

외란 오브저버에 의한 작업좌표공간에서의 다이렉트 드라이브 로봇의 위치와 힘의 하이브리드 제어

○신 정호* 코마다 사토시**, 이시다 무네아키**, 호리 타카마사**
 *名古屋大學 工學部 **三重大學 工學部

Hybrid Position/Force Control of Direct Drive Robots by Disturbance Observer in Task Coordinate Space.
 ○ Jeong-Ho Shin(Nagoya University), Satoshi Komada, Muneaki Ishida, Takamasa Hori(Mie University)

This paper proposes a simple and high performance hybrid position/force control of robots based on disturbance compensation by using the disturbance observer in task coordinate space. The disturbance observer linearizes system of robot manipulators in task coordinate space and realizes acceleration control. To realize the strict acceleration control, the disturbance observer whose input is a position signal by simple computation, works as if it were a disturbance detector. The inverse kinematics can be simplified, because the disturbance observer in task coordinate space compensates not only the disturbance but also the error due to the simplification of the inverse kinematics. The new strategy is applied to a three-degrees-of freedom direct drive robot. The robust and simple hybrid position/force control is realized experimentally.

1. 서론

多關節 로봇은 고도의 非線形 시스템이기 때문에 고속 位置制御 및 정밀 힘제어를 하기 위해서는 動力學과 運動學 등의 복잡한 알고리즘을 필요로 한다. 최근 로봇 관절의 入出力 관계로 부터, 관절에 가해지는 外亂과, 파라미터 변동을 구하는 外亂 오브저버 (disturbance observer) 가 제안 되어왔다. 이 외란 오브저버를 이용해, 외란을 추정하여 補償함으로써, 逆動力學의 복잡한 계산을 하지않고서도 로봇을 고속·고정밀하게 제어 할 수 있다^{(1),(2)}.

본 논문은 關節座標空間에서의 외란 오브저버를 作業座標空間으로 확장시킨것으로, 외란 오브저버 특성에 대해 논했다. 이 제어법을 이용하면, 외란과 파라미터 변동 및 복잡한 逆運動學 (inverse kinematics) 변환식을 簡略化할 수 있다^{(3),(4)}. 또한 작업좌표공간에서의 외란 오브저버를 기초로 해서 위치와 힘의 하이브리드 제어를 구성했다. 그리고 역동력학 문제를 계산하지 않고, 게다가 역운동학 변환식을 간략화하여, 로봇을 고속·고정밀하게 제어할 수 있음을 실험에 의해 확인 했다.

2. 제어 방법

그림 1에 관절좌표공간에서의 외란 오브저버에 의한 로봇 매니퓰레이터의 제어법을 나타낸다. 이 제어법은 가속도추정법 (ATOM) 이라고 불리운다. 여기에서 r 은 작업좌표공간에서의 위치와 방향벡터, q 는 관절공간에 따른 위치벡터, f 는 작업공간에 따른 힘벡터, f_s 는 힘센서에 의해 검출된 힘벡터를 가리킨다. 또한 cmd , ref , cap 는 지령값, 참조값, 보상값을 의미한다. 그림 1의 제어는 각 관절에서 외란과 파라미터 변동을 외란 오브저버에 의해 일괄해서 구하고, 그것을 補償하여 가속도 제어를 실현한다. 여기에서 각 관절의 가속도지령은 작업좌표공간에서의 컨트롤러에서 발생한 가속도 지령으로부터 역운동학 변환식을 통해 서얼 수 있다.

