

이 남구° 박 세승 박 중국

경희대학교 공과대학 전자공학과

Motion and Force Control of Robot Manipulator

Lee, Nam Gu° Park, Sei Seung Park, Chong Kug

Department of Electronic Engineering

Kyung Hee University

Abstract

In this paper, we present a unified approach for the control of manipulator motions and active forces based on the operational space formulation. The end-effector dynamic model is used in the development of a control system in which the generalized operational space end-effector forces are selected as the command vector. A "generalized position and force specification matrix" is used for the specification of space of motions and forces in which manipulator is to be controlled. Flexibility in the force sensor, end-effector, and environment are discussed.

1. 서 론

일반적으로 로봇 시스템의 능력은 주로 말단효과장치의 운동과 힘의 동시 제어가능성에 의존한다[1-7]. 최근까지의 연구들은 위치 제어만을 다루었지만 물체와 접촉을 하는 작업에 있어서는 힘 제어가 필요하다. 위치 제어만을 할 경우, 위치 오차로 인해 물체와 접촉을 안 하는 경우와 물체에 과도한 압력이 가해지는 경우가 발생하게 된다. 힘 제어에 대한 많은 연구가 있었으며[8-9], 대부분의 방법들은 일반적으로 관절공간 제어 시스템의 구성 내에서 발전되어 왔다. 반면, 본 논문에서는 동작공간에서 제어 시스템을 설계하였다. 작업들은 일반적으로 말단효과장치의 운동과 접촉력의 형태로 나타내어진다. 동작공간 정식화는 운동과 힘 제어의 혼합을 위한 효율적이고 본질적인 방법이며 말단효과장치의 동력학적 움직임을 포

현하는 데 효과적이다.

본 논문에서는 매니퓰레이터 동력학 방정식을 동작공간에서 정식화하고 센서의 유연성으로 인한 효과는 간단한 질량/스프링 시스템 모델을 사용함으로써 해석한다.

2. 동작공간 정식화

동작좌표 시스템은 기준축  $R_0$ 에서 말단효과장치의 위치와 방향을 나타내는  $n$ 개의 독립적인 말단효과장치 형상 파라미터들의 집합  $X$ 로 구성된다. 동작공간에서의 말단효과장치의 운동방정식은 다음과 같이 나타내어진다[10].

$$\Lambda(x)\ddot{x} + \mu(x, \dot{x}) + P(x) = F \quad (1)$$

여기서  $\Lambda(x)$ 는 운동에너지 행렬을 나타내고  $\mu(x, \dot{x})$ 는 말단효과장치의 코리올리스 및 원심력 벡터를 나타낸다.  $P(x)$ 와  $F$ 는 각각 중력 및 일반화된 동작힘 벡터를 표현한다. 관절공간에서의 매니퓰레이터 운동방정식은 다음 형태로 나타내어진다.

$$A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) + g(q) = \Gamma \quad (2)$$

여기서  $b(q, \dot{q})$ ,  $g(q)$ ,  $\Gamma$ 는 각각 관절공간에서의 코리올리스 및 원심력, 중력, 일반화된 힘을 나타내며  $A(q)$ 는  $n \times n$  관절공간 운동에너지 행렬을 표현하고 다음식처럼  $\Lambda(x)$ 와 관련된다[1].

$$A(q) = J^T(q)\Lambda(x)J(q) \quad (3)$$

여기에서,  $x = G(q)$ 일때  $G$ 는 전향 기구학을 나타내며

$$\partial G_i(q)$$

$$J(q) = \frac{\partial G_i(q)}{\partial q_i} \text{로 주어진다.}$$

$$\partial q_i$$

### 3. 말단효과장치 운동 제어

동작공간에서의 매니플레이터의 제어는 명령벡터로서 F의 선택에 기초한다. 이 명령벡터를 구하기 위해 관절 역추레이터에서 가해주어야 할 힘  $\Gamma$ 를 규정한다. n관절 좌표 벡터를 표현하는 q와 자코비안 행렬 J(q)를 이용하면 F와 일반좌표 관절힘  $\Gamma$ 사이의 관계식은 다음처럼 주어진다.

$$\Gamma = J^T(q)F \quad (4)$$

운동시 매니플레이터의 말단효과장치는 관성결합, 원심력 및 코리올리스 힘들의 영향을 받는다. 이런 힘들은 동작공간에서 동력학 분리에 의해 보상되어질 수 있다. 말단효과장치의 동력학 분리와 운동 제어를 위한 동작 명령벡터는

$$F = F_m + F_{ccg} \quad (5)$$

이며, 여기서

$$F_m = \Lambda(x)F_m^0$$

$$F_{ccg} = \mu(x, \dot{x}) + P(x) \quad (6)$$

$F_m^0$ 는 분리된 말단효과장치의 명령벡터이다. 식(4)를 이용하여 식(5)의 동작 명령벡터 F에 대응하는 관절힘은 다음처럼 표현된다.

