

충돌회피 및 잔류진동 감소를 위한 여유자유도 탄성 로봇 매니퓰레이터 경로설계

Path Design of Redundant Flexible Robot Manipulators to Reduce Residual Vibration in the Presence of Obstacles

박 경 조 · 정 강

K. J. Park and K. Chung

Key Words : Redundancy(여유자유도), Flexible Manipulator(탄성매니퓰레이터), Residual Vibration(잔류진동), Avoiding Obstacles(장애물회피), Path Design(경로설계)

Abstract : A method is presented for generating the path which significantly reduces residual vibration of the redundant, flexible robot manipulator in the presence of obstacles. The desired path is optimally designed so that the system completes the required move with minimum residual vibration, avoiding obstacles. The dynamic model and optimal path are effectively formulated and computed by using special moving coordinate, called VLCS, to represent the link flexibility. The path to be designed is developed by a combined Fourier series and polynomial function to satisfy both the convergence and boundary condition matching problems. The concept of correlation coefficients is used to select the minimum number of design variables. A planar three-link manipulator is used to evaluate this method. Results show that residual vibration can be drastically reduced by selecting an appropriate path, in the presence of obstacles.

1. 서 론

현재 산업현장에서 주로 사용되고 있는 로봇은 요구되어지는 정확성과 반복성을 만족하기 위해 무겁고, 견고한 구조로 되어 있다. 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 추종오차(tracking error)나 잔류진동(residual vibration)을 더욱 크게 하는 유연성이 존재하기 때문이다.

링크 내부의 감쇠는 무시할 수 있을 만큼 작고, 외부에서 수동감쇠를 첨가하는 것은 질량증가에 의해 로봇팔의 동적 응답을 방해하여, 가벼운 구조물이 갖는 장점을 상쇄시키는 효과를 유발한다. 따라서 원하는 성능을 구현하기 위해 능동 진동감쇠가 요구되는데, 이는 링크를 구동하기 위해 각

조인트에 설치된 구동기(actuator)의 토크형상을 적절히 설계함으로써 가능하다. 그러나 매니퓰레이터의 운동은 로봇팔의 회전에 따른 각 링크의 질량변화, 회전에 의한 코리올리(Coriolis)효과, 강제운동과 탄성변위의 연성(coupling) 등에 의해 비선형특성을 나타내므로 정확한 동응답을 예측하는 것은 어렵고, 따라서 입력형상 설계에 의해 추종오차나 잔류진동을 완전히 상쇄시키는 것은 거의 불가능하다.

이러한 유연한 매니퓰레이터의 운동을 제어하기 위해 많은 방법들이 제안되었다. Book²⁾은 피드백 제어, 피드포워드제어, 수동감쇠 첨가, 구조물 형상 설계 등에 의한 로봇 진동제어 방법들을 조사, 정리하였다. Karolov와 Chen³⁾은 1-링크 유연 로봇팔에 대해 고유진동수 변화에 강건한(robust) 제어를 설계하였다. 많은 연구에서 다링크 로봇팔을 단순화한 다자유도 집중질량으로 모델링하였다. Meckl과 Seering^{4,5)}은 단순화된 집중질량 모델에 대해, 계의 공진을 회피하도록 설계된 뱅뱅제어력(bang-bang control force)을 가하여 잔류진동을

접수일 : 2000년 2월 2일

박경조, 정 강 : 여수대학교 기계자동차공학부

감소시킬 수 있음을 보였다. 또한 경사정현함수(ramped sinusoidal function)를 사용한 제어함수 설계도 수행하였다. Singhose⁶⁾은 위의 연구를 더욱 발전시켜 일련의 임펄스함수에 의한 입력형상화(input shaping)방법을 제시하였다. Yamada와 Nakagawa⁷⁾는 1자유도 시스템의 고유진동수 변화에 따른 진동감쇠 방법을 제안하였고, Vincent등⁸⁾은 개회로(open-loop) 위치이동 단계와 폐회로(closed-loop) 감쇠 단계의 두 단계로 이루어진 제어 알고리즘을 전개하였다. Jayasuriya와 Choura⁹⁾는 최단시간에 최소에너지로 움직이면서 잔류진동을 감소시키는 개회로 구동력함수를 전개하였다. 최근에 William과 Donogh¹⁰⁾는 구동기에서 전파된 파동(wave)이 로봇 선단에서 반사되지 않도록 입력형상을 설계하는 방법을 제안하였다.

