

Path Constraint한 궤적 계획법의 위치

오차 감소에 관한 연구

“황승재”, “박세웅”, “김동준”, “김갑일”, “김대원”

“명지대학교 전기공학과”, “제어계측 공학과”

A Study on the Path Constraint Error Reducing Trajectory Planning

Hwang, Seung Jae^{*} Park, Se Woong^{*}
Kim, Dong Jun^{*} Kim, Kab Il^{*} Kim, Dae Won^{**}

^{*}Dept. of Electrical Eng., Myongji Univ.

^{**}Dept. of Control and Instrumentation Eng. Myongji Univ.

ABSTRACT

There are a variety of trajectory and control algorithms available for robot trajectory tracking. Before using the enhanced trajectory and control algorithms to reduce the tracking error, we introduce the new method which reduces the tracking error by clipping the joint velocity. A lot of robot trajectory tracking methods are proposed to enhance the robot tracking, but irregular tracking errors are always accompanied. Up to now, these irregular tracking errors are gradually but uniformly reduced by introducing more complicated control algorithms. It is intuitively obvious to reduce only the big errors selectively in the irregular ones for the better performance. By heuristic method, big tracking errors in these irregular ones are assumed mostly due to the fast moving of joint with respect to the same tracking and control method. So, in this paper, we introduce a new method which reduce the big tracking errors by clippings the joint velocity with the constraint of given path. Using this method, desired trajectory tracking is obtained within the far reduced error bound. Also, this method is successfully applied to generate the path-constrained error reducing trajectories for 2-axis SCARA type robot.

1. 서 론

궤적 계획은 시간의 진행에 따라 주어진 목표 위치까지 로보트의 관절이 얼마의 속도와 가속도를 가지고 움직여야 하는가를 말한다. 로보트가 장애물을 회피한다든지 혹은 주어진 궤적을 따라가야만 하는 어떤 작업을 수행함에 있어서, 궤적 계획은 필수적이다. 이러한 궤적의 위치 및 속도 오차를 줄이는 새로운 제어방법의 도입은 이미 많이 연구되어져 왔다. 그러나 대부분의 비교적 큰 오차의 원인은 관절 공간에서의 속도가 큰 경우이거나 혹은 속도의 변화가 심한 경우에 생기게 된다. 이것은 작업 공간에서의 궤적은 관절의 궤적에 의해서 이루어지며 관절의 모터는 위치나 속도를 입력으로 받아서 동작하므로 실제의 작업 공간에서의 위치 오차는 관절 공간에서의 오차에 의해서 생기게 되기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 궤적을 정확하게 추종하기 위해서 새로운 제어방법을 사용하기 보다는 앞서 제안된 궤적 자체가 지니는 문제점에 대해서 연구하였다. 보통 산업용 로보트의 궤적 계획은 여러 제안된 알고리즘이 있다. R. Paul[1]에 의해서 직각 좌표(Cartesian coordinates) 공간에서의 궤적의 제어가 제안된 후 3차 함수법을 이용한 궤적 생성[2, 3, 4, 5, 7]이 제안되었으며 근래에는 최소 시간 내의 궤적 계획[6]이 연구되었고 최근에는 B. Cao[8] 등에 의해서 최적 시간과 부드러움을 동시에 만족하는 궤적 계획법이 연구되었다. 그러나 이러한 궤적들은 속도의 크기가 대단히 큰 경우가 많고 때로는 제한 속도 범위를 벗어나기도 하며 궤적의 평균 속도가 이 상치에서는 추종 오차가 커지게 된다. 따라서 오차를 줄이는 방법은 새로운 제어방법의 도입에 의하지 않고 단순히 관절의 속도를 줄임으로써 이를 수 있는 것이다. 본 논문에서는 작업 공간의 일정한 속도가 요구되어지지 않는 작업에서 작업 공간의 속도를 변화시킴에 의해서 관절의 속도를 줄이거나 유연하게 함으로써 궤적 오차를 줄이는 방법을 제안하고자 한다.

2. 로보트 시스템

2.1 로보트의 구조

FARA 로보트는 수평 다관절형의 로보트로 4개의 축(1, 2, 3, 4)으로 구성되어 있다. FARA 로보트 본체의 외형구조와 작업 영역은 그림 1, 2와 같다.

