

## 스카라 로봇에 대한 순응성 제어에 관한 연구

이 양희, 도미선, 김승우, 박민용, 이상배  
연세대학교 전자공학과

## A Study on Compliance Control of a SCARA Robot

Yanghee Yee, Misun Do, Sungwoo Kim, Mignon Park, Sangbae Lee  
Dept. of Electronics, Yonsei University

## ABSTRACT

In this paper, compliant motion control of a manipulator in manipulator is proposed by using the self-tuning adaptive controller. Compliant motion is needed in order to applicated to complicated and accurate fields such as assembly operation in which several parts are matched.

For a control method of compliant motion hybrid control is used so forces and position control are proposed selectively through a closed feedback loop.

By contacting with environment, the uncertainties higher. Self-tuning controller which adapts to variable dynamic response is applied to compliant motion control in order to satisfy the desired operation.

The applicability of the suggested algorithm was confirmed by simulation of the contour tracking task of four joint manipulator.

## 1. 서론

현재 여러 산업 분야에서 매니플레이터(manipulator)가 보통 순수한 위치 제어로서 수행할 수 있는 단순, 반복 작업에 많이 사용되고 있으나 점차 조립 작업과 같은 복잡, 정밀한 작업을 수행하기 위한 요구가 증가하고 있다. 따라서 원하는 작업을 실현시킬 목적이라는 대상물이나 작업 수행 도중 충돌하게 되는 장애물 등 환경과 접촉하는 경우에 대한 순응 제어가 필요하다.

순응 운동(compliant motion)은 매니플레이터와 환경 사이에 연속적인 접촉이 있고 원하는 작업(task)을 실행하는 동안 종단 효과 장치(end-effector)의 궤적이 접촉힘에 의해 수정되는 매니플레이션 작업을 말한다.

외부힘에 의한 로봇의 파라미터가 더욱 불확실해지므로, 작업 공경 임 출력을 온 라인(on-line)으로 측정하여 얻어지는 정보로 제어기의 매개 변수를 최적으로 동조되도록 하던 변화하는 동적 특성에 대응하는 적응 제어기를 얻을 수 있다.

본 논문은 free-joint 방법과 하이브리드 힘 위치 제어 방법을 이용한 순응 운동 제어를 행하고, 매니플레이터의 온 라인 측정으로부터 매개 변수 값을 추정하여, PID 제어기의 매개 변수 값을 계산하는 극점 배치 자기 동조기(pole-placement self-tuner)를 갖는 시스템을 설계한다.

## 2. 순응운동 제어

## 2.1 순응 운동 제어

매니플레이터의 운동이 접촉면으로 인하여 부분적으로 제한받는 경우에 대한 제어 구성에 중점을 둔다. 매니플레이터의 종단 효과 장치와 작업 환경이 접촉함으로써 정의되는 부작업은 작업 형상의 기하학적 특성으로 인해 제한 조건을 갖는다.

위치[속도] 제어 방향과 힘 제어 방향으로 제어 수행을 분리하는 하이브리드 제어를 사용하여, 종단 효과 장치의 운동의 자유도는 두 방향으로 나뉘어 서로 다른 기준에 의해 제어된다. 이 두 방향은 흔히 직각이고 상호 보충적으로 순응성 작업계를 구성한다.

원하는 작업을 수행하기 위해 위치나 힘의 원하는 궤적을 정할 때마다 인위적 제한이 정의된다. 이는 자연적 제한과 일관성을 유지하면서 제한 평면의 수평 방향과 수직 방향으로 주어진다. 부분적으로 구성된 환경에서 순응성 운동 작업을 규정하기 위해서, 먼저 작업계를 설정하고 여기에서 위치와 힘 제어 방향을 정의한 후 실행시키려 하는 위치 목표와 힘 목표를 설정한다.

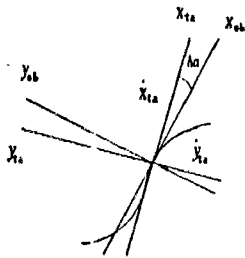
작업계(task frame)는 미리 알려져있는 다른 계에 대해 고정되어 있지 않고, 접촉점마다 자신의 궤적을 갖는 동적계(dynamic frame)이다. 매니플레이터가 이동하면서 변하는 접촉 환경으로 인해 구성되는 작업계로 나타내고, 두 계의 차를 구하여 오차를 보상하도록 작업계의 궤적을 발생시켜야 한다. 이는 두 계의 공통 축으로 추적 방향을 정의함으로써 가능하다. (그림 2-1)의 접촉점에서 추적 방향은 Z축으로의 회전 방향으로 오차는  $\Delta\alpha$ 이다.

