

잔류진동 감소를 위한 탄성 로봇 매니퓰레이터 경로설계 및 섭동적응제어의 적용

Flexible Robot Manipulator Path Design and Application of Perturbation Adaptive Control to Reduce Residual Vibration

박 경 조
K. J. Park

Key Words : Flexible Manipulator(탄성매니퓰레이터), Residual Vibration(잔류진동), Path Design(경로 설계), Perturbation Adaptive Control(섭동 적응제어)

Abstract : A method is presented for generating the path which significantly reduces residual vibration of a flexible robot manipulator and applying control theory to track the desired path. The desired path is optimally designed so that the system completes the required move with minimum residual vibration. A closed loop control theory is applied to track the planned path in the case of load variation. Specifically, it is desired that the optimally designed path has a better trajectory tracking capabilities during the residual vibration over the cycloidal path, in various cases of load. Perturbation adaptive control is used as closed loop control scheme. A planar two link manipulator is used to evaluate this method.

1. 서 론

생산성을 높이고 생산품의 질을 개선하기 위해 컴퓨터에 의해 제어되는 로봇 매니퓰레이터에 대한 요구는 최근 들어 산업현장에서 더욱 증가하고 있는 추세이다.

그러나 현재 산업체의 자동화 과정에 사용되고 있는 대부분의 로봇들은 요구되어지는 반복성과 정확도를 만족하기 위해 무겁고, 견고한 링크로 구성되어 있다. 따라서 매니퓰레이터를 구동시키기 위해서는 많은 에너지가 필요하고 운동이 이루어지는 시간도 필연적으로 길어지게 된다.

이에 비해 가볍고, 유연한 로봇팔은 적은 에너지 소비, 보다 안전한 조작, 그리고 빠른 작업속도를 구현할 수 있는 장점이 있다¹⁾.

그러나 이러한 장점을 지닌 유연한 로봇 매니퓰레이터가 널리 사용되고 있지 않는 이유는, 관절(joint)이나 링크에 내재되어 있는 자체의 유연성에 의해 운동이 이루어지는 동안의 추종오차(tracking error)도 커지게 되고, 운동이 끝난 후에도 로봇 첨단부는 원하는 최종위치에서 멈추지 못

하고 잔류진동(residual vibration)을 일으키게 된다. 구조물의 공진은 작은 감쇠를 갖기 때문에 최종위치에서 발생하는 진동은 새로운 작업이 시작되기 전까지 추가적인 정착시간(settling time)을 필요로 한다.

따라서 빠른 운동을 이루면서 잔류진동을 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법의 개발이 필요하게 되었다. 잔류진동을 감소시키는 방법들은 여러 가지가 제안되었으나 크게 개방회로(open loop) 방법과 폐회로(closed loop) 방법으로 나눌 수 있다. 개방루프 방법은 주로 우주구조물의 회전하는 기동장치(maneuver)에 대해 개발되어 왔다²⁻⁵⁾.

폐회로 방법은 되먹임 이득값에 의해 잔류진동을 감소시키는 방법, 수동, 능동감쇠를 첨가하는 방법 등이 개발되어 왔다⁶⁻⁸⁾. 최근에 박 경조 등은 경로 자체를 설계하여 잔류진동을 감소시키는 방법들을 제안하였는데, 토크에 제한이 있는 경우, 경로 상에 장애물이 있는 경우에 대해 각각 제안된 방법들을 적용하여 유용성을 입증하였다^{9,10)}.

이 방법은 기본적으로 개방회로 제어방법으로 시스템의 모델링이 이상적인 경우에만 원하는 응답을 나타낸다. 그러나 실제 산업용 로봇 매니퓰레이터는 각 관절 사이에 작용하는 코리올리력(Coriolis), 원심력 등의 강한 비선형성, 미지의 부

접수일: 2002년 10월 12일
박경조(책임저자) : 여수대학교 응용공학부
E-mail : kjpark@yosu.ac.kr Tel. 061-659-3221

하변동 및 모델 파라미터의 불확실성에 의해 정확한 동특성 모델링이 어려운 문제로 대두된다.

이러한 문제로 인해 개방회로 제어만으로는 실제 로봇 매니퓰레이터가 원하는 경로를 추종하도록 만드는 것이 불가능하기 때문에 폐회로 제어가 요구되어지게 되었다.

지난 20여 년 동안에 산업용 로봇 제어시스템 설계에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이는 크게 비적용제어와 적용제어로 분류된다.

