

# 초기속도 부가에 의한 두 대의 로봇 시스템의 최소시간 경로계획

이지홍, 문점생<sup>o</sup>  
국립금오공과대학 전자제어공학과

## A Minimum-Time Trajectory Planning for Dual Robot System Using Running Start

Jihong Lee and Jeomsaeng Moon<sup>o</sup>  
Department of Control Engineering, Kum-oh National Institute of Technology

### ABSTRACT

A velocity planning method is proposed that ensures collision-free and minimal delay-time motions for two robotic manipulators and auxiliary equipments. Additional path, which makes robot start with possible largest speed, is added to the original prescribed path of one of two robots, and this running start along the additional path reduces delay time introduced to avoid collision between the robots and therefore reduces total traveling time.

## 1 서론

공간상에 길이 주어졌있는 두대의 로봇트를 위한 충돌 없고 시간적으로 최소인 속도 및 조정계획을 런닝 스타트란 개념에 의해 구하는 방법을 제안한다.

실제로 운영되고있는 많은 로봇트 시스템은 전체 작업시간을 줄이기 위해 여러대의 로봇트가 작업공간을 공유하며 전체작업을 나누어 가능한한 빨리 작업을 수행하도록 하는 형태를 취하고 있다. 이 경우 필수적으로 고려해야하는 문제가 로봇트와 정지 장애물과의 충돌은 물론이고 로봇트끼리의 충돌에 관한 고려이다. 이러한 필요성으로 여러대의 로봇트를 위한 충돌없는 경로계획은 로봇틱스 분야에서 오랫동안 다루어져 온 문제이나[1]-[4]

로봇트 몸체의 기구학적 동력학적 구조가 복잡해서 일반적인 문제에 대해서 해석적인 방법이 아직 알려져 있지 않다.

본 연구에서 다루고자 하는 여러대의 로봇트를 위한 충돌회피경로 계획은 [4]에서의 최소 지연 시간 방법에 기초를 두고 있는데, 이 방법의 개요를 살펴보면 일단 두대의 로봇트 각각의 최소시간 경로계획을 독립적으로 구한다. 그리고 나서 결과를 조정공간에서 표시하여 충돌 여부를 결정한다. 충돌이 없으면 해가 이미 구해진 것이 되고 만약 충돌이 있으면 어느 한 로봇트의 출발시각을 지연시켜 충돌이 없게 되도록 최소의 지연 시간을 구한다. 물론 그 방법이 이러한 경우의 최소시간임을 보장한다는 해석적인 증명이 기술되어있다. 여기서 사용되고 있는 어떻게 두 대의 로봇트의 충돌 여부를 결정하는가 하는 문제는 편리하게 충돌여부를 판단할 수있는 조정공간의 개념이 [3]에서 발표된 바있는데 이 조정공간은 두대의 로봇트가 각각의 길위를 따라 이동한 거리를 2차원 공간의 각각의 축으로 하고 시간이 배제된 그 공간 위에서 충돌 영역을 그래픽적인 방법에 의해 구함으로써, 두대의 로봇트의 경로 계획 문제를 2 차원 조정공간에서 연속한 곡선을 찾는 문제로 단순화시킬 수있도록 했다.

그런데 보통 로봇트 시스템이 이용될 때는 여러 주변

장치와 연계되어 있는 상황이 보통의 경우이다. 이런 경우에는 로봇 앞쪽에 작업대상물이 안정하게 고정되는데 얼마간의 시간이 경과하기 마련이다. 본 연구에는 이러한 경우와 하나의 충돌 영역을 가정하여 그 준비 시간동안 로봇을 미리 준비시켜, 즉 안전한 공간으로 주어진 경로의 뒤쪽으로 이동하였다가 주어진 경로 위로 운동하여 실제로 주어진 경로위를 달릴때는 어느 정도의 초기 속도를 갖게하고 이러한 초기속도를 이용하여 충돌 문제를 적극적으로 해결하는 방법을 제안한다. 이러한 해는 나중에 제어 단계에서 피드백 제어기와 더불어 피드포워드 양으로 사용되는 것이 보통이므로 오프라인으로 구해 저장해둘 수 있기 때문에 해의 계산 시간은 크게 문제가 되지 않는다.

