
여유 자유도를 이용한 두 팔 로봇 매니플레이터의 충돌 회피 알고리즘

이석원* · 남윤석**

An Algorithm for Collision Avoidance of Two-Arm Robot Manipulator Using Redundancy

Seok-Won Lee* · Yun-Seok Nam**

요 약

본 논문에서는 여유 자유도를 이용한 두 팔 로봇 매니플레이터의 충돌 회피 알고리즘을 제안한다. 여유 자유도를 갖는 각 로봇 팔의 엔드-이펙터는 서로의 충돌을 회피하면서 주어진 작업을 수행하기 위하여 각각 미리 정의된 직선 경로를 따라 이동해야 한다. 이 문제를 풀기 위해서 엔드-이펙터의 위치와 방향을 변화시키지 않는 각 축의 동작인 자체동작을 이용한다. 매 샘플링 시간마다 각 팔의 링크들이 서로 멀어지는 방향으로 자체 동작을 수행함으로써 엔드-이펙터가 주어진 작업도 성공적으로 수행하고, 동시에 서로의 충돌도 회피할 수 있다. 제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 각각 9자유도의 팔을 갖는 두 팔 로봇 매니플레이터에 대한 모의실험을 수행하고 그 결과를 제시한다.

ABSTRACT

An algorithm is suggested for collision avoidance of two-arm robot manipulator using redundancy. End-effectors of each redundant arm should move along each prescribed straight path to complete the given task, while avoiding collision with each other. Self-motion, considered as motion of each axis not to change the position and orientation of end-effector, is utilized in order to solve this problem. At each sampling time, self-motion is executed with the view to making farther between the links of each arm. Simulation results for two-arm robot manipulator, which has 9-d.o.f. respectively, are illustrated to show the performance of the algorithm.

키워드

충돌 회피, 두 팔 로봇(two-arm robot), 여유 자유도, 자체동작(self-motion)

1. 서론

인간의 작업을 대신 수행할 수 있는 로봇은 기구부 설계 기술의 발전 및 제어를 담당하는 컴퓨터의 급속한 성능 향상을 바탕으로 그 기능 및 역할이 계속적으로 확대되고 있다. 로봇을 대상으로 하는 학문 분야에서도 이러한 현실을 적극적으로 수용하여 로봇의 성능 향상 및 사용 영역 확대를

위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 산업용 로봇은 공장 자동화의 핵심 요소로서 잘 정의되어 있고 고정된 환경 속에서 단순한 조립, 용접, 도장 등의 작업에 많이 활용되었으나, 로봇을 필요로 하는 영역이 우주와 해저 공간 등 각종 극한 환경이나 농업용, 가정용 등의 비제조업 분야까지 확대되면서 열악하고 불확실한 환경에 능동

*우송대학교 컴퓨터전자정보공학부

**한국산업기술대학교 제어계측공학과

적으로 대처하고 복잡한 작업을 유연한 조작성을 갖고 수행할 수 있는 로봇에 대한 연구 및 개발이 중요한 문제로 등장하였다. 이에 대한 해결 방법 중 하나는 다중 로봇 시스템 또는 두 개 이상의 팔, 세 개 이상의 손가락이나 7축 이상의 자유도를 가진 팔 등 여유 자유도를 갖는 로봇 시스템을 사용하는 것이다. 여유 자유도는 로봇이 기본적인 작업을 수행하는 동시에 축의 위치 제한, 특이점(singularity), 장애물 등을 회피하거나 에너지 소비, 이동 거리, 이동 시간, 조작성 지수(manipulability measure) 등 각종 성능 지수를 최적화하는 것을 가능하게 한다[1-3]. 그러므로, 여유 자유도를 갖는 로봇 시스템은 일반 로봇이 할 수 없었던 작업들을 수행할 수 있고, 동일한 작업을 수행한 결과에서도 향상된 신뢰성과 효율성을 보여 줄 수 있다.

여유 자유도를 갖는 두 팔 로봇 시스템이 협조 작업을 수행하기 위해서 갖추어야 할 기능들 중 충돌 회피 기능은 가장 기본적이면서도 중요하므로 본 논문에서는 여유 자유도를 갖는 두 팔 로봇 매니플레이터를 대상으로 실제 적용 가능한 충돌 회피 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 여유 자유도를 이용한 충돌 회피 알고리즘을 제안하는데 필요한 여유 자유도에 관한 배경 이론 및 지금까지의 관련 연구에 대해서 정리한다. III장에서는 서로 충돌이 가능한 장애물들로 고려되는 각 팔의 링크들 사이의 거리를 계산하기 위한 링크들의 기하학적 근사화 방법 및 거리 계산 방법에 대해서 설명하고, 여유 자유도를 이용한 두 팔 로봇의 충돌 회피 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 모의실험 대상으로 선정된 9축 팔을 갖고 있는 두 팔 로봇 매니플레이터의 기구학에 대하여 소개하고, 그래픽 시뮬레이터를 통하여 제안한 알고리즘의 성능을 검토하며 그 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서 간단한 결론을 맺고 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

II. 여유 자유도형 로봇의 특성 및 관련 연구

이 장에서는 여유 자유도형 로봇이 갖고 있는 여유 자유도의 개념 및 여유 자유도를 충돌 회피 알고리즘에 활용할 수 있는 일반적인 방법에 대하여 알아보고 지금까지 발표된 관련 연구들을 정리한다. 일반적으로 로봇 엔드-이펙터의 위치와 방향을 나타내는 변수들로 구성된 벡터 $x \in R^6$ 을 조작 변수라 하고 로봇의 각 축의 위치를 표현하는 축 변수로 구성된 벡터를 $q \in R^n$ 으로 나타내면 두 벡터들 사이의 관계는 다음과 같은 기구학 식으로 나타낼 수 있다. q 를 포함하는 공간의 차원인 n 은 축의 개수, 즉, 로봇이 갖고 있는 자유도를 의미한다.

