

장애물과 특이점의 회피를 위한 강인한 로봇의 궤적계획

임 남 일^{*}, 안 두 성^{*}, 손 권^{**}
* 부산 수산대, ** 부산대

Robust Trajectory Planner for Obstacle and Singularity Avoidance in a Robot Manipulator

N. I. Leem^{*}, D. S. Ahn^{*}, K. Son^{**}
* Pusan National Fisheries Univ., ** Pusan National Univ.

ABSTRACT

This paper introduces robust trajectory planner for obstacle and singularity avoidance in a nonredundant robot manipulator. In this work, we propose new trajectory generator in cartesian space by use of Bezier function. Also, SR-inverse is used for obstacle and singularity avoidance of nonredundant robot. This result is verified with 3-D simulator which has been developed to examine the effectiveness of the suggested method.

Key words : Nonredundant Robot (여유자유도가 없는 로봇), SR-inverse (Singularity Robust 역행렬), Bezier function (Bezier 함수), Singular point (특이점), Obstacle (장애물), Trajectory planning (궤적계획)

1. 서 론

로봇이 사용되는 생산시스템에서는 로봇의 동작을 방해하는 이리까지 물체가 존재하게 된다. 그러므로 로봇의 작업도중 이러한 장애물과의 충돌을 회피할 수 있는 동작 계획 시스템이 필요하게 된다. 장애물 회피에 관한 종전의 연구는 주로 형상공간상에서 행해졌으나⁽¹⁾ 계산시간의 과다로 실시간용으로는 적합치 못하다. 반면에 로봇의 작업 공간내에서의 장애물 회피를 위한 궤적계획을 행하면 계산시간이 단축되어 실시간 적용이 가능하게 된다. 그러나 작업공간상의 궤적계획은 링크와 장애물과의 충돌회피를 보장하기 어려우며 또한 특이점 부근을 통과시 역기구학의 강인성등이 문제 되어진다. 특이점 회피에 관한 종전의 연구는 주로 여유 자유도가 있는 로봇⁽²⁾에서 많이 이루어져 왔고 산업현장에서 많이 사용되는 여유 자유도가 없는 로봇의 경우는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 여유자유도가 없는 로봇에 대한 특이점과 장애물회피에 관하여 연구하였다⁽³⁾. 먼저 궤적생성을 두 단계로 분류하였는데 첫번째 단계

는 end effector의 장애물회피를 위하여 적절히 설계된 Bezier함수를 사용하여 작업공간에서의 경로가 계획된다. 두번째 단계는 특이점과 링크의 장애물회피를 위하여 작업공간에서 계획된 경로가 SR-inverse를 사용하여 관절공간으로의 계획이 이루어진다.^(4,5)

2. 궤적계획

본 연구에서는 형상공간에서의 경로계획의 단점을 보완하기 위하여 작업공간에서 궤적을 계획하였고 적절히 설계된 Bezier 함수를 사용하여 궤적생성의 소요시간을 단축시켰다. 하지만 작업공간에서의 경로계획은 관절공간으로의 수치적 변환이 되어야 한다. 작업공간에는 로봇의 관절 속도의 불일치성을 발생하는 특이점이 존재하는데 계획된 경로가 이러한 특이점이나 그 부근을 지나게 되면 관절속도가 비현실적으로 커지게 된다. 또한 작업공간에서의 경로 계획은 링크의 장애물에 대한 회피를 보장하지 못한다. 로봇의 링크와 장애물의 충돌을 방지하고 특이점을 통과하기 위하여 SR-inverse를 사용하여 관절공간으로 변환한다.

