

적응관측시간을 이용한 로봇 매니플레이터의 시변 장애물 회피 동작 계획

고낙용*, 최한수*, 이범희**, 고명삼**

*조선대학교 제어계측공학과, **서울대학교 제어계측공학과

Motion Planning of a Robot Manipulator for Time-Varying Obstacle Avoidance Using Adaptive View-Time

Nak Yong Ko*, Han Soo Choi*, Bum Hee Lee**, Myoung Sam Ko**

*Dept. Control and Instrumentation Eng., Chosun Univ.

**Dept. Control and Instrumentation Eng., Seoul National Univ.

Abstract

An analytic solution approach to the time-varying obstacle avoidance problem is pursued. We use the view-time concept, especially the adaptive view-time. First, we introduce the adaptive view-time and analyze its properties. Next, we propose a view-time based motion planning method. The proposed method is applied and simulated for the collision-free motion planning of a 2 DOF robot manipulator. We simulate the robot motion under several different view-time systems. Generally, the motion planning with the adaptive view-time systems has some advantages over that with the fixed view-time systems.

표기법

N : 관절 로봇의 자유도.

$q_i(t)$: 시각 t 에서 i 번째 일반화 관절 변수(generalized joint variable) 값.

${}^M(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t))$: 관절 공간에서 시각 t 에서의 로봇 형상.

M_0 : 로봇의 관절 공간상 동작 시작점.

M_f : 로봇의 관절 공간상 동작 목표점.

${}^O(t) = \{ (x, y, z) \mid (x, y, z) \in \text{Obstacle at time } t, (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \}$: 카테시안 공간상 장애물

${}^O_S[{}^O(t)]$: 카테시안 공간상의 장애물 ${}^O(t)$ 에 대한 관절 공간상 장애물

t_0 : 로봇이 초기 형상에서 동작을 시작하는 시각.

1. 서론

로봇의 작업 공간내에는 다른 로봇, 작업물, 다른 기기 또는 작업자등이 있다. 로봇은 이러한 장애물들을 피하면서 주어진 작업을 하여야한다. 장애물들은 고정되어있기도 하지만, 이동하거나 그 형상이 변하는 시변 장애물인 경우가 대부분이다. 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획은 로봇의

작업 공간내의 시변 장애물들을 피하면서 주어진 시작점에서 목표점까지 동작하도록 로봇의 각 관절들의 동작을 계획하는 것을 의미한다[1]. 본 논문에서는 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획 문제에 대한 해결 접근 방법을 제시한다.

장애물 회피 동작 계획에 관한 이제까지의 연구들은 고정 장애물 회피에 관한 것들이 대부분이었으며, 시변 장애물 회피에 관한 소수의 연구들은 대부분 고정 장애물 회피 방법을 응용한 것들이었다. 기존의 장애물 회피 동작 계획 방법들은 공간-시간 공간을 이용한 방법, 속도 조절 방법, 인공 전위계를 이용한 방법, 그리고 거리 함수를 이용한 방법등이었다. 공간-시간 공간을 이용한 방법에서는 시변 장애물을 공간-시간 공간에서 고정 장애물화하여 고정 장애물을 피하는 경로 계획 방법에 의해서 시변 장애물을 피하였다[2], [3]. 속도 조절에 의해 시변 장애물을 피하는 방법은 주어진 로봇의 동작 경로상에서 로봇의 속도를 조절하여 시변 장애물을 피하였다[4], [5]. 이 방법은 로봇의 경로를 계획하지 않아서 간편한 반면, 주어진 경로상에서 충돌을 피할 수 있는 로봇의 궤적이 존재하지 않는 경우도 있다. 인공 전위계를 이용한 방법에서는 로봇과 로봇 동작의 목표점 사이에는 인력이 작용하고, 로봇과 장애물 사이에는 척력이 작용하는 가상의 전위계를 로봇의 작업 공간에 구성하여, 전위가 낮아지는 방향으로 로봇이 운동하도록하여 장애물을 피하게한다[6], [7]. 이 방법은 수학적으로 간단하고 분석적이긴하나 시변 장애물 회피에 적용하기 어렵다. 거리 함수를 이용한 방법에서는 로봇과 장애물 사이의 거리를 일정한 여유값 이상으로 유지하여 장애물을 피하도록 하였다[8]. 이 방법은 거리 함수를 도입하여 장애물 회피에 최적화 기법을 이용할 수 있게하지만, 시변 장애물 회피에 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 적응 관측 시간을 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 제안한다[1]. 관측 시간을 이용한 시변 장애물 회피 방법은 관절 로봇의 시변 장애물 회피, 여러대 로봇의 무 충돌 동작 조정, 이동 물체의 시변 장애물 회피등 일반적인 시변 장애물 회피에 널리 이용될 수 있는 장점이 있다. 특히 장애물의 시변성에 적응하여 관측 기간을 변화 시키는 적응 관측 시간을 이용하면, 고정 관측 시간을 이용하는 방법에 비해서 효율적으로 로봇의 동작을 계획할 수 있다.

