

PRM과 포텐셜 필드 기법에 기반한 다자유도 머니플레이터의 충돌회피 경로계획

Collision-Free Path Planning for a Redundant Manipulator Based on PRM and Potential Field Methods

박 정 준, 김 휘 수, 송 재 복*
(Jung-Jun Park¹, Hwi-Su Kim¹, and Jae-Bok Song¹)
¹Korea University

Abstract: The collision-free path of a manipulator should be regenerated in the real time to achieve collision safety when obstacles or humans come into the workspace of the manipulator. A probabilistic roadmap (PRM) method, one of the popular path planning schemes for a manipulator, can find a collision-free path by connecting the start and goal poses through the roadmap constructed by drawing random nodes in the free configuration space. The path planning method based on the configuration space shows robust performance for static environments which can be converted into the off-line processing. However, since this method spends considerable time on converting dynamic obstacles into the configuration space, it is not appropriate for real-time generation of a collision-free path. On the other hand, the method based on the workspace can provide fast response even for dynamic environments because it does not need the conversion into the configuration space. In this paper, we propose an efficient real-time path planning by combining the PRM and the potential field methods to cope with static and dynamic environments. The PRM can generate a collision-free path and the potential field method can determine the configuration of the manipulator. A series of experiments show that the proposed path planning method can provide robust performance for various obstacles.

Keywords: collision-free path planning, probabilistic roadmap, potential field method

I. 서론

최근 들어 인간의 생활 공간에서 작업을 수행하는 서비스 로봇이 보급됨에 따라서, 인간과 로봇 사이의 충돌 안전에 대한 관심이 증대되고 있다. 따라서 인간과 로봇의 상호 안전을 구현하기 위한 다양한 안전전략이 제시되어 왔다.

첫 번째로, 카메라와 같은 비접촉 센서를 사용하여 충돌을 예측하고, 실시간으로 장애물에 대한 충돌회피 경로를 생성하는 방법이 있다[1]. 두 번째로는 접촉 센서를 사용하여 충돌을 감지하고 그 충돌에 적절히 대응하여, 인간에게 전달되는 충격력을 최소화하는 방법이다[2]. 마지막으로, 상대적으로 큰 충격력이 불가피하게 발생하였을 때, 수동 컴플라이언스 장치를 사용하여 충격력을 흡수하는 방법이다[3]. 이와 같은 안전전략 중에서 첫 번째의 경로계획(path planning)을 이용한 충돌회피 전략은 인간과의 물리적 접촉이 발생하기 전에 충돌을 미연에 방지하므로, 안전성 측면에서는 가장 바람직한 방법이다.

경로계획이란 주어진 환경내에서 로봇 머니플레이터가 지정된 시작점으로부터 목표점까지 장애물과 충돌하지 않는 안전한 경로를 계획하는 과정을 의미한다. 이를 위해서 머니플레이터의 경로계획은 머니플레이터와 장애물이 공간상에서 서로 충돌을 일으키지 않는 안전한 경로를 계획해야 한다

는 점과 그 경로가 가능한 한 다른 경로보다 짧아야 하며 머니플레이터가 이동하는 과정에서 무리하게 부하를 주는 심한 변동이 없어야 한다는 세 가지 측면을 모두 고려해야 한다[4].

기존의 경로계획은 작업공간상의 장애물을 머니플레이터의 관절변수를 좌표축으로 하는 형상공간(configuration space)으로 사상(mapping)시켜 생성된 장애물공간을 이용하였다. 즉, 이러한 장애물공간과 교차하지 않는 자유공간상의 점들을 생성하고 이 점들을 연결하는 효율적인 경로를 추출하는 방법이 연구되어 왔다. 형상공간을 이용한 머니플레이터의 경로계획은 정적인 환경에 대하여 상당히 강인한 적응력을 보인다. 충분한 사전정보를 알고 있는 정적인 환경의 경우, 머니플레이터의 시작점과 목표점이 주어지면 환경 내에 존재하는 장애물을 유연하게 회피할 수 있는 경로계획이 가능하다.