2.1 Bezier 함수를 이용한 end effector의 경로계획

Bezier 함수는 매개 함수로써 경로의 형성과 속도 조절이 용이하며 연속성이 우수하다^(6,7). 이러한 Bezier 함수의 장점을 이용하면 장애물 회피를 위한 궤적을 자동 생성할 수 있다. Bezier 함수는 식 (1)처럼 f_i 의 가중합이다.

$$f(t) = \sum_{i=0}^n f_i \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad f_i : \text{Bezier points} \quad (2)$$

속도는 식 (3)과 같이 유도된다. 시작점과 끝점의 속도는 각각 양 끝단에서의 점들을 연결하는 기울기와 같다.

$$\frac{df}{dt}(t) = \sum_{i=0}^n f_i \binom{n}{i} (i t^{i-1} (1-t)^{n-i} - t^i (n-i) (1-t)^{n-i-1}) \quad (3)$$

이러한 특성을 이용하여 중간 경유점을 가지고 경유점에서의 속도가 지정된 경우의 Bezier 함수를 설계하였는데 각 구간의 양 끝점에서의 위치를 u_0 (출발점), u_1 (도착점)이라 하고 양 끝점에서의 속도를 $\frac{du(0)}{dt}$ (출발점 속도) $\frac{du(1)}{dt}$ (도착점 속도)라 하면 Bezier 점은 식 (4)와 같다.

$$f_i : \begin{cases} f_0 = u_0 \\ f_1 = f_0 + 0.333 \frac{du(0)}{dt} \\ f_2 = f_3 - 0.333 \frac{du(1)}{dt} \\ f_3 = u_1 \end{cases} \quad (4)$$

이때 첫구간에서의 $\frac{du(0)}{dt}$ 와 마지막 구간에서의 $\frac{du(1)}{dt}$ 는 0이고 중간구간에서의 $\frac{du}{dt}$ 는 구간의 평균 속도를 조건값으로 취하여 급격한 운동을 방지한다. Bezier 함수는 미분값의 연속성을 보장하면서 Fig. 1과 같이 Bezier 점을 어떻게 설계할 하느냐에 따라서 여러 형태의 Bezier 곡선을 나타낸다.

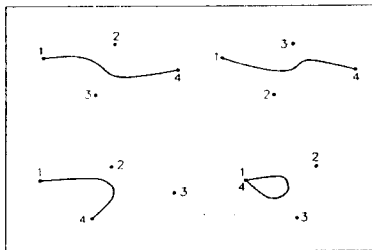


Fig. 1 Bezier curves (n=3)

2.2 SR-inverse를 이용한 관절공간에서의 경로계획

Bezier 함수를 이용하여 작업공간에서 end effector에 대한 경로계획이 완성되면 궤적계획의 문제는 역기구학을 사용한 관절공간에서의 경로계획의 문제로 축소되어진다. 강인하고 효율성 있는 역기구학의 해를 얻기 위하여 SR-inverse를 사용하였다. Bezier 함수를 사용한 end point의 궤적이 $x(t)$ 로 주어졌을때 임의의 시간 t_i 에 대한 관절변수 $\theta(t)$ 에 대한 계산은 아래 식 (5)와 같다.

$$\theta_p(t_i) = J_p^{-1}(\theta(t_i)) \dot{x}(t_i) + [I - J_p^{-1}(\theta(t_i)) J_p(\theta(t_i))] v(t_i) \quad (5)$$

$$J_p^{-1}(\theta(t_i)) = J^T(\theta(t_i)) [J(\theta(t_i)) J^T(\theta(t_i)) + kI]^{-1} \quad (6)$$

여기서 $J_p^{-1}(\theta(t_i))$ 는 SR-inverse이고 $J^T(\theta(t_i))$ 는 Jacobian의 전위이고 $v(t_i)$ 는 링크와 장애물의 회피를 위한 제어 입력이며 k 는 음의 값이 아닌 damping factor 이다. damping factor k 는 식 (7)과 같이 계산되어진다.

$$k = \begin{cases} k_0 (1 - \frac{w}{w_0})^2 & \text{if } w < w_0 \\ \zeta & \text{if } \alpha < \alpha_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

첫번째 조건식은 Singularity의 존재를 나타내는 것으로서

$$w = \sqrt{\det(J(\theta(t_i)) J^T(\theta(t_i)))} \quad (8)$$

이다.

