

Robot Path Planning Method for Tracking Error Reduction

金 東 俊* · 金 甲 一** · 朴 溶 植**
(DJ Kim · KI Kim · YS Park)

Abstracts - A lot of robot trajectory tracking methods are proposed to enhance the tracking error, but irregular tracking errors are always accompanied and very hard to reduce it. Up to now, these irregular tracking errors are reduced by introducing more complicated control algorithms. But, it is intuitively obvious to reduce only the big errors selectively in the irregular ones for the better performance instead of using more complicated control algorithms. By the characteristics of the robot, big tracking errors of the end-effector are generated mostly due to the fast moving of joint. 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.

Key Word : path planning, robot trajectory, tracking, error reduction, path constrained

1. 서 론

궤적 계획이란 시간의 진행에 따라 주어진 목표위치까지 로봇의 팔(joint 및 end-effector)이 얼마의 속도와 가속도를 가지고 움직여야 하는가를 계획하여 정하는 것을 말한다. 로봇이 장애물을 회피한다든지 혹은 주어진 궤적을 따라가야만 하는 어떤 작업을 수행함에 있어서 궤적 계획은 필수적이다. 그러므로 이러한 궤적의 위치 오차를 줄이는 새로운 제어방법의 도입은 이미 많이 연구되어져 왔다.[1-9] 그러나 이러한 위치오차를 줄이기 위해서 사용된 새로운 제어방법들은 그다지 큰 효과를 보지 못하는 경우가 대부분이고 현재도 범용의 산업용 로봇들은 가장 전형적인 PID제어를 사용하고 있는 실정이다. 실제로 이러한 산업용 로봇을 이용해서 정밀 위치추적을 수행하면 어느 경우에는 위치오차가 만족할 만 하지만 어느 경우에는 위치오차가 제법 커지는 경우가 생기게 된다. 이러한 로봇의 비교적 큰 오차의 원인 중의 하나는 관절공간에서의 속도가 큰 경우이거나 혹은 속도의 변화가 큰 경우에 생기게 된다. 이것은 작업공간(operational space)에서의 궤적은 관절의 궤적에 의해서 이루어지며 관절의 모터는 위치나 속도를 입력으로 받아서 동작하므로 실제의 작업공간에서의 위치오차는 관절공간(joint space)에서의 오차에 의해서 생기게 되기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 궤적을 보다 정확하게 추종하기 위해서 새로운 제어방법을 사용하기보다는 궤적 자체가 지니는 이러한 문제점에 대해서 연구하였다.

궤적의 제어가 제안된 후 3차 함수법을 이용한 궤적생성 지금까지 산업용 로봇의 궤적 계획 방법에 관한 연구는 많이 되어있다. R. Paul[1]에 의해서 작업 공간에서의 궤적의 제어가 제안된후 3차 함수법을 이용한 궤적생성 [2,3,4,5,7]이 연구되었으며 근래에는 최소 시간 내의 궤적 계획[6]이 연구되었고 최근에는 B. Cao[8,9]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 속도 이상에서는 추종에러가 커지게 된다. 따라서 오차를 줄이는 방법은 새로운 제어방법의 도입에 의하지 않고 경로를 벗어나지 않으면서 적절히 관절의 속도를 줄임으로써 이를 수 있는 것이다. 따라서 본 논문에서는 일정한 속도가 요구되지 않는 작업에서, 작업공간에서의 속도를 변화시킴에 의해서 관절의 속도를 줄이거나 유연하게 함으로써 추종 오차를 줄이는 방법을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇의 구조와 시스템의 구성 및 제어기에 대해 고찰하고, 3장에서는 소 구간별 3차 스플라인을 이용한 궤적의 생성과 본 논문에서 제안하는 위치 오차 감소 방법에 대하여 설명한다. 4장에서는 기존의 궤적과 수정된 궤적의 비교를 실험을 통하여 추종 성능 향상 정도를 알아보고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 로봇 시스템

