

로봇트 매니플레이터에 대한 궤적 계획 방법들의 실시간 구현 및 상호 비교 연구

° 조 정 호 *, 서 일 홍 *, 임 준 홍 *, 양 해 원 **, 임 달 호 **

* 한양대학교 전자공학과 ** 한양대학교 전기공학과

Real-time Implementation and Comparative Study on
Trajectory Planning Methods for Robot Manipulators

Jeongho Cho *, Il Hong Suh *, Joonhong Lim *, Hai-Won Yang **, Dal-Ho Im **

* Dept. of Electronic Eng., ** Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ.

ABSTRACT

This paper describes the methods of spline low-order polynomial trajectory planning using only a few limited look-ahead knots on the desired trajectory for the real-time computing. Specifically presented are the mixed joint trajectory planning methods which apply linear or LSPB method to initial and final segments, overlapped cubic spline method to the other segments, where the displacements for initial and final segments are chosen to be relatively smaller than the displacements for the other equidistant segments.

Experimental and simulation results of these methods show smooth motions and improved path tracking performances compared with any other interpolated joint trajectory planning methods.

1. 서 론

로봇트의 관절 궤적 계획은 로봇트 제어의 한 중요한 분야로 많은 방법이 연구되어 왔다. 오늘날 대부분의 산업용 로봇트의 운행 경로는 로봇트가 이동해야 하는 시작 및 최종 위치 사이의 연속적인 경로점들을 사용하여 오프라인으로 계획되어진다. 이때 이들 경로점 사이의 보간에 선형 다항식을 사용할 경우, 궤적 계획 시간을 줄일 수 있으나 관절 변위에 대한 선형 함수가 정속도 구간 사이에 대해서 임펄스한 가속도를 발생하므로 부드러운 서보 응답에 불안정하여 진동하는 운동을 유발한다.[1] 따라서 부드러운 운행 궤적 계획을 위해서는 일차 이상의 고차 다항식을 사용하여야만 한다. 만약, 경로상에 N 개의 경로점이 존재할 경우 이들 경로점들을 모두 지나 가는 다항식의 최소 차수는 N - 1 차가 되므로 궤적 계획에 대한 계산량이 증가하며, Overshoot 나 Wandering과 같은 바람직하지 못한 경로 궤적이 생성 된다. 따라서 다항식의 차수를 줄여 계산량을 감소 시키며, 바람직하지 못한 현상들을 최소화하는 방법으로 Spline 저차 다항식이 널리 사용되어진다.[2,3] 한편, 많은 경로점을 포함한 Spline 다항식의 궤적은 궤적이 완성되기 이전에 모든 Spline 계수가 오프라인으로 계산 되어져야만 된다.[4]

본 논문에서는 직교 좌표계상에서 주어진 경로를 근사화 하기 위해 충분한 경로점들을 선택함에 있어, 경로 오차와 궤적 계획 계산 시간을 최소화 하기 위해서 시작 및 최종 경로점을 포함한 경로 구간의 변위를 등간격으로 선택된 그 외 경로 구간 변위에 비해서 s (s > 1) 배 작게 선택되도록 하였다. 그리고 이들을 관절 좌표계로 변환하여 온라인 궤적 계산과 더불어 실시간적으로 궤적 수행을 하기 위해서 작은 블록 단위로, 오프라인 Spline 다항식 궤적 계산을 나눈 방법들을 소개한다[5]. 블록 단위로 나뉜 Spline 다항식들의 계산의 경우, 단지 실행 되고 있는 블록 내의 Spline 다항식의 계수들만을 저장시킬 필요가 있으므로 매우 작은 메모리 영역만이 요구되어진다.[6] 이와 같은 방법들에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과로부터 시작 및 최종 경로 구간에 간단한 일차 다항식 또는 LSPB 방법을 사용하는 혼합된 관절 궤적 계획

방법을 제시하고, 이 방법을 사용함으로써 보다 향상된 경로 오차 및 부드러운 운동을 보여준다.

