

〈論 文〉

장애물 회피를 위한 로봇 매니플레이터의 경로계획에 관한 연구

조 선 휘* · 류 길 하**

(1990년 10월 11일 접수)

A Study of the Path Planning of the Robot Manipulator for Obstacle Avoidance

Sun Whi Cho and Gil Ha Ryu

Key Words : Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), Path Planning(경로계획), Obstacle Avoidance(장애물 회피), Modeling(모델링), Minimum Distance(최소거리), Free Space(자유공간)

Abstract

Future generation of robots will be considerably more autonomous than present robotic systems. The main objective of research on theoretical problems in robotics is to endow robotics system with basic capabilities they will need to operate in an intelligent and autonomous manner. This paper discusses the problem of collision free movement of robot manipulator. It is formulated in path planning with obstacle avoidance expressed in the term of the distance between convex shapes in the three dimensional space. The examples are given to illustrate the main feature of the method.

1. 서 론

최근 산업 현장에서는 생산성 향상과 공장 자동화의 추세에 따라 여러 작업 공정(조립, 용접, 운반, 검사 등)에 로봇의 사용이 점차 증가하고 있으며 따라 로봇의 응용 기술도 날로 발달되어 가고 있으며 로봇의 운동에 관하여 작업 환경과의 관계(environment sensing) 및 운동의 정밀제어 등에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 로봇의 운동 경로 계획은 로봇 운동 방식의 비선형성, 조인트 운동의 기구학적 제한 및 구동력의 제한 조건등으로 인하여 쉽지 않으며 이와 더불어 로봇 작업 영역 내의 장애물을 동시에 고려할 경우 더욱 복잡한

문제가 된다. 현재 대부분의 경우 로봇의 경로 계획은 반복 학습 방법(teach and play back method)에 의하여 이루어 지고 있으며 이는 새로운 작업을 부여할 때 마다 로봇의 작업을 정지 시켜야 할 뿐 아니라 작업 영역 내의 장애물과의 충돌을 예측하기 힘들고 운동의 최적화를 고려하기 어려운 난점이 있다. 지난 몇 년간 로봇의 경로 계획을 온라인으로 수행하는 연구가 이루어져 왔으나 이는 계산 시간이 많이 걸리기 때문에 실시간 운영(real time operation)이 불가능 하여 비 효율적인 방법으로 간주되었으며 로봇의 이용율을 높이고 운동 경로를 보다 최적화 시키기 위하여서는 경로 계획을 오프라인으로 수행하는 것이 바람직하다. 공장 자동화를 위해서 로봇의 사용은 필수적이며 또한 로봇의 운동경로 계획도 반복학습 방법을 지양하고 자동생성 하는 것이 바람직 하다. 이를 위하여 로봇 시스

*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

**정회원, 서울대학교 대학원

템은 여러감지장치를 이용하여 작업영역내의 여러 주변정보를 분석하는 주변정보 감지장치(sensing), 이를 이용하여 로봇의 경로를 생성시키는 경로 생성과정(planning)과 최종적으로 생성된 경로를 수행시키기 위한 제어과정(control)이 필요하다. 이중 경로생성 과정은 주변정보를 이용하여 로봇의 경로를 자동으로 생성하게 된다. 이때 로봇의 경로 계획은 로봇이 초기위치에서 최종위치까지 작업영역 내의 장애물과 충돌하지 않고 이동할 수 있는 조인트의 경로를 시간의 함수로 나타내게 되며 이는 로봇의 운동을 자동화하기 위한 필수적인 과정이며 사용자로 하여금 보다 상위레벨(high level, task level)에서 로봇의 운용을 가능하게 한다.

로봇의 작업영역 내에 장애물이 있는 경우의 경로계획은 첫째, 로봇과 장애물과의 충돌을 야기시키지 않는 자유공간을 찾는과정(find space)과 둘째, 자유공간내에서 로봇의 운동을 기술하여 경로를 계획하는과정(find path)로 나누어 고려할 수 있으며 그 방법으로 Combinatorial 방법과 Continuum방법이 이용되었다.

Combinatorial 방법은 문제의 형상공간(configuration space)을 이와 유사한 공간내 여러개의 유한한 집합(finite set)으로 구성하여 각 집합의 구성요소 격자(cell)간의 기하학적 관계(topological relationship)를 이용하여 초기상태와 최종상태 사이를 망상분석(network analysis)을 이용하여 서로 연결함으로써 경로를 계획하는 방법이며 continuum 방법은 원래의 형상공간상에서 발견적 교수방법(heuristic method)을 이용하여 경로를 계획하는 방법이다. 간단한 사각형 모델의 평면상에서 운동 경로계획이 Whitley⁽¹⁾에 의해 처음으로 시도 되었으며 이는 이후 Combinatorial 방법을 이용할수 있는 기초가 되었다. Lozano-Perez는 물체(object)와 장애물(obstacle)과의 충돌을 피할수 있는 자유공간을 구하기 위하여 먼저 물체를 하나의 점으로 축소시키고 대신 장애물을 그에 연관하여 확대시킴으로써 충돌가능 영역(obstacle configuration space)을 구하고 물체의 이동경로 대신 축소된 점의 이동경로를 구하는 방법으로 문제를 단순화 시킨 바 있다^(2,3). 이 방법은 물체의 회전 자유도를 고려하기 힘든 단점을 지니고 있다. 이후 Brooks와 Lozano-Perez는 이러한 단점을 해결하기 위하여 물체의 회전 운동량을 일정한 간격으로 나누후 그 회전량으로 물체를 이동시킨 후 그 이동