이상의 연구들이 단순화된 집중질량모델에 기초한 반면 Asada등¹¹⁾은 역동역학(inverse dynamics)에 의해 유연한 로봇팔의 추종오차를 감소시키는 방법을 제안하였다. Parks¹²⁾와 박 경조등¹³⁾은 선단의 경로자체를 설계하여 잔류진동을 감소시킬 수 있음을 보였다. 즉 점대점운동(point-to-point motion)을 하는 경우 매니퓰레이터가 중간에 지날 수 있는 경로는 무수히 많이 존재하는데, 그 중에서 운동이 끝나는 점에서의 잔류진동을 최소로 감소시키는 경로를 선택하여 원하는 성능을 구현하는 방법이다. 이는 경로자체를 설계하기 때문에 경로 상에 존재하는 고정장애물이나, 근처에서 작업하는 다른 로봇과 같은 이동장애물과의 충돌을 회피하면서 잔류진동을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.

한편 여유자유도 로봇은 여분의 자유도에 의해 특이점(singular point)을 회피할 수 있고, 로봇팔의 정교함이 증가함에 따라 장애물회피에 유용하게 사용될 수 있는 장점이 있기 때문에 현재 활발히 연구가 진행되고 있다^{14,15,16)}. 그러나 여유자유도를 갖는 로봇의 동적 해석이나 경로설계 시에는 일반로봇에 비해 상대적으로 복잡하고, 어려운 문제가 발생한다. 즉 문제의 차원(dimensionality)도 증가하고, 로봇팔과 손의 분리개념도 적용하기 어렵다. 여기에 로봇팔의 유연성이 첨가되면 일반로봇에 적용되던 경로설계 및 제어방법들은 한계성을 지니게 된다. 따라서 현재 여유자유도 로봇에 대한 연구는 주로 강체로봇을 대상으로 하고 있다.

본 연구에서는 기존의 연구^{12,13)}를 확장하여 충돌회피 및 잔류진동 감소를 위한 여유자유도, 탄성로봇의 경로설계를 수행한다. 동적 모델 수립시 링크의 수가 증가할수록 그 효율성이 증대되는

VLCS(Virtual Link Coordinate System)를 사용하여 탄성로봇을 모델링한다. 경계조건 및 수렴성이 보장되는, 다항식과 후리에급수가 결합된 형태로 경로를 함수전개하고, 상관계수개념을 도입하여 설계변수를 감소시키는 방법을 제안한다. 여유자유도 로봇의 운동 시, 장애물이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 잔류진동의 감소 추이를 비교하고, 경로자체를 설계하여 잔류진동의 크기를 허용범위 이내로 감소시킬 수 있음을 보인다.

2. 동적모델 수립

2.1 좌표계의 선정

분포모델로 모델링하는 경우, 링크의 유연성은 선정된 물체고정좌표계(body-fixed coordinate)에 대한 링크의 변형정도로 표현된다. 일반적으로 링크의 변형을 표현하기 위해서는 가정된 변형함수를 사용하는데, 이러한 변형함수는 좌표계의 선정에 따라 크게 달라지게 된다. 또한 각각의 링크에서 정의된 물체고정좌표계 사이의 상호관계도 좌표계 선정에 따라 영향을 받는다.

대부분의 분포모델에서 사용되어지는 좌표계는 접선좌표계이다. 이는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 좌표축 O_1x_1 과 O_2x_2 가 1,2번째 링크의 중심선에 대해 접선방향을 향하는 좌표계이다. 그림에서 링크의 양 끝단은 서로 다른 좌표계 $O_1x_1y_1$ 과 $O_2x_2y_2$ 에 존재하게 된다. 그리고 접선좌표계 $O_2x_2y_2$ 의 원점 O_2 는 θ_1 뿐만 아니라 링크 1의 선단변형 $v_1(L_1)$ 에 의해서도 영향을 받는다. 반면에 Fig. 1(a)에 나타낸 VLCS에서는 링크의 양 끝단이 동일 좌표축 x_1 위에 존재한다. 또한 링크 2의 원점은 링크 1의 변형에 무관하고 단지 θ_1 에 의해서 결정된다.

이러한 두 좌표계의 차이에 의해 각각의 좌표계에서 사용될 수 있는 변형함수도 달라지게 된다. 즉 접선좌표계를 사용하는 경우, 변형함수는 한쪽은 고정되고(fixed), 한쪽은 자유(free)상태인 보의 모드를 사용한다. 이 모드함수는 잘 알려진 바와 같이 매우 복잡한 함수형태를 갖는다. VLCS의 경우 변형함수는 양단이 단순지지된(simply-supported) 보의 모드함수를 사용할 수 있다. 이는 매우 간단한 형태의 함수로 표시되는 모드이다. 또한 접선좌표계의 경우 한 링크에서 정의된 좌표계가 다른 링크에서 정의된 좌표계에 의해 영향을 받기 때문에 각각의 링크에서의 변형은 서로 연성되어지게 된다. VLCS에서는 각각의 좌표가 독립적이기 때문에 변형의 연성은 나타나지 않게 된다.

