

## 충돌회피를 위한 다관절 로봇의 최적 경로계획

최진섭(동신대학교), 양성모, 강희용(전북대학교)

J.S.Chi (Dongshin Univ.), S.M.Yang (Chonbuk Univ.)

**ABSTRACT :** A collision-free geometric path for industrial articulated robot is searched among polyhedral obstacles considering kinematic characteristics. Then minimum-time control of the geometric path is studied considering dynamic characteristics. The algorithm is simulated on PC for maximum speed, moving time and so forth.

### 1. 서론

기존의 충돌회피 경로계획은 주로 기구학적(kinematic)인 관점에서 연구되었으며, 그 이유는 충돌회피가 일차적으로 기하학적인 문제이며 또한 동력학적(dynamic)인 고려가 쉽지 않기 때문이다. 실질적인 충돌회피 경로를 생성하기 위해서는 로봇의 기구학적 특성뿐만 아니라 동력학적인 특성도 고려되는 것이 바람직하다.

기구학적인 특성을 고려한 다관절 로봇의 충돌회피 경로계획은 크게 형상공간(configuration space)<sup>1)</sup>으로의 변환과, 변환된 형상공간에서의 충돌회피 경로생성의 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 형상공간에서 로봇은 한 점으로 표현되며 장애물들을 변환된 영역으로 표현된다. 다관절 로봇을 위한 형상공간으로는 관절공간(joint space)<sup>2,3)</sup>이 많이 이용된다. 관절공간에서 경로를 생성할 경우 로봇의 각 링크들이 장애물들에 충돌하지 않는 해를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 관절 극한을 고려하지 않아도 된다.

### 2. 충돌회피 경로의 최소시간 경로계획

기구학적 특성만을 고려한 경로의 경우에는 최소거리를 최적화 기준으로 많이 이용하고 있으나, 동적 특성을 고려한 경우에는 주어진 경로를 최소시간, 최소에너지<sup>4)</sup>를 만족하며 경유하는 방법이 있다. 실제적인 면에서 최소에너지 보다는 최소시간이 중요하기 때문에 많은 연구가 최소시간

에 중점을 두어 왔다.

최소시간 문제의 가장 간단한 경우는 초기점 및 목표점만이 주어졌을 경우의 문제<sup>5)</sup>이다. Actuator의 최소 토오크와 최대 토오크가 항상 일정하다고 가정하면 모든 actuator들의 토오크를 항상 최소값 또는 최대값을 취함으로써 두 점 사이를 최소시간에 경유할 수 있다. 이는 자동차 운전자가 가속페달 또는 브레이크페달을 최대로 밟는 것에 비유할 수 있다. 따라서 문제는 토오크의 최소값과 최대값 사이의 변환하는 시점을 결정하는 문제로 요약된다.

동적인 문제와 충돌회피 문제를 동시에 고려해야 하는 경우는 식(1)과 같이 동적인 기준을 cost 함수로 놓고 충돌회피에 관련된 제약사항을 penalty 함수로 처리하는 방법이 있다<sup>4,6)</sup>.

$$\text{Cost function} = t(\mathbf{v}) + \sum_{i=1}^q \frac{W_i}{d_i^q} \quad (1)$$

여기서  $W_i$ 들은 가중치들이며,  $d_i$ 는 로봇과 장애물 사이의 최소 수직거리이며,  $q$ 는 장애물의 개수이다. 로봇과 장애물 사이의 최소 수직거리의 계산은 쉽지 않은 문제이며 보통 장애물 및 로봇의 링크들을 직육면체 또는 다면체로 가정하고 계산한다.

위의 cost 함수에서 가중치들을 크게 하면 확실한 충돌회피를 할 수 있고, 가중치들을 작게 하면

장애물의 더 근접하는 대신 더 짧은 시간에 경로를 경유할 수 있다. 즉 시간의 문제와 안전도의 문제는 가중치에 의해서 조절되는 상반관계이다.

초기 경로의 적절한 선택을 위해서는 대화형 컴퓨터 그래픽의 이용이 도움을 줄 수 있다. 그러나 장애물이 복잡하게 널려진 작업장의 경우 위와 같은 국부적인 해(local solution)가 여러개 존재할 수 있으며, 따라서 선택한 초기 경로가 최적해에 수렴할지는 명확하지 않다<sup>6,7)</sup>.

