

디버링 작업을 위한 로봇 매니플레이터의 힘 제어에 관한 연구

A Study on the Force Control of a Robot Manipulator in the Deburring Process

채호철(한양대 대학원), 한창수(한양대 공대)

Hocheol Chae(Graduate Hanyang Univ.), Changsoo Han(Hanyang Univ.)

ABSTRACT

In this paper, the external force control and hybrid force control algorithms are proposed to apply Deburring process. The purpose of adjust which can be implemented to on unknown environments, adaptive control law(MRAC) is adopted. If a model system is given, the plant system can be controlled on the way which we will introduce to. We showed the validation and the possibility of Deburring process with multi-dimensional force control Idea through experiments. The experimental result show the validity of Deburring in the robot manipulator.

Key Word : deburring, hybrid control(혼합 제어), external control(외부제어), compliance(순응), MRAC(Model Reference Adaptive Control), F/T sensor(Force & Torque 센서)

1. 서론

산업의 발달과 함께 작업의 자동화에 로봇을 응용하는 연구가 끊임없이 수행되어 왔다. 로봇의 응용 작업은 로봇 말단부가 환경과 접촉하는지 여부에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. Pick-and-place, painting과 같은 작업들은 작업 환경과의 접촉 없이 순수한 위치제어로 상당한 성능을 발휘하지만 조립(assembly), 연삭(grinding), 디버링(deburring), 연마(polishing), 유리창 닦기 등과 같이 외부 환경과 접촉이 일어나는 경우에는 순수한 위치 제어만으로는 그 성능을 발휘할 수가 없다. 따라서 접촉력의 규정이 필요한 작업에서는 로봇의 위치 제어뿐만 아니라 작업 대상물과 로봇사이의 원하는 힘을 적절히 구현할 수 있는 힘 제어가 필수적으로 요구 된다.

이전에 연구 되었던 다양한 힘 제어 방식들은 로봇에 입력되는 것이 토크이므로 동력학을 풀어야 하는 부담이 있고 산업 현장에 있는 속도 서보, 위치 서보를 이용한 로봇 제어 시스템에 대해서는 하드웨어를 바꾸어야 하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 위치 제어 시스템이 존재할 경우 동력학 문제를 풀거나, 하드웨어의 교체없이 힘 제어를 원활히 할 수 있는 external force control을 이용한 힘 제어를 구현하기로 하고 혼합 힘 제어가 가지는 작업 정의의 용이성이라는 장점을 여기에 접목 시키기로 한다.

그러나 환경의 불확실성과 모델링과 동력학적 요소의 불확실성, 로봇 조인트의 비선형성, 기계 요소의 노후 등에 의하여 단지 귀환 제어(feedback control)로써는 그 성능을 발휘할 수가 없으며, 또한 다양한 입력에 대한 응답이 만족스럽지 못하다.

따라서 모델링의 불확실성과 비선형성을 보상하고 시스템에 큰 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 추정을 달성할 수 있도록 적응 제어를 제안 한다. 제안된 이론의 적용으로 접촉 현상하에서 작업이 이루어지는 디버링(deburring) 작업에 응용할 수 있도록 하는 것을 본 연구의 목표로 한다. 검증을 위한 실험으로 4축 SCARA 로봇의 x,y축에 대해서 힘을 제어하고 일반적인 PID 제어와 비교, 고찰하기로 한다.

2. 힘 제어

로봇에 있어서 힘 제어를 수행하기 위해서는 힘 제어를 수행할 방향과 위치 제어를 행을 방향에 대해서 명확히 규명해야 하며, 직교 좌표 기준으로 편성되는 실제계와 관절 좌표계는 적용을 위한 적절한 변환을 거쳐야 할 것이다. 또한 디버링 작업을 진행을 위한 로봇의 적절한 작업 정의도 필요하다.

2.1 접촉현상과 힘 제어

접촉시 발생하는 위치 제어와 힘 제어 사이의 이원성(duality)은 natural constraints와 artificial constraints에 의해서 표현되어질 수 있다. 일반적인 공간내의 위치를 나타내는 속도와 힘을 벡터 공간에서 표현하면 속도와 힘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v &= [v_x \ v_y \ v_z \ w_x \ w_y \ w_z] \\ f &= [f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z] \end{aligned} \quad (1)$$

이때 natural constraints 를 행렬 형태로 표현 하면

$$\begin{aligned} Av &= 0 \\ Bf &= 0 \end{aligned}$$

이 되고, 특히 B 행렬을 대각 구성 행렬 혹은 선택 행렬 S 하며 $S = B$, $S^\perp = A$ 로부터 위치 구성 A와 힘 구성 B는 보집합 형태로 서로 직교하여 이원성을 가진다.