운동방정식의 유도시 간단한 형태의 변형함수는 그만큼 운동방정식의 유도를 쉽게 만들고, 유도되어진 운동방정식도 간결한 형태를 갖는다. 또한 각 링크에서의 탄성변형이 비연성되어 있으면 유도되는 운동방정식은 축약된 형태를 갖게 되고, 이는 운동방정식의 수치적분 시 계산의 간편함과 계산시간이 단축되는 효과를 유발시킨다. 특히 여유자유도를 갖는 탄성 매니퓰레이터는 링크와 조인트의 개수가 부가적으로 증가하므로 동적 모델도 복잡해진다. 따라서 좀더 간편하고 계산시간이 적게 소요되는 모델이 필수적이라 할 수 있다. 이상의 비교로부터 링크의 탄성변형을 표현하기 위해 설정되는 물체고정좌표계는 접선좌표계에 비해 VLCS가 매우 유용함을 알 수 있다.

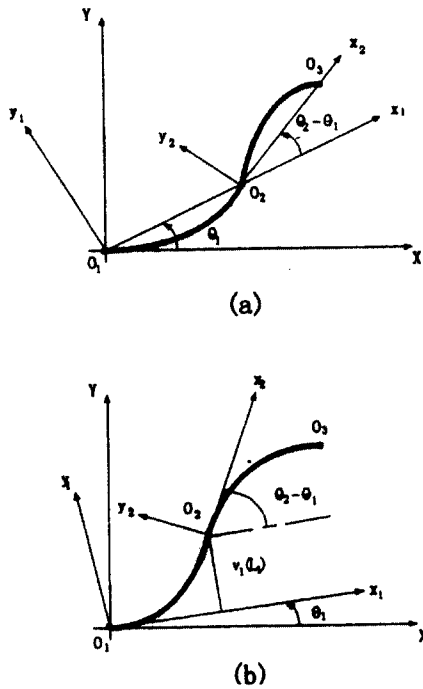


Fig. 1 Comparison of VLCS(a) and tangent coordinate system(b)

2.2 운동방정식의 유도

본 연구에서는 일반좌표(generalized coordinate)를 계의 모든 상대조인트좌표(relative joint coordinate) 및 모드좌표(mode coordinate)의 집합으로 정의한다. 좌표계 $x_{i-1}y_{i-1}$ 을 $(i-1)$ 번째 링크에서 정의된 물체고정좌표계로, x_iy_i 를 i 번째 링크에서 정의된 물체고정좌표계라 하면 상대조인트좌표는 $x_{i-1}y_{i-1}$ 좌표계에 대한 x_iy_i 좌표계의 상대각도 θ_i 로 정의된다. 링크의 중심선에 대한 i 번째 링크의

변형 u_i 는 s_i 개의 독립함수(independent function)에 의해 정의될 수 있다.

$$u_i(x_i, t) = \sum_{j=1}^{s_i} \phi_i^j(x_i) q_i^j(t) \quad (1)$$

여기서 ϕ_i^j 는 i 번째 링크에 대한 가정된 변형함수이고, q_i^j 는 이에 대한 모드좌표이다.

매니퓰레이터의 각 조인트는 구동기(actuator), 기어나 체인과 같은 전동기(transmission unit)로 구성된다. 조인트 부분의 유연성은 주로 전동장치인 기어나 체인에서의 탄성변형에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 구동기의 관성을 무시하고 전동장치의 유연성만을 고려하여, 이를 등가의 비틀림 스프링 k_i 로 모델링한다. 조인트강성에 의해 각 링크 사이에는 연성된(coupled) 반력들이 존재하고, 이는 운동방정식을 더욱 비선형적으로 만드는 요인이 된다.

여유자유도, 탄성 로봇에 대한 운동방정식은 잘 알려진 라그랑지방정식(Lagrange equation)을 사용하여 구할 수 있다. 복잡한 계산과정을 통해 구한 운동에너지, 위치에너지, 일반화된 외력을 대입하면 평면에서 움직이는 여유자유도, 탄성로봇에 대한 운동방정식을 구할 수 있다¹⁷⁾.

$$D(X)\ddot{X} + C(X)\dot{X} + KX + H(X, \dot{X}) = T \quad (2)$$

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 조인트와 링크의 유연성에 의한 강성을 나타내는 행렬이다. $T = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 는 평면상에서 움직이는 여유자유도 로봇에 대한 일반화된 외력을 나타내고, 일반좌표 X 는 $X = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ q_1^{s1} \dots q_1^{s1} \ q_2^{s2} \dots q_2^{s2} \ q_3^{s3} \dots q_3^{s3}]^T$ 로 정의된다.

3. 최적화과정을 통한 경로설계

3.1 목적함수의 정의

선행연구¹²⁾로 부터 잔류진동의 크기는, 운동이 끝나는 순간의 조인트변위와 속도의 오차가 최소 이면서 동시에 각 조인트의 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.

$$J = \text{Max } p_e \quad (p_e = \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \text{ for } t \geq t_f) \quad (3)$$

위에서 정의된 목적함수는 운동방정식을 수치적분하여 구할 수 있으므로 최적화문제를 정의하기 위해서는 식 (2)의 운동방정식이 필요하다.