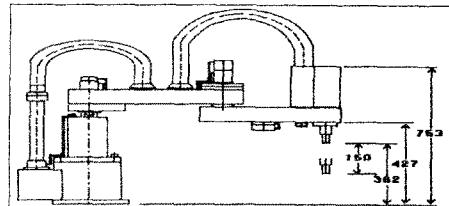


그림 1. FARA ROBOT의 외형구조

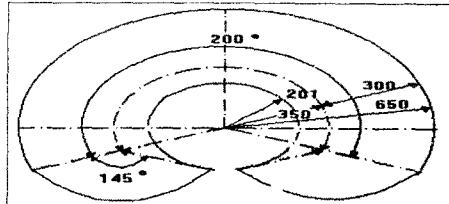


그림 2. FARAROBOT의 작업영역

2.2 시스템의 구성

설계된 제어 시스템은 기존의 제어기와는 완전하게 독립하여 4개의 서보 드라이버를 직접 PC로 제어할 수 있도록 설계하였다. 인터페이스 보드는 PC로서 직접 서보 드라이버의 디지털 제어부와 아날로그 신호 부를 직접 제어하여 로보트를 제어할 수 있도록 제작하였다. 그림 3과 4는 병렬 입·출력 보드와 DAC board의 블록 다이어그램이다.

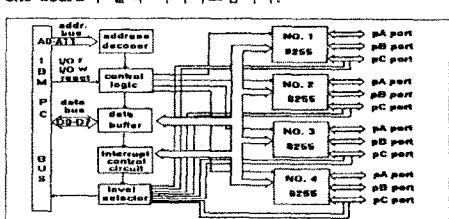


그림 3. 병렬 입·출력 보드의 블록 다이어그램

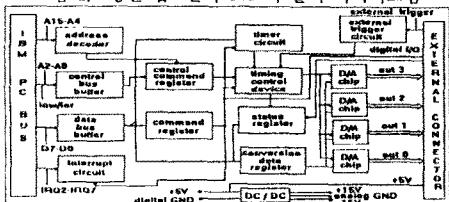


그림 4. DAC 보드의 블록 다이어그램

2.3 속도 및 위치 제어

로보트의 위치 제어는 그림 5에 나타낸 위치 제어 흐름도에서 보는 것과 같다.

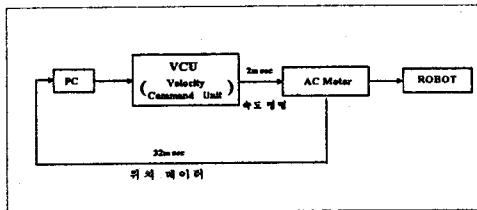


그림 5. 위치 제어 흐름도

3. 궤적 계획

3.1 궤적의 형태와 생성

로보트의 작업 궤적은 일반적으로 직교 공간(Cartesian space)에서 정해지거나 제한하고 원하는 궤적과 속도는 역기구학(inverse kinematics)을 통해 관절 공간(joint space)으로 변환되어야 한다. 이러한 관절 공간(joint space)에서 주로 제어가 이루어진다. 즉, 작업 궤적 사이의 각 경유점(knot point)들을 지정하여 경유점 사이의 보간을 통해 최종적으로 관절 궤적으로 변환하여 나타낸다.

3.2 소구간별 3차 다항식 궤적

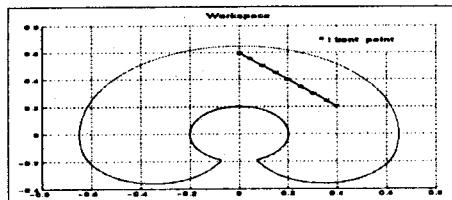
작업 공간에서의 궤적은 여러 개의 경유점을 포함하면서 다양한 기회학적인 형상을 가질 수 있다. 본 논문에서 사용되는 기본 궤적은 10개의 경유점(knot point)으로 이루어져 있으며 위치분포는 3차, 속도분포는 2차, 가속도 분포는 1차의 다항 함수가 된다. 이것은 궤적 계획이 가질 수 있는 최소한의 차수이며 따라서 전체적인 궤적 계획이 용이하고 처리 속도도 빠르다. 관절 공간에서의 궤적들은 각 경유점을 이용하여 clamped cubic spline으로 생성되었다. 즉, 1번 째와 i+1번 째 경유점을 사이의 아래의 식과 같은 형태가 된다.