두번째 조건식은 link와 장애물과의 충돌을 회피하기 위한 것으로서

$$\alpha = \|d_1\|^2 + \|d_2\|^2 + \dots + \|d_n\|^2 \quad (9)$$

이다.

Bezier 함수를 사용하여 작업공간에서 경로를 계획할 때 로봇 링크의 장애물에 대한 회피까지 고려한다는 것은 곤란한 문제이므로 link와 장애물사이의 거리를 최대로 하는 개념을 도입하였다. 이러한 목적을 위하여 거리 vector d_k ($k=1,2,\dots$)는⁽⁸⁾ joint에서 장애물에 가장 가까운 점까지를 표시하고 거리함수 $s(\theta) = [\|d_1\|^2 + \|d_2\|^2 + \dots + \|d_n\|^2]$ 가 최대가 되어졌다. 그리고 제어 입력 $v_i(\theta)$ 는 식 (10)과 같이 계산된다.

$$v_i(\theta) = \frac{1}{2} \left[-\frac{\partial \|d_1\|^2}{\partial \theta_i} + \frac{\partial \|d_2\|^2}{\partial \theta_i} + \dots + \frac{\partial \|d_n\|^2}{\partial \theta_i} \right]$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$(10)$$

2.3 제어 알고리즘

제어 알고리즘은 복잡하고 비선형적인 로봇의 동역학을 선형적인 게로 취급하는 계산 토크 방법을 사용하였는데 계산 토크 제어의 feedback control law는 식 (11)과 같다.

$$\tau = c(q, \dot{q}) + h(q) + D[k_p(q_d - q) + k_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + \ddot{q}_d] \quad (11)$$

여기서 τ 는 제어기의 제어입력, c 는 속도항, h 는 중력항, D 는 관성행렬이며 q 는 관절각, \dot{q} 는 관절각 속도, q_d 는 기준 입력 관절각, k_p, k_v 는 gain값이다.

2.4 충돌조사

로봇의 링크와 장애물은 유변체의 집합으로 모델링되었고, 이 두 유변체 사이의 교차물 조사하는 것으로 충돌을 확인하게 된다. 결국 충돌은 두 유변체의 교차에 의해 일어나는 것으로 거리함수의 부호로써 교차물 확인한다.

먼저 직교좌표 공간에서 면 방정식은 다음과 같다.

$$Ax + By + Cz = D \quad (12)$$

여기서 (x, y, z) 는 직교 좌표 공간을 나타낸다.

거리함수는

$$F(x, y, z) = Ax + By + Cz - D \quad (13)$$

이고 여기서 A, B, C, D 는 로봇이나 장애물을 나타내는 면이 되고 면이 만약 로봇을 표시한다면 (x, y, z) 는 장애물의 꼭지점의 좌표이다. 조사방법은 한 물체의 각 꼭지점에서 다른 물체의 면에 대한 거리함수의 부호를 조사하고 그 다음엔 다른 물체의 각 꼭지점에서 한 물체의 면에 대한 거리함수의 부호를 조사한다. 만약 이 과정에서 어느 한 거리함수라도 그 부호가 다른 거리함수와 같지 않다면 교차가 된 것이므로 충돌로써 간주한다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이터의 개요

본 연구에서 제안된 방법의 효율성을 검토하기 위하여 공동 개발된 그래픽 시뮬레이터⁽⁶⁾(OLP)를 이용하여 그 결과를 검토하였다. 이 그래픽 시뮬레이터는 SCARA형 FARA로봇을 위한 것으로서, 특히 PC 상에서 편리하게 운용될 수 있으며, 다양한 제어 알고리즘을 적용할 수 있도록 구성되어 있다.