그림 2에 작업좌표공간에서의 외란 오브저버에 의한 로봇 매니퓰레이터의 제어법을 나타낸다. ⁽⁴⁾ 그림 1의 제어법과 다른점은 외란 오브저버의 위치다. 외란 오브저버는 작업좌표공간에서의 가속도 지령값과 관절의 각도 (위치) 정보를 이용한다. 이 제어방법의

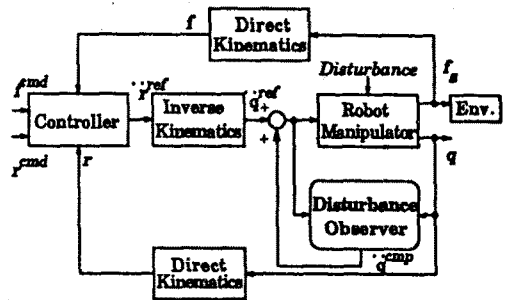


Fig. 1. Hybrid control based on disturbance observer in joint coordinate space.

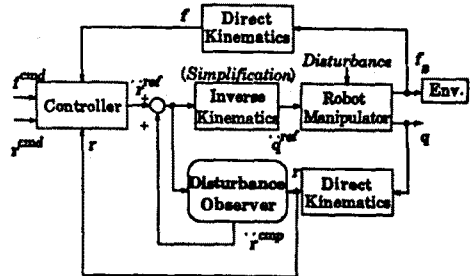


Fig. 2. Hybrid control based on disturbance observer in task coordinate space.

특징은 다음과 같다.

- (1) 작업좌표공간의 외란 오브저버는 작업좌표공간에 대한 感度를 결정한다.
- (2) 역운동학 변환식을 간략화할 경우의 계산오차를 작업좌표공간에서의 외란 오브저버에 의해 보상한다.
- (2)의 특징으로부터 알 수 있듯이 외란 오브저버에 의해 역운동학 변환식을 간략화할 수 있다. 작업좌표공간에 있어서의 외란 오브저버는 중력 및 관절의 마찰 등의 부하 변동에 의한 외란과 좌표변환에 있어서 역운동학 변환식을 간략화한 경우의 오차까지도 추정하여 보상할 수가 있다. 이하 그림 2에 기초한 위치와 힘의 하이브리드 제어에 대해서 기술한다.

3. 외란 오브저버에 의한 가속도 제어

가속도 제어를 실현하기 위한 외란 오브저버로서 위치신호를 이용한 외란 보상 블록선도를 그림3에 나타낸다. 여기서 r 은 위치 또는 관절의 각도, $s^2 r^{ref}$ 는 시스템의 가속도 지령값, $s^2 r^{cmp}$ 는 가속도 외란 추정값, $s^2 r^{dis}$ 는 가속도외란, $G^{cmp}(s)$ 는 외란 추정함수이다. 외란 오브저버는 (1) 식에 나타내듯이 전달함수 $G^{cmp}(s)$ 를 통해서 얻어지는 추정외란 $s^2 r^{cmp}$ 를 피드백 하여 $s^2 r^{dis}$ 를 억제한다.

$$s^2 r^{cmp} = G^{cmp}(s) s^2 r^{dis} \dots (1)$$

그림3을 등가변환 하면 그림4와 같이 되어 외란과 nominal 시스템 사이에 感度함수 $G(s)$ 가 삽입된 형태로 된다. $G(s)$ 는 다음 식과같이 된다.

$$G(s) = 1 - G^{cmp}(s) \dots (2)$$

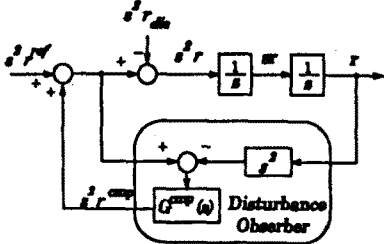


Fig. 3 Disturbance compensation by disturbance observer.