본 논문에서는 2 절에서 관측 시간을 도입하고 시변 장애물을 회피와 관련하여 그 성질을 분석한다. 3 절에서는 관측 시간을 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 제안한다. 4 절에서는 제안된 방법을 2 자유도 관절 로봇의 시변 장애물 회피에 적용하고 시뮬레이션한다. 여기에서는 고정 관측 시간과 적응 관측 시간을 이용하는 경우에 대하여 각각 시뮬레이션하여 그 결과를 비교한다. 마지막으로 5 절에서는 제안된 방법의 장단점과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관측 시간과 그 성질

1. 개념들의 정의

시간에 따라 연속적으로 변화하는 시변 장애물은 무한개의 각 순간에서의 형태, 위치, 그리고 방향 정보에 의해서 그 운동이 완벽하게 나타내진다. 그러나, 시변 장애물을 피하기 위해 무한개의 시변 정보를 다루는 것이 실제로는 불가능하므로 시변 장애물을 일정한 기간 마다 대응하는 고정 장애물로 근사한다. 관측 시간은 이를 위한 시간 단위이다.

[정의 1] i 번째 관측 시간 : vt_i

$$vt_i = \{ t \mid t_i \leq t \leq t_{i+1} \}, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

여기에서, t_0 는 초기 시간 이고, $i < j$ 이면 $t_i < t_j$ 이다.

[정의 2] 관측 기간

1) i 번째 관측 기간 (the i -th view-period) : vp_i

$$vp_i = t_{i+1} - t_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

2) $i = 1, 2, 3, \dots$ 에 대하여 $vp_0 = vp_i$ 이면 고정 관측 기간

3) $vp_0 \neq vp_i, i \neq 0$ 인 i 가 존재하면 가변 관측 기간

[정의 3] ${}^cOS(t)$ 가 vt_i 동안 지나간 부피 : ${}^cOS(vt_i)$

$${}^cOS(vt_i) = \{ (x, y, z) \mid (x, y, z) \in {}^cOS(t), t \in vt_i \}$$

관측 기간은 관측 시간의 길이이고, 지나간 부피 ${}^cOS(vt_i)$ 는 시변 장애물 ${}^cOS(t)$ 가 관측 시간 vt_i 동안 지나간 카테시안 공간상의 모든 점들의 집합이다 지나간 부피 ${}^cOS(vt_i)$ 를 피하도록 동작을 계획하면 적어도 vt_i 동안 충돌이 발생하지 않는다. 따라서 시변 장애물 ${}^cOS(t)$ 를 vt_i 동안 ${}^cOS(vt_i)$ 로 근사하여 고정 장애물로 간주한다.

${}^cOS(vt_i)$ 에 대한 관측 공간상 장애물 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 의 형태는 로봇의 기구학적 구조와 ${}^cOS(vt_i)$ 에 관한 함수이다. 그런데 ${}^cOS(vt_i)$ 는 vt_i 와 ${}^cOS(t)$ 의 운동에 관한 함수이므로, vt_i 동안 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 를 피하기 위한 ${}^jM(t)$ 의 경로와 궤적도 vt_i 와 ${}^cOS(t)$ 의 운동에 따라 달라진다. 이와 같은 $vt_i, {}^cOS(vt_i), {}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$, 그리고 충돌 회피를 위한 경로와 궤적들의 성질 및 상호 관계를 분석한다.

2. 개념들의 성질 및 관련성

관측 시간을 이용하여 문제를 해결하기 위해 위에 정의한 개념들의 성질 및 상호 관련성들을 분석한다. 관측 기간의 길이에 따른 지나간 부피와 관측 공간상 장애물의 변화를 관찰하기 위해 2 개의 관측 시간 체계를 도입한다. 이 2 가지 관측 시간

체계에서의 i 번째 관측 시간을 첫 첨자 1 과 2 로 구분하여 vt_i^1 와 vt_i^2 로 표시한다.

[성질 1] 두 관측 시간에서의 지나간 부피들, 관측 공간상 장애물들 사이의 관련성:

$$vt_i^1 \subseteq vt_j^2 \text{ 이면,}$$

$$1) {}^cOS(vt_i^1) \subseteq {}^cOS(vt_j^2) \text{ 이고,}$$

$$2) {}^jOS[{}^cOS(vt_i^1)] \subseteq {}^jOS[{}^cOS(vt_j^2)] \text{ 이다.}$$

[성질 2] 두 관측 시간의 공통 부분에서의 지나간 부피와 관측 공간상 장애물:

$$vt_i^1 \cap vt_j^2 \neq \emptyset \text{ 이고, } t \in \{ vt_i^1 \cap vt_j^2 \} \text{ 인 모든 } t \text{ 에서 } {}^cOS(t) \neq \emptyset \text{ 이면,}$$

$$1) \{ {}^cOS(vt_i^1) \cap {}^cOS(vt_j^2) \} \supseteq {}^cOS(vt_i^1 \cap vt_j^2) \neq \emptyset$$

$$2) {}^jOS[{}^cOS(vt_i^1) \cap {}^cOS(vt_j^2)] \supseteq {}^jOS[{}^cOS(vt_i^1 \cap vt_j^2)]$$