$$\theta_d(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.1)$$

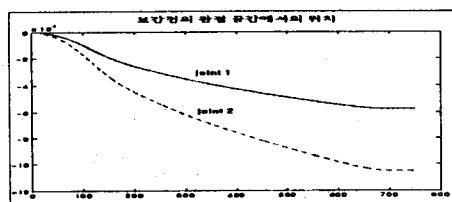
$$\dot{\theta}_d(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (3.2)$$

$$\ddot{\theta}_d(t) = 2a_2 + 6a_3 t \quad (0 \leq t < \Delta t) \quad (3.3)$$

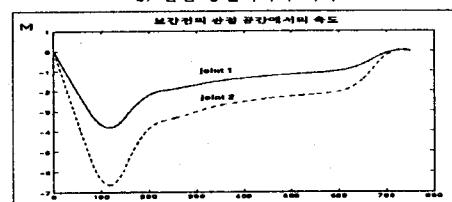
여기에서 침자 i 는 1와 i+1번 째 경유점 사이에 해당되는 값임을 의미하고 변수 a 들은 각 경유점을 이용하여 spline으로 구한 궤적 변수이다. 그림 6은 직각 좌표 공간에서의 관절 공간에서 본 궤적 생성의 예를 보여주고 있다.



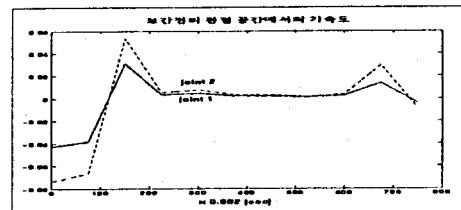
a) 직각 좌표 공간의 궤적



b) 관절 공간에서의 위치



c) 관절 공간에서의 속도



d) 관절 공간에서의 가속도

그림 6. 직각 좌표 공간과 관절 공간에서의 궤적 생성의 예

3.3 구간을 보간한 궤적 계획법

궤적을 생성하여 작업을 수행함에 따라 생기는 추종오차의 원인은 보통 속도의 최대치와 변화율의 영향을 받는데 특히 최대 속도에 대해서 영향을 많이 받는다. 기존의 방법으로 궤적을 추종하면 속도는 분포 곡선의 최대치가 커지기 때문에 추종 오차값이 커지게 된다. 특히 한계 속도를 넘었을 경우에 추종 궤적이 완전히 이탈하는 경우가 생기게 된다. 따라서 그러한 경우를 방지하기 위해 위치 분포 곡선에서의 구간을 조정함으로써 궤적 속도 범위를 조과 하였다. 하더라도 경로를 이탈하지 않게 하고 한계 속도 범위 안에서도 속도의 최대치를 평균값이 되도록 줄여주어서 추종 오차값을 감소 시킬 수 있다. 속도의 최대치를 평균값 이하로 줄여주기 위해서는 궤적상의 각 지점의 위치를 기울기가 완만하도록 재배열 함으로써 속도의 최대치를 평균치 이하로 줄여주기 위해 위치를 기울기 기가 완만하도록 재배열함으로써 속도의 최대치를 줄여줄 수 있다. 이러한 궤적의 재배열함으로써 속도의 최대치를 벗어나지 않도록 하기 위해서는 기존의 궤적상의 값을 가지고 보간을 취해서 얻어야 한다. 그러기 위해서는 먼저 기존의 궤적의 위치곡선에 대한 함수의 시간의 간격을 바꿔주고 그 바꿔진 시간에 대해 각 관절에 대한 각도 즉 위치를 알아내어 기존의 시간배열과 일치시킨다. 그 기본 개념은 그림 7과 같다.

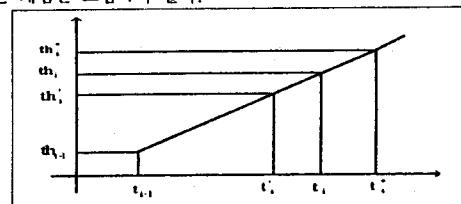


그림 7. 각 시간대의 위치값

th_i : 보간전 1번째 위치값

th_i' , th_i'' : 보간된 후 1번째 위치값

t_i : 보간전 1번째 시간

t_i' , t_i'' : 보간된 후 1번째 시간

위 그림에서 기존의 i 번째 속도는 $V_i = \frac{th_i - th_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ 이다. 여기서 속도를 줄여주자 하면 t_i 를 보다 앞의 값인 t_i' 를 취하여 위치에 대한 보간으로 th_i' 를 구한다. 이렇게 얻어진 th_i' 를 t_i 와 일치시킴으로써 속도를 줄인다. 이때의 속도는 $V_i' = \frac{th_i' - th_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ 이 된다. 속도를 높여 주는 경우도 마찬가지 방법으로 t_i'' 와 th_i'' 를 구하여 th_i'' 와 t_i'' 를 일치시킨다. 이때의 속도는 $V_i'' = \frac{th_i'' - th_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ 이 되고 각 속도의 관계는 $V_i' < V_i < V_i''$ 가 된다. 이를 수식적으로 구현하기 위해서 앞에서 언급된 바와 같이 시간을 속도에 대한 함수로서 구현하면 된다.

