

2자유도 적용 제어기에 의한 AC 서보 모터의 속도제어

이석호^o, 이제희, 허육렬
인하대학교 전기공학과

Speed Control of AC Servo Motors using Adaptive Two-Degrees-of Freedom Controller Design

Seok ho Lee^o, Je hie Lee, Uk-youl Huh
Department of electrical engineering , Inha Univ.

Abstract

We propose speed controller of AC servo motors using adaptive two-degrees-of freedom controller design. The overall control system consists of three elements: a forward speed controller, parameter identifier and disturbance observer. This servosystem can improve the characteristics of the closed loop systems with the disturbance observer by eliminating the disturbance torque without changing the command input response. Moreover, the system can be adaptable to the parameter variation by employing adaptive scheme. We will show the control performances through the simulation results.

1. 서론

최근 외관의 억제를 위한 견실한 서보 시스템의 연구가 널리 행해지고 있다. 이러한 결과로 다양한 견실 제어기들이 제안되어져 오고 있다. 가변구조 제어(슬라이딩 모드 제어), H_∞ 제어, 외란 관측자, 앞미음 제어기 등이 그러한 예로 할 수 있다.

본 논문에서는 AC 서보 모터의 속도제어를 위한 외란 관측자를 갖는 적용 제어기를 제안한다. 일반적인 외란 관측자는 직류 외란(dc-disturbance)의 보상에만 제한되어지고 외관의 제거를 위한 주파수 대역 폭을 조절하는데는 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 자유 매개변수(free parameter)를 조절하여 이러한 문제점을 개선하고, 또한 2자유도 개념을 이용하여 기준입력용답과 폐루프 특성을 각각 독립적으로 설계하므로써 지령치에 대한 응답특성을 변화시키지 않으면서 폐루프 특성을 개선한다. 그리고, 외관 제거의 대역폭 조절을 위한 자유매개 변수를 결정하는데 있어서 Butterworth필터의 설계방법을 이용한다. 이러한 종류의 외란 관측자의 설계는 Umeno와 Hori[1]에 의해 제안되었던 바 있다.

포워드 속도제어기로써는 IP(Integral-Proportional)제어기를 사용하였다. 여기서 사용된 IP 제어기는 고전적인 PI제어기와는 약간은 다른 개념으로, PI 제어기를 사용함으로써 만들어지는 영점의 영향에 의해 발생할 수 있는 오버슈트의 문제점을 보완하고, 적용제어기의 설계를 용이하게 한다[2].

또한, 계수 추정기를 사용하여 매 스텝마다 시스템 모델의 계수값들을 추정하고, 외란 관측자를 구성하는데 이 값들을 사용하는 한편, 적용과정을 거쳐 포워드 속도제어기의 이득 값을 조절한다.

본 논문에서 제안되며는 서보 시스템은 디지털 형태로 구현되고, 서보 시스템의 각 요소들은 이산시간 영역에서 소개되어지며, 만약 연속시간 영역으로 소개되었더라도 구현에 있어서는 디지털 형식으로 변형된다.

본 논문의 구성은 2장에서는 제안된 서보 시스템의 설계에 대하여 설명하고, 3장에서는 모의 실험을 통하여 제안된 서보 시스템의 성능을 검증한다. 마지막으로 4장에서는 이에 대한 결론을 기술한다.

2. 제안된 서보 시스템

그림 1은 제안된 시스템의 전체적인 블럭 선도이다. 이 그림은 시스템의 제어기가 다음과 같은 세 부분으로 구성되어 있음을 보여준다: IP 제어를 이용한 포워드 속도제어기, 계수 추정기, 외란 관측자.

그림의 플랜트는 AC 서보 모터이고, 이 모터의 전류가 이상적으로 제어된다는 가정으로, 모터의 토크가 식(1)과 같이 표현된다면, 플랜트의 전달함수는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = (3/2)K_i i^* \quad (1)$$

이때, T, K_i, i^{*}는 각각 토크, 토크상수, 제어된 전류이다.

$$G_T(s) = \frac{\omega(s)}{i^*(s)} = \frac{1.5K_i}{Js + B} \quad (2)$$

이때, J, B는 각각 관성 모멘트, 마찰계수이다.