비적용제어는 고전적 제어방법과 최적제어 방법으로 분류할 수 있고^{11,12)}, 적용제어는 기준모델(model referenced)¹³⁾, 자기동조(self tuning)¹⁴⁾, 섭동(perturbation) 적용제어¹⁾ 등으로 나눌 수 있다. 이 중 섭동 적용제어는 매 순간 비선형 방정식을 선형화하여 얻은 공칭모델(nominal model)의 응답과 실제 계의 응답의 차를 최소화하도록 제어기를 설계하는 방법으로 매개변수의 불확실성 및 부하변동이 존재하는 경우에도 우수한 성능을 나타낸다고 알려져 있다.

본 연구에서는 기존의 연구^{9,10)}를 확장하여 설계된 최적경로가 모델계수의 오차 및 미지의 부하변동이 존재하는 경우에도 기존의 경로에 비해 우수한 성능을 갖는다는 것을 보이고자 한다.

먼저 기존의 연구를 간략하게 정리하고, 각 조인트에서의 반력들을 효과적으로 제어하는 섭동 적용제어방법을 사용한다. 설계된 경로를 추종할 때 여러 종류의 부하가 부착되어 있는 경우와 제어기의 성능이 변하는 경우에 대해 제어를 수행한다. 그리고 추종오차 및 잔류진동 구간에서의 오차의 크기를 기존 경로를 추종할 때와 비교, 검토한다.

2. 최적 경로설계

2.1 동적 모델링

매니퓰레이터가 평면상에 놓인 n 개의 개방연쇄계로 구성되어 있다고 가정하고, 링크의 축변형으로의 변형은 횡단면 방향 변형에 비해 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 이 변형은 고려하지 않는다. 링크의 탄성변형에 의한 동적 거동을 표현하기 위해 물체고정좌표계(body fixed coordinate)로 좌표계의 x 축의 링크의 원점과 변형된 링크의 선단을 직선으로 연결하는 VLCS (virtual link coordinate system)를 사용하였고, 관절의 유연성을 동시에 고려하기 위해 관절을 등가의 선형 스프링으로 모델링하였다.

라그랑지 방정식을 이용하면 다음과 같은 매니

퓰레이터에 대한 비선형 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$D(X)\ddot{X} + C(X)\dot{X} + KX + H(X, \dot{X}) - T \quad (1)$$

여기서 $D(X)$ 는 시간에 따라 매니퓰레이터의 자세가 변함에 따라 변하는 관성행렬을 나타낸다. 행렬 C 와 H 는 매니퓰레이터 회전으로 인한 코리올리력과 원심력에 의한 영향을 나타내고, K 는 관절과 링크의 유연성에 의한 강성을 나타내는 행렬이다. $T [t_1 \ t_2 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 는 관절에 가해지는 토크에 의한 외력을 나타낸다. 일반좌표 X 는 $X [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_1^{s1} \ q_2^{s1} \ \dots \ q_2^{s2}]^T$ 로 정의된다.

2.2 최적화문제 정의

선행연구⁹⁾로부터 잔류진동의 크기는, 운동이 끝나는 순간의 관절변위와 속도의 오차가 최소이면서 동시에 각 관절의 오차의 비가 일정값을 가질 때, 최소가 됨을 알 수 있다.

즉 운동이 끝나는 순간의 위치오차만을 최소화시키면 원하는 결과를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 최소화시키고자 하는 목적함수를 잔류진동 구간에서의 위치오차의 최대값으로 설정하였다.

$$J = \text{Max } p_e \quad (p_e = \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \text{ for } t \geq t_f) \quad (2)$$

위에서 정의된 목적함수는 운동방정식을 수치적분하여 구할 수 있으므로 최적화문제를 정의하기 위해서는 식 (1)의 운동방정식이 필요하다.

또한 운동의 양 끝점에서의 요구되어지는 관절의 변위, 속도, 가속도의 기구학적 제한조건을 설정할 수 있다.

$$\theta_i = \theta_{id}; \quad \dot{\theta}_i = 0; \quad \ddot{\theta}_i = 0 \text{ at } t=0, t_f \quad (3)$$

최적경로를 설계하기 위해서는 각 관절의 경로를 함수전개할 필요가 있다. 일반적으로 이와 같은 목적에 사용되는 함수는 푸리에급수(Fourier series)와 다항식이 있다. 다항식은 경계조건을 정확하게 만족시키는 반면, 계의 공진을 유발시키는 고주파수 성분이 함수전개에 포함되게 된다.

또한 항을 계속해서 첨가해도 수렴성이 보장되지 않는 단점이 있다. 반면 푸리에급수는 다항식과 정반대로 항의 첨가에 의해 수렴성이 보장되는 반면 경계조건을 만족시키지 못하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이 두 함수를 결합시켜 서로의 장점만을 갖는 함수로 관절의 경로를 전개하고자 한다.

$$\theta_i(t) = \lambda_i(t) + \sigma_i(t) \quad (4)$$

여기서 $\lambda_i(t) = \sum_{j=0}^5 \lambda_{ij} t^j$, $\sigma_i(t) = \sum_{m=1}^M a_{im} \cos \frac{m\pi}{t_f} t$

이고 후리에급수의 상수항은 다항식에 포함하였다. 설계변수 α_{im} 이 결정되면 조인트의 변위, 속도, 가속도는 식 (4)로부터 구할 수 있다.