$$\Gamma = J^T(q)\Lambda(q)F_m^0 + \bar{b}(q, \dot{q}) + g(q) \quad (7)$$

여기서  $\bar{b}(q, \dot{q})$ 는 말단효과장치 코리올리스 및 원심력 벡터  $\mu(x, \dot{x})$ 의 관절공간으로의 변환하에서 관절 힘벡터이다. 기호를 간단히 하기위해서  $\Lambda$ 는 관절 좌표벡터 q의 함수로 이런 벡터들은 다음처럼 관계되어진다.

$$\bar{b}(q, \dot{q}) = b(q, \dot{q}) - J^T(q)\Lambda(q)h(q, \dot{q}) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } h(q, \dot{q}) = \dot{J}(q)\dot{q} \quad (9)$$

실시간 제어와 동력학 해석을 위한  $\bar{b}(q, \dot{q})$ 의 유용한 형태는 다음과 같다.

$$\bar{b}(q, \dot{q}) = B(q)[\dot{q}\dot{q}] + C(q)[\dot{q}^2] \quad (10)$$

여기서 B(q)와 C(q)는 말단효과장치 코리올리스 및 원심력의 관절공간으로의 변환하에서  $n \times n(n-1)/2$  및  $n \times n$  관성행렬이다.

$[\dot{q}\dot{q}]$ 와  $[\dot{q}^2]$ 는  $n(n-1)/2 \times 1$  및  $n \times 1$  열행렬

$$[\dot{q}\dot{q}] = [\dot{q}_1\dot{q}_2, \dot{q}_1\dot{q}_3, \dots, \dot{q}_{n-2}\dot{q}_n, \dot{q}_{n-1}\dot{q}_n]^T$$

$$[\dot{q}^2] = [\dot{q}_1^2, \dot{q}_2^2, \dots, \dot{q}_n^2]^T \quad (11)$$

를 위한 상징적 기호이다. 식(10)을 이용하여 말단효과장치의 동력학 분리는 항상 종속 동력학 계수  $\Lambda(q), B(q),$

$C(q), g(q)$ 를 이용하여 얻을 수 있다.

### 4. 힘 제어

작업은 일반적으로 말단효과장치의 운동과 가해진 힘/토크의 형태로 주어진다. 기준축  $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ 에서  $f_d$ 와  $\tau_d$ 를 말단효과장치에 의해 가해지는 힘과 토크라고 가정한다. 말단효과장치의 위치는  $f_d$ 에 수직인 부평면에서 규정된 운동을 통해 제어되어질 수 있다.

$R_f(0, x_f, y_f, z_f)$ 는  $z_f$ 를  $f_d$ 와 일치시키는 회전변환 행렬  $S_f$ 에 의해  $R_0$ 로부터 얻어지는 기준축이라고 가정한다.  $R_f$ 에서 위치 제어의 부평면은  $\{x_f, y_f\}$ 에 의해 결정된다.  $\{x_f, y_f\}$ 에서의 위치 제어 및  $z_f$ 방향으로의 힘 제어형태로 규정된 작업에서 작업 선택 행렬은 다음과 같다.

$$\Sigma_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

유사하게  $R_r(0, x_r, y_r, z_r)$ 는  $z_r$ 를 작업토크 벡터  $\tau_d$ 와 같은 방향으로 향하게 하는 회전행렬  $S_r$ 에 의해  $R_0(0, x_0, y_0, z_0)$ 로부터 얻어지는 기준축이라고 한다.  $R_r$ 에서 표현된 회전작업 및 가해진 토크에 관계되는 작업 선택 행렬은  $\Sigma_f$ 와 동일하다. 결과적으로 기준축  $R_0$ 에서 표현된 말단효과장치의 위치(위치와 방향)와 가해진 힘(힘과 토크)의 일반적인 작업을 위한 일반화된 위치와 힘 선택행렬은 다음과 같다.

$$\Omega = \begin{bmatrix} S_f^T \Sigma_f S_f & 0 \\ 0 & S_r^T \Sigma_r S_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\Omega$ 를 사용하여 말단효과장치의 동력학 분리, 운동 및 힘 제어를 위한 동작 명령벡터는 다음처럼 표현된다.

$$F = F_m + F_a + F_{ccg} \quad (14)$$

여기서  $F_m, F_a$ 는 운동 및 힘 제어의 동작 명령벡터이며 다음과 같다.

$$F_m = \Lambda(q)\Omega F_m^0$$

$$F_a = \bar{\Omega} F_a^0 \quad (15)$$

여기서 행렬  $\bar{\Omega}$ 는

$$\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} S_f^T \bar{\Sigma}_f S_f & 0 \\ 0 & S_r^T \bar{\Sigma}_r S_r \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_f &= I - \Sigma_f \\ \Sigma_v &= I - \Sigma_v \end{aligned} \quad (17)$$

로 주어진다. 식(14)의 F에 대응하는 관절힘 벡터는 다음과 같다.

$$\Gamma = J^T(q)[\Lambda(q)\Omega F_m^0 + \bar{D} F_m^0] + \bar{b}(q, \dot{q}) + g(q) \quad (18)$$

제어 시스템 구조는 그림.1에 나타내어진다.