영역(sweeping volumn)을 그때의 새로운 물체로 정의하여 충돌가능영역을 구하는 방법을 시도하였다⁽⁴⁾. 그러나 이는 물체의 자유도가 늘어남에 따라 계산량이 기하급수적으로 늘어나는 문제점을 지니고 있으며 3자유도 이상의 자유도를 지니는 문제에는 적용이 불가능하다. Brooks는 자유공간을 일반화된 원추(generalized cone)를 이용하여 표현하는 방법을 제시하였으나 이역시 평면문제에 국한하여야 하는 단점이 있다⁽⁵⁾. 이와 같은 Combinatorial 방법은 해의 정밀도를 위해서는 계산량과 전자계산기의 메모리가 기하 급수적으로 늘어날 뿐 아니라 회전운동을 정확히 고려하기 힘들고 3자유도 이상의 문제에는 적용이 불가능 하며 물체 운동 경로 계획시 최적화 문제와 연관시킬 수 없는 단점이 있다.

Continuum방법은 먼저 물체의 운동경로를 가정(hypothesized path)한 다음 경로를 따라 물체와 장애물사이의 충돌을 판단하고 충돌이 일어날경우 경로를 변화(path modification)시켜가며 최종위치까지 도달할 수 있는 경로를 계획하는 방법으로 Myers는 직육면체 장애물이 있는 경우에 적용시킨 바 있다⁽⁶⁾.

이방법은 먼저 물체와 장애물사이의 충돌여부를 판단 할 수 있는 방법이 필요하며 일반적으로 물체와 장애물 사이의 최소거리를 그 기준으로 삼고 있다. 이 방법은 물체의 경로를 계획하기 위하여 물체와 장애물 사이의 충돌 여부를 경로 상에서 매우 자주 계산하여야 함으로 효율적으로 두물체 사이의 거리를 계산할 수 있는 방법이 요구되며 이는 경로 계획 전체 계산과정의 대부분을 차지하게 된다. 두 물체의 최소 거리를 계산하는 방법은 물체의 표현 방법에 따라 서로 다르며 물체가 해석적인 함수로 표현이 가능한 경우에는 그 경우에는 그 거리 역시 해석적인 방법으로 쉽게 구할수 있으나 일반적으로 물체를 해석적인 방법으로 표현하는 데에는 그 한계가 있으므로 두 물체사이의 최소 거리를 계산하는데에는 수치해석적 방법이 필요하다.

Johnson은 convex hull을 이용하여 표현된 물체, Bobrow는 볼록 다면체(convex polyhedron)를 이용하여 표현된 물체 사이의 최소 거리를 계산하는 방법을 제안 하였다^(7,8). 이들 방법은 두 물체가 서로 충돌하지 않고 서로 떨어져 있는 경우에는 그 최소 거리 계산이 가능하나 서로 충돌하는 경우에는 두 물체사이의 충돌 깊이에 대한 정보를 주는

데 있어서는 비 효율적이다. 국내에서는 단순화된 로봇의 모델(로봇을 하나의 선분으로 표시함)에 대한 충돌회피 경로계획에 관한 연구가 수행된 바 있다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 로봇이용의 자동화를 위하여 가장 필수적인 과정인 로봇의 운동경로 계획에 관하여 연구하고 작업영역 내에 장애물이 있는 경우에 로봇과 장애물과의 충돌 회피를 위한 정량적인 양으로 두물체간의 최소거리 및 충돌깊이를 효율적으로 계산할 수 있는 방법을 제안하며 이를 이용하여 로봇이 장애물과 충돌하지 않고 주어진 작업을 수행할 수 있는 로봇의 경로를 자동으로 생성함으로써 로봇을 보다 상위레벨에서 운용하기 위한 기초를 마련한다.

2. 물체의 모델링 및 최소거리의 계산

로봇의 작업영역내 장애물이 존재하는 경우의 운동경로를 계획하기 위하여 물체사이의 최소거리 및 충돌깊이에 대한 정량적인 양의 계산은 필수적이며 이는 물체를 모델링 하는 방법에 따라 달라지게 된다.