추출된 형상공간에서의 경로계획 수립을 위하여 로드맵(roadmap) 방식, 셀분할(cell decomposition) 방식, 그리고 포텐셜 필드(potential field) 방식 등 다양한 기법들이 제시된 바 있다[5]. 이러한 여러 기법들 중에서도, PRM (Probabilistic Roadmap)은 로드맵 방식의 하나로 매우 복잡한 정적 환경 및 다자유도 머니플레이터에 대하여 상당히 강인한 적응력을 보이며, 기본원리가 간단하여 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있는 반면에, 장애물 환경에 대한 정확한 환경정보를 필요로 하고, 형상공간으로 사상 시 많은 시간이 소요되므로, 동적 환경에 대응이 어렵다는 취약점을 가지고 있다[6].

따라서 본 논문에서는 머니플레이터의 작업공간 상에서 PRM을 직접 적용함으로써, 정적 및 동적 장애물 환경에 대

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 6. 11., 수정: 2010. 12. 6., 채택확정: 2011. 1. 7.

박정준, 김휘수, 송재복: 고려대학교 기계공학부

(hantiboy@korea.ac.kr/figh704@korea.ac.kr/jbsong@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부의 융복합형 로봇전문인력 양성사업 및 인간-로봇 협업 매니플레이션 기술 개발사업을 통하여 수행되었음.

하여 실시간으로 충돌회피가 가능한 경로계획 알고리즘을 제안한다. 그리고 매니퓰레이터가 충돌회피 경로를 추종할 때, 포텐셜 필드 방법을 적용하여 실시간으로 장애물 환경에 대한 충돌회피 형상을 유지할 수 있도록 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서는 작업공간에서의 PRM에 대하여 간략히 소개하며, III 장에서는 작업공간에서의 충돌회피 형상 결정을 위한 포텐셜 필드 방법에 대하여 설명한다. IV 장에서는 앞서 PRM 과정을 통하여 생성된 로드맵을 이용하여 동적 장애물에 대한 충돌회피 경로 재생성과 충돌회피 과정을 다룬다. 그리고 V 장에서는 다양한 장애물 환경에 대한 실험을 통하여, 본 연구에서 제안한 충돌회피 경로계획법에 대한 검증을 수행한다. 마지막으로, VI 장에서는 결과 및 앞으로의 연구에 대하여 고찰한다.

II. PRM을 이용한 정적 환경에서의 충돌회피 경로계획

다자유도의 매니퓰레이터는 다차원의 형상공간으로 구성되므로, 작업공간의 장애물을 형상공간으로 변환할 때 많은 시간이 소요되고, 매니퓰레이터의 위치 및 종류가 변하게 되면 장애물에 대한 형상공간을 갱신해야 하는 문제점이 있다. 즉, 형상공간 기반의 경로계획은 정적 환경에는 매우 강한 성능을 보이지만, 고정되지 않은 동적 장애물에 대해서는 빠른 대응이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여, 매니퓰레이터의 작업공간 상에서 PRM을 적용한 충돌회피 경로계획법을 제안한다. PRM은 네트워크 형식의 로드맵을 구성하는 과정인 전처리 단계(preprocessing phase)와 구성된 로드맵을 토대로 최적의 전역경로를 생성하는 조회 단계(query phase)로 구성된다.

1. 전처리 단계

전처리 단계는 장애물이 없는 자유공간 상에 존재하는 충돌 회피점(milestone)을 무작위로 추출하고, 방향성을 갖는 양방향 곡선으로 상호 연결함으로써 로드맵을 구성하는 과정이다. 이 때, 장애물공간과 교차하지 않으면서 충돌 회피점을 상호 연결하는 양방향 곡선은 국부경로(local path)로 정의한다. 여기서, 로드맵을 구성하는 충돌 회피점들로 구성된 집합을 N , 충돌 회피점을 상호 연결하는 로드맵 상의 국부경로들의 집합을 E 라고 하면, 로드맵은 $R=(N, E)$ 로 표현할 수 있다.

예를 들어, 그림 1과 같이 3자유도 매니퓰레이터의 2차원 공간에서 단순한 사각형 형상의 정적 장애물을 고려하자. 사각형의 정적 장애물들은 계산상의 편의를 위하여 다양한 크

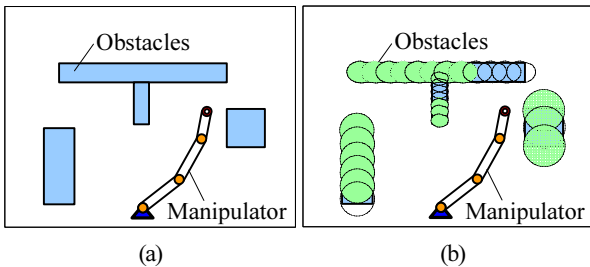


그림 1. 매니퓰레이터의 작업공간상의 정적 장애물: (a) 실제 장애물, (b) 원으로 모델링된 장애물.

