

# 2 자유도 보상기를 이용한 직접 구동형 로봇의 궤도제어

○申 正篤 藤 敏 健司 鈴木 達也 大熊 繁  
名古屋大學 工學部 電子機械工學科

Trajectory Control of Direct Drive Robot with Two-Degree-of-Freedom Compensator

○Jeong-ilo SHIN, Kenji FUJIIUNE Tatsuya SUZUKI, Shigeru OKUMA  
Dept. of Electronic Mechanical Eng. Nagoya University

**Abstract-** In this paper, the authors show a link between a heuristic controller used in industry and a theoretical generalized controller. First, we clarify the internal structure of the generalized two-degree-of-freedom controller which yields a link between the theoretical researches and the practical applications. Secondly, we indicate how to blend identification and control together without any modification of the controller. This is in fact the the problem of closed-loop identification. Thirdly, we propose a design technique of a free parameter taking into account a robust stability based on the information obtained from the identification. Finally, we apply the proposed algorithm to trajectory control of DD robot.

## 1. 서론

로봇을 고속 고정밀하게 제어하기 위한 대표적인 방법으로 서역 동력학에 기초한 계산로봇법<sup>[1]</sup>, 비선형피드백제어<sup>[2]</sup>, 분해가속도제어<sup>[3]</sup>, 등을 들 수 있다. 그러나, 이들 제어법은 계산량이 많고 부하변동에 약한 단점이 있다. 이들 제어법에 비해 운동제어 분야에 있어서는 관절을 구동하는 액츄에이터의 입출력 관계로부터 관절에 가해지는 외란을 추정하여 보상하는 외란 옵저버가 제안되어 로봇의 제어에 있어서 그 유효성이 확인되고 있다<sup>[4,5,6,7]</sup>.

또한, 2자유도 제어계의 관점으로 부터 외란 옵저버를 재고하여 로봇 제어에 적용한 예도 보고되어 있다<sup>[8]</sup>. 이들의 제어 방법의 직접적으론 선형제어계에 기초한 점이며, 복잡한 역 동력학 문제를 계산할 필요가 없이 마이크로 프로세서 레벨로서 용이하게 제어 시스템을 구성할 수가 있다는 점이다. 그러나 지금까지의 외란 옵저버를 이용한 로봇 제어계에 있어서는, 외란 추정 필터의 주파수 영역을, 경험적으로, 시행착오적으로 결정하는 점과, 비교적 선형성이 강한 매니퓰레이터를 대상으로 한 수법 이외에는 보고되지 않은 점으로부터 그 유효성이 충분히 검증 되었다고 하는 말하기 어렵다. 이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 비 선형성이 강한 직접 구동형 로봇(DD 로봇)를 대상으로 한 경우의 2자유도 제어계의 적용 가능성에 대해 검토한다. 2자유도 보상기의 설계법으로서의 필자들이 제안한 수법을 이용한다<sup>[11]</sup>. 이 수법의 특징은 제어대상의 변동분을 동정하여 free parameter를 설계하는 점이다.

본 논문에서는 2자유도 보상기의 내부구조에 대해 논하며, DD 로봇을 대상으로 한 경우 로봇이 취하는 자세와 간섭력 등에 의해 어느정도 제어대상의 주파수 특성이 변화하는가를 실험에 의해 검증한다.

## 2. 2 자유도 보상기의 내부구조

본 절에서는 2자유도 보상기의 내부구조에 대해 논한다. 일반적으로 2자유도 제어계의 내부구조는 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>. 여기에서  $P$ 는 플랜트  $r, u, d, g$ 는 각각 참조입력, 플랜트에의 입력, 외란 및 관측출력(여기에서는 관측값)이다. 또한,  $C_2$ 는  $RH\infty$  상에서 플랜트의 기약분해 표현(factorization)을 이용한다<sup>[13,14]</sup>.

$$P = ND^{-1} \quad (1)$$

$$C_2 = (Y-QV)^{-1}(X+QD) \quad (2)$$

여기에서,  $X, Y$ 는, bezout identity  $AX+YD = U$  (3)