본 방법의 근간을 이루고 있는 한대의 로봇의 동력학을 고려한 최소시간 운동계획에 대해서 [5] 및 [6]에서 공간상의 경로가 주어졌을 경우에 완벽한 해를 구하는 방법을 제시한 바있는데, 이들 방법은 공통적으로 로봇이 주어진 경로를 따라 이동한 거리를 나타내는 변수로 기구학적, 동력학적 방정식을 표시하는 방법을 채택하고있다. 그리고 나서 로봇의 동력원의 토크 제약조건을 위의 변수의 위상공간에서의 속도, 가속도 제약조건으로 변환시킨 다음, 최대 가속도와 최소 가속도를 스위칭하는 위상공간상의 위치들을 찾아 연결하여 최소시간을 갖는 속도계획을 구하도록 되어있다. 최근 들어 이 방법의 많은 문제점이 보완되어, 최대 또는 최소 가속도가 가정되지 않는 경우와 singlar 포인트(singular point) 또는 크리티컬 포인트(critical point)가 존재하는 경우도 해결이 가능하게 되었다[7].

이상의 방법을 기초로 본 방법에 의해 해를 구하는 순서를 기술하면 다음과 같다.

1. 두 대의 로봇의 동력학적 제약 조건으로부터 최

대 허용속도 및 가속도를 경로를 따라 움직인 거리의 함수로 표시되도록 구한다.

2. 조정공간상에서 충돌영역을 구한다.
3. 각 로봇의 시간 경로 계획을 수행한다.
4. 결정된 경로쌍의 충돌여부를 조정공간과 미리 구해놓은 충돌영역으로부터 판정한다.
5. 충돌이 있는 경우 한 로봇에 대해 주어진 여유 공간에서의 준비 경로를 결정하여 가능한 큰 속도로 런닝 스타트를 하도록 한다.
6. 충돌이 없도록 나머지 로봇의 출발 지연 시간을 구한다.

## 2 런닝 스타트에 의한 경로 계획

본 연구에서 다루고자 하는 문제의 가정을 정리하면 다음과 같다.

1. 두 대의 로봇이 작업 공간을 공유하고 있다.
2. 각 로봇이 움직여야 할 공간 경로는 사전에 결정되어 있다.
3. 각 로봇의 동력학적, 기구학적 상수가 결정되어 있다.
4. 각 로봇이 주변 장치와 간섭이 없는 동작 공간이 정해져 있다.

이상의 가정을 예제로 다루게 될 두 대의 SCARA 형 로봇의 경우를 그림 1에 나타낸다.

이러한 경우에 [7]의 방법으로 각 로봇의 최소시간 속도를 계획하고 이를 조정공간에 표시하면 그림 2의 (a)와 같이 되는데 최종 운동시간은 두 대의 로봇 모두 0.416 초로 계산되었다. 이 그림의 의미는 각각 독립적인

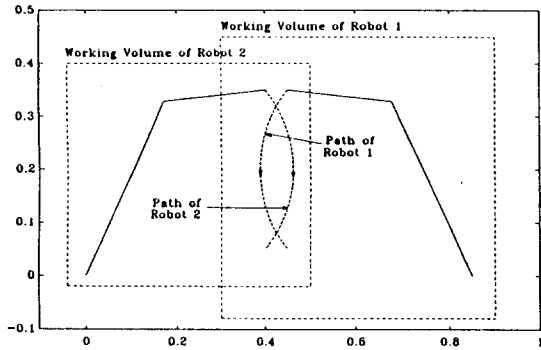


그림 1. 두 대의 로봇으로 이루어진 시스템

시간 경로 계획은 충돌을 유발한다는 것이 된다. 이러한 충돌 문제를 극복하기 위해 두대의 로봇 중 한대를 다른 한대가 출발한 후 어느 정도 출발 위치에 머물게 하다가 출발시키는 [4]의 방법에 의한 결과는 그림 2의 (b)에 보였다. 그 결과 충돌을 피해 감을 알 수 있으며 이때의 출발 지연시간은 0.092 초로서 결국 최종운동시간은 0.508 초가 되었다. 이때 주어진 경로를 동력학이 정해진 각 로봇이 운동하는 시간은 제한되어 있으므로 전체의 운동시간을 줄이기 위해서는 출발대기 시간(Delay Time)을 줄여야 함을 알 수 있다. 그런데 [4]에서의 분석에 의하면 한 로봇의 초기 속도가 지연시간에 영향을 미침을 알 수 있다.