장애물에 대한 제한조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$g_k(s) = \psi_k(s) - l_k(\mathbf{r}) < 0 \quad k=1, 2, \dots, p \quad (4)$$

여기서 p 는 장애물의 개수, s 는 공간상에서 선단의 경로를 표시하는 매개변수이다. \mathbf{r} 은 공간의 차원을 나타내는 벡터로 3차원 공간상에서 $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 로 표현된다. $\psi_k(s)$ 는 매니퓰레이터 운동에 따른 선단경로로 통상 관성좌표계의 원점에서 로봇선단까지의 길이로 표시된다. $l_k(\mathbf{r})$ 은 고정 또는 이동장애물의 공간상에서의 위치를 표현한다.

3.2 경로의 함수전개

최적화과정을 통해 장애물과의 충돌을 회피하면서 잔류진동을 감소시키는 경로를 설계하기 위해서는 각 조인트의 경로를 함수전개할 필요가 있다. 일반적으로 이와 같은 목적에 사용되는 함수는 후리에급수(Fourier series)와 다항식이 있다. 다항식은 경계조건을 정확하게 만족시키는 반면, 계의 공진(resonance)을 유발시키는 고주파수 성분이 함수전개에 포함되게 된다. 또한 항을 계속해서 첨가해도 수렴성이 보장되지 않는 단점이 있다. 반면 후리에급수는 다항식과 정반대의 특성을 갖고 있다. 항의 첨가에 의해 수렴성이 보장되는 반면 경계조건을 만족시키지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이 두 함수를 결합시켜 서로의 장점만을 갖는 함수로 조인트경로를 전개하고자 한다.

먼저 조인트경로를 후리에 코사인급수를 사용하여 전개한다.

$$\theta_i(t) = a_{i0} + \sum_{m=1}^M a_{im} \cos \frac{m\pi}{t_f} t \quad (5)$$

위의 함수는 다음과 같은 단점이 있다.

(1) 수렴성은 $(0, t_f)$ 에서만 보장된다. 임의의 경계조건을 만족하기 위해서는 구간이 $(0, t_f)$ 에서 $[0, t_f]$ 으로 확장되어야 한다.

(2) $\theta_i(t)$ 가 최적해에 수렴해도 $\theta_i(t)$ 의 도함수들이 최적해의 도함수들에 수렴한다는 보장이 없다.

(3) 후리에급수의 수렴속도는 최적해에 따라 달라지는데, 위와 같이 전개할 경우 수렴속도가 상당히 느려질 가능성이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 조인트경로를 5차 다항식과 후리에급수가 결합된 형태로 전개한다.

$$\theta_i(t) = \lambda_i(t) + \sigma_i(t) \quad (6)$$

여기서

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

이다. 후리에급수의 상수항은 다항식에 포함되어졌다. 조인트의 변위, 속도, 가속도의 경계조건으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_i(0) &= \lambda_i(0) + \sigma_i(0) \\ \theta_i(t_f) &= \lambda_i(t_f) + \sigma_i(t_f) \\ \dot{\theta}_i(0) &= \dot{\lambda}_i(0) + \dot{\sigma}_i(0) \\ \dot{\theta}_i(t_f) &= \dot{\lambda}_i(t_f) + \dot{\sigma}_i(t_f) \\ \ddot{\theta}_i(0) &= \ddot{\lambda}_i(0) + \ddot{\sigma}_i(0) \\ \ddot{\theta}_i(t_f) &= \ddot{\lambda}_i(t_f) + \ddot{\sigma}_i(t_f) \end{aligned} \quad (7)$$

위의 관계식으로부터 6개의 다항식계수들을 후리에급수의 계수와 경계조건으로 표현할 수 있다. 즉 다항식의 계수는 아래와 같은 완전식으로 표현된다.

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}(a_{im}, \text{ boundary value of } \theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i) \quad (8)$$

위의 조건을 사용하면 설계변수의 수를 증가시키지 않으면서 후리에급수가 갖는 단점을 보완할 수 있다. 따라서 설계변수는 후리에급수의 계수 $a_{im}(m=1, 2, \dots, M)$ 이 된다.

설계변수 a_{im} 이 결정되면 조인트의 변위, 속도, 가속도는 식 (6)으로부터 구할 수 있다. 이를 강제운동에 대한 운동방정식에 대입하면 매니퓰레이터를 구동시키기 위한 각 조인트의 토크를 구할 수 있고, 구하여진 토크를 여유자유도, 탄성로봇의 운동방정식 (2)에 대입하여 수치적분하면 동응답을

언을 수 있다. 이 동응답결과로부터 식 (3)의 목적함수를 정의할 수 있다. 목적함수가 최적조건을 만족하지 않으면, 최적해가 구해질 때까지 최적화 프로그램을 수행하여 원하는 결과를 얻는다.

