

프리아크를 이용한 3차원 형상 공간 장애물 구성 방법

A Method for Constructing 3-Dimensional C-obstacles Using Free Arc

이 석 원, 임 충 혁

(Seok-Won Lee and Chung-Hyuk Yim)

Abstract : We suggests an effective method to construct time-varying C-obstacles in the 3-dimensional configuration space (C-space) using free arc. The concept of free arc was defined mathematically and the procedure to find free arc in the case of 2-dimensional C-space was derived in [1]. We showed that time-varying C-obstacles can be constructed efficiently using this concept, and presented simulation results for two SCARA robot manipulators to verify the efficacy of the proposed approach. In this paper, extensions of this approach to the 3-dimensional C-space is introduced since nearly all industrial manipulators are reasonably treated in the two or three dimensional C-space for collision avoidance problem. The free arc concept is summarized briefly and the method to find free arc in the 3-dimensional C-space is explained. To show that this approach enables us to solve a practical collision avoidance problem, simulation results for two PUMA robot manipulators are presented.

Keywords : C-obstacles, free arc, 3-dimensional C-space, collision avoidance, PUMA robot

I. 서론

일반적으로 로봇의 작업 공간(workspace) 내에는 다른 로봇을 포함한 각종 기기나 작업자들과 같은 장애물이 있기 마련이다. 이러한 장애물들은 위치 및 형태가 고정되어 있는 고정 장애물(stationary obstacles)과 시간에 따라 위치 및 형태가 변화할 수 있는 시변 장애물(time-varying obstacles)로 분류할 수 있다. 로봇은 작업 공간 내부에 있는 장애물들의 기하학적 형태와 이동 경로나 궤적에 대한 정보를 바탕으로 자신의 기하학적 정보 및 경로, 궤적 등과 비교하여 충돌 감지(collision detection)를 하고, 만약 충돌 가능성이 있으면 충돌 시간과 위치를 예상하고 충돌회피 알고리즘을 수행하여 새로운 충돌회피 경로와 궤적을 구성하는데 이러한 일련의 과정을 충돌회피 동작 계획이라 한다. 고정 장애물에 대한 충돌회피 동작 계획 문제는 고정 장애물에 대한 기하학적인 해석에 의한 경로 계획만으로 풀 수 있는 반면에 시변 장애물에 대해서는 경로 계획 이외에 상황에 맞도록 시간에 따른 변화까지 고려한 궤적 계획도 수행해 주어야 한다[2,3].

시변 장애물을 포함한 환경에서의 로봇의 충돌회피 동작 계획 문제를 풀기 위한 접근 방법 중 Lozano - Perez와 Wesley[4]에 의해 제안된 형상 공간(configuration space : C-space)을 이용한 방법은 형상 공간 장애물(C-obstacles)을 구성하는 단계와 형상 공간 장애물들을 제외한 충돌회피 형상 공간(collision-free C-space)에서 최종적인 충돌회피 경로를 찾아내는 단계로 나누어진다. 형상 공간을 이용한 방법은 로봇이 한 점으로 표현되며 로봇의 충돌회피 동작 계획 문제가 초기 형상으로부터 목표 형상까지 형상 공간 장애물들과의 충돌을 회피할 수 있는 경로를 찾아내는 문제로 단순화된다는 장점을 가지고 있는 반면에 시변 형상 공간 장애물을 구하는 데 너무 많은 시간이 걸린다는 단점을 가지고 있다[5]. 시변 장애물을 포함한 환경에서 이러한 형상 공간을 사용한 방법들의 문제를 해결하기 위해서, [1]에서는 시변 형상 공간 장애물을 효율적으로 구성하는 방법을 제안

하고 2차원 형상 공간의 경우에 대하여 이론 전개 및 검증을 하였다. 기존의 충돌회피 동작 계획 알고리즘들과 비교했을 때 제안한 방법은 시변 장애물을 포함하는 환경을 보다 효율적으로 구성함으로써 동작 계획에 소요되는 계산 시간을 감소시킬 수 있었으며, 동시에 로봇의 동작 제한 조건을 고려할 수 있었다.