이를 강제운동에 대한 운동방정식에 대입하면 매니퓰레이터를 구동시키기 위한 각 조인트의 토크를 구할 수 있고, 구하여진 토크를 탄성로봇의 운동방정식 (1)에 대입하여 수치적분하면 동응답을 얻을 수 있다.

이 동응답 결과로부터 식 (2)의 목적함수를 정의할 수 있다. 목적함수가 최적조건을 만족하지 않으면, 최적해가 구해질 때까지 최적화 프로그램을 수행하여 원하는 결과를 얻는다.

2.3 잔류진동 감소를 위한 경로

제시된 최적화 방법을 사용하여 탄성 2 링크 매니퓰레이터의 잔류진동을 최소화시키는 경로를 설계하였다. 동응답을 구하기 위해 사용된 모델계수는 다음과 같다.

먼저 각 링크는 길이 1(m)의 사각형 알루미늄보로 모델링하였다.

질량은 3.5(kg)이고 두께는 1(cm)이다. 보의 단면은 3×4(cm)이고, 사용된 영계수(Young's modulus)는 7.1×10^3 (kgf/mm²)이다. 각 관절의 스프링상수는 2(kN·m/rad)를 갖는 동가의 비틀림스프링으로 모델링하였다.

각 링크에서 보의 유연성을 표현하기 위해 사용된 모드의 수는 3개이다. 매니퓰레이터의 운동시간은 1(sec)로 하였다. 매니퓰레이터는 θ_{10} 90°, θ_{20} 90°위치에서 운동을 시작하여 θ_{1f} 0°, θ_{2f} 45°에서 운동을 끝내도록 하였다.

최적화 초기조건은 가장 매끄러운 운동을 만들어내는 곡선 중의 하나로 알려진 사이클로이드(cycloid) 함수를 후리에급수로 전개한 항으로 설정하였다.

이에 대한 선단경로는 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 사이클로이드 운동은 거의 직선에 가까운 경로를 갖는다는 것을 알 수 있다.

최적화과정을 통하여 설계한 로봇 첨단부 경로는 Fig. 2에 제시하였다. 결과를 살펴보면 사이클로이드 경로와 최적화된 경로 모두 양 끝점에서의 경계조건은 정확하게 만족하지만, 중간의 경로는 매우 다름을 알 수 있다.

특히 설계된 선단 경로는 경로가 직선에 가까운 사이클로이드 경로에 비해 많은 차이를 보인다. Fig. 2에서 보면 운동이 전반부에서 첫 번째 링크의 운동속도는 매우 빠르고 두 번째 링크는 안쪽으로 굽어지는 운동을 한다.

이는 Fig. 1의 사이클로이드 경로와 비교하면 반대 방향의 운동을 하는 것을 알 수 있다.

첫 번째 링크가 0.4초 이내에 대부분의 운동을 완성하면 두 번째 링크는 바깥쪽으로 굽어지는 운동을 나머지 시간 내에 수행한다.

이는 대부분의 운동이 운동의 전반부에 이루어지고, 운동의 후반부에서는 전반부의 빠른 운동에 의해 발생된 위치오차를 보상하면서 선단이 원하는 최종위치로 접근하는 운동을 나타낸다.

잔류진동의 크기를 비교하기 위하여 설계된 입력력을 동적 운동방정식에 대입하여 구한 선단의 x, y방향 추종오차 및 잔류진동 Fig 3에 제시하였다. 그림에서 보듯이 설계된 경로를 사용하면 사이클