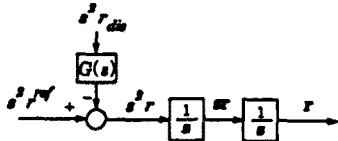


Fig. 4. Block diagram of acceleration controller. 그림4에서 가속도 콘트롤러의 가속도 오차는 다음과 같이 된다.

$$s^2 r^{ref} - s^2 r = G(s) s^2 r^{dis} \dots (3)$$

즉, 가속도오차는 가속도외란과 감도함수의 곱과같다. 이 식에서 전달함수 $G^{cmp}(s)$ 가 작게 되도록 선택함으로써 robust 제어계를 구성할 수 있다. 예를들면 $G^{cmp}(s)$ 가 1 이라면 즉, 가속도외란을 직접 피드백 하면, 이상적인 가속도 콘트롤러가 실현되어 $G(s)$ 는 0 이되고, 시스템은 외란의 영향을 전혀 받지 않게 된다. 그러나 이것은 현실적으로는 불가능하기 때문에 외란 오브저버가 proper 가 되도록 $G^{cmp}(s)$ 를 2次 low pass filter로서 선택한다. 이때 $G^{cmp}(s)$ 는 (4) 식과 같이 된다.

$$G^{cmp}(s) = \frac{g_2}{s^2 + g_1 s + g_2} \dots (4)$$

따라서, 외란 주파수보다도 높은 cut off 주파수의 오브저버를 이용함으로써, (3) 식의 우변의 가속도외란 오차를 적게할 수 있게 되며, robust 가속도 제어가 실현된다. 또한 스텝 외란에 대해서 가속도외란의 최종 값은, (5) 식과같이 0로 수렴한다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s G(s) = 0 \dots (5)$$

4. 작업좌표공간에서의 역운동학 변환식의 간략화

작업좌표공간에따른 위치벡터를 r , 매니퓰레이터의 관절좌표벡터를 q 라고하면 r 는 (7) 식에 나타내듯이 q 의 함수로서 나타낼 수 있다.

$$r = L(q) \dots (7)$$

(7) 식 양변을 시간변수로 2회 미분하면, (8) 식이

된다.

$$\ddot{r} = J_{aco} \ddot{q} + \dot{J}_{aco} \dot{q} \dots (8)$$

여기에서 J_{aco} 는 jacobian 행렬이라고 불리우며, q 의 관수이다. 작업좌표의 가속도 지령을 관절의 가속도 지령으로 변환하는 역운동학의 변환식은 (9) 식과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\ddot{q} = J_{aco}^{-1}(\dot{r} - \dot{J}_{aco} \dot{q}) \dots (9)$$

또한, 계산량을 적게 하기 위해서 간략화한 역운동학의 변환식으로서 다음식을 이용한다.

$$\ddot{q} = J_{aco}^{-1} \ddot{r} \dots (10)$$

Jacobian 행렬의 전치 J_{aco}^T 는 정지시의 작업좌표의 힘벡터를 관절좌표의 토크 벡터로 변환한 것이다.

5. 실험결과

5.1> 실험 시스템

실험에서는 제한한 하이브리드 제어계를 그림5와같은 3 자유도 DD로봇에 적용했다. 표1에 DD로봇의 명세서, 그림6에 실험 시스템 구성도를 나타낸다.

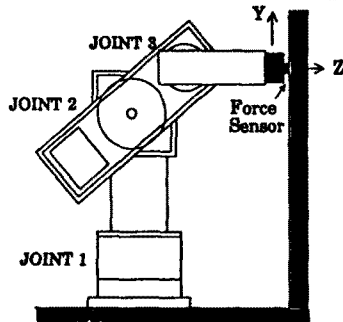


Fig. 5 3-degrees-of-freedom DD robot.

Table 1 Specification of DD robot.

Joint	Joint 1	Joint 2	Joint 3
Rated power [W]	410	410	250
Maximum torque[Nm]	100	100	30
Maximum rotation[rps]	1.2	1.2	2.4
Resolution encoder [p/rev]	1024000	1024000	655360
Link length [cm]	40	22.5	24

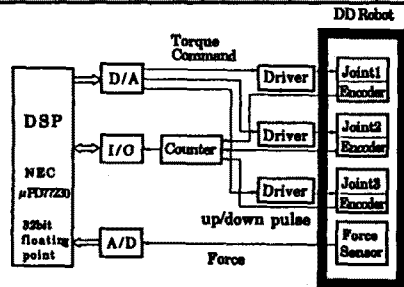


Fig. 6 Schematic daigram of Experiment system.