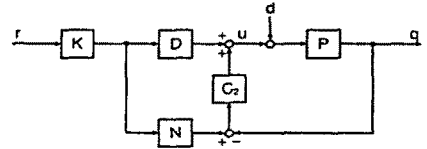


Fig. 1: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller I

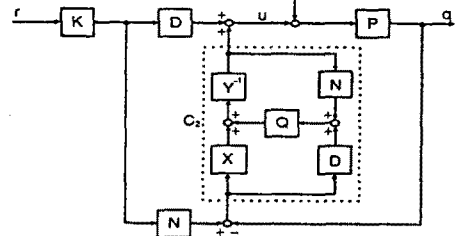


Fig. 2: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller II

을 만족하는 특수해이고,  $M, D, X, Y$ 는  $RH\infty$ 의 요소이며,  $U$ 는 unimodular 함수이다. Fig. 1과 식(2)에 있어서, 설계자가 자유롭게 취급할 수 있는 파라미터는  $K$ 와  $Q$ 이다( $K, Q$ 는  $RH\infty$ 의 요소). 이와같은 기약분해표현을 이용한 제어계의 설계론의 최대 장점인 제어대상  $P$ 가 주어졌을 때, 그것을 피드백하여 안정화하는 모든 보상기가, 어느 하나의 free parameter  $Q$ 를 이용하여 식(2)의 형태로 표현될 수 있다는 점이다. 더욱이, 이것들을 이용하면 2자유도 제어계에 있어서 달성 가능한 전달함수의 class가 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \text{목표치 응답특성} & G_{yr} = NK \\ \text{외란 응답특성} & G_{yd} = (Y - NQ)N \\ \text{감도함수} & S = (Y - NQ)D \\ \text{상보감도함수} & T = (X + QD)N \end{cases}$$

윗 식에서,  $K$ 와  $Q$ 의 2종류의 전달함수를 이용함으로써, 목표치 응답특성( $G_{yr}$ )과 피드백 특성( $G_{yd}, S, T$ )을 독립적으로 설정할 수가 있으며, 이것이 2자유도 제어계가 가지는 장점이다. 그리고 Fig. 1에 있어서  $C_2$ 를 식(2)의 형태로 바꾼 블록 특성을 Fig. 2에 나타낸다. 또한, Fig. 2에 있어서,  $P$ 를 식(1)과 같은 관계를 이용해서, 외란 옵저버의 제어법을 고려한 블록선도도 변형하면 Fig. 3과 같이 된다<sup>[10]</sup>. 위에서 설명한 바와같이 2자유도 제어계의 내부구조는 다음과 같이 세 개의 부분 컨트롤러로 구성되어 있다.

- 1) feedforward 보상(DK) : nominal 플랜트가 정확하다면, 이 부분에 의해 희망의 주동특성(NK)를 얻는다.
- 2) 피드백보상( $Y^{-1}X$ ) : 불안정한 플랜트를 안정화하는 역할을 한다. 단, 플랜트가 안정한 경우에는 생략가능하다. 그리고 nominal 플랜트가 정확하다면, 피드포워드보상의 이득 $q=NK$ 이 되어 신호는 이 부분을 통과하지 않는다.
- 3) 외란 옵저버 : 추정된 외란은  $Y^{-1}Q$ 를 통하여 피드백된다. 즉,  $Q$ 가 시스템의 로비스트 특성을 결정한다.

다음에 Fig. 3에 있어서는, 하나의 파라미터가 복수의 블록 내에 존재하고 있다. 여기에서,  $Q$ 의 표현을 좀더 개량하여 bezout 등식을 이용하면 2자유도 제어계 내부구조는 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다. Fig. 4는 2자유도 제어계의 기약분해표현에 따른 free parameter  $Q$ 가 외란 옵저버에 있어서 외란 추정 주파수 대역을 결정하는 요소인 것을 의미

한다. 따라서, 외란 옵저버를 이용한 운동제어에 적용할 때 외란 추정 필터가 설계상의 파라미터이고, 이 파라미터의 설계 여하에 따라 제어성능은 크게 좌우된다. 다음은 로봇의 궤도제어를 대상으로한 경우의 기약분해표현이다. 제어대상은

$$P = K_i / (Js + D) s \quad (4)$$

로 표현할 수 있다. 여기서  $K_i$ 는 토오크정수,  $J$ 는 관성모멘트,  $D$ 는 점성저항이다. 본 논문에서는, PI 제어와의 대응을 의식하여 다음과 같은 기약분해를 채용할 수가 있다.

$$\begin{aligned} N &= K_i / (Js + D)(s + 1), & D &= s / (s + 1), \\ X &= 1, & Y &= C_{P1}^{-1} s / (k_{P1} s + k_i) \end{aligned} \quad (5)$$