다음에 보여지는 Fig.3과 Fig.4는 디버링 작업에 필요한 트래킹 운동을 벡터 공간에서 나타낸 것이다.

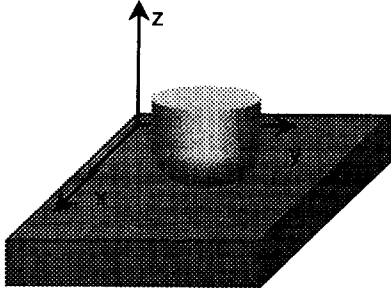


Fig.1 Tracking motion in the plane

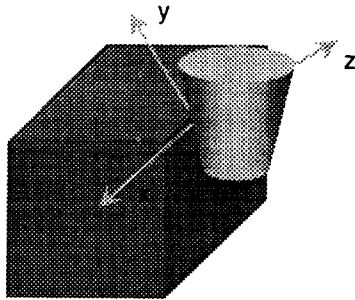


Fig.2 Tracking motion on the edge

이 경우들의 대각 구성 행렬은 다음과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 말단부의 정역학 해석

힘 제어에 필요한 접촉력 신호를 인지하고 접촉 상태를 규정하기 위해서는 센서의 신호를 정역학적으로 규명하는 작업이 필요하다. 더욱이 본 연구에서 중점적으로 다루고자 하는 디버링 작업에서는 작업 대상에 접촉하는 가공부의 위치가 무척 중요하다. Fig.는 F/T 센서를 이용하여 인지한 접촉력으로 말단부의 접촉 상태를 규명하는 방법을 제시하고 있다.

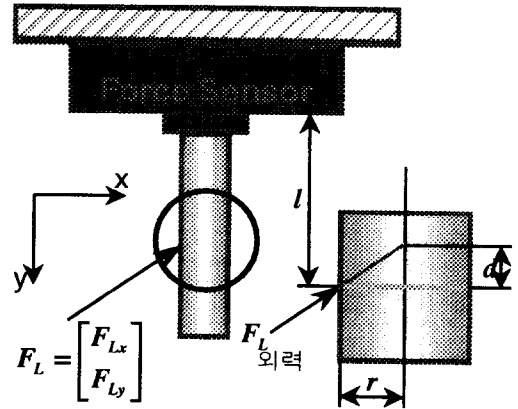


Fig.3 Statics in F/T sensor

위의 기하학적 조건들로부터 다음 두식을 유도할 수 있으며 두식의 연립으로부터는 접촉 중에 있는 말단부의 접촉 위치 l 을 규정 할 수 있게 된다.

$$M_{sz} = (l + d') \times F_{Lx}$$

$$d' = d \cdot \text{sign}(F_{Ly}) = r \cdot \text{sign}(F_{Ly}) \tan \alpha \quad (3)$$

2.3 혼합 외부 힘 제어

다음의 Fig.은 혼합외부 힘 제어의 개략도를 나타낸 것이다. 제어구조의 전반적인 형태는 힘 제어부분과 위치 제어부분을 분할하여 제어하는 혼합제어의 구조를 취하고 힘 제어부분은 외부 힘 제어를 설치 하였다.

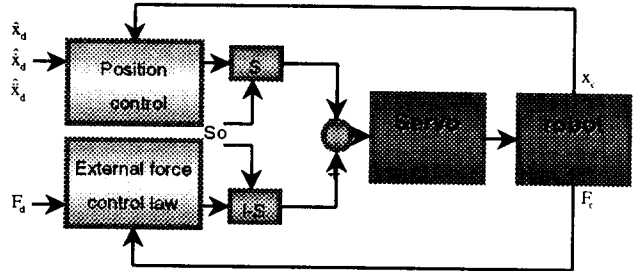


Fig.4 Hybrid External Force Control Scheme

디버링과 같이 마찰이 작용하는 말단부의 작업에서는 힘 제어방향에 대해 오차가 발생하게 된다. 따라서 힘 제어기와 위치 제어기를 분할하는 선택행렬이 수정되지 않으면 적절한 제어가 이루어 질수 없다. 접촉하는 물체 사이에 마찰력이 존재하지 않는 이상적인 작업 공간에서는 접촉면의 방향과 반발력의 방향이 항상 일치 하지만 실제 작업이 이루어 지는 공간에서는 마찰력 때문에 접촉력의 방향과 접촉면의 방향이 동일하지 않는다. Fig.5는 실제 공간상에서 트래킹 동작을 수행 할 때 발생하는 이론 힘과 실제

힘의 방향에 대한 오차를 보여주고 있다.

