

'관측 시간' 개념을 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획

Robot Motion Planning for Time-Varying Obstacle Avoidance Using View-Time Concept

고 나용, 이 범희, 고 명삼, 남 윤석

서울 대학교 대학원 제어 계측 공학과, 자동화 시스템 공동 연구소

Nak Yong Ko, Bum Hee Lee, Myoung Sam Ko, Yun Seok Nam

Automation and Systems Research Institute and Dept. of Control and Instrumentation Eng., Seoul National Univ.

Shinrim-Dong Kwanak-Ku, Seoul 151-742, Korea, Tel.(02)880-7316, Fax.(02)885-6620

ABSTRACT

An approach to time-varying obstacle avoidance problem is pursued. The mathematical formulation of the problem is given in Cartesian space and in joint space. To deal with the time-varying obstacles, view-time is introduced. A view-time is the time interval viewing the time-varying obstacles to model equivalent stationary obstacles.

For the analysis of the properties of the view-time, avoidability measure is defined as a measure of easiness for a robot to avoid obstacles. Based on the properties, a motion planning strategy to avoid time-varying obstacles is derived.

An application of the strategy to the collision-free motion planning of two SCARA robots and the simulation on the application are given.

I. 서론

로봇의 시변 장애물(time-varying obstacle) 회피 동작 계획 문제의 해결 방법을 제시한다. 고정 장애물을 피하기 위해서는 카테시안 공간(Cartesian space) 또는 로봇의 관절 공간(Joint space)에서 장애물을 피하도록 경로를 결정하면 된다. 그러나 시변 장애물의 경우에는 동일한 경로를 따라서 동작 하더라도 그 경로상의 시간 궤적에 따라서 충돌 발생 여부가 달라지며, 경우에 따라서는 주어진 경로에 대하여 장애물을 피하는 시간 궤적이 존재하지 않는 경우도 있다[1]. 따라서 시변 장애물을 피하기 위해서는 경로와 궤적을 독립적으로 계획하지 않고 서로의 연관성을 고려하여 동시에 계획하여야 한다.

시변 장애물을 피하기 위한 동작 계획 방법들에는 동작을 계획하려는 공간에 시간 차원을 확장한 공간-시간 공간(space-time space)을 구성하여 시변 장애물을 고정 장애물로 취급할 수 있도록 하는 방법[2], [3], [4], 공간 상에 먼저 경로를 결정하고 주어진 경로 위에서 장애물과 충돌하지 않도록 속도를 조절하는 방법[1], [5], [6], [7], 인공 전위계(artificial potential field)를 이용하는 방법[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], 그리고 물체 사이의 거리 함수를 이용하는 방법[15] 등이 있다.

본 논문에서는 관절 로봇의 관절 공간에서의 충돌 회피 동작 계획을 주로 다루며, 시변 장애물을 다루기 위해 관측 시간(view-time) 개념을 도입한다. II절에서는 문제를 수학적으로

구성한다. III절에서는 관측 시간을 도입하고, 충돌 회피 가능도를 정의하여 관측 시간의 성질을 분석한 후, 이를 기초로 IV절에서는 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 유도한다. V절에서는 이 방법을 2 대의 SCARA 형 로봇의 무 충돌 동작 계획에 적용하고, VI절에서 결론을 내린다. 이 방법은 여러대의 관절 로봇이나 이동 로봇들의 무 충돌 동작 조정 문제, 한대의 관절 로봇이 주변의 시변 장애물을 피하는 문제, 이동 로봇이 주변의 시변 장애물을 피하는 문제등, 일반적인 충돌 회피 동작 계획 문제의 해결에 광범위하게 적용될 수 있다.

II. 문제 구성

1. 표기법

N : 관절 로봇의 자유도.

$q_i(t)$: 시각 t 에서 i 번째 일반화 관절 변수 값.

$\tau_i(t)$: 시각 t 에서 i 번째 관절 운동의 토크 값.

(i_x, i_y, i_z) : i 번째 링크 좌표계상에 표현된 한 점.

(x, y, z) : 기초 좌표계상에 표현된 한 점.

t_0 : 동작 계획 시작 시각.

t_f : 동작 계획 끝 시각.

$T = \{ t \mid t_0 \leq t \leq t_f \}$

${}^{i-1}A_i(q_i)$: i 번째 일반화 관절 변수값이 q_i 일 경우 i-1 번째 링크 좌표계에 대한 i 번째 링크 좌표계의 위치와 방향을 나타내는 homogeneous transformation 행렬, ${}^{i-1}A_n(q_i) \in R^{4 \times 4}$.

${}^0A_n(q_1, q_2, \dots, q_n) = {}^0A_1(q_1) \cdot {}^1A_2(q_2) \cdot \dots \cdot {}^{n-1}A_n(q_n) \in R^{4 \times 4}$.

$J_M(t)$: N 차 관절 공간상에서 시각 t 에 로봇의 형상을 나타내는 한 점, $J_M(t) \in R^N$.

J_M^* : N 차 관절 공간상에서 로봇 동작의 목표 형상.

$JOS(t)$: N 차 관절 공간상에서 시각 t 에 장애물이 차지하고 있는 공간, $JOS(t) \subset R^N$.