2.1 시스템 구성

본 실험을 위해 사용된 로봇은 수평 다 관절의 Scara형 로봇으로 4개의 관절 축(1,2,Z, θ)으로 구성되어 있으며 본 실험에서는 수평방향의 위치제어를 위해서 1,2축 만을 사

* 正 會 員 : 한창시스템 中央研究所 責任研究員

** 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 教授

接受日字 : 2000年 4月 10日

最終完了 : 2001年 2月 26日

용했다. 궤적추적을 위한 실험을 수행하기 위해서는 기존의 산업용 로봇의 제어기에서 사용하는 주어진 코멘드 식의 간단한 언어를 이용한 point to point 이동방법으로는 실험을 할 수가 없으며 궤적에서의 위치를 연속적으로 추적 제어 하는 방법을 사용하여야 한다.[11] 이러한 시스템을 구성하기 위해서는 기존의 산업용 로봇의 제어기를 사용하지 않고 PC를 사용하여 매 샘플링 시간마다 서보 드라이버의 위치제어를 하여야 하며, 이들 사이의 인터페이스를 위하여 디지털 데이터 인터페이스 보드와 서보 모터의 속도 제어를 위해 D/A 보드를 사용했다.[11] 각 보드들을 사용한 전체 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

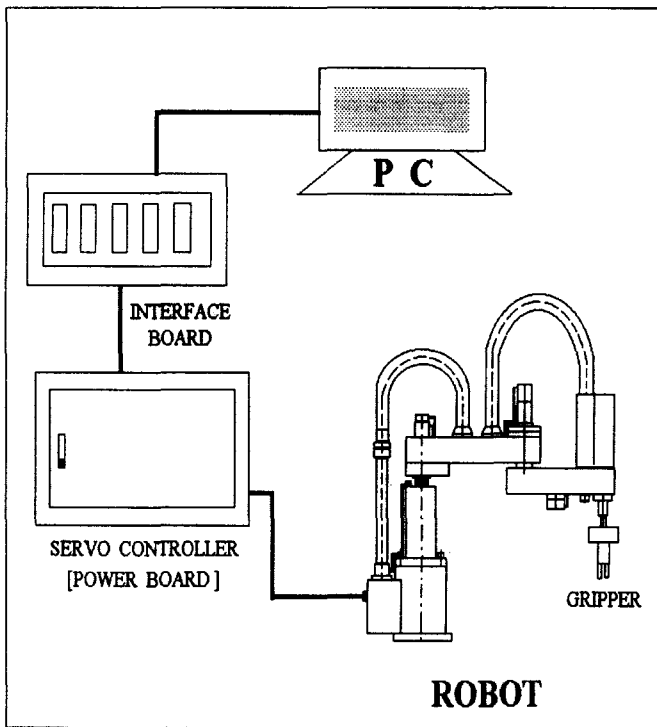


그림 1 하드웨어 시스템 구성도
Fig. 1 Diagram of Hardware System

2.2 위치 제어 시스템

로봇의 위치를 제어하기 위한 위치 제어 시스템은 그림 2 에 나타낸 위치 제어 블록도와 같으며 PC를 사용하여 수행되었으며 피드백 되는 신호는 브러쉬리스 DC모타에 부착된 리졸버 센서에서 나오는 위치 및 속도 신호이다. PC 에서는 32msec 마다 이 리졸버 센서의 위치신호를 받아들이어서 원하는 위치와의 차이를 계산하여 그 오차가 PID 제어기를 통과하게 된다. 이때 주어진 로봇 시스템은 항상 안정하므로 stability의 문제를 고려하지 않아도 되므로 다음과 같은 PI 제어기를 사용하여 정상상태의 오차를 최소화한다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^{\infty} e(t) d\tau \quad (1)$$

식(1)에서 K_p, K_I 는 각각 비례 및 적분 상수이며, $e(t)$

는 위치 오차이고 $u(t)$ 는 제어기출력이다. 이와 같이 구성된 제어기의 출력은 VCU(Velocity Command Unit)라는 속도 명령(velocity command)생성기를 거쳐서 기존의 모터 드라이브로 입력되며 모터 드라이브는 이 속도 신호를 가지고 속도 및 전류제어를 수행한다. VCU는 PC상에서 적절한 속도 프로파일을 생성하며 주로 삼각형 및 사다리꼴의 속도명령을 생성한다.[11] VCU는 2msec 마다 속도 명령을 모터 드라이브로 출력한다.

