

두 로봇의 충돌 회피를 위한 조인트 제한 지도(JCM)의 구성

남 운석, 이 범희, 고 명삼

서울대학교 제어 계측 공학과 로보틱스 및 지능 시스템 연구실

A Design of JCM(Joint Constraint Map) for the Collision Avoidance of Two Robots

Yun Seok Nam, Bum Hee Lee, Myoung Sam Ko

Robotics & Intelligent Systems Lab.

Dept. of Control & Instrumentation Eng., Seoul Nat'l Univ.

Abstract

In this paper, collision avoidance of two robots working in a common workspace is described. The workspace for a two robot system is defined and classified. JCM (Joint Constraint Map) is designed which shows the region of joint values that must be avoided for collision free motion, and application of the JCM is studied.

1. 서론

최근 진행되는 공장 자동화 추세에 따라 공장에서의 로봇은 필수 불가결한 요소가 되었다. 이에 따라 로봇의 효율적인 사용을 위한 많은 연구가 진행되고 있는데, 그 중 여러 로봇이 공동 작업 공간(common workspace)내에서 독립된 작업(loosely coordinated work)이나 상호 보완 작업(tightly coordinated work)을 하는 경우, 로봇사이의 충돌 문제가 관심있는 연구 대상이 되었다.

각 로봇이 미리 계획된 궤적(trajec-tory)으로 목적지까지 움직일 때 작업 공간내의 장애물(obstacle: 고려 대상인 로봇이외의 모든 물체)과의 충돌 가능성은 항상 존재한다. 이 장애물은 고정 물체(static object)와 컨베이어(conveyor)위의 물체나 다른 로봇 즉, 유동 물체(moving object)로 분류할 수 있다. 충돌을 피하고 목적지까지 움직이기 위해서는 첫 단계로, 움직이기 전에 미리 충돌 가능성에 대한 조사가 필요하다. 즉, 효과적인 충돌 감지(collision detec-

tion) 알고리즘이 요구된다. 충돌 감지는 고정 장애물인 경우는 그 물체의 위치, 형태, 크기등의 기하학적 성질을 미리 알아서 로봇의 계획된 경로가 장애물과의 충돌 가능성이 있는지를 감지하는 것이고, 유동 장애물인 경우는 그 장애물의 기하학적 복셀과 궤적에 대한 정보를 종합하여 충돌 발생 위치와 시간을 감지한다. 다음 단계로, 충돌 감지의 결과로 충돌 가능성이 있는 경우 충돌 없는 동작 계획(collision-free motion planning)이 필요하다.

이상을 요약하면 빠르고 효율적인 충돌 없는 동작 계획을 수행하는 알고리즘이 요구됨을 알 수 있다. 이를 위해서 먼저, 충돌 감지를 신속하고 용이하게 하기 위한 장애물과 로봇의 적절한 표현과 효과적인 자료 저장 방법이 필요하고, 다음 단계로, 이를 이용한 충돌 없는 동작 계획 알고리즘의 제시가 요구된다.

그 동안 이상의 문제를 해결하기 위한 많은 방법이 제안되었다 [ 1 - 11 ]. 그 중 Lozano-perez [ 1, 2 ]는 실제 공간상의 장애물을 형상 공간(configuration space)에 표시하여 구성한 형상 공간-시간 지도(configuration space-time map)를 이용한 충돌 회피 동작 알고리즘을 제시하였다. 또한, Park [ 3 ]은 이 개념을 다중 로봇 시스템에 적용하였다.

본 논문은 두 대의 로봇이 공동 작업 공간에서 작업을 할 때, 각 로봇의 충돌 없는 동작을 수행하는 새로운 알고리즘을 제시하는데 있어, 두 로봇이 충돌할 수 있는 가능성이 있는 영역은 공동 작업 공간인 점에 착안하여 작업 공간의 기하학적 특성을 이용한

충돌 감지 알고리즘을 제안한다. 즉, 한 로봇이 동작 중에 있을 때 다른 로봇과의 충돌 가능 영역을 표시한 JCM(Joint Constraint Map)을 이 방법으로 구성하였다. 또한, 충돌 회피 동작에의 JCM의 기본적인 이용 방법에 대해 고찰을 하였다.