$$x = f(q) \tag{1}$$

식 (1)에서 표현한 기구학 식에서 $f(\cdot)$ 는 n 차의 축 공간으로부터 6차의 카르테시안 공간으로의 사상(mapping)을 표현하는 함수이다. 이 기구학 식을 시간에 대해서 미분하면 다음과 같은 식이 구해진다.

$$\dot{x} = J(q) \dot{q} \tag{2}$$

여기서, $J(q)$ 는 로봇의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로서 축의 속도 공간으로부터 카르테시안 좌표들의 속도 공간으로의 사상을 표현하는 행렬이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J(q) \equiv \frac{\partial f}{\partial q} \in R^{6 \times n} \tag{3}$$

R^6 의 부분 공간(subspace)인 $J(q)$ 의 열 공간(range space)을 조작 공간(manipulable space)이라 정의하고 조작 공간의 차원을 조작 자유도(Degree Of Manipulability: DOM)라 정의한다. 카르테시안 공간 상의 속도 \dot{x} 또는 변위 δx 는

조작 공간에 속해 있어야만 축 속도 \dot{q} 또는 변위 δq 에 의해서 구현할 수 있다.

한편, 축 공간의 차원 n 이 조작 공간의 차원보다 클 때 그 로봇을 여유 자유도형 로봇(redundant robot)이라 부르고 여유 자유도형 로봇은 무한개의 역 기구학 해를 갖게 된다. 즉, 여유 자유도형 로봇은 카르테시안 공간상의 한 점에 의해서 로봇 엔드-이펙터의 위치와 방향이 정해졌을 때, 그 위치와 방향을 구현할 수 있는 형상이 여러 개 존재할 수 있다. 자코비안에 의해서 카르테시안 속도 공간의 0 벡터(null vector)로 사상되는 축 속도 공간상의 원소들의 집합인 자코비안의 영 공간(null space)을 여유 공간(redundant space)이라 정의하고 이 여유 공간의 차원을 여유 자유도(Degree Of Redundancy: DOR)라 정의한다. 그러면, DOM과 DOR 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다[4].

$$DOM + DOR = n \quad (4)$$

여유 자유도를 갖지 않는 일반 로봇의 경우에는 DOM이 n 의 값을 갖게 되어 DOR이 0이 되므로 자코비안의 영 공간인 여유 공간이 존재하지 않는다. 그러므로, 축 속도 공간 상의 모든 변위는 카르테시안 공간 상의 로봇 엔드-이펙터의 속도 변화에 항상 영향을 주게 되고, 역 기구학 식의 해를 구할 때 다른 작업 목표를 고려할 여유가 없어진다. 반면에, 여유 자유도를 갖는 대상 로봇이 9 자유도를 갖는다면 DOM은 6이고 DOR은 3인 경우가 되어 3자유도의 여유 자유도를 활용하여 충돌 회피 등의 다른 작업 목표를 고려할 수 있는 가능성을 가지게 된다.

식 (2)로부터 구할 수 있는 속도 차원의 역 기구학 식은 여유 자유도를 갖는 경우 무한개의 해를 갖게 되는데 일반 해는 다음과 같이 자코비안 행렬과 그 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)에 의해 구할 수 있음이 알려져 있다.

$$\dot{q} = J^+(q) \dot{x} + \{ I_n - J^+(q)J(q) \} y \quad (5)$$

여기서, $J^+(q)$ 는 $J(q)$ 의 의사역행렬을 의미하고 I_n 은 $n \times n$ 단위행렬이다. $J^+(q) \dot{x}$ 는 기본적인 역 기구학을 만족시키는 특정해(particular solution)로 볼 수 있으며, $\{ I_n - J^+(q)J(q) \} y$ 는 여유 공간으로 사상되는 순수해(homogeneous solution)이다. 그리고, $y \in R^n$ 는 여유 공간으로 사상시킬 임의의 벡터이며, $\{ I_n - J^+(q)J(q) \}$ 는 여유 공간으로 사상시켜 주는 직교 투영 연산자(orthogonal projection operator)이다. 식 (5)를 물리적으로 해석하면 로봇 엔드-이펙터의 정해진 경로 추종과 같이 일차적으로 원하는 조작 공간상의 작업을 만족시켜 주면서 동시에 다른 작업 목표도 만족시킬 수 있는 가능성을 보여 주는 식이다. 다른 작업 목표는 식 (5)에서 임의의 벡터 $y \in R^n$ 를 적절히 선정하여 엔드-이펙터의 위치와 방향에는 영향을 주지 않고 각 축의 속도를 변화시켜 로봇의 전체적인 형상을 바꾸어 줌(reconfiguration)으로써 만족시킬 수 있다. 이 때, 영 공간으로 사상이어 엔드-이펙터의 위치와 방향에는 영향을 주지 않는 각 축의 동작을 영운동(null motion) 또는 자체운동(self motion)이라 한다.

여유 자유도를 활용한 충돌 회피 알고리즘 중 에서 가장 널리 알려진 것은 Maciejewski와 Klein[5]이 제안한 방법이다. 그들은 로봇 엔드-이펙터가 정해진 궤적을 따라 움직이는 것을 일차 작업 목표로 만족시키면서 여유 자유도를 이용하여 장애물들로부터의 거리를 최대화시키는 이차 작업 목표도 동시에 만족시킬 수 있다는 것을 보여 주었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘도 그 기본 이론은 위의 방법과 같으나, 위의 방법에서는 매 샘플링 시간마다 장애물과 가장 가까운 장애물 회피점(obstacle avoidance point)을 로봇 상에서 구하고 그 점을 장애물의 면으로부터 멀어지는 방향으로 자체운동을 수행하기 때문에 장애물 회피점의 자코비안을 구해야 하는 반면에 본 논문에서는 충돌 가능 링크에 대해서 각각 장애물들과의 거리를 계산하고 각 축들을 그 거리를 커지게 하는 방향으로 자체운동을 수행시키는 방법을 사용한다.