2. 온라인 Spline 다항식 관절 궤적 계획 방법

온라인으로 관절 궤적에 대한 Spline 다항식을 계산 하기 위해서는 엔드 이펙터 궤적상에서 단 몇개의 (Look-ahead) 경로점들을 묶어서 하나의 블록으로 보는 개념이 요구되며, 각 경로점의 위치에 대한 정보가 필요하다. 한편 블록의 크기는 블록내에 존재하는 궤적 구간의 갯수로서 표현되며, 앞선 경로점들의 위치를 계산 하는 제어기의 계산 능력에 의해서 결정된다.[5]

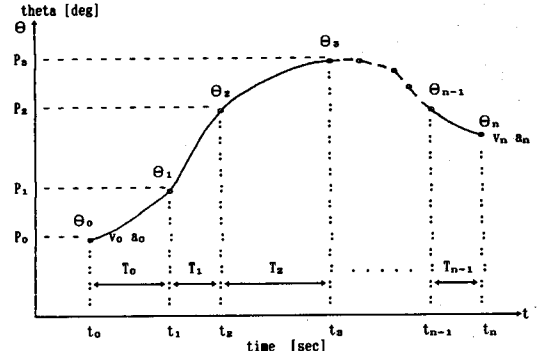


그림 1. n 개의 경로점을 가진 관절 궤적
Fig. 1. Joint Trajectory with n Knots

그림 1.에서, 임의의 i 번째 궤적 구간을 다음과 같이 정규화된(normalized) 시간 $u \in [0, 1]$ 로 표시하자.

$$u = \frac{t - t_{i-1}}{T_{i-1}} \quad (1)$$

여기서

- t : 실시간
- t_i : i 번째 궤적 끝에서의 실시간 ($i = 1, 2, \dots, n$)
- $T_{i-1} = t_i - t_{i-1}$
- 0 : 각 궤적 구간의 시작 시간

$$u = \begin{cases} 0 & \text{각 궤적 구간의 시작 시간} \\ 1 & \text{각 궤적 구간의 종결 시간} \end{cases}$$

모든 궤적 구간 다항식을 u 에 대한 r 차수 다항식으로 표현하기 위해서 i 번째 궤적 구간을 다음과 같이

$$f_i(u) = \sum_{j=0}^r C_{j,i} u^j \quad (3)$$

로 표시하면,

$$df_i(u)/du = [df_i(u)/dt][dt/du] = T_{i-1}[df_i(u)/dt] \quad (4)$$

$$d^2f_i(u)/du^2 = T_{i-1}^2[d^2f_i(u)/dt^2] \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

2.1 Cubic Spline 궤적 계획 방법

관절 궤적 계획시 각 경로점 사이의 구간을 Cubic Spline 다항식으로 계산한다. 그림 1.로 부터, 시작점 P₀에서의 위치와 속도값을 알고 경로점 P₁과 P₂의 위치 정보가 주어지고, P₂에서의 속도값을 P₁, P₂, P₃의 위치 변위로부터 평균 속도값으로 선택한다면, P₁에서의 가속도 연속성과 더불어 P₀P₂ 구간을 두개의 Cubic Spline 다항식으로 표현할 수 있다. 이 경우 관절 궤적은 3개의 앞선 경로점들을 가지는 블록 크기 2인 궤적이 된다. 한편 각 블록 끝점에서의 가속도 연속성은 상실된다.

1) 3 - 3 ... 3 궤적

그림 1.에서, 임의의 k (k = 1, 2, ..., n/2) 번째 블록내의 P_{2k-2}P_{2k-1} 구간과 P_{2k-1}P_{2k} 구간을 다음과 같이 각각 3차 다항식으로 표시한후 그 계수값들을 계산한다.

$$f_{k,m}(u) = \sum_{j=0}^3 C_{j,m} u^j \quad (m = 2k-1, 2k) \quad (6)$$

식 (6)에 궤적 계획을 위한 위치 경계조건을 대입하면

$$\begin{aligned} f_{k,m}(0) &= \Theta_{m-1} \\ f_{k,m}(1) &= \Theta_m \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고,

식 (4)에 궤적 계획을 위한 속도 경계조건을 대입하면

$$\begin{aligned} df_{k,m}(0) / du &= T_{m-1} - v_{m-1} \\ df_{k,m}(1) / du &= T_m - v_m \end{aligned} \quad (8)$$

가 된다.

식 (5)를 사용하여, P_{2k-1}에서의 가속도 연속성을 표시한후 식 (7)과 (8)로부터 3차 다항식의 계수들을 구하면

$$\begin{aligned} C_{0,m} &= \Theta_{m-1} \\ C_{1,m} &= T_{m-1} - v_{m-1} \\ C_{2,m} &= 3(\Theta_m - \Theta_{m-1}) - (v_m + 2v_{m-1})T_{m-1} \\ C_{3,m} &= -2(\Theta_m - \Theta_{m-1}) + (v_m + v_{m-1})T_{m-1} \end{aligned} \quad (9)$$

이 되므로, P_{2k-1}에서의 속도 v_{2k-1}는

$$v_{2k-1} = \{ [1/(2(T_{2k-2} + T_{2k-1}))] \{ (3T_{2k-1} / T_{2k-2}) (\Theta_{2k-1} - \Theta_{2k-2}) - (3T_{2k-2} / T_{2k-1}) (\Theta_{2k} - \Theta_{2k-1}) - v_{2k-2} T_{2k-1} - v_{2k} T_{2k-2} \} \} \quad (10)$$

로 표시 된다.