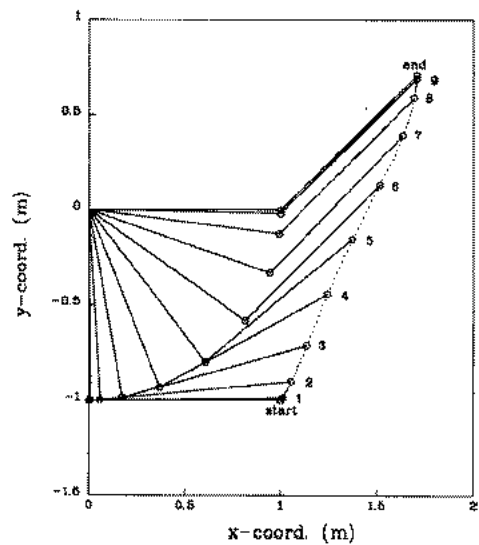


Fig. 1 Arm motion and tip path for cycloidal motion

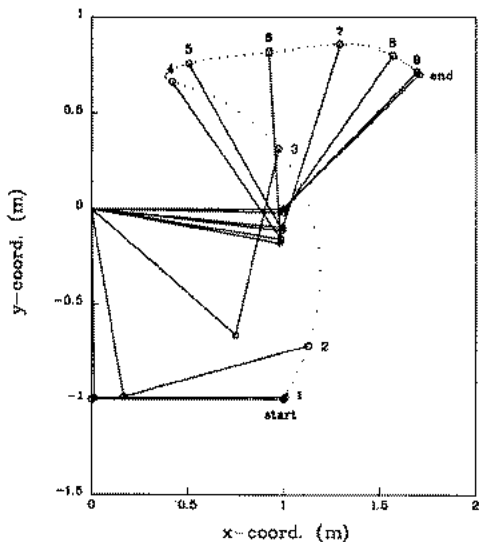
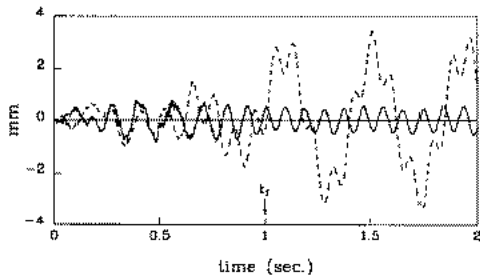


Fig. 2 Arm motion and tip path for optimal motion

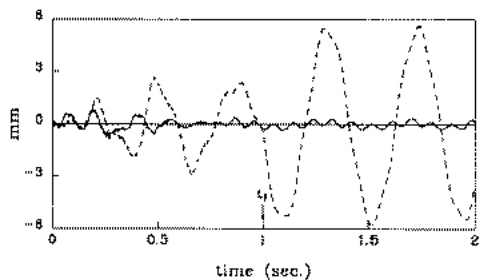
로이드 경로에 비해 잔류진동의 크기가 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

사이클로이드 경로를 사용하는 경우 x방향의 최대 잔류진동의 크기는 3.43(mm)이고 y방향은 5.75(mm)이다.

반면에 설계된 경로를 사용하는 경우 x방향의 잔류진동의 최대치는 0.56(mm)이고 y방향은 0.34(mm)로 사이클로이드 경로에 의한 잔류진동 최대치의 각각 16.3%, 5.9%에 해당된다. 이로부터 설계된 경로를 사용하면 잔류진동의 크기를 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) x position error



(b) y position error

Fig. 3 Tip position error(:cycloidal, :optimal)

3. 섭동 적응제어

설계된 최적경로가 모델계수의 오차 및 미지의 부하변동이 존재하는 경우에도 기존의 사이클로이드 경로에 비해 우수한 성능을 갖는다는 것을 보이기 위해 섭동 적응제어 방법을 적용한다. 섭동 적응제어 방법은 공칭궤적(nominal trajectory)에 대해 선형화된 모델에 기초하여 설계된다. 제어입력은 개별적으로 그리고 동시에 계산할 수 있는 피드포워드 성분과 되먹임 성분으로 구성된다.

역동역학을 통해 공칭궤적에 따른 각 관절 사이의 결합력을 보상하는 공칭토크(nominal torque), 즉 피드포워드 성분을 계산한다.

되먹임 성분은 공칭궤적을 추종하면서 발생하는

위치, 속도의 오차를 0으로 감소시키는 섭동토크(perturbation torque)에 의해 구성된다.

섭동방정식의 시스템 파라미터를 추정하기 위해서는 회귀적(recursive)이고 실시간으로 계산할 수 있는 최소자승추정(least square estimation) 알고리즘이 사용된다.

필요한 제어효과를 얻기 위해서, 선형화된 시스템에 대한 시스템 파라미터와 되먹임이득값은 매 샘플링 주기마다 갱신되고 조정된다. 이 방법에 의해 제어문제를 비선형 제어에서 공칭궤적에 대해 선형화된 시스템에 대한 선형 제어문제로 바꿀 수 있다.

공칭궤적을 추종하면서 발생하는 위치, 속도오차를 0으로 감소시키는 섭동 조인트토크를 계산하는 되먹임 제어기를 설계하기 위해서는 적합한 선형 섭동방정식을 유도하여야 한다. 상태벡터(state vector) x 를 다음과 같이 정의하자.

$$x^T = [X^T, \dot{X}^T] \triangleq [x_1^T, x_2^T] \quad (5)$$

n 차원의 입력벡터는

$$u^T = [\tau_1(t), \tau_2(t), \dots, \tau_n(t)] \quad (6)$$

가 된다. 앞에서 유도한 운동방정식은 다음과 같이 상태변수 형태로 쓰여질 수 있다.