일반적으로 관측 기간 vp_i 가 길어지면 ${}^cOS(vt_i)$ 와 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 가 커진다. 따라서 ${}^cOS(t)$ 대신 ${}^cOS(vt_i)$ 를 피하도록 하면 불필요하고 과다한 회피 동작이 일어나며 관측 기간이 길어질수록 불필요한 우회 동작이 커진다. 그리고 관측 기간 vp_i 가 길어지면 ${}^cOS(vt_i)$ 와 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 가 커지므로 ${}^jM(t)$ 와 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 사이의 거리가 작아져서 충돌 회피에 불리해진다. 그러나 관측 시간을 이용하여 시변 장애물 ${}^cOS(t)$ 를 관측 시간 vt_i 동안 고정 장애물 ${}^cOS(vt_i)$ 로 근사하면, 관측 시간 vt_i 동안은 시변 장애물 회피에 고정 장애물 회피 방법을 이용할 수 있는 장점이 있다. 각 관측 시간마다 시변 장애물 회피 동작 계획을 위해 고려해야할 성질들은 다음과 같다.

[성질 3] 관측 시간을 이용하여 시변 장애물을 회피하기 위해 고려해야할 조건:

1) ${}^jM(t) \notin {}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 이면, $t \in \{ t \mid t_i < t < t_{i+1} \}$ 인 모든 t 에서 로봇트가 장애물 ${}^cOS(t)$ 와 충돌하지 않는다.

2) $i = 1, 2, \dots$ 에서 ${}^jM(t) \notin \{ {}^jOS[{}^cOS(vt_{i-1})] \cup {}^jOS[{}^cOS(vt_i)] \}$ 이면, $t = t_i$ 에서 로봇트가 장애물과 충돌하지 않는다.

3) $j = i, i+1, i+2, \dots$ 에서 ${}^jM_i \notin {}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 이면, ${}^jM(t_i)$ 에서 jM_i 까지 장애물과 충돌하지 않는 ${}^jM(t)$ 의 경로와 궤적이 존재하지 않는다.

$t \in vt_i$ 에서 ${}^jM(t) \notin {}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 이더라도 ${}^jM(t) \in {}^jOS[{}^cOS(vt_{i+1})]$ 일 수 있다. 이 경우 관측 시간 vt_i 의 경계 시각 $t = t_{i+1}$ 에 ${}^jM(t_{i+1}) \in {}^jOS[{}^cOS(vt_{i+1})]$ 이어서 충돌이 일어날 수 있다. 따라서 위의 2)에서와 같이 관측 시간의 경계 시각 $t = t_i, i = 1, 2, \dots$ 에서는 ${}^jOS[{}^cOS(vt_{i-1})]$ 과 ${}^jOS[{}^cOS(vt_i)]$ 를 동시에 피하도록 하여야 충돌 회피가 보장된다.

위에서 고찰한 성질들을 바탕으로 시변 장애물을 피하기 위한 로봇트의 동작 계획 방법을 도출할 수 있다.

3. 적응 관측 시간

관측 기간이 고정되어 있으면 장애물이 빠르게 변화하는 경우 장애물을 근사시키기 위한 지나간 부피의 형상이 실제 장애물의 형상과 큰 차이가 나며 크기도 매우 커진다. 이 경우

실제 장애물과 모양과 크기에서 큰 차이를 가진 장애물을 피하
게되어 비효율적인 회피 동작이 일어난다. 따라서 장애물의 변
화에 적응하여, 장애물의 변화가 큰 시간대에서는 관측 시간을
짧게하고 장애물의 변화가 작은 시간대에서는 관측 시간을 길
게하는 적응 관측 시간이 필요하다. 이러한 적응 관측 시간의
하나로서 다음과 같이 장애물의 지나간 부피를 모든 관측 시간
에서 동일하게 만들어주는 관측 시간을 제안한다.

[정의 4] 적응 관측 시간:

가변 관측 시간에서 $i=1,2,3,\dots$ 인 모든 i 에서 $vol[{}^cOS(vt_i)]$
= C (상수) 이면, vt_i 는 적응 관측 시간이다.