형상 공간을 사용한 방법들이 가지고 있는 또 하나의 문제점은 로봇의 자유도가 증가함에 따라 계산 복잡도(computational complexity)가 지수적으로 증가한다는 점이다. 이 문제를 해결하기 위해서 산업용 매니플레이터 중 SCARA형 로봇매니플레이터의 경우는 2차원 형상 공간상의, 6축 회전 관절형 매니플레이터의 경우는 3차원 형상 공간상의 문제로 근사화 시켜서 풀 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 [1]에서 제안한 프리아크 개념을 이용한 로봇의 충돌회피 동작 계획 방법을 3차원 형상 공간에서 적용하기 위한 과정을 유도하고, 두 대의 PUMA형 로봇 시스템의 충돌 회피 문제를 대상으로 한 모의 실험 결과를 제시함으로써 널리 사용되어지는 산업용 로봇에도 적용 가능한 방법임을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 M 차원 형상 공간에서의 프리아크의 개념을 요약하고, 3차원 형상 공간에서 프리아크의 표현 방법을 설명한다. III장에서는 로봇의 동작 제한 조건 및 충돌 제한 조건을 고려하여 3차원 형상 공간에서 프리아크를 찾아내는 과정을 유도한다. IV장에서는 제안한 방법을 두 대의 PUMA형 로봇 매니플레이터들의 충돌회피 동작 계획 문제에 적용한 모의 실험 결과를 제시하고, V장에서 결론을 기술한다.

II. 프리아크 개념을 이용한 로봇의 충돌 회피 동작 계획 기법

프리아크는 매 샘플링 시간마다 충돌회피 동작 제한 조건을 만족하는 형상점들로 구성되는 집합으로 다음과 같이 정의한다.

정의 2.1 : 시간 t_i 에서의 프리아크 FA_i

$$FA_i = \{q_k \mid q_k \in CN_s(t_i) \cap CN_c(t_i)\} \quad (1)$$

논문접수 : 2002. 4. 17., 채택확정 : 2002. 9.17.

이석원 : 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부(lswss@lion.woosong.ac.kr)

임충혁 : 서울산업대학교 기계설계자동화공학부(chyim@snut.ac.kr)

여기서 q_k 는 $q_{1,k}, q_{2,k}, \dots, q_{m,k}$ 로 구성된 M 자유도 로봇의 시간 t_k 에서의 형상점, $CN_s(t)$ 는 축 동작의 속도와 가속도 제한 조건을 만족시키는 형상점들의 집합, $CN_c(t)$ 는 충돌회피 형상 공간에 포함된 형상점들의 집합이다.

프리아크를 효율적으로 표현하기 위해서 q_k 가 목표 형상점 q_0 을 중심으로 하는 반지름 r_k 인 M 차원 동심구의 경계상에 존재한다고 가정하고, 목표 형상점을 중심으로 하는 새로운 좌표계를 도입하면 q_k 의 각 축 성분 $q_{i,k}$ 는 r_k 와 새로운 좌표계를 중심으로 표현되는 $M-1$ 개의 변수로 구성되는 벡터 ψ_k 에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$q_{i,k} = f_i(r_k, \psi_k), \quad i=1,2,\dots,M \quad (2)$$

r_k 는 매 샘플링 시간마다 고정된 상수이므로 프리아크는 ψ_k 의 범위로써 표현할 수 있으며, 각 샘플링 시간의 프리아크의 집합 $\{FA_0, \dots, FA_k, \dots, FA_N\}$ 을 구하면 이로부터 $M-1$ 차원 벡터들의 집합 $\{\psi_0, \dots, \psi_k, \dots, \psi_N\}$ 을 결정할 수 있다. 그리고, (2)를 이용하면 최종적으로 형상 공간상에서의 동작 제한 조건을 만족하는 충돌회피 경로 $\{q_0, \dots, q_k, \dots, q_N\}$ 를 구할 수 있다.

동시에 프리아크의 집합 $\{FA_0, \dots, FA_k, \dots, FA_N\}$ 으로부터 $\{\psi_0, \dots, \psi_k, \dots, \psi_N\}$ 를 선택할 때 성능 지수를 선점함으로써 최적화를 고려할 수 있으므로 다음과 같은 준최적 충돌회피 문제(Sub-Optimal Collision Avoidance Problem : SOCAP)를 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} \quad \{\psi_0, \dots, \psi_k, \dots, \psi_N\} \text{ s.t.} \\ & \text{minimize} \quad G(\psi_0, \dots, \psi_k, \dots, \psi_N) \\ & \text{subject to} \quad (f_1(r_k, \psi_k), f_2(r_k, \psi_k), \dots, f_M(r_k, \psi_k)) \\ & \quad \quad \quad \in CN_s(t) \cap CN_c(t) \\ & \quad \quad \quad \text{for } k=0,1,\dots,N \end{aligned}$$