Fig. 1. Static obstacles in workspace of manipulator: (a) real obstacles, and (b) obstacles mapped into circles.

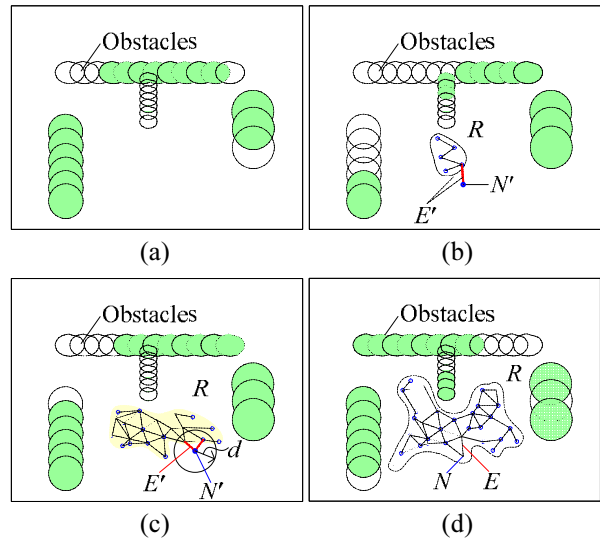


그림 2. 전처리 단계: (a) 작업공간상의 장애물, (b) 새로운 충돌 회피점과 새로운 국부경로, (c) 새로운 충돌 회피점의 선택, (d) 로드맵의 갱신.

Fig. 2. Preprocessing of PRM: (a) obstacles in workspace, (b) new random node and new local paths, (c) selection of new node without collision with obstacles, and (d) renewal of roadmap subset.

기의 원들로 모델링하였다. 초기 상태에서 로드맵 $R=(N, E)$ 는 그림 2(a)와 같이 비어 있는 상태이지만, 자유공간 내에 존재하는 새로운 충돌 회피점 N' 을 그림 2(b)와 같이 추출하여 기존 로드맵 R 과의 새로운 국부경로 E' 를 형성하게 된다. 본 연구에서는 그림 2(c)와 같이 새로운 충돌 회피점 N' 과 인접한 거리 d 에 존재하는 기존 로드맵 상의 충돌 회피점들과 연결을 시도하여 새로운 국부경로 E' 를 추출한다. 이때, 그 국부경로가 장애물공간과 교차하지 않으면 새로운 충돌 회피점과 국부경로를 로드맵에 추가하여 갱신한다.

이와 같은 로드맵 구성 단계를 반복적으로 적용하여 새로운 충돌 회피점을 추출할수록, 충돌 회피점 N 과 국부경로 E 로 구성된 로드맵 R 의 크기는 그림 2(d)와 같이 증가하게 된다. 여기서 생성된 각각의 국부경로에는 연결하는 두 점 사이의 이동비용 정보를 포함하고 있다.

2. 조회 단계

조회 단계는 전처리 단계를 통하여 구성된 로드맵을 토대

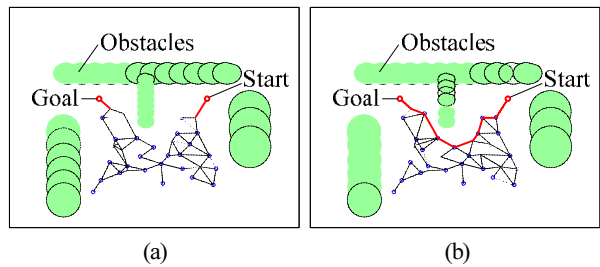


그림 3. 조회 단계: (a) 시작점과 목표점을 잇는 국부경로의 생성, (b) 전역경로의 생성.

Fig. 3. Query phase of PRM: (a) local paths from start and goal to roadmap, and (b) generation of global path.

로 하여 주어진 시작점과 목표점을 연결하면서, 최적의 전역 경로를 구성하는 국부경로들의 조합을 추출하는 과정을 의미한다. 그림 3(a)에서와 같이, 작업공간상의 시작점과 목표점을 연결할 수 있는 로드맵 상의 충돌 회피점들을 탐색한다. 즉, 시작점과 목표점이 각각 로드맵상의 점들과 연결 가능하면, 이 점들을 잇는 국부경로가 생성된다.