2장에서는 시스템을 모델링하였고, 3장에서는 다중 작업 공간의 생성과 분류에 대해 기술하였고, 4장에서는 JCM을 구성하고 이에 대한 시뮬레이션을 하였다. 마지막으로 5장에서는 요약과 앞으로의 연구 방향에 대해서 간단히 기술하였다.

2. 시스템 모델링 (System Modeling)

본 논문에서는 두 대의 SCARA형 로봇이 공동 작업 공간을 두고 독립된 작업을 하는 경우에 있어서 충돌 문제에 대해서 살펴 본다. SCARA형 로봇의 외관은 그림 1과 같다. 앞으로 다룰 충돌 회피 문제를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

(가정1) 로봇의 수직 운동 링크를 무시하고, 조인트 3의 좌표계의 원점을 엔드 이펙터(end effector)의 중심점으로 본다. 즉, 그림 2와 같이 2 자유도의 관절 조인트(revolute joint)로 이루어진 로봇으로 간단히 모델링이 된다.

(가정2) 링크 1과 2는 각각  $a_1, a_2$ 의 길이를 갖는 직선이다.

(가정3) 각 조인트의 회전 가능 범위는 다음과 같다.

$$\theta 1 : \theta 1min (-130^\circ) \longleftrightarrow \theta 1max(100^\circ)$$

$$\theta 2 : \theta 2min (-10^\circ) \longleftrightarrow \theta 2max(150^\circ)$$

(가정4) 그림 2의 두 로봇은 동형이고, 두 로봇의 X축은 동일 직선위에 있다.

(가정5) 두 로봇의 작업 공간은 겹친다. 즉,

$$a_1 + a_2 > dx/2 \quad (1)$$

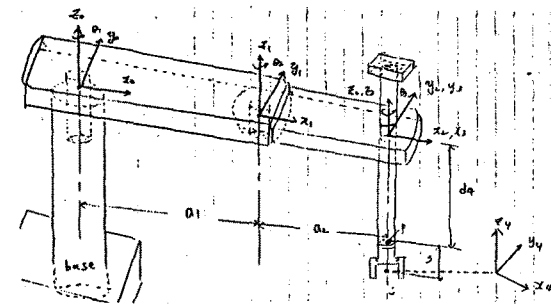


그림 1. SCARA 형 로봇의 간략화된 외관

그림 2는 두 로봇이 2차원 평면상에 임의로 배치되었을 때, 평면상의 한 점에 대한 두 로봇의 좌표계로부터의 관계를 나타낸다[12].

3. 두 로봇의 작업 공간

작업 공간은 주어진 공간 내에서 로봇의 엔드 이펙터(end effector)의 중심이 도달할 수 있는 점들의 집합으로 정의할 수 있다[12]. 이 정의에 의한, 2장에서 모델링한 시스템의 작업 공간은 링크 2의 끝점이 도달할 수 있는 점들의 집합이 된다. 다음 절에서는 두 로봇이 그림 2와 같이 놓여 있을 때의 다중 작업 공간을 구성하고 분류한다.

3.1. 두 로봇의 작업 공간의 구성

작업 공간을 표시하기 위하여 Yang[13]이 제안한 방법을 이용하였다. 이 방법은 searching으로 작업 공간의 한 경계점을 찾고, 이 경계점으로부터 cordray 추적법으로 전체 경계를 구하는 것이다. 이 알고리즘을 이용하여 그림 2와 같이 임의의 거리(dx)로 배치된 두