3차원 형상 공간에서는 목표 형상점을 중심으로 한 새로운 좌표계로서 구형 좌표계를 선택한다. 이 경우에 반지름 r_k 인 M 차원 동심구의 경계는 q_N 을 중심으로 하는 3차원 동심구의 형태를 갖게 되며 프리아크상의 형상점 q_k 의 각 축 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} q_{1,k} &= f_1(r_k, \psi_k) = r_k \cos \theta_k \sin \varphi_k + q_{1,N}, \\ q_{2,k} &= f_2(r_k, \psi_k) = r_k \sin \theta_k \sin \varphi_k + q_{2,N}, \\ q_{3,k} &= f_3(r_k, \psi_k) = r_k \cos \varphi_k + q_{3,N}, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\psi_k = [\theta_k \ \varphi_k]$ 이고, θ_k, φ_k 는 각각 $\theta_k \in [0, 2\pi)$, $\varphi_k \in [0, \pi)$ 의 범위를 만족한다. 그림 1은 목표 형상점을 원점으로 하는 구형 좌표계에 대하여 r_k 와 θ_k, φ_k 에 의해서 표현되는 형상점 q_k 를 보여준다.

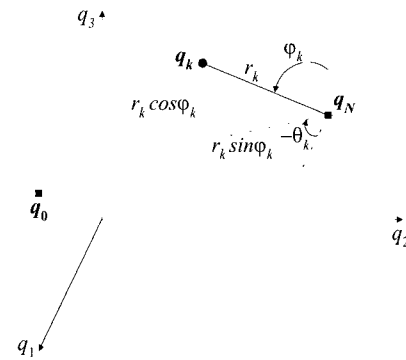


그림 1. 3차원 형상 공간에서의 구형 좌표계.

Fig. 1. The spherical coordinate frame attached to the goal configuration.

III. 3차원 형상 공간상의 문제에 대한 적용 방법

이번 장에서는 3차원 형상 공간의 경우에 프리아크를 찾아내고 표현하는 방법을 설명한다. (1)과 같이 정의된 프리아크는 계획적 유연 제한 조건을 만족하는 형상점들의 집합을 $FA_{s,k}$ 라 표현하고 충돌 제한 조건을 만족하는 형상점들의 집합을 $FA_{c,k}$ 라 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} FA_k &= \{q_k \mid q_k \in CN_s(t)\} \cap \{q_k \mid q_k \in CN_c(t)\} \\ &= FA_{s,k} \cap FA_{c,k} \end{aligned} \quad (4)$$

III.1절과 III.2절에서 $FA_{c,k}$ 를 구하는 과정을, III.3절에서는 $FA_{s,k}$ 를 구하는 과정을 설명한다.

1. 작업 공간에 포함되는 형상점들의 집합 $FA_{cs,k}$

3차원 형상 공간의 경우에 q_k 가 존재한다고 가정한 3차원 동심구들 사이의 거리가 모두 같다면 k 번째 샘플링 시간 t_k 에서의 로봇 매니퓰레이터의 형상점 $q_k = (q_{1,k}, q_{2,k}, q_{3,k})$ 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\|q_k - q_N\| = \|q_0 - q_N\| \cdot (N-k)/N \quad (5)$$

위 식을 만족하는 형상점 q_k 들의 집합은 중심이 q_N 에 위치해 있고 반지름이 $\|q_0 - q_N\| \cdot (N-k)/N$ 인 구로써 표현할 수 있다. 이러한 동심구들을 효율적으로 표현하기 위해서 목표 형상점을 중심으로 한 구형 좌표계를 도입한다. q_N 을 원점으로 하는 구형 좌표계를 중심으로 이 구를 표현하면 (3)과 (5)에서와 같이 그 구의 반지름 r_k 와 $[\theta_k \ \varphi_k]$ 의 구간으로 나타낼 수 있다. 즉, 시간 t_k 에 형상점들이 위치해 있는 동심구 C_k 는 다음과 같이 표현할 수 있고,

$$C_k = \{q_k \mid 0 \leq \theta_k < 2\pi, 0 \leq \varphi_k < \pi\} \quad (6)$$

3차원 형상 공간에서 로봇의 작업 공간 CS 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$CS = \{q \mid q_{i,\min} \leq q_i \leq q_{i,\max}, i = 1,2,3\} \quad (7)$$

그러므로, 3차원 형상 공간상에서 충돌 회피 동작 제한 조건을 고려하지 않은 작업 공간에 포함된 형상점들의 집합 $FA_{CS,k}$ 는 다음과 같이 유도되어진다.