이와 같은 국부경로가 성공적으로 생성되면 별도의 경로 계획 기법을 적용함으로써, 그림 3(b)와 같이 시작점과 목표점을 연결하는 로드맵상의 전역경로를 생성할 수 있다. 이 과정에서는 앞서 수행된 전처리 단계를 통하여 생성된 각각의 국부경로에 대한 이동비용을 바탕으로, 기존에 제안된 다양한 경로계획 기법들을 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 최상우선 탐색(best-first search) 기법을 변형한 형태인 A* 탐색 기법을 적용하였다[7]. 결과적으로, 조회 단계를 통하여 장애물공간에 근접하지 않으면서, 최단거리를 갖는 전역경로를 추출할 수 있다.

III. 포텐셜 필드 기반의 매니퓰레이터의 충돌회피 형상 결정

형상공간 기반의 경로계획법은 매니퓰레이터의 모든 조인트 각변위에 따른 장애물 충돌 여부를 고려한다. 따라서 형상공간상에서 최적경로가 생성되면 매니퓰레이터의 충돌회피 형상은 자동적으로 결정되게 된다. 하지만 본 연구에서는 동적 환경에 대응이 어려운 형상공간 기반이 아닌 작업공간에서 매니퓰레이터의 충돌회피 경로계획을 수행하기 때문에, II 장의 PRM을 통하여 생성된 경로는 매니퓰레이터의 말단점에 대한 충돌만이 고려된다. 즉, 매니퓰레이터의 말단점 하위단의 링크와 조인트에 대한 장애물 충돌이 반영되지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 포텐셜 필드 방법[8]을 사용하여 여유자유도 매니퓰레이터의 장애물 충돌회피 형상을 결정하였다.

PRM을 통하여 생성된 충돌회피 경로에서는 목표 방향으로 인력(attractive potential)이 작용하고, 작업공간상의 장애물에서는 척력(repulsive potential)이 매니퓰레이터의 링크 및 조인트에 작용하도록 하였다. 그림 4와 같이 매니퓰레이터에 인가되는 인력은 매니퓰레이터 말단의 속도벡터, 척력은 매니퓰레이터의 장애물 지점에 대한 속도벡터로 변환하게 되면, 여유자유도 매니퓰레이터의 조인트 각속도는 다음과 같이 자코비안 의사역행렬(pseudo-inverse Jacobian)과 영공간 벡

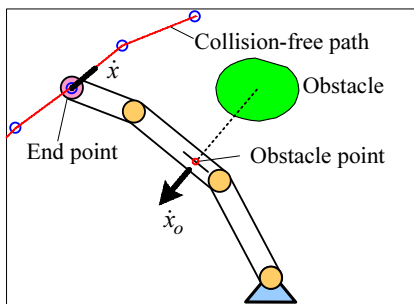


그림 4. 여유자유도 매니퓰레이터의 충돌회피 형상결정을 위한 포텐셜 필드 방법.

Fig. 4. Potential field method for collision-free configuration of redundant manipulator.

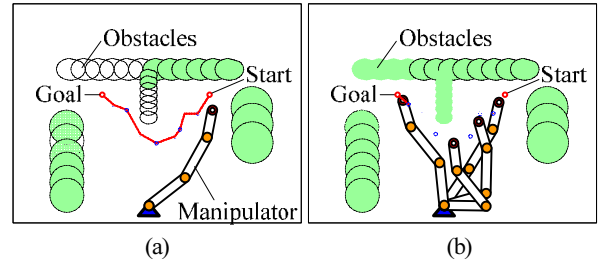


그림 5. 3 자유도 매니퓰레이터의 포텐셜 필드 방법: (a) 충돌 회피 전역경로, (b) 매니퓰레이터의 충돌회피 형상.

Fig. 5. Potential field method of 3 DOF manipulator: (a) global path for collision avoidance, and (b) collision-free configuration of a manipulator.