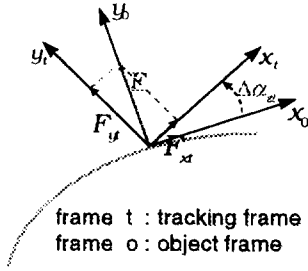


Fig.5 Tracking motion on real space

말단부가 접촉면에 수직인 일정한 힘을 주고 곡면을 따라 가도록 하는 트래킹 작업에서 곡면 추정성에 의하여 트래킹 좌표계로부터 목적 좌표계로 수정되어야 할 방향 변화가

$$\Delta\alpha_{yf} = \tan^{-1}\left(\frac{F_{xf}}{F_{yf}}\right) \cong \frac{F_{xf}}{F_{yf}} \quad (4)$$

라면 마찰력이 존재하는 경우는

$$\Delta\alpha_{yf} \cong \frac{F_{xf}}{F_{yf}} + \mu \quad (5)$$

가 되어 마찰력 성분을 만큼 더 보정을 해주어야 한다. 따라서 트래킹의 성능 향상을 위해서는 접촉면 간의 마찰 계수라는 동적 특성을 파악하여야 함을 알 수 있다. 또 트래킹 작업이 원활히 수행되기 위해서는 마찰력에 의해 발생하는 오차 성분을 지속적으로 보정 해주어야 함을 알 수 있다. 말단부의 좌표계를 P_o 라고 하면

$$P_o = Rot_y(\Delta\alpha_{yf})P_t \quad (6)$$

가 된다. 따라서 작업 구속 행렬은 P_o 에 구현되고 S_o 로 표현 할 수 있다.

3. 제어이론과 시뮬레이션

제어이론의 적용과 시뮬레이션 그리고 실험을 하기 위해서는 사용하고자 하는 로봇 및 서보에 의한 시스템 파라미터를 정확히 알아야 한다. 정확한 파라미터의 설정은 로봇의 기구적, 동역학적 해석과 서보 드라이버의 모델링 등을 통해서 이루어 질 수 있다. 하지만 전체 시스템은 모델링이란 실제 상황에서는 거의 불가능하다. 따라서 입력에 대하여 출력을 하는 신호를 비교하여 System Identification을 통해 2차 시스템으로 파라미터들을 구해 보았다

수 번의 실험결과 $w = 7.988, \zeta = 0.803$ 으로 추정하였다.

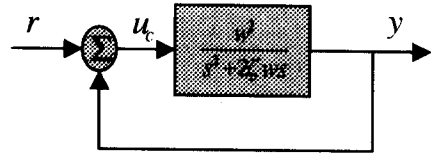


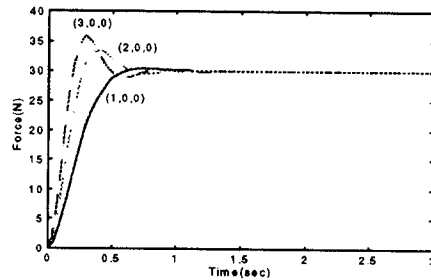
Fig.6 Feedback loop with unknown system

3.1 PID 제어

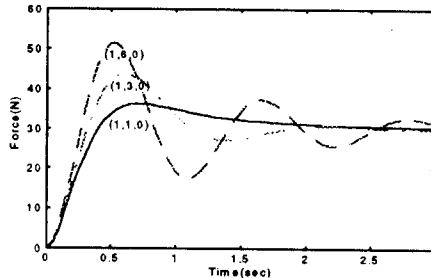
적절한 응답을 얻기 위하여 일반적으로 실제 제어에 많이 사용되는 PID 제어를 적용해 보기로 한다. PID 제어기는 다음과 같이 구성하였다.

$$g_f(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (7)$$

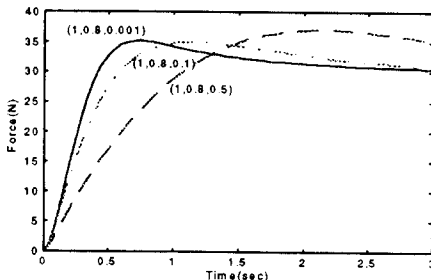
다음에 이어지는 Fig.7은 K_p, K_I 와 K_D 를 변화시켜가며 수행한 시뮬레이션 결과를 보여준다.



(a) The step response to K_p variation



(b) The step response to K_I variation



(c) The step response to K_D variation

Fig.7 The step response in PID Control(30N)

3.2 적응제어(MRAC)

시스템의 파라미터가 시불변으로 고정되어 나타날 경우 대체적으로 PID 제어로도 충분한 성능을 기대할 수 있다. 그러나 로봇의 자세에 따라 동역학적 변수가 존재하고 거동 중에 파라미터값이 다양하게 변화하게 된다. 더욱이 외부 힘 제어가 적용될 경우 환경의 탄성계수는 시스템에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 시스템의 변화에 대응하기 위하여 적응제어(MRAC)를 적용하기로 하였다.