$$\Delta\alpha = -\tan^{-1}\left[\frac{V_{yt}}{V_{xt}}\right] \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\Delta\alpha) & \sin(\Delta\alpha) & 0 \\ -\sin(\Delta\alpha) & \cos(\Delta\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

(그림 2-1)에 접촉점에서의 추적 방향과 오차를 나타낸다. 작업을 실행하려면 작업계를 선택하고 힘 제어 방향과

위치 제어 방향, 추적 방향을 정의한 후 원하는 순응 운동이 진행되도록 제어기를 선택한다. 제어기는 각 샘플링 순간마다 그 순간의 작업계에 대해 각 축의 속도를 적절히 발생해야하고 작업계에서 실행되는 속도가 작업계 궤적을 발생한다.



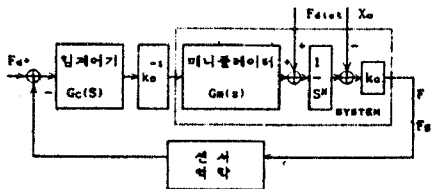
$x_{1a}(v_d)$ : 속도 제어 방향  $y_{1a}(f_d)$ : 힘 제어 방향  
 $\alpha_{z1a}(\Delta A)$ : 추적 방향

그림 2-1 추적 방향과 오차

2.2 힘 제어 방향의 제어

(그림 2-2)는 힘 제어 축의 일반적 구조이다. 프로세스의 특성  $G_m(s)$ 는 매니플레이터 시스템을 나타내고,  $k_0$ 는 강성이다.

$$F = k_0(x-x_0) \quad (2.3)$$



$F_d$ : 원하는 힘  $F$ : 실제 힘  
 $F_s$ : 힘 센서에서 측정된 접촉힘

그림 2-2 일반적인 능동 힘 제어의 구조

매니플레이터 시스템을 위치 제어로 행하면  $N=0$ 이고,  $G_m(s)$ 는 2차 시스템으로 표현된다. 흔히  $F_d$ 는 상수값이다. 힘 제어기는  $k_0$ 에 무관하도록 순응성  $k_0^{-1}$ 을 이득으로 한다.  $F_{dist}$ 를 무시하면 (그림 2-2)의 페루프 특성은 다음과 같다.

$$\frac{F(s)}{F_d(s)} = \frac{G_c(s) G_m(s)}{s^N + G_c(s) G_m(s)} \quad (2.4)$$

정상 상태 오차는

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{G_c(s)}{s^N + G_c(s)} \quad (2.5)$$

이다.

추적 방향에서 제어되는 것은 추적 오차로 이를 보상하는데 위치 제어가 행해진다. (그림 2-2)에서

$$F = \Delta X, F_s = \Delta X_s, k_0 = 1, k_0^{-1} = 1 \quad (2-6)$$

인 경우이다. (그림 2-3)에 작업계의 각 방향에서 순응 운동의 제어 법칙을 보인다.

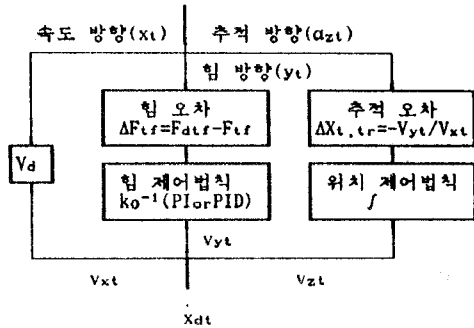


그림 2-3 순응 운동의 제어 흐름도

3. 자기 동조 순응 제어

대부분의 제어 시스템의 설계 방식은 전통적인 PID 제어기로, 각 관절에서 동적 응답을 제어하는 관절 서보 기술이다. 관절 제어를 설계하여 하이브리드 제어를 하려면 위치 제어와 힘 제어가 관절에서 결합됨에 따라 어려움이 따른다. 또한 이에 따라 위치 제어와 힘 제어 사이의 상충(trade-off)이 일어난다.

작업계에서는 위치 제어 속과 힘 제어 속이 수직하므로, 위치와 힘은 독립적으로 제어될 수 있다. 따라서 작업 좌표 시스템에서 제어 알고리즘을 구현한다.

시스템 매개 변수를 추정하기 위해 온 라인 인식 (identification)을 사용하여 적절한 규환 법칙을 설계하는 제어 방식인 자기 동조 제어를 사용한다.