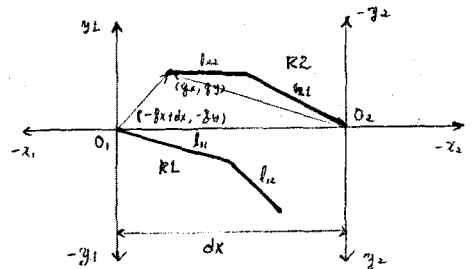


그림 2. 공동 작업 공간을 갖는 두 로봇

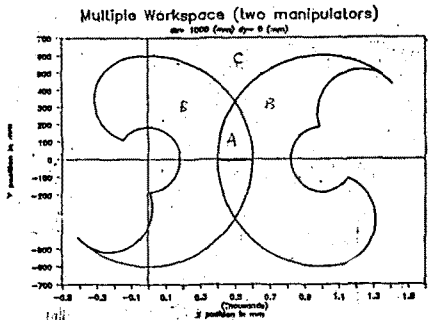


그림 3. 두 로봇의 다중 작업 공간

로봇이 이루는 다중 작업 공간을 구성한다. 구성의 첫 단계는, 각 로봇의 작업 공간을 각 로봇의 좌표계를 기준으로 구한다. 다음 단계로, R1의 좌표계를 전체 시스템의 기준 좌표계로 보고, R2의 작업 공간상의 경계점을 R1의 좌표계로 변환시킨다. 그림 3은 이렇게 구성된 다중 작업 공간의 한 예이다.

3.2. 다중 작업 공간의 분류

두 대 이상의 로봇으로 이루어진 시스템을 구성하고자 할 때, 로봇과 로봇, 로봇과 작업자간의 충돌등의 안전과 관련된 문제나 효율적인 작업을 위한 로봇 배치에 관한 문제등을 고려하여야 한다. 이를 위해 다중 로봇이 이루는 다중 작업 공간에 대한 분석이 필요하게 된다. 다음은 두 로봇이 이루는 다중 작업 공간을 작업 환경과 안전성을 고려하여 분류, 정의하였다.

- (1) 공동 작업 공간(CW) --- 여러 로봇이 연이어 벨트나 작업대를 두고 공동 작업을 하는 공간이다. 로봇간의 충돌 가능 지역이고, 작업자도 위험한 공간이다. 이는 그림 3의 A 공간이다.
- (2) 독립 작업 공간(Respective Workspace : RW) --- 로봇의 독자적인 작업이 수행되고, 연이어 벨트, 작업대, 선반, 불꽃대 등이 존재할 수 있다. 작업자에게는 위험한 공간으로 그림 3의 B로 표시되어 있다.
- (3) 지지 작업 공간(Supporting Workspace : SW) --- 시스템 전체의 작업에 지지 역할을 할 수 있는 공간으로 작업자가 충돌의 위험없이 활동을 할 수 있는 장소로, 그림 3의 C 공간이다.

4. JCM의 구성과 분석

3장에서 정의한 CW에서의 두 로봇의 충돌 가능성 감지와 이의 충돌 회피 동작에의 이용 방법에 대해서 논한다. 충돌 회피 동작을 위해서는, 먼저 충돌 가능한 위치와 시간에 대한 정보를 얻고 신속하게 얻고, 얻은 정보를 사용하기 편리하게 저장하고, 이 정보로부터 적절한 동작 계획이 수립되어야 한다. 다음 절에서는 이 정보를 얻기 위한 방법으로, 작업 공간 개념을 이용한 새로운 알고리즘을 제안하였다.

4.1. JCM의 구성 원리

CW를 직각 좌표계(cartesian coordinate space)의 고정 장애물 영역으로 보고, 이 영역내의 각점을 조인트 좌표계상의 점들로 사상(mapping)하면, 사상된 영역은 충돌이 발생하지 않는 로봇의 조인트 값들을 나타낸다. 이것이 JCM의 기본 구성 원리인데, 이 관계를 도식적으로 나타낸 것이 그림 4이다. 그림에서 금지 영역(forbidden region)은 CW를 조인트 좌표계로 사상시킨 영역을, 안전 영역(safe region)은 RW의 사상된 영역을 나타낸다. 다음은 JCM을 구성하는 알고리즘을 상술하기 전에 필요한 가정이다.

