

마찰이 있는 조립작업을 위한 동일 방향 혼합위치/힘 제어 Hybrid Position/Force Control in the Same Direction for Assembly Operation in Variable Friction Environment

°김상연* 권동수** 강성철*** 김문상***

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 (Tel : +82-42-869-3082, E-mail : kimsy@robot.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 기계공학과 (Tel : +82-42-869-3042, E-mail : kwon@automation.kaist.ac.kr)

***한국과학기술연구원 (Tel : +82-2-958-5623, E-mail : mskim@kistmail.kist.re.kr)

Abstract : This paper proposes a control strategy of position and force control in the same direction based on hybrid position/force control. In order to control position and force in the same direction, a *weighting matrix* is introduced instead of a selection matrix suggested by Raibert and Craig. The major part of the controller output comes from the position controller when a position control error is large, from the force controller when a position control error is large. The proposed algorithm is implemented by the simulation and experiment focusing on the peg-in-hole task where friction exist significantly and is not constant. It also adopts an event control scheme for more efficient performance.

Keywords : Hybrid position/force control(혼합 위치/힘 제어), event-based control scheme(이벤트식 제어기법), Assembly task(조립작업), Variable friction(가변 마찰), Weighting Matrix(가중치 행렬)

1. 서론

최근 산업 현장에서는 생산성 향상과 공장 자동화 추세에 따라 다양한 작업 공정에 로봇을 사용하고 있다. 그러나 로봇을 주변환경과 접촉하지 않는 작업에 사용하는 경우에는 위치제어 만으로도 충분하지만, 조립작업이나 그라인딩과 같이 표면을 따라가는 작업등에 사용하는 경우에는 로봇의 말단부(end effector)가 주변환경과 접촉하게 되어 발생하는 힘정보에 상호 관계를 이용한 힘제어까지 고려해야 한다.

조립과 같은 접촉작업을 위한 컴플라이언트 제어 연구는 크게 다음과 같은 두 가지 방식이 제안되어 사용되고 있다.

- (1) 위치제어에 기반을 둔 힘 제어방식[1,2].
- (2) 위치제어기와 힘제어기가 서로 독립적으로 구분되어 있는 방식[3].

두 번째 방식인 혼합위치/힘제어는 위치제어기와 힘제어기가 서로 선택행렬로 인해 수직방향으로 구분되어 있으므로 직관적으로 이해하기 쉽고 적용이 편리하나, 위치와 힘을 동일방향으로 제어할 수 없다[4]. 부품을 조립하거나, 팬 뚜껑을 열고 닫을 때처럼 순간적으로 마찰력이 급변하는 경우나, 위치이동의방향과 동일방향으로의 마찰력이 가변적으로 존재하는 구멍에 물체를 집어넣는 경우에는, 위치와 힘을 수직인 방향으로 분리시키는 기존의 알고리즘은 사용될 수 없다. 만일 인간이라면 이런 경우에 마찰력이 큰 곳에서는 물체가 변형이 일어나지 않도록 천천히, 마찰력이 적은 곳에서는 빨리 집어 넣을 것이다. 이러한 원리를 이용하여 본 논문에서는 순간적으로 마찰력이 급변하는 구멍에 유연한 물체를 집어넣는 작업 등을 대상으로 마치 인간이 하듯이 시간에 의존한 방법이 아닌 사건에 기인한 제어방법[5]을 써서 적용력있는 혼합 위치/힘 제어 알고리즘을 시뮬레이션하고 실험을 통해 제안된 제어 방법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 동일 방향으로의 위치/힘 제어기의 설계

위치 진행방향과 동일한 방향으로 마찰력이 존재하더라도 기존의 혼합 위치/힘 제어 알고리즘은 이 방향의 선택행렬의 대각 원소를 0 또는 1로 고정시킨다[3]. 그러나 임의의 방향의 마찰력이 거의 존재하지 않으면 거의 순수한 위치제어가 되므로 임의의 방향의 선택행렬의 원소는 0에 가깝고 마찰력이 크게 존재하면 힘제어를 많이 해야 하므로 임의의 방향의 선택행렬 원소는 1에 가깝다. 그러므로 마찰력이 구간별로 다르게 존재한다면 선택행렬을 이렇게 고정시킬 수만은 없다. 이에 본 논문에서는 선택행렬대신 가중행렬을 정의하여 사용하고자 한다.

