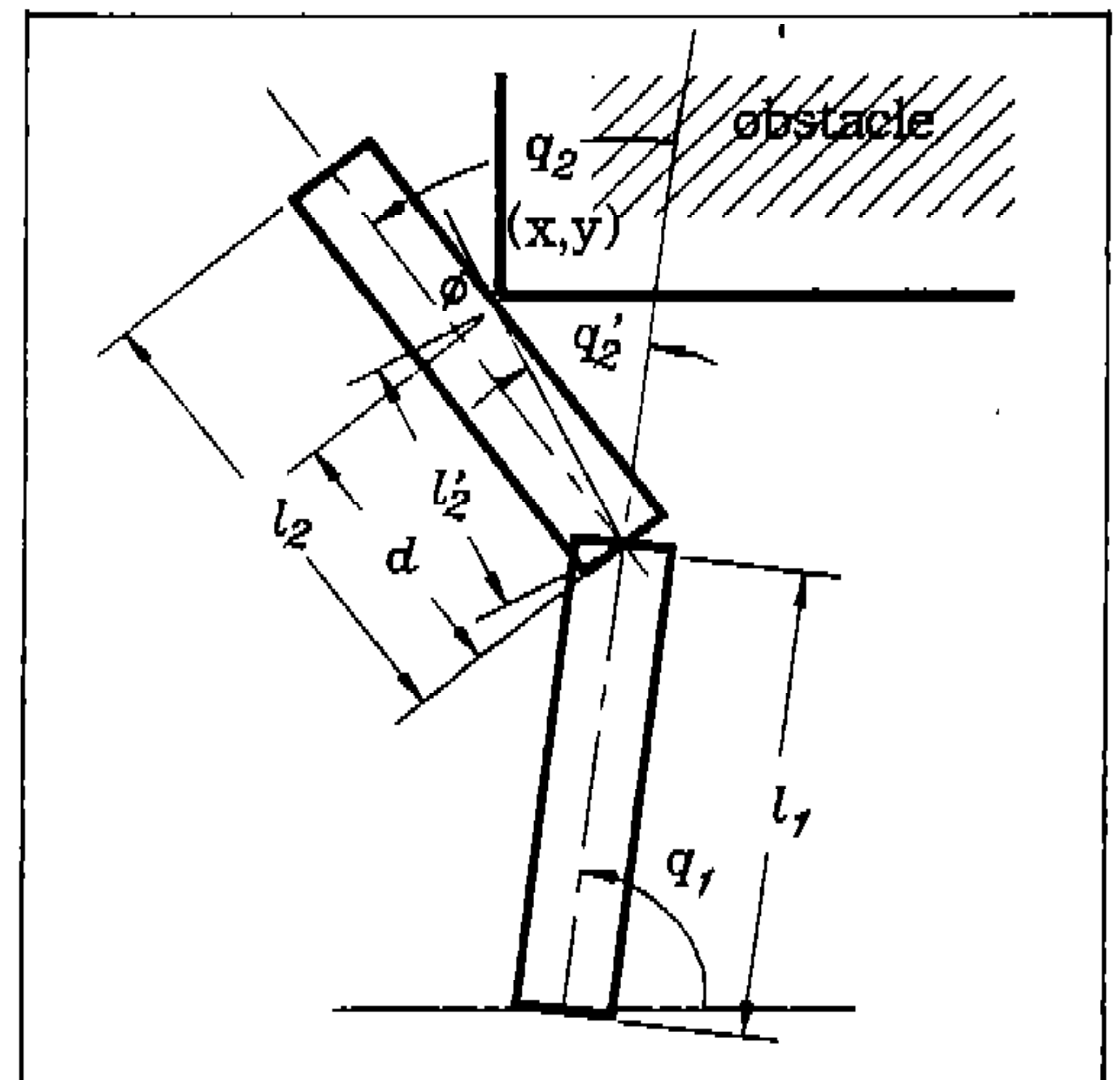


Fig.3 An edge of link 2 contacts a vertex of obstacle.

경우 (d). 링크 1의 양쪽 외곽선과 장애물의 꼭지점이 접촉하는 경우(Fig.5).

$$q_1' = \text{Atan2}(y, x), \quad \phi = \sin^{-1}\left(\frac{t}{2\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

에 의해 $q_1 = q_1' \pm \phi$ 로 되고 이때의 모든 q_2 값은 금지 구역으로 된다.

3. 2차원 작업영역에서의 시뮬레이션

Fig.6과 같이 장애물이 산재되어 있는 2차원 작업장을 예로 하여 경로 계획을 하여 보았다. 로봇 각 관절의 관절 범위는 -180° 에서 180° 로

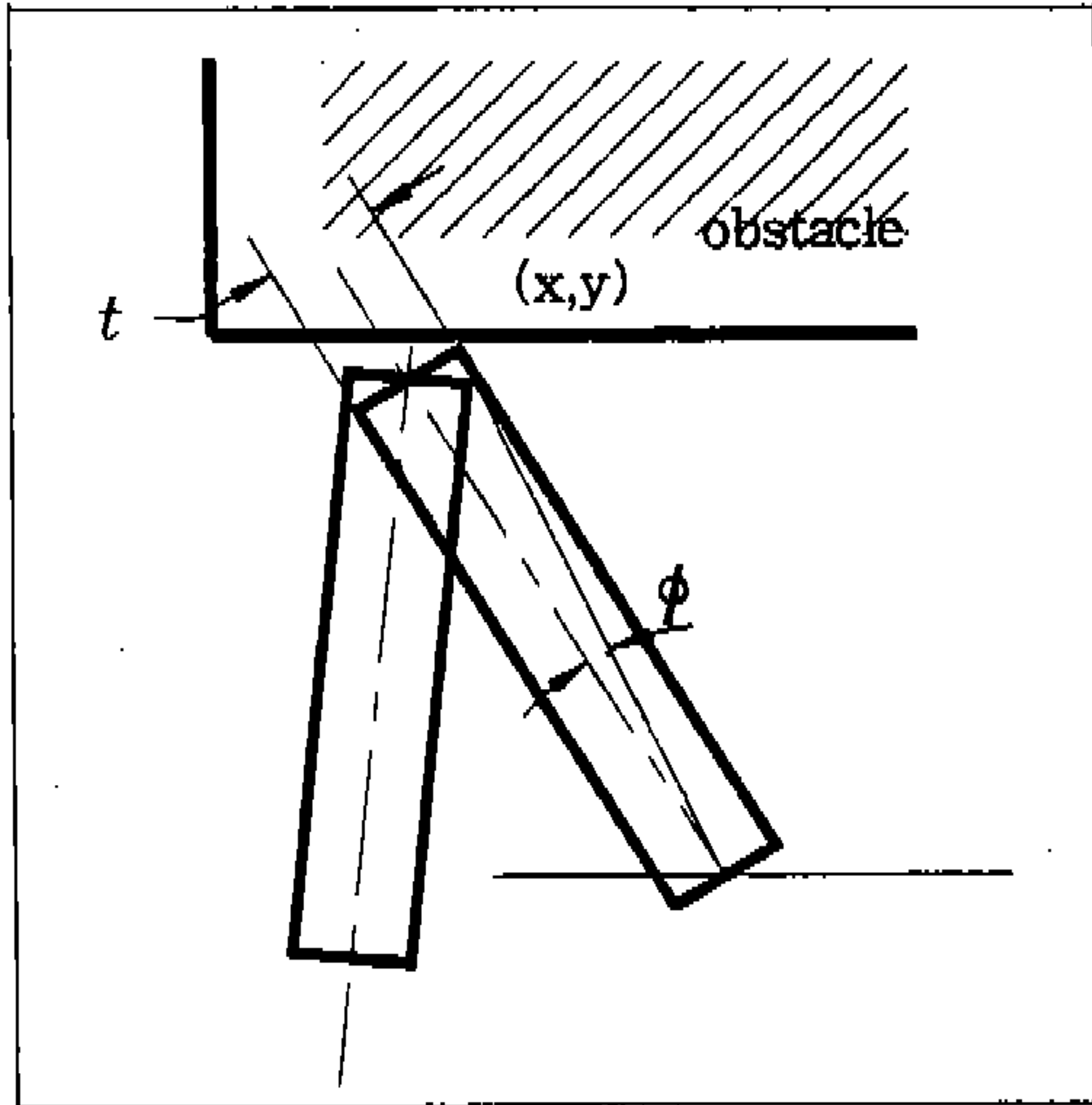


Fig.4 A vertex of link 1 contacts an edge of obstacle.