다음에는 제안된 서보 시스템의 각 부분의 구조와 기능에 대해서 자세하게 기술한다.

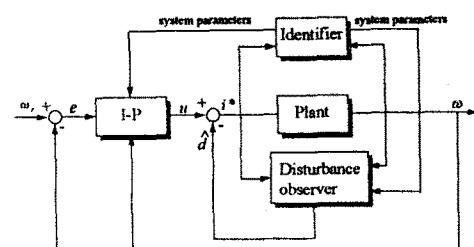


그림 1. 서보 시스템의 전체구조

2.1 외란 관측자

많은 것을 고려하여 일어낸 모델이라 하더라도, 실제 시스템은 그것과 똑같이 동작할 수는 없다. 본 논문에서 제안한 외란 관측자는 이러한 실제 출력과 공정 모델의 출력과의 차이를 고려

하고, 공정 모델에 가해지는 등가 외관을 추정하여, 그 값을 되며 시켜서 외관 상쇄작용을 하는 신호로써 사용한다. 그것의 구조는 그림 2에서 보여준다.

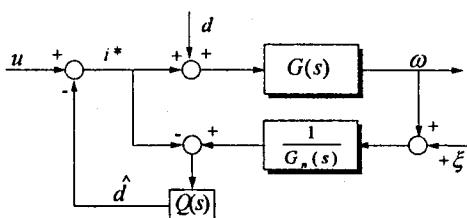


그림 2. 외관 관측자의 구조

* 제안된 외관 관측자의 기본적인 개념

외관 관측자의 동작을 쉽게 이해하기 위해서 먼저, 그림 2에서 $Q(s) = 1$ 로 한다. 그러면, 입력 u 에 대한 식은

$$u = \frac{G_n(s)}{G(s)} i^* - d - \frac{1}{G(s)} \xi \quad (3)$$

여기서, $G(s)$, d , ξ 는 각각 실제 플랜트의 전달함수, 외관, 측정 잡음.

이되고, 이것을 이용하여 플랜트의 출력을 나타내면,

$$\omega = G_n(s) i^* - \xi \quad (4)$$

이된다. 식(4)로부터 시스템의 입력 i^* 과 출력 ω 의 관계가 오직 공정 모델에 의해서만 표현됨을 알 수 있다. 또한, 추정 외관 $\hat{\alpha}$ 에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$\hat{\alpha} = \left[1 - \frac{G_n(s)}{G(s)} \right] u + \frac{1}{G(s)} \xi + d \quad (5)$$

여기서, $\hat{\alpha}$ 는 추정 외관이다.

만약 플랜트가 공정 모델과 똑같이 동작하고, 측정 잡음이 없다고 가정하면 추정 외관($\hat{\alpha}$)은 실제 외관(d)과 같아지게 된다. 이러한 이유 때문에 이것을 외관 관측자라 칭한다. 이 추정 외관을 되먹임 시켜서 시스템의 외관이 상제되도록 한다. 또한, 제안된 외관 관측자는 외관 뿐만 아니라, 측정 잡음까지 고려할 수 있다. 외관 관측자의 매개변수인 $Q(s)$ 를 조절하여 식(5)에서 나타나는 측정잡음의 영향을 덜어주는 역할을 한다. 그래서 매개 변수 $Q(s)$ 의 적절한 선택이 외관 관측자를 설계하는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다.

* 매개변수 $Q(s)$ 의 선택

전체 시스템의 기준입력 응답을 $G_{ry}(s)$ 라 할 때, 페루프 시스템의 특성은 다음과 같이 유도되어 진다.

$$S(s) = (1 - Q(s))(1 - G_{ry}(s)) \quad (6)$$

$$G_{dy}(s) = S(s)G_n(s) \quad (7)$$

$S(s)$ 와 $G_{dy}(s)$ 는 각각 감도 함수, 외관 입력 응답.

