

충돌모델을 고려한 로봇 contour tracking 제어 알고리즘 Control algorithm of robot contour tracking based on impact model

*리성걸¹, 이승훈², 김동형², 송민수¹, #한창수²

*C. J. Li¹, S. H. Lee², D. H. Kim², M. S. Song¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)²

¹ 한양대학교 메카트로닉스공학과, ² 한양대학교 기계공학과

Key words : Impact model, Contour tracking, Transition phase, Repulsive direction vector

1. 서론

산업의 발달과 함께 수작업에 의존하던 기존의 공정방식은 로봇 및 생산자동화와 관련한 다양한 연구를 바탕으로 점진적인 수정·발전을 거듭해 왔다. 산업현장 내에서 로봇 매니플레이터의 작업은 로봇의 말단부가 외부환경과 접촉하는지 여부에 따라 크게 두 가지로 분류되며, 용접(welding), 도장(painting)과 같은 작업의 경우 환경과의 접촉 없이 단순한 로봇의 위치제어만으로 수행 가능하다. 반면에 조립(assembly), 연삭(grinding), 디버링(deburring), 연마(polishing)와 같은 작업은 공정 시 로봇 매니플레이터가 외부 환경과 일정한 접촉력을 유지하여야 하고, 특히 충돌시에 시스템의 안정성 향상을 위한 힘제어 기반의 contour tracking 제어 과정이 반드시 수반되어야 한다 [1]. 기존의 머시닝센터는 약 100~1000 Hz 대역의 외란에 강건한 시스템이지만, 산업용 로봇 매니플레이터를 이용하여 머시닝 작업을 수행하는 경우에는 외부의 작은 충격이 가공 성능을 결정짓는 중요한 요인이기 때문에 작업 반력 및 외란을 적절히 보상할 알고리즘이 필요하다 [2].

따라서, 본 연구에서는 로봇 매니플레이터와 외부환경 - 작업물 사이의 충돌 모델 (Impact model)을 고려한 contour tracking 제어 알고리즘을 제안하고, 로봇을 이용한 머시닝 작업의 가능성을 확인한다. 이를 위하여, 로봇 매니플레이터의 동적 특성을 크게 세가지 운동조건으로 나누어 각 단계별 수학적 모델을 제안하고, 충돌모델이 고려된 로봇 매니플레이터의 contour tracking 제어 알고리즘을 2DOF 플랫폼에 적용, 실험을 통하여 그 성능을 검증한다 (Fig. 1).

2. 매니플레이터의 충돌 모델

로봇이 외부환경의 접촉표면을 tracking 기 위해서는 환경과 접촉여부에 따라 3 개의 단계로 나눌 수 있다. (a)로봇이 외부환경과 접촉하지 않은 상태를 자유운동단계 ($\Phi(x(q)) < 0$), (b) 로봇이 외부환경과 접촉하고 접촉면의 법선 방향에서의 속도가 0 일 때를 제한조건운동단계 ($\Phi(x(q)) = 0$), (c) 자유운동단계에서 제한조건운동단계로 전환하는 단계를 전환운동단계라고 정의 한다. $\Phi(x(q)) = 0$ 은 구속평면을 나타내고 $\Phi(x(q)) > 0$ 는 환경내의 제한조건 바깥의 영역을 나타낸다. $x(q)$ 는 Cartesian 공간에서 로봇 말단부의 위치이다 [3]. 외부환경의 표면에 마찰력이 존재한다고 가정하면 법선 방향과 접선방향의 마찰력은 마찰계수 ξ 에 의하여 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$f_t = \xi f_n \quad (1)$$

각 단계별 동적 관계를 정리하면 다음과 같다.

- 자유운동단계 (free motion phase)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2)$$

- 전환운동단계 (transition motion phase)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \text{ and } \dot{q}_+ = D(q, \dot{q}) \quad (3)$$

- 구속운동단계 (constraint motion phase)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + v(q)f_n + v'(q)\xi f_n \quad (4)$$

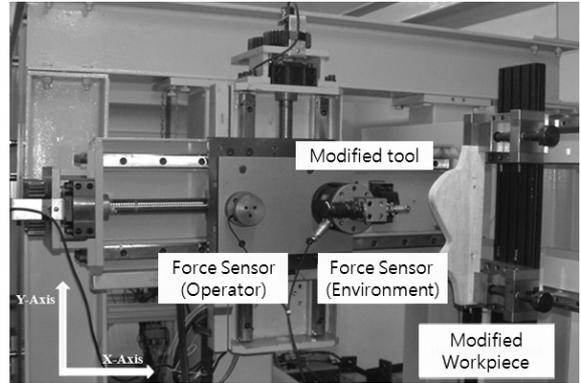


Fig. 1 The 2DOF manipulator for machining task

\dot{q}_+ 와 \dot{q} 는 전환운동 단계에서 충돌 전후의 속도를 나타내고 $D(q, \dot{q})$ 는 충돌전의 속도를 충돌후의 속도로 매핑(mapping) 시켜주는 관계식을 나타낸다. 다음 관계식 $D(q, \dot{q})$ 는 아래의 충돌모델 식 (5), (6) 으로부터 얻을 수 있으며 이때, $v(q) = J^T(q)n(x(q))$ 는 접촉면의 법선 방향의 힘을 관절영역으로; $v'(q) = J^T(q)t(x(q))$ 는 접촉면의 접선 방향의 힘을 관절영역으로 매핑 시켜준다 [4].