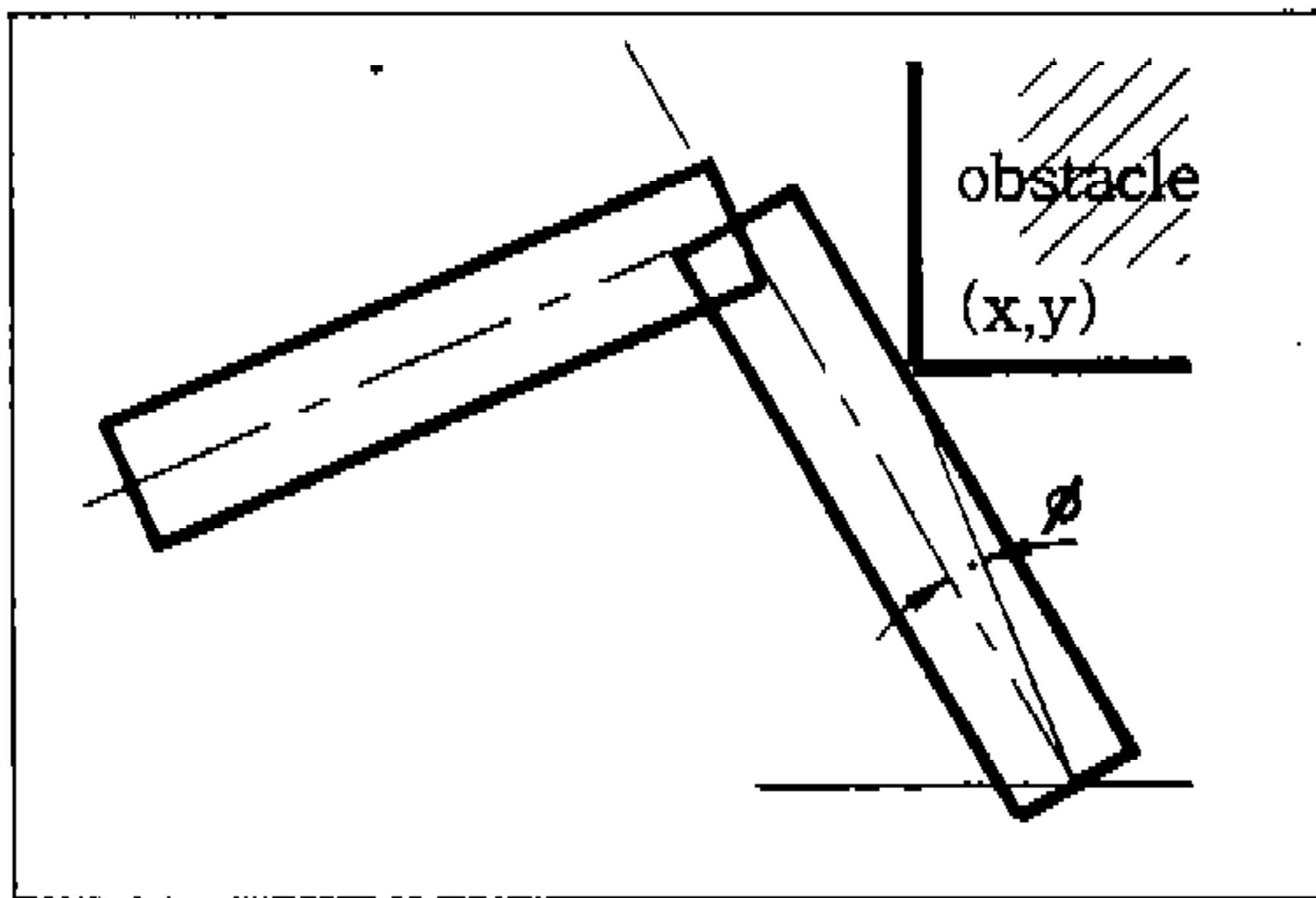


Fig.5 An edge of link 1 contacts a vertex of obstacle.

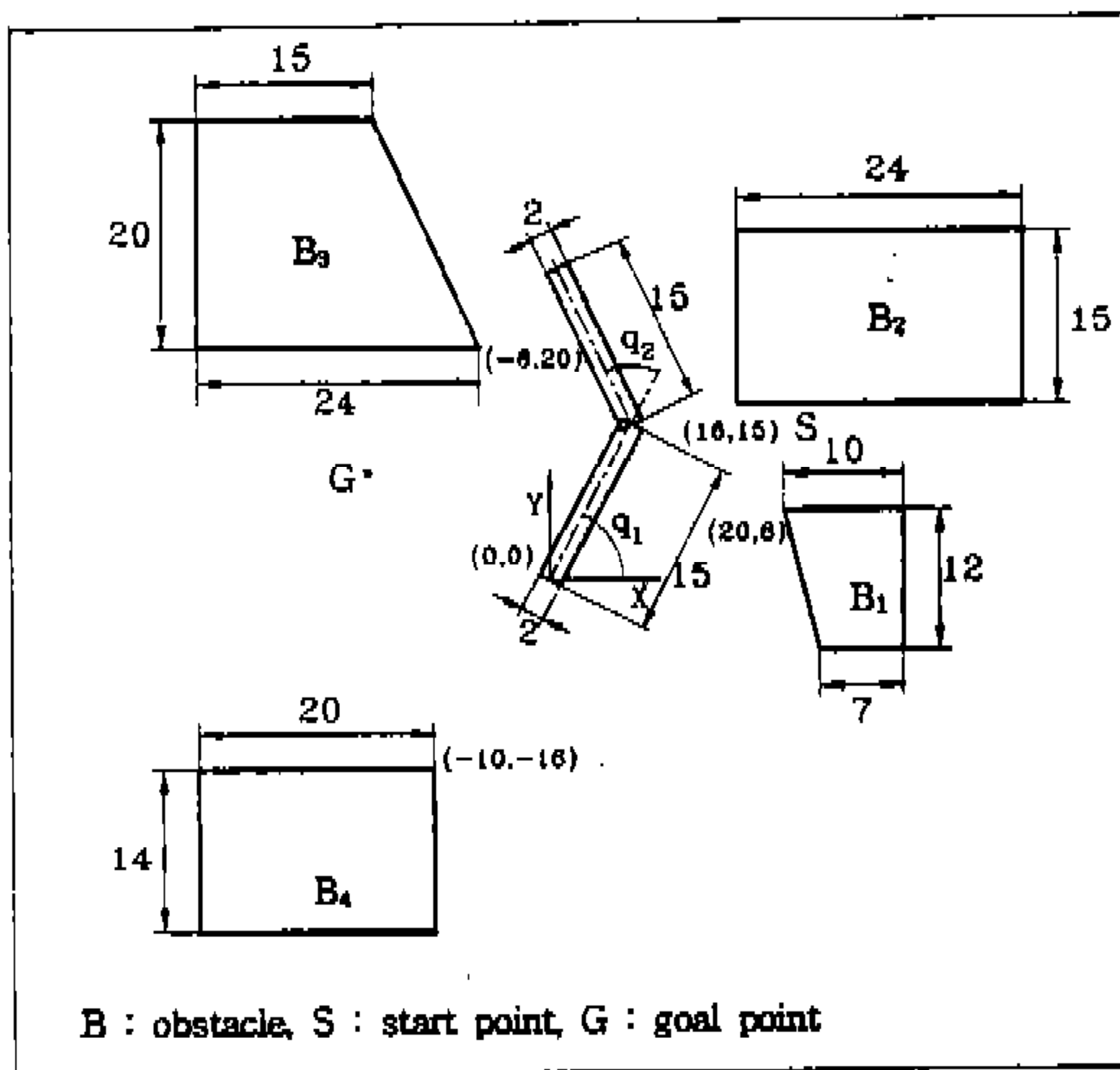


Fig.6 An example of two-dimensional work-space.