한편, Nakamura와 Hanafusa[6]는 작업에 우선 순위 개념을 도입하여 낮은 우선 순위의 부작업(subtask)은 높은 우선 순위를 갖는 부작업의 여유 자유도를 이용하여 구현할 수 있음을 충돌 회피와 특이점 회피 문제 등의 예를 들어 보여 주었다. 그들은 여유 자유도형 로봇의 역 기구학 해를 구하는 데 있어서 작업에 우선 순위를 부여하고 자코비안의 열 공간과 영 공간에 각각 우선 순위가 높은 작업과 낮은 작업을 할당함으로써 제한된 작업 공간을 효과적으로 사용하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 그들의 관점으로 분석하면 로봇 팔의 엔드-이펙터가 정해진 직선 경로를 따라 움직이는 것이 우선 순위가 높은 작업이 되고, 각 링크들이 장애물로부터 멀어지는 방향으로 자체운동을 수행하는 것이 우선 순위가 낮은 작업이 된다.

III. 여유 자유도를 이용한 두 팔 로봇의 충돌 회피 알고리즘

로봇의 일반적인 동작 계획(motion planning)은 경로 계획(path planning)과 궤적 계획(trjectory planning)으로 구성된다. 일반적으로 고정 장애물(stationary obstacle)에 대한 충돌 회피 동작 계획 문제는 고정 장애물에 대한 기하학적인 해석에 의한 경로 계획만으로 풀 수 있다. 반면에 이동 장애물(moving obstacle)에 대해서는 경로 계획 이외에 상황에 맞도록 시간에 따른 변화까지 고려한 궤적 계획도 수행해 주어야 한다.

본 연구를 통해 풀고자 하는 충돌 회피 동작 계획 문제는 여유 자유도를 가진 두 팔 로봇의 각 팔 사이의 충돌을 그 대상으로 하기 때문에 기본적으로 이동 장애물에 대한 충돌 회피 동작 계획 문제로 구성되며, 로봇의 축 수가 많고 구조가 매우 복잡하므로 보통의 로봇보다 문제를 구성하고 풀기 어려운 반면에 여유 자유도를 활용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 일반적인 로봇의 충돌 회피 동작 계획과 관련된 연구 흐름과 두 로봇 사이의 충돌 회피 문제를 다룬 연구에 대해서 정리하면 다음과 같다.

지금까지의 충돌 회피 동작 계획에 관한 연구

는 크게 두 가지 흐름으로 나누어 볼 수 있다. 그 하나는 주로 Lozano-Perez[7]에 의해 제안되고 그 개념이 확장되어진 형상 공간(Configuration space: C-space)을 이용한 방법이다. 형상 공간에서 충돌 회피 동작 계획 문제는 형상 공간상의 장애물을 피할 수 있는 경로 계획 문제로 바뀌어진다. 이 방법은 충돌 제한 조건(collision constraints)의 수식적인 표현을 가능하게 하고 로봇의 여러 가지 동작 계획 문제를 풀기 위한 효율적인 기반을 제공한다. 그러나, 본 연구의 대상처럼 로봇의 축 수가 많은 경우에는 계산량이 기하 급수적으로 늘어나고 형상 공간상의 장애물을 구하는 것이 매우 어려워진다.

다른 하나는 인공 전위계(Artificial Potential Field)를 사용하는 방법으로서, 이 방법의 기본 개념은 목표 지점으로부터 인력(attractive force)이 작용하고 장애물들로부터 척력(repellent force)이 작용하는 전위계를 구성하는 것이다[8]. 이 방법은 상대적으로 적은 계산 시간 때문에 온 라인 동작 계획에 적용이 가능하지만, 국부 최소점(local minimum)을 해결하는 문제와 효율적인 인공 전위계 구성 방법이 중요 과제로 남아 있다.

Lee[9]는 두 로봇의 경로와 궤적 정보를 이용하고 물체의 속도를 고려하여 작성된 충돌 지도(collision map)를 통하여 충돌을 감지하고, 이를 기반으로 로봇의 동작을 시간 스케줄링(scheduling)하여 출발 시간 지연(departure time delay)과 속도 감소법(speed reduction)을 이용한, 구로 모델링된 로봇 팔목의 시변 환경 내에서의 충돌 회피에 관한 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 주어진 경로 상에서 충돌 회피 궤적을 구할 수 없을 가능성이 있다는 단점이 있다.

Shin과 Zheng[10]은 Lee가 제시한 방법을 임의의 경로와 로봇의 좀 더 정확한 기하학적 모델에 대해서도 적용 가능하게 함으로써 발전시키고, 초기 위치에서 한 대의 로봇을 출발 지연시키는 방법이 일정한 조건 아래서는 가장 짧은 동작 시간을 구현할 수 있는 방법이라는 사실을 밝혀 냈다. Shin과 Bien[11]은 미리 정의된 경로상의 위치를 표현하는 변수들로 구성되는 조정 공간(coordination space) 개념을 소개하고 그 공간에

서 충돌 영역(collision region)을 정의하였다.