기구학적 특성을 이용한 충돌회피 경로계획에 의해 경로가 이미 주어진 경우에는 그 경로를 로봇이 동력학적으로 최적으로 경유할 수 있도록 한다. Bobrow등은 경로상의 모든 점에서 로봇의 각축의 actuator들이 그 경로를 이탈하지 않는 범위 안에서 가장 큰 속도를 낼 수 있는 가속도 쿠데트(profile)을 선택하는 방법을 이용한 바 있다<sup>6,8,9)</sup>. 이는 자동차 운전자가 정해진 코스를 최소 시간에 통과하기 위해서는, 모든 지점에서 가능한 최고속도를 유지할 수 있도록, 가속페달과 브레이크페달을 조정하는 것에 비유할 수 있다. 여기서 코스는 로봇의 충돌회피 경로에, 가속페달은 양(+)방향 actuator에, 브레이크페달은 음(-)방향 actuator에 해당된다. 이를 위해서는 로봇의 동력학적 모델식을 경로를 따른 거리 S의 함수로 표현한다.

로봇의 비선형 동력학적 모델은 다음과 같이 서술될 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{D} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G} = \mathbf{T} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{M}$ 은  $n \times n$  관성 행렬,  $n$ 은 로봇의 자유도,  $\mathbf{D}$ 는 원심력 및 Coriolis 힘에 관계하는  $n \times n$  배열,  $\mathbf{G}$ 는 중력 벡터,  $\mathbf{T}$ 는 actuator의 토오크이다. 그리고 actuator의 토오크 구속조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{i,\min}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \leq T_i \leq T_{i,\max}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad i=1,..,n \quad (3)$$

식 (2)의  $\boldsymbol{\theta}$ 에 관해 표현된 운동방정식은 주어진 경로를 따른 거리  $S$ 를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다<sup>6,9)</sup>.

$$\mathbf{m} \ddot{S} + \mathbf{b} \dot{S}^2 + \mathbf{G} = \mathbf{T} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{m}$  및  $\mathbf{b}$ 는 계산 가능한 값이며 관절공간에서 표현되는 경우 다음과 같다.

$$\mathbf{m} = \mathbf{M} \mathbf{P}_s$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{M} \mathbf{P}_{ss} + \mathbf{P}_s^T \mathbf{D} \mathbf{P}_s$$

$\mathbf{P}$ 는 3차원 공간상의 좌표값이다.

이제 식 (2)의 각 actuator의 속도 및 가속도를 구해야 하는 multi-state 최적화 문제는 식 (4)와 같이 표현함으로써 경로상의 속도 및 가속도를 구하는 two-state 문제로 변환되었다. 허용되는 최고 속도를 내기 위해서는, 경로를 따른 가속도  $\ddot{S}$ 가 최대값 또는 최소값을 취하여야 한다. 따라서  $\ddot{S}$ 의 최대값과 최소값을 구하기 위하여 식 (4)를  $\ddot{S}$ 에 관하여 정리하여 식(3)의 actuator의 토오크 구속조건을 대입하면 다음과 같은  $\ddot{S}$ 의 최대값과 최소값을 계산할 수 있다.

$$S_d(S, \dot{S}) \leq \ddot{S} \leq S_a(S, \dot{S}) \quad (5)$$

한편 각각의  $S$ 에는 어느 속도 이상은 불가능한  $S_{\max}$ 가 존재한다. 즉  $S_{\max}$ 는 경로 상의 그 점에서 actuator의 구속조건을 위반하지 않고 허용할 수 있는 최대속도이다. 이는 자동차 코스의 임의의 지점에서 코스를 이탈하지 않을 수 있는 최고 속도에 비유할 수 있다. 따라서 주어진 충돌회피 경로를 따른 최소시간 운동은  $S_{\max}$ 를 넘지 않고  $S_d(S, \dot{S})$ 와  $S_a(S, \dot{S})$  사이의 변환점을 잘 선택하는 문제로 귀착된다. 이상의 변환과정을 요약하면 Table 1.과 같다. 거리의 함수로 표현된 변환점들은  $t = \int \frac{1}{S} dS$ 를 이용하여 시간의 함수로 표현 가능하고 또한 식(4)를 이용하여 시간에 따른 actuator의 토오크들을 구할 수 있다.