$COS(t)$: 카테시안 공간상에서 시각 t 에 장애물이 차지하고 있는 공간, $COS(t) \subset R^3$.

2. 로봇의 장애물에 관련된 개념들의 수학적 표현

위의 표기법을 사용하여 로봇과 장애물을 수학적으로 표현하고, 이들의 상호 관계 및 충돌을 기술한다.

[정의 1] 관절 공간에서 시각 t 에서의 로봇 형상 : $J_M(t)$

$J_M(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$

t ∈ T 인 모든 t 에 대응하는 $J_M(t)$ 를 생각하면, $J_M(t)$ 는 $J_M : T$

→ R^N 인 함수로서 로봇트의 관절 공간에서의 시간에 따른 궤적, 즉 동작을 나타낸다.

[정의 2] 관절 공간상 작업 공간 : JWS

$$JWS = \{ (q_1, q_2, \dots, q_N) \mid q_{i, \min} \leq q_i \leq q_{i, \max}, i = 1, 2, \dots, N \}$$

여기에서,

$q_{i, \min}$: i 번째 관절의 동작 범위의 하한 값

$q_{i, \max}$: i 번째 관절의 동작 범위의 상한 값

장애물의 카테시안 공간에서의 표현은 장애물이 시각 t 에 카테시안 공간상에서 차지한 부피로서 다음 $COS(t)$ 와 같다.

$$COS(t) = \{ (x, y, z) \mid (x, y, z) \in \text{Obstacle at time } t, (x, y, z) \in R^3 \}$$

특히 장애물의 시간에 따른 형태, 위치와 방향의 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$COS(t) = ROS(t) \cdot COS_0(t) + POS(t)$$

여기에서,

$COS_0(t)$: 시각 t 에서 장애물이 차지한 장애물 좌표계상의 모든 점들의 집합, $COS_0(t) \subset R^3$.

$ROS(t)$: 행렬 함수 $ROS : T \rightarrow R^{3 \times 3}$ 은 시간에 따른 장애물 좌표계의 회전 운동을 나타내며, 시각 t 에서 $ROS(t)$ 는 $R^{3 \times 3}$ 정규 직교(orthonormal)행렬.

$POS(t) = [x_{os}(t), y_{os}(t), z_{os}(t)]^T$: 벡터 함수 $POS : T \rightarrow R^3$ 는 시간에 따른 장애물 좌표계의 병진 운동을 나타내며, 시각 t 에서 $POS(t) \in R^3$.

보통 장애물은 형태 $COS_0(t)$ 는 고정되어 있고, $ROS(t)$ 또는 $POS(t)$ 가 시간에 따라 변하는 이동 장애물인 경우가 많다.

카테시안 공간에서의 장애물 $COS(t)$ 에 대응하는 관절 공간상에서의 장애물은 장애물과 충돌을 일으키는 로봇트의 부위에 따라서 다음과 같이 구분하여 정의된다.

[정의 3] 관절 공간상 장애물

1) $COS(t)$ 와 손끝의 충돌을 고려한 관절 공간상 장애물 :

$$JOS_0[COS(t)] = \{ (q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)) \mid {}^0A_N(q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)) \cdot (N_{x_e}, N_{y_e}, N_{z_e}, 1)^T = (x_{os}, y_{os}, z_{os}, 1)^T, \text{ for all } (x_{os}, y_{os}, z_{os}) \in COS(t) \}$$

여기에서, $(N_{x_e}, N_{y_e}, N_{z_e})$: 로봇트 손끝의 좌표

2) $COS(t)$ 와 몸통 전체의 충돌을 고려한 관절 공간상 장애물 :

$$JOS_b[COS(t)] = \bigcup_{i=1}^N JOS_i[COS(t)]$$

여기에서,

$$JOS_i[COS(t)] = \{ (q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)) \mid q_{j, \min} \leq q_j(t) \leq q_{j, \max}, \text{ for } j = i+1, \dots, N \\ {}^0A_N(q_1(t), q_2(t), \dots, q_i(t)) \cdot (i_{x_1}, i_{y_1}, i_{z_1}, 1)^T = (x_{os}, y_{os}, z_{os}, 1)^T, \text{ for all } (x_{os}, y_{os}, z_{os}, 1) \in COS(t), \text{ for all } (i_{x_1}, i_{y_1}, i_{z_1}) \in \text{the } i\text{-th link} \}$$

위에서 $JOS_i[COS(t)]$ 는 i 번째 링크가 $COS(t)$ 와 충돌할 때의 관절 공간상 로봇트 형상들의 집합이다. 앞으로 $JOS_0[COS(t)]$ 와 $JOS_b[COS(t)]$ 사이의 구분이 필요치 않은 일반적인 관절 공간상 장애물을 지칭할 경우 $JOS(t)$ 로 표시한다.

로봇트와 장애물 사이의 충돌은 $JM(t)$ 의 $JOS(t)$ 에의 포함관계에 의해서 다음과 같이 정의된다.