3.2 시뮬레이터의 구조 및 특성

본 시뮬레이터 시스템은 Fig. 2와 같이 그래픽, 시뮬레이션, 프로그래밍의 세가지 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 세부적인 구성모듈을 포함하고 있으나 총체적인 기능을 수행하기 위해 서로 연관되어 있다. 그래픽모듈에서는 로봇의 모델링과 3차원 그래픽 처리를, 시뮬레이션모듈에서는 궤적계획, 기구학, 동역학, 제어 알고리즘을 통한 동적시뮬레이션의 수행을, 프로그래밍 모듈에서는 로봇 명령어와 이를 해석하는 기능을 담당하고 있다.

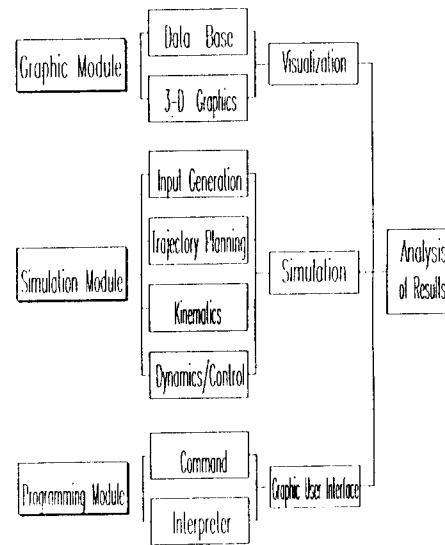


Fig. 2 Structure of simulator

3.3 시뮬레이션의 결과

특이점과 링크의 장애물회피에 대한 두가지 경우에 대해 시뮬레이션하였다.

3.3.1 특이점의 회피동작

링크의 길이는 $l_1=1, l_2=1$ 이고 출발점과 목표점의 $\theta_s = [60^\circ, -120^\circ], \theta_r = [120^\circ, -120^\circ]$ 이며, 특이점은 $\theta = [90^\circ - 180^\circ]$ 부근이다. Fig. 3은 2차원공간에서 특이점을 회피하는 링크의 동작을 보여준다. Fig. 4는 관절각의 속도를 보여준다. 그리고 Fig. 5는 조작성(Manipulability)과 damping factor를 보여준다.

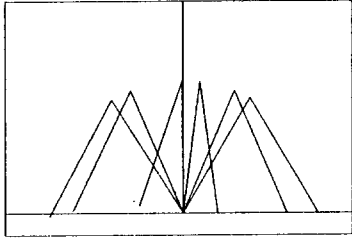


Fig. 3 Motion of links avoiding singular point

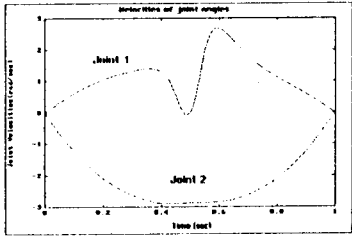


Fig. 4 Velocities of joint angles

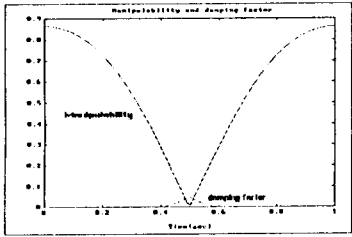
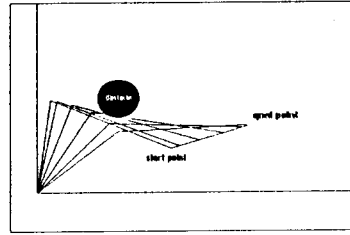


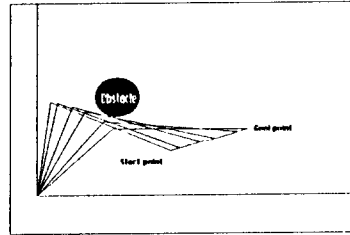
Fig. 5 Manipulability and damping factor

3.3.2 링크의 장애물 회피동작

출발점과 목표점의 $\theta_s = [82^\circ, -112^\circ]$, $\theta_g = [41^\circ, -36^\circ]$ 이며 경로를 따라 링크가 운동하면 관절각이 $\theta = [70^\circ, -88^\circ]$ 부근에서 장애물에 링크가 부딪히게 설정되어있다. Fig. 6의 (a)는 링크의 장애물 회피 계획전의 동작이고 (b)는 링크의 장애물 회피 계획후의 동작을 보여준다. Fig. 7은 OLP simulator에서의 실행화면이다. SCARA형 FARA로봇의 링크가 장애물을 회피하는 동작을 보여주고 있다. Fig. 7의 (a)는 로봇의 초기 위치이고 (b)는 링크가 장애물을 회피하는 동작이고 (c)는 로봇의 최종 위치이다.