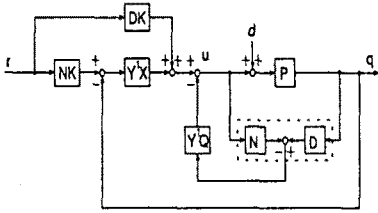


Fig. 3: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller III

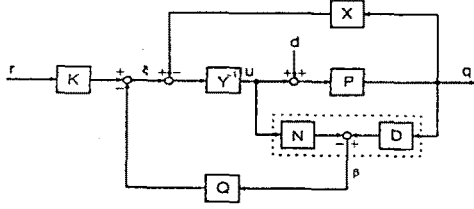


Fig. 4: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller IV

이때 각각의  $N, D, X, Y$ 는  $RH\infty$ 의 요소이며, 식(1)을 만족한다. 식(5)의 기약분해를 적용한 때의 블록선도를 Fig. 5에 나타낸다.

### 3. 플랜트 변동 R의 동정법

본 절에서는 2자유도 보상기의 내부 신호를 이용하여 플랜트 변동분을 동정하는 방법에 대해 논한다. 이때, 노미널 플랜트  $P_n(s)$ 는 free parameter를 포함한 컨트롤러  $C(s)$ 에 의해 안정화되고, 변동후의 플랜트  $P^-(s)$ 는 nominal 콘트롤러  $C_0(s)$ 에 의해 안정화된다고 가정한다. 여기서 nominal 콘트롤러라는 것은 free parameter  $q=0$  일때의 콘트롤러를 의미하고, 다음 식과 같다.

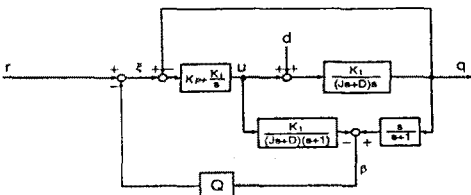


Fig. 5: Block diagram of 2 D.O.F. Controller

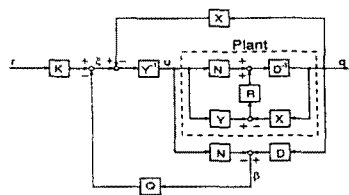


Fig. 6: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller V

$$C_0(s) = Y^{-1} X \quad (6)$$

위의 두번째의 가정으로부터 변동후의 플랜트  $P^-$ 는 다음과 같다.

$$P^- = (N + RY) (D - RX)^{-1} \quad (7)$$

여기에서,  $R$ 은  $RH\infty$ 의 요소로서 변동분을 나타내는 파라미터이고, 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$R = (P - P^-) D (Y - P X)^{-1} \quad (8)$$

단, 각각의  $N, D, X, Y$ 는 식(1)을 만족한다. 이와같은 제어대상의 변동을 표현하는 방법은, 종래의 가법적변동과, 승법적변동을 포함한 형태다<sup>[22]</sup>. Fig. 4중의 플랜트를 식(1)로 치환하여 정리하면 Fig. 5를 얻을 수 있다. 이것을 간단히 하면 r로부터  $\beta$  및,  $y$ 에의 블록선도가 Fig. 6과같이 대단히 간단한 형태로 된다. Fig. 6에서  $\epsilon$ 와  $\beta$ 를 이용하면 보상기의 내부구조를 조금도 변경하지 않고, 파라미터 변동분 R을 동정할 수 있다.

$$\beta = Dq - Nu \quad (9)$$

$$\epsilon = Yu + Xq \quad (10)$$

또한, Fig. 7은 플랜트가 식(1)로부터 식(8)과 같이 변경할 때의 페루프가 안정하기 위한 충분 조건이 다음과 같음을 의미한다.

$$\|RQ\|_{\infty} < 1 \quad (11)$$

식(11)은 제이게가 로버스트 안정이 되기위해 free parameter(외란추정필터)가 만족해야 될 조건이다. 외란 옵저버를 이용한 경우 외란 추정 필터의 cut off 주파수 레벨을 그다지 크게할 수 없다는 것을 식(11)에서 분명히 알 수 있고, 이 결과로부터 식(11)의 조건이 중요한 의미를 띤다. 또한, 식(11)은 R과 Q가 시변수라도 성립하는 조건이기 때문에 R의 변화에 맞춰 Q를 tuning 할 필요가 있다. 더우기, 플랜트 전체를 동정하는 대신에 변동분만을 동정하는 것의 장점으로서 로버스트 안정성에 있어서 필요한 것은 플랜트 그 자체보다는 플랜트의 변동분만이기 때문에, 변동분만을 동정하면 R을 직접 설계에 이용할 수가 있고, 플랜트 전체를 동정하는 경우보다도 설계를 간단히 할 수가 있다.