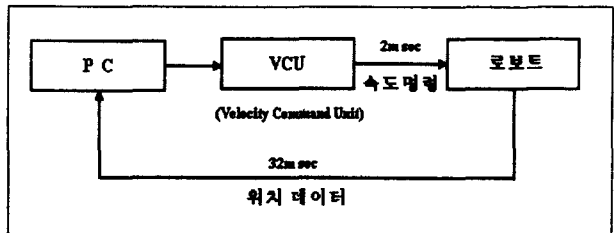


그림 2 제어 시스템의 블록도
Fig. 2 Block Diagram of Control System

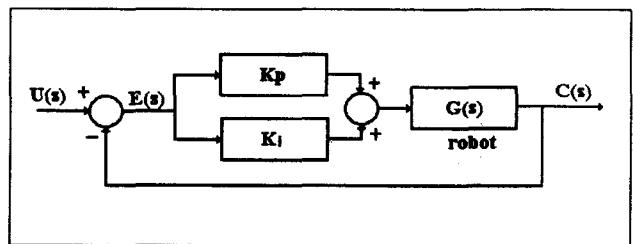


그림 3 PI 제어기의 구조
Fig. 3 Structure of PI Controller

3. 궤적 생성

3.1 궤적의 형태와 생성

로봇의 궤적 생성 방법은 주로 사용되는 소구간별 3차 스플라인 방식을 사용했다.[5-7] 로봇의 궤적은 일반적으로 작업공간에서 계획되고 원하는 궤적과 속도는 역기구학(inverse kinematics)을 통해 관절공간으로 변환되어 제어가 이루어진다. 주어진 경로점들의 벡터는 $[q_1(t_1), q_2(t_2), \dots, q_n(t_n)]$ 이고 여기서 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ 은 각 경유점들의 시간 순열이며 $t=t_i$ 일 때의 위치는 $q_i(t_i)$ 를 의미한다. 시작 시간은 $t=t_1$ 이고 종결시간은 $t=t_n$ 이고 그에 해당하는 위치, 속도, 그리고 가속도는 각각 q_1, v_1, ω_1 과 q_n, v_n, ω_n 이다. 그리고 자유 경계조건을 이용하여 q_2 와 q_{n-1} 을 결정할 수 있다. 따라서 가속도, 속도, 그리고 위치 벡터가 다음과 같이 구해진다.

$$A \omega = b \quad (2)$$

$$\omega = [\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{n-2}, \omega_{n-1}]^T \quad (3)$$

$$h_i = t_{i+1} - t_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 3h_1 + 2h_2 + \frac{h_1^2}{h_2} & h_2 & \dots & 0 & 0 \\ h_2 - \frac{h_1^2}{h_2} & 2(h_2 + h_3) & \dots & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 2(h_{n-3} + h_{n-2}) & h_{n-2} - \frac{h_{n-1}^2}{h_{n-1}} \\ 0 & 0 & \dots & h_{n-2} & 3h_{n-1} + 2h_{n-2} + \frac{h_{n-1}^2}{h_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b = \begin{bmatrix} 6(\frac{q_3}{h_2} + \frac{q_1}{h_1}) - 6(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2})(q_1 + h_1 v_1 + \frac{h_1^2}{3} \omega_1) - h_1 \omega_1 \\ \frac{6}{h_2}(q_1 + h_1 v_1 + \frac{h_1^2}{3} \omega_1) + \frac{6q_2}{h_3} - (\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3})q_3 \\ 6(\frac{q_5 - q_4}{h_4} - \frac{q_4 - q_3}{h_3}) \\ \dots \\ \frac{6}{h_{n-2}}(q_n - v_n h_{n-1} + \frac{h_{n-1}^2}{3} \omega_n) - 6(\frac{1}{h_{n-2}} + \frac{1}{h_{n-3}})q_{n-1} + \frac{6}{h_{n-3}}q_{n-3} \\ -6(\frac{1}{h_{n-1}} + \frac{1}{h_{n-2}})(q_n - v_n h_{n-1} + \frac{h_{n-1}^2}{3} \omega_n) + \frac{6q_n}{h_{n-1}} + \frac{6q_{n-2}}{h_{n-2}} - h_{n-1} \omega_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\omega_i(t) = \frac{t_{i+1} - t}{h_i} \omega_i + \frac{t - t_i}{h_i} \omega_{i-1} \quad (7)$$