$$V_a = \frac{|\sum_{i=1}^m V_i|}{m} \quad (3.4)$$

V_a : 속도의 평균치

V_i : i번째의 속도

m: 속도의 data 개수

$$K_t = \frac{V_a - |V_i|}{KV_{\max}} \quad (3.5)$$

V_{\max} : 최대 속도

K : 비례 상수

$t_{i+1} = t_i + t_d + K_t$

t_d : 기존의 시간 간격

위의 식에서 K_i 는 그림상의 $t_i' - t_i$ 또는 $t_i'' - t_i$ 값이 되고 t_d 는 $t_i - t_{i-1}$ 를 의미한다. 즉, 시간 간격을 조정하는 인수(factor)가 된다. 그러므로 $K_i < 0$ 경우에는 시간 간격이 줄고 $K_i = 0$ 경우에는 시간 간격이 같고 $K_i > 0$ 경우에는 시간 간격이 늘어난다. 이렇게 구해진 시간 t 에 해당되는 새로운 위치를 원래의 시간 t 의 위치에 보간하여 기울기를 변화할 수 있다. 즉, 위치의 기울기를 조정하여 속도 및 가속도를 변화할 수 있는 것이다. 그림8은 보간한 궤적 생성의 예를 보여주고 있다.

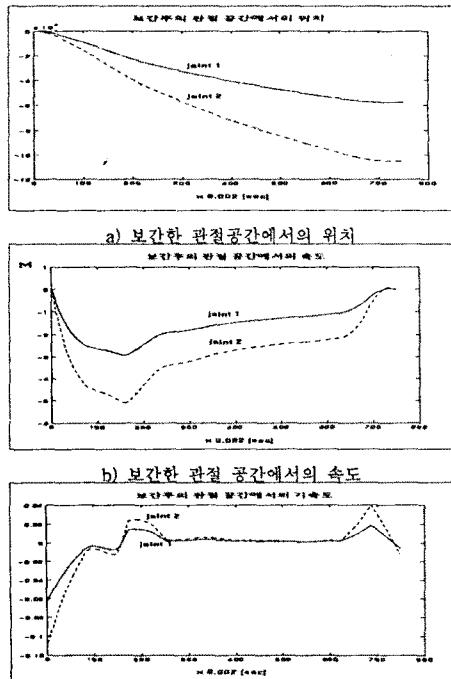


그림 8. 보간한 궤적 생성의 예

4. 실험적 궤적오차 분석

4.1 궤적의 형태

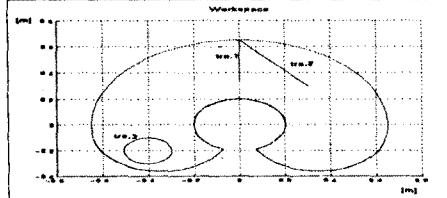


그림 9. 궤적의 예

그림9의 궤적에 대한 좌표와 추종시간은 표1에서 보여준다.

표 1. 그림9의 궤적과 추종시간

Trajectory	Coordinates(m)	Tracking Time(sec)
Tra.1	(0, 0.65) → (0, 0.35)	1.5
Tra.2	(0, 0.65) → (0.3, 0.3)	2
Tra.3	C: (-0.4, -0.2) R=0.1	2

4.2 구간을 보간한 궤적의 성능 비교

보간한 궤적에 대한 추종 성능을 비교하여 보았다. 다음 그림에서 각각의 궤적에 대하여 그 추종 오차들을 보여주고 있다. 그림 10에서는 보간한 궤적과 원래의 궤적에 대해 추종 오차 값이 굉장히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, 보간하지 않는 궤적이 완전히 궤적을 이탈하는 것을 의미한다. 왜냐하면 제한된 암력을 넘는 구간에서 로보트는 궤적을 이탈하는 것이다. 따라서 이러한 현상을 막기 위해 구간을 조종하여 제한전압의 범위 안으로 조종하였다. 그러므로 제한전압의 경계에서는 보간한 궤적의 추종 성능이 훨씬 향상되었음을 볼 수 있다. 그럼 11과 그림 12는 제한된 전압 범위 안에서의 원래의 궤적과 보간된 궤적의 추종오차들을 보여주고 있다. 그림 11은 추종 성능이 보간된 것과 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 12는