[정의 4] 시각 t 에서 로봇트와 장애물($COS(t)$) 사이의 충돌

1) 손끝과 $COS(t)$ 사이의 충돌

$$JM(t) \in JOS_0[COS(t)]$$

2) 몸통 전체와 $COS(t)$ 사이의 충돌

$$JM(t) \in JOS_b[COS(t)]$$

[정의 2]와 [정의 4]로부터 로봇트의 충돌 회피를 위한 제한 조건이 다음과 같이 정의된다.

[정의 5] 충돌 회피 제한 조건

$$JM(t) \in JCNC[COS(t)] \text{ for all } t \in T$$

여기에서, $JCNC[COS(t)]$ 는

1) 로봇트의 몸통 전체와 장애물간의 충돌을 피하려는 경우

$$JCNC[COS(t)] = JWS - JOS_b[COS(t)]$$

2) 로봇트 손끝과 장애물간의 충돌을 피하려는 경우

$$JCNC[COS(t)] = JWS - JOS_0[COS(t)]$$

본 논문에서는 로봇트 몸통 전체가 시변 장애물을 회피하기 위한 방법을 주로 다룬다.

III. 관측 시간과 충돌 회피 가능성

로봇트의 시변 장애물 회피 동작 계획을 위해서 관측 시간과 지나간 부피 개념을 도입하고, 충돌 회피 가능성을 정의하여, 이들의 성질 및 상호 관련성들을 분석한다.

1. 개념들의 정의

시변 장애물용 고정 장애물로 근사하기 위한 시간 단위인 관측 시간과 관측 시간의 길이인 관측 기간은 다음과 같이 정의된다.

[정의 6] i 번째 관측 시간 : vt_i

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

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

[정의 7] 관측 기간

1) i 번째 관측 기간 : v_{ii}

$$v_{ii} = t_{i+1} - t_i, i = 0, 1, 2, \dots$$

2) $i = 1, 2, 3, \dots$ 에 대하여 $v_{i0} = v_{ii}$ 이면 고정 관측 기간

3) $v_{i0} \neq v_{ii}, i \neq 0$ 인 i 가 존재하면 가변 관측 기간

시변 장애물 $COS(t)$ 가 vt_i 동안 지나간 공간상의 모든 점들의 집합을 다음과 같이 지나간 부피(swept volume)로 정의한다.

[정의 8] $COS(t)$ 가 vt_i 동안 지나간 부피 : $COS(vt_i)$

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

지나간 부피 $COS(vt_i)$ 를 피하도록 동작을 계획하면 적어도 vt_i 동안 충돌이 발생하지 않으므로 시변 장애물 $COS(t)$ 를 vt_i 동안 $COS(vt_i)$ 로 근사하여 고정 장애물로 간주한다.

$COS(vt_i)$ 에 대한 관절 공간상에서의 장애물은 [정의 3]에서와 같이 손끝의 충돌을 고려하는 경우 $JOS_0[COS(vt_i)]$ 이고, 로봇트 몸통 전체의 충돌을 고려하는 경우 $JOS_b[COS(vt_i)]$ 이다. 앞으로 $JOS_0[COS(vt_i)]$ 와 $JOS_b[COS(vt_i)]$ 사이의 구분이 필요치 않은 경우 $COS(vt_i)$ 에 대한 일반적인 관절 공간상 장애물을 $JOS[COS(vt_i)]$ 로 지칭한다.

충돌 회피 가능성은 로봇트가 장애물을 피할 수 있는 가능성을 나타내는 수학적인 척도이다. 시각 t 에서의 충돌 회피 가능성은 로봇트의 상태, 장애물의 상태, 그리고 로봇트와 장애물 사이의 상대적인 관계등에 의해 결정되므로 충돌 회피 동작 계획 문제의 상태 벡터(state vector)를 다음과 같이 정의한다.

[정의 9] 충돌 회피 동작 계획 문제의 시각 t에서의 상태 벡터 : $\underline{s}(t)$

$$1) \underline{s}(t) = (r(JOS(t)), m(JM(t)), m(JOS(t)), d(JM(t), JOS(t))) \in R^4$$

$$2) r(JOS(t)) = \text{Min} \{ \text{Max} \{ (X - Y) \cdot (X - Y)^T \}^{1/2} \mid Y \in R^n, X \in JOS(t) \}$$

$$3) m_p(JM(t)) = f_p(\text{vel}_p(JM(t)), \text{acc}_p(JM(t)), \text{jer}_p(JM(t)))$$

여기에서,

(1) $\text{vel}_p(JM(t)), \text{acc}_p(JM(t)), \text{jer}_p(JM(t))$: 로봇트의 기구학적, 동력학적인 한계에 의해 제한 받는 시각 t에서 p 방향으로의 JM(t)의 속도, 가속도, 저크의 최대값 (<그림 1> 참조).