$$FA_{CS,k} = CS \cap C_k = \{q_k \mid \theta_{CS}^{\min}(k) \leq \theta_k \leq \theta_{CS}^{\max}(k) \text{ and } \varphi_{CS}^{\min}(k) \leq \varphi_k \leq \varphi_{CS}^{\max}(k)\} \quad (8)$$

위에서 θ_k 와 φ_k 의 범위를 결정하는 값들인 $\theta_{CS}^{\min}(k)$, $\theta_{CS}^{\max}(k)$, $\varphi_{CS}^{\min}(k)$ 와 $\varphi_{CS}^{\max}(k)$ 들은

1) 다음과 같은 식들을 동시에 만족하고

$$q_{i,\min} \leq f_i(r_k, \psi_k) \leq q_{i,\max}, i = 1,2,3 \quad (9)$$

2) 다음 식 으로부터 구해지는 $\psi_0 = [\theta_0 \ \varphi_0]$ 를 포함하는 $[\theta_i \ \varphi_i]$ 의 범위를 구함으로써 얻어진다.

$$f_i(r_0, \psi_0) = q_{i,0}, i = 1,2,3 \quad (10)$$

이때, φ_k 의 범위를 먼저 구하고 그 범위를 정해진 이산화 분해능 $\Delta\varphi$ 의 간격으로 추출한 다음, 추출한 각각의 값에 대하여 위 식들을 만족하는 θ_k 의 범위를 구한다. 3차원 형상 공간에서 $FA_{CS,k}$ 의 기본적인 형태는 그림 2와 같이 그려진다. 그림 2에서 q_N 을 중심으로 한 동심구 C_k 는 시간 t_k 에 위치할 수 있는 후보 형상점들의 집합이며, 이 동심구가 직육면체로 표현되는 로봇의 작업 공간 CS 에 의해 잘려지면 바깥 면은 진한 색으로, 안쪽 면은 옅은 색으로 칠하여진 구의 일부분으로써 $FA_{CS,k}$ 를 표현할 수 있다.

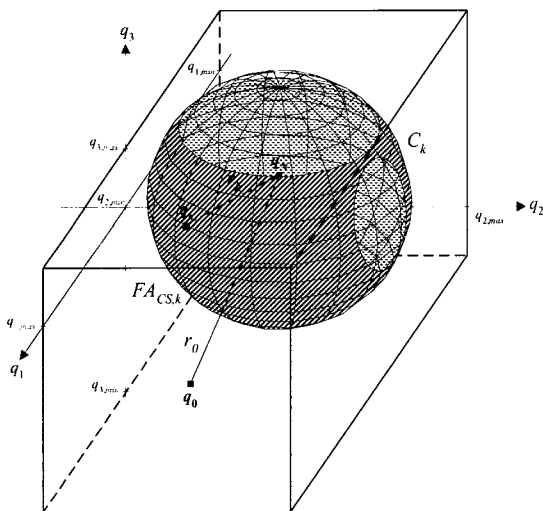


그림 2. 작업 공간에 포함되는 형상점들의 집합 $FA_{CS,k}$ (단, $q_k = (q_{1,k}, q_{2,k}, q_{3,k})$).

Fig. 2. $FA_{CS,k}$ included in the workspace.

2. 충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크의 구성

3차원 형상 공간에서 충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크는 2차원 형상 공간상에서의 방법을 응용하여 구성할 수 있다. 충돌 제한 조건의 정의를 고려하면 충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크 $FA_{C,k}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$FA_{C,k} = FA_{CS,k} - OS_k \quad (11)$$

여기서 OS_k 는 시간 t_k 에서 형상 공간 장애물과 충돌하는 모든 형상점들의 집합을 나타낸다. 매 샘플링 시간마다 로봇의 형상을 III.1절에서 구한 $FA_{CS,k}$ 상으로 제한하여 $FA_{CS,k}$ 에 포함된 θ_k 의 범위를 정해진 이산화 분해능 $\Delta\theta$ 의 간격으로 추출한 다음, 추출한 각각의 값에 대하여 로봇의 충돌을 검사하면 시변 형상 공간 장애물을 구성할 수 있다. 각 동심구 상에 위치한 형상 공간 장애물 슬라이스들을 각각을 포함하는 바운딩 박스 (bounding box)로 근사화시킬 수 있다면 시간 t_k 에서 i 번째 형상 공간 장애물 슬라이스를 나타내는 $OS_k(i)$ 는 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$OS_k(i) = \{q_k \mid \theta_{OS}^{\min}(k,i) \leq \theta_k \leq \theta_{OS}^{\max}(k,i) \text{ and } \varphi_{OS}^{\min}(k,i) \leq \varphi_k \leq \varphi_{OS}^{\max}(k,i)\} \quad (12)$$