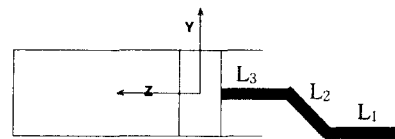


그림.1 마찰력이 가변하는 조립작업의 예

마찰력이 거의 존재하지 않을때 속도와 힘이 0이 되는 축을 찾아보면 속도 성분은

$$v_x = v_y = w_x = w_y = 0 \quad (1)$$

가 되고 힘 성분은 다음 (2)식 처럼 된다.

$$f_z = \tau_z = 0 \quad (2)$$

그러므로 선택 행렬을 구해 보면.

$$S_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = S \quad (3)$$

이되고, 작용하는 마찰력이 매우 크고 마찰력만을 이길 정도의 위치 이동이 존재하여 위치변화를 무시 할 수 있다고 가정하면 위치와 힘 성분은

$$v_x = v_y = v_z = w_x = w_y = w_z = 0 \quad (4)$$

$$f_z \neq 0, \tau_z \neq 0 \quad (5)$$

이 되며, 선택행렬은 식(6)과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(3)과 (6)에서 S 행렬의 3번째와 6번째의 대각선 원소(diagonal element)는 마찰력이 매우 작을 때는 0에 가깝게 되고 마찰력이 매우 클 때는 1에 근접하게 된다. 그러므로 작용하는 마찰력을 무시할 수 없다면 작용하는 마찰력과 동일 방향의 원소를 임의로 0 또는 1로 고정시킬 수 없다. 그래서 기존의 제어알고리즘의 사용보다는 작용하는 마찰력과 동일 방향의 선택행렬(S)의 원소를 0에서 1사이로 상황에 맞게 변화시킬 필요가 있다.

2.1 동일 방향으로의 위치/힘 제어알고리즘

그림.2에서 로봇이 가하는 힘(F_{total})은 식(9)처럼 되고 로봇의 각 관절에 부착된 모터에 가하는 토크(τ)는 식 (10)과 같다.

$$F_p = (I - C) * [K_p * ({}^c X_d - {}^c X) + K_D * ({}^c \dot{X}_d - {}^c \dot{X})] \quad (7)$$

$$F_f = (C) * [K_p * ({}^c F_d - {}^c F) + K_f * ({}^c \dot{F}_d - {}^c \dot{F})] \quad (8)$$

$$F_{total} = F_p + F_f \quad (9)$$

$$\tau = J^T * F_{total} \quad (10)$$

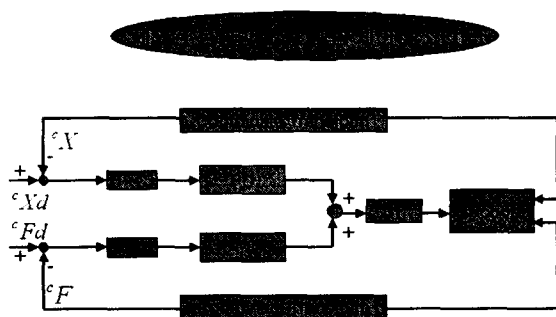


그림.2 제안된 동일 방향의 제어 알고리즘

제안된 선택행렬C는 식 (11)과 같이 정의한다.

$$C = \begin{bmatrix} c1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서 C의 각 대각 원소들은 식 (12)처럼 된다.

$$c_i = \frac{FE_i}{FE_i + PE_i}, \quad i=1,2,3,4,5,6 \quad (12)$$

여기에서

$$PE_i = \frac{\|e_{\mu}\|}{\|e_{\mu}\|_{\max}}, \quad FE_i = \frac{\|e_f\|}{\|e_f\|_{\max}}$$

e_{μ} : 위치에러, e_f : 힘 에러이다.