5.2> 실험 결과

그림5와같이 고정된 벽에 행한 Position and Force Hybrid control 결과들 이하에 설명한다. 벽에 평행인 y 방향에는 위치제어를, 벽에 수직인 z 방향에는 힘제어를 행했다. 오브저버와 콘트롤러 및 좌표변환은 DSP(Digital Signal Processor NEC-μ PD77230)에서 계산하고 토크 지령은 D/A를 통해서 각 관절의 드라이버에 출력된다. 오브저버의 극은 콘트롤러의 극보다 크게 하고, 모든 파라미터는 실험적으로 구했다. 본 연구에서 이용한 파라미터 설정은 오브저버를 이용하는 것으로

시스템을 선형화 하기 때문에, 오브저버의 극을 높게 했다. 로봇의 제어 주기는 350[μ sec]로 했다.

다음에 하이브리드 제어의 시간 응답을 그림 7에 나타낸다. 이 실험은 작업좌표공간에서의 외란 오브저버의 각축에 있어서의 외란 억제효과를 나타낸다. 이 그림에서 상단이 y 방향의 위치지령 y^{cmd} 과 위치응답 y , 하단이 z 방향의 위치지령 z^{cmd} 과 위치응답 z 을 나타낸다. 그림 a 는 y 방향에는 오브저버의 보상이 있는 경우이고, z 방향에는 외란 보상을 행하지 않았을 때의 제어결과이다. 그림 b 는 z 방향에는 오브저버의 보상이 있고, y 방향에는 외란 보상을 행하지 않았을 때의 제어결과이다. 이때, z 방향에는 force 지령대로의 force 의 응답이 얻어지지만, y 방향의 위치응답에는 중력때문에 크게 오차가 생기고 있다. 그림 c 는 y, z 방향 모두 오브저버의 보상이 있는 경우의 제어 결과이다. 외란 오브저버의 보상을 행하지 않았을 때에는 로봇 자체의 자중에 의한 중력의 움셋과 관절의 마찰에 의한 히스테리가 존재한다. 외란 보상을 행하면 이러한 외란이 보상되기 때문에 지령대로의 응답이 얻어지게 된다. 따라서, 작업좌표의 각방향에서 독립적으로 제어를 할 수가 있다.

다음에 역운동학의 변환식을 간략화한 경우의 작업좌표공간에서의 외란 오브저버의 유효성을 입증하기 위해 실험을 했다. y, z 방향에 위치제어를 행했을 때의 실험결과를 그림 8에 나타낸다.

그림 a 는 그림 1과 같은 제어법에, 역운동학으로서는 (9) 식을 이용한 경우의 위치제어 결과이다. 이 결과는 지령값과 거의 일치 하고 있다. 그림 b 는 그림 1과 같은 제어법에, 역운동학으로서는 (9) 식 대신에 (10) 식을 이용한 경우의 위치제어 결과이다. 이때는 관절좌표공간에서의 외란 오브저버가 역운동학 변환식의 오차를 보상하지 않기 때문에, 그결과 그림과같이 로봇가진동하여 불안정한 상태가 된다. 그러나 그림 c 에 알수 있듯이 작업좌표공간에서의 외란 오브저버를 이용하면 위치지령 대로 응답이 얻어진 것을 알 수 있다. 이것은 작업좌표공간에서의 관절의 외란 및 역운동

학 변환식의 간략화에 의한 오차까지도 보상되어 지령대로 응답이 얻어 진것을 의미 한다.

6. 결론

본 연구의 성과를 정리하면 다음과 같다.

1) 작업좌표공간에서 외란 오브저버를 이용하여 역동력학을 사용하지 않고 간단히 가속도제어를 실현했다 또한, 이 오브저버는 관절의 관성변동 및 마찰등의 외란과 역운동학 변환식을 간략화한 경우에 따르는 가속도 오차까지도 보상한다. 이것으로 인해 로봇 전체의 연산시간을 짧게해서, real time 으로 로봇트를 고속·고정밀하게 제어할 수 있다.