(가정 6) R2는 R1에 비해 동작의 우선권을 갖는다.

즉, R2은 R1의 유동 장애물로 작용한다.

이 가정에 의하면 JCM은 R1이 움직일 때 제한받는 영역을 나타낸 지도가 된다. JCM 구성 알고리즘은 그림 5에 나타나 있다.

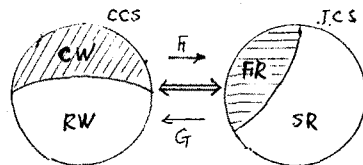
JCM은 dx에 따라 변화하는데, 그림 6은 dx = 1.0m인 경우에 구한 JCM이다. 이 그림에서 막대 모양의 영역은 링크 1의 끝점이 CW안에 있기 때문에 생긴 영역이다. 이런 경우는 다음과 같을 때에 발생한다.

$$2 * a1 + a2 >= dx \tag{2}$$

4.2. 시간을 고려한 JCM 구성

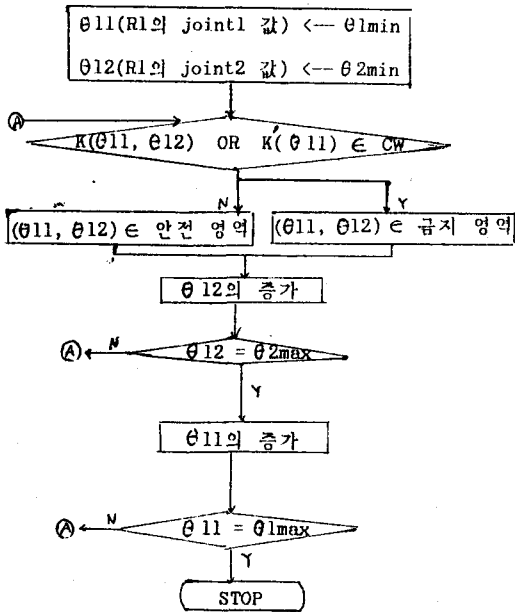
4.1 절에서의 JCM 구성법은 충돌 회피 동작에 이용한다는 점에서 다음과 같은 비효율적인 면을 가지고 있다.

- (1) 동작하는 어느 한 순간에, R2의 몸체 일부는 CW의 일부만을 차지하는데도 불구하고 CW 전체를 장애물로 고려하였다.



CCS : Cartesian Coordinate Space  
 JCS : Joint Coordinate Space  
 FR : Forbidden Region  
 SR : Safe Region  
 F : inverse kinematics  
 G : kinematics

그림 4. 직각 좌표계와 조인트 좌표계와의 관계



$\theta_{11}$  : R1의 링크 1의 조인트 변수  
 $\theta_{12}$  : R1의 링크 2의 조인트 변수

K : kinematics      K' : link1만의 kinematics

그림 5. JCM 구성 알고리즘

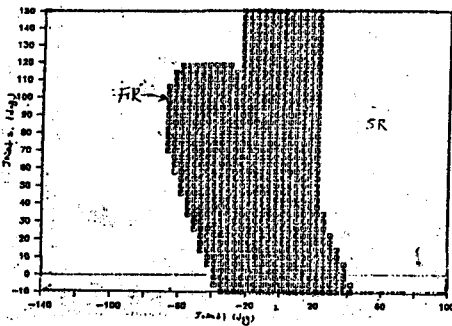


그림 6. JCM의 한 예

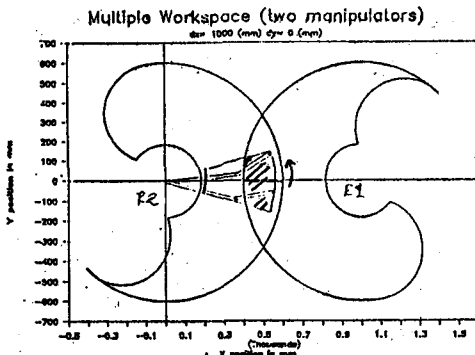


그림 7. 단위 표본 구간 동안에 로봇에 의하여 발생된 스융 영역

(2) 데이터를 저장하기 위하여 많은 기억 용량이 필요하다.