위의 식에서 위치에러가 힘에러보다 커지면($PE_i \gg FE_i$) $c_i \approx 0$ 이 되어 힘제어기가 거의 무시되어 위치제어 모드가 되고, 힘에러가 위치에러보다 커지면($PE_i \ll FE_i$) $c_i \approx 1$ 이 되어 힘제어 모드가 된다. 따라서 위치에러와 힘에러의 비(ratio)에 의해 동일 방향으로의 혼합 위치/힘 제어가 가능하다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경

기존의 알고리즘과 제안된 알고리즘을 비교평가하기 위한 시뮬레이션 환경의 로봇 구조는 그림.1과 같이 3축 플래너로 각 링크의 제원은 표 1과 같고, 대상은 위치방향과 동일 방향으로 표 2와 같이 마찰력이 가변하는 구멍에 변형되기 쉬운 물체를 넣는 것으로 선정하였다.

3.1.1 위치제어만을 사용하였을 경우.

그림.3, 4와 5는 6초동안 5cm/sec의 속도로 위치제어 입력을 가한 경우이다. 마찰력이 최대로 작용하는 구간에서 물체는 서서히 움직이고 물체에 가해지는 힘이 증가하여 물체의 변형이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

표1. 링크의 길이와 질량

	길이(m)	질량(kg)
Link 1	0.35	60
Link 2	0.3	35
Link 3	0.254	15

표 2. 구간별마찰계수

구간	마찰계수
0-10cm	0.15
10-15cm	0.4
15-30cm	0.05

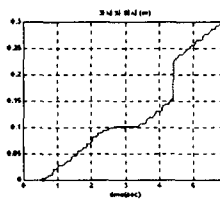


그림.3 위치

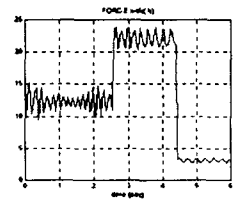


그림.4 물체의 변형량

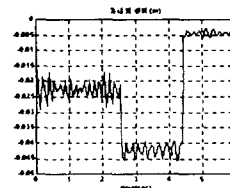


그림.5 힘

3.2 힘제어만을 사용하였을 경우.

그림.6, 7과 8은 20.23N으로 힘제어 입력을 가한 경우이다. 마찰력이 큰 구간에서는 물체는 천천히, 마찰력이 작은 구간에

서는 빨리 움직이며, 물체의 변위는 거의 모든 구간에서 크게 존재함을 알 수 있다.

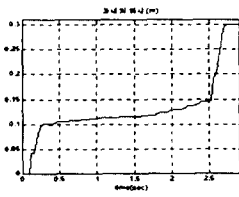


그림.6 위치

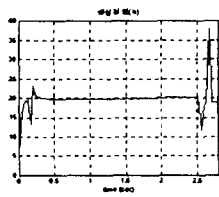


그림.7 힘

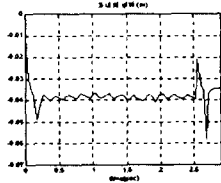


그림.8 물체의 변위.

3.3 가중치를 주어, 동일 방향으로 제어를 한 경우.

그림.9, 10과 11은 힘과 위치를 위치제어에 동일 방향의 힘 정보를 이용하면서, 제안한 알고리즘을 이용하여 제어한 결과이다. 제어 힘 입력은 20.5N을 넘지 않게 가하였고, 제어 위치 입력은 시간을 토대로한 제어방식(Time based Control)을 사용하지 않고 $\Delta X = \frac{v}{f} * T$ 로 증가시키는 기본적인 사건 발생 제어방식(Event based Control)을 택하였다. 만일 힘이 무한대에 가까워지면 ΔX 는 거의 0에 가까워지고 센싱된힘이 거의 0이면 ΔX 는 무한대로 커짐으로 적절한 힘으로 힘의 한계(limit)를 주었다. 여기에서 f 는 힘 센서에서 얻은 힘의 정보, n 은 크기를 조정하는 scale factor(N*m/sec)이며, T 는 sampling time이다. 본 시뮬레이션에서는 $T = 0.001$ 초, $n=0.8$ 로 정의하였다.