위의 적응 관측 시간을 이용하는 경우 각 관측 시간마다
장애물의 크기가 일정하게되고 장애물의 형상 변화도 적어진다.
이 경우 고정 관측 시간을 이용하여 관측 시간의 경과에따
른 장애물의 크기와 형상 변화가 큰 경우에 비해서 로봇의
장애물 회피 동작이 효율적일 것으로 예상된다. 이러한 효율성
을 비교하기 위해 4 절에서는 동일한 조건에서 적응 관측 시간
을 이용한 경우와 고정 관측 시간을 이용한 경우의 동작 계획
결과를 비교한다.

3. 시변 장애물 회피 동작 계획 방법

로봇트는 관절 구동기들의 구동 능력에 한계가 있고, 동
력학적인 특성에 의해서 관절의 동작이 제한을 받는다. 따라서
동작 계획시 이러한 제한 조건들을 충족시켜야 된다. 일반적인
로봇트의 동작 계획을 위해서는 유연 제한 조건(smoothness
constraints)과 동력학적 제한 조건(dynamics constraints)을
만족시키면 되고, 장애물 회피를 위해서는 여기에 충돌 회피를
위한 제한 조건을 추가로 만족시켜야한다[1]. 따라서 전체적인
동작 계획은, 매 관측 시간 vt_i 마다 [실질 3]의 1)조건을 만
족시키기 위한 [과정 1] 경로 계획, 유연 제한 조건과 동력학
적 제한 조건을 만족시키기 위한 [과정 2] 궤적 계획, 그리고
[실질 3]의 2)조건을 만족시키기 위한 [과정 3] 경로와 궤적
수정의 3 과정을 수행함으로써 이루어진다.

[동작 계획 과정]

[초기화] ${}^M(t_0) = {}^M_0$ 로하고, $i = 0$ 부터 다음의 과정을 수
행한다.

[과정 1] 경로 계획: 관절 공간상에서 관측 시간 vt_i 동안
 ${}^cOS[{}^cOS(vt_i)]$ 를 피하도록 ${}^M(t_i)$ 로부터 M_0 까지의 경로를
구한다.

[과정 2] 궤적 계획: 위의 [과정 1]에서 구해진 경로상에 유
연 제한 조건과 동력학적 제한 조건을 만족하도록 궤적 계획
하여 모든 $t \in vt_i$ 에 대하여 ${}^M(t)$ 를 구한다.

[과정 3] 경로와 궤적 수정: ${}^M(t_{i+1}) \in {}^cOS[{}^cOS(vt_{i+1})]$ 이어
서 시각 $t = t_{i+1}$ 에 충돌 가능성이 있는 경우 ${}^cOS[{}^cOS(vt_{i+1})]$
을 피하도록 [과정 1]부터 다시 동작 계획한다.

[과정 4] 동작 계획 완료 조사: ${}^M(t_{i+1}) = {}^M_0$ 이면 동작 계
획을 끝내고, 그렇지 않으면 i 를 1 증가하여 [과정 1]부터
계속 동작 계획한다.

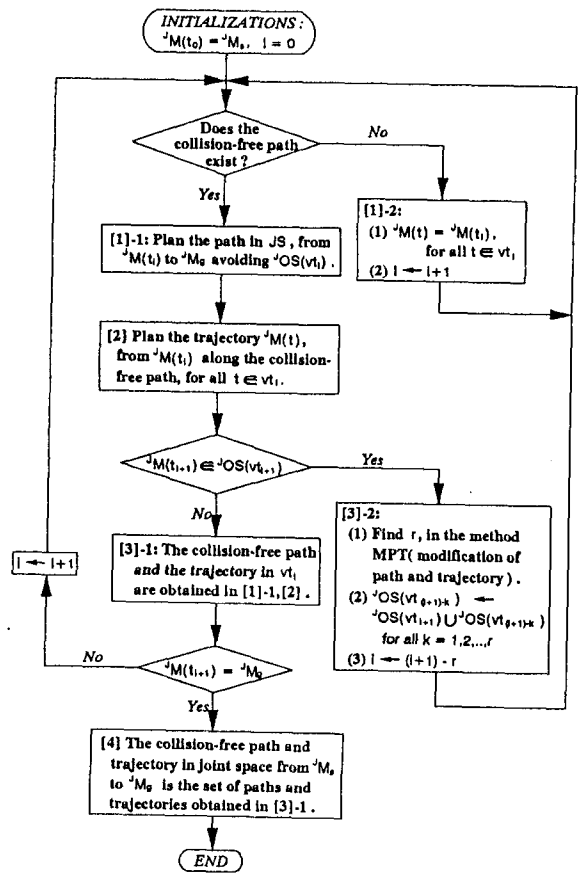


그림 1 동작 계획 방법의 흐름도

이상의 과정을 흐름도로 표현하면 그림 1 과 같다. 각각의
과정들에 대한 구체적인 방법은 다음과 같다.