(2) $f_p : R^3 \rightarrow R^1$ 은 $f_p(0, 0, 0) = 0$ 이고, 모든 변수 $\text{vel}_p(JM(t)), \text{acc}_p(JM(t)), \text{jer}_p(JM(t))$ 에 대한 증가 함수로서 p 방향으로의 운동 능력을 나타냄.

$$4) m_p(JOS(t)) = f_p(\text{vel}_p(JOS(t)), \text{acc}_p(JOS(t)), \text{jer}_p(JOS(t)))$$

여기에서,

$\text{vel}_p(JOS(t)), \text{acc}_p(JOS(t)), \text{jer}_p(JOS(t))$: 시각 t에서 p 방향으로의 JOS(t)의 속도, 가속도, 저크값(<그림 1> 참조)

$$5) d(JM(t), JOS(t)) = \text{Min} \{ (X - JM(t)) \cdot (X - JM(t))^T \}^{1/2} \mid X \in JOS(t)$$

상태 벡터에서 $r(JOS(t))$ 는 관절 공간에서 장애물들 포함하는 가장 작은 구의 반지름이다. $m_p(JM(t))$ 는 로봇트의 p 방향으로의 운동 능력, $m_p(JOS(t))$ 는 장애물의 p 방향으로의 운동 능력을 의미한다. $d(JM(t), JOS(t))$ 는 로봇트와 장애물 사이의 거리를 의미한다. 위의 4 개의 변수들 사이에는 부분적인 연관성이 있어서 완전히 독립된 변수들은 아니며, 이들 외에 충돌 회피 동작 계획 문제의 상태를 기술하는 다른 변수들을 더 정의할 수 있다.

상태 벡터를 이와 같이 정의하면 충돌 회피 가능성은 다음과 같이 정의된다.

[정의 10] 충돌 회피 가능성도 : $AVM(\underline{s}(t))$

충돌 회피 동작 계획 문제에서 $AVM(\underline{s}(t))$ 는 상태 공간 S에서 V로의 함수 $AVM : S \rightarrow V$ 이다.

여기에서,

S : 모든 상태 벡터 $\underline{s}(t)$ 들의 집합으로서 $S \subset R^4$

V = { x | $x \in R^1, x \geq 0$ }

일반적으로 로봇트의 운동 능력 $m_p(JM(t))$ 가 클수록, 장애물의 운동 능력 $m_p(JOS(t))$ 가 작고 장애물의 크기 $r(JOS(t))$ 가 작을수록, 그리고 장애물과 로봇트 사이의 거리 $d(JM(t), JOS(t))$ 가 클수록 로봇트의 충돌 회피가 용이하다. 이러한 사실을 바탕으로 다음과 같이 충돌 회피 가능성도의 크기를 정의한다.

[정의 11] 충돌 회피 가능성도의 크기

1) 시각 t_1 에서 상태 벡터가 $\underline{s}(t_1)$ 이면, $t \geq t_1$ 인 어떤 t에서 로봇트가 장애물과 충돌 하는 경우에

$$AVM(\underline{s}(t_1)) = 0$$

2) 시각 t_1 에서 상태 벡터가 $\underline{s}(t_1)$ 이면, $t \geq t_1$ 인 모든 t에서 로봇트가 장애물과 충돌 할 수 없는 경우에

$$AVM(\underline{s}(t_1)) = \infty$$

3) 시각 t에서의 상태 벡터 $\underline{s}(t)$ 에서 4 개의 변수중 3 개는 일정한 경우, 하나의 변수만에 대한 함수로서의 충돌 회피 가능성도의 크기는

$$(1) r(JOS_1(t)) \leq r(JOS_2(t)) \text{ 이면,}$$

$$AVM(r(JOS_1(t))) \geq AVM(r(JOS_2(t)))$$

$$(2) m_p(JM_1(t)) \leq m_p(JM_2(t)) \text{ 이면,}$$

$$AVM(m_p(JM_1(t))) \leq AVM(m_p(JM_2(t)))$$

$$(3) m_p(JOS_1(t)) \leq m_p(JOS_2(t)) \text{ 이면,}$$

$$AVM(m_p(JOS_1(t))) \geq AVM(m_p(JOS_2(t)))$$

$$(4) d(JM_1(t), JOS_1(t)) \leq d(JM_2(t), JOS_2(t)) \text{ 이면,}$$

$$AVM(d(JM_1(t), JOS_1(t))) \leq AVM(d(JM_2(t), JOS_2(t)))$$

위의 정의에 의해서 충돌 회피가 용이할수록 충돌 회피 가능성도가 큰 값을 갖는다.

2. 개념들의 성질 및 관련성

관측 시간을 도입하여 문제를 해결하기 위해 앞서 정의한 개념들의 성질 및 상호 관련성들을 분석한다. 여기에서 서로 다른 관측 기간을 갖는 2 가지 관측 시간 체계를 첫 첨자 1 과 2 로 구분하여 vt^1_i 와 vt^2_i 로 표기한다.

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

$$1) vt^1_i \leq vt^2_j \text{ 이면 } \cos(vt^1_i) \leq \cos(vt^2_j) \text{ 이다.}$$

$$2) \cos(vt^1_i) \leq \cos(vt^2_j) \text{ 이면 } JOS[\cos(vt^1_i)] \leq JOS[\cos(vt^2_j)]$$

보통의 경우 관측 기간 vi_i 가 길어지면 $\cos(vt_i)$ 가 커져서 $JOS[\cos(vt_i)]$ 도 커진다. [성질 1]로부터 관측 시간의 도입에 따른 동작 계획상의 장단점이 다음과 같이 유도된다.