블록의 끝점인 P_{2k}에서의 속도값 v_{2k}를 다음과 같이 평균 속도값으로 주면,

$$v_{2k} = (1/2) [(\Theta_{2k} - \Theta_{2k-1}) / (T_{2k-1}) + (\Theta_{2k+1} - \Theta_{2k}) / (T_{2k})] \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)으로부터 한 블록내의 두 3차 다항식의 계수값이 결정된다.

2) 4 - 3 ... 4 궤적

경로의 시작 위치부터 Lift-off 위치(P₁) 까지의 궤적 구간과 Set-down 위치(P_{n-1}) 부터 최종 위치까지의 궤적 구간을 4차 다항식으로 표시한다. 즉 시작 및 최종 경로점에서의 위치와 속도 조건에 가속도 조건을 추가한 경우이다. 그 외 궤적 구간은 3차 다항식으로 계산한다.

2.2 중첩된(Overlapped) Cubic Spline 궤적 계획 방법

블록의 크기가 2인 3차 Spline 다항식에서 블록 끝점의 속도값을 평균 속도값으로 계산하는 대신에, 블록내의 최종 다항식을 2차로 하여 속도값을 구한후, 다시 3차 다항식으로 표시하는 3 - 2(3) ... 3 궤적 계획 방법이다.

그림 1.에서 블록의 크기가 2인 임의의 한 블록을 식 (6)과 같이 표시할때 P_{2k-2}P_{2k} 구간을 다음과 같이 2차 다항식으로 먼저 표시하자.

$$f_{k,2k}(u) = \sum_{j=0}^2 C_{j,2k} u^j \quad (12)$$

식 (6) |_{m=2k-1}과 식 (12)에, 경계 조건식 (7), (8)을 대입하면 f_{k,2k-1}(u) 계수는 식 (9)와 같이 계산되고, f_{k,2k}(u)의 계수는 아래와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} C_{0,2k} &= \Theta_{2k-1}, \quad C_{1,2k} = T_{2k-1} - v_{2k-1} \\ C_{2,2k} &= (\Theta_{2k} - \Theta_{2k-1}) - T_{2k-1} v_{2k-1} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (9), (13)을 식 (8)에 대입하여 P_{2k-1}에서의 속도값 v_{2k-1}를 구하면

$$v_{2k-1} = \{ [(T_{2k-2} T_{2k-1}) / (T_{2k-2} + 2T_{2k-1})] \{ (1/T_{2k-1}) (\Theta_{2k} - \Theta_{2k-1}) + (3/T_{2k-2}) (\Theta_{2k-1} - \Theta_{2k-2}) - (1/T_{2k-2}) v_{2k-2} \} \} \quad (14)$$

이 되므로 식 (9)으로부터 P_{2k-2}P_{2k-1} 구간의 3차 다항식 계수값이 결정된다. 한편, 같은 방식으로 P_{2k}에서의 속도 v_{2k}를 구하면 식 (14)와 같이 (2k-1 → 2k) 계산되어지므로, 식 (12) 대신에 식 (6) |_{m=2k}의 3차 다항식으로 표시되는 P_{2k-1}P_{2k} 구간의 계수들을 식 (9)로부터 결정할 수 있다.

이 경우 각 경로점의 속도를 구하기 위해서 이웃하는 블록을 중첩하므로 모든 경로점에서의 가속도 연속성이 상실된다. 한편 초기 및 최종 경로점에서의 가속도 경계조건을 포함할 경우는 4 - 3 - 2(3) ... 4 궤적으로 계획한다.