터(null space vector)를 이용하여 계산할 수 있다[9].

$$\dot{\theta} = J^{\#} \dot{x} + [J_o(I - J^{\#}J)]^+ (\dot{x}_o - J_o J^{\#} \dot{x}) \quad (1)$$

여기서 $J^{\#}$ 는 매니퓰레이터 말단에서의 자코비안 의사역행렬, J_o 는 매니퓰레이터 말단에서의 자코비안 행렬, J_o 는 매니퓰레이터의 장애물 지점에서의 자코비안 행렬이다. 그리고 매니퓰레이터의 특이점 발생 문제를 극복하기 위하여 damped least-square pseudo-inverse Jacobian [10]을 다음과 같이 적용하였다.

$$J^{\#} = J^T (JJ^T + \lambda I)^{-1} \quad (2)$$

여기서 λ 는 감쇠상수이고, I 는 단위행렬이다. 식 (1)로부터 얻은 조인트의 각속도 벡터를 실시간으로 제어하면, 여유자유도의 매니퓰레이터가 장애물과의 충돌을 회피할 수 있는 형상을 유지하면서 생성된 경로를 추종할 수 있다.

예를 들어, 그림 5(a)에서와 같이 3자유도 매니퓰레이터가 II 장에서 생성된 충돌회피 경로를 추종하도록 속도 제어한다고 가정하자. 이때, 식 (1)과 (2)를 적용하면 매니퓰레이터의 여유자유도를 이용하여 장애물을 회피할 수 있는 형상을 그림 5(b)와 같이 결정할 수 있다.

IV. 조회단계에서의 동적 장애물에 대한 충돌회피 경로 재생성

매니퓰레이터가 PRM과 포텐셜 필드 방법을 이용하여 충돌회피 형상을 유지하면서 경로를 추종할 때, 작업공간상에 동적 장애물이 발생하게 되면 이를 회피할 수 있는 경로를 실시간으로 재생성하여야 한다. 본 연구에서는 PRM의 전처리 단계를 통하여 생성된 로드맵 정보를 이용하여, 동적 장애물을 회피하는 경로를 실시간으로 재생성하였다.

동적 장애물이 작업공간상에 위치하게 되면, 장애물과 충돌이 발생하는 국부경로들을 로드맵에서 제외하고 조회 단계를 수행한다. 이때 출발점은 매니퓰레이터 말단의 현재 위치가 되며, 목표점은 이전과 동일하다. 그리고 A* 탐색 기법을 적용하여, 동적 장애물을 회피하는 경로를 재생성할 수 있다.

매니퓰레이터는 다시 포텐셜 필드 방법을 이용하여, 충돌회피 형상을 유지하면서 재생성된 경로를 추종하게 된다. 만약 동적 장애물이 매니퓰레이터의 경로상에 존재하지 않을

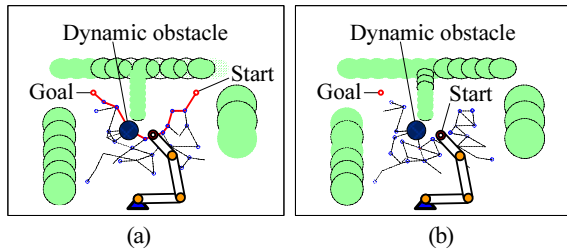


그림 6. 3 자유도 매니퓰레이터의 조회 단계: (a) 생성된 경로상의 동적 장애물, (b) 재생성된 충돌회피 경로.

Fig. 6. Query phase of 3 DOF manipulator: (a) dynamic obstacle on generated path, and (b) regenerated collision-free path.

경우에는 경로를 재생성할 필요 없이, 포텐셜 필드만을 적용하여 매니퓰레이터의 형상을 결정하면 된다. 본 경로계획법은 전처리 단계에서 기 생성된 로드맵 정보를 이용하기 때문에, 매우 짧은 시간 안에 동적 장애물에 대한 충돌회피 경로를 재생성할 수 있다.

예를 들어, III 장(그림 5)에서 생성된 경로상에 동적 장애물이 발생한 경우를 살펴보도록 하자. 그림 6(a)와 같이 매니퓰레이터가 경로를 추종하는 도중에 동적 장애물이 발생하게 되면, 그림 6(b)와 같이 기존의 로드맵 정보를 이용하여 충돌회피 경로를 실시간으로 재생성하게 된다. 따라서 매니퓰레이터는 동적 장애물과의 충돌을 회피할 수 있고, 포텐셜 필드를 사용하여 각 조인트의 충돌회피 형상을 유지할 수 있다.