본 논문에서는 여유 자유도형 두 팔 로봇의 충돌 회피를 위해 [5]에서 제시된 방법을 부분적으로 응용한 알고리즘을 제안한다. 즉, 본 논문에서 제안하는 충돌 회피 알고리즘은 여유 자유도를 갖고 있기 때문에 가능한 자체운동을 이용한 알고리즘이다. 두 팔의 엔드-이펙터가 각각 정해진 직선 경로를 따라 움직이는 동시에 매 샘플링 시간마다 각 링크들의 장애물로부터의 거리를 계산하고 그 거리를 최대로 만드는 방향으로 각 링크들을 동작시킨다. 이 때, 각 링크들의 동작은 자체운동으로서 자코비안의 영 공간으로 사상되어 로봇 엔드-이펙터의 위치와 방향에는 영향을 주지 않는다. 각 링크들 사이의 거리 계산은 두 팔의 링크들을 원통형으로 근사화하여 거리 함수를 사용하는 방법을 이용하였으며, 이 알고리즘을 적용하는데 필요한 두 팔 로봇에 대한 기본적인 가정들은 다음과 같다.

- ▶ 가정 1 : 두 팔의 엔드-이펙터의 초기 위치와 최종 위치 및 직선 경로는 미리 주어진다.
- ▶ 가정 2 : 두 팔에 각각 주어진 직선 경로는 변경할 수 없다.
- ▶ 가정 3 : 두 팔의 출발 시간의 지연은 허용되지 않는다.
- ▶ 가정 4 : 서로 다른 팔 이외의 장애물은 고려하지 않는다.

링크들 사이의 거리 계산을 위한 계산량을 줄이기 위해서 두 팔의 각 충돌 발생 가능 링크들을 단순한 형태로 근사화 시킨다. 특히, 거리 함수를 사용하여 장애물들과의 거리를 계산하기 때문에 빠른 충돌 감지를 위해서는 각 축의 위치 변화에 따른 링크의 외부적 모양 변화를 잘 반영하면서도 거리 함수의 계산이 간단한 형태로 근사화 시키는 것이 중요하다. 충돌 발생 가능 링크로 가정한 링크들을 링크의 기준 좌표계를 중심으로 원통형으로 근사화 시키면 거리 함수의 계산도 간단해지고 로봇 팔의 형상 변화를 실제와 가깝게 반영할 수 있다.

이와 같이 두 팔의 충돌 가능 링크들을 원통형으로 근사화 시키면 원통과 원통 사이의 최단 거

리를 계산할 수 있다. 그리고, 두 팔의 링크들 사이의 충돌은 근사화된 두 원통 사이의 충돌로 감지한다. 원통의 중심 축들을 기준으로 근사화된 각 링크 사이의 최단 거리를 구하고 그 거리가 두 원통의 반지름들과 미리 정해놓은 안전 거리 값의 합보다 작을 때 충돌이 일어나는 것으로 판단한다. 이러한 충돌 감지 방법은 계산이 간단하기 때문에 충돌 감지에 소요되는 시간이 매우 짧다는 장점을 가지고 있으며, 특히 실제 링크의 형상이 원통형인 경우에는 충돌 감지를 위해 근사화되는 부분이 줄어들기 때문에 더욱 유리하다.

여유 자유도형 두 팔 로봇의 충돌 회피 알고리즘을 제안하기 위해서 우선 로봇의 각 팔이 수행해야 할 작업을 두 개의 부작업들로 나누고 우선 순위를 부여한다. 우선 순위가 높은 부작업은 로봇 엔드-이펙터의 정해진 직선 경로로 표현하고, 장애물과의 충돌 회피를 우선 순위가 낮은 부작업으로 선정한다. 우선 순위가 높은 부작업은 자코비안의 의사역행렬을 이용하여 속도 차원의 역기구학 해를 구해 주면 된다. 우선 순위가 낮은 충돌 회피 문제를 높은 우선 순위의 작업을 수행하면서 동시에 해결하기 위해서 본 연구에서는 충돌 회피를 위한 각 링크들의 동작을 자코비안의 영 공간으로 사상시키는 방법을 사용하였다. 즉, 매 샘플링 시간마다 충돌 회피를 위한 각 축의 변위 δq 를 결정하고 δq 를 직교 투영 연산자 $\{I_n - J^+(q)J(q)\}$ 와 곱해주어 역기구학 식의 해에 다음과 같이 더해준다.

$$\dot{q} = J^+(q) \dot{x} + \{I_n - J^+(q)J(q)\} \delta q \quad (6)$$

그 결과 δq 는 자코비안의 영 공간으로 사상되므로 카르테시안 공간상의 로봇 엔드-이펙터의 위치와 방향에는 영향을 주지 않는 자체운동으로 표현된다. 그러므로, 로봇 엔드-이펙터는 정해진 직선 경로를 이탈하지 않고 움직이면서 동시에 각 링크들을 장애물로부터 멀어지는 방향으로 운동시킬 수 있다. 이 방법에서 중요한 문제는 매 샘플링 시간마다 영 공간에 사상시킬 변위 δq 를 결정하는 것으로서, 본 연구에서는 매 샘플링 시간마다 각 축의 현재 변위를 +, - 방향으로 일정량만

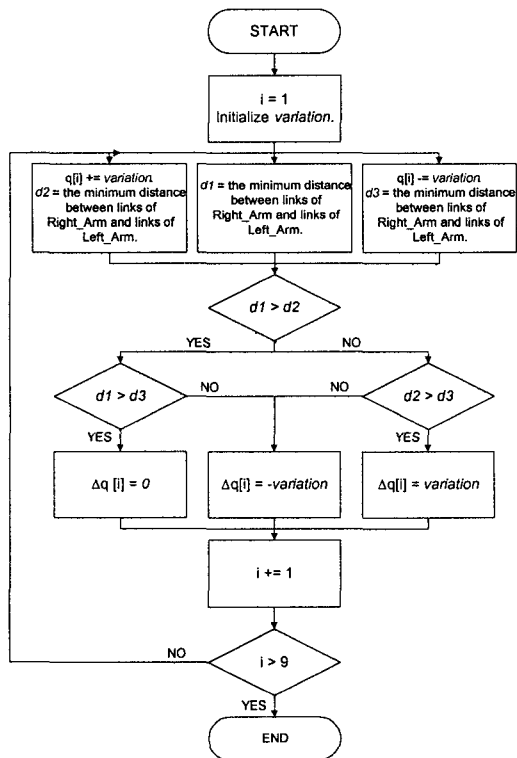


그림 1. 알고리즘 순서도
Fig. 1. Algorithm flowchart

킴 움직였을 때 장애물들과의 최소 거리를 계산해 보고 그 거리가 최대 값이 나오는 방향으로 움직이는 일정량을 δq 로 결정하였다. 이상에서 설명한 알고리즘을 순서도를 이용하여 정리하면 그림 1과 같다.