1. [과정 1] 경로 계획

각 관측 시간 vt_i 마다 고정 장애물 회피 방법을 이용하여
 ${}^M(t_i)$ 로 부터 M_0 까지의 경로를 구한다. 여기에서는 고정 장애
물 회피에 관한 연구가 목적이 아니므로, 기존의 경로 계획 방
법중 사용하기 쉬운 V-그래프 탐색법(view graph search
method)을 이용한다. V-그래프 탐색법은 불록 다면체로 장애물의
경우에 잘 적용할 수 있으므로 장애물을 불록 다면체로 근사시
키는 방법이 필요하다. 만일 ${}^M(t_i)$ 에서 M_0 까지의 경로가 존재
하지 않는 경우 관측 시간 vt_i 동안 로봇트를 정지시킨다. 이러
한 경로 계획 방법에 의해서 관절 공간상에서 유한 길이 직선
들이 연결된 형태(piecewise straight lines)의 충돌 회피 경
로가 형성된다.

2. [과정 2] 궤적 계획

주어진 무 충돌 경로상에 유연 제한 조건과 동력학적 제
한 조건을 만족시키는 시간 궤적을 결정한다. 본 논문에서는,

유연 제한 조건에서 관절 운동의 속도와 가속도를 충분히 제한 하면 관절 구동에 필요한 힘 또는 토크가 관절 구동기가 낼 수 있는 최대 힘 또는 토크 이하로 유지된다고 가정하여[9], 유연 제한 조건에서의 허용 최대 속도와 허용 최대 가속도를 작게 설정하는 대신 동역학적 제한 조건을 무시한다.

유연 제한 조건은 관절 운동의 속도, 가속도, 저크(jerk)를 허용 범위 이내로 유지하여 관절의 동작을 부드럽게 유지하기 위한 것으로 다음과 같이 정의된다[1].

[정의 5] 유연 제한 조건:

$${}^iM(t) \in {}^iCN_S(t), \text{ for all } t \in T$$

여기에서,

$${}^iCN_S(t) = \{ (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \mid |\dot{q}_i(t)| \leq VB_i$$

$$|\ddot{q}_i(t)| \leq AB_i, |\dddot{q}_i(t)| \leq JB_i, i=1, 2, \dots, N \}$$

VB_i, AB_i, JB_i : i 번째 관절 운동의 속도, 가속도, 저크의 한계값

무 충돌 경로 상에서 ${}^iM(t_i)$ 로 부터 k 번째 꼭지점의 관절 공간상 좌표를 ${}^iM_k = (q_{1,k}, q_{2,k}, \dots, q_{n,k})$ 라 하고, ${}^iM_0 = {}^iM(t_i)$ 라 하자. 꼭지점 iM_k 에서 ${}^iM_{k+1}$ 사이의 한점 ${}^iM(t)$ 는

$${}^iM(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \\ = a(t) * ({}^iM_{k+1} - {}^iM_k) + {}^iM_k, \quad 0 \leq a(t) \leq 1$$

$\therefore q_i(t) = a(t) * (q_{i,k+1} - q_{i,k}) + q_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, N$ 으로 나타내지고, iM_k 에서 ${}^iM_{k+1}$ 까지의 궤적은 $a(t)$ 에 의해서 결정된다. 여기에서 유연 제한 조건은 다음과 같이 $a(t)$ 에 대한 조건으로 나타내어진다.

[유연 제한 조건]

$$|a(t)| \leq \text{Min} \{ VB_i / (q_{i,k+1} - q_{i,k}) \}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$|\dot{a}(t)| \leq \text{Min} \{ AB_i / (q_{i,k+1} - q_{i,k}) \}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$|\ddot{a}(t)| \leq \text{Min} \{ JB_i / (q_{i,k+1} - q_{i,k}) \}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

3. [과정 3] 경로와 궤적 수정

관측 시간 vt_{i-1} 에 ${}^iOS[{}^iOS(vt_{i-1})]$ 을 피하도록 ${}^iM(t)$ 의 경로와 궤적을 계획했을 때 만일 ${}^iM(t_i) \in {}^iOS[{}^iOS(vt_i)]$ 이면 [성질 3]의 2) 조건을 만족시키지 못하여 관측 시간 vt_i 의 초기 시각 t_i 에 로봇트가 장애물과 충돌할 가능성이 있다. 이러한 경우 다음의 방법으로 계획된 경로와 궤적을 수정한다.