$$v_i(t) = -\frac{\omega_i}{2h_i}(t_{i+1} - t)^2 + \frac{\omega_{i+1}}{2h_i}(t - t_i)^2 + (\frac{q_{i+1}}{h_i} - \frac{h_i \omega_{i+1}}{6}) - (\frac{q_i}{h_i} - \frac{h_i \omega_i}{6}) \quad (8)$$

$$q_i(t) = \frac{\omega_i}{6h_i}(t_{i+1} - t)^3 + (\frac{q_{i+1}}{h_i} - \frac{h_i \omega_{i+1}}{6})(t - t_i) + \frac{\omega_{i+1}}{6h_i}(t - t_i)^3 + (\frac{q_i}{h_i} - \frac{h_i \omega_i}{6})(t_{i+1} - t) \quad (9)$$

(i=2,3,...,n-1)

3.2 속도 제한을 이용한 궤적의 재구성

로봇이 작업을 수행할 때 생기는 추종오차는 일반적으로 속도와 변화율 값의 영향을 많이 받는 것으로 여겨지고 있으며 특히 속도가 빨라지는 최대 속도 값에서 많은 오차가 생성되는 것을 실험적으로 구할 수 있었다. 기존의 방법으로 궤적을 추종하면 속도 분포 곡선의 최대치가 커지는 부분에서 추종 오차 값이 커지게 된다. 특히 로봇의 관절의 속도가 제한 속도를 초과할 경우 심지어는 궤적이 이탈하는 경우가 생기게 된다. 따라서 이를 방지하기 위해 위치 프로파일에서 변화율을 조정함으로써 제한 속도 범위를 초과하는 경우를 방지하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 그때 생기는 위치오차를 줄이는 방법에 대해서는 로봇의 제어에 의한 오차를 줄이는 방법을 사용하고 있으며 보다 좋은 제어 방법을 추구하고 있는 실정이다. 그러나 현실적으로 PID제어 보다 월등히 성능이 좋아서 그것을 산업체에서 대치할 만큼의 제어방법이 나오고 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 다음과 같은 속도 제한을 이용한 방법을 높은 속도가 요구되는 관절의 속도를 제한함에 의해서 궤적에서 생기는 오차자체를 줄이기 위한 연구를 시도하고자 한다.