2.1 물체의 모델링

일반적으로 물체의 기하학적 형상을 표현하는 방법에는 여러가지가 있으며 이는 두 물체사이의 거리를 계산하는데 큰 영향을 끼친다. 간단한 기하학적 형상을 가진 물체의 경우 해석적인 방법으로 물체를 표현할 수 있으며 이들 물체사이의 최소거리 역시 해석적인 방법으로 간단히 구할 수 있다. 그러나 해석적인 방법으로 물체를 표현하는 데는 그 형상에 한계가 있으므로 물체를 수치적으로 표현하는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 반평면(planar half space)을 이용하여 물체를 볼록다면체로 표현하였으며 다음식으로 나타낸다.

$$C_i = \{x | n_{ik}^T x - b_{ik} \leq 0, k=1, \dots, N_i\} \quad (1)$$

여기서, n_i : 반평면의 수직벡터

b_{ik} : 원점에서 반평면 까지의 거리

N_i : 물체를 이루는 반평면의 갯수

물체의 위치(position and orientation)는 그물체가 지나고 있는 자유도에 따라 변하게 된다. 예를 들면 로봇의 링크는 조인트의 변화량에 따라 위치가 변하고 컨베어 벨트상의 물체는 컨베어 벨트의 이동에 따라 움직이게 된다. 따라서 물체의 위치는

그물체의 자유도를 나타내는 형상변수의 함수로 나타내며 식 (1)로 표현된 물체에 대하여 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$C_i(q, t) = \{x | (R_i(q, t) n_{ik})^T (x - p_i(q, t)) - b_{ik} \leq 0, k=1, \dots, N_i\} \quad (2)$$

여기서, R_i : 회전 변환 행렬

P_i : 병진 변환 벡터

일반적으로 하나의 물체를 하나의 볼록다면체로 표현할 경우 모델링 오차가 커지게 되므로 하나의 볼록다면체로 구성하기 힘든 오목다면체(concave polyhedron)의 경우 이를 여러개의 볼록다면체로 구성된 하나의 물체로 표현할 수 있으며 다음식으로 나타낸다.

$$C_A = \bigcup_{i \in I_A} C_i \quad (3)$$

여기서, I_A : 물체를 이루는 볼록다면체의 갯수

두 볼록다면체 사이의 최소 거리를 d_{ij} 라 하고 각각의 물체가 I_A, I_B 개의 볼록다면체로 구성되어 있다면 두물체(A, B) 사이의 최소거리는 다음식으로 구할 수 있다.

$$d(C_A, C_B) = \min \{d_{ij} | i \in I_A, j \in I_B\} \quad (4)$$

2.2 두 물체사이의 최소거리의 계산

두 물체사이의 거리는 장애물이 있는 경우의 운동경로 계획에 중요한 양(measure)이 된다. 그러나 두물체사이의 기하학적 거리는 서로 충돌하는 경우에는 그 거리가 0이 되므로 충돌 여부에 대한 판단은 가능하나 충돌 깊이에 대한 정보를 얻을 수 없다. 따라서 두 물체가 충돌시 그 충돌깊이 까지 고려하기 위하여 두 물체 사이의 최소거리를 한 물체가 다른 물체와 단순접촉(just contact) 시키기 위하여 이동시켜야 할 병진운동량으로 정의하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$d(A, B) = \min \{\|X : \text{contact}(A, B+x)\} \quad (5)$$

여기서, x : 병진 이동 벡터

$B+x$: Minkowski set sum

Compact set(K)에 대한 지지범함수(support function) h_K 는

$$h_K(n) = \max \{n^T x : x \in K\} \quad (6)$$

이며 접촉함수(contact function) s_K 는

$$s_K(n) = \{x \in K : n^T x = h_K\} \quad (7)$$

이며 이때 접촉함수, $s_K(n)$ 는 n 방향으로 compact set K 상의 가장 먼점을 나타내며 Fig. 1은 그 상관관계를 나타낸다.

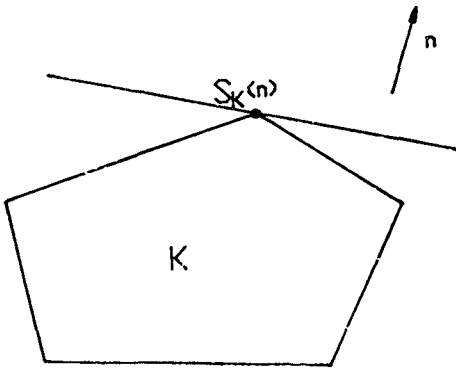


Fig. 1 The support mapping and supporting half space

지지함수 및 접촉함수는 물체의 기하학적 형상을 이용하여 다음식으로 구할 수 있다.

$$h_K(n) = \max\{n^T x_i : x_i = 1, \dots, r\} \quad (8)$$

$$s_K(n) = x_j, \quad j = \min\{i : n^T x_i = h_K(n)\} \quad (9)$$

여기서, x_i : 물체의 꼭지점 좌표

주어진 두 개의 compact set (A, B) 에 대하여 Minkowski set difference, $K = A - B$, 라 하면 K 는 다음식으로 정의 할 수 있다.

$$K = \{z : z = x - y, x \in C_A, y \in C_B\} \quad (10)$$

이때 K 의 지지범함수 및 접촉함수는 다음식으로 구할 수 있다.

$$h_K(n) = h_A(n) + h_B(-n) \quad (11)$$

$$s_K(n) = s_A(n) - s_B(-n) \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 두 물체의 Minkowski set difference역시 반평면으로 표현할 수 있다. 두 물체 (A, B) 사이의 최소거리는 항상 두 물체의 경계면사이에 존재하게되므로 이 최소거리를 식 (5)와 식 (10)을 이용하여 나타내면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$d(K) = \min\{\|x\| : x \in bd(K)\} \quad (13)$$

여기서, K : 두 물체 (A, B) 의 Minkowski set difference $(K = A - B)$

$bd(\cdot)$: (\cdot)의 경계 (boundary of set)

두 물체 (A, B) 사이의 최소거리는 식 (13)으로 나타내며 두 물체 (A, B) 의 Minkowski set difference $(K = A - B)$ 는 식 (11)과 식 (12)를 이용하여 반평면으로 표현이 가능하다.