하였다. 작업 시작 위치(S)의 관절값은 $\theta_1=57^\circ$, $\theta_2=-68^\circ$ 이고, 작업 목표 위치(G)의 관절값은 $\theta_1=105^\circ$, $\theta_2=80^\circ$ 이다. Fig.7은 2장의 알고리즘을 이용하여 관절 공간으로 변환된 장애물을 보여 주고 있다. 관절 공간으로 변환됨으로써 로봇의 시작점 및 목표점에서의 형상은 한점으로 축소되었다. 충돌 회피 경로는 시계 그래프 방법을 이용하여 생성되었다. Fig.8은 이 관절 공간에서의 경로를 작업 공간(task space)에서 시뮬레이션한 결과이다.

4. 3차원 작업영역에서의 충돌 회피

공간 상에 장애물들이 산재해 있을 경우 Fig.1과 같은 산업용 다관절 로봇을 위한 충돌 회피 알고리즘을 작성하면 다음과 같다. 첫번째 관절(joint 1)에 대하여 Fig.9와 같이 슬라이스 투영 방법을 적용하기 위하여 -180° 에서 180° 까지 일정한 간격으로 움직이면서 Slices 함수를 이용하여 장애물 단면(slicedObstacles)을 계산한다. 장애물을 Z방향으로 두께가 일정한 각기둥(prism)으로 가정할 경우에 장애물 단면을 계산하는 문제는, 기울기가 joint 1인 직선과 각기둥의 단면인 다각형과의 교점을 계산하는 문제로 귀결된다. 장애물 단면이 구해지면 2장의 알고리즘을 적용한 Inverse Kinematics 함수를 이용하여 2차원 관절 영역에서의 장애물(Cspace_of_23)을 계산하고, 이 작업을 joint 1에 대하여 -180° 에서 180° 까지 수행하여 3차원 관절 영역에서의 장애물(Cspace_of_123)을 계산한다.

이상의 방법에 의해 얻은 3차원 형상 공간을 이용하여 직접 경로를 생성하기에는 어려움이 있어 Projection 함수를 이용하여 각각의 관절축을 기준으로 하여 q_2-q_3 평면, q_1-q_3 평면, q_1-q_2 평면에 대해 투영을 하여 3개의 2차원 형상 공간(project_12, project_23, project_13)으로 나타내었다. 만일 3차원 공간상에 존재하는 한점 및 물체를 각각 3개의 직교 좌표축에 대해 투영시켜, 이때 얻은 세개의 2차원 평면중 어느 한 평면에서라도 그 점이 물체의 영역 밖에 있다면 그 점은 3차원 공간상에서 물체의 밖에 존재한다. 이와 비슷하게

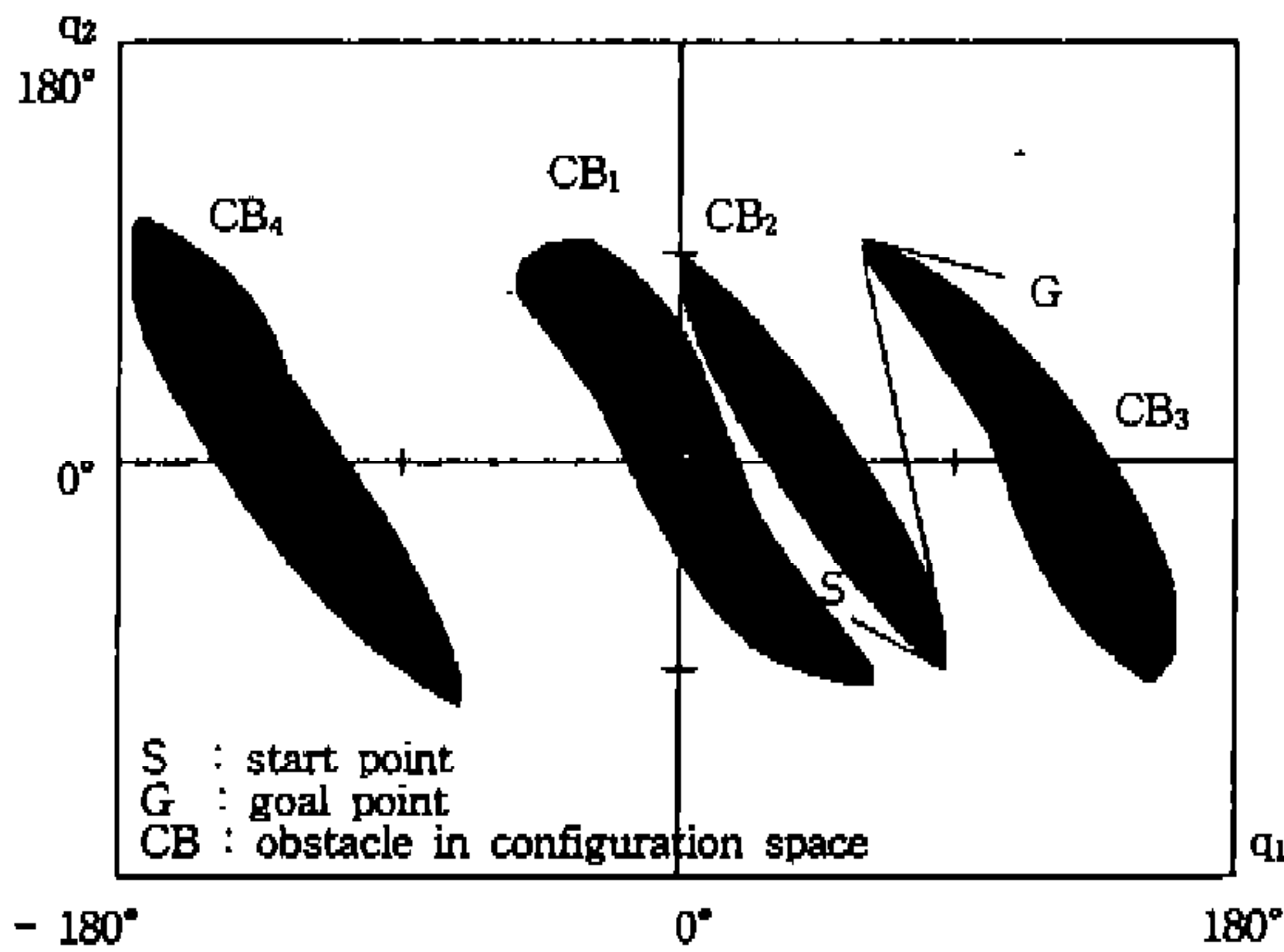


Fig.7 Configuration space of two-dimensional joint space.