이때, 감도함수(sensitivity function)는 시스템의 변화에 대한 감도를 나타내기 때문에 노음 $|S(j\omega)|$ 를 충분히 작게 하여 시스템의 견실성을 얻도록 하는 것이 바람직하다. 보감도함수

(complementary sensitivity function) $T(s)$ 역시 페루프 특성 중에서 고려되어져야 할 함수인데, 이것은 식(8)과 같다.

$$T(s) = 1 - S(s) \quad (8)$$

여기서, 보감도 함수 $T(s)$ 는 센서의 잡음 ξ 으로부터 출력 ω 까지의 전달함수를 표시하기 때문에 이것의 노음 역시 작은 값을 유지하도록 해야한다. 그러나, 두개의 노음 $|S(j\omega)|$ 과 $|T(j\omega)|$ 을 전 주파수 영역에 걸쳐 동시에 작은 값으로 유지한다는 것은 사실상 불가능하다. 외관의 억제는 저주파 영역에서 더욱 중요하고, 잡음 성분은 보통 고주파 영역에서 높은 값을 갖기 때문에 저주파 영역에서는 $|S(j\omega)|$ 을 작게 하고, 고주파 영역에서는 $|T(j\omega)|$ 를 작게 조절하여주는 방법을 사용한다.

그러면, 이러한 특성을 갖도록 이 값을 어떻게 조절하는지를 살펴보자.

$Q(s)$ 의 차단 주파수(cutoff frequency)가 G_{ry} 보다 훨씬 높다면, 다음과 같은 근사치를 얻을 수 있다.

$$|S(j\omega)| = |1 - Q(j\omega)| \quad (9)$$

$$|T(j\omega)| = |Q(j\omega)| \quad (10)$$

그리므로, 위에서 언급한 $S(s)$ 와 $T(s)$ 의 노음의 조건을 만족하기 위하여, $Q(s)$ 는 저역 통과 필터, $1-Q(s)$ 를 고역 통과 필터의 특성을 갖도록 설계해야한다.

본 논문에서는 지역 통과 필터로서의 $Q(s)$ 를 결정하기 위해서 Butterworth 저역 통과 필터의 설계방법을 이용한다. 그리고, 다음과 같이 매개변수 $Q(s)$ 의 차수에 의해서 서보 시스템의 이름을 정한다.

$$\text{Type 0 : } Q(s) = 0 \quad (11a)$$

$$\text{Type 1 : } Q(s) = \frac{1}{(sr)+1} \quad (11b)$$

$$\text{Type 2 : } Q(s) = \frac{1.41(sr)+1}{(1.41sr)^2+1.41(sr)+1} \quad (11c)$$

여기서, r 는 매개변수의 차단주파수를 결정한다. 단, Type 0은 외관 관측자가 없는 경우를 말한다.

외관 관측자에서의 $1/G_n(s)$ 가 가속도 요소를 갖기 때문에 구현하는데 있어서 약간의 변형을 필요로 한다. 그리고, 이것의 각 부분은 이산화에 의해 구현된다.

2.2 적응 제어기의 설계

본 논문에서는 포워드 속도제어기로써 IP(integral-proportional) 제어기를 사용한다. 고전적인 PI제어기에서 비례 이득이 상태의 오차에 인가되는데 반해, 여기에서 사용되는 IP제어기는 비례 이득이 제어된 상태에 인가된다는 점에 있어서 고전적인 PI제어기와 다르다. 이런 결과로 IP제어기는 영점을 갖지 않게되고, PI제어기에서 발생될 수 있는 영점 의한 오버슈트의 문제점을 해결할 수 있다. 더욱이, PI제어기는 영점의 영향으로 완전한 적응 극제어 제어를 얻어내지 못한다. 반면에, 영점이 없는 IP제어기는 극점을 미리 배치하여 원하는 상승시간을 오버슈트 없이 결정할 수 있다.

본 논문에서 사용되는 IP제어기의 이산화 형태는 다음과 같다.

$$x_w(t+1) = x_w(t) + \delta_w(w_r(t) - w(t)) \quad (12)$$

$$i^*(t) = K_I x_w(t) - K_p w(t) \quad (13)$$

여기서, x_w 는 적분기의 상태, w_r 는 지령 속도, δ_w 는 샘플링 주기, K_I 와 K_p 는 이득을 나타낸다.