두 물체가 서로 충돌하는 경우 원점은 두 물체 (A, B) 의 Minkowski set difference $(K = A - B)$ 의 내

부에 존재하게되며 다음 식을 만족한다.

$$h_K(n_i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N_K \quad (14)$$

따라서 두 물체가 서로 충돌하는 경우의 최소거리는 식 (13), 식 (14)를 이용하여 다음식으로 구할 수 있다.

$$d(K) = -\min\{h_K(n_i) : i = 1, \dots, N_K\}$$

N_K 는 두 물체의 Minkowski set difference K 를 표현하기 위한 반평면의 갯수 이고 식 (15)의 음부호는 두 물체가 서로 충돌하였음을 나타내는 지표이다.

식 (14)를 만족하지 않는 경우는 두 물체가 서로 충돌하지 않고 서로 떨어져 있는 경우를 나타내며 이 경우 두 물체사이의 최소거리는 식 (13)을 이용하여 다음식의 최소화 문제로 귀결된다.

$$\text{최소화 함수: } f(x) = \min\{\|x\| : x \in K\} \quad (16)$$

$$\text{구속조건: } g_i(x) \leq 0 \quad (17)$$

여기서 $g_i(x)$ 는 K 의 경계를 나타내는 반평면 방정식이 되며 식 (11)과 식 (12)를 이용하여 구할 수 있다.

식 (17)의 제한조건을 갖는 식 (16)의 목적함수에 대하여 Kuhn Tucker조건을 적용시키면 다음식과 같다.

$$-\frac{x}{\sqrt{x^T x}} = \sum_{i=1}^{N_K} \lambda_i \nabla g_i(x), \quad \lambda_i \geq 0 \quad (18)$$

이때 x 는 K 의 경계상의 한점이며 $\nabla g_i(x)$ 는 x 에서 K 를 표현하는 반평면의 수직벡터가 된다.

3. 운동 경로 계획 방법

물체 사이의 최소거리를 계산하는 목적은 장애물이 있는 경우에 물체가 장애물과 충돌하지 않고 주어진 초기위치에서 최종위치까지 운동하는 운동경로를 계획하기 위함이다. Myers는 운동경로 계획을 먼저 임의의 경로를 가정하고 그 경로를 따라 충돌여부를 판단하며 충돌이 일어나지 않는 경우에는 수행을 끝내고 충돌이 일어나는 경우 새로운 중간점 (intermediate point)을 충돌이 일어나는 장애물의 경로상의 한 점에 수직인 평면상에 있는 점으로 택하여 원래의 경로를 두 개로 나누어 다시 각각의 경로에 대하여 충돌여부를 반복 수행하면서 경로를 계획하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 충돌 여부에 대한 판단기준으로 두 물체사이의 최소 거리를 이용하고 충돌회피를 위한 경로의 변경을 물체가 지닌 형상 변수에 대한

두 물체사이의 최소거리의 변화율을 이용하여 새로운 경로를 찾는 방법을 이용하였다.

3.1 충돌 여부 판단

원래의 가정된 임의의 경로의 변경 여부는 물체가 초기위치에서 최종위치까지 충돌하지 않고 운동할 수 있는가에 달려 있다. 따라서 원래의 경로를 따라 물체를 조금씩 이동시켜가며 매 단계에서 물체와 장애물간의 충돌여부를 판단하여야 되는데 이때 물체의 이동량이 너무 커지면 실제 충돌이 일어나는 경우를 간과할 수 있고 또 이를 피하기 위하여 이동량을 작게 할 경우에는 전체적으로 계산 소요 시간이 많이 걸리게 되는 단점이 있다. 두 물체사이의 최소거리를 충돌 판단의 기준으로 사용하면 물체의 이동량을 이들 거리에 의하여 조절할 수 있다. 예를 들면 두 물체 사이의 거리가 큰 양수를 나타낼 경우 이는 두 물체가 서로 멀리 떨어져 있는 경우를 가리키며 따라서 이 단계에서는 좀 더 큰 이동량을 가지고 운동할 수 있고 작은 수일 경우 물체가 장애물과 매우 근접한 경우를 나타내므로 이 단계에서는 좀 더 세밀한 운동을 시켜야 할 필요성이 있다는 판단기준이 될 수 있다.