V. 실험 및 결과

본 연구에서 제시한 매니퓰레이터의 충돌회피 경로계획법을 검증하기 위하여, Schunk사의 7자유도 매니퓰레이터를 이용하여 3차원 작업공간상에서 다양한 실험을 수행하였다[11]. 그림 7과 같이 매니퓰레이터의 말단에는 1자유도 그리퍼를 장착하여 물체를 파지할 수 있도록 하였고, 물체인식을 위하여 Point grey사의 범블비 스테레오 카메라를 매니퓰레이터의 기저부에 장착하였다[12]. 매니퓰레이터의 작업공간에는 0.9 x 0.75 x 0.3 m 크기의 2단 선반을 정적 환경으로 배치하였다. 선반의 제일 상단에는 격벽이 없고, 하단은 격벽으로 분리되어 있다. 매니퓰레이터의 작업 반경을 고려하여 선반으로부터 0.8m 앞 중앙에 고정하였다.

먼저 정적 환경에 대한 매니퓰레이터의 충돌회피 경로계획을 실험하였다. 매니퓰레이터의 임무는 선반 위에 있는 음료수를 카메라로 인식 후 조작자가 지정한 목표위치로 이동하는 작업이다. PRM의 전처리 단계를 통하여, 작업공간상의 자유공간에 50개의 충돌 회피점을 무작위로 추출하였고, 이 점들을 잇는 580개의 충돌회피 국부경로로 구성된 로드맵을 그림 8과 같이 생성하였다. 이와 같은 전처리 단계는 오프라인 상태에서 수행되므로, 매니퓰레이터의 작업을 수행하기 위한 제어기의 연산부하에는 영향을 주지 않는다.

조회 단계에서는 스테레오 카메라를 이용하여 선반 위의 음료수의 위치를 인식하고, 전처리 단계에서 추출된 로드맵을 기반으로 지정된 목표점까지의 충돌회피 최적 경로를 생성하게 된다. 그림 9와 같이 출발점(점 1)에서 목표지점(점 2, 3, 4)까지의 충돌회피 경로를 PRM의 조회 단계를 적용하여

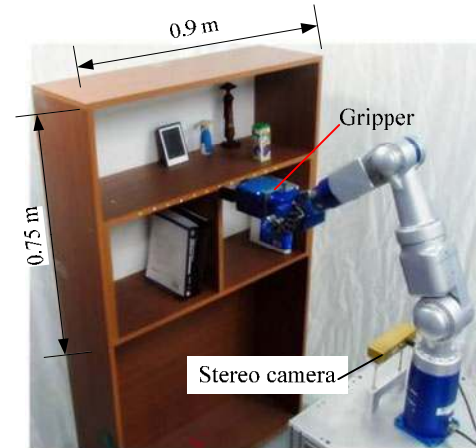


그림 7. 충돌회피 경로계획을 위한 실험 장치.

Fig. 7. Experimental setup for collision-free path planning.

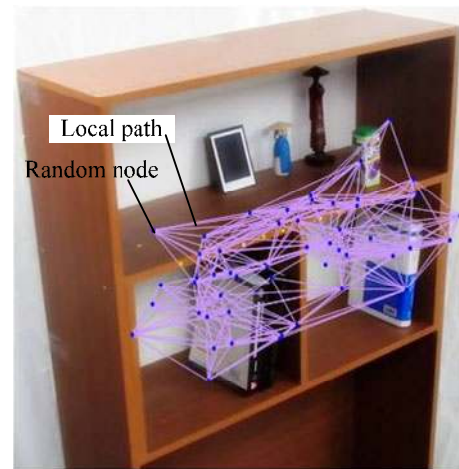


그림 8. 3 차원 공간에서의 전처리 단계.

Fig. 8. Preprocessing phase in 3D workspace.

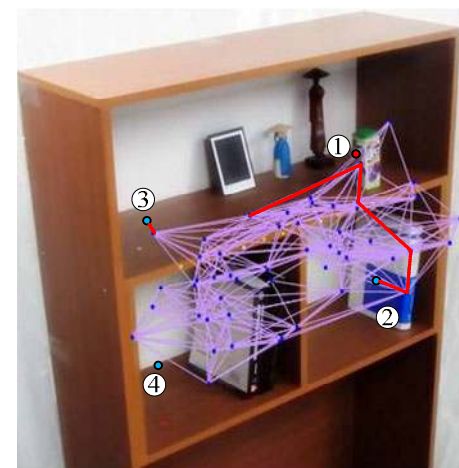


그림 9. 조회 단계를 이용한 충돌회피 경로의 생성.

Fig. 9. Generation of collision-free path using query phase.

실시간으로 생성할 수 있다. 조회 단계를 수행하여 각각의 충돌회피 최적 전역경로를 생성하는 데 소요된 연산시간은 다음과 같다.