그러므로, 시간 t_k 에 형상 공간 장애물 슬라이스가 한 개 있는 경우에 충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크는 (11)과 (12)로부터 다음과 같이 표현되고, 그 형태는 그림 3에서와 같이 그려진다.

$$FA_{C,k} = \{q_k \mid \theta_{CS}^{\min}(k) \leq \theta_k < \theta_{OS}^{\min}(k,1), \theta_{OS}^{\max}(k,1) < \theta_k \leq \theta_{CS}^{\max}(k) \text{ or } \varphi_{CS}^{\min}(k) \leq \varphi_k < \varphi_{OS}^{\min}(k,1), \varphi_{OS}^{\max}(k,1) < \varphi_k \leq \varphi_{CS}^{\max}(k)\} \quad (13)$$

그림 3에서는 그림 2에서처럼 구해진 $FA_{CS,k}$ 로부터 형상 공간 장애물 슬라이스 $OS_k(1)$ 이 떨어져 나간 형태의 $FA_{C,k}$ 를 관찰할 수 있다.

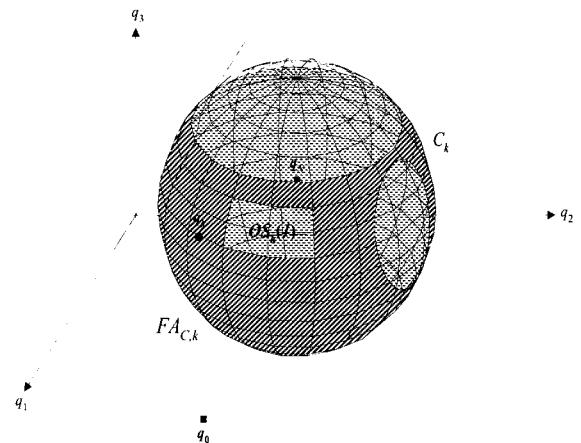


그림 3. 충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크 $FA_{C,k}$ (단, $q_k = (q_{1,k}, q_{2,k}, q_{3,k})$).

Fig. 3. Free arc $FA_{C,k}$ satisfying collision constraints.

3. 유연 제한 조건을 만족하는 프리아크의 구성

3차원 형상 공간의 경우에 로봇 매니퓰레이터가 q_{k-1} 로부터 $t = t_k$ 에 도달할 수 있는 영역은 2차원 형상 공간의 원 대신에 반지름이 $q_{max}\Delta t$ 인 구로써 다음과 같이 표현되어진다.

$$R_{reach,k} \equiv \{q_k \mid \|q_{k-1} - q_k\| \leq \dot{q}_{max}\Delta t\} \quad (14)$$

축 속도와 가속도에 대한 유연 제한 조건을 만족하는 프리아크 $FA_{S,k}$ 는 2차원 형상 공간에서와 같이 다음과 같이 정의할 수 있고,

$$FA_{S,k} \equiv C_k \cap R_{reach,k} \quad (15)$$

로봇의 도달 가능 영역 $R_{reach,k}$ 와 두 개의 동심구 C_{k-1}, C_k 를 $(\varphi_{k-1}, \varphi_k)$ 를 고정시키고 q_1, q_2 평면에, (θ_{k-1}, θ_k) 를 고정시키고 q_2, q_3 평면에 각각 투영시키면 유연 제한 조건을 2차원 형상 공간에서처럼 (θ_{k-1}, θ_k) 와 $(\varphi_{k-1}, \varphi_k)$ 에 대한 선형 제한 조건으로 변형시킬 수 있다. 그러므로, 유연 제한 조건을 만족하는 프리아크는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$FA_{S,k} = \{q_k \mid |\theta_{k-1} - \theta_k| \leq \theta_{safe}(k) \text{ and } |\varphi_{k-1} - \varphi_k| \leq \varphi_{safe}(k)\} \quad (16)$$