IV. 모의실험 결과 및 성능 분석

4.1 모의실험 대상 로봇

본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용해 보기 위한 모의실험 대상으로 9축 팔을 갖고 있는 두 팔 로봇 매니플레이터를 선정하였다. 각 팔은 9자유도를 가지고 있기 때문에 각각 3차원의 여유 자유도를 갖게 된다. 오른쪽 팔과 왼쪽 팔의 기본 형태는 같으나 기준 좌표계에 대한 상대적인 위치가 다르기 때문에 기구학을 표현하는 식은 약간 달라진다. 두 팔의 충돌 회피 알고리즘에서는 기준 좌

표계를 중심으로 한 각 팔의 상대적인 위치에 대한 정보만을 필요로 하기 때문에 두 팔 사이의 몸통은 모델링 과정에서 제외하였다. 각 로봇 팔의 기구학 식을 결정하는 Denavit-Hartenberg 파라미터의 값은 표 1, 2와 같다.

표 1. 9자유도 로봇 팔의 D-H 파라미터(오른팔)
Table 1. D-H parameters of the 9 d.o.f. right arm

Joint i	θ_i	a_i	α_i	d_i
1	θ_1	$-\pi/2$	0	l_1
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	$\pi/2$	0	0
4	θ_4	$\pi/2$	0	0
5	θ_5	$\pi/2$	0	l_3
6	θ_6	$\pi/2$	0	0
7	θ_7	$-\pi/2$	0	l_4
8	θ_8	$\pi/2$	0	0
9	θ_9	0	l_5	0

4.2 모의실험 결과 및 분석

제안한 충돌 회피 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 2가지 경우에 대한 모의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험에서는 한 팔을 고정시킨 상태에서 다른 팔의 엔드-이펙터가 주어진 초기 위치와 최종 위치를 연결하는 직선 경로를 따라 움직이도록 할 때, 자체운동에 의하여 두 팔 사이의 충돌을 회피할 수 있는지 확인하였다. 그리고, 제안한 충돌 회피 알고리즘에서 사용되는 파라미터의 값을 변화시켰을 때 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 두 번째 실험에서는 첫 번째 실험 결과를 바탕으로 두 팔 모두 각각 정해진 직선 경로를 움직이는 경우에도 각 팔이 자체운동의 수행을 통하여 서로의 충돌을 회피할 수 있음을 검증하였다.

표 2. 9자유도 로봇 팔의 D-H 파라미터(왼팔)
Table 2. D-H parameters of the 9 d.o.f. left arm

Joint i	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1	$\pi/2$	0	$-l_1$
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	$-\pi/2$	0	0
4	θ_4	$-\pi/2$	0	0
5	θ_5	$-\pi/2$	0	$-l_3$
6	θ_6	$\pi/2$	0	0
7	θ_7	$\pi/2$	0	$-l_4$
8	θ_8	$-\pi/2$	0	0
9	θ_9	0	l_5	0

4.2.1 한 팔이 다른 팔의 고정 장애물인 경우

이 실험에서는 왼팔의 위치를 고정시켜 오른팔의 고정 장애물로 간주하고 오른팔의 초기 위치와 최종 위치를 다른 값으로 설정하여 엔드-이펙터가 직선 경로를 따라 움직이도록 할 때, 제안한 방법에 의하여 오른팔이 직선 경로를 벗어나지 않으면서 고정 장애물인 왼팔과의 충돌을 회피할 수 있는지 확인하였다. 고정 장애물 역할을 수행하는 왼팔이 오른팔의 직선 경로 상에 존재하지 않는 동시에 두 팔의 각 링크들 사이에는 충돌 발생이 가능하도록 각 팔의 초기 및 최종 위치를 표 3과 같이 설정하였다.

표 3. 첫 번째 모의실험의 왼팔과 오른팔의 초기 및 최종 위치

Table 3. Initial & final position of left & right arm in 1st simulation

원팔	초기 및 최종 위치	(11/18, 0, 2/9, 1/2, 1/2, 1/6, 0, -1/2, 0) [rad.]
오른팔	초기 위치	(4/9, 0, -1/18, 1/2, 0, 5/6, 0, -1/2, 0) [rad.]
	최종 위치	(2/3, 0, -1/18, 1/2, 0, 5/6, 0, -1/2, 0) [rad.]

알고리즘에서 사용하는 파라미터인 variation=5[deg.]로 설정하고 오른팔의 자체운동에 의하여 충돌 회피가 가능하다는 것을 확인하기 위하여 오른팔의 자체운동을 막아 놓은 경우와 수행한 경우로 나누어 모의 실험을 진행하였다. 그 결과 그림

2에서 볼 수 있듯이 자체운동을 막아 놓은 경우에는 두 팔 사이의 거리가 점점 감소하여 안전 거리 (safety margin)로 설정한 5[cm]보다 작아져 충돌이 발생하지만, 자체운동을 수행한 경우에는 주어진 직선 경로를 따라 엔드-이펙터가 이동해야 하기 때문에 두 팔 사이의 거리가 어느 정도 감소하더라도 충돌에 이르는 것은 피할 수 있었다. 이 결과를 그래픽 시뮬레이터를 통하여 확인하면 자체운동을 막아 놓은 경우 그림 3과 같이 동작 시작 후 0.68초만에 충돌이 발생하는 반면, 자체운동을 수행한 경우 그림 4와 같이 성공적으로 충돌 회피 동작을 완료하는 것을 볼 수 있다.