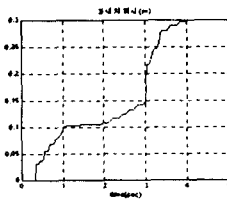


그림.9 위치성능

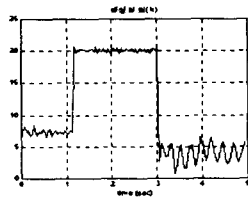


그림.10 힘성능

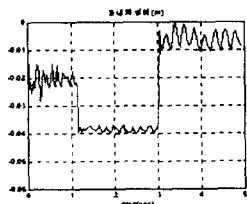


그림.11 물체의 변위

그림.9, 10과 11에서 보듯이, 사건을 토대로 한 제어를 동일 방향의 위치/힘 제어알고리즘을 이용하여 수행하였으므로 환경에 따라 위치제어입력과 힘 제어입력이 가해지기 때문에 마찰력이 큰 구간에서는 마찰력을 이길 정도의 힘으로 천천히 움직이고, 마찰력이 작은 구간에서는 위치의 이동이 빠른 것을 알 수 있다. 그리고 가해지는 힘이 20.25N 이상을 넘지 않으므로

물체의 변형도 적게 일어나는 것을 알 수 있다. 위치제어만을 수행하였을 때, 힘 제어만을 사용하였을 때, 그리고 동일 방향의 위치와 힘 제어를 수행하였을 때의 결과를 표 3에 정리해 놓았다.

4 실험

4.1 실험 장치 구성과 환경

본 시스템에서는 주제어기로는 VxWorks에서 프로그램한 것을 VME시스템으로 다운로드하여 기준입력을 보조 제어기부로 전달해 주었고, 보조 제어기부로는 DSP를 사용하여 센서에서 나오는 신호를 받아서 로봇의 각 관절로 실제적인 힘을 전달하는 실제 제어기부역할을 담당하게 하였다. 그리고 주 제어기부와 보조 제어기부는 DPRAM을 통하여 통신을 하여 실시간 제어를 가능하게 하였다.

표 3. 성능 분석표

	위치제어알고리즘만을 적용	힘제어알고리즘만을 적용	제안한제어알고리즘적용
물체가받은 에너지	0.426(J)	0.651(J)	0.388(J)
충격량	1.378 (Kgm/sec)	28.725 (Kgm/sec)	1.251 (Kgm/sec)
평균변형량	2.811(cm)	3.740(cm)	2.732(cm)
최대변형량	4.604(cm)	5.702(cm)	3.913(cm)
총작업시간	6초	2.754초	4.005초

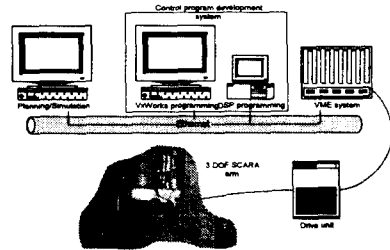


그림.12 실험장치 블록도.

그림.12와 같은 실험 장치를 이용하여 마찰력이 일정하지 않은 표면에 3자유도를 갖는 로봇을 이용하여 물체를 일정하게 미치는 작업을 실험 대상으로하여 실험을 하였다. 구간별 마찰계수는 0 - 12cm구간에서는 마찰계수를 약 0.46으로, 12-18cm 사이에서는 마찰계수를 0.6으로, 18cm - 30cm사이에서는 마찰계수를 0.28로, 구간 별로 마찰계수를 달리하여 실험을 하였다. 샘플링시간은 1 msec로 하였고 위치제어만 하였을 경우와 동일 방향으로 위치/힘 제어를 했을 경우에 대하여 실험을 하여 시뮬레이션결과와 비교 분석해 보았다.