여기서 $\theta_{safe}(k)$ 와 $\varphi_{safe}(k)$ 는 코사인 법칙(the law of cosines)을 이용한 기하학적인 분석에 의하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_{safe}(k) = \cos^{-1} \left(\frac{r_{k-1}^2 + r_k^2 - r_{vel}^2}{2r_{k-1}r_k} \right) \quad (17)$$

$$\varphi_{safe}(k) = \cos^{-1} \left(\frac{r_{k-1}^2 + r_k^2 - r_{vel}^2}{2r_{k-1}r_k} \right) \quad (18)$$

여기서 r_{k-1} 과 r_k 는 $r_k = |q_0 - q_N| \frac{N-k}{N}$ 으로 표현되는 동심구 C_{k-1} 과 C_k 의 반지름이며, $r_{vel} = q_{max}\Delta t$ 는 도달 가능 영역의 반지름이다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

이번 장에서는 제한한 방법을 산업 현장에서 널리 쓰이는 6축 산업용 로봇 매니퓰레이터에도 적용할 수 있다는 것을 보여주기 위해서 6축 PUMA 로봇의 충돌회피 문제에 대해서 모의실험을 수행하고, 그 결과를 제시, 분석한다. PUMA 로봇 매니퓰레이터는 6자유도를 갖고 있는 6축 로봇이지만 엔드 이펙터(end-effector)를 이루고 있는 세 축의 동작은 충돌 회피에 큰 영향을 주지 못하기 때문에 충돌회피 문제를 풀 때에는 엔드 이펙터를 세번째 링크에 포함시켜 모델링하면 3차원 형상 공간에서 문제를 풀 수 있다. 우선, 형상 공간 장애물이 구해진 상황에서 문제를 풀어 봄으로써 적용 가능성을 검토하고, 그 다음으로 실제 두 대의 PUMA 로봇 시스템을 대상으로 모의실험을 수행한다.

표 1. 첫번째 모의 실험을 위한 입력 데이터.

Table 1. Data for the 1st computer simulation.

기호	값[단위]
$q_{i,min}$	-90 [deg.]
$q_{i,max}$	+90 [deg.]
\dot{q}_{max}	40 [deg./sec.]
q_0	(90, 0, 0) [deg.]
q_N	(0, 0, 90) [deg.]
N	20
Δt	0.5[sec.]

표 1에서 첫번째 모의실험을 위한 입력 데이터를 정리하였으며, 형상공간 장애물은 다음과 같이 구해졌다고 가정한다.

$$OS_k = \{q_k \mid 290^\circ \leq \theta_k \leq 330^\circ \text{ and } 120^\circ \leq \varphi_k \leq 140^\circ\} \text{ for } k = 9 \sim 14. \quad (19)$$

그리고, 성능 지수로는 형상 공간에서 다음과 같이 표현할 수 있는 로봇의 이동 거리를 사용한다[6].

$$G(\psi_0, \dots, \psi_k, \dots, \psi_N) = \sum_{k=1}^N \|\psi_k - \psi_{k-1}\|^2 \quad (20)$$

MATLAB최적화 도구(Optimization Toolbox)의 SQP (Sequential Quadratic Programming) 방법을 이용하여 SOCAP을 풀은 결과로부터 성능 지수가 231 스텝만에 0.0076이라는 값으로 최소화됨을 확인할 수 있었고, 이 결과를 그림 4에 도시하였다. 결과적으로 충돌회피 동작 제한 조건을 만족하는 동시에 형상 공간에서 로봇의 이동 거리를 최소화시키는 준최적 경로를 얻을 수 있었다. 3차원 형상 공간에서의 형상 공간 장애물 슬라이스들과 결과로 얻은 로봇의 충돌회피 경로를 그림 5에서 확인할 수 있다.

두번째 모의실험으로서 실제 PUMA 로봇의 기구학 데이터를 바탕으로 두 대의 PUMA 로봇 시스템의 충돌회피 문제를 제안한 방법으로 풀어 보았다. 두 대의 로봇은 같은 규격과 기구학적 특성을 갖고 있다고 가정하였으며 두 대의 로봇 중 로봇 2는 미리 정해진 경로를 따라 등속도로 이동하고 로봇 1은 장애물인 로봇 2와의 충돌을 회피하고 유연 제한 조건을 만족시킬 수 있는 자신의 충돌회피 경로를 계획해야 한다. 두 로봇 사이에 충돌이 발생할 수 있도록 베이스 사이의 거리(D)는 1,500[mm]로 설정하였으며, 두 로봇의 초기 및 목표 형상, 운동 시간 등의 데이터는 표 2에 정리하였다. III장에서 설명한 방법에 의하여 프리아크들을 구성하였으며 성능 지수로는 첫번째 모의실험에서와 같이 로봇 1의 형상 공간상의 최소 이동 거리를 사용하였다.