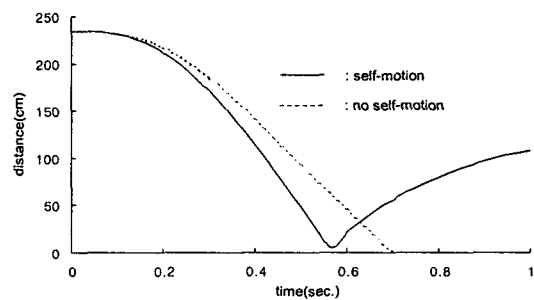


그림 2. 두 팔 사이의 거리 변화(실험 #1 : variation=5(deg.))

Fig. 2. Transition graph of the distance between two arms(Exp. #1 : variation=5(deg.))

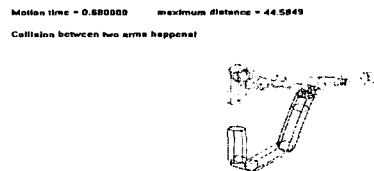


그림 3. 자체운동이 없을 때의 충돌 회피 동작(실험 #1 : variation=5(deg.))

Fig. 3. Collision-free motion without self-motion (Exp. #1 : variation=5(deg.))

그림 5에 도시한 오른팔 엔드-이펙터의 위치 오차를

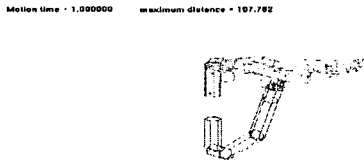
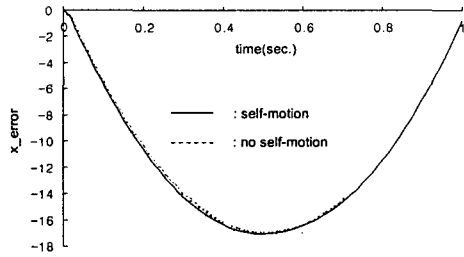
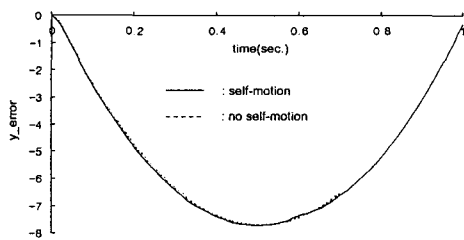


그림 4. 자체운동이 있을 때의 충돌 회피 동작(실험 #1 : variation=5[deg.])

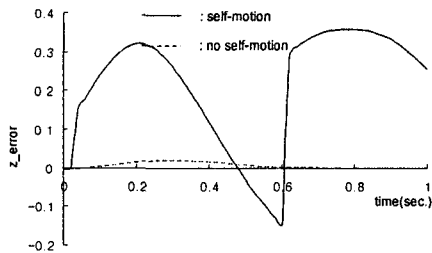
Fig. 4. Collision-free motion with self-motion (Exp. #1 : variation=5[deg.])



(a) x_error



(b) y_error



(c) z_error

그림 5. 오른팔 엔드-이펙터의 위치 오차의 변화

(실험 #1 : variation=5[deg.])

Fig. 5. Transition graph of the position error of the right arm's end-effector(Exp. #1 : variation=5[deg.])

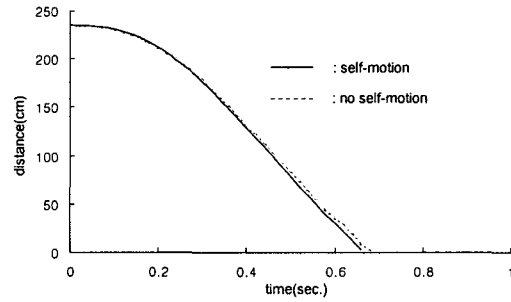


그림 6. 두 팔 사이의 거리 변화(실험 #1 : variation=1[deg.])

Fig. 6. Transition graph of the distance between two arms(Exp. #1 : variation=1[deg.])

살펴보면 자체운동의 유무가 각 축 방향의 위치 오차에 거의 영향을 주지 않고 있음을 확인할 수 있다. z축 방향의 위치 오차가 자체운동이 작용할 때 상대적으로 많이 증가한 것처럼 보이지만 그래프에서 오차량을 나타내는 세로축의 단위가 x, y축 방향 위치 오차 그래프에 비해 매우 작은 것을 고려하면, 자체운동 때문에 오른팔의 엔드-이펙터가 정해진 직선 경로를 이탈했다고 볼 수는 없다.

한편, 제안한 충돌 회피 알고리즘에서 사용하는 파라미터 variation의 값이 충돌 회피 성능에 미치는 영향을 검토하였다. variation은 로봇 팔 자코비안의 영 공간으로 사상될 양으로 엔드-이펙터의 위치와 방향에는 영향을 주지 않으면서 각 링크들이 장애물로부터 멀어지도록 자체운동을 가능하게 한다. 그러므로, 이 파라미터의 크기가 충돌 회피 성능에 영향을 주리라고 예상할 수 있다. 위의 실험에서 자체운동의 성능을 확인할 수 있었던 variation=5[deg.]의 값을 기준으로 큰 값 variation=10[deg.]와 작은 값 variation= 1[deg.]을 사용하여 실험을 수행해 보았다. 그 결과 variation=1[deg.]의 값을 사용했을 때에는 그림 6에서 볼 수 있는 것처럼 자체운동을 수행했을 때에도 두 팔 사이의 거리가 자체운동이 없을 때와 거의 차이가 없어 0.66초만에 충돌이 발생하였다. 그 이유는 자체운동의 변량이 너무 작아 오른팔의 각 링크들이 고정 장애물인 왼팔로부터 충분히 빨리 멀어지지 못하기 때문이다. 즉, 우선 순위가 높은

작업으로 설정한 엔드-이펙터의 직선 경로 추종을 우선적으로 수행하느라 우선 순위가 낮은 충돌 회피 작업을 수행하지 못한 상황으로 설명할 수 있다. 반면에, variation=10[deg.]일 때에는 그림 7에서와 같이 자체운동에 의해 충돌을 회피할 수 있었고, 파라미터 값의 크기와 충돌 회피 기능 수행 여부를 조사한 결과 4-41[deg.] 사이의 값을 가질 때 충돌을 회피할 수 있음을 확인하였다.