이 문제를 해결하기 위하여 R2의 동작을 단위 표본 구간(sampling period)으로 분할하여 각 구간에서 CW 상에서의 R2가 만드는 스융 영역(swept region)에 대해 R1의 JCM을 구성한다. 즉, 이것은 그림 7의 빗금친 영역에 대한 JCM을 구성하는 것이다.

#### 4.3. 시뮬레이션

4.2 절에서 제안한 JCM 구성 방법을 사용하여 다음과 같은 조건으로 시뮬레이션을 하였다.

- dx = 0.9 m
- R2는 그림 8과 같은 속도 프로파일(profile)을 갖는다. 그림 9는 이 때의 직각 좌표계상의 경로이다.
- 표본 구간 : 0.5 sec

시뮬레이션 결과는 그림 10 과 같다.

#### 4.4. 충돌 회피를 위한 JCM 이용에 대한 고찰

충돌 회피 문제에 있어 JCM을 구성함으로써 얻는 이점은 다음과 같다. 첫째, 로봇의 전체 몸체를 고려하여 구성된 조인트 공간상의 JCM에서의 충돌 회피 동작은, 직각 좌표계상의 한 점의 고정 물체 회피 경우와 같은 방법으로 할 수 있다는 것이다. 둘째, 귀적 계획시에 역 키네마틱스(inverse kinematics)가 불필요하므로 다중 키네마틱스 해의 발생 경우가 없다는 것이다.

이와 같은 특성과 시뮬레이션에서 얻은 자료를 이용하여 충돌 회피 문제를 다룰 때에, 충돌 회피 문제는 어느 표본 구간에서 구성된 JCM의 안전 영역의 한 점이 금지 영역을 거치지 않고 안전 구역의 다른 점으로 이르는 경로를 찾는 문제로 귀착될 수 있다. 이 문제의 해결 방법으로 Lozano-perez[2]는 V-그래프 탐색 방법을 사용하였다.

그러나, 위와 같은 방법으로 충돌 회피 동작 계획을 하는 경우에 다음과 같은 문제점이 존재한다. 첫째, 표본 구간을 어느 정도로 하느냐는 것이고, 둘째, 동작을 이산화시킴으로써 불확실성(uncertainty)이 발생한다는 것이다. 앞으로 이 문제의 해결 방법과 함께 효율적인 충돌 회피 알고리즘의 개발이 요구된다.

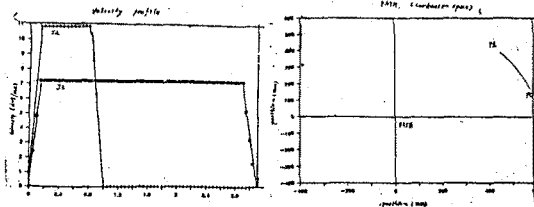
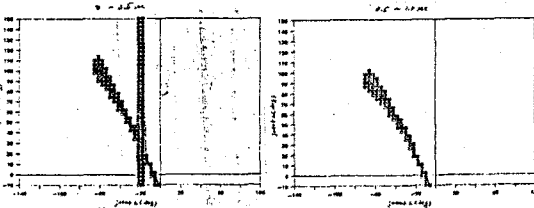