2.3 Three - Segment 궤적 계획 방법

본 궤적 계획 방법은 엔드 이펙터가 시작점에서 최종점까지 이동하는 PTP 은행시, 두개의 경로점(Lift-off, Set-down)과 더불어 3개의 궤적 구간으로 나누어 궤적을 계획하는 방법이다.[7]

본 논문에서는, 많은 경로점을 가지는 연속적인 경로 궤적을 온라인으로 계획하기 위해서 두개의 경로점을 Lift-off와 Set-down의 개념이 아닌, 단지 앞선(Look-ahead) 경로점으로 간주하고, 3개의 궤적 구간을 하나의 블록으로 보는, 블록 크기가 3인 궤적 계획 방법으로서 사용한다. 한편 각 블록에 대해서 14개의 경계 조건이 생성되는데 이 중 3개의 Free Constant(t의 함수가 아닌) 경계 조건이 존재하므로, 블록내의 궤적 구간들의 차수의 합은 적어도 11이 되어야만 한다. 따라서, 한 블록을 4 + 3 + 4차 또는 3 + 5 + 3차의 다항식 궤적들로 구성할 수 있다. 이 경우 블록내의 두 경로점에서의 속도 및 가속도 연속성이 보장되나, 블록의 끝점에서는 연속성이 상실된다.

2.4 LSPB(Linear Segment with Parabolic Blends)

궤적 계획 방법

각 궤적 구간내를 2 + 1 + 2 차의 다항식 조합으로서 표시하는 궤적 계획 방법이다. 온라인으로 궤적을 계획하기 위해서, 블록 크기가 1인 궤적 계획 방법으로 보고, 임의의 i (i = 1, 2, ..., n) 번째 궤적 구간을 정규화된 시간 u ∈ [0, tf_i]를 사용하여 3개의 궤적 영역으로 표시하면,

$$f_{1,i}(u) = [(v_1 - v_{i-1}) / (2tb_1)] u^2 + v_{i-1} u + \Theta_{i-1} \quad (15)$$

$$f_{2,i}(u) = v_i u + \Theta_{i-1} + (v_{i-1} - v_i) / 2 - (v_i - v_{i-1}) / 2 \quad (16)$$

$$f_{3,i}(u) = [(v_1 - v_i) / (2tb_1)] u^2 + [v_i - (tf_1(v_1 - v_i) / tb_1)] u + [\Theta_{i-1} - v_i tf_1 + (tf_1^2(v_1 - v_i) / (2tb_1))] \quad (17)$$

이 된다. 여기서

- tf_i : t_i - t_{i-1} : 한 궤적 구간의 시간
- tb_i : blend 영역의 시간 (0 < tb_i ≤ (tf_i/2))
- v_i : 블록 끝에서의 평균 속도
- V_i = [1/(tf_i - tb_i)] [(Θ_i - Θ_{i-1}) - (tb_i(v_{i-1} + v_i)/2)] : 선형 영역의 속도

LSPB 궤적의 생성에서 tb_i = tf_i / 2 인 경우를, BBPB (Bang-Bang Parabolic Blend) 궤적이라 한다. LSPB 궤적 계획 방법으로 연속적인 경로점에 대한 관절 궤적을 계획할 때 각 경로점에서의 가속도 연속성은 상실된다.

3. 혼합된 온라인 Spline 다항식 궤적 계획 방법

로봇트의 은행 경로를 Spline 다항식으로 생성하며 경로 오차가 주어질 범위내로 한정되도록 충분한 경로점을 선택하는 이탈한계(bounded deviation)방법에 의한 추가의 경로점은 주로 속도 경계 조건이 0인 시작 및 최종 경로점을 포함한 경로 구간들 내에서 오프라인으로 생성되어진다.

따라서 온라인으로 작고 공간상에서 경로점을 생성하며 경로 오차를 최소화 하기 위해서, 시작 및 최종 경로 구간 변위를 등간격으로 선택된 그 외 경로 구간 변위에 대해서 s(s > 1)배 작게 선택하여 간단한 1차 또는 LSPB 궤적 다항식으로 계획하고, 그 외 경로 구간을 Cubic Spline 궤적 또는 Overlapped Cubic Spline 궤적으로 구성하는 혼합된 온라인 Spline 궤적 계획 방법을 제시한다.

3.1 선형 궤적과 (중첩된) 3차 Spline 다항식 궤적의 혼합.

로봇트 매니퓰레이터가 가속도없이 등속도로 출발하고 정지하는 경우, 시작 및 최종 경로 구간은 1차 다항식으로 궤적 계획하고 그 외 구간은 (중첩된) 3차 Spline 다항식으로 궤적 계획한다. 그림 1.로부터,

i) 궤적 구간 i = 1, n :

$$f_1(u) = \sum_{j=0}^1 C_{j,1} u^j \quad (19)$$

여기서

$$C_{0,1} = \Theta_{i-1}, \quad C_{1,1} = \Theta_i - \Theta_{i-1} \quad (20)$$

ii) 궤적 구간 i = 2, 3, ..., n-1 : 블록 크기가 2인 궤적으로 식 (6)과 같이 표시되며,

다항식의 계수는 식 (9) $|_{n \rightarrow 1}$ 으로부터 결정되어진다.