[성질 2] 관측 시간의 길이에 따른 충돌 회피 가능성도의 크기 : $vt^1_i \leq vt^2_j$ 이면,

$$1) AVM(r(JOS_1(t))) \geq AVM(r(JOS_2(t))) \text{ 이다.}$$

$$2) AVM(d(JM(t), JOS_1(t))) \geq AVM(d(JM(t), JOS_2(t)))$$

$$\text{여기에서 } JOS_1(t) = JOS[\cos(vt^1_i)], JOS_2(t) = JOS[\cos(vt^2_j)]$$

보통의 경우 관측 기간 vi_i 가 길어지면 $JOS[\cos(vt^1_i)]$ 가 커져서 장애물의 크기에 따른 충돌 회피 가능성이 낮아지고, JM(t)와의 거리도 작아지므로 거리에 따른 충돌 회피 가능성이 낮아진다. 따라서 관측 시간을 이용하는 경우에는 장애물의 크기, 로봇트와 장애물간의 거리의 측면에서 충돌 회피에 불리해진다.

[성질 3] 관측 시간에서의 지나간 부피의 운동 능력 :

$$t \in vt_i \text{ 인 } t \text{ 에서 } JOS(t) = JOS[\cos(vt_i)] \text{ 이면, } t \in vt_i \text{ 인 } t \text{ 에서 } m_p(JOS(t)) = 0$$

장애물이 로봇트 방향으로 다가오는 경우 관측 시간을 이용하면 장애물의 운동 능력의 측면에서 충돌 회피에 유리해진다.

각 관측 시간마다 지나간 부피로 근사되어진 시변 장애물들을 피하기 위해 고려해야할 성질들은 다음과 같다.

[성질 4] 충돌 회피를 위한 고려 사항 :

관측 시간 $vt_i, i = 0, 1, 2, \dots$ 에서 지나간 부피 $\cos(vt_i)$ 를 장애물로 간주하면,

1) $JM(t) \notin JOS[\cos(vt_i)]$ 이면, $t \in \{ t \mid t_i < t < t_{i+1} \}$ 인 모든 t에서 로봇트가 장애물과 충돌하지 않는다.

2) $JM(t) \in \{ JOS[\cos(vt_i)] \cup JOS[\cos(vt_{i+1})] \}$ 이면, $t = t_{i+1}$ 에서 로봇트가 장애물과 충돌하지 않는다.

3) $j = i, i+1, i+2, \dots$ 에서 $JM_j \in JOS[\cos(vt_j)]$ 이면, $JM(t_i)$ 에서 JM_j 까지 장애물과 충돌하지 않는 JM(t)의 경로와 궤적이 존재하지 않는다.

t = t_{i+1} 에서는 $JOS[\cos(vt_i)]$ 와 $JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 을 동시에 피하여야 충돌 회피가 보장된다.

IV. 시변 장애물을 피하는 로봇의 동작 계획 방법

동작 계획은 관측 시간을 단위로 [성질 4]의 1), 2)를 만족시키는 과정으로서 다음과 같다.

[동작 계획 과정]

(과정 1) $i = 0$ 부터 다음 (과정 2)를 수행한다.

(과정 2) 관절 공간상에서 V-그래프 탐색법(view graph search method)을 이용하여 관측 시간 vt_i 동안 $JOS[\cos(vt_i)]$ 를 피하도록 $J_M(t_i)$ 로부터 J_M 까지의 경로를 구한다.

(과정 3) 구해진 경로상에 로봇의 기구학적, 동력학적 한계에 의해 결정 되는 운동 능력 범위 내에서 궤적 계획하여 모든 $t \in vt_i$ 에 대하여 $J_M(t)$ 를 구한다.

(과정 4) $J_M(t_{i+1}) \in JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 여서 시각 $t = t_{i+1}$ 에 충돌 가능성이 있는 경우 적절한 관측 시간 이전부터 $JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 을 피하도록 (과정 2)부터 다시 동작 계획한다.

(과정 5) $J_M(t_{i+1}) = J_M$ 이면 동작 계획을 끝내고 그렇지 않으면 i 를 1 증가하여 (과정 2)부터 계속 동작 계획한다.

관측 시간 vt_i 에서 $JOS[\cos(vt_i)]$ 를 피하도록 동작 계획했을 때 만일 $J_M(t_{i+1}) \in JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 이면 관측 시간 vt_{i+1} 의 초기 시각 t_{i+1} 에 로봇이 장애물과 충돌할 가능성이 있으므로 (과정 4)가 필요하다. 이 경우 다음의 방법으로 적당한 관측 시간 이전부터 $J_M(t)$ 가 $JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 을 피하도록 동작 계획한다.

[r 관측 시간 이전의 장애물 회피 방법]

- 1) $j = 0, 1, \dots, i$ 들 중 $J_M(t_j) \notin JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 인 가장 큰 m 을 구한다.
- 2) $j = m, m+1, \dots, i$ 인 vt_j 에서 관절 공간상 장애물을 $JOS[\cos(vt_j)] \leftarrow JOS[\cos(vt_j)] \cup JOS[\cos(vt_{i+1})]$ 으로하고, vt_m 부터 다시 경로와 궤적을 계획한다($r = i+1-m$).