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (7)$$

공칭 상태벡터 $x_n(t)$ 는 계획된 궤적에 의해 구해질 수 있고, 공칭토크 $u_n(t)$ 는 역동역학에 의해 구해질 수 있다. $x_n(t)$ 와 $u_n(t)$ 는 식 (7)을 만족한다.

$$\dot{x}_n = f(x_n(t), u_n(t)) \quad (8)$$

식 (7)을 공칭궤적에 대해 테일러급수(Taylor series)로 전개하여, 식 (8)을 소거하면 선형화된 섭동모델을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= \nabla_x f|_n \delta x(t) + \nabla_u f|_n \delta u(t) \\ &= A(t) \delta x(t) + B(t) \delta u(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\nabla_x f|_n$ 과 $\nabla_u f|_n$ 은 $x_n(t)$, $u_n(t)$ 에서 구한 $f[x(t), u(t)]$ 의 자코비안행렬(Jacobian matrix)이다. 그리고 $\delta x(t) = x(t) - x_n(t)$, $\delta u(t) = u(t) - u_n(t)$ 이다.

시스템 파라미터 $A(t)$ 와 $B(t)$ 는 공칭궤적에 따른 매 순간의 매니퓰레이터 위치와 속도의 변화에 따라 결정된다. 매니퓰레이터의 운동방정식은 매우 복잡한 형태를 가지므로 $A(t)$ 와 $B(t)$ 를 수식의 형태로 구하는 것은 대단히 어렵다.

그러나 섭동모델에 대한 되먹임 제어기를 설계하기 위해서는 식 (9)의 시스템 파라미터의 값이 구해져야 한다. 따라서 미지의 $A(t)$ 와 $B(t)$ 의 요소들을 규명하기 위해서는 파라미터 규명방법이 사

용되어야 한다.

섭동 적응제어 방법을 컴퓨터에 적용하기 위해서는 식 (9)를 이산화(discrete)하여 이산 선형방정식을 얻고, 이 방정식에 파라미터 규명방법을 적용해야 한다.

$$x[(k+1)T] = F(kT)x(kT) + G(kT)u(kT) \quad (10)$$

$k = 0, 1, \dots$

여기서 T 는 샘플링주기이다.

식 (10)에서 $F(kT)$ 와 $G(kT)$ 행렬의 $6n^2$ 개의 파라미터를 규명해야 한다. 여기서 n 은 관절의 갯수이다.

여러 가지 규명 알고리즘 중에서 회귀적 실시간 최소자승 파라미터 규명방법은 전개가 간단하고 적용하기가 쉽기 때문에, 본 논문에서는 $F(kT)$ 와 $G(kT)$ 의 시스템 파라미터를 규명하기 위해 이 방법을 사용한다.

최소자승법을 식 (10)에 적용하기 위해서는 시스템 방정식을 파라미터 규명에 적합한 형태로 재구성할 필요가 있다.

k 번째 순간에서의 미지의 시스템 파라미터의 i 번째 열을 $3n$ 차원의 벡터로 표시하면

$$\pi_i^T(k) = [f_{i1}(k), \dots, f_{ip}(k), g_{i1}(k), \dots, g_{in}(k)] \quad (11)$$

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

이고 행렬 형태로 쓰면

$$\Pi(k) = \begin{bmatrix} f_{11}(k) & \dots & f_{p1}(k) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ f_{1p}(k) & \dots & f_{pp}(k) \\ g_{11}(k) & \dots & g_{p1}(k) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g_{1n}(k) & \dots & g_{pn}(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$= [\pi_1(k), \pi_2(k), \dots, \pi_p(k)]$$

이다. 여기서 $p = 2n$ 이다. 같은 방법으로 식 (10)의 k 번째 순간의 입력과 출력을 $3n$ 차원의 벡터로 표시하면

$$z^T(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_p(k), u_1(k), u_2(k), \dots, u_n(k)] \quad (13)$$

이고 상태벡터는

$$x^T(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_p(k)] \quad (14)$$

이다. 따라서 식 (10)은

$$x_i(k+1) = z^T(k) \pi_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (15)$$

의 형태로 쓸 수 있다.