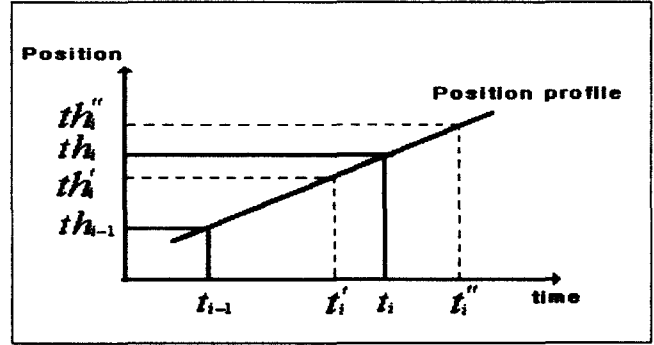


그림 4 각 시간대의 위치 값
Fig. 4 Position values at each time

그림 4에서 th_i 는 수정 전 i번째 위치 값, th'_i , th''_i 는 수정된 후 i번째 위치 값, t_i 는 수정 전 i번째 시간, t'_i , t''_i 는 수정된 후 i번째 시간이다. 그림 6에서 기존의 i번째 속도는 $V_i = (th_i - th_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$ 이다. 여기서 속도를 줄여주고자 하면 t_i 를 보다 앞의 값인 t'_i 를 취하여 위치에 대한 수정으로 t'_i 를 구한다. 이렇게 얻어진 th'_i 를 t_i 와 일치시킴으로써 속도를 줄인다. 이때의 속도는 $V'_i = (th'_i - th_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$ 이 된다. 속도를 높여 주는 경우도 마찬가지로 방법으로 t'_i 와 th''_i 를 구하여 th''_i 와 t_i 를 일치시킨다. 이때의 속도는 $V''_i = (th''_i - th_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$ 이 되고 각 속도의 관계는 $V''_i < V_i < V'_i$ 가 된다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_a = \frac{|\sum V_i|}{m} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{V_a - |V_i|}{KV_{max}} \quad (11)$$

여기서 V_a 는 속도의 평균값이고, V_i 는 i번째의 속도 값이며 m 은 속도데이터 개수를 의미한다. 또한 V_{max} , K 는 각각 최대속도, 비례상수이다. 수정되는 시간 간격의 값은 $t_{i+1} = t_i + t_d + Kt$ 로 계산된다. 여기서 t_d 는 기존의 시간 간격이다. 위의 식에서 K_i 란 그림 상의 $t'_i - t_i$ 또는 $t''_i - t_i$ 값이 되고 t_d 란 $t_i - t_{i-1}$ 를 의미한다. 즉, 시간 간격을 조정하는 인수(factor)가 된다. 그러므로 $Kt < 0$ 인 경우에는 시간 간격이 줄고 $Kt = 0$ 인 경우에는 시간 간격이 같고 $Kt > 0$ 인 경우에는 시간 간격이 늘어난다. 이렇게 구해진 시간 t 에 해당되는 새로운 위치를 원래의 시간 t 의 위치에 수정하여 기울기를 변환할 수 있다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 실험방법

여기서 생성된 궤적은 원과 직선 등 3개이며 각 궤적에 대한 좌표 및 동작시간은 다음 표 1과 같으며 그림 5에 로봇의 작업영역에서의 위치를 나타냈다. 그리고 다음 그림(그림 6-11)들은 위에서 주어진 궤적들에 대한 SCARA 로봇의 1,2축에 대한 위치, 속도, 그리고 가속도의 프로파

일을 나타낸다. 여기서 실선은 기존의 스플라인 방법을 이용한 것이고 점선의 본 논문에서 제안한 방법을 이용한 것이다.

표 1. 궤적의 좌표 및 추종 동작 시간
Table 1. Coordination and tracking time of Trajectories

궤적	좌 표 (m)	동작시간(sec)
궤적 1	(0,0.65)→(0.0,0.35)	1.5
궤적 2	(0,0.65)→(0.3,0.3)	2
궤적 3	C:(-0.4,-0.2) R=0.1	2