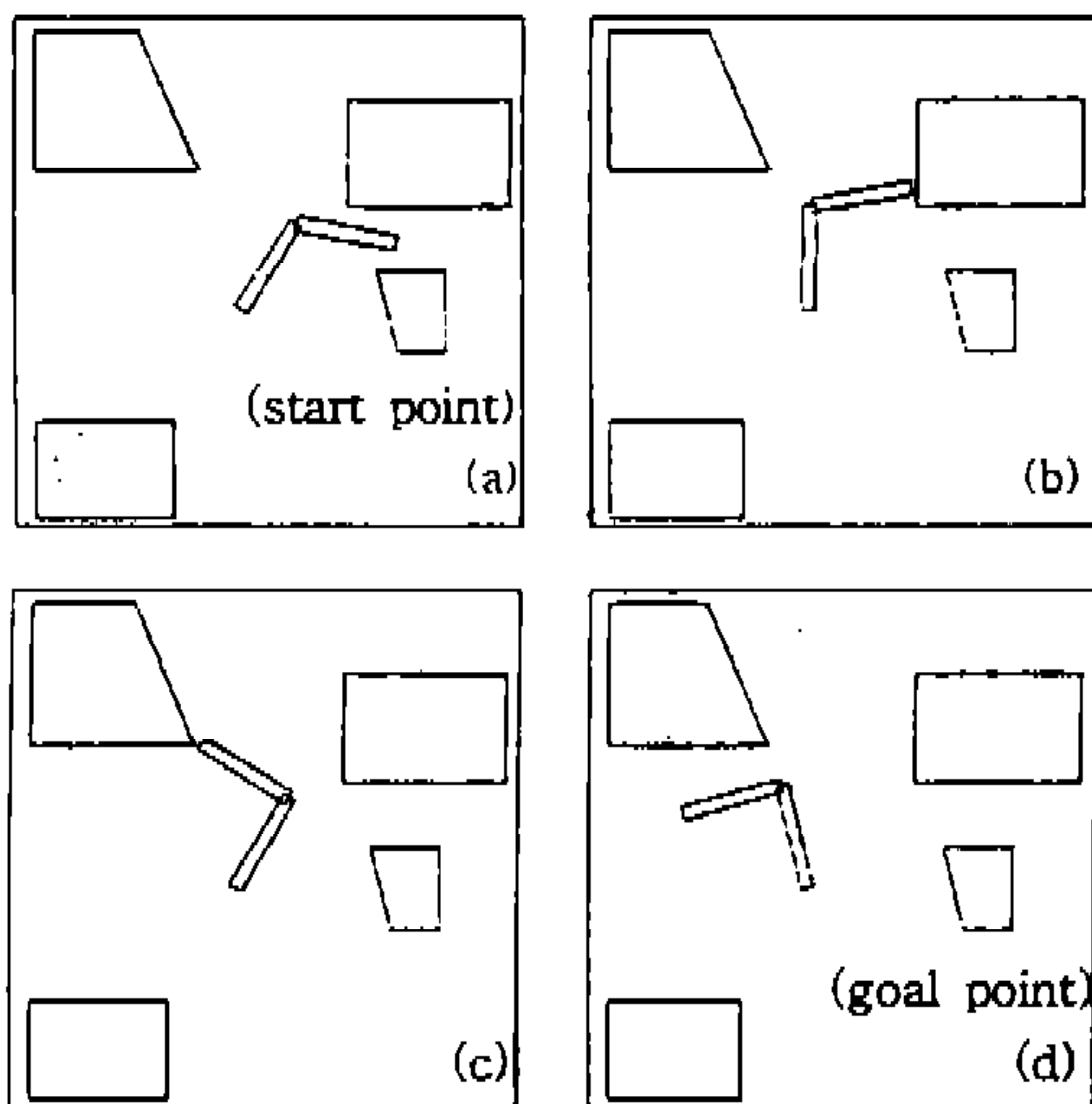


Fig.8 Collision-free path of two-dimensional task space.

3차원 관절 공간에서 계획된 어느 로봇 운동 경로를 투영하여 얻은 세계의 2차원 형상 공간중, 한 단면에서라도 장애물 밖에 있다면 이 경로는 안전한 경로이다. 따라서 Check_Collision_Free 함수를 이용하여 각각의 2차원 형상공간에서 안전한 경로가 존재하는가를 확인하고, Path_Planning 함수를 이용하여 3차원 충돌 회피 경로(collision_free_path)를 생성한다. 만일 어느 한 단면에서도 안전한 경로가 없는 경우라도 3차원상에서 안전한 충돌 회피 경로가 존재할 수 있으며, 이를 검색하기 위해서는 부가적인 알고리즘이 요구된다. 이상의 알고리즘을 파스칼언어를 기본으로

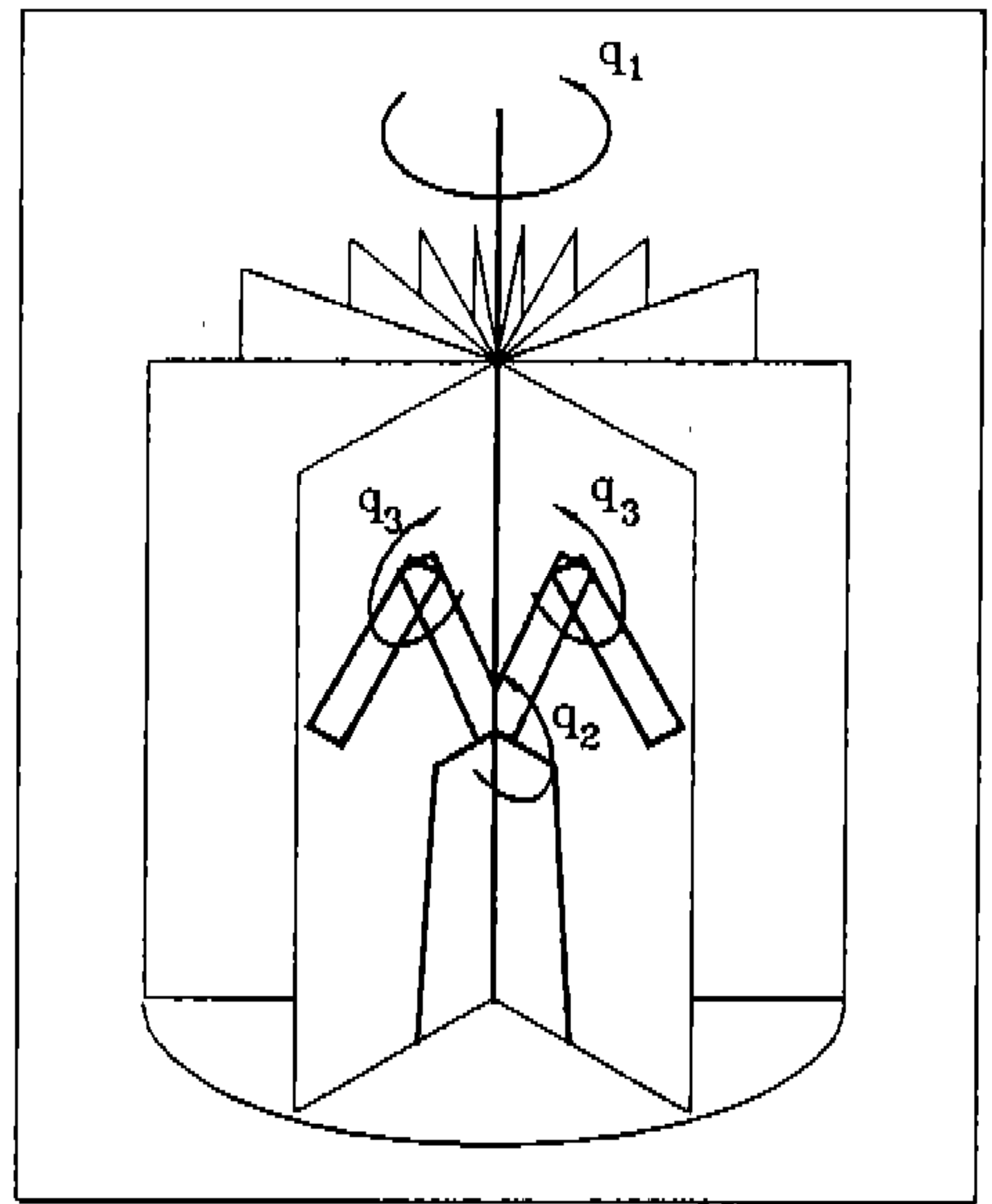


Fig.9 Slice projection about joint 1.