Table 1. Transformation to Distance variable

variable	joint angle ( $\boldsymbol{\theta}$ )	$\Rightarrow$	path distance( $S$ )
dynamic model	$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{D} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G} = \mathbf{T}$	$\Rightarrow$	$\mathbf{m} \ddot{S} + \mathbf{b} \dot{S}^2 + \mathbf{G} = \mathbf{T}$
constraint	$T_{\min} < T < T_{\max}$	$\Rightarrow$	$\ddot{S}_{\min} < \ddot{S} < \ddot{S}_{\max}$

그러나 최소시간을 위한 최적화는 토오크의 변환 시점에서의 불연속, actuator 자체의 동력학적 거동의 미예측 및 이에 따른 구조적 진동의 문제가 발생한다. 따라서 시간과 에너지를 적절히 조합한 cost function를 이용하는 방법도 바람직하다<sup>10)</sup>. 이와 같은 동력학적인 특성을 고려한 경로해는 기구학적인 특성만을 고려한 경로해에 비해 계산시간이 많이 소요되나 오프-라인 프로그래밍으로 해결하기 때문에 큰 문제가 되지는 않는다. 시뮬레이션이 끝난 후 생성된 최적 경로를 로봇 컨트롤러로 다운로드시킨다.

### 3. 시뮬레이션

기구학적 특성을 고려하여 충돌회피 경로를 구하고, 이 경로를 최소시간에 경유하기 위한 시뮬레이션이 수행되었다. 로봇 작업장은 3개의 장애물과 엔드-이펙터가 없는 3축 다관절 로봇으로 이루어져 있다. 로봇의 초기위치 및 최종위치는 Fig.1과 같다. 이로부터 기하학적 특성을 고려한 충돌회피 알고리듬<sup>11)</sup>을 이용하여 Fig.2와 같은 충돌회피 경로를 구하였다. 그리고 이 경로로부터 5개의 조정점(control point)  $V_1, \dots, V_5$ 를 추출하였다.  $V_1$ 과  $V_5$ 를 지나는 cubic B-spline을 구성하기 위하여 cubic B-spline 특성상 기준의 5개의 조정점 전후에 다음과 같은 인위적인 두 점을 추가하였다.

$$V_0 = V_1 + (V_1 - V_2), \quad V_6 = V_5 + (V_5 - V_4)$$

생성된 3차원 cubic B-spline 이 Fig.3에 나타나 있다. Fig.3에서 직선들의 꼭지점이 B-spline의 조정점들이다. 그림의 오른쪽 아래에는 3차원 방위가 표시되어 있다.

동적 시뮬레이션을 위한 로봇의 데이터들은 다음과 같다. 각 actuator들의 토오크는 상수를 가정하였다.

Waist :  $-300 \text{ N}\cdot\text{m} \leq \text{Torque } 1 \leq 300 \text{ N}\cdot\text{m}$   
 Shoulder :  $-200 \text{ N}\cdot\text{m} \leq \text{Torque } 2 \leq 200 \text{ N}\cdot\text{m}$   
 Elbow :  $-100 \text{ N}\cdot\text{m} \leq \text{Torque } 3 \leq 100 \text{ N}\cdot\text{m}$

Upper arm :