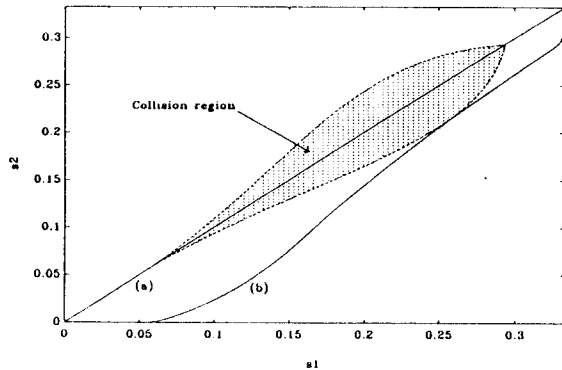


그림 2. 조정공간 및 조정곡선

본 연구의 착안점은 어느 한 로봇에게 초기에 0이 아닌 초기속도를 부가함으로써 다른 로봇의 출발 지연

시간을 줄여 보자는 것이다. 그런데 정지한 상태에서 0이 아닌 초기 속도 값을 갖는 것은 물리적으로 불가능하다. 그래서 주어진 작업공간의 여유분을 이용하여 적당한 양(공간 경로의 외의 부분)을 준비공간으로 하여 뒤로 이동하였다가 다시 출발점을 향하는 동작에 의하여 실 작업 구간에 들어섰을 때는 어떤 값의 초기속도를 갖도록 한다. 좀더 구체적으로 그림 3을 보자.

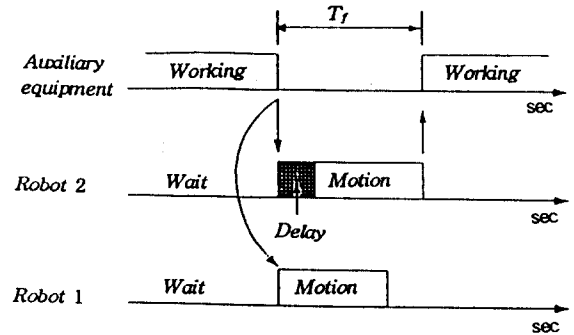


그림 3. 작업 시간표의 예

본 연구에서 가정한 두대의 로봇 시스템과 주변 장치들이 연계된 전형적인 작업 시간표이다. 여기서는 주변장치에 의해서 작업 준비가 완료된 후에 충돌을 피하기 위해 로봇 1가 먼저 움직이기 시작하고 잠시 기다린 후 로봇 2가 움직이기 시작함을 알 수 있다.

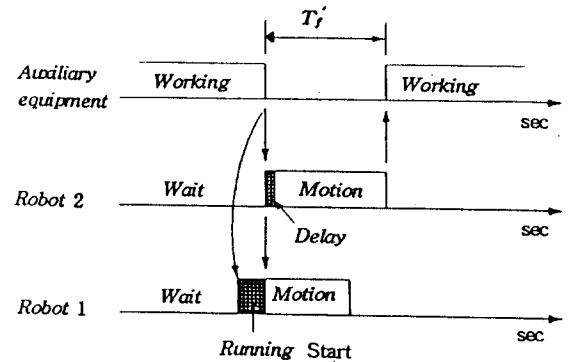


그림 4. Running Start에 의한 작업 시간 개선

이러한 경우에 런닝 스타트로써 전체 운동시간을 줄

일 수 있음을 살펴보자. 그림 3의 상황에 사전 운동을 추가한 작업시간표는 그림 4와 같다. 이 그림을 보면 주변 장치의 작업준비가 끝나기전에 로봇 2가 뒤로 준비운동에 의하여 원래의 작업경로에 진입하였을 때는 어느 정도의 초기 속도를 갖게되어 로봇 2의 작업시간도 줄어들고 이로인한 로봇 1의 지연시간도 줄게 되어 결과적으로 전체 작업시간이 줄게 됨을 알 수 있다. 다음 장에서 자세한 예제를 다루기로 한다.