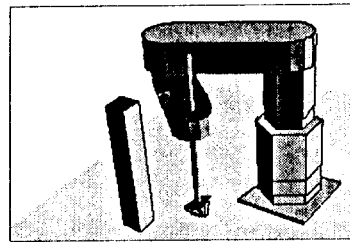


(a)

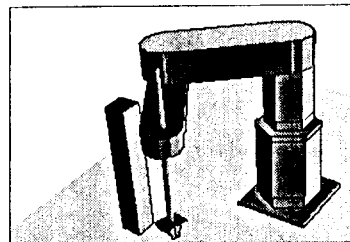


(b)

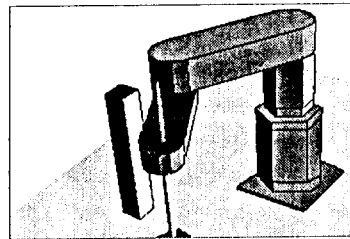
Fig. 6 Motion of links avoiding obstacle



(a) Initial pose



(b) Avoiding obstacle



(c) Goal pose

Fig. 7 Motion of links avoiding obstacle

4. 결 론

본 논문에서는 이류자유도가 없는 로봇의 특이점 회피와 링크의 장애물 회피에 관한 방법을 제시하였다. 즉 궤적생성을 두 단계로 분류하여 작업공간에서 end effector의 장애물회피를 Bezier 함수를 사용하여 계획하였고, 특이점과 링크의 장애물 회피를 위하여 SR-inverse를 사용하여 관절공간으로의 계획이 이루어졌다. 계획된 궤적은 관절속도의 연속성과 실현성이 보장되었으며 특이점의 회피뿐 아니라 링크와 장애물의 충돌회피도 가능함을 보였다.

참고문헌

1. M. Harada and M. Kunimitsu and M. Yamada, "A Planning Method of Collision Free Path for a Manipulator", IEEE Int. Robots and System , pp. 676-680. 1992
2. A.S.Deo and I.D.Walker, "Robot Subtask Performance with Singularity Robustness using Optimal Damped Least-Squares" IEEE Int. Robotics and Automation , Vol. 1, pp 434-441. 1992
3. Sunil K.Singh, "Motion Planning and Control of Non-Redundant Manipulators at Singularities" Technical Report CAR-92-05, Thayer Sch.Eng., Dart. College, 1992
4. F.Janabi-Sharifi and W.J.Wilson, "Integration of Robust Trajectory Planner with a Feedforward Neural Controller for Robotic Manipulators" IEEE Int. Rob. Aut. , Vol 4, pp 3192-3197. 1994
5. Yoshihiko Nakamura, "Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator Control" Journal of Dynamic Sys. Mea. Con., Vol. 108, pp 163-171. 1986
6. Robert E. Parkin ,1991, "Applied Robotic Analysis", Addison Wesley Pub., pp. 196-231.
7. 임남일,안두성,정창욱,손권, " 실시간 장애물 회피를 위한 고속 궤적계획에 관한 연구" 한국 자동제어 학술회의 논문집, Vol. 2 , pp. 1143-1148. 1994
8. Daniel R.Baker and Charles W.Wampler II,"On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators" Int. Journal of Robotics Research , Vol. 7, No. 2, pp. 3-20. 1988
9. 박민조,손권,안두성 October 20-22, 1993, " 3차원 그래픽을 이용한 오프-라인 프로그램의 개발", 한국 자동제어 학술회의논문집, pp. 445-449. 1993