Length	: 0.65 m
$L_{\text{center of gravity}}$	: $0.65 / 2 \text{ m}$

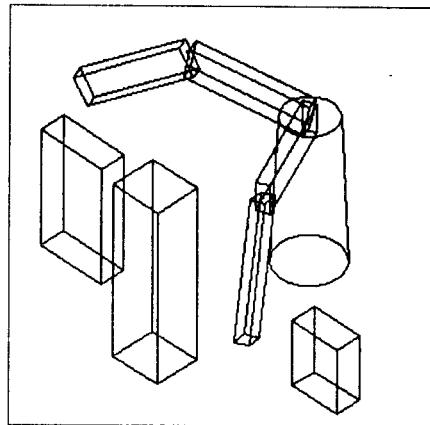


Fig.1 Start point and end point for task

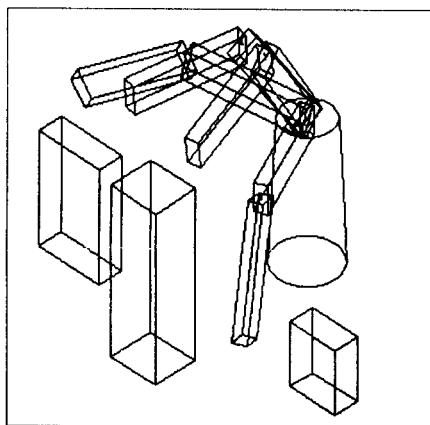


Fig.2 Collision-free path

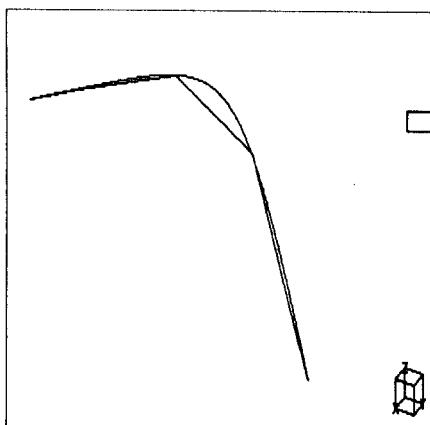


Fig.3 Control points and B-spline curve

Mass	: 10 kg
$J_{xx}$ center of gravity	: 0.1 kg/m <sup>2</sup>
$J_{yy}$ center of gravity	: 1 kg/m <sup>2</sup>
$J_{zz}$ center of gravity	: 1 kg/m <sup>2</sup>
Lower arm :	
Length	: 0.6 m
$L_{center of gravity}$	: 0.6 / 2 m
Mass	: 10 kg
$J_{xx}$ center of gravity	: 1 kg/m <sup>2</sup>
$J_{yy}$ center of gravity	: 1 kg/m <sup>2</sup>
$J_{zz}$ center of gravity	: 0.1 kg/m <sup>2</sup>

이와 같은 동적 데이터를 입력으로 하여 최소시간에 경로를 경유하기 위한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션 알고리듬은 다음과 같다.

```

PROCEDURE Dynamic_CAPP
  (collision_free_path, robot_dynamic_data ;
   Var actuator_torques)
BEGIN
  Make_B_spline (collision_free_path ;
    Var cubic_B_splines);
  FOR unit_spline:= spline_1 TO spline_number
    FOR S := 0 TO 1 STEP 0.01 DO
      Derivative_spline (S, unit_spline ;
        Var P,Ps,Pss);
      Evaluate_MDG (P ; Var M,D,G);
      Evaluate_mb (M,D,Ps,Pss ;Var m,b);
      Find_Velocity_limit (m,b,G ;
        Var Velocitylimit(S));
      Find_Velocity (m,b,G;
        Var Velocity(S));
    END
  END
  Integration_S_dot (Velocitylimit(S),Velocity(S);
    Var S(time), Velocity(time));
  Evaluate_torque(m,b;Var actuator_torques);
END

```

Fig.4에 B-spline의 경로를 따른 거리  $S$ 를 x축으로 표현하였을 때, velocity limit curve 및 경로를 따른 속도곡선을 y축에 표현하였다. 경로의 중간 부분에서 velocity limit curve의 값이 작은 것은 충돌회피 경로 상의 그 부분에서의 급격한

곡률 때문인 것으로 생각된다. Velocity limit curve 이하에서 최고의 속도를 유지하기 위하여 속도곡선은 3번의 가감속 변화(가속->감속->가속->감속)를 하였다. 이 속도곡선으로부터  $t = \int \frac{1}{S} ds$

를 이용하여 Fig.5, Fig.6과 같이 시간에 따른 속도 및 거리를 구할 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 경로(약 2.7m)를 따른 최소시간은 0.59초 정도이다.

#### 4. 결론

산업용 다관절 로봇을 위한 충돌회피 경로계획 시 동적 특성을 고려하기 위하여 초기점과 목표점만 있을 때 최소시간에 경유하는 방법, 충돌회피 및 시간을 동시에 고려하여 경로계획을 하는 방법, 기구학적 알고리듬으로 충돌회피 경로를 사전에 구하고 이 경로를 최소시간에 경유하는 방법 등이 연구되었다. 알고리듬의 검증을 위하여 주어진 충돌회피 경로를 최소시간에 경유하는 시뮬레이션이 수행되었다.