표 1. 충돌회피 경로 생성을 위한 연산시간.

Table 1. Computation time for generating collision-free path.

Path	1 → 2	1 → 3	1 → 4
Time (ms)	82	58	93

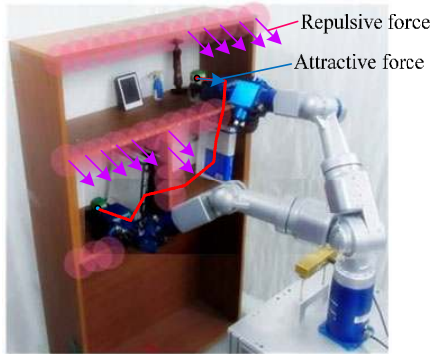


그림 10. 포텐셜 필드를 이용한 충돌회피 형상 결정.

Fig. 10. Collision-free configuration of manipulator using potential field.

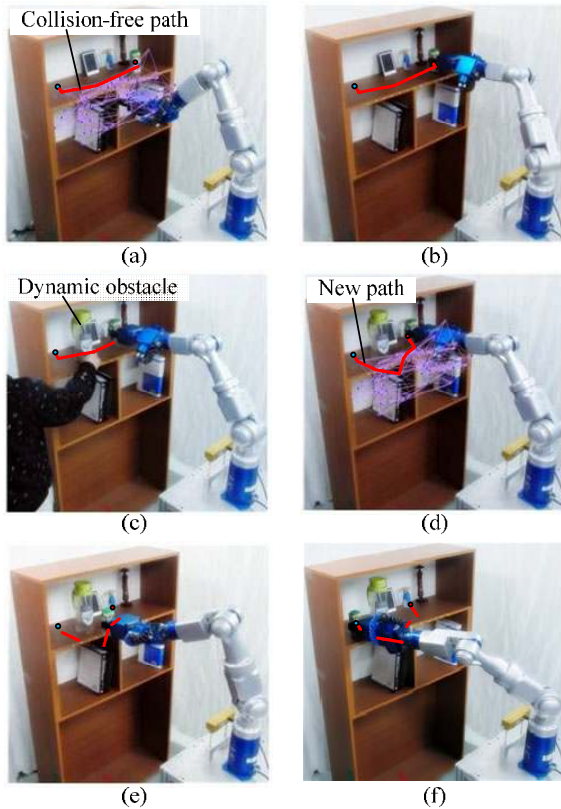


그림 11. 충돌회피 경로의 재생성.

Fig. 11. Regeneration of collision-free path.

여기서 대상 물체의 위치와 목표지점의 위치 정보가 카메라로부터 측정된 후 경로가 생성되기까지의 연산시간을 측정하였고, 실험에서 사용된 제어기 CPU 사양은 펜티엄4 3.2GHz이다. Table 1과 같이 정적 환경에 대한 충돌회피 경로 생성에 소요되는 시간이 평균 100ms 이내로, 대상 물체와 목표위치의 인식과 동시에 경로를 빠르게 생성할 수 있음을 알 수 있다.

3차원 공간상에 충돌회피 경로가 생성되면, 머니플레이터

말단이 생성된 경로를 추종하도록 식 (1)을 이용하여 머니플레이터의 각 조인트를 제어하였다. 머니플레이터에 식 (1)의 포텐셜 필드 기반의 영공간 벡터를 적용하였을 때, 그림 10과 같이 경로를 추종하면서 정적 환경에 대한 충돌회피 형상을 유지함을 확인할 수 있었다.

다음으로, 머니플레이터의 작업 도중에 동적 장애물이 발생한 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 9의 선반 상단의 점 1에 위치한 음료수를 점 3의 위치로 이송하는 작업을 수행할 때, 머니플레이터의 작업 경로상에 동적 장애물인 물병을 위치시켰다.