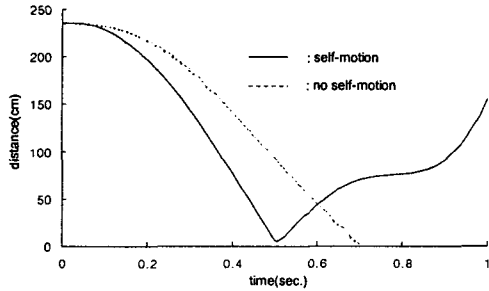


그림 7. 두 팔 사이의 거리 변화(실험 #1 : variation=10(deg.))

Fig. 7. Transition graph of the distance between two arms(Exp. #1 : variation=10(deg.))

4.2.2 두 팔 모두 각각 정해진 직선 경로를 움직이는 경우

두 번째 실험에서는 첫 번째 실험과 달리 왼팔과 오른팔 모두 각각의 작업을 수행하기 위한 엔드-이펙터의 직선 경로가 주어지고 작업중 서로 이동 장애물로 작용하는 경우에도 제안한 알고리즘에 의해 충돌 회피가 가능하다는 것을 검증하

표 4. 두 번째 모의실험의 왼팔과 오른팔의 초기 및 최종 위치

Table 4. Initial & final position of left & right arm in 2nd simulation

왼팔	초기 위치	(1/18, 1/18, 1/3, 1/2, -1/2, 0, 0, -1/2, 0) [rad.]
	최종 위치	(1/18, 1/18, 1/3, 1/2, -1/2, 5/6, 0, -1/2, 0) [rad.]
오른팔	초기 위치	(0, 1/18, 0, 1/2, 0, 5/6, 0, -1/2, 0) [rad.]
	최종 위치	(2/3, 1/18, 0, 1/2, 0, 5/6, 0, -1/2, 0) [rad.]

Motion time = 0.480000 maximum distance = 0.73699
Collision between two arms happens!

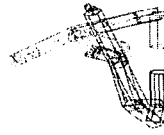


그림 8. 자체운동이 없을 때의 충돌 회피 동작 (실험 #2 : variation=5(deg.))

Fig. 8. Collision-free motion without self-motion (Exp. #2 : variation=5(deg.))

였다. 두 팔이 직선 경로를 따라 작업을 수행하는 중에 두 팔의 각 링크들 사이에 충돌이 발생할 수 있도록 각 팔의 초기 및 최종 위치를 표 4와 같이 설정하였다.

실험 결과 두 팔 모두 자체운동을 막아 놓은 경우에만 충돌 회피에 실패하고 한 팔이라도 자체운동을 수행할 수 있는 경우 충돌 회피에 성공하였다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 두 팔 모두 자체운동이 기능하지 않을 때에는 0.48초만에 충돌이 발생하고, 한 팔의 자체운동이라도 수행하는 경우에는 그림 9에서처럼 충돌 회피에 성공함을 볼 수 있다. 두 팔의 링크들 사이의 거리 변화를 그림 10에서 관찰해 보면 두 팔 모두 자체운동이 없는 경우에는 두 팔 사이의 거리가 점점 가까워져서 결국 충돌에 이르지만 두 팔 모두 자체운동이 있는 경우에는 두 팔 사이의 거리가 안전 거리로 설정한 5[cm]에 가까이 가다가 자체운동의 도움으로

Motion time = 1.080000 maximum distance = 363.041

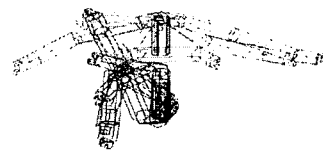


그림 9. 자체운동이 있을 때의 충돌 회피 동작(실험 #2 : variation=5(deg.))

Fig. 9. Collision-free motion with self-motion (Exp. #2 : variation=5(deg.))



그림 10. 두 팔 사이의 거리 변화(실험 #2 : variation=5(deg.))

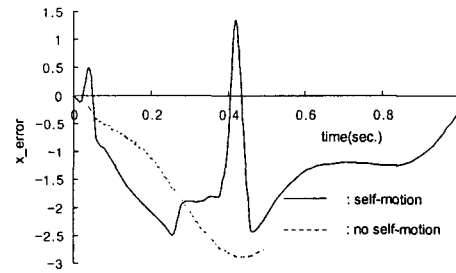
Fig. 10. Transition graph of the distance between two arms(Exp. #2 : variation=5(deg.))

충돌 위험에서 벗어남을 확인할 수 있다. 왼팔이 직선 경로를 움직이면서 나타내는 엔드-이펙터의 위치 오차를 살펴보면 그림 11과 같다. 각 축 방향의 위치 오차를 비교해 보면 오른팔과 왼팔 사이에는 상대적으로 큰 차이가 있어 보이지만, 이 그래프들에서 주목해야 할 사실은 각 팔의 위치 오차가 자체운동의 있고 없음에는 큰 영향을 받지 않는다는 점이다. 즉, 각 팔의 위치 오차는 역기구학을 푸는 과정에서 발생한 오차이며 본 논문에서 제안한 방법으로 충돌 회피를 하는 과정과는 관련이 없다고 할 수 있다. 이상에서의 두 가지 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 방법으로 여유 자유도형 두 팔 로봇이 두 팔 사이의 충돌을 회피하며 각 팔의 독립적인 작업을 수행할 수 있음을 검증하였다.