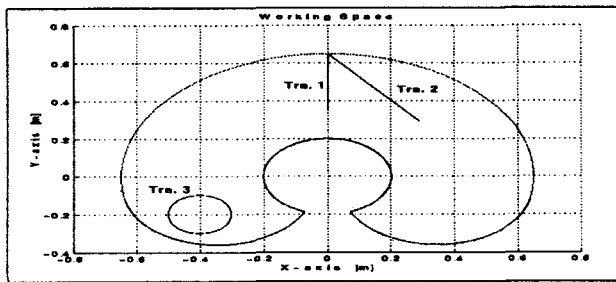


그림 5 궤적의 예
Fig. 5 Examples of trajectory

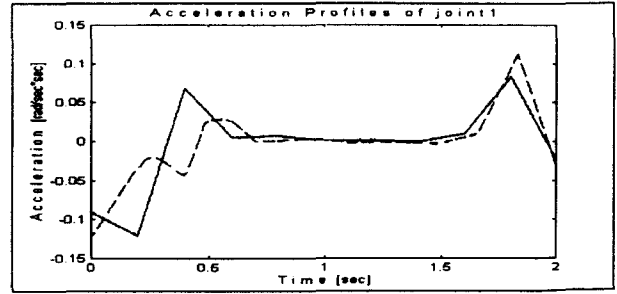


그림 8 관절 1의 가속도 프로파일
Fig. 8 Acceleration profile of joint 1

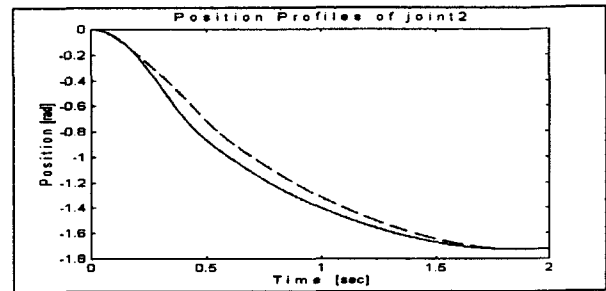


그림 9 관절 2의 위치 프로파일
Fig. 9 Position profile of joint 2

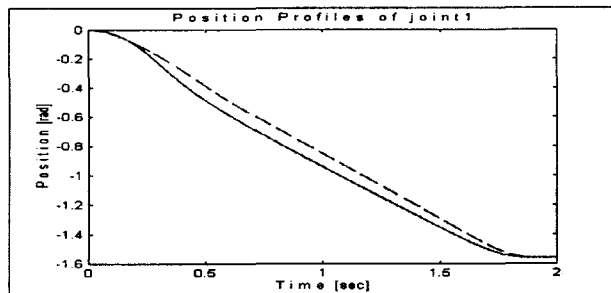


그림 6 관절 1의 위치 프로파일
Fig. 6 Position profile of joint 1

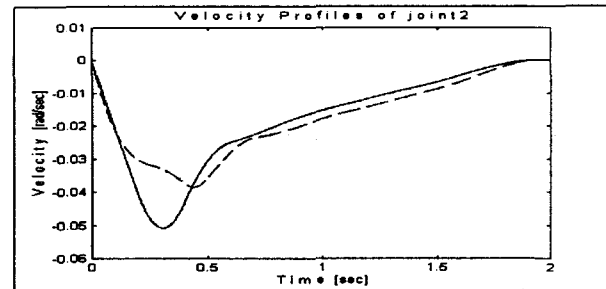


그림 10 관절 2의 속도 프로파일
Fig. 10 Velocity profile of joint 2

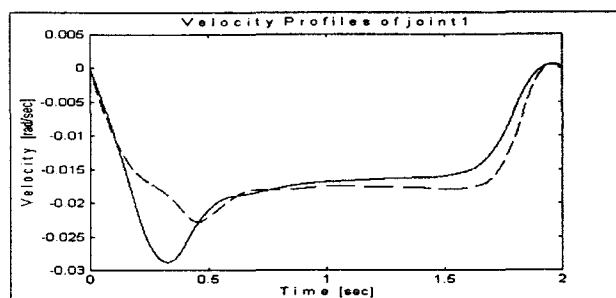


그림 7 관절 1의 속도 프로파일
Fig. 7 Velocity profile of joint 1

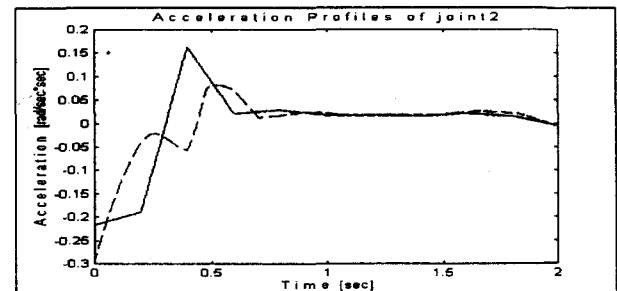


그림 11 관절 2의 가속도 프로파일
Fig. 11 Acceleration profile of joint 2

4.2 궤적의 성능 비교

성능비교는 추종에러의 크기를 비교함에 의해 얻어질 수 있다. 다음 그림(그림 12-14)들은 실험에서 사용된 궤적들의 추종 오차를 나타낸다. 여기서 실선은 기존의 스플라인 방법을 사용한 것이고 점선은 본 논문에서 제안한 방법을 사용한 경우이다.