[경로/궤적 수정 방법]

$t \in vt_{i-1}$ 인 모든 t 에서 ${}^iOS[{}^iOS(vt_{i-1})]$ 을 피하도록 ${}^iM(t)$ 를 계획했을 때, 만일 ${}^iM(t_i) \in {}^iOS[{}^iOS(vt_i)]$ 이면,

1) r 의 결정:

$$r = \text{Min} \{ k \mid {}^iM(t_{i-k}) \notin {}^iOS[{}^iOS(vt_i)] \}, \quad k = 1, 2, \dots, i \}$$

2) 장애물 변환:

$j=i-r, i-r+1, \dots, i-1$ 인 모든 j 에 대하여 ${}^iOS[{}^iOS(vt_j)]$ 를 다음의 ${}^iOS[{}^iOS(vt_j)]$ 으로 변환한다.

$${}^iOS[{}^iOS(vt_j)] = {}^iOS[{}^iOS(vt_j)] \cup {}^iOS[{}^iOS(vt_i)]$$

3) 경로 및 궤적 계획:

관측 시간 vt_{i-r} 부터 경로와 궤적을 다시 계획한다.

위의 규칙에 의하면 ${}^iOS[{}^iOS(vt_i)]$ 를 관측 시간 vt_i 로부터 r 관측 시간 이전인 vt_{i-r} 부터 피하게된다. 따라서 이 방법은 미래의 충돌을 방지하기 위해, 충분한 시간 이전부터 장애물을 피하게하는 역할을 한다.

4. 동작 계획 방법의 적용 및 시뮬레이션

제한된 관측 시간을 이용한 로봇트의 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 그림 2와 같은 관절 로봇트의 시변 장애물 회피 동작 계획에 적용한다. 적용 관측 시간을 이용한 경우와 고정 관측 시간을 이용한 경우에 대한 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 비교 검토한다.

1. 시뮬레이션 조건

장애물은 로봇트의 동작에 관계없이 주어진 시작점에서 목표점까지 주어진 속도와 가속도로 운동한다. 장애물의 동작에 관한 모든 정보는 주어진 것으로 가정하여, 로봇트가 장애물을 피하면서 주어진 시작점에서 목표점까지 동작하도록 로봇트의 동작을 계획한다. 카테시안 공간에서의 로봇트의 작업 공간은 (x, y) 평면상에 형성되며 사각형 장애물은 이 평면상에서 움직인다고 가정한다. 로봇트의 각 링크의 부피를 무시하여 각각 선분으로 구성된 것으로 가정한다. 적용 관측 시간과 고정 관측 시간인 경우에 대하여 각각 관측 시간의 갯수를 달리하여 4가지의 경우에 대하여 시뮬레이션한다.

각각의 경우에 공통된 조건은 다음과 같다.

1) 로봇트에 관한 조건들

- (a) 관절 운동의 최대 각 속도: $VB_i = 400 \text{ deg/sec}, i = 1, 2.$
- (b) 운동의 최대 각 가속도: $AB_i = 100 \text{ deg/sec}^2, i = 1, 2.$
- (c) 작업 공간: $-180^\circ < q_1 < 180^\circ, -180^\circ < q_2 < 180^\circ$
- (d) 크기: $l_1 = l_2 = 100 \text{ cm}$
- (e) 동작의 관절 공간에서의 시작점: $(80 \text{ deg}, -10 \text{ deg})$
- (f) 동작의 관절 공간에서의 목표점: $(-40 \text{ deg}, 25 \text{ deg})$

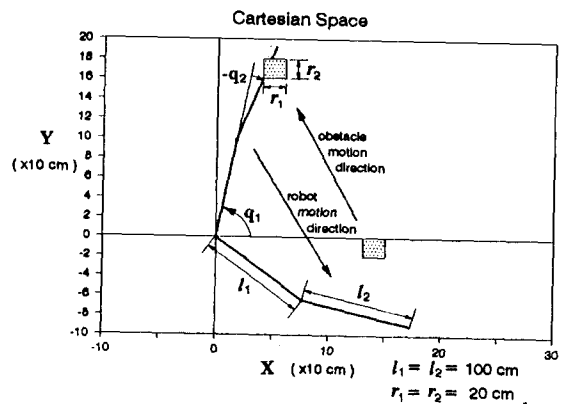


그림 2 시뮬레이션 모드

2) 장애물에 관한 조건들

- (a) 형태: 각변의 길이가 20 cm 인 정사각형
- (b) 카테시안 공간에서의 동작 경로: 직선 경로
- (c) 카테시안 공간에서의 최대 선 속도: 20 cm/sec
- (d) 카테시안 공간에서의 최대 선 가속도: 5 cm/sec²
- (e) 동작의 카테시안 공간에서의 시작점: (130 cm, -20 cm)
- (f) 동작의 카테시안 공간에서의 끝점: (40 cm, 160 cm)

적용 관측 시간의 경우에는 관측 시간의 갯수를, 고정 관측 시간의 경우에는 관측 시간을 각각 다음 표 1 과 같이 변화 시켜 시뮬레이션한다.