$$\min \|W(Y - NQ)D\|_2 \quad (12)$$

$$\text{subject to } \|RQ\|_{\infty} < 1 \quad (13)$$

$W$ 는 주파수 가중치로서,  $\|\cdot\|_2$ 는 주파수 가중치를 갖는 감도함수이다. 또한,  $\|\cdot\|_2$ 는, 다음 식과 같이  $H_2$  norm을 나타낸다.

$$\|G\|_2 = [1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega]^{1/2} \quad (14)$$

### 4. 제어 시스템의 구성 및 결과

Fig. 8과 같은 3자유도 수직다관절 DD 로봇체를 제어대상으로하여 동정실험을 행했다. Table 1은 직접 구동형 로봇의 사양이며, Fig. 9은 실험 시스템이다.

각 관절을 독립적으로 Fig. 5와같은 제어계를 구성하고,  $q=0$ 일때  $\epsilon$ 로부터  $\beta$ 까지의 전달함수 R을 동정했다. 하드웨어로서는 80386와 DSP(Digital Signal Processor NEC  $\mu$ PD77230)를 사용했고, 각 블록의 전달함수의 계산, 콘트

Table 1. Specifications of DD robot.

| 관  | 점          | 관점1     | 관점2    | 관점3 |
|----|------------|---------|--------|-----|
| 전력 | 출력 [W]     | 410     | 250    |     |
| 회전 | 속도 [rps]   | 1.2     | 2.4    |     |
| 회전 | 토크 [p/rev] | 1024000 | 655360 |     |
| 링크 | 길이 [cm]    | 40      | 22.5   | 24  |

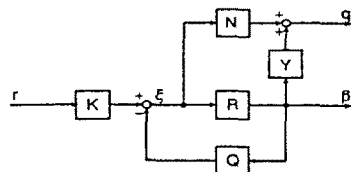


Fig. 7: Internal Structure of 2 D.O.F. Controller VI

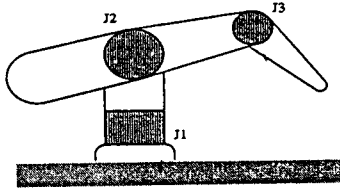


Fig. 8: 3-degree-of-freedom DD robot.

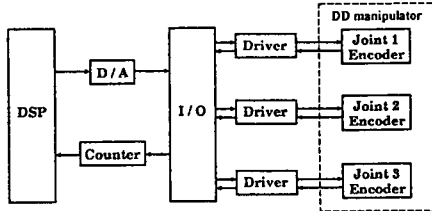


Fig. 9: Schematic diagram of Experimental system

롤러, 동정용의 신호는 DSP와 80386에서 도출하였고, 토오크 지령값은 D/A를 통하여 각 관절의 드라이버에 출력된다. 동정 및 샘플 주기는  $400\mu\text{sec}$ , 데이터의 수는 600개이다. 본 절에서는 주파수 특성이 어느정도 변화하는가를 실험 결과를 통하여 검증하기 위해, 이하에 보이는 것같이 동작 조건을 바꾸어 관절3의 변동분  $R$ 을 동정했다.

실험조건①: 관절1과 관절2를 고정시키고, 관절3의 제어 개체의  $f$ 에 방형파를 입력한 경우 (Fig. 10)

실험조건②: 관절1과 관절2를 고정시키고, 관절2와 관절3의 양쪽의 제어개체의  $f$ 에 방형파를 입력한 경우 (Fig. 11)

실험조건①에 비해 조건②는 관절3이 관절2로부터의 간섭력을 받기 쉬운 경우이다. Fig. 10과 Fig. 11을 비교해보면 로봇의 동작조건에 따라 주파수 특성이 변화한다는 점이 판명되어, 이에따라 free parameter를 재 설계할 필요가 있는 것을 알 수 있다. 그때의  $Q$ 와  $RH\infty$ 의 그래프는 각각 Fig. 12와 Fig. 13과 같다. 이와같이 안정성을 잃지 않는 범위내에서  $Q$ 를 재 설계할 필요가 있다.