3.2 LSPB 궤적과 (중첩된) 3차 Spline 다항식 궤적의 혼합.
 로봇 매니플레이터가 가속도 크기 α 로 가속하여 출발하고 정지하는 경우, 시작 및 최종 경로 구간은 LSPB로 궤적 계획 하고 그 외 구간은 (중첩된) 3차 다항식으로 궤적 계획한다.

- i) 궤적 구간 $i = 1, n$:
 가속도 크기 $\alpha = |V_1 / t_{b1}|$ 이고, 궤적내의 3개의 영역에 대한 다항식은 식 (15), (16), (17)과 같이 결정된다.
- ii) 궤적 구간 $i = 2, 3, \dots, n-1$:
 블록 크기가 2인 궤적으로 식 (6)과 같이 표시되며, 다항식의 계수는 식 (9) $|_{n \rightarrow 1}$ 으로부터 결정되어진다.

4. 실험 결과에 의한 궤적 계획 방법들의 비교

4.1 전체 시스템의 구성 및 궤적 계획 알고리즘
 본 논문의 실험을 위한 로봇 제어 시스템의 전체 구조를 관찰할 궤적 계획과 이의 수행 기능을 갖는 관리 제어 시스템, 서보 제어 시스템 및 프로그래밍 시스템의 3개의 subsystem으로 분류하여 구성하였다.[8][9] 그리고 제어 대상으로 2개의 축을 가진 SCARA-type Robot를 사용하였다. 한편, 제어 프로그램은 C언어로 작성된 후 C-Cross Compiler와 Assembler에 의해서 MC68000 기계어로 변환되어 관리 제어 시스템에 Down-loading 된다.

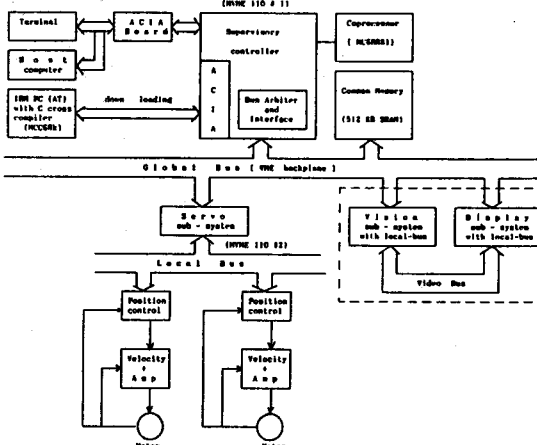


그림 2. 전체 시스템의 구성도
 Fig. 2. Overall Configuration of the Control System

1) 온라인 궤적 계획 알고리즘
 온라인으로 경로 궤적 계획시, MVNE-110 #1을 사용하여 각 경로점들의 위치를 계산하고, MVNE-110 #2을 사용하여 각 경로점 사이의 궤적을 계산한다. 그리고 각 CPU간의 Data통신은 공유 메모리에 의해서 수행되며, MC6840 PTM을 사용한 Interrupt Service Routine에서 서보 제어 시스템에 속도 명령을 내린다.

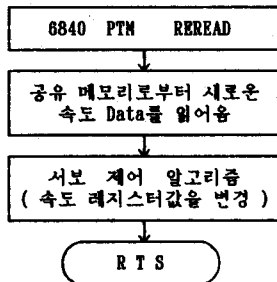


그림 4. MVNE-110 #2 에서 수행되는 궤적 계획 알고리즘 및 인터럽트 서비스 루틴
 Fig. 4. Trajectory Planning Algorithm and Interrupt Service Routine executed in MVNE-110 #2