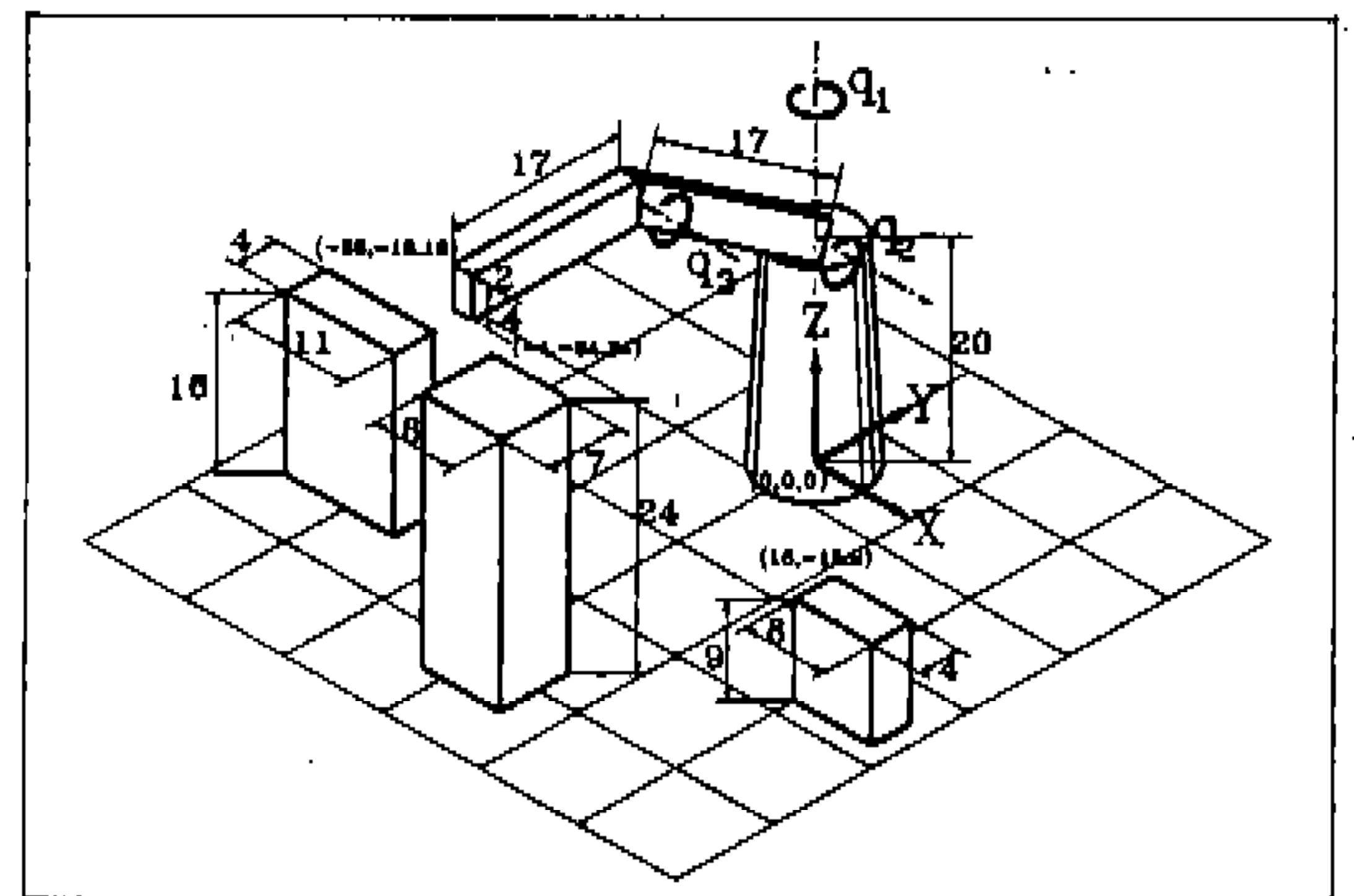


Fig.10 An example of an articulated robot workspace

하여 서술하면 다음과 같다.

PROCEDURE

Collision_Free_Path_Planning_for_Articulated_Robot
(robot, obstacles; VAR collision_free_path)

BEGIN

FOR joint1 := -180 TO 180 DO

BEGIN

Slices (joint1,robot,obstacles; VAR sliced_obstacles);

Inverse_Kinematics (robot,sliced_obstacles;
VAR Cspace_of_23);

END;

Make_Cspace (Cspace_of_23; VAR Cspace_of_123);

```

Projection (Cspace_of_123;
           VAR project_12, project_23, project_13);
Check_Collision_Free(project_12,project_23,project_13;
                    VAR f_12, f_23, f_13);
IF ( (f_12 OR f_23 OR f_13) = True ) THEN
  Path_Planning (project_12, project_23, project_13;
                VAR collision_free_path);
ELSE
  { Check using more complex algorithm }
END
    
```

5. 3차원 작업영역에서의 시뮬레이션

Fig.10은 3차원 로봇 작업장의 예이다. 작업 시작 위치($\theta_1 = -160^\circ, \theta_2 = 10^\circ, \theta_3 = -40^\circ$)에서 작업 목표 위치($\theta_1 = -65^\circ, \theta_2 = 0^\circ, \theta_3 = -70^\circ$)까지 장애물 충돌 회피 경로를 시뮬레이션 하였다. 안전한 충돌 회피를 위하여 장애물들을 외부로 3mm만큼씩 오프셋하여 계산하였다. 그리고 관절 1의 중심축을 기준으로 하여 -180° 에서 $+180^\circ$ 까지를 1° 간격으로 슬라이스 시켰다. Fig.11~Fig.13은 3차원 형상 공간을 각각의 관절축에 대해 투영을 하여 얻은 3개의 2차원 형상 공간이다.

세개의 투영평면중 q_2-q_3 평면에는 목표점이 장애물에 포함되어 있으므로, q_1-q_2 평면에서 시계 그래프 방법에 의해 경로를 생성하였다. 이때의 q_3 값들을 결정하기 위해서는 q_1-q_3 평면 또는 q_2-q_3 평면을 이용한다. q_1-q_2 평면에서의 경로가 q_1 축을 따라 경로의 방향이 변하지 않으므로 Fig.15와 같이 q_1-q_3 평면에서 초기점과 목표점 사이를 직선 보간한다. Fig.16은 시작점, 목표점 및 경로상의 중간점들에서의 로봇의 형상을 시뮬레이션한 결과이다. 세번째 관절의 운동은 첫번째 관절의 운동에 비례하고 두번째 관절의 운동은 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

산업용 다관절 로봇을 위한 효과적인 충돌 회피 경로 생성을 위하여 관절 공간을 이용하였다. 특히 3차원 관절 공간으로의 변환을 위하여 산업용 다관절 로봇의 기구학적 특성을 고려

하였다. 즉 첫번째 관절에 대해서는 알고리즘이 간단한 슬라이스 투영방법을 이용하였고 두번째, 세번째 관절에 대해서는 정확한 해를 구하고 계산시간을 단축하기 위하여 역기구학 방법을 이용하였다.

또한 생성된 3차원 관절 공간으로부터 충돌 회피 경로를 생성하기 위해서는, 관절 공간 상의 장애물을 각각 세개의 관절축에 투영하는 방법을 이용하였다. 각각의 관절축에 투영함으로써 3차원 경로 생성 문제를 2차원 경로 생성 문제로 간략화 할 수 있었다.

그러나 어느 한 투영면에서도 안전한 경로가 존재하지 않는 경우에도, 공간상에서 충돌 회피 경로가 존재할 수 있으며, 이를 정확히 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 더 나아가서는 3차원 관절 공간으로부터 직접 충돌 회피 경로를 생성하는 방안도 검토하여야 한다.

본 연구에서는 다관절 로봇의 몸체 부분의 충돌만을 고려하였으나, 로봇의 손목부분의 자유도를 고려한 엔드 이펙터의 충돌 문제도 함께 고려되어야 한다. 아울러 안전한 충돌 회피 경로만이 본 연구에서 계획되었으나 향후 최소 시간, 최소 거리 또는 최소 에너지를 만족시킬 수 있는 경로 계획이 요구된다.