## 5. 결론

본 절에서는, 2자유도 보상기의 내부구조에 대해 논하였고, 플랜트 변동분  $R$ 을 동정하는 방법을 설명했다. 그 다음으로

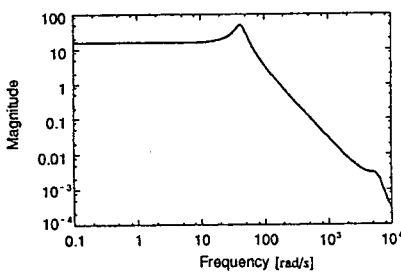


Fig. 10: Identification of plant deviation R(I)

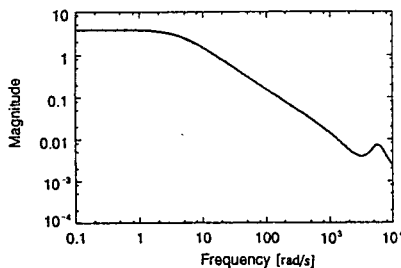


Fig. 11: Identification of plant deviation R(II)

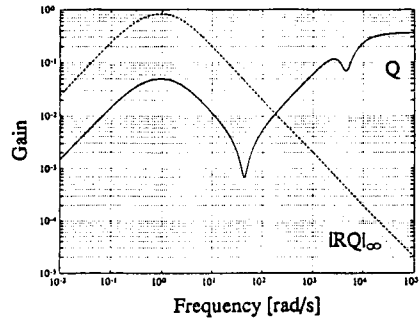


Fig. 12 Design of Compensator Q(I)

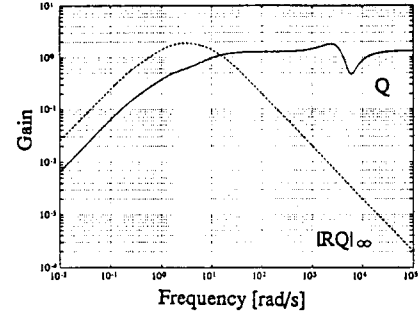


Fig. 13 Design of Compensator Q(II)

이 동정법을 비 선형성이 강한 DD 로봇에 적용하여 동작 조건에 따라 주파수 특성이 변화하는 것을 실험을 통해 확인했다. 따라서, DD 매니퓰레이터를 제어할 경우, 이들의 주파수 특성의 변화를 고려하며, 안정성을 잃지 않는 free parameter  $Q$ 에 알맞은 제어를 할 필요가 있다.

## 참고 문헌

- R.P.Paul: Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, the MIT Press, (1981)
- E.Freund: Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole-Placement for Industrial Robots and Manipulators, Int. J. Robot Res., vol.1-1, pp.65-78, (1982)
- J.Y.S.Luh, M.W.Walker & R.P.Paul: Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Trans. Automatic Control, AC-25, No.3, pp.468-474, (1980)
- M.Nakao, K.Ohishi & K.Miyachi: A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.326-331, (1987)
- 駒田, 村上, 大西: 加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御, 電気学会論文誌 D, Vol.109, pp.325-332, (1989)
- S.Komada & K.Ohishi, Force Feedback Control of Robot Manipulator by the Acceleration Tracing Orientation Method, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-37, pp.6-12, (1990)
- 中, 駒田, 石田, 堀: 外乱オブザーバによる作業座標空間での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電学誌, D, Vol.112, pp.1235-1242, (1992)
- 権野, 堀: 2自由度ロボットのサーボ系の構成とマニピュレータの運動制御への応用, 電気学会論文誌 D, Vol.110, No.11, pp.1163-1170, (1990)
- 杉江, 吉川: 2自由度補償器の基本構造とそのサーボ問題への応用, 計測自動制御学会論文誌, 第22巻, 第9号, pp.156-161, (1986)
- S・ソンプーン: 平成3年電気学会産業応用部門全国大会論文集, #2-4, (1991)
- 松本, 鈴木他: 2自由度制御系の内部構造と補償器のフリーパラメータの設計法, 電気学会論文誌 D, vol.113, No.6, pp.769-777, (1993)
- T.T.Tay et al.: Indirect adaptive techniques for fixed controller performance enhancement, Int. J. Control, vol.50, No.5, pp.1941-1951, (1989)
- M.Vidyasagar: Control System Synthesis, MIT Press, (1985)
- 前田, 杉江: アドバント制御のためのシステム制御理論 (システム制御情報ライブラリー 3), 朝倉書店, (1990)