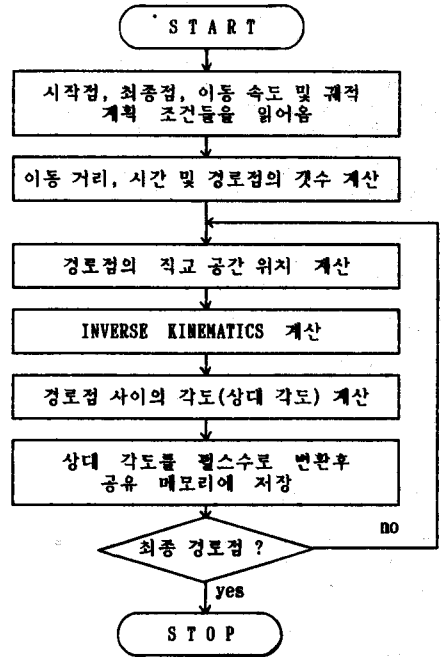
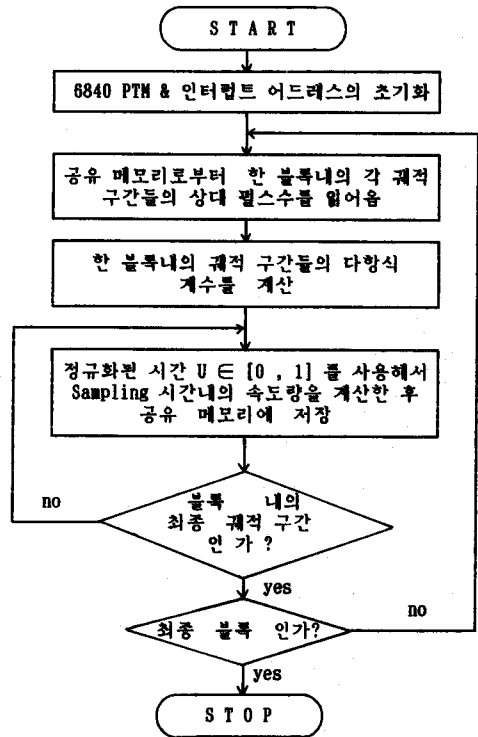


그림 3. MVNE-110 #1 에서 수행되는 궤적 계획 알고리즘
 Fig. 3. Trajectory Planning Algorithm executed in MVNE-110 #1



2) 서보 모터 제어 알고리즘

서보 모터 제어시 속도 Profile은 전용 펄스 발생기인 PCL-240K에 의해 H/W적으로 결정되며, 제어 알고리즘에서는 이를 정확하게 결정하기 위하여 서보 Process CPU에서 주어지는 궤적 Data(펄스에 의한 속도량)에 근거하여 온라인으로 PCL-240K의 각종 파라미터를 결정한다.

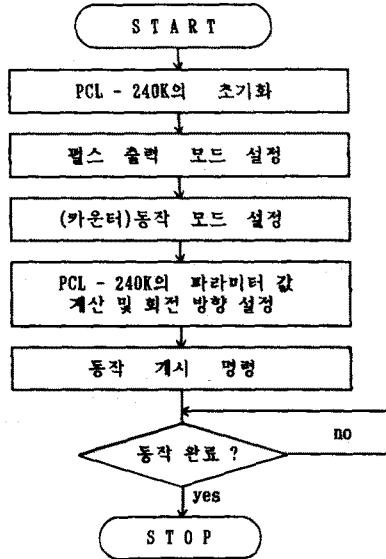


그림 5. 서보 모터 제어 알고리즘
Fig. 5. Servo Motor Control Algorithm

4.2 계산 량

온라인 궤적 계획 방법들에 대한 계산량을 상호 비교하기 위해서, 각 알고리즘의 계산량을 더하기(a), 곱하기(m), 나누기(d) 및 초월 함수(t)의 갯수로 표시한다. 한편 제어 시스템에서 사용한 MC68000L8 CPU의 산술 명령어 실행 클럭 주기는 다음과 같다.

ADD : 4 clock , (125ns / 1 clock)
MUL : 70 clock , DIV : 158 clock

n개의 경로점을 가진 온라인 관절 궤적 계획에서, 정규화된 시간 $u \in [0, 1]$ 동안 한 궤적 구간의 다항식을 h번 계산시 각 궤적 계획 방법들의 계산량은 표 1.과 같다.