참 고 문 헌

1. T. Lozano-Pérez, "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movement", *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-11, no.10, Oct, 1981.
2. T. Lozano-Pérez, "A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, no.3, June 1987.
3. R.A. Brooks and T. Lozano-Pérez, "A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation", *IEEE Transactions of System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-15, no. 2, 1985.
4. J.C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer

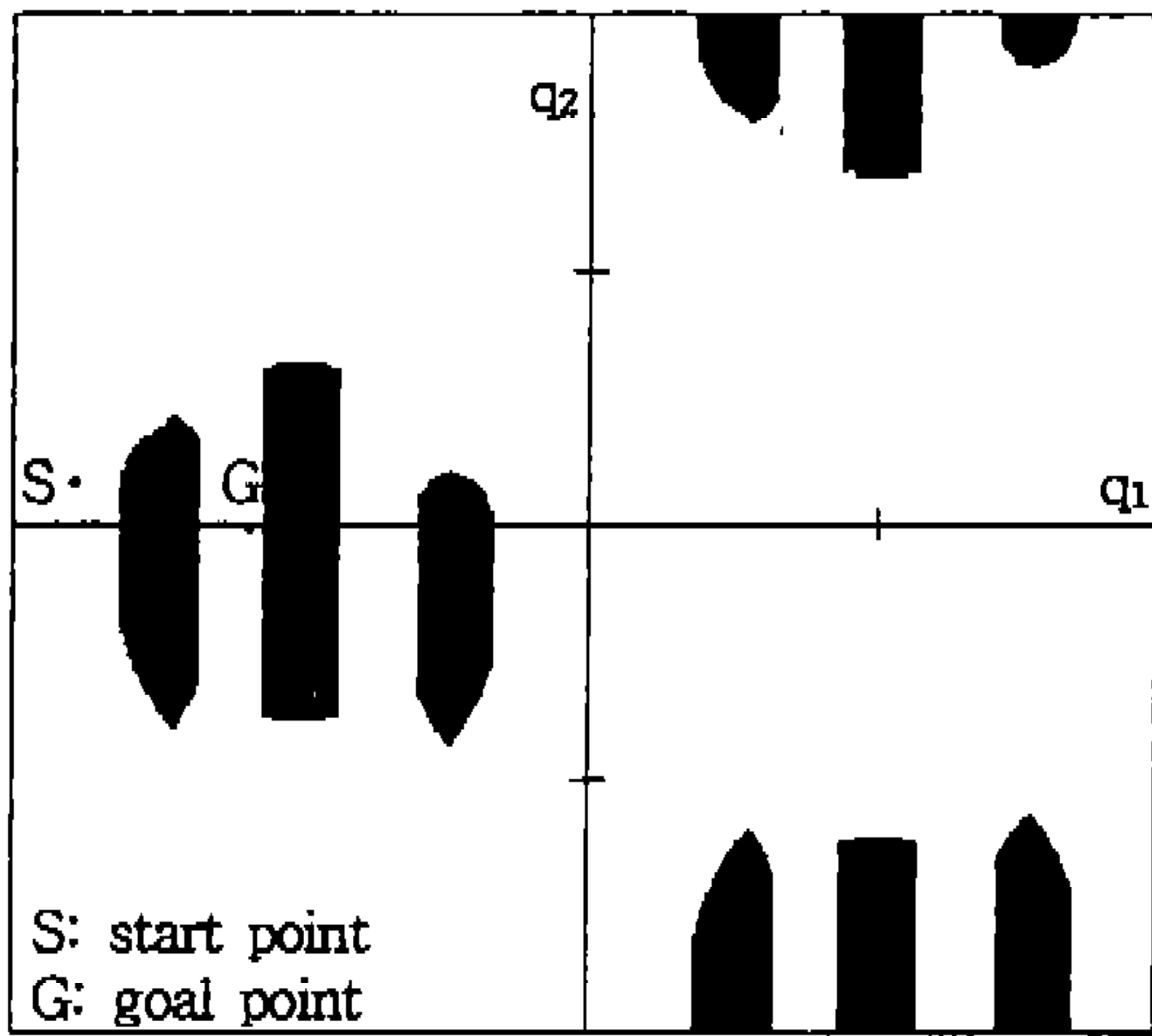


Fig. 11 q_1-q_2 projection plane.

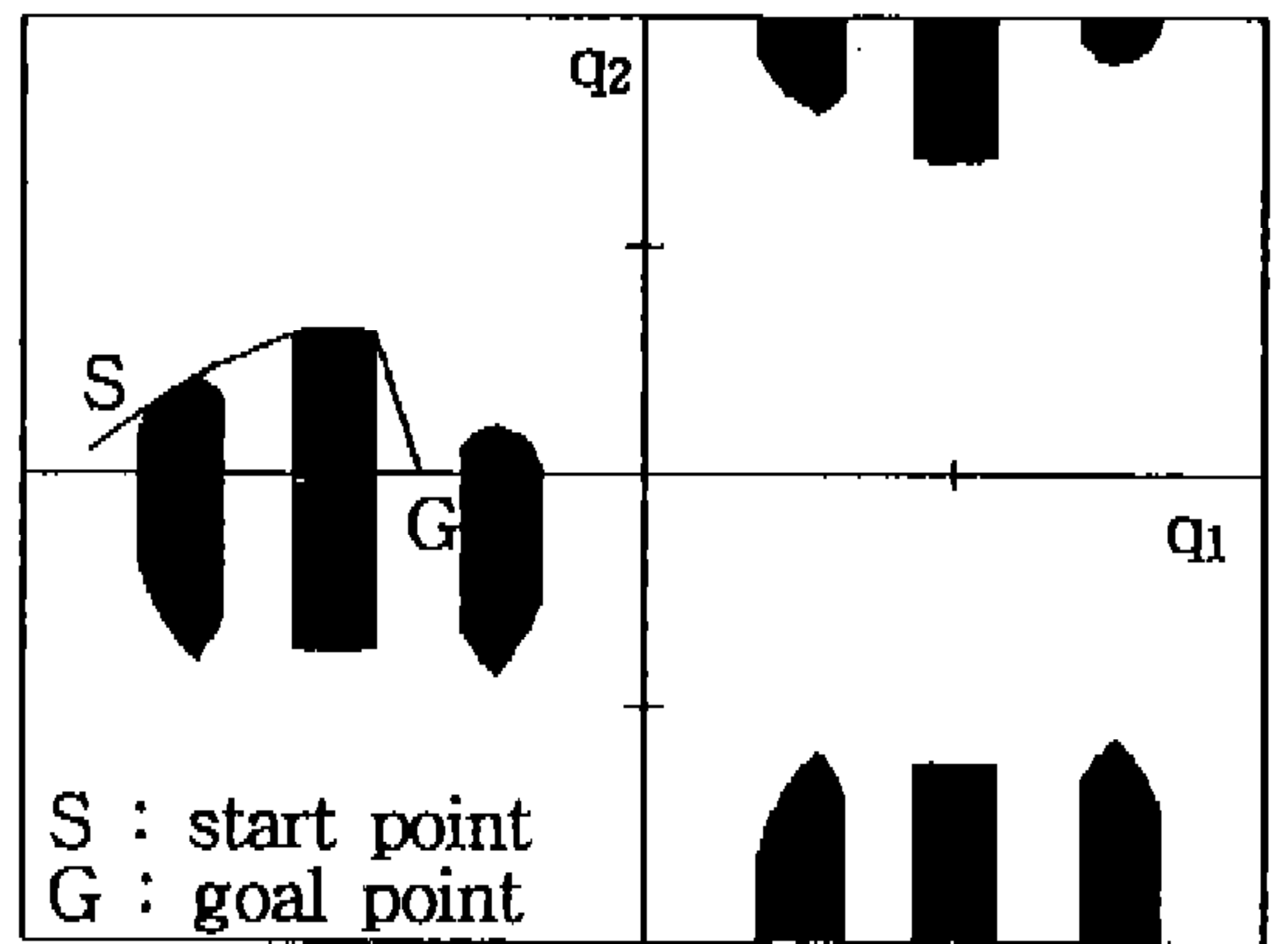


Fig. 14 Path planning in q_1-q_2 projection plane.