예측오차(prediction error)를

$$e_i(k) = x_i(k+1) - \hat{x}_i(k+1) = x_i(k+1) - z^T(k) \hat{\pi}_i(k) \quad (16)$$

로 정의하면 다음과 같은 회귀적인 파라미터 규명 알고리즘을 사용하여 미지의 파라미터 $\pi_i(k)$ 를 규명할 수 있다.

$$\hat{\pi}_i(k+1) = \hat{\pi}_i(k) + \gamma(k) P(k) z(k) [x_i(k+1) - z^T(k) \hat{\pi}_i(k)] \quad (17)$$

$$P(k+1) = P(k) - \gamma(k) P(k) z(k) z^T(k) P(k) \quad (18)$$

$$\gamma(k) = [z^T(k) P(k) z(k) + \rho]^{-1} \quad (19)$$

여기서 기호 $\hat{\cdot}$ 는 추정치를 나타내고, ρ 는 가중계수로 $0 < \rho < 1$ 을 만족한다. $P(k)$ 의 초기값은 다음 식으로 선택할 수 있다.

$$P(0) = \alpha I_{3n} \quad (20)$$

여기서 α 는 $\alpha \gg 1$ 인 양수이고, I_{3n} 은 $3n \times 3n$ 의 단위행렬이다. 미지의 파라미터 $F(k)$ 와 $G(k)$ 의 초기값은 다음 식에 의해 근사화될 수 있다.

$$F(0) \cong I_{2n} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} [x_n(0), u_n(0)] \right\} T + \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} [x_n(0), u_n(0)] \right\}^2 T^2 \quad (21)$$

$$G(0) \cong I_{2n} + \left\{ \frac{\partial f}{\partial u} [x_n(0), u_n(0)] \right\} T + \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} [x_n(0), u_n(0)] \right\} \times \left\{ \frac{\partial f}{\partial u} [x_n(0), u_n(0)] \right\} T^2 \quad (22)$$

$F(k)$ 와 $G(k)$ 의 파라미터들이 결정되었으므로, 공칭궤적을 추종하면서 발생하는 위치, 속도의 오차를 감소시키는 교정토크를 구하기 위한 적절한 제어기를 설계할 수 있다.

본 논문에서는 토크계산방법에서 사용한 방법과 같은 방법인 극지정방법(pole assignment method)에 의해 오차를 제어한다. 제어입력은

$$u(k) = -K_x \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

로 구성되고 식 (23)을 식 (10)에 대입하면

$$x(k+1) = [F(k) - G(k) K_x] x(k) \quad (24)$$

이다. $[F \ G K_x]$ 의 고유치가 원하는 극위치 z_d 에 존재하도록 매 순간 K_x 를 갱신하여 식 (24)에 대입하면 교정토크(correction torque) $u(k)$ 를 구할 수 있다. 본 방법에 대한 블록선도는 Fig. 4에 제시하였다.

4. 결과 및 고찰

섭동 적응제어 방법을 사용하여 미지의 부하변동이 존재하는 경우에, 기존의 사이클로이드 경로와 최적설계된 경로를 추종할 경우, 각각의 경로 추종오차 및 잔류진동 구간에서의 오차의 크기를 비교한다.

실험은 실제 로봇 제어기의 실현 시 필연적으로 수반되는 현상들을 조합하여 여러 종류의 부하 (1kg, 2kg)가 선단에 부착된 경우에, 원하는 극위치를 변화시키면서(z_d 20, 30) 수행하였다. 사용되어진 모델 계수들의 값은 최적설계의 경우와 같으며 제어기의 샘플링주기는 5(ms)이다.

각각의 결과는 기존의 사이클로이드 경로를 추종하는 경우와 비교하여 나타내었다.

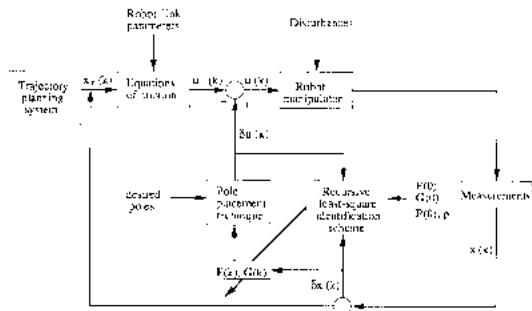


Fig. 4 Block diagram for perturbation adaptive control

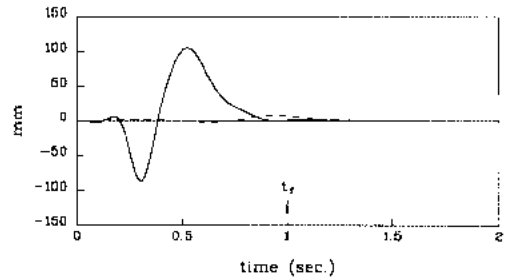
Fig. 5에는 원하는 극위치가 20이고 1kg의 부하가 부착된 경우에 대한 선단의 추종오차 및 잔류진동 구간에서의 오차를 나타내었다. 그림에서 경로 추종오차는 사이클로이드 경로에 비해 10배 이상 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면 잔류진동 구간에서의 오차는 오히려 크게 감소되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

이는 설계된 경로가 추종오차를 감소시키도록 설계되지 않고 잔류진동을 줄이도록 설계되었기 때문이라 생각된다.