$$n^T v_+ = -e_n n^T(x) v_- \quad (5)$$

$$t^T v_+ = t^T(x) v_- - \frac{t^T(x)H(q)n(x)}{n^T(x)H(q)n(x)}(1 + e_n)n^T(x) v_- \quad (6)$$

실제 가공 및 contour tracking 작업 시 위의 충돌 전후 속도 관계식을 활용하여 시스템의 안정성 향상에 기여한다.

3. Contour tracking 제어 알고리즘 제안

자유운동단계에서의 제어목적은 매니플레이터의 불확실성을 고려하여 로봇이 원하는 경로를 잘 추종시키는 것이고 구속운동 구간에서는 로봇의 경로 추종과 동시에 작업물 표면의 법선 방향에서 외부환경과의 접촉력을 일정하게 유지 시켜야 한다. 로봇은 위치제어에서 하이브리드 형태의 힘제어 모드로 전환하는 단계에 로봇 말단부와 외부환경 접촉면은 정상상태에 도달하기까지 여러 번 충돌이 일어나며 안정화 혹은 다음 단계의 작업을 수행한다. 전환운동단계에서는 충돌모델을 적용하여 로봇과 환경의 충돌 후 속도를 예측하고 이를 보상하는 제어기를 설계하여 반복적인 충돌이 발생하지 않게 한다. 외부환경이 로봇 말단부에 대한 구속조건이 변하면 따라서 로봇의 운동특징도 변하게 된다. 여러 운동특징에서도 로봇이 안정적으로 구동될 수 있게 제어 알고리즘을 아래와 같이 제안한다.

플랫폼 각 축의 모터는 로봇의 움직임에 충분한 토크를 낼 수 있다고 가정하고 로봇 말단부의 시작 위치와 끝나는 위치, 그리고 외부환경의 대략적인 형상정보를 알고 있다고 가정한다.

3.1 자유운동단계

$$e = q - q_r, \quad e_v = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (6)$$

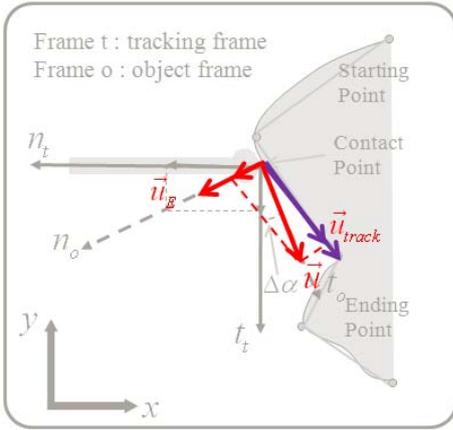


Fig. 2 Schematic of the force distribution

로봇의 실제위치 q 와 원하는 위치 q_r 사이의 차이를 이용, PD 제어를 통한 위치제어를 한다.

$$\tau = K_p \cdot e + K_D \cdot \dot{e}_v \quad (7)$$

3.2 전환운동단계

전환운동 단계의 제어목적은 로봇의 말단부가 자유운동 상태에서 작업물의 표면에 안정하게 닿게 하는 것이다. 이 단계에서의 충돌 모델을 이용한 제어기모델은 다음과 같다.

$$\tau = K_p \cdot e + K_D \cdot \dot{e}_v + \lambda_n P_\phi(q) \text{sgn}(e_m) \quad (8)$$

$$e_m = P_\phi(q) e_v \quad (9)$$

여기서, λ_n 은 양의 값을 갖는 이득 값이고 e_m 은 법선 방향에서의 속도 차이이며 $P_\phi(q)$ 는 orthogonal projection matrix 이다. 이때 e_v 의 전사 값이 구속평면에 수직되는 방향을 가리키게 하고 제어기에 불연속 항을 추가 하여서 로봇 말단부가 안정하게 작업물 표면에 닿도록 제어 한다.