### 3 시뮬레이션 예

다음의 식으로 주어진 두 대의 로봇에 대해

$$\begin{aligned}
 u_1^r &= (0.9808 + 0.3404\cos q_2^r)\dot{q}_1^r \\
 &+ (0.07905 + 0.1702\cos q_2^r)\dot{q}_2^r \\
 &- 0.3405\sin q_2^r\dot{q}_1^r\dot{q}_2^r - 0.1702\sin q_2^r\dot{q}_2^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 u_2^r &= 0.07905 + 0.1702\cos q_1^r\dot{q}_1^r + 0.07905\dot{q}_2^r \\
 &- 0.1702\sin q_1^r\dot{q}_1^r, \quad r = 1, 2
 \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1로 주어진 두 대의 로봇 및 경로에 대해 각각 독립적으로 최소시간 속도 계획을 구하면 그림 5와 같고 이를 조정공간에 표시하면 그림 6의 (a)와 같으며 로봇 1을 출발 지연시간을 주어 충돌을 피한 경우는 그림

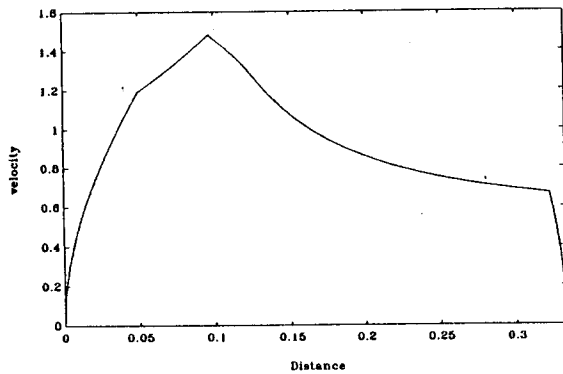


그림 5. 각 로봇의 속도 곡선

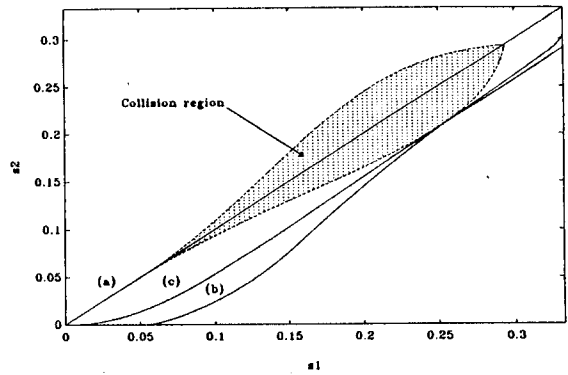


그림 6. 각 방법의 조정 곡선

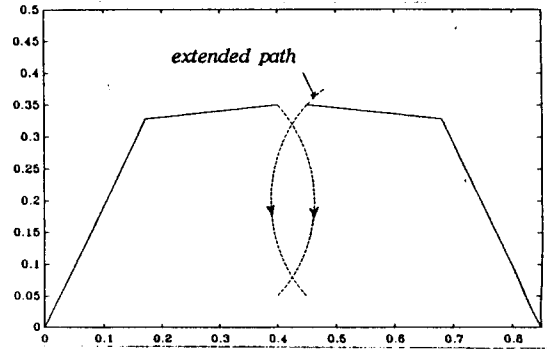


그림 7. 추가 설정된 준비운동 구간

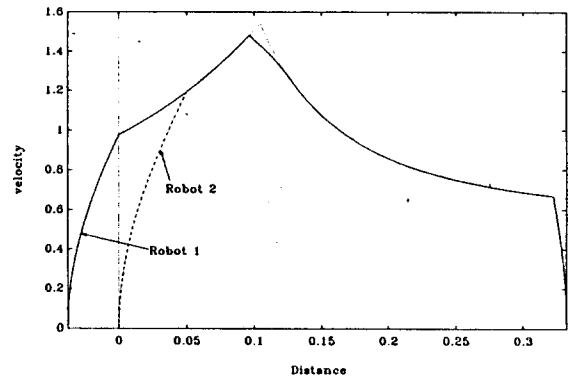


그림 8. 각 로봇의 속도 곡선

6의 (b)와 같으며 전체 작업시간은 각각 0.416초 0.508초가 된다. 여기에 그림 7과 같은 준비 운동구간을 주고 앞서 언급한 방법을 적용한 방법을 적용하면 각 로봇의 속도 계획은 그림 8과 같으며 이에 의한 지연시간은 그림 6의 (c)에서 0.0082 초로 계산되어 최종 운동시간은 0.424초로 구해졌다.

## 4 결론

작업 공간을 공유하는 두 대의 로봇과 작업 준비를 위한 주변 장치가 연계된 상황을 가정하여 충돌 없는 시간 경로 계획 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 사전에 주어진 공간 경로를 따라 이동한 거리로 각 로봇의 동력학을 표현하였으며 여기에 주어진 최대허용 토크 및 각 관절의 최대 허용 회전 속도에 제약된 최소 시간 속도 계획을 구하는 방법을 기초로 충돌을 피하기 위한 최소의 대기 시간을 구현함을 목표로 하였다. 그래서 두 대의 로봇 중 한대를 주어진 공간 경로 이외의 부분에 사전 준비 구간을 두어 이 구간을 이용하여 뒤로 갔다 다시 앞으로 가는 동작을 통하여 원래의 공간 경로 위에 도달하였을 때는 0이 아닌 속도 값을 갖도록 하여 이 로봇의 운동시간 및 나머지 로봇의 대기 시간을 줄일 수 있도록 하였다.