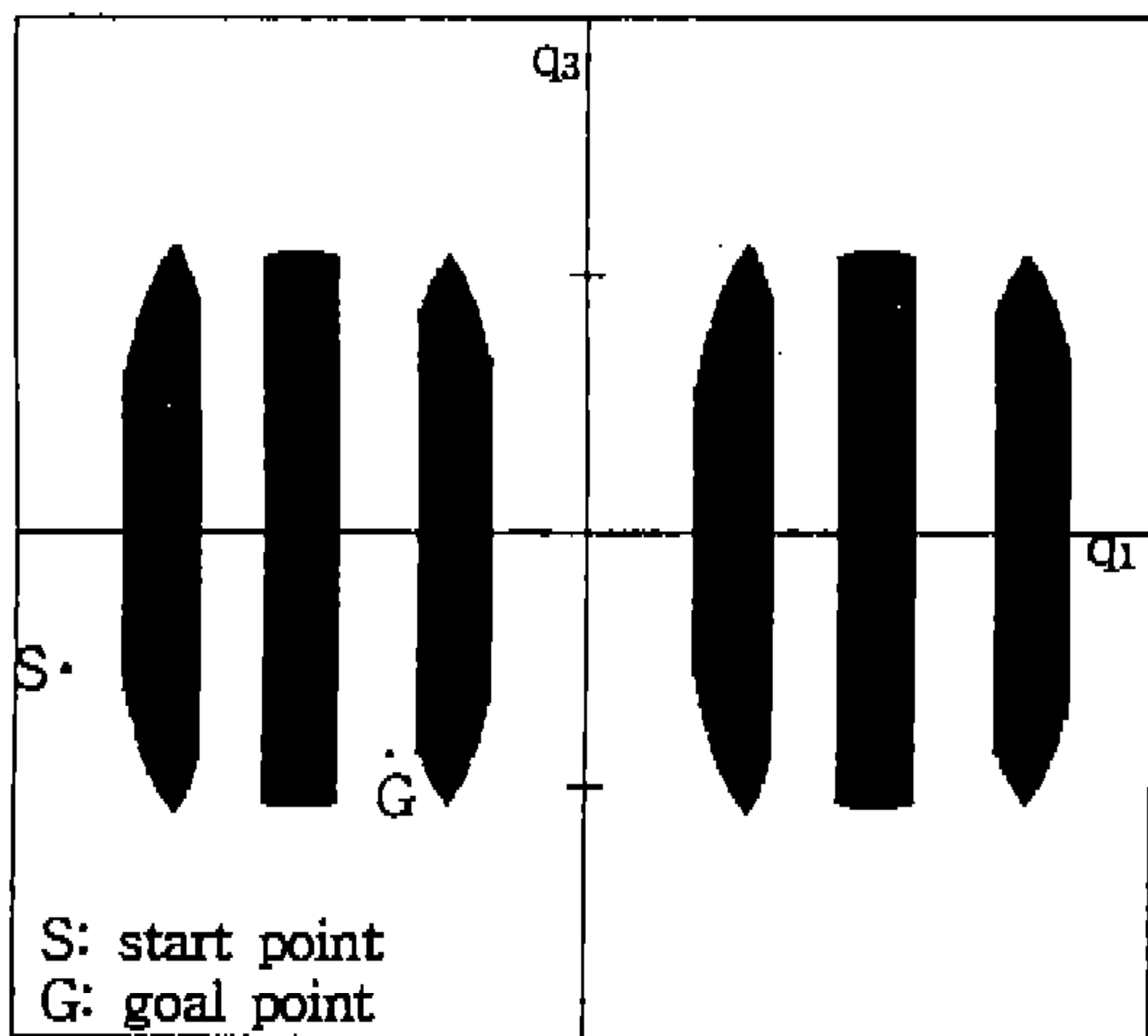


Fig. 12 q_1-q_3 projection plane.

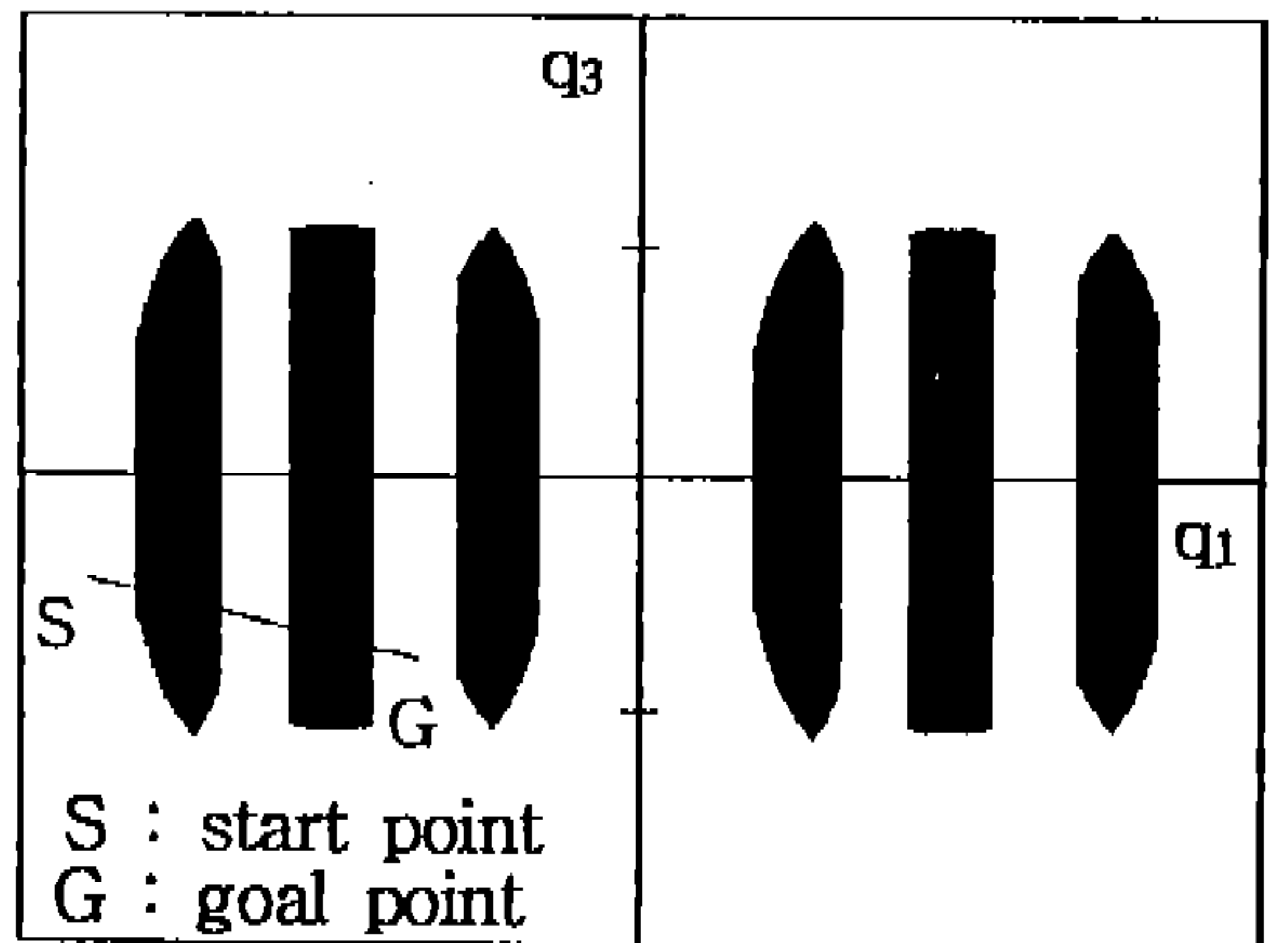


Fig. 15 Path planning in q_1-q_3 projection plane.