$$P_\phi(q) = (\nabla\phi(q))^T (\nabla\phi(q)) / \|\nabla\phi(q)\| \quad (10)$$

3.3 구속운동단계

이 단계에서 로봇은 경로를 잘 추종해야 할 뿐만 아니라 동시에 법선 방향에서 일정한 접촉력을 유지해야 하기 때문에 위치제어와 힘 제어를 혼합한 하이브리드 형태의 제어를 수행한다. 그림 2 와 같이 가공물의 형상정보는 주요한 점들로 구성되어져 있다. 점과 점 사이를 선으로 이어서 벡터 \vec{u}_{track} 을 계산하여 로봇의 이동방향을 결정하고 톨 말단부에 장착된 F/T(Force/torque)센서에서 센싱된 x 축 y 축 힘을 합성하고 합력의 방향과 동일하게 벡터 \vec{u}_E 를 생성한다. 벡터 \vec{u}_{track} 와 \vec{u}_E 를 합성하여 실제 로봇의 이동방향벡터 \vec{u} 을 결정한다. 로봇이 작업물의 contour 를 tracking 할 때 일정한 접촉력을 유지 할 수 있도록 벡터 \vec{u}_E 는 로봇의 이동방향을 변화시켜 준다. 여기서 이 벡터를 반력 보상벡터(Repulsive Direction Vector)로 정의 하고 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{u}_{track} = \frac{\vec{p}_{track}}{\|\vec{p}_{track}\|} ; \vec{u}_E = \frac{f_E}{|f_E|} \quad (11)$$

Table 1 the experimental conditions of the system specification

Parameter	Value
V_{ref} Reference velocity	3 mm/s
F_{cont} Contact force	3 N
α Weight factor	0.4

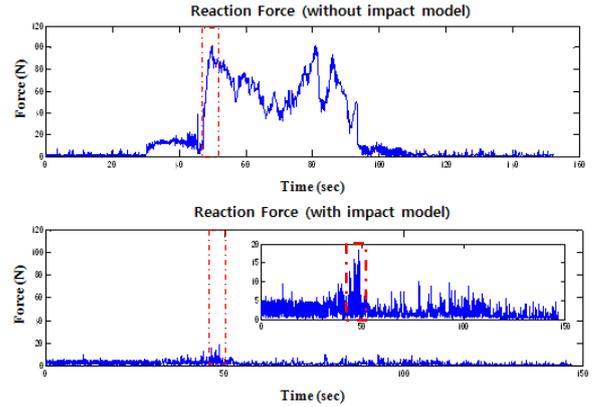


Fig. 3 Experiment result - Reaction force with/without impact model

벡터 \vec{u}_{track} 와 \vec{u}_E 를 가중인자 α 를 선정해서 합성한 결과는 다음과 같다.

$$\vec{u} = \sqrt{(1-\alpha)^2} \vec{u}_{track} + \alpha \vec{u}_E \quad (|\vec{u}|=1) \quad (12)$$

4. 실험 및 결론

위에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 1 과 같이 2DOF 플랫폼으로 로봇이 작업물의 contour 를 추종하는지에 대한 실험을 구성하였다. Contour tracking 하기 위하여 로봇의 말단부에는 작은 휠을 장착하여 작업물의 표면을 smooth contact 할 수 있게 하였고 contour tracking 과정에 2 축 Force 센서를 이용하여 반력을 측정하였다. 로봇의 작업경로는 분산된 점들로 구성되어 로봇의 말단부의 시작위치 작업이 끝난 후의 위치 그리고 대략적인 작업물의 contour 정보들로 구성하였다. 로봇의 속도 및 로봇과 작업물의 접촉하는 힘의 크기를 Table. 1 과 같이 설정하고 실험을 진행하였다.

그림 3 의 실험 결과에서처럼 충돌모델을 고려한 제어를 사용했을 때 로봇 말단부와 작업물의 순간 충돌력은 충돌모델을 고려하지 않은 실험에서보다 70% 이상 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 구속운동 단계에서 반력 보상 벡터를 적용한 힘제어 방식은 미리 설정한 접촉력 3N 영역에서 비교적 안정적으로 유지하며 변화하는 것을 확인할 수 있었고, 실험결과를 통하여 로봇 contour tracking 제어 알고리즘이 실제 로봇 가공작업에도 적용될 수 있음을 검증하였다. 보다 안정적인 충돌보상과 접촉력의 변화율을 줄이기 위한 추가적인 연구가 필요할 것이다

후기

본 연구는 국토해양부(MLMT) 건설기술혁신사업(CTIP)의 연구비 및 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Li C.J., Lee S.H., Kim D.H., Han C.S., "Automated Robotic Polishing Using a Direct Teaching and Playback Method" International Conf. on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies, Jan.,2010.
- Pan A., Zhang H., "Analysis and Suppression of Chatter in Robotic Machining Process", International Conf. on Control, Automation and Systems, pp. 595-600, Oct., 2007.
- Pagilla PR., Yu B., "Mechatronic design and control of a robot system interacting with an external environment", Mechatronics, pp.791-811, Dec 2002.
- Pagilla PR., Yu B., "An Experimental Study of Planar Impact of a Robot Manipulator", IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp.3943-3948, May 2001