그림 11(a)에서 보듯이 선반의 상단에는 격벽이 없으므로 일직선 형태의 경로가 생성된다. 그림 11(b)와 같이 머니플레이터가 정적 환경인 선반에 충돌하지 않는 형상을 유지하면서 생성된 경로를 추종한다. 이때, 머니플레이터의 경로 상에 그림 11(c)와 같이 물병이 놓이게 된 경우, 스테레오 카메라를 이용하여 물병의 위치를 측정하고, 머니플레이터가 물병에 근접하게 되면, 비상정지를 한 후 조희 단계를 이용하여 그림 11(d)와 같이 충돌회피 경로를 실시간으로 재생성할 수 있다. 그리고 그림 11(e)와 (f)에서 보듯이 정적 환경과 동적 장애물과의 충돌을 회피하며, 재생성된 경로를 머니플레이터가 잘 추종함을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 다자유도 머니플레이터가 정적 환경 및 동적 장애물에 강인하게 적응할 수 있도록 하기 위하여, PRM과 포텐셜 필드 방법을 작업공간상에서 적용한 경로계획법을 제안하였다. 일련의 연구과정 및 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 논문에서 제시한 경로계획법은 주어진 작업공간에서 PRM을 적용하여, 자유공간상에 존재하는 충돌 회피점들과 국부경로로 구성된 로드맵을 형성하고, 장애물 환경에 대한 충돌회피 경로를 실시간으로 생성할 수 있다. 장애물 환경을 머니플레이터의 형상공간으로 변환하지 않아도 되므로, 경로 계획의 연산시간을 크게 줄일 수 있다. 뿐만 아니라, 머니플레이터의 종류와 상관없이 이미 생성된 로드맵 정보를 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다.

2) 포텐셜 필드 방법을 이용하여, 장애물 환경에 대한 머니플레이터의 충돌회피 형상을 유지함과 동시에 생성된 충돌회피 경로를 추종할 수 있다. 본 알고리즘은 속도제어를 기반으로 하기 때문에, 머니플레이터의 역기구학 연산이 필요 없으므로, 다수의 역기구학 해중에서 최적해를 구해야 하는 어려움을 해결할 수 있다.

3) 미지의 동적 장애물이 머니플레이터의 작업공간에 나타났을 경우, 이미 생성된 로드맵 정보를 이용하므로 충돌회피 경로를 실시간으로 재생성할 수 있다. 즉, 동적 장애물에 대한 형상공간으로 사상 과정이 필요 없으므로, 동적 상황에 빠르게 대응할 수 있다.

인간-로봇 상호 안전성 구현을 위하여, 현재 인간을 동적 장애물 환경으로 고려한 충돌회피 경로계획법에 대한 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- [1] K. K. Gupta, "Fast collision avoidance for manipulator arms: a sequential search strategy," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 5, pp. 522-532, Oct. 1990.
- [2] A. Albu-Schaeffer, O. Eiberger, M. Grebenstein, S. Haddadin, Ch. Ott, T. Wimboeck, S. Wolf, and G. Hirzinger, "Soft robotics: from torque feedback controlled lightweight robots to intrinsically compliant systems," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 20-30, Sep. 2008.
- [3] J.-J. Park, B.-S. Kim, J.-B. Song, and H.-S. Kim, "Safe link mechanism based on nonlinear stiffness for collision safety," *Mechanism and Machine Theory*, 43, pp. 1332-1348, Oct. 2008.
- [4] P. J. McKerrow, *Robotics*, Addison Wesley, pp. 507-515, 1992.
- [5] J. C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [6] L. E. Kavraki, J. C. Latombe, and M. H. Overmars, "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 4, Aug. 1996.
- [7] G. Dudek and M. Jenkin, "Computational principles of mobilerobotics," Cambridge University Press, 2000.
- [8] O. Khatib, "Real - time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, Mar. 1986.
- [9] A. A. Maciejewski and C. A. Klein, "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 3, pp. 109-117, Sep. 1985.
- [10] Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse kinematics solutions with singularity robustness for robot manipulator control," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 108, pp. 163-171, Sep. 1986.

[11] Schunk, <http://www.schunk-modular-robotics.com/>

[12] Point Grey, <http://www.ptgrey.com/products/bumblebee2/>



박정준

2008년 고려대학교 기계공학과(공학사).
2005년 고려대학교 기계공학과(공학석사).
2010년 고려대학교 기계공학과(공학박사).
2010년~현재 독일 우주항공연구
연구소(DLR). 관심분야는 로봇 설계, 로
봇 안전.



김휘수

2007년 고려대학교 기계공학과(공학사).
2007년~현재 고려대학교 대학원 기계
공학부 석박사 통합과정 재학중. 관심
분야는 안전 로봇팔 설계.



송재복

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사).
1985년 서울대학교 기계설계학과(공학
석사). 1992년 MIT 공과대학 기계공학
과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교
기계공학부 교수. 관심분야는 안전 매
니퓰레이터, 이동로봇의 주행, 지능형

로봇의 설계 및 제어.