3.3 설계변수의 선택

일반적으로 후리에급수의 계수를 설계변수로 설정하는 경우 가장 낮은 차수에서부터 고려하는 최대항까지 순차적으로 모든 항들을 포함시킨다. 이러한 경우 잔류진동 감소에 거의 기여하지 않는 항들까지 불필요하게 포함되어지는 것을 피할 수 없다. 또한 항의 수가 증가할수록 계산시간이 많이 소요되고, 결과의 정확성도 감소하는 경향이 있다. 따라서 잔류진동 감소에 기여하는 계수만을 선정하여 설계변수로 설정하는 방법이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 상관계수 개념을 도입하여 이에 대한 방법을 제시한다.

선단의 오차 중 먼저 x 방향오차 x_e 와 m 번째 후리에 급수 $\sigma_m = \cos(m\pi t/t_f)$ 와의 상관계수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\rho_{x_e, \sigma_m} = \frac{S_{x_e \sigma_m}}{S_{x_e} S_{\sigma_m}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_d} x_e(k) \sigma_m(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_d} x_e^2(k) \sum_{k=1}^{N_d} \sigma_m^2(k)}} \quad (9)$$

마찬가지 방법으로 y 방향오차와 m 번째 조화함수와의 상관관계 ρ_{y_e, σ_m} 도 정의할 수 있다. 식 (9)에서 정의한 ρ_{x_e, σ_m} 의 값은 -1에서 +1 사이에 존재한다. 따라서 절댓값이 1에 가까우면 x_e 와 σ_m 사이의 상관관계가 높고, 따라서 σ_m 은 조인트의 후리에급수전개 시 설계변수로 포함되어져야 함을 의미한다. 반대로 절댓값이 0에 가까우면 σ_m 은 함수전개 시 배제되어야 함을 알 수 있다.

위에서 정의한 ρ_{x_e, σ_m} 은 신뢰도에 따라 각각 다른 허용구간을 갖는다.

$$\frac{\sqrt{N_d - 3}}{2} \left| \ln \left[\frac{1 + \rho_{x_e, \sigma_m}}{1 - \rho_{x_e, \sigma_m}} \right] \right| \geq z_{\alpha/2} \quad (10)$$

여기서 N_d 는 샘플링자료의 수이고, z 는 표준화된 정규분포 변수, α 는 신뢰도이다. 만약 ρ_{x_e, σ_m} 가 위에 정의한 부등식을 만족하면 x_e 와 σ_m 사이에는 α 의 신뢰도를 갖는 상관관계가 존재한다고 할 수 있다. 같은 이론을 ρ_{y_e, σ_m} 에 대해서도 적용할 수 있다.

따라서 식 (10)의 부등식을 만족하는 후리에급수의 계수만을 설계변수로 설정하면, 설계변수의 숫자를 크게 줄일 수 있고, 따라서 계산시간을 단축하고 최적해에의 수렴성을 증가시킬 수 있다.

4. 결과 및 고찰

여유자유도, 탄성로봇 매니퓰레이터의 동응답을 구하기 위해 사용된 모델계수는 다음과 같다. 먼저 각 링크는 길이 1(m)의 사각형 알루미늄으로 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 조인트의 스프링상수는 2(kN·m/rad)를 갖는 등가의 비틀림스프링으로 모델링하였다. 각 링크에서 보의 유연성을 표현하기 위해 사용된 모드의 수는 3개이다. 매니퓰레이터의 운동시간은 1(sec)로 하였다. 매니퓰레이터는 $\theta_{10} = -90^\circ$, $\theta_{20} = 0^\circ$, $\theta_{30} = -90^\circ$ 위치에서 운동을 시작하여 $\theta_{1f} = 0^\circ$, $\theta_{2f} = -45^\circ$, $\theta_{3f} = -45^\circ$ 에서 운동을 끝내도록 하였다.

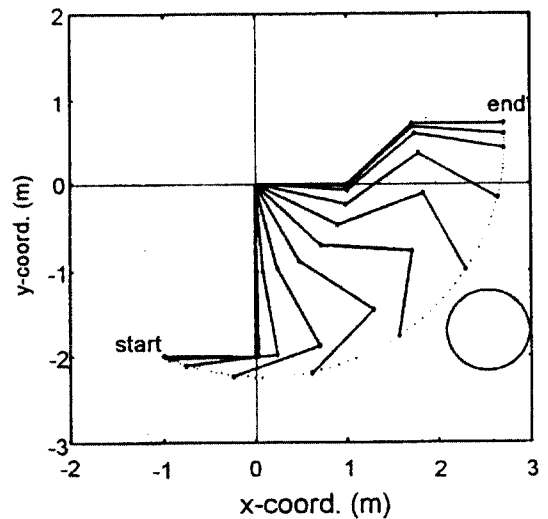
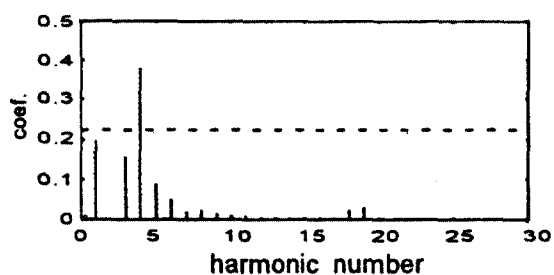
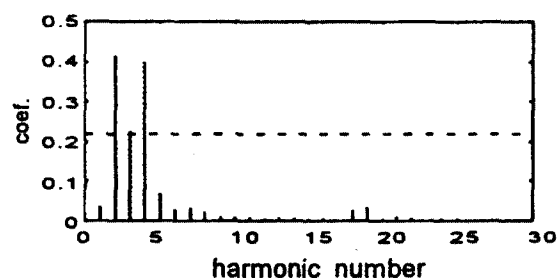