관절 궤적 계획 방법	계산 량
선형 보간 궤적	$(1a)n$
3 - 3 ... 3 궤적	$[(6+3h)a + (10+6h)m + 1d]n$
4 - 3 ... 4 궤적	$[(6+3h)n + 12 + 5h]a + [(10+6h)n + 32 + 14h]m + [n + 6]d$
3 - 2(3) ... 3 궤적	$[(7+3h)a + (14+6h)m + 4d]n$
4 - 3 - 2(3) .. 4 궤적	$[(7+3h)n + 14 + 2h]a + [(14+6h)n + 37 + 8h]m + [4n + 1]d$
4 - 3 - 4 ... 궤적	$[(14+4h)a + (23+9h)m + 9d]n$
3 - 5 - 3 ... 궤적	$[(9+4h)a + (20+9h)m + 2d]n$
LSPB 궤적	$[(9+2h)a + (9+3h)m + 5d]n$

표 1. 온라인 궤적 계획 방법들의 계산량
Table 1. Computation Cost of On-line Trajectory Planning Methods

4.3 시뮬레이션 및 실험 결과

온라인 궤적 계획 방법들을 상호 비교하기 위하여 그림 6.과 같은 예제로 컴퓨터 시뮬레이션을 하고, 그 결과들을 표 2.에 요약 정리하였다. 또한 그림 9.에서의 같이 이들 방법들을 실시간으로 SCARA Robot에 구현하였다.

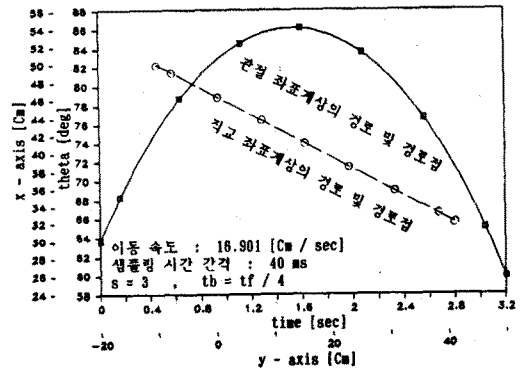


그림 6. 궤적 계획을 위한 한 예 : 직선
Fig. 6. An Example for Trajectory Planning : Straight-line

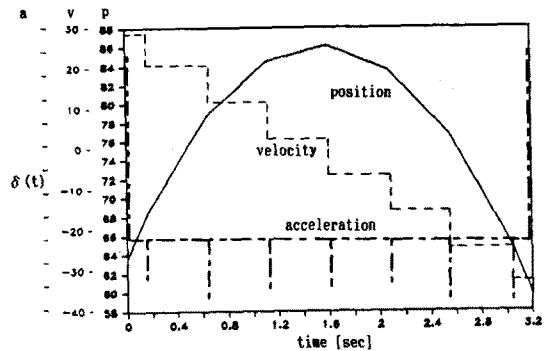


그림 7. 선형 보간 궤적
Fig. 7. Linear Interpolated Trajectory

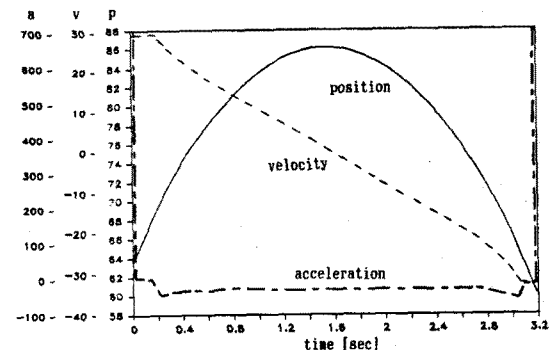


그림 8. 선형 궤적과 (중첩된)3차 Spline 궤적의 혼합
Fig. 8. Mixed trajectory with Linear and (Overlapped) Cubic Spline-polynomial

관절 궤적 계획 방법 (Joint Θ_2)	최대 경로 오차		평균 경로 오차		관절 속도		관절 가속도		
	관절 공간 [degree]	직교 공간 [Cm]	관절 공간 [degree]	직교 공간 [Cm]	[degree/sec] 최대	[degree/sec] 평균	[degree/sec ²] 최대	[degree/sec ²] 평균	
선형 보간 궤적	0.656	0.240	0.345	0.128	32.38	14.86	$\delta(t)$	$\delta(t)$	
3 - 3 ... 3 궤적	0.958	0.456	0.207	0.111	44.51	15.24	472.37	48.64	
4 - 3 ... 4 궤적	1.971	0.991	0.411	0.220	57.84	15.29	607.08	79.62	
3 - 2(3) ... 3 궤적	1.141	0.612	0.211	0.112	42.08	15.23	512.91	43.01	
4 - 3 - 2(3) ... 4 궤적	2.177	1.198	0.566	0.301	57.85	15.35	607.08	79.24	
LSBP 궤적	LSPB	0.599	0.282	0.166	0.066	38.45	15.28	961.28	45.66
	BBPB	0.863	0.423	0.065	0.035	50.60	15.29	632.48	60.10
LSPB +	3-3...3 궤적	0.600	0.282	0.055	0.027	38.45	15.29	961.28	45.68
	3-2(3)...3 궤적	0.606	0.282	0.047	0.021	38.15	15.24	953.64	45.59
선형 +	3-3...3 궤적	0.195	0.067	0.048	0.021	32.38	14.90	$\delta(t)$	38.47
	3-2(3)...3 궤적	0.178	0.063	0.044	0.016	32.38	14.91	$\delta(t)$	38.59
4 - 3 - 4 ... 궤적 *	0.504	1.453	0.156	0.411	32.38	14.83	$\delta(t)$	39.41	
3 - 5 - 3 ... 궤적 *	1.653	0.584	0.487	0.175	32.38	14.94	$\delta(t)$	56.01	