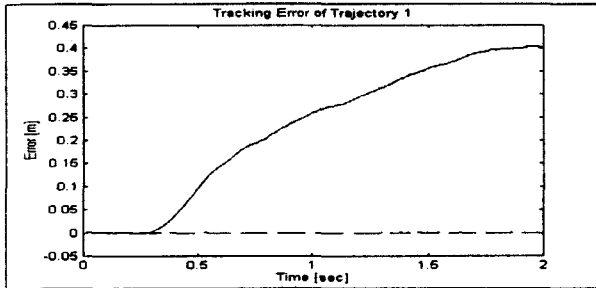


그림 12 궤적 1의 추종 오차
Fig. 12 Tracking errors of trajectory 1

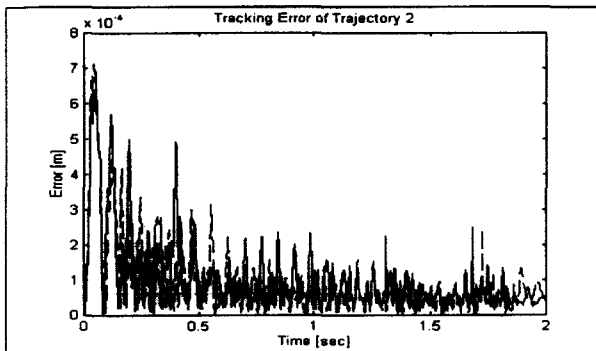


그림 13 궤적 2의 추종 오차
Fig. 13 Tracking errors of trajectory 2

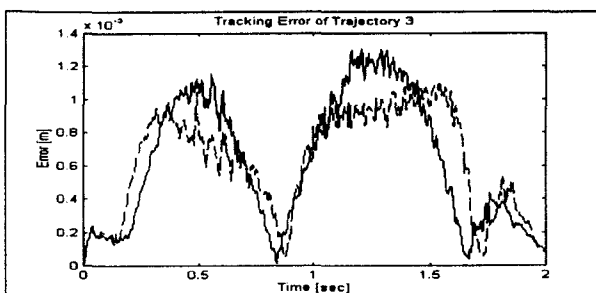


그림 14 궤적 3의 추종 오차
Fig. 14 Tracking errors of trajectory 3

그림 12-14 에서와 같이 본 논문에서 사용한 방법은 기존의 스플라인 방법보다 비교적 좋은 추종 성능을 보여준다. 그림12는 추종궤적이 완전히 궤적을 이탈하는 경우를

보여주는데 원인은 속도 값이 제한 속도 값을 초과하는 프로파일이 생성된 경우라 할 수 있다. 그림13 와 14은 생성된 궤적의 속도가 제한 속도값 내에 있는 경우이다. 그림 13은 개선된 오차의 차이를 거의 느낄 수 없다. 그러나 그림 14는 추종성능이 수정된 것이 향상되었음을 볼 수 있다. 여기서 알 수 있는 사실은 제한된 속도 범위 안에서 수정된 궤적의 추종성능이 직선 궤적보다는 곡선 궤적에서 향상되었음을 볼 수 있다. 이것은 가속도의 분포 곡선이 매끄럽지 못하기 때문이다. 직선 궤적에 비해 곡선 궤적이 속도의 크기나 변화율에 더 많은 영향을 받는다는 것을 실험 결과로 알 수 있다. 이러한 추종 오차의 최대 값을 비교한 것을 표 2.에 나타내었다.