### 5. 힘 제어 보상기

말단효과장치의 힘은 손목 힘 센서나 손가락 힘 센서를 사용하여 측정할 수 있다. 힘 센서는 본질적으로 유연성을 갖기 때문에 이런 장치를 부착했을 경우 매니퓰레이터는 강건체로 모델링할 수 없으며 간단한 질량/스프링 모델로 근사화시켜 해석할 수 있다. zr축으로의 접촉을 가정하고 손가락 끝의 질량을 무시하면 zr축 방향으로의 운동방정식은

$$m_{zf}\ddot{z}_f + k_{zf}\dot{z}_f = f_{z0} \quad (19)$$

$m_{zf}$  = 주어진 모양에서 zr방향으로의 팔의 유효질량  
 $f_{z0}$  = 동작 제어 힘  
 $k_{zf}$  = zr방향으로의 센서와 환경의 유효강도  
 $= (1/k_s + 1/k_e)^{-1}$

팔의 유효질량  $m_{zf}$ 는 매니퓰레이터의 방향과 모양에 따라 변하며 다음처럼 주어진다.

$$m_{zf} = u^T \Lambda(q) u \quad (20)$$

여기서

$$u = [z_f^T \ 0]^T \quad (21)$$

간단화된 모델에 기초하여 zr방향으로의 힘 제어는 다음의 제어구조로서 이루어진다.

$$f_{z0} = f_{zd} + k_f(f_{zf} - f_x) - m_{zf}k_{vf}\dot{z}_f \quad (22)$$

여기서  $f_{zd}$ 는 가해준(원하는) 힘이고  $k_f$ 와  $k_{vf}$ 는 각각 힘 오차 및 속도 감쇄이득이다. 이 모델에서 속도는 힘 미분치에 비례하므로( $\dot{f}_z = k_{vf}\dot{z}_f$ ) 속도 감쇄는 힘 미분 귀환으로 얻을 수 있다. 식(15)에서 대응하는 동작공간 명령벡터  $F_a$ 는

$$F_a = \bar{D} (F_d + k_f(F_d - F)) - k_{vf}\bar{D}\dot{X} \quad (23)$$

이며, 여기서  $k_f$ 와  $k_{vf}$ 는 각각  $k_f$  및  $k_{vf}$ 를 요소로 갖는 대각행렬이다.

### 6. 모의 실험 및 고찰

본 논문에서는 PUMA 560의 2,3번째 링크를 사용하여 모의 실험하였다(그림.2). 모의 실험에 사용된 수치값들은  $L_1=0.432m$ ,  $L_2=0.432m$ ,  $M_1=15.91kg$ ,  $M_2=11.36kg$ 로 주었고 원하는 궤적과 힘은 다음과 같다.

$$XD = 0.7\sin(t/2)$$

$$FD = -0.175\sin(t/2) - 9.8$$

그림.3는 원하는 궤적과 실제 궤적을 나타내며, 그림.4는 궤적 오차값을 나타낸다. 그림.5는 원하는 힘과 실제 힘을 나타내며, 그림.6는 힘 오차값을 나타낸다.

결과에서 보는 것처럼 원하는 궤적 및 힘값에 실제값들이 동시에 수렴함을 알 수 있다.

### 7. 결론

운동과 힘 제어에 대한 위의 접근방법은 관절 토크의 정확한 제어에 기초한다. 그러나 PUMA 560과 같은 대부분의 산업용 매니퓰레이터들은 기어 마모나 마찰등으로 인해 관절토크의 제어가 힘들다. 실험 결과들은 이런 문제점들을 포함하지 않은 결과들이며 더욱 정확한 결과는 매니퓰레이터 파라미터들의 정확한 추정과 정확한 동역학 모델을 사용하여 얻을 수 있다. 힘 제어를 위해 간단한 질량/스프링 모델을 사용했으나 정확한 모델은 매니퓰레이터 링크와 관절 역슈레이터 시스템, 말단효과장치의 유연성과 비선형성을 포함시켜야 한다.

앞으로의 연구 방향은 이런 비선형성과 유연성들을 포함한 정확한 모델을 사용하여 위치와 힘제어를 하여야 하며, 특정 방향으로의 위치/힘 제어보다는 일반화된 방향으로의 제어를 하여야 한다.