* : knot point의 갯수가 8개 이므로 시작 및 최종 궤적 구간을 선형 보간으로 궤적 한 경우의 결과 값

표 2. 온라인 관절 궤적 계획 방법들의 시뮬레이션 결과
Table 2. The Simulation Results of On-line Joint Trajectory Planning Methods

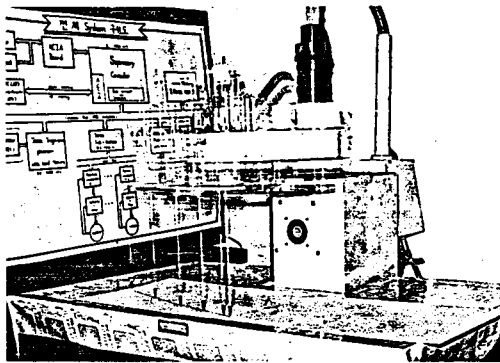


그림 9. SCARA 로봇에 구현한 예
Fig. 9. An Example Implemented in SCARA Robot

5. 결 론

본 논문에서는 제한된 몇개의 앞선 경로점을 하나의 블록 단위로 묶어, 온라인으로 관절 궤적 계획 하는 방법을 소개하고 그들의 성능을 상호 비교하였다. 그리고 그 결과로부터 혼합된 온라인 관절 궤적 계획 방법들을 제시하여, 로봇 매니플레이터가 주어진 경로를 충실히 유지하면서도 부드럽게 운행함을 보였다. 또한 이들 방법들을 실시간적으로 구현하기 위한 제어 시스템의 제작 및 소프트웨어 알고리즘을 개발하였다.

제시된 방법들은 센서 입력에 의한 궤적 계획의 경우처럼, 미리 완전한 궤적을 계획할 수 없는 경우 및 아르송점이나 페인팅 작업과 같은 산업용 공정에 유용하리라 사료된다.

(본 연구의 일부는 1988년도 한양 대학교 고내 연구비의 지원에 의하여 이루어졌음.)

참 고 문 헌

- [1] L.Van Aken and H.Van Brussel, "On-Line Robot Trajectory Control in Joint Coordinates by Means of Imposed Acceleration Profiles", 15th ISI.
- [2] John J.Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison Wesley, Reading, Mass.,1986.
- [3] C.S.G.Lee, R.C.Gonzales and K.S.Fu, "Tutorial on Robotics, 2nd ed, IEEE Computer Society Press.
- [4] Luh, J.Y.S., Lin, C.S., and Chang, P.R, "Formulation and Optimization of Cubic Polynomial Joint Trajectories for industrial Robots", IEEE Trans. Automatic Control, vol.AC-28, No.12, 1983 (DEC).
- [5] S.Chand and Keith L.Doty, "On-Line Polynomial Trajectories for Robot Manipulators", Int.J. Robotics Research. vol 4, No.2, 1985.
- [6] Rolph H.Castain and Richard P.Paul, "An On-Line Dynamic Trajectory Generator", Int. J. Robotics Research, 3, 68-72, 1984.
- [7] M.Shahinpoor and S.Z.Abdel-Rahman, "Generalized Algorithm for Computing the 4-3-4 N-Axis Robotic Trajectory", J.Robotic Systems.vol.1, No.4, 1984.
- [8] 서일홍 외, "여유 자유도를 갖는 로봇 시스템의 제어 장치 개발에 관한 연구", 한양대학교 산업 과학 연구소.
- [9] 변승남 외, "시각장치 및 보조센서를 이용한 Feedback Controller 및 인공지능을 갖는 관리자 시스템 개발", 과학기술처, 1988