표 2 수정된 궤적에 대한 추종 성능
Table 2 Tracking performance of modified trajectory

궤적	기존 궤적의 최대 오차[m]	수정 궤적의 최대 오차[m]	오차 감소 비율 (%)
궤적 1	0.41	0.00705	98.28
궤적 2	0.000675	0.000712	105.56
궤적 3	0.0013	0.0011	15.38

5. 결 론

지금까지의 대부분의 로봇의 궤적연구는 주로 궤적의 제어방법에만 초점이 모아져 왔다. 본 논문에서는 이러한 관점을 변화하여 궤적 자체에서 생기는 오차를 줄이는 동작에 대한 연구를 하였다. 로봇이 작업 영역에서 주어진 궤적을 따라 움직일 때 어느 특정한 관절의 속도가 너무 커지는 경우가 생기게 된다. 따라서 이러한 관절의 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 제어 방법을 쓰지 않고 추종 오차를 적게 할 수 있고, 더불어 기존의 속도 프로파일로 계획할 수 없는 시간 안에서도 속도 프로파일의 변환으로 궤적을 추종할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 변환 이후 가속도 분포 곡선에서 오목한 현상(그림 8, 11의 그래프의 점선 참조)을 초래하므로 추종성능 향상의 가장 큰 장애가 되고 있다. 이러한 이유로 직선 궤적에 있어서 추종 성능을 향상시키지 못하는 문제점도 가지고 있다. 따라서 가속도 곡선을 좀 더 유연하게 할 수 있다면 직선뿐만 아니라 다른 여러 궤적에서도 추종성능은 훨씬 더 좋아지리라 생각된다. 이러한 연구는 로봇자체 동작의 분석에 의한 오차를 줄이는 방법으로서 좀더 많은 연구가 되어져야 하리라 여겨지며 좀더 부드러운 가속도 프로파일을 얻기 위한 연구가 과제라 할 수 있겠다.

감사의 글

이 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의해 이루어진 연구임

참고 문헌

[1] R. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control," IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics, 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. Horng, "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, Mans, 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. on Robotics and Automation, May, 1994, San Diego, California, pp. 1853-1858.

[9] B. Cao, G. I. Dodds and G. W. Irwin, "Implementation of Time Optimal Smooth and Collision-Free Path Planning in a Two Robot Arm Environment," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May, 1995, Nagoya, pp. 715-720.

[10] J. Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1993.

[11] 손유석, 김동준, 원진희, 김갑일, 김대원, "PC를 이용한 SCARA type Robot의 구동에 관한 연구," 1994년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1994년 7월 21-23일, 경주, pp.1058-1060

저 자 소 개



김 동 준 (金 東 俊)

1968년 생. 1992년 명지대 전기과 졸업. 1994년 동 대학원 전기과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기과 박사. 현재 한창시스템 중앙연구소 책임 연구원. 관심분야 : 로봇공학, 자동화시스템, 통신 시스템



박 용 식 (朴 溶 植)

1958년 생, 1981년 한양대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업 (공박). 1988년 부터 현재, 명지대 전기 및 정보제어공학부 부교수. 관심분야 : 제어시스템, 로봇공학, 자동화시스템



김 갑 일 (金 甲 一)

1956년 생. 1979년 서울대 전기과 졸업. 1981년 한국과학원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1990년 (미)클렘슨대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 1981-1985년 육군사관학교 전자공학과 전임 강사. 1991년 부터 현재, 명지대학교 전기공학과

조교수, 부교수, 교수. 관심분야 : 로봇공학, 자동화 시스템, 워터마킹, 산업통신 시스템, 웨이브렛 변환, 제어공학