충돌 제한 조건을 만족하는 프리아크를 구성할 때 프리아크의 분해능을 1로 잡으면 985[sec.]정도의 많은 시간이 소요되었지만 분해능이 3일 때에는 약 165[sec.], 5일 때에는 61[sec.]정도의 계산 시간이 소요되어 2차원 형상 공간에서 슬라이스 프로젝션 방법[7]을 사용하는 경우보다도 적은 계산 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

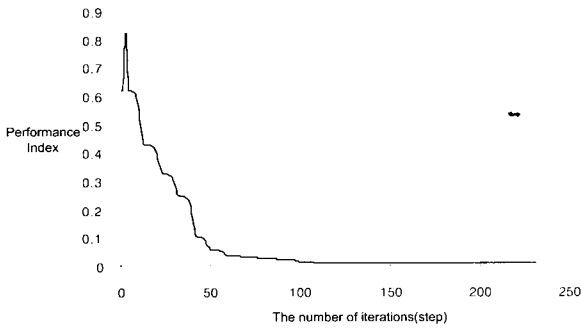


그림 4. PUMA 로봇의 성능 지수의 변화 그래프.
Fig. 4. Transition graph of the performance index.

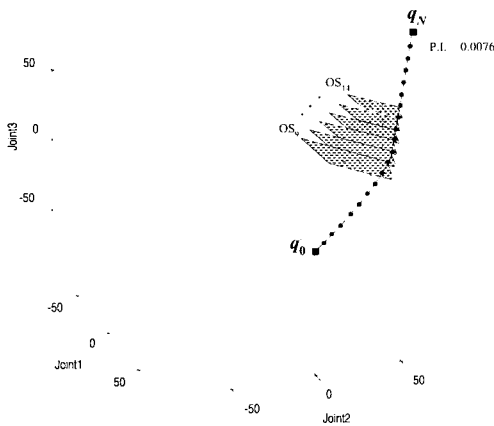


그림 5. PUMA 로봇의 준최적 충돌회피 경로.
Fig. 5. Sub-optimal collision-free path of PUMA robot.

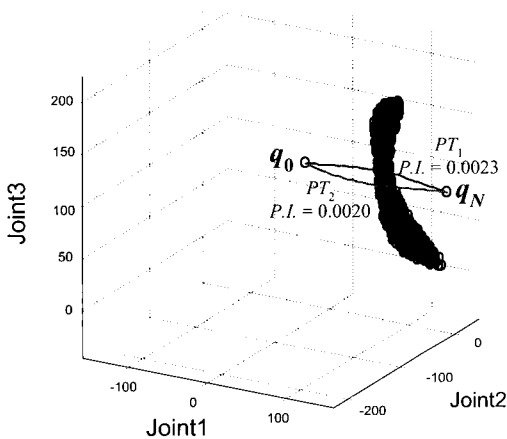


그림 6. PUMA 로봇 시스템 중 로봇1의 준최적 충돌회피 경로.
Fig. 6. Sub-optimal collision-free path of robot1.

초기 형상을 포함하고 인접한 프리아크들 사이의 공통 구간이 항상 존재하는 두 개의 경로 트리가 형성되었으며 각 경로 트리 PT_1 과 PT_2 에 대하여 SOCAP을 구성하여 풀은 결과 PT_1 에서는 0.0023, PT_2 에서는 0.0020의 성능 지수 값을 갖는 준최적 충돌회피 경로를 얻을 수 있었다. 이 결과를 로봇 1의 3차원 공

표 2. 두번째 모의 실험을 위한 입력 데이터.

Table 2. Data for the 2nd computer simulation.

기호	값[단위]	
	로봇1($r=1$)	로봇2($r=2$)
$q_{i,\min}$	(-160, -225, -45) [deg.]	
$q_{i,\max}$	(160, +45, +225)[deg.]	
\dot{q}_{\max}	90[deg./sec.]	90[deg./sec.]
q_0	(-30, 0, 90)[deg.]	(0, 0, 90)[deg.]
q_N	(150, 0, 90)[deg.]	(150, 0, 90)[deg.]
D	1500[mm]	
θ_{margin}	5.0[deg.]	
N	40	
Δt	0.1[sec.]	