V. 2 대의 SCARA형 로봇의 충돌 회피 동작 계획에의 적용

1. 2 대의 SCARA형 로봇 시스템의 구성

(1) 2 대의 로봇은 <그림 2>와 같이 같은 평면 위에서 동작하며, 다음과 같은 치수를 갖는다.

$$l_1 = 350 \text{ mm}, l_2 = 250 \text{ mm}, r = 25 \text{ mm}, d = 900 \text{ mm}$$

(2) R1의 손끝은 R2의 동작에 관계 없이 카테시안 공간에서 직선 동작한다.

(3) R2는 R1을 피하면서 관절 공간상에 주어진 초기 형상에서 목표 형상으로 동작한다.

R1은 R2에 대한 시변 장애물이므로 R1을 장애물 $\cos(t)$ 로 표시하고, R2의 관절 좌표계상의 형상을 $J_M(t)$ 로 표시한다.

2. 로봇의 지나간 부피와 관절 공간상의 장애물

R1의 지나간 부피 $\cos(vt_i)$ 는 다각형이 아니거나 오목한 경우가 있으나 쉽게 다루기 위해 볼록 다각형으로 근사한다.

관절 공간상의 장애물 $JOS_b[\cos(vt_i)]$ 를 구하기 위해 slice projection 방법을 이용한다[16]. 일반적으로 관절 공간상 장애물은 외형이 곡선이어서 V-그래프 탐색법을 적용하기 어렵다. 여기에서는 관절 공간상 장애물 $JOS_b[\cos(vt_i)]$ 를 실제 관절 공간상 장애물을 포함하는 가장 작은 직사각형으로 근사시킨다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서의 두 로봇의 동작 특성은 다음과 같다.

$$q1_{\min} = -130^\circ,$$

$$q1_{\max} = 100^\circ$$

$$q2_{\min} = -120^\circ,$$

$$q2_{\max} = 150^\circ$$

$$| \dot{q1}_{\max} | = 131^\circ / \text{sec.}, \quad | \dot{q2}_{\max} | = 180^\circ / \text{sec.}$$

$$| \ddot{q1}_{\max} | = 656^\circ / \text{sec.}^2, \quad | \ddot{q2}_{\max} | = 900^\circ / \text{sec.}^2$$

R1의 손끝의 시점, 종점 : (500, -200), (450, 300) (mm)

R2의 초기 형상, 목표형상 : (-60°, 40°), (60°, -60°)

R1의 동작 : 6 sec. 동안 카테시안 공간에서 등속 직선 운동

다음과 같은 4 가지의 관측 시간 체제에서의 충돌 회피 동작 결과를 비교한다.

<경우 1> : 고정 관측 시간 $vi_i = 0.3 \text{ sec.}$ 를 갖는 관측 시간

<경우 2> : 고정 관측 시간 $vi_i = 0.6 \text{ sec.}$ 를 갖는 관측 시간

<경우 3> : 고정 관측 시간 $vi_i = 1.0 \text{ sec.}$ 를 갖는 관측 시간

<경우 4> : 고정 관측 시간 $vi_i = 1.5 \text{ sec.}$ 를 갖는 관측 시간

<경우 2>에서 R2의 손끝이 카테시안 공간에서 직선 운동할 경우 <그림 3>과 같이 R1과 충돌한다. 관측 시간을 이용한 충돌 회피 방법에 의하면 <그림 4>와 같이 R1을 피하는 동작을 할 수 있다. 첫 번째 관측 시간에서의 $JOS_b[\cos(vt_0)]$ 는 <그림 5>와 같고 이것을 직사각형으로 근사하면 <그림 6>이 된다.

관측 시간을 달리한 위의 4 가지 경우에 장애물을 피하는 관절 공간상에서의 경로와 궤적은 <그림 7>과 같다. 관측 시간 길이가 짧을수록 계산량은 많아지지만 지나간 부피와 관절 공간상 장애물의 크기가 작아져서 불필요한 회피 동작이 적어지고 미세한 동작을 한다.

<그림 4>와 같이 장애물 회피시 불필요한 동작을 하는 이유는 세 가지가 있다. 첫 번째는 관측 시간 길이가 0 이 아니기 때문이며, 두 번째는 R1 의 지나간 부피를 구할 때 볼록 다각형으로 근사시켰기 때문이며, 세 번째는 관절 공간 장애물을 구할 때 직사각형으로 근사시켰기 때문이다. 이 중 가장 주요한 이유는 세 번째의 이유로서 <그림 5>, <그림 6>에서 실제 관절 공간 장애물과 근사시킨 장애물 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 과도한 회피 동작은 지나간 부피와 관절 공간 장애물을 실제에 가깝도록 모델링하고 관측 시간을 줄이므로서 피할 수 있다.

VI. 결론

본 연구의 내용은 다음과 같이 요약 된다.

- 관측 시간을 이용한 로봇의 시변 장애물 회피 동작 계획 문제에 대한 접근 방법을 제시하였다.
- 충돌 회피 가능도를 정의하여 충돌 회피와 관련하여 관측 시간의 성질을 분석하였다.
- 분석된 성질을 이용하여 시변 장애물 회피 동작 계획 방법을 제안하였다.
- 제안된 방법을 2 대의 SCARA형 로봇의 충돌 회피 동작 계획에 적용하였다.