3.2 충돌 회피 경로 계획

미리 가정된 경로를 따라 물체를 이동시켜가며 충돌 여부를 판단하여 충돌이 일어날 경우 원래의 경로를 수정할 필요가 있다. 이때 두 물체의 최소거리(이 경우 충돌 깊이)와 그 때 물체의 형상을 알고 있으므로 이를 이용하여 경로를 수정하게 된다. 본 연구에서는 가정된 경로를 물체의 초기위치와 최종위치의 형상 변수값을 직선 보간법(linear interpolation)에 의하여 계획한다. 물체와 장애물이 충돌하지 않을 구속 조건은 다음과 같다.

$$d_i(x) - d_i^0 \geq 0 \quad i=1, \dots, N_0 \quad (19)$$

여기서, d_i : i 번째 장애물과의 최소거리

d_i^0 : 충돌 안전거리

N_0 : 장애물의 갯수

따라서 물체와 장애물이 서로 충돌할 경우 식 (19)를 만족하지 않으므로 그 때의 형상변수 값을 다음식을 만족하는 방향으로 변화시켜 가며 발견적 교수방법으로 식 (19)와 식 (20)을 만족하는 새로운 형상 변수의 값을 구한다.

$$\nabla d_i(x) \geq 0 \quad (20)$$

이와 같은 방법으로 물체와 장애물과의 충돌을 회

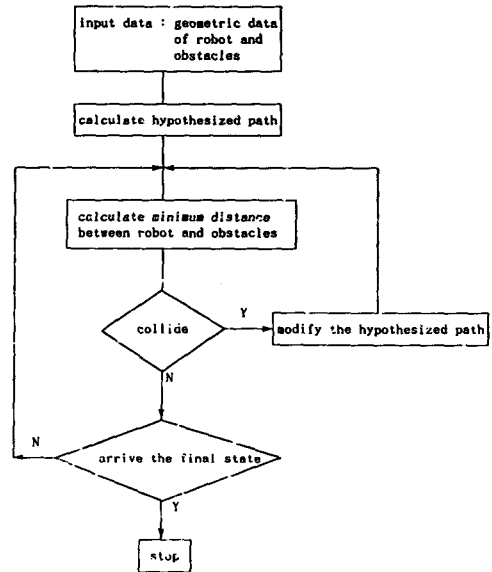


Fig. 2 Flow chart for finding the collision free path

피할 수 있는 경로를 계획할 수 있으며 Fig. 2에 장애물 충돌 회피 경로를 구하는 흐름도를 나타내 주었다.

4. 결과 및 검토

앞절에서 유도한 두 물체사이의 최소거리의 계산은 대부분의 경우 2~3회 정도의 반복수행으로 두 물체사이의 최소거리를 나타내는 해를 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 물체(A)와 장애물($B_i, i=1,4$)를 나타내

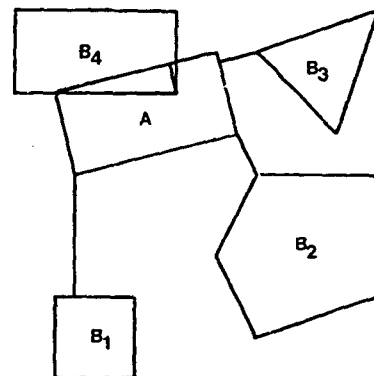


Fig. 3 Generating segment for minimum distance between objects

Table 1 Distance between objects

Object pairs	Minimum distance (cm)
A-B ₁	1.500
A-B ₂	0.559
A-B ₃	0.485
A-B ₄	0.364

고 두 물체를 잇는 직선은 두 물체사이의 최소거리를 나타내며 그 크기를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 A-B₄의 거리가 음수임은 두 물체가 서로 충돌하였음을 나타내고 그 크기는 충돌 깊이이다.