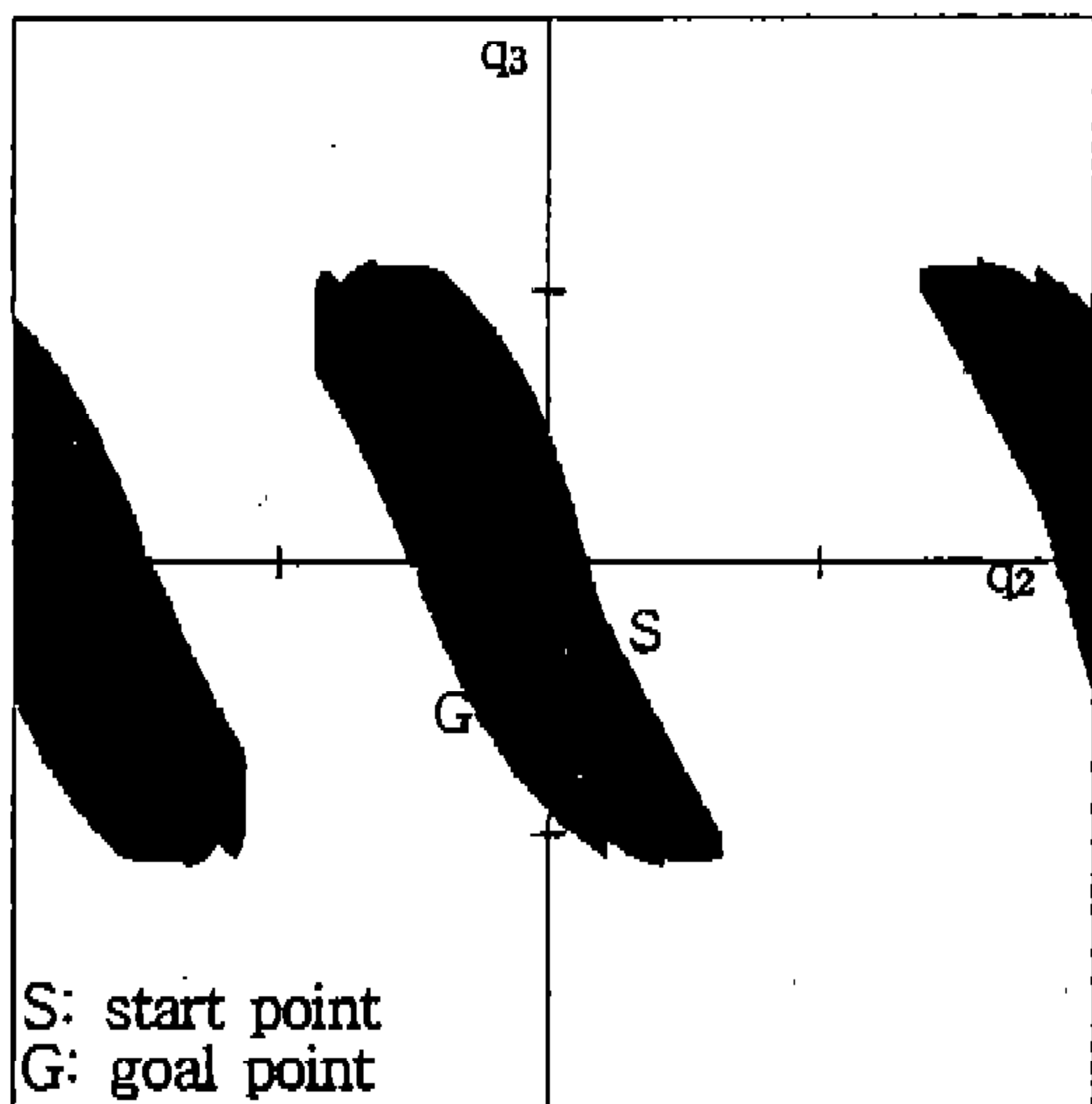


Fig. 13 q_2-q_3 projection plane.

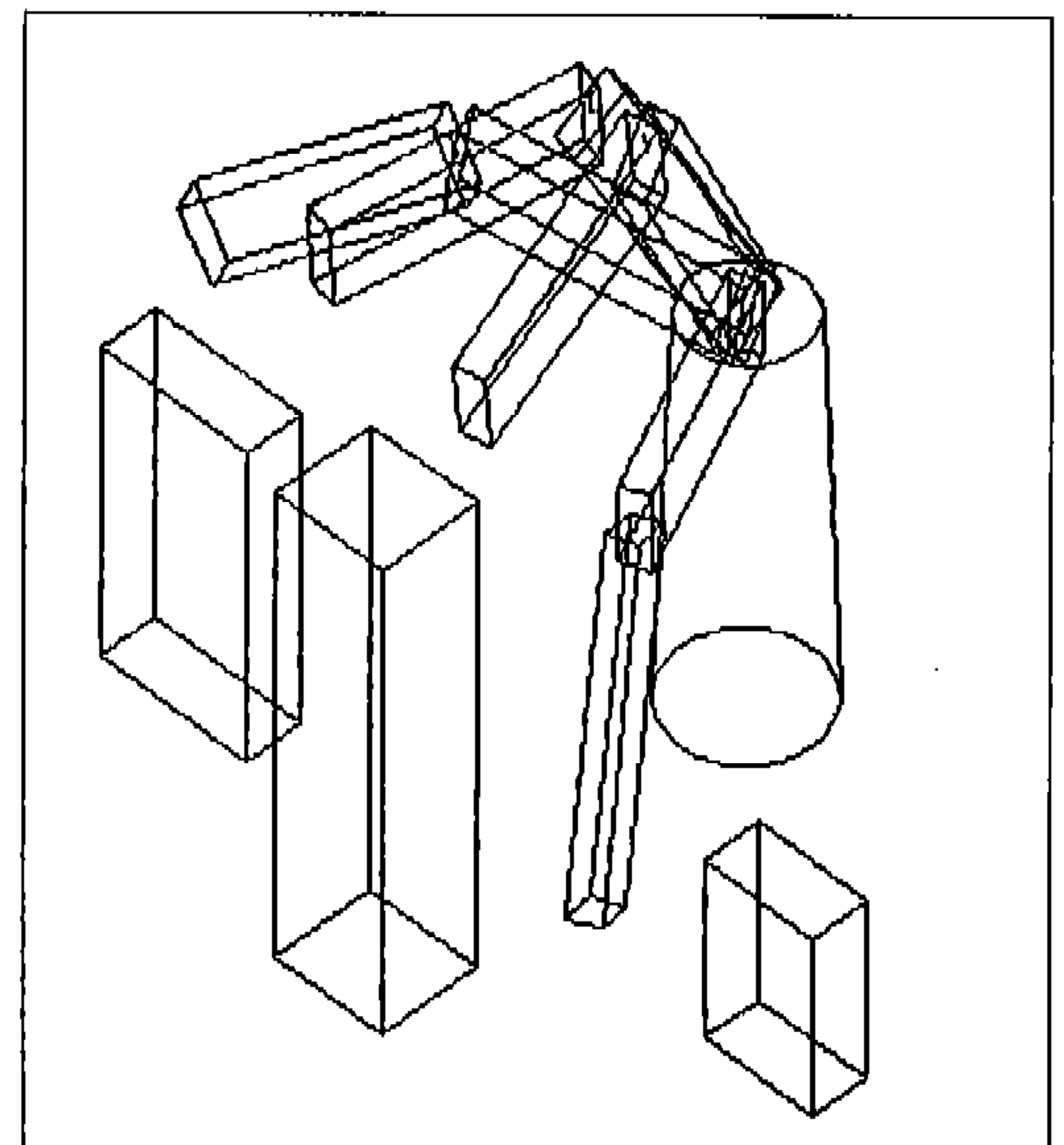


Fig. 16 Collision-free path of three dimensional example.

- Academic Publishers, 1993.
5. C.W. Warren, J.C. Danos, and B.W. Mooring, "An Approach to Manipulator Path Planning", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.8, no.5, pp.87-95, 1989.
 6. N.S.V. Rao, S.S. Iyengar, and G. de Saussure, "The Visit Problem : Visibility Graph-Based Solution", *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1650-1655, 1988.
 7. C.W. Warren, "Fast Path Planning Using Modified A* Method", *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.662-667, 1993.
 8. K. Kant and S.W. Zucker, "Toward Efficient Trajectory Planning : The Path-Velocity Decomposition", *The International Journal of Robotics Reserarch*, Vol.5, no.3, 1986.
 9. B. Paden, A. Mees, and M. Fisher, "Path Planning Using a Jacobian-Based Freespace Generation Algorithm", *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1732-1737, 1989.
 10. T. Lozano-Pérez and M.A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles", *Communications of the ACM*. Vol.22, no.10 October 1979.
 11. J. Ilari and C. Torras, "2D Path Planning : A Configuration Space Heuristic Approach", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.9, no.1, Feb.1990.
 12. B. Faverjon, "Obstacle Avoidance using an Octree in the Configuration Space of a Manipulator", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, March 1984.