표 1 시뮬레이션 조건

경우 1: 적용 관측 시간		경우 2: 고정 관측 시간	
관측 시간의 갯수		관측 기간(sec)	
경우 1-(a)	29	경우 2-(a)	0.5
경우 1-(b)	15	경우 2-(b)	1.0
경우 1-(c)	10	경우 2-(c)	1.5
경우 1-(d)	8	경우 2-(d)	2.0

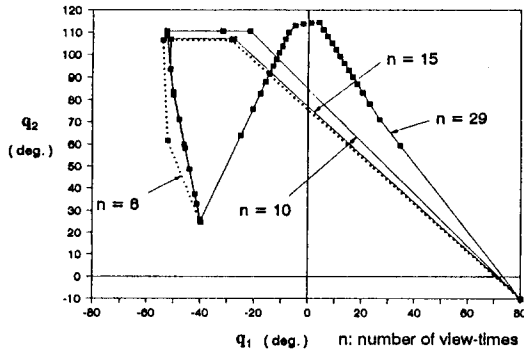


그림 3 로봇트 동작의 관철 공간상 궤적(적용 관측 시간)

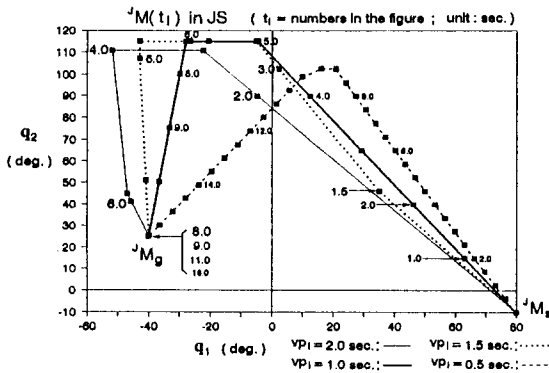


그림 4 로봇트 동작의 관철 공간상 궤적(고정 관측 시간)

2. 시뮬레이션 결과

관철 공간에서의 충돌 회피 경로와 궤적을 적용 관측 시간을 이용한 경우와 고정 관측 시간을 이용한 경우 각각 그림 3 과 그림 4에 나타내었다. 그림 5 와 그림 6 은 경우 1-(b) 와 경우 2-(b) 에서의 카테시안 공간에서의 장애물 회피 동작을 보여준다.

각각의 경우들에 있어서의 동작 계획상의 효율성을 비교하기 위해서 다음 표 2 에 이들에 대한 분석 결과를 보인다.

표 2 시뮬레이션 결과의 비교

분류	비교 사항 1		비교 사항 2		비교 사항 3	
	경우1	경우2	경우1	경우2	경우1	경우2
(a)	16.0	14.06	11	9	31	28
(b)	11.0	8.71	3	1	10	9
(c)	9.0	8.04	2	1	5	5
(d)	8.0	5.77	1	0	3	2

비교 사항 1: 로봇트의 동작 시간(sec)

비교 사항 2: 경로/궤적 수정 방법의 적용 횟수

비교 사항 3: 로봇트 동작에 필요한 관측 시간의 갯수

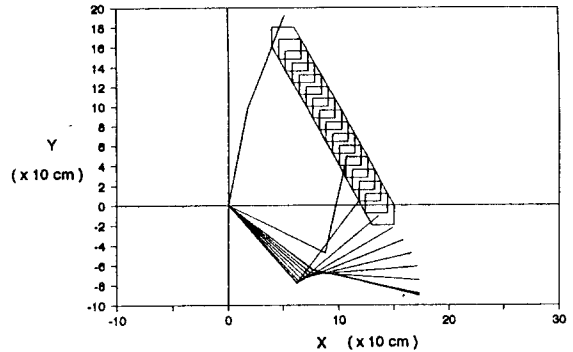


그림 5 카테시안 공간상의 로봇트 동작(경우 1-(b))

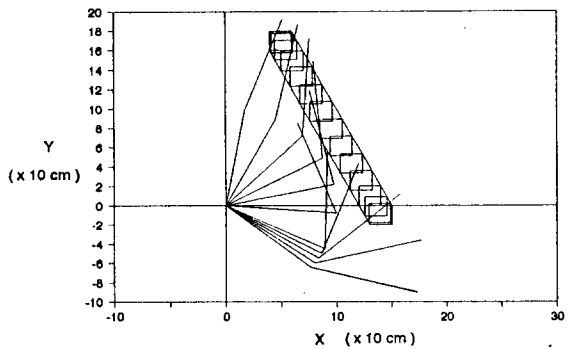


그림 6 카테시안 공간상의 로봇트 동작(경우 2-(b))

표 2의 비교 사항 1로부터 충돌을 피하는 로봇의 동작 시간이 적용 관측 시간을 이용하면 고정 관측 시간을 이용하는 경우보다 짧아짐을 알 수 있다.