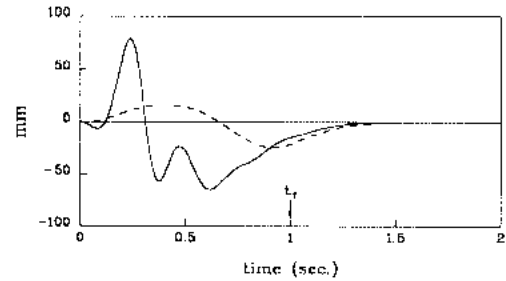
즉 설계된 경로는 관절의 가속도 및 입력토크의 크기가 크게 증가되어 운동의 전반부에서 빠른 운동을 이루게 하는데, 운동속도가 증가할수록 제어기의 성능이 저하되어 추종오차를 충분히 보상할 수 없는데 기인한다.

운동속도가 증가될수록 선형화된 섭동모델의 정확도는 감소되고, 비선형 및 각 조인트에서의 반력들에 대한 영향도 증가하여 원하는 경로를 추종하기 어렵게 만들기 때문이다.

그러나 운동이 끝나는 최종위치에 접근할수록 운동속도가 느려져 오차의 크기도 감소하고 결국 잔류진동 구간에서의 오차는 기존의 사이클로이드 경로에 비해 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. 이로부터 설계된 경로를 추종하면 사이클로이드 경로

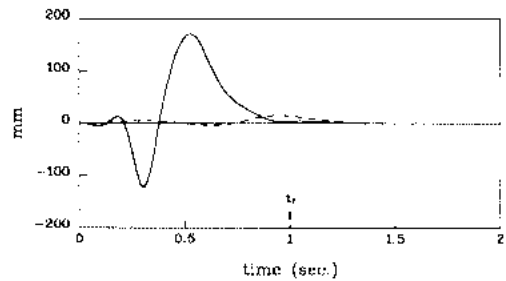


(a) x position error

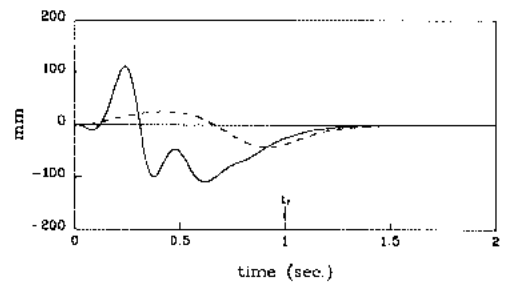


(b) y position error

Fig. 5 Tip position error, payload 1kg, z_d 20 (:cycloidal, :optimal)



(a) x position error



(b) y position error

Fig. 6 Tip position error, payload 2kg, z_d 20 (:cycloidal, :optimal)

를 추종하는 경우에 비해, 미지의 부하변동이 존재하는 경우에도 추종오차는 증가하지만 잔류진동 구간에서의 오차는 오히려 감소함을 알 수 있다.

사이클로이드 경로는 매니퓰레이터의 동특성을 고려하지 않고, 또 잔류진동을 감소시키도록 설계되지 않았기 때문에 운동의 최종위치에 접근할수록 오차가 커지게 된다. 이는 부하가 부착되어 있는 경우에도 같은 양상을 보인다.

부하가 증가하여도 같은 양상을 보이는지를 살펴보기 위해 선단에 부착되는 부하의 크기를 2kg으로 변화시켜 주어진 경로를 추종하도록 제어를 수행하였다.

선단에 2kg의 부하가 부착된 경우의 추종오차 및 잔류진동 크기를 Fig. 6에 나타내었다.

오차의 형상은 유사하지만 무거운 부하가 부착될수록 선단의 오차가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 운동이 끝나는 순간에서의 추종오차도 부하의 크기가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다.

특히 설계된 경로를 추종하는 경우가 사이클로이드 경로를 추종하는 경우에 비해 추종오차의 증가율이 크게 나타난다.

즉 부하가 증가될수록 설계된 경로는 더욱 크게 영향을 받는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 증가된 조인트 가속도 및 토크의 크기에 의해 운동이 이루어지는 동안의 추종오차가 커지게 되고, 따라서 최종위치에서의 오차도 커지게 되는 것을 의미한다. 이에 따라 잔류진동 구간에서의 오차도 증

가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 2kg의 부하상태에서 원하는 극위치가 30인 제어기를 사용하여 원하는 경로를 추종하도록 제어한 결과이다.