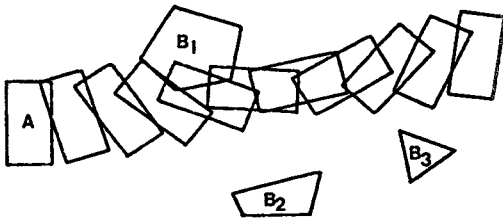


Fig. 4 Motion of object for specified path

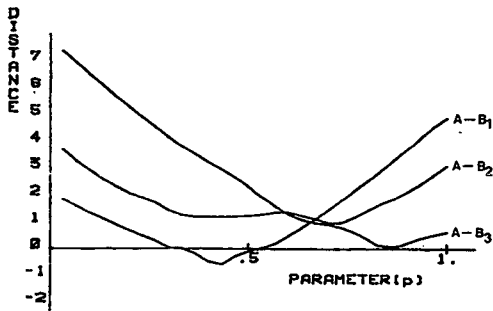


Fig. 5 Plot of the distance versus p for previously shown path

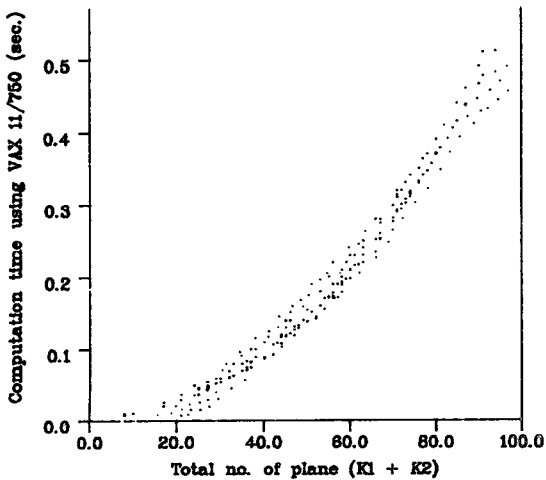
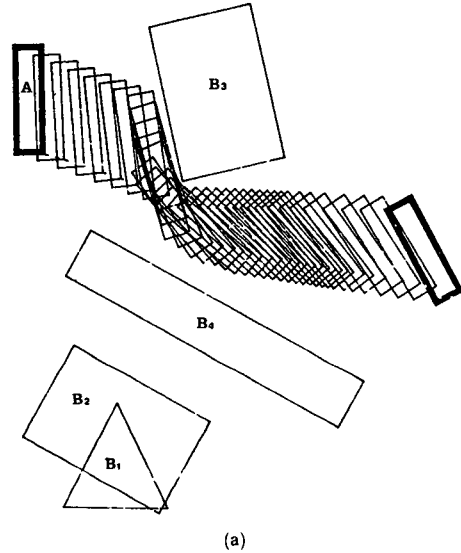
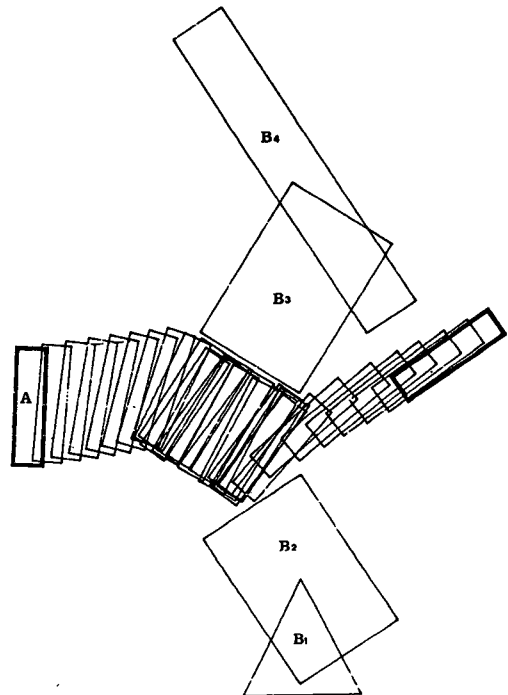


Fig. 6 Computation time versus the total number of plane of both objects



(a)



(b)

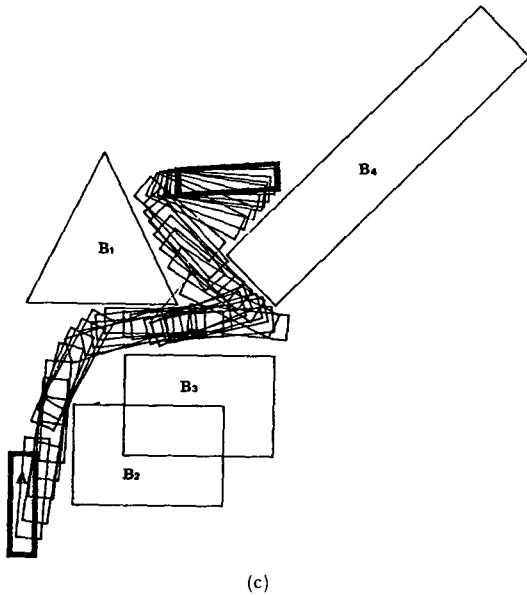
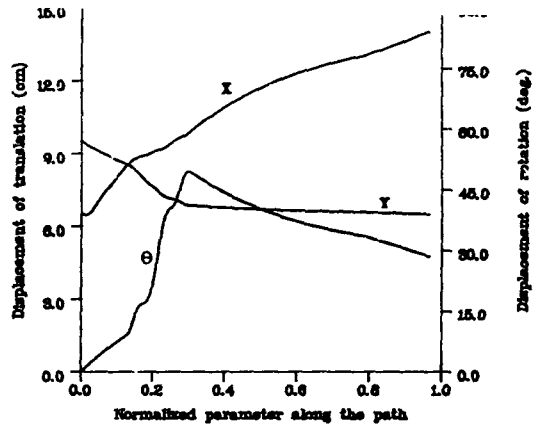


Fig. 7 Planned collision free movement of a body

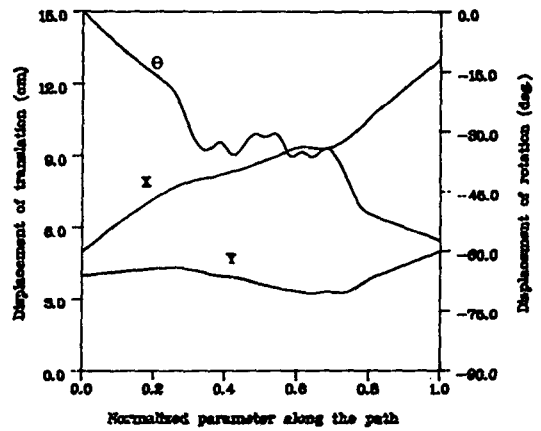
Fig. 4는 물체(A)가 장애물($B_i, i=1,3$)이 있는 경우에 이미 주어진 경로를 따라 운동할 때를 나타내며 이때 물체와 각 장애물과의 최소거리는 Fig. 5에 도시하였다. 여기서 파라미터 p 는 경로를 따라 변하는 매개변수 값이며 그 범위는 0과 1사이이고 $p=0$ 은 초기위치 $p=1$ 은 최종위치를 가르킨다.