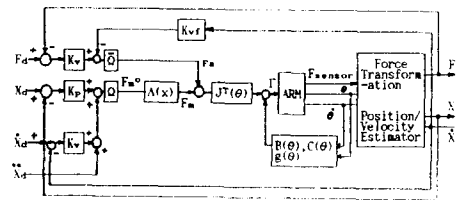


그림.1 제어 시스템 구조

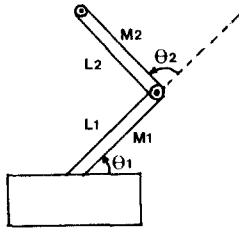


그림.2 2-링크를 갖는 매니플레이터

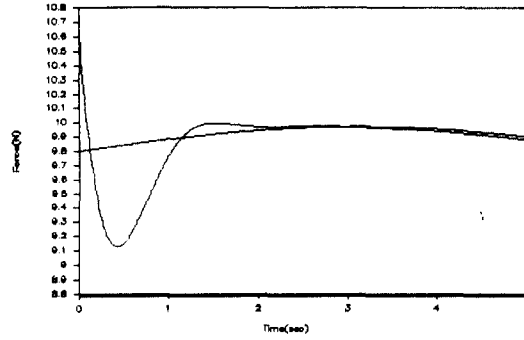


그림.5 원하는 힘과 실제 힘

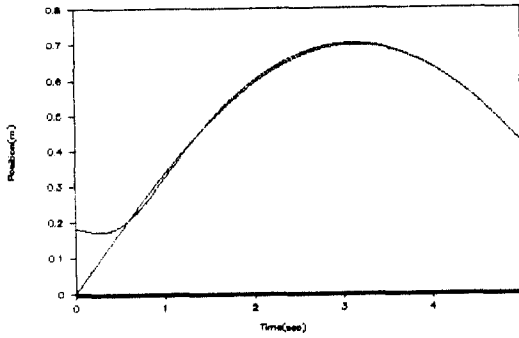


그림.3 원하는 궤적과 실제 궤적

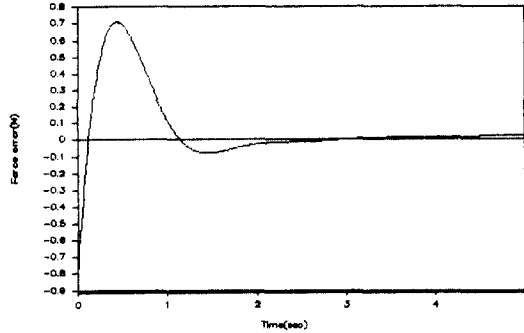


그림.6 힘 오차

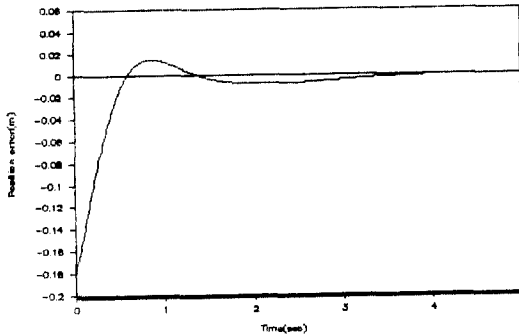


그림.4 궤적 오차

#### 참고 문헌

- [1] John J.Craig,1987."Robotics".pp.223-280, Addison Wesley Publishing Company.
- [2] M.H.Raibert, and J.J.Craig."Hybrid Position/Force Control of Manipulators".Transaction of the ASME, Vol.102,June 1981.
- [3] K.S.Fu,R.C.Gonzalez,C.S.G.Lee.1987."Robotics". McGraw-Hill International Editions.
- [4] Yoram Koren,1987."Robotics for Engineers".McGraw-Hill International Editions.
- [5] Robert J.Schilling,1990."Fundamentals of Robotics Analysis and Control".Prentice-Hill International Edition.
- [6] Antti J.Koivo,1989."Fundamentals for Control of Robotic Manipulators".A Wiley-Interscience Public.

- [7] H.Asada and J.J.E.Slotine,1986."Robot Analysis and Control".A Wiley-Interscience Publication.
- [8] Whitney,D.E.1985(March)."Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control". Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation,pp.262-268, St.Louis.
- [9] Salisbury,J.K.1980(December). "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinate" 19th IEEE Conference on Decision and Control, Albuquerque,New Mexico.
- [10] Khatib,O.1983(December 15-20)."Dynamic Control of Manipulators in Operational Space".Sixth CISM-IF ToMM Congress on Theory of Machines and Mechanism,pp.1128-1131,New Delhi,India(Wiley, New Delhi).