#### 참고문헌

1. T. Lozano-Pérez, "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movement," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, vol SMC-11, no. 10, Oct, 1981.
2. T. Lozano-Pérez, "A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3. no. 3, June 1987.
3. C. W. Warren and J. C. Danos and B. W. Mooring, "An Approach to Manipulator Path Planning," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 5, pp. 87-95, 1989.
4. 류길하, "장애물 회피를 위한 로봇 매니퓰레이터의 최적 경로 계획에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제17권, 제3호, pp.492-501, 1993.

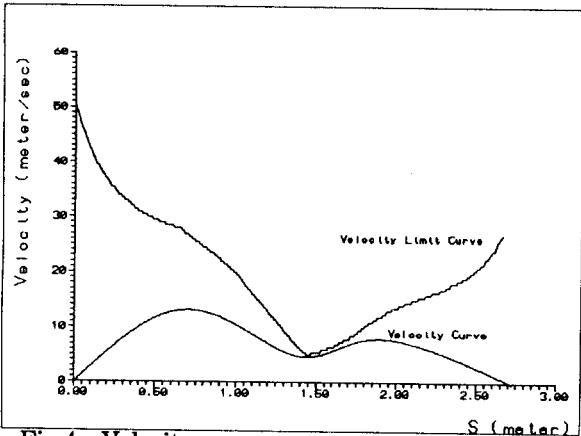


Fig.4 Velocity curve

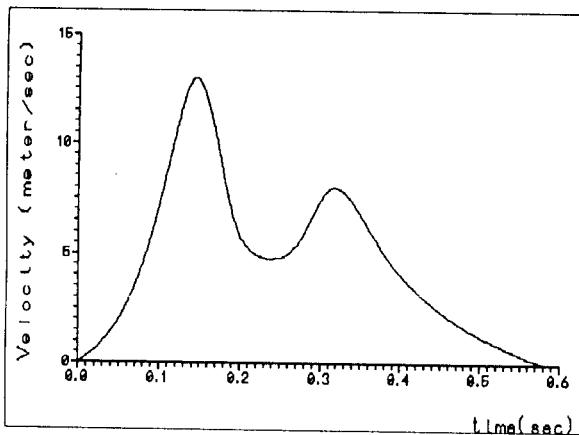


Fig. 5 Time-velocity Curve

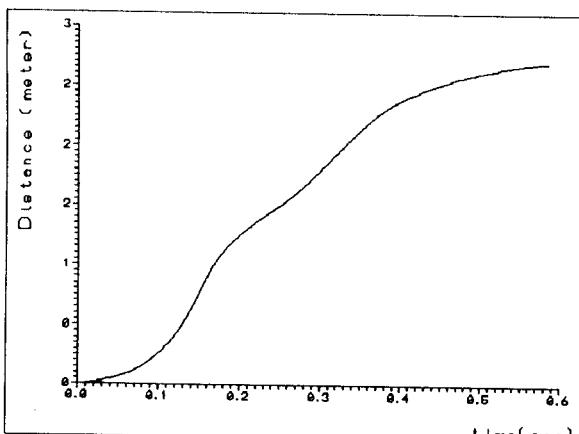


Fig.6 Time-distance curve

5. M. E. Kahn, B. Roth, "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains," *Transactions of the ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, pp.164-172, September 1971.
6. Zvi Shiller, Steven Dubowsky, "Robot Path Planning with Obstacles, Actuator, Gripper, and Payload Constraints," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.8, N0.6, December 1989.
7. Z. Shiller, S. Dubowsky, "Global Time Optimal Motions of Robotic Manipulators in the Presence of Obstacles," *IEEE Conference of Robotics and Automation*, pp370-375, 1988.
8. James E. Bobrow, "Optimal Robot Path Planning Using the Minimum-Time Criterion," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.4, No.4, August 1988.
9. James E. Bobrow, S. Dubowsky, J. S. Gibson, "Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.3, Fall 1985.
10. Z. Shiller, "Time-Energy Optimal Control of Articulated Systems with Geometric Path Constraints," *IEEE Conference of Robotics and Automation*, pp2680-2685, 1994.
11. 김정훈, 최진섭, 강희용, 김동원, 양성모, "형상공간을 이용한 다관절 로보트의 충돌회피 경로계획," *한국자동차공학회지* 11월호, 1994.