추종 성능이 보간된 것이 향상되었음을 볼 수 있다. 여기서 알 수 있는 사실은 제한된 전압 범위 안에서 보간된 궤적의 추종 성능이 직선 궤적보다는 곡선 궤적에서 향상되었음을 볼 수 있다. 이것은 가속도의 분포 곡선이 매끄럽지 못한 때문이다. 직선 궤적이 곡선 궤적보다도 속도크기 보다도 속도의 변화율에 더 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

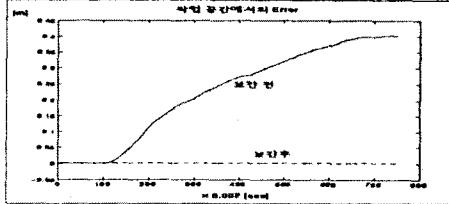


그림 10. Tra.1의 추종 오차

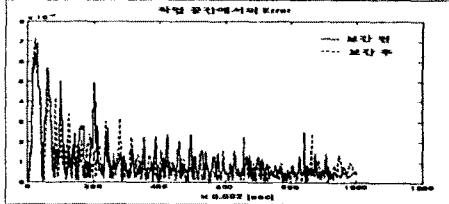


그림 11. Tra.2의 추종 오차

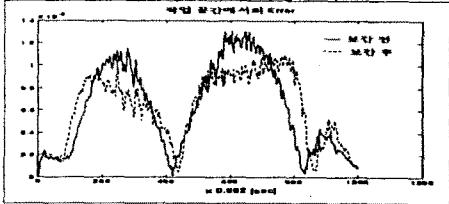


그림 12. Tra.3의 추종 오차

5. 결 론

로보트가 주어진 궤적을 따라 움직일 때 속도가 큰 경우에는 그 위치 곡선의 기울기를 완만하게 해주고 기울기가 너무 완만한 경우에는 약간 급하게 해주는 적절한 구간 조종을 통해 알맞은 속도를 구할 수 있다. 이러한 방법은 특별한 계산방법을 쓰지 않고 추종 오차를 적게 할 수 있고 계획할 수 있는 시간안에서도 속도 변환으로 궤적을 추종할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가속도 분포 곡선에서 오목한 현상을 초래해 추종 성능 향상의 가장 큰 장애가 되고 있다. 이러한 이유로 직선 궤적에 있어서 추종 성능을 향상시키기 못하는 문제점도 가지고 있다. 따라서 가속도 곡선을 좀 더 유연하게 할 수 있다면 직선 뿐만 아니라 다른 여러 궤적에서도 추종 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. PAUL, "Manipulator Cartesian Path Control," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-9, NO. 11, pp. 702-711, Nov. 1979.
- [2] C. S. Lin, P. R. Chang and J. Y. S. Luh, "Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-28, No. 12, pp. 1067-1074, Dec., 1983.
- [3] C. S. Lin, P. R. Chang, "Joint Trajectories of Mechanical Manipulators for Cartesian Path Approximation," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-13 NO. 6, pp. 1094-1102, Nov. 1983.
- [4] J. Y. S. LUH, "Approximate Joint Trajectories for Control of Industrial Robots Along Cartesian Paths," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-14, NO. 3, pp. 444-450, MAY/JUNE, 1984.
- [5] S. E. Thompson and R. V. Patel, "Formulation of joint trajectories for industrial robots using B-spline," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 35, No. 5, pp. 192-199, May, 1990.
- [6] C. H. Wang and J. G. Hornig, "Constrained Minimum-Time path planning for robots manipulators via virtual knots of the cubic B-spline functions," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 35, No. 5, pp. 573-577, May, 1990.
- [7] B. K. Choi and D. W. Kim, "Bounded deviation joint path algorithms for piecewise cubic polynomial trajectories," IEEE Trans. Systems, Man., and Cybern., Vol. 20, No. 3, pp. 725-733, May/June, 1990.
- [8] B. Cao, G. I. Dodds, "Time optimal and smooth constrained path planning for robotic manipulators," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., May, 1994, San Diego, California, pp. 1853-1858
- [9] J. Latombe, "Robot motion planning", Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [10] O. Dhal, "Path constrained robotic control," Doctoral Dissertation, Lund Institute of Technology, Sweden, 1992.
- [11] 원진호, 김봉준, 박성인, 김길원, 김대원, "PC를 이용한 로봇의 구동 및 볼트와 네트체결에의 응용," 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 202-207, 1994.