제안된 동작 계획 방법의 특징 및 장단점은 다음과 같다.

- 여러대의 관절 로봇이나 이동 로봇들의 무 충돌 동작 조정 문제, 한대의 관절 로봇이 주변의 시변 장애물을 피하는 문제, 이동 로봇이 주변의 시변 장애물을 피하는 문제 등, 일반적인 충돌 회피 동작 계획 문제의 해결에 광범위하게 적용될 수 있다.

- 시변 장애물을 고정 장애물로 근사함으로써 주어진 관측 시간 내에서는 고정 장애물 회피 방법을 이용할 수 있다.
 - 관측 시간을 도입함으로써 충돌 회피 가능도의 측면에서는 대체적으로 불리하다.
 - 관측 시간이 길어지면 피해야할 장애물의 크기가 커져서 불필요한 회피 동작이 커지고 충돌 회피 가능도가 작아지지만 동작 계획에 필요한 계산량이 적어진다.
 - 관측 시간이 짧아지면 피해야할 장애물의 크기가 작아져서 불필요한 회피 동작이 줄어들고 충돌 회피 가능도는 높아지지만 전체 동작 계획에 필요한 계산량이 많아진다.
 - 충돌 회피 가능도와 계산량 사이의 관계를 고려하여 적절한 관측 시간 길이를 결정하여야한다.
- 관측 시간을 이용한 시변 장애물 회피에 관한 향후의 연구 방향은 다음과 같다.
- 시간에 따른 장애물의 운동에 적응하여 관측 기간을 변화시키는 가변 관측 기간을 이용하는 방법이 필요하다.
 - 지나간 부피, 관절 공간상 장애물들을 실제 모양에 가깝게 모델링할 수 있는 방법이 필요하다.
 - 동력학적인 제한 조건을 만족 시키는 방법을 연구한다.
 - 제안된 방법을 다양한 충돌 회피 동작 계획 문제에 적용한다.

참 고 문 헌

[1] B.H.Lee, "Constraint identification in time-varying obstacle avoidance for mechanical manipulators," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.19, No.1, pp.140-143, Jan./Feb. 1989.

[2] K.Fujimura, H.Samet, "A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.1, pp.61-69, Feb. 1989.

[3] M.Erdmann, T.Lozano-Perez, "On multiple moving objects," Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1419-1424, 1986.

[4] Ching L.Shin, Tsu T.Lee, William A.Gruver, "A Unified Approach for robot motion planning with moving polyhedral obstacles," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.20, No.4, pp.903-915 Jul./Aug. 1990.

[5] B.H.Lee, C.S.G.Lee, "Collision-free motion planning of two robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.17, No.1, pp.21-32, Jan./Feb. 1987.

[6] K.Kant, S.W.Zucker, "Toward efficient trajectory planning: The path-velocity decomposition," The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.3, pp.72-89, Fall 1986.

[7] K.J.Kyriakopoulos, G.N.Saridis, "Collision avoidance of mobile robots in non-stationary environments," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.904-909, April 1991.

[8] B.H.Krogh, "A generalized potential field approach to obstacle avoidance control," SME Conference Proceedings, Robotics Research: The Next Five Years and Beyond, Bethlehem, Pennsylvania, Aug. 1984.

[9] O.Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," The International Journal Robotics Research, pp.90-98, Spring 1986.

[10] Charles W.Warren, "Mobile robot path coordination using artificial potential fields," Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.500-505, 1990.

[11] Kamal Kant, Steven Zucker, "Planning collision-free trajectories in time-varying environments: A two-level hierarchy," Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1644-1649, 1988.

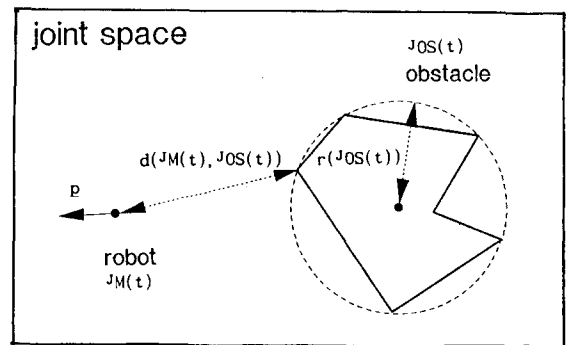
[12] Johann Borenstein, Yorem Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.19, No.5, pp.1179-1187, Sep./Oct. 1989.

[13] Yorem Koren, Johann Borenstein, "Potential field method and their inherent limitations for mobile robot navigation," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1398-1404, April 1991.