매니플레이터의 차수는 2차이고 선형 시변 모델이라 가

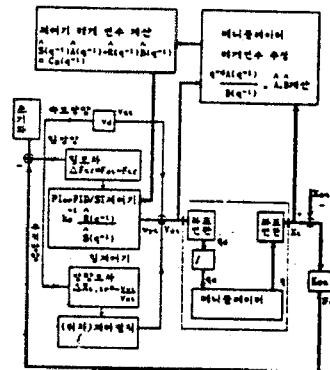


그림 3-1 매개 변수 적응 제어기를 이용한 다차원 순응 운동 제어

정한다. 관절 사이에 상호작용이 작다고 가정하면 ARMA 모델에서 결합항은 제거되고 각 관절은 다른 관절에 독립적으로 제어될 수 있다.

PI(PID) self-tuning 제어에 관한 보다 자세한 내용은 전자공학회 추계자동학술회의 논문집('89)를 참고하기 바란다.

4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 이용된 로봇은 대표적인 스카라 로봇인 Adept I를 사용하였다. (그림 4-1)은 시뮬레이션에 사용된 작업 모델이다.

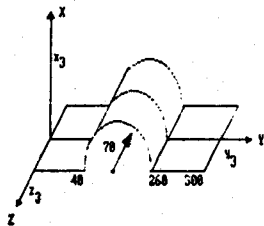


그림 4-1 작업 모델

이 로봇의 기구학은 다음과 같은 동차 변환 행렬로 표현된다. 미소 변환 행렬은 자코비안 J와 역 자코비안 J<sup>-1</sup>로 다음과 같다.

$$T_4 = \begin{bmatrix} C_{123} & S_{123} & 0 & 375C_{12} + 425C_1 \\ S_{123} & -C_{123} & 0 & 375S_{12} + 425S_1 \\ 0 & 0 & -1 & 1110 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$J = \begin{bmatrix} a_1S_{23} + a_2S_3 & a_2S_3 & 0 \\ -a_1C_{23} - a_2C_3 & -a_2C_3 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

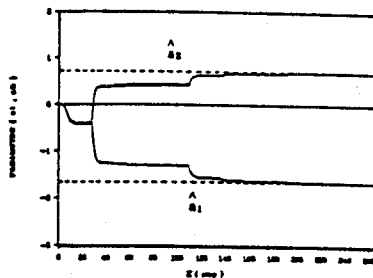
$$J^{-1} = \frac{1}{a_1a_2S_3} \begin{bmatrix} a_1S_{23} + a_2S_3 & a_2S_3 & 0 \\ -a_1C_{23} - a_2C_3 & -a_2C_3 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

시뮬레이션은 32비트 워 스테이션 이용하여 샘플링 구간 0.056으로 수행하였다. 매니퓰레이터를 2차 시스템으로 나타낸다. 감쇠비가 0.75, 고유 주파수가 11 rad/sec이고 매개 변수의 온 라인 추정시 샘플 간격 계산 지연 d = 1인 매니퓰레이터의 ARMA 모델은 다음과 같이 설정한다.

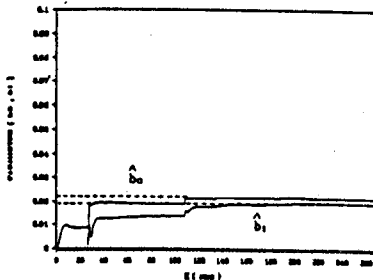
$$y(t) = 1.677y(t-1) - 0.720y(t-2) + 0.022u(t-1) + 0.019u(t-2) + \zeta(t) \quad (4.4)$$

여기서  $\zeta(t)$ 는 평균이 0 이고 표준 편차가 0.005인 잡음이 다.

식(4.4)과 같은 매니퓰레이터의 입 출력 값으로부터 추정된 매개 변수는 순환 최소 자승 알고리즘을 이용하여 각 접속점에서 갱신된다.



(a) 매개 변수 a1과 a2의 추정



(b) 매개 변수 b0와 b1의 추정

그림 4-2 매니퓰레이터 시스템 인식

(그림 4-2)는 식(4.4)의 매개 변수 추정 결과이다. (그림 4-3)은 추정된 파라미터로 구성된 자기 동조 제어기의 PI 제어기의 값이다. (그림 4-4)는 k<sub>o</sub> = 3(N/mm) 일 때

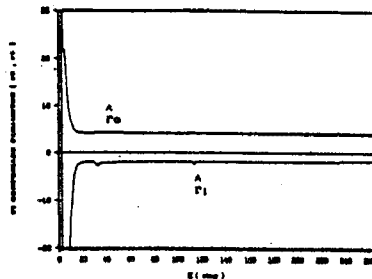


그림 4-3 제어기 매개 변수

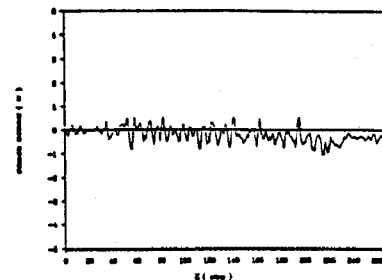


그림 4-4 힘 오차

힘 오차를 나타내고, (그림 4-5)는 관절 공간에서의 운동을 나타낸다. (그림 4-6)은 x축과 y축에서의 출력 궤적 값이다. (a)는 힘 제어방향에서의 매니플레이터의 운동 궤적이고, (b)는 속도 제어 방향에서의 운동 궤적이다.