2) 가속도 제어를 기초로 하여 작업좌표공간에서의 위치와 힘의 hybrid제어를 실현 했다. 수직 다관절 DD로봇에 이 제어법을 적용하여 고정밀한 motion control을 구성한 것을 실험에 의해 확인했다.

참 고 문 헌

- [1] M. Nakao, K. Ohnishi & K. Miyachi: "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 326-331(1987)
- [2] 駒田, 村上, 大西: [加速度に基づく多自由度robotの力feedback制御], 電学論D, Vol. 109, pp325-332 (1989-5)
- [3] 申, 駒田, 石田, 堀: [外乱オブザーバを用いたダイレクトドライブロボットの位置と力のハイブリッド制御] ROBOMEC'91講演会, pp509-512(1991-6)
- [4] S. Komada, J. H. Shin, M. Ishida & T. Hori, "Simplification of Inverse Kinematics Routine of Robot Manipulators by Disturbance Observer in Task Space.", IEE JAPAN-IAS'91, Int. Sec. Records, pp. E23-28, (1991-8)
- [5] S. Komada & K. Ohnishi, "Force Feedback Control of Robot Manipulator by the Acceleration Tracing Orientation Method", IEEE Trans, Ind. Electron, vol. 1E-37, pp6-12(1990-2)

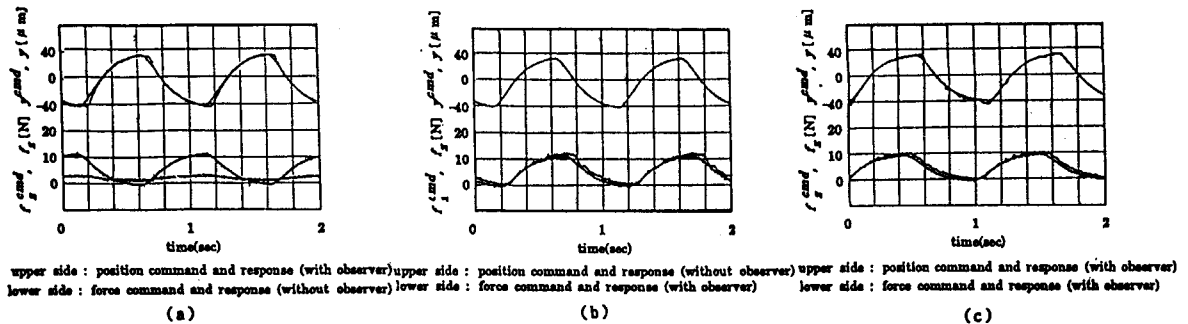


Fig. 7 Experimental results of hybrid position/force control.

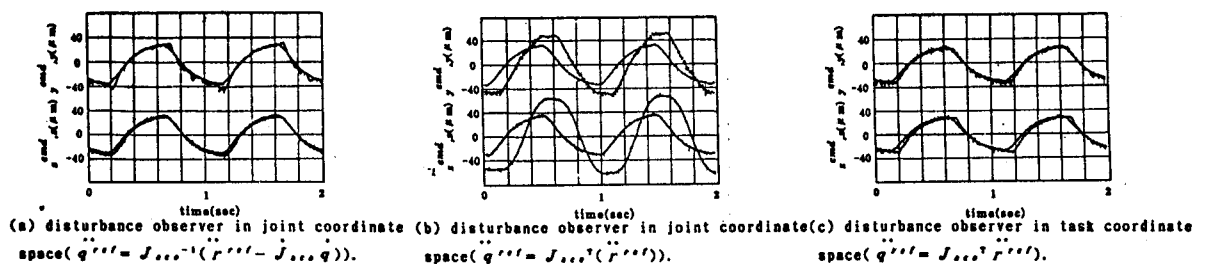


Fig. 8 Comparison of the influence in inverse kinematics simplification.