물론 이 연구는 시점과 종점만이 주어진 여러대의 로봇의 충돌없는 최소시간 경로계획이라는 목표의 중간 단계의 연구 과정이라 볼 수 있고 관련된 추후 연구 과제로는 준비 운동 구간의 효율적 설정 방법, 주변 장치와의 동기 문제등이 있다. 같은 거리의 준비 운동구간이라 하더라도 원래의 공간 경로 위에 도달했을 때의 속도를 다를 수 있다. 그러므로 가장 단거리의 준비 운동 구간에 의해 최대의 속도를 얻는 방법이 필요하다. 또한 본 방법은 주변 장치가 작업 준비를 완전히 마치기 전에 어느 한 로봇이 움직이게 된다. 그러므로 이 로봇이 원래의 공간 경로 위에 오르는 시각과 주변장치가 작업 준비를 마치는 시각이 일치해야 할 필요가 있을 수 있으며 이는 각 로봇의 동력학이 근사적으로 파악된 경우에 이 동시간을 정확히 계산하기 어려운 경우에 문제가 될 수 있겠다.

## 참고 문헌

- [1] E. Freund and H. Hoyer, "Real-Time Pathfinding in Multirobot Systems Including Obstacle Avoidance," *Int. J. of Robotics Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 42-70, Feb. 1988.
- [2] C. Chang, M. J. Chung and Z. Bien, "Collision-free motion planning for two articulated robot arms using minimum distance functions," *Robotica*, vol. 8, Apr.-Jun. 1990.
- [3] Y. Shin and Z. Bien, "Collision-free trajectory planning for two robot arms," *Robotica*, vol. 7, pp. 205-212, July-Sept. 1989.
- [4] Z. Bien and J. Lee, "A Minimum-Time Trajectory Planning Method for Two Robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automat.*, vol. 8, no. 3, pp. 414-418, June, 1992.
- [5] J. E. Bobrow, S. Dubowski and J. S. Gibson, "Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths," *Int. J. of Robotics Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 3-17, Fall 1985.
- [6] K. G. Shin and N. D. McKay, "Minimum-Time Control of Robotic Manipulators With Geometric Path Constraints," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-30, no. 6, pp. 531-541, Jun. 1985.
- [7] Z. Shiller and H-H. Lu, "Robust Computation of Path Constrained Time Optimal Motions," *Proc. of IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 144-149, 1990.