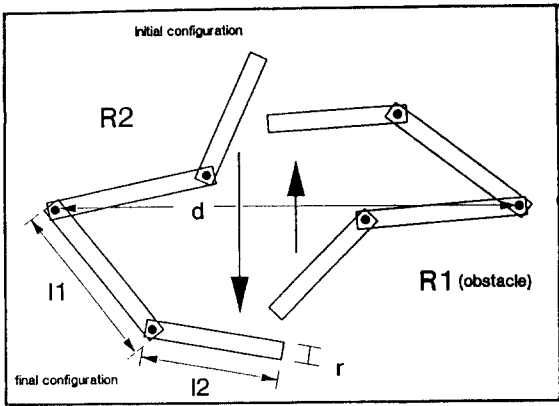
[14] Richard Volpe, Pradeep Khosla, "Manipulator control with superquadric artificial potential functions: Theory and experiments," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.20, No.6, pp.1423-1436, Nov./Dec. 1990.

[15] Elmer G. Gilbert, Daniel W. Johnson, "Distance function and their application to robot path planning in the presence of obstacles," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.1, No.1, pp.21-30, Mar. 1985.

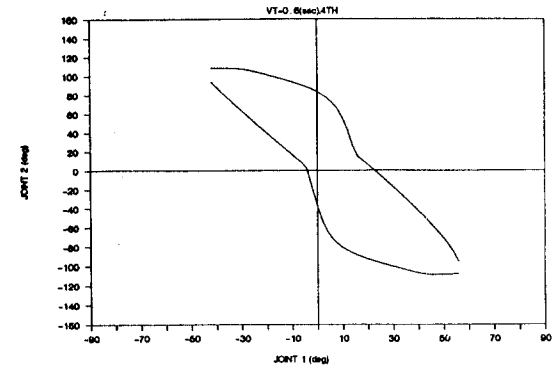
[16] T.Lozano-Perez, "A simple motion planning algorithm for general robot manipulators," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.3, No.3, pp.224-238, June 1987.



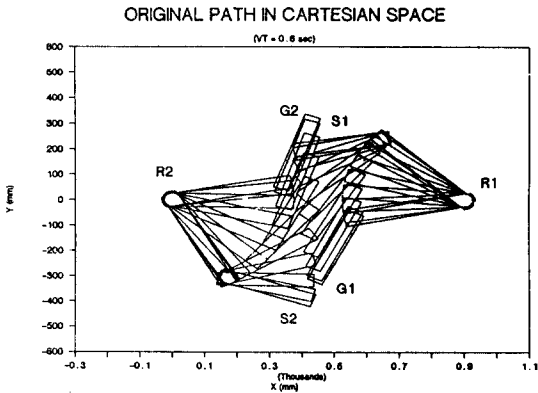
<그림 1> 관절 공간에서의 충돌 회피 동작 계획 문제



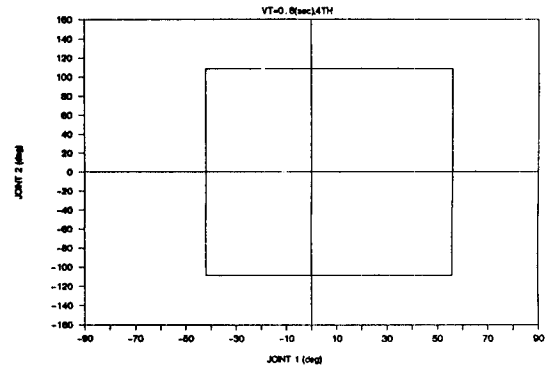
<그림 2> 두 SCARA 로봇 시스템의 구성



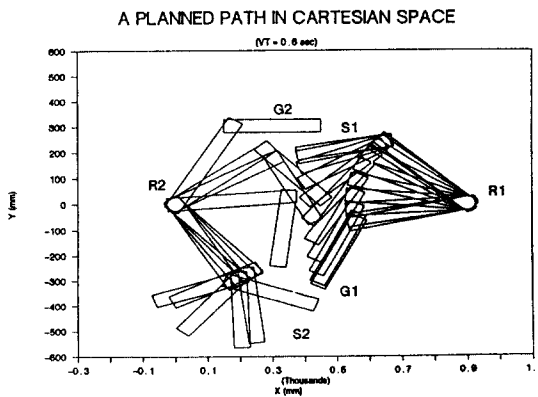
<그림 5> 관절 공간상 장애물(<경우 2>의 첫번째 관측 시간)



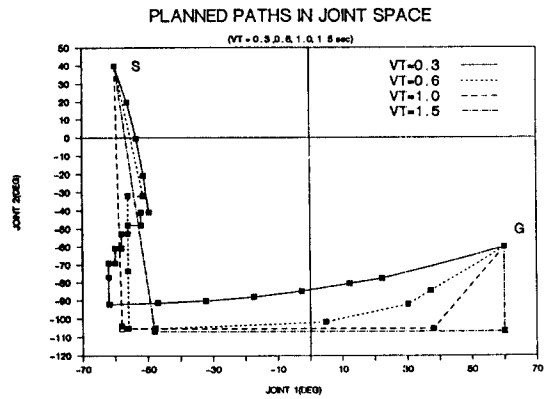
<그림 3> 카테시안 공간에서의 두 로봇의 충돌(<경우 2>)



<그림 6> 근사된 관절 공간상 장애물



<그림 4> 카테시안 공간에서의 충돌 회피 동작(<경우 2>)



<그림 7> 관측 시간에 따른 관절 공간에서의 충돌 회피 경로 및 궤적의 변화