Fig. 2 Arm motion and tip path for cycloidal motion

동응답을 구하기 위해 먼저 선단의 운동을 사이클로이드(cycloid)함수로 전개한다. 이에 대한 선단 및 각 링크의 운동은 Fig. 2에 나타내었다. 사이클로이드함수는 캠형상설계에 사용되어지는 가장 부드러운 곡선중의 하나로 알려져 있다. 링크를 구동하기 위한 각 조인트에서의 토크는 역동역학에 의해 구할 수 있고, 구하여진 토크를 운동방정식에 대입하면 동응답을 구할 수 있다. 동응답



(a) Correlation coefficients for x-position error



(b) Correlation coefficients for y-position error

Fig. 3 Correlation coefficients of tip position error for cycloidal motion

의 결과는 4장 후반부에서 최적설계 결과와 비교하여 검토한다.

구하여진 동응답으로부터 선단의 x , y 방향의 위치오차를 구할 수 있다. 잔류진동은 운동이 끝난 후의 x , y 방향의 위치오차로 구성된다. 각 방향의 위치오차와 후리에급수의 조화함수 사이의 상관관계는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 데이터의 수가 100개이면 신뢰도 $\alpha=0.01$ 에서 식 (10)을 만족하기 위한 상관계수는 0.22 이상이다. Fig. 3에서 보듯이 x 방향 위치오차에서 위 관계를 만족하는 조화함수는 4번째 조화함수 뿐이고, y 방향 위치오차에서는 2,3,4번째 조화함수에 대한 상관계수가 0.22 이상임을 알 수 있다. 이들 조화함수의 주파수는 매니퓰레이터 운동에 따른 첫 번째 고유진동수의 변화에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 경로의 최적설계시 각 조인트의 경로를 단지 2,3,4번째 조화함수와 다항식이 결합된 형태의 함수로 전개할 수 있다.

경로를 함수전개하였으므로 충돌회피 및 잔류진동을 감소시키는 경로를 최적설계할 수 있다. 초기경로는 사이클로이드 함수로 설정하였다. 계산에 사용된 알고리즘은 PCON알고리즘으로, 이는 Powell의 직접탐색, 공액방향 방법(direct search-conjugate direction method)과 SUMT 알고리즘을 조합시킨 알고리즘이다. 장애물의 개수는 1개의

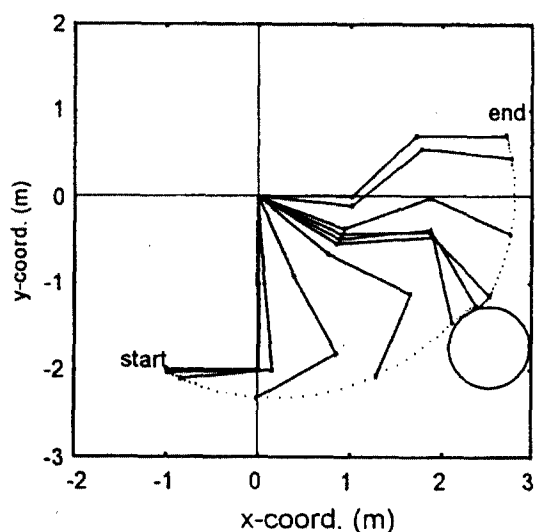


Fig. 4 Arm motion and tip path for optimized motion with obstacles

고정장애물로 설정하였으며 이에 대한 공간상에서의 식은 $\ell(x,y)=(x-2.6)^2+(y+1.7)^2-2.6^2$ 으로 표현하였다. 최적설계를 통해 구한 경로는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 Fig. 4는 경로 상에 장애물이 존재하는 경우, Fig. 5는 장애물이 존재하지 않는 경우의 선단 및 링크의 경로이다. 그리고 사이클로이드 경로, 장애물을 회피하면서 잔류진동을 감소시킨 경로, 잔류진동의 크기만을 감소시킨 경로를 각각 운동방정식에 대입하여 구한 동응답은 Fig. 6에 나타내었다.