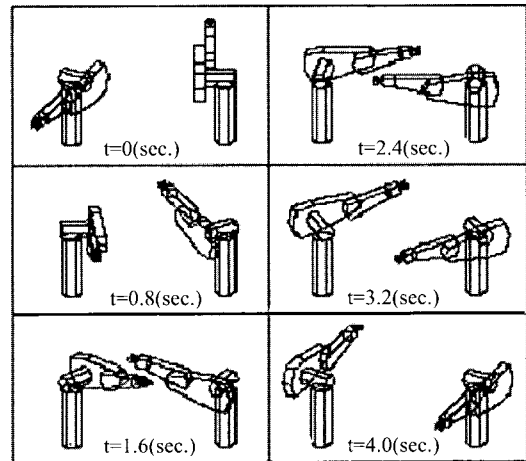


그림 7. PUMA 로봇 시스템의 준최적 충돌회피 동작.
Fig. 7. Sub-optimal collision-free motion of PUMA robot system.

간상에서 표현하면 그림 6과 같다. 두 경로 중 경로 트리 PT_2 로부터 얻어진 경로가 최종적인 준최적 충돌회피 경로로 선정되었으며, 이 경로를 따라 로봇 1이 이동하면서 로봇 2와의 충돌을 회피할 수 있음을 직접 제작한 그래픽 시뮬레이터를 통하여 그림 7에서와 같이 확인하였다. 정상적인 궤적대로 동작한다면 $t=1.6$ 초 이후에 두 로봇 사이의 충돌이 예상되지만, 좌측에 위치한 로봇 1의 2축이 계산되어진 충돌 회피 경로에 따라 동작하면서 팔(arm)을 전체적으로 들어 올려 충돌을 회피하고 있음을 관찰할 수 있다.

V. 결론

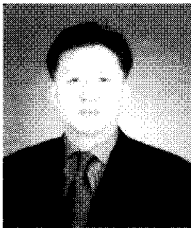
본 논문에서는 [1]에서 제안한 프리아크 개념을 이용한 로봇의 충돌회피 동작 계획 방법을 3차원 형상공간상의 충돌회피 문제를 풀 수 있도록 확장하고, 두 대의 PUMA 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 한 모의실험을 통하여 적용 가능성을 검증하였다. 2차원 형상 공간상에서 확인한 것처럼, 제안한 방법은 3차원 형상 공간상에서도 추가로 형상-시간 공간(CT-space)을 구성하지 않고서도 시변 장애물을 효율적으로 구성할 수 있었으며, 로봇의 동작 제한 조건을 만족하는 동시에 특정 성능 지수를 최적화

시키는 경로를 찾아낼 수 있었다. 추후 지속적인 관련 연구 방향으로서는 제안한 방법을 이용하여 4차원 이상의 형상 공간에서 로봇 매니퓰레이터의 충돌 회피 동작 계획 문제를 풀기 위한 방법에 대한 연구와, 최적화 시킬 수 있는 성능 지수의 형태 및 그 한계에 대한 분석 등이 필요하리라 할 것이다.

참고문헌

[1] 이석원, 남윤석, 이범희, "프리아크 개념을 이용한 로봇의 충돌회피 동작 계획," 제어자동화시스템공학 논문지, 제6권, 제3호, pp. 317-328, 2000.
 [2] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
 [3] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "Gross motion planning-A survey,"

ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 3, pp. 219-291, Sep. 1992.
 [4] T. Lozano-Perez and M. A. Wesley, "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles," *Commun. ACM*, Vol. 22, No. 10, pp. 560-570, Oct. 1979.
 [5] J. F. Canny, *The complexity of robot motion planning*, MIT Press, 1987.
 [6] S. W. Lee, B. H. Lee and K. D. Lee, "A configuration space approach to collision avoidance of a two-robot system," *Robotica*, Vol. 17, No. 2, pp. 131-141, Mar. 1999.
 [7] T. Lozano-Perez, "A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 3, pp. 224-238, June 1987.



이석원

1968년 7월 30일생. 1991년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1993년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1998년 서울대학교 전기공학부(공학박사). 1998년~2001년 삼성항공 정밀기기연구소 선임연구원. 2001년~현재 우송대학교 컴퓨터 전자정보공학부 전임강사. 관심분야는 로봇틱스, 지능제어, 공장자동화, 마이크로프로세서 응용.



임충혁

1965년 10월 20일생. 1987년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1989년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1994년 서울대학교 전기공학부(공학박사). 1992년~1997년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1997년~현재 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 조교수. 관심분야는 전력전자, 제어시스템.