Fig. 6은 두 물체사이의 최소거리를 계산하기 위하여 소요된 전산기(VAX 11/750) 사용시간을 도시하였으며 이때 사용된 물체는 원위에 일정한 간격으로 분포된 꼭지점을 가지고 원의 중심선상에서 일정한 거리만큼 서로 반대방향으로 떨어진 점에 각각의 꼭지점을 치닌 다이아몬드형상에 대하여 적용시켰다. 그리고 그림에 나타난 바와 같이 소요계산 시간은 두 물체를 표현하기위한 반평면의 갯수에 비례함을 알 수 있다.

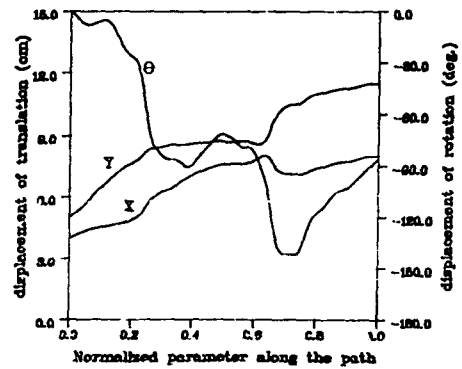
앞절에서 설명한 로봇의 작업영역내에 장애물이 있는 경우의 운동 경로계획 방법을 먼저 두개의 병진운동과 한개의 회전운동 자유도를 가진 자유물체(free body)에 적용시켜 보았다. Fig. 7은 각 경우에 대하여 물체가 초기위치까지 장애물과 충돌을 일으키지 않고 운동하는 경로를 나타낸 것이며 Fig. 8은 각 경우에 물체의 병진운동과 회전운동량을 나타낸 것이며 Fig. 9는 각 경우에 대하여 물체와 각 장애물과의 최소거리를 나타낸 것이다. 이는



(a)



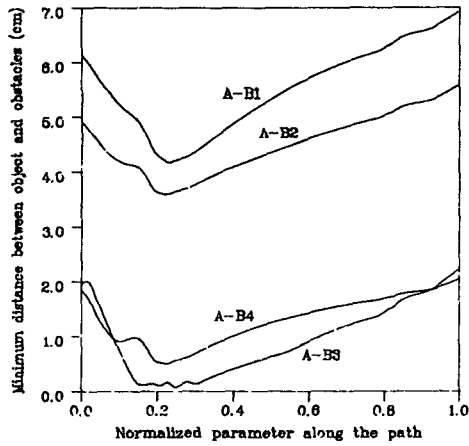
(b)



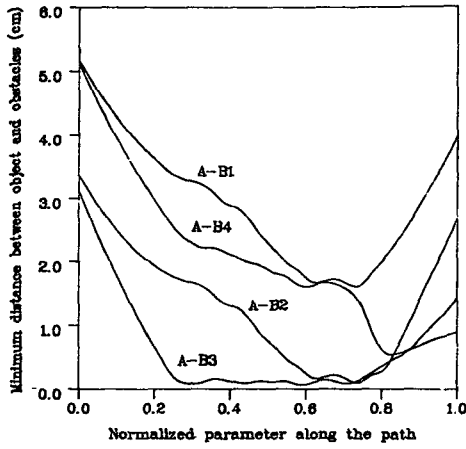
(c)

Fig. 8 Rotational and translational displacement of a body

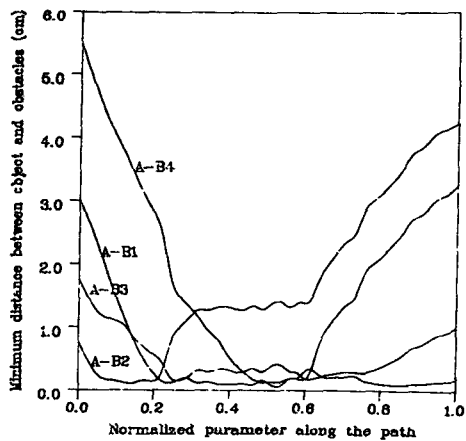
Brooks와 Buckley가 사용한 예에 적용시킨 결과이며 계산시간을 Table 2에 서로 비교하여 놓았다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Minimum distance between a body and obstacles