먼저 Fig. 3의 사이클로이드 경로와 Fig. 5의 장애물이 존재하지 않는 경로를 비교해 보면, 잔류진동을 감소시키기 위해 로봇선단이 원점으로부터 더 멀리 회전하는 것을 볼 수 있다. 선단이 원점에서 멀리 회전한다는 것은 세 번째 링크가 두 번째 링크에 대해 좀 더 바깥쪽으로 굽어지는 운동을 하는 것을 의미한다. 즉 최종위치에 접근할수록 최적경로에서의 두 번째 링크와 세 번째 링크 사이의 조인트각도 θ_3 가 사이클로이드경로에 비해 더 빨리 최종위치에서의 조인트각도에 가까워진 것을 볼 수 있다. 이는 미리 대부분의 운동을 완성하고, 빠른 운동에 의해 발생한 위치오차를 보상하면서 선단이 원하는 최종위치로 접근하는 운동을 나타낸다. 장애물이 존재하는 경우의 경로에서도 이를 확인할 수 있다. Fig. 4에서 보듯이 잔류진동을 감소시키기 위해 선단은 원점으로부터 멀리 회전하려 하지만, 경로 상에 장애물이 존재하므로 원점에 가깝게 접근하여 장애물을 회피한 다음, 다시 원점으로부터 멀리 회전하는 것을 볼 수 있다.

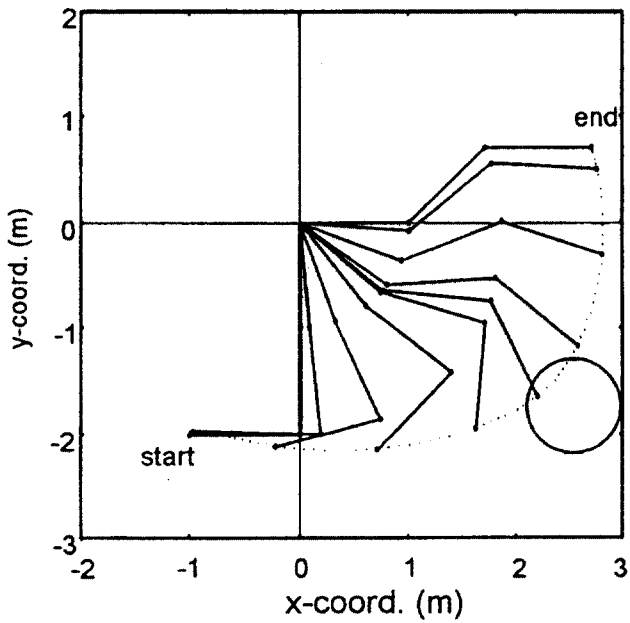
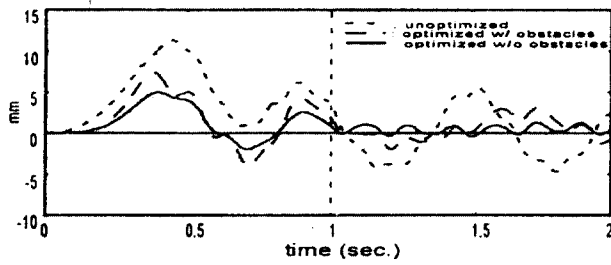
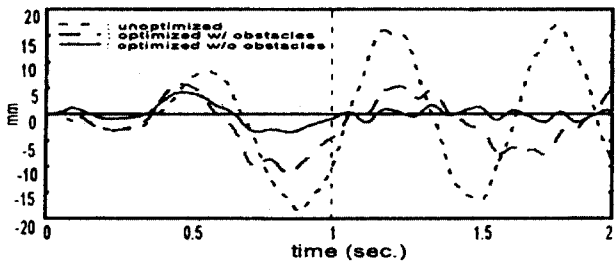


Fig. 5 Arm motion and tip path for optimized motion without obstacles



(a) x-position error



(b) y-position error

Fig. 6 Tip position errors and residual vibration

잔류진동의 크기는 Fig. 6에서 비교할 수 있다. 사이클로이드 경로를 사용하는 경우 x방향의 잔류진동의 최대크기는 5.63(mm)이다. 이에 비해 장애물이 존재하는 경우의 최적경로를 사용하는 경우는 최대크기가 3.15(mm)로 44.1%가 감소되었고, 장애물이 존재하지 않는 경우는 1.26(mm)로 77.6% 감소되었다. y방향은 감소폭이 더 커서 사이클로이드 경로인 경우 최대크기가 17.01(mm)인 반면, 장애물이 존재하는 경우는 7.64(mm)로

55.1%가 감소하였고, 장애물이 존재하지 않는 경우는 1.76(mm)로 89.7%가 감소하였다. 또한 장애물이 없는 경우의 잔류진동 구간에서의 오차의 형태를 보면 첫 번째 고유진동수 성분이 거의 사라지고, 두 번째 고유진동수 성분이 주요하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 조인트경로의 후리에급수 전개시 첫 번째 고유진동수 성분을 첨가시킴으로써, 이 주파수에 의한 진동발생을 상쇄하도록 작용했기 때문이라 생각된다.