제어기의 성능이 향상되었으므로 Fig. 6의 결과에 비해 추종오차가 감소하였음을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 성능이 향상된 제어기에 대해서도 설계된 경로를 추종하는 경우가 사이클로이드 경로에 비해 잔류진동 구간에서의 오차가 적게 나타남을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 부하의 크기가 변하고 제어기의 성능이 바뀌어도, 설계된 경로를 추종하는 경우가 기존의 경로를 추종하는 경우에 비해 잔류진동 구간에서의 오차가 크게 감소되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

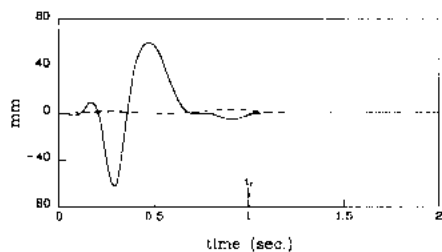
본 연구에서는 기존의 연구를 확장하여 설계된 최적경로가 모델계수의 오차 및 미지의 부하변동이 존재하는 경우에도 기존의 경로에 비해 우수한 성능을 갖는다는 것을 보이고자 하였다.

설계된 경로를 추종하는 경우, 잔류진동 구간에서의 오차는 사이클로이드 경로에 비해 크게 감소하지만 운동이 이루어지는 구간에서의 추종오차는 증가되어 나타난다. 이는 증가된 조인트 가속도 및 토크의 크기에 의해 운동이 이루어지는 동안의 추종오차가 커지게 되고, 따라서 최종위치에서의 오차도 커지게 되는 것을 의미한다고 할 수 있다.

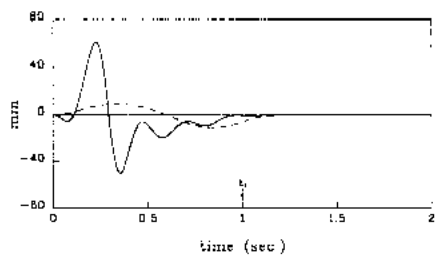
이러한 문제를 해결하기 위해 토크의 크기를 사이클로이드 경로와 유사하게 제한하여 설계한 경로를 추종하게 하면, 운동이 이루어지는 구간에서의 추종오차도 사이클로이드 경로를 추종하는 경우와 유사해지고, 잔류진동 구간에서의 오차도 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. R. F. Anthony and W. D. Ron, "Perturbation Techniques for Flexible Manipulator", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991
2. D. M. Aspinwall, "Acceleration Profiles for Minimizing Residual Vibration", ASME J. DSCMC, Vol. 102, pp.3~6, 1980
3. H. Sehitoglu and J. H. Aristizabal, "Design



(a) x position error



(b) y position error

Fig. 7 Tip position error, payload 2kg, $z_d = 30$
(:cycloidal, :optimal)

- of a Trajectory Controller for Industrial Robots Using Bang Bang and Cycloidal Motion Profiles”, ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, pp.169~175, 1989
4. P. Meckl and W. P. Seering, “Minimizing Residual Vibration for Point to Point Motion”, ASME J. Vib., Acou., Stress and Relia. in Design, Vol. 107, pp.378~382, 1985
 5. W. E. Singhose, N. C. Singer and W. P. Seering, “Design and Implementation of Time Optimal Negative Input Shapes”, Proc. Intl. Mech. Eng. Cong. and Expos., Chicago, IL., pp.151~157, 1994
 6. J. A. Breakwell, “Optimal Slewing of Flexible Spacecraft”, Journal of Guidance and Control, Vol. 4, pp.472~479, 1981
 7. L. M. Sliverberg, “Uniform Damping Control of Spacecraft”, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 9, pp.221~227, 1986
 8. S. P. Bhat and D. K. Miu, “Precise Point to Point Positional Control of Flexible Structures”, ASME J. DSMC, Vol. 112, pp.667~674, 1990
 9. 박 경조, 박 윤식, “토크 제한하에서의 잔류진동 감소를 위한 로봇 경로설계”, 대한기계학회 논문집, 제 17권, 3호, pp.2437~2445, 1993
 10. 박 경조, 정 강, “충돌회피 및 잔류진동 감소를 위한 여유자유도 탄성 로봇 매니퓰레이터 경로설계”, 한국동력기계학회지 제 5권, 제2호, pp.79~86, 2001
 11. J. S. Luh, “Conventional Controller Design for Industrial Robots A Tutial”, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC 13, pp.298~316, 1993
 12. Y. H. Chen, “Robust Computed Torque Schemes for Mechanical Manipulators: Nonadaptive Versus Adaptive”, ASME J. DSMC, Vol. 113, pp.324~327, 1991
 13. S. Dubowsky and D. T. Desforges, “The Application of Model Reference Adaptation Control to Robot Manipulators”, ASME J. DSMC, Vol. 101, pp.193~200, 1979
 14. M. Lambert, “Adaptive Control of Flexible Systems”, D. Phil Thesis, Oxford Univ., Dept. Engineering Science, 1987