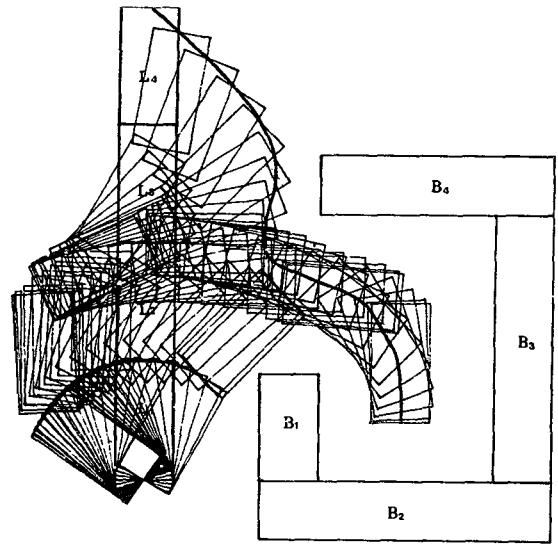


Fig. 10 Planned collision free movement of a redundant robot

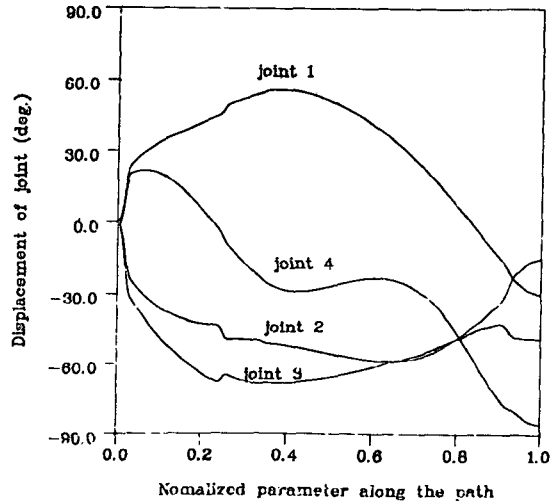


Fig. 11 Displacement of joints of a robot

Fig. 10에는 Ozaki가 사용한 모델인⁽¹⁰⁾ 4개의 회전 자유도를 가진 잉여 로봇(redundent robot)의 경우에 대하여 적용시킨 결과이며 이는 로봇의 끝점(end effector)이 주어진 경로를 따라 움직일때 각 조인트의 운동량을 최소로 하며 로봇의 링크와 장애물과의 충돌을 회피할 수 있는 조인트의 운동을 구하였으며 각 조인트 운동의 변화는 Fig. 11에 나타내었다.

Table 2 Comparison of path planning computing time

Case No.	Brooks' result	Buckley's result	Ryu's result
	Symbolic 3670 workstation		VAX 11/750
1	252,238 msec	12,804 msec	10,165msec
2	242,854 msec	66,410 msec	15,278 msec
3	1,253,061 msec	95,127 msec	19,340 msec

5. 결 론

로봇의 운동경로를 자동으로 생성하는 일은 로봇을 보다 상위레벨에서 운용하기 위하여 필수적이다.

로봇과 장애물과의 충돌여부를 판단하기 위하여 두 물체 사이의 최소거리를 이용하였으며 이의 계산은 로봇의 운동경로 계획시 매우 자주 계산되어야 함으로 보다 효율적인 방법이 요구된다. 본 연구에서는 두 물체의 모델링시 필요한 반평면의 갯수의 함에 비례하는 방법을 제시하였고 경로 계획시 로봇과 장애물의 충돌이 일어날 경우 이를 회피하기 위한 방법을 제시하였으며 이를 이용하여 로봇의 운동경로 계획을 자동으로 생성할 수 있는 알고리즘을 개발 하였다.

본 연구는 로봇의 작업영역내에 장애물이 있는 경우의 로봇의 운동경로 계획을 자동으로 생성하게 하며 이 알고리즘은 로봇의 자동화 및 상위레벨에서의 운용을 가능케 하는 기초가 될 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Whitheny, D. E., 1969, "State Space Methods of Remote Manipulation Tasks", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-14, No. 6, pp. 617~623.
- (2) Lozano-Perez, T. and Wesley, M. A., 1979, "An Algorithm for Planning Collision Free Path Among

Polyhedral Obstacles", *Communications of the ACM*, Vol. 22, No. 10, pp. 560~570.

- (3) Lozano-Perez, T., 1983, "Spatial Planning: A Configuration Space Approach", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-32, No. 2, pp. 108~120.
- (4) Brooks, R. A. and Lozano-Perez, T., 1985, "A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-15, pp. 224~233.
- (5) Brooks, Rodney, A. 1982, "Solving the Find-Path Problem by Representing Free Space as Generalized Cones", *Artificial Intelligence Laboratory, M. I. T. AI Memo 674*.
- (6) Myers John, K., 1981, "A Supervisory Collision-Avoidance System for Robot Controllers", *Master Thesis, Carnegie-Mellon University*.
- (7) Gilbert, E. G. and Johnson D. W., 1985, "Distance Function and Their Application to Robot Path Planning in the Presence of Obstacles", *IEEE Journal Robotics and Automation*, Vol. RA-1, pp. 21~30.
- (8) James, E. Bobrow, 1989, "A Direct Minimization Approach for Obtaining the Distance between Convex Polyhedra", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 65~76.
- (9) 이동수, 정낙영, 서일홍, 최동훈, 1990, "두대의 로봇트 근사 최소 시간제어를 위한 충돌회피 경로계획", *대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(II)*, pp. 58~61.
- (10) Ozaki H., and Mohri A., 1986, "Planning of Collision-Free Movements of a Manipulator with Dynamic Constraints", *Robotica*, Vol. 4.