5. 결 론

여유자유도, 탄성로봇에 대해 장애물과의 충돌을 회피하면서 잔류진동의 크기를 현저하게 감소시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 경로를 후리에 급수와 다항식이 결합된 형태로 전개하고, 후리에급수의 계수를 설계변수로 선택하여, 잔류진동의 최대크기를 감소시키도록 최적설계함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있었다. 링크와 조인트의 수가 부가적으로 증가하는 여유자유도, 탄성로봇 매니퓰레이터의 모델링 시 VLCS를 물체고정좌표계로 사용하면 계산이 간편해지고 계산시간이 단축되는 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 경로를 다항식과 후리에급수의 결합된 형태로 전개하면 경계조건을 만족하면서도, 항의 첨가에 의해 수렴성이 보장되는 조건을 동시에 만족할 수 있음을 확인하였다.

제안된 방법을 평면상에서 움직이는 3-링크 여유자유도 로봇에 적용하여 타당성을 검토하였다. 계산결과로부터 고정된 운동시간 내에서 선단경로가 이동하는 총 길이가 길수록 잔류진동 감소에 효과적임을 보였다. 장애물이 존재하는 경우에도 사이클로이드 경로에 비해 잔류진동을 크게 감소시키면서, 동시에 장애물과의 충돌을 회피할 수 있는 경로가 존재함을 보였다. 이상의 결과로부터 여유자유도, 탄성로봇의 운동 시 시작점과 끝점 사이에서 적절한 경로를 선택하면, 부가적인 제어기의 부착없이 장애물과의 충돌을 회피하면서도 잔류진동의 크기를 허용범위 이내로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구 지원 프로그램에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. R. F. Anthony and W. D. Ron, "Perturbation Techniques for Flexible Manipulator", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991
2. W. J. Book, "Controlled Motion in an Elastic World", ASME J. DSMC, Vol. 115, pp. 252~261, 1993
3. V. V. Karolov and Y. H. Chen, "Controller Design Robust to Frequency Variation in a One-Link Flexible Robot Arm", ASME J. DSMC, Vol. 111, pp. 9~14, 1989
4. P. Meckl and W. Seering, "Active Damping in a Three-axis Robotic Manipulator", ASME J. Vib., Acou., Stress and Relia. in Design, Vol. 107, pp. 38~46, 1985
5. 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
6. 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
7. I. Yamada and M. Nakagawa, "Reduction of Residual Vibration in Position Control Mechanisms", ASME J. Vib., Acou., Stress and Relia. in Design, Vol. 107, pp. 47~52, 1985
8. T. L. Vincent, S. P. Joshi and C. L. Yeong, "Positioning and Active Damping of Spring-Mass Systems", ASME J. DSMC, Vol. 111, pp. 592~599, 1989
9. S. Jayasuriya and S. Choura, "On the Finite Settling Time and Residual Vibration Control of Flexible Robot Arm", J. Sound and Vibration, Vol. 148, pp. 117~136, 1991
10. O. William and L. Donogh, "Position Control of Flexible Robot Arms Using Mechanical Waves", ASME J. DSMC, Vol. 120, pp. 334~339, 1998
11. H. Asada, Z. D. Ma and H. Tokumaru, "Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms: Modeling and Computation for Trajectory Control", ASME J. DSMC, Vol. 112, pp. 177~185, 1990
12. K. J. Park and Y. S. Park, "Fourier-based Optimal Design of a Flexible Manipulator Path to Reduce Residual Vibration of the Endpoint", Robotica, Vol.11, pp. 263~272, 1993
13. 박 경조, 박 윤식, "토크 제한하에서의 잔류진동 감소를 위한 로봇 경로설계", 대한기계학회 논문집, 제17권, 3호, pp. 2437~2445, 1993
14. C. Chevallereau, "Feasible Trajectories in a Task Space from a Singularity for a Non-redundant or Redundant Robot Manipulator", Intl. J. Robotics Research, Vol. 17, No. 1, pp. 56~69, 1998
15. M. Galiki, "The Planning of Robotic Optimal Motions in the Presence of Obstacles", Intl. J. Robotics Research, Vol. 17, No. 3, pp. 248~256, 1998
16. P. E. Dupont and S. Derby, "Two-Phase Path Planning for Robotics with Six or More Joints", ASME J. Mech. Design, Vol. 112, pp. 50~58, 1990
17. 박 경조, "여유자유도 탄성로봇팔 운동의 동적해석", 여수대학교 논문집 제 11권, 2호, pp. 35~43, 1998