제안된 동작 계획 방법은 관측 시간을 단위로 동작 계획이 이루어지므로 동작 계획에 필요한 계산량은 로봇 동작에 소요되는 관측 시간의 갯수에 비례한다. 그리고 경로/궤적 수정 방법을 적용하는 경우, r 관측 시간 동안의 경로와 궤적을 다시 계획하여야 하므로 경로/궤적 수정 방법의 적용 횟수에 비례하여 계산량이 많아진다. 표 2의 비교 사항 2와 3으로부터 적용 관측 시간을 이용하는 경우에는 고정 관측 시간을 이용하는 경우에 비해서 동작 계획 계산량이 적어짐을 알 수 있다.

그림 3과 그림 4의 관절 공간상의 로봇 동작 궤적으로부터 알 수 있듯이, 관측 시간의 갯수 또는 관측 기간에 따라 관절 공간에서의 로봇 경로와 궤적의 길이와 과다한 우회 동작의 크기가 달라진다. 일반적으로 관측 시간의 갯수가 많을수록 또는 관측 기간이 짧을수록 경로의 길이가 짧아지고 우회 동작의 크기가 작아진다.

이상의 표 2의 결과에 대한 관찰로부터 2.3 절에서 분석한 바와 같이 일반적으로 적용 관측 시간을 이용한 경우가 고정 관측 시간을 이용한 경우에 비해서 동작 계획과 계획된 로봇 동작이 효율적임을 알 수 있다.

표 2, 그림 3, 그리고 그림 4로부터 관측 시간의 갯수가 많을수록 또는 관측 기간이 짧을수록 로봇의 동작 시간이 길어지고 동작 계획 계산량이 많아지지만, 로봇의 동작은 부드러워지고 과다한 우회 동작이 적어짐을 알 수 있다[1].

5. 결론

본 논문에서는 관측 시간을 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 제안하였다. 특히 적용 관측 시간을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 고정 관측 시간을 이용한 경우에 비하여 효율성이 개선됨을 보였다. 적용 관측 시간을 이용하면 로봇의 동작 시간이 짧아지고, 동작에 필요한 관측 시간 수와 경로/궤적 수정 방법의 적용 횟수가 적어져서 동작 계획 계산량이 적어진다. 또한 관절 공간상 장애물의 시간에 따른 변화가 작아져서 효율적으로 동작 계획이 이루어진다.

관측 시간을 이용한 동작 계획 방법은 다른 시변 장애물 회피 방법에 비해서 적용할 수 있는 범위가 넓다. 본 논문에서 보인바와 같은 관절 로봇의 시변 장애물 회피 뿐 아니라, 여러대 로봇의 무 충돌 동작 조정, 이동 로봇 또는 일반적인

운동 물체의 시변 장애물 회피에 쉽게 적용될 수 있다.

관측 시간을 이용한 동작 계획에 관한 이제까지의 연구 결과를 확장 발전시키기 위해 다음과 같은 향후의 연구 방향을 제안한다.

- (1) 경로/궤적 수정이 필요없는 관측 시간을 이용한 동작 계획 방법에 관한 연구가 필요하다.
- (2) 계획된 경로와 궤적이 최적의 성능을 갖도록하는 동작 계획 방법에 관한 연구가 필요하다.
- (3) 관측 시간을 실 시간 시변 장애물 회피에 이용한다.

참고 문헌

- [1] 고 낙용, 이 범희, 고 명삼, "로봇의 시변 장애물 회피를 위한 수학적 접근 방법," 대한 전기 학회 논문지, Vol.41, No.7, pp.809-822, 1992년 7월.
- [2] K.Fujimura and H.Samet, "A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles," IEEE Trans. RA, Vol.5, No.1, pp.61-69, Feb. 1989.
- [3] C.L.Shin, T.T.Lee, and W.A.Gruver, "A unified approach for robot motion planning with moving polyhedral obstacles," IEEE Trans. SMC, Vol.20, No.4, pp.903-915, Jul./Aug. 1990.
- [4] B.H.Lee and C.S.G.Lee, "Collision-free motion planning of two robots," IEEE Trans. SMC, Vol.17, No.1, pp.21-32, Jan./Feb. 1987.
- [5] K.Kant and S.W.Zucker, "Toward efficient trajectory planning: The path-velocity decomposition," The Int. J. Robotics Research, Vol.5, No.3, pp.72-89, Fall 1986.
- [6] O.Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," The Int. J. Robotics Research, Vol.5, No.1, pp.90-98, Spring 1986.
- [7] J.Borenstein and Y.Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," IEEE Trans. SMC, Vol.19, No.5, pp.1179-1187, Sep./Oct. 1989.
- [8] E.G.Gilbert and D.W.Johnson, "Distance function and their application to robot path planning in the presence of obstacles," IEEE J. RA, Vol.1, No.1, pp.21-30, Mar. 1985.
- [9] J.Y.S.Luh and C.S.Lin, "Optimum path planning for mechanical manipulators," ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr., Vol.102, No.2, pp.193-204, June 1981.