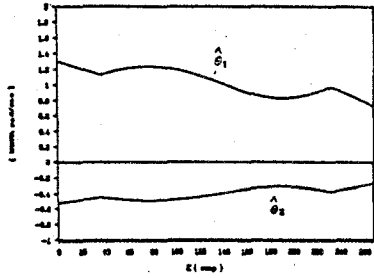
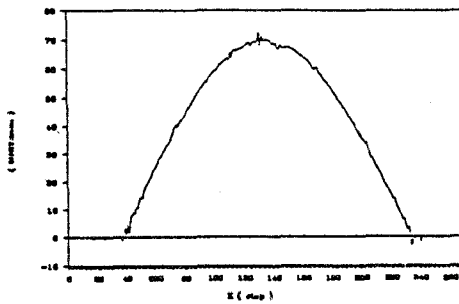
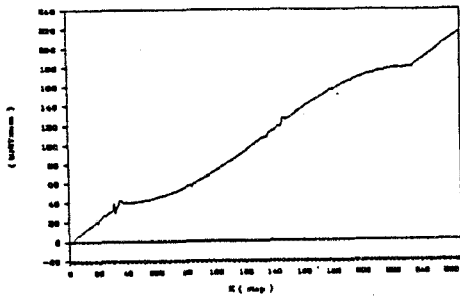


그림 4-5 관절 공간 궤적



(a) x축 운동 궤적



(b) y축 운동 궤적

그림 4-6 출력 궤적

5. 결론

순응 제어는 매니플레이터가 환경과 접촉하는 힘을 적절히 이용하여 힘 제어를 함으로써 원하는 작업을 수행하고, 적응 제어는 이러한 힘에 의하여 생기는 로봇트의 비선형성을 이 알고리즘을 통해 로봇트를 제어하도록 한다. 본 연구는 이 두 가지 알고리즘을 적절히 통합 하고 작업 모델을 세워 시뮬레이션을 통해 적용하여 타당성을 확인하였다.

작업 환경과 연속적인 접촉을 가질 때 매니플레이터의 종단 효과 장치에서 받는 힘을 감지하여, 이 접촉힘에 의해 직선과 반원으로 구성된 작업체를 모델링하고, 작업의

힘 제어와 위치 제어가 매니플레이터 주위에 외부 루프를 갖고, 외부로부터 받는 힘을 원하는 값으로 유지하면서 궤적을 추적하는 하이브리드 순응 제어 방식을 적용하였다.

작업 부딪끼리 서로 접촉하고 있는 상태에서 맞추어야 하는 접촉힘을 받는 조립 작업 등의 정밀한 작업 수행에 이러한 하이브리드 방식이 유효하게 사용될수 있을 것이다.

적응 제어는 매니플레이터의 동적 특성에 대한 비선형성 및 정보 부족, 또는 변화로 매개 변수 값을 정확히 알지 못하는 불확실한 매니플레이터 모델에 적합한 제어 알고리즘이다. 다만 연산 속도와 수렴성 및 수렴 속도가 문제점이다.

이러한 연구 결과를 실제 적용하는 것을 연구 과제로 남겨둔다.

6. 참고 문헌

- [1] M. Vukobratovic, Scientific Fundamentals of Robotics, New York : Springer, 1985.
- [2] M.T.Mason, " Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., Vol. SMC-11, No.6, pp.418-432, 1981.
- [3] J. De Schutter and H. Van Brussel, " Compliant Robot Motion II: A Control Approach Based on External Control loops", Int. J. Robotics Res., Vol.7, No.4, pp.8-33, 1988.
- [4] 김 승우, "PID 적응 제어를 이용한 컴플라이언스 로봇트에 대한 연구", 연세대학원 전자공학과, 1989.
- [5] A.J.Koivo and T.H. Guo, " Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-28, No.2, pp.162 - 171, 1983.
- [6] J.K.Salisbury, " Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates", 19th IEEE Conf. on Decision and Control, Albuquerque, N.M., 1980.
- [7] 도 미선, " 매개변수 적응 제어를 이용한 매니플레이터의 순응성 제어에 관한 연구", 연세대학교 전자공학과, 1990.