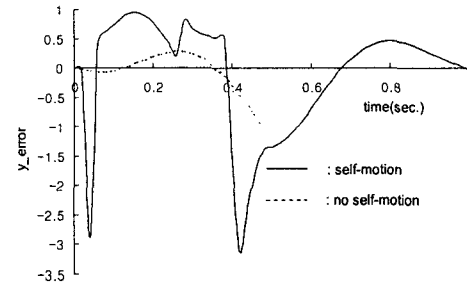
V. 결론

본 논문에서는 두 팔을 가진 로봇 매니퓰레이터가 각 팔의 여유 자유도를 이용하여 서로 충돌을 회피하며 각각 정해진 작업을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하고 그 성능을 그래픽 시뮬레이터를 통하여 검증하였다. 제안한 알고리즘을 이용하여 각 팔의 엔드-이펙터는 주어진 초기 위치와 목표 위치를 연결하는 직선 경로를 따라 움직이며 독립적인 작업을 수행하는 동시에 서로의 충돌을 회피할 수 있다. 각 엔드-이펙터가 작업 수행을 위한 직선 경로에서 벗어나지 않으면서 두 팔 사

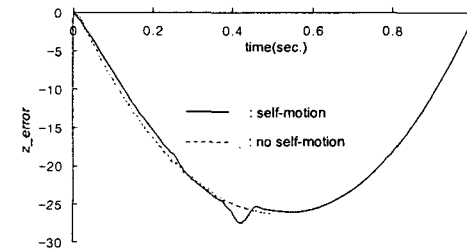
이



(a) x_error



(b) y_error



(c) z_error

그림 11. 왼팔 엔드-이펙터의 위치 오차의 변화(실험 #2 : variation=5(deg.))

Fig. 11. Transition graph of the position error of the left arm's end-effector(Exp. #2 : variation=5(deg.))

이의 충돌을 회피할 수 있는 것은 충돌 회피를 위한 각 링크들의 동작이 자코비안의 영 공간으로 사상되는 자체운동으로서 엔드-이펙터의 위치와 방향에 영향을 주지 않기 때문이다. 자체운동은 매 샘플링 시간마다 두 팔 사이의 충돌 가능성이 있는 링크들이 서로 멀어지는 방향으로 일정량만큼 움직이도록 결정하였다. 각 팔이 9자유도 매니

플래이터로서 각각 3차원의 여유 자유도를 갖는 두 팔 로봇 시스템을 대상으로 모의 실험을 수행한 결과 자체운동을 통하여 각 팔의 엔드-이펙터가 정해진 직선 경로로부터 크게 벗어나지 않으면서 두 팔을 구성하는 링크들 사이의 충돌을 효과적으로 회피할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구 과제로는 제안한 알고리즘 중 충돌을 회피하기 위한 자체운동을 각 축에 따라 제한적으로 또는 직렬적으로 적용하는 실험 및 결과 분석을 통하여 알고리즘의 효율성을 높이고, 자체운동을 하기 위한 각 축의 동작량의 크기나 방향을 상황에 따라 변시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy", Proc. 1st Int. Symp. of Robotics Research, pp.735-748, 1984.

[2] S. Seereeram and J. T. Wen, "A global approach to path planning for redundant manipulators", IEEE Trans. on R&A, Vol. 11, No. 1, pp.152-160, 1995.

[3] C. L. Luck and S. Lee, "Global path planning of redundant manipulators based on self-motion topology", Proc. IEEE Int. Conf. on R&A, pp.372-377, 1994.

[4] Y. Nakamura, "Advanced Robotics: Redundancy and Optimization", Addison-Wesley Publishing Co., 1991.

[5] A. A. Maciejewski and C. A. Klein, "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments", Int. J. Robotics Res., Vol. 4, No. 3, pp.109-117, 1985.

[6] Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Task priority based redundancy control of robot manipulators", Int. J. Robotics Res., Vol. 6, No. 2, pp.3-15, 1987.

[7] T. Lozano-Perez, "A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators", IEEE Trans. on R&A, Vol. RA-3, No. 3, pp.224-238, 1987.

[8] J. Guldner and V.I. Utkin, "Sliding mode control for gradient tracking and robot

navigation using artificial potential Fields", IEEE Trans. on R&A, Vol. 11, No. 2, pp.247-254, 1995.

[9] B. H. Lee and C.S.G. Lee, "Collision-free motion planning of two robots", IEEE Trans. on SMC, Vol. 17, No. 1, pp.21-32, 1987.

[10] K. G. Shin and Q. Zheng, "Minimum-time collision-free trajectory planning for dual-robot systems", IEEE Trans. on R&A, Vol. 8, No. 5, pp.641-644, 1992.

[11] Y. Shin and Z. Bien, "Collision-free trajectory planning for two robot arms", Robotica, Vol. 7, pp.205-212, 1989.

저자 소개



이석원(Seok-Won Lee)

1991년 서울대학교 제어계측공학과(공학사)

1993년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)

1998년 서울대학교 전기공학부(공학박사)

1998년 - 2001년 삼성테크윈 선임연구원

2001년 - 현재 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 전임강사

※ 관심분야 : 로봇틱스, 지능제어, 마이크로프로세서 응용



남윤석(Yun-Seok Nam)

1987년 서울대학교 제어계측공학과(공학사)

1989년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)

1997년 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)

1997년 - 1998년 삼성전자 선임연구원

1998년 - 현재 한국산업기술대학교 제어계측공학과 조교수

※ 관심분야 : 로봇틱스, 공장자동화, 마이크로프로세서 응용