4.2 위치제어만을 수행하였을 경우.

그림.13과 14는 6초동안 5cm/sec의 속도로 위치제어 입력을 가한 경우이다. 시뮬레이션 결과와 같은 양상을 나타낸다. 즉, 마찰력이 최대로 작용하는 구간에서 위치를 따라가기 위해 많은 힘이 가해지고 마찰력의 작용이 작은 경우에는 힘이 작게 제어됨을 알 수 있다. 예를 들어 이 물체가 70N이상의 힘을 가하게 되면 손상되거나 변형이 될 수 있는 물체라면 힘을 감소시키기 위하여 힘을 제어하거나 속도를 낮추어야 한다.

이렇게 위치제어만을 사용하였을 경우에는 가장행렬(C

matrix)을 0으로 고정을 시킨 것과 같다.

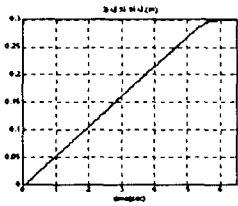


그림.13 위치

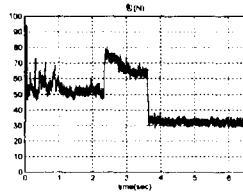


그림.14 힘

4.3 동일방향의 위치/힘 제어를 수행하였을 때.

그림.15와 16은 구간별로 마찰계수가 다른 곳의 물체를 동일 방향으로의 위치/힘 제어 알고리즘을 이용하여 힘을 68N이 넘지 않게 하고, 기준위치 입력을 $\Delta X = \frac{v}{f} * T$ 로 주어 제어를 수행하였다. 마찰력이 크게 작용하는 곳에서는 위치의 이동이 천천히 일어나고 마찰력이 적은 곳에서는 위치의 이동이 빠르게 이동하면서 힘도 68N이 넘지 않게 제어가 되어 시뮬레이션 결과와 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다.

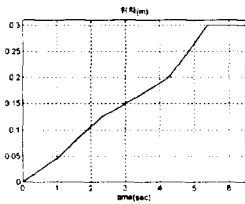


그림.15 위치

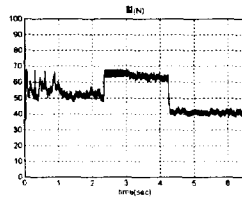


그림.16 힘

5. 결론

동일 방향으로의 혼합 위치/힘 제어에 의한 조립작업을 가변 마찰력이 존재하는 경우에 대하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가중행렬(Weighting Matrix)을 이용하여 동일 방향으로 위치제어와 힘제어의 성능을 만족시켰다.
2. 가변마찰력이 존재하는 경우의 조립 작업시 동일 방향으로의 위치/힘제어 알고리즘을 이용하는 것이 위치제어만을 한 경우나 힘 제어만을 한 경우 보다 나은 성능을 나타냄을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 기전 연구부 ROHY팀의 장비 지원에 의해 수행되었고 한국과학기술원(계정번호 NN2260)에 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Mason, M. 1981. Compliance and force control for computer controlled manipulators. *IEEE trans. Sys. Man Cybernet.* 11(6) : 418-432.
- [2] Hogan, N. 1985. Impedance control : An Approach to manipulation : Parts I,II,and III. *J. Dynam. Sys. Measurement and Control* 107: 1-24.
- [3] Craig, J.J., and Raibert, M.H. 1981 Hybrid position and force control of manipulators. *J. Dynamic Sys., Measurement and Control. Trans. ASME. vol. 103(2) :* 126-133
- [4] Volpe, R., Khosla, P. 1995. The equivalence of second-order Impedance control and proportional gain explicit force control. *J. of Robotics Research Vol. 14, No6, December 1995,* pp.574-589
- [5] GKSS Reserch center, "Scheme Event based control". <http://www.gkss.de/G/MM - Event - Scheme.html>.