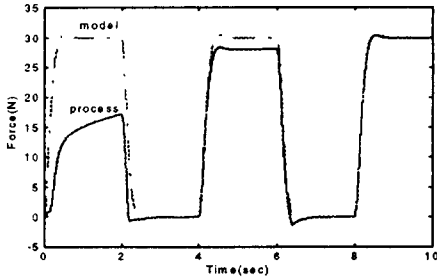
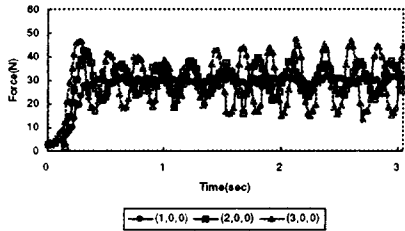


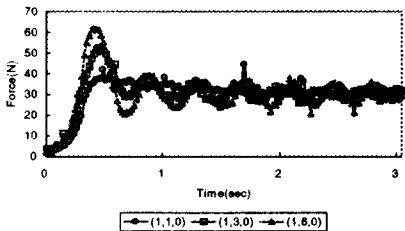
Fig. 8 Response on Adaptive Control(period=4sec, 30N)

4. 실험

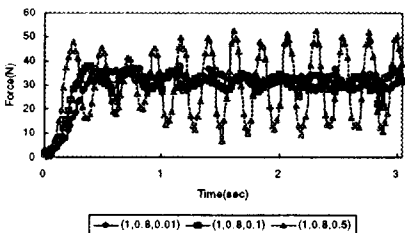
이상의 시뮬레이션과 동일한 실험을 행하였다. 다음의 Fig.9 은 PID 제어에 대한 실험 결과이다.



(a) The step response to K_p variation



(b) The step response to K_t variation



(c) The step response to K_D variation

Fig.9 The step response in PID Control(K_p, K_t, K_D)

위의 그림에서 보듯이 비례, 적분제어는 시뮬레이션과 유사한 반응을 보이지만 미분 제어가 포함되는 경우 심한 히스테리시스 반응이 일어남을 알 수 있다. 이는 노이즈 요소가 미분되면서 일어나는 현상으로 이런 경우 실험에 의한 게인선정이 요구된다. 실험을 위해 구성한 적응제어기에도 미분요소가 포함되어 있는데 이로 인하여 시뮬레이션에서 사용된 게인들을 이용했을 경우 아주 불안정한 반응을 보이게 된다. 따라서 실험에서는 시행 반복을 거듭하여 적절한 게인값을 다시 얻어야 한다. 다음 Fig.10 은 미분부분의 게인을 시뮬레이션보다 1/100 한 값으로 실험한 적응제어(MRAC)를 보여주고 있다.

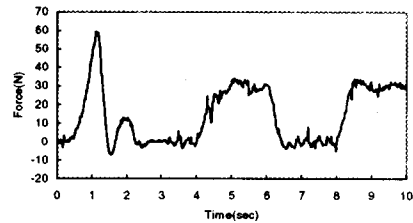


Fig.10 Response on Adaptive Control(period=4sec, 30N)

5. 결론

로봇 매니퓰레이터를 이용하여 디버링 작업을 실현할 수 있도록 혼합 외부 힘 제어를 이용하여 작업에 대해 정의하고, 디버링 작업 수행시 환경의 변화에 대처할 수 있도록 적응제어(MRAC)를 접목시켰다. 불확실한 환경에서도 파라미터 추적으로 시스템은 환경의 탄성계수값을 쉽게 추정할 수 있을 것이다. 적응제어 이용시 노이즈 문제로 인하여 시스템이 상대적으로 불안정한 경향을 보이는데 파라미터 추적시에는 적응제어를 이용하다가 어느 정도의 시간이 흐른 후 추정된 파라미터를 이용하여 PID 제어를 이용한다면 훌륭한 성능을 발휘 하리라 본다. 추후 연구 과정에서는 적응제어와 PID 제어의 장점을 접목시키는 부분과 노이즈 필터링 대책, 실제 작업교시에 대한 부분을 연구할 계획이다.

참고문헌

1. J. De Schutter, & H. Van Brussel, Compliant Robot Motion: II. A Control Approach Based on External Control Loop, The Int. J. of Robotics Research, Vol.7 No.4 pp.18-33 1988(Aug)
2. F.L. Lewis, C.T.Abdallah, D.M. Dawson, Control of Robot Manipulator, Macmillan, 1993