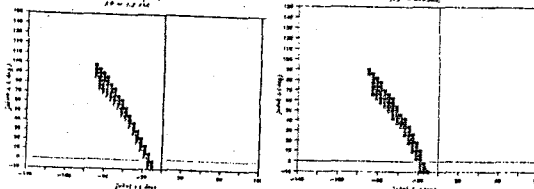
그림 8. 임의로 주어진 R2의 속도 프로파일

그림 9. R2의 경로



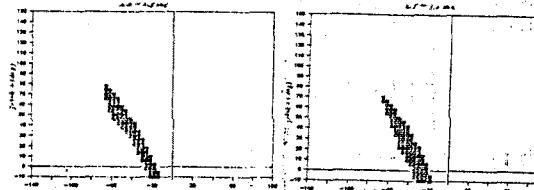
(a) 0 - 0.5 sec

(b) 0.5 - 1.0 sec



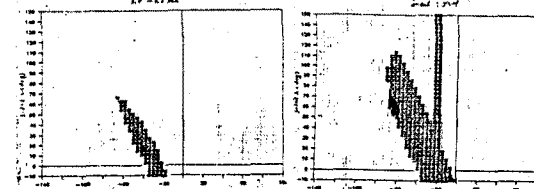
(c) 1.0 - 1.5 sec

(d) 1.5 - 2.0 sec



(e) 2.0 - 2.5 sec

(f) 2.5 - 3.0 sec



(g) 3.0 - 3.1 sec

(h) total JCM

그림 10. 시간을 고려하여 구성한 JCM

5. 결론

두 로봇이 공동 작업 공간을 두고 동작을 할 때의 충돌 회피 문제에 대해서 논하였다. 이를 위하여 다중 작업 공간을 분류, 정의하였고, 이를 바탕으로 충돌 회피를 위해 두 로봇이 만드는 JCM을 구성하였다. 여기서, 특이할 점은, JCM은 두 로봇의 모든 링크를 고려하여 구성했다는 것과 이를 이용한 충돌 회피는 일종의 엔빌랩 충돌 회피(envelope collision avoidance)라는 것이다. 다음 단계로, 이상에서 얻은 결과를 바탕으로 모델링한 시스템에 적절한 충돌 회피 동작 알고리즘을 개발하는 연구가 요구된다.

참고 문헌

- [1] T. Lozano-Perez, "Spatial Planning: A Configuration Space Approach," *IEEE Trans. on Computers*, C-32(2): pp.108-120, 1983.
- [2] M. Erdmann and T. Lozano-Perez, "On multiple moving objects," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1419-1424, 1986.
- [3] W.T. Park, "State-Space representations for coordination of multiple manipulators," in *Proc. 14th Int. Symp. Industrial Robots*, Gothenburg, Sweden, pp. 397-405, 1984.
- [4] W.E. Red and H.V. Truong-Cao, "Configuration maps for robot path planning in two dimensions," *ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr.*, Vol.107, Dec. 1985.
- [5] B.H. Lee, "Wrist Collision Avoidance of Two Robots: A Collision Map and Time Scheduling Approach," in *Proc. 25th IEEE Conf. Decision and Control*, Athens, Greece, pp.429-434, Dec. 1986.
- [6] K. Kant and S.W. Zucker, "Toward Efficient Trajectory Planning: The Path-Velocity Decomposition," *Int. J. Robotics Res.*, Vol.5, No.3, pp.72-89, Fall 1986.
- [7] J.W. Roach and M.N. Boaz, "Coordinating the Motions of Arms in a Common Workspace," *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.5, pp.437-444, Oct. 1987.
- [8] P. Tournassoud, "A Strategy for Obstacle Avoidance and Application to Multi-Robot Systems," *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, pp.1224-1229, 1986.
- [9] R.S. Wallace, "Three Findpath Problems," in *Proc. AAAI Nat. Conf. AI*, pp.326-329, 1984.
- [10] E. Freund, "Hierarchical Control of Guided Collision Avoidance for Robots in Assembly Automation," pp.91-103. Sept. 1983.
- [11] Y.S. Shin and Z.N. Bien, "Coordination Chart for Collision-Free Motion of Two Robot Arms," '87 KACC, pp.915-920, 1987.
- [12] J.J. Craig, "Introduction to Robotics, Mechanics & Control," pp.106-110, 1986.
- [13] D.C.H. Yang and T.S. Chiueh, "Work Area of Six Joint Robots with Fixed Hand Orientation," *International J. of Robotics and Automation*, Vol.1, No.1, pp.23-32, 1986.