* 메개변수의 선택

시스템 모델의 계수를 식별하는데는 순환형 최소자승(Recursive Least Square)추정 법을 사용한다. 순환형 최소 자승 법을 기초로한 식별기들은 그것의 빠른 수렴성과 구현의 용이성 때문에 널리 사용되어지고 있다.

먼저, 추정자의 구성을 위해 식(2)를 다음과 같은 이산화 모델로 변형시킨다.

$$w(t) = [\begin{matrix} a & b \end{matrix}] \left[\begin{matrix} w(t-1) \\ i^*(t-1) \end{matrix} \right] \equiv \phi^T \phi(t) \quad (14)$$

여기서 $a = e^{-(B/J)\delta_t}$, $b = \frac{1.5K_t}{J} \int_0^{\delta_t} e^{-(B/J)\delta_t} d\tau$, 위첨자 T는 전

치벡터를 나타낸다.

이 모델로부터 다음과 같은 ϕ 에 대한 순환형 최소자승 추정자를 구성한다.

$$\hat{\phi}(t) = \hat{\phi}(t-1) + T(t)[w(t) - \hat{\phi}^T(t-1)\phi(t)] \quad (15)$$

$$T(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{\lambda(t) + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \quad (16)$$

$$P(t) = \left[P(t-1) - \frac{P(t-1)\phi(t)\phi^T(t)P(t-1)}{\lambda(t) + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \right] \frac{1}{\lambda(t)} \quad (17)$$

이때, $\hat{\phi}$ 는 추정 매개변수, T는 이득벡터, P는 상호분산행렬, $\lambda(t)$ 망각함수(forgetting factor)이다.

그러나, 이것을 구현하는데는 다음과 같은 몇 가지 문제점들이 발생한다: 외란이 가해졌을 때의 발산 문제, 'blow-up' 문제, $P(t)$ 행렬의 0으로의 수렴등

제수 추정기를 구성하는데 있어서 이러한 문제점들을 고려하여, 이것들의 해결을 위해 몇 가지 방법들을 사용하였다.

앞에서 언급한 최소 자승 추정법의 구현에 있어서의 문제점 중 $P(t)$ 행렬의 0으로 수렴 또는 'blow-up' 등에 관한 문제점을 해결하기 위해 식(19)에서의 망각함수를 고정된 값으로 사용하지 않고 변화하는 합수로 사용하였다. 가변 망각함수를 결정하는 방법은 많은 사람에 의해 제안되어져 왔지만, 본 논문에서는 다음과 같이 Lozano-leal 과 Goodwin(1985)[3]에 의해 제안된 방법을 사용한다.

$$\lambda(t) = \frac{tr P(t)}{tr P(0)} \quad (18)$$

이 방법은 구현이 쉽고, 해결하고자 하는 문제인 $P(t)$ 행렬이 0으로 수렴하는 문제와 'blow-up' 현상을 완전히 해결한다. 또한, 햄프 신호나 주기 함수 신호같이 형태는 알 수 있으나 크기를 모르는 확장적 외란 신호를 제거하는 외란 제거 필터 $H_d(q)$ 가 추정자의 입력과 출력에 각각 위치하여 추정과정에서 외란의 영향을 받지 않게 했다. 이 필터는 외란 신호에 포함되어 있는 저주파와 고주파 성분을 모두 제거하기 위한 대역 통과 타입의 형식을 취한다. 외란 제거 필터 $H_d(q)$ 는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$H_d(q) = \frac{(1-\alpha)(q-1)}{q-\alpha} \quad (19)$$

여기서 $|\alpha| < 1$. 매개변수 α 는 페루프의 위상교차 주파수의 2-10배의 값을 취한다. [4]

2.3 제어 이득 결정

시스템의 추정된 계수 값들은 포워드 속도제어기와 외란 관측자에 보내지고, 이 값들은 직용 과정중 미리 지정한 페루프 극점의 위치를 계속해서 유지할 수 있도록 이 값들은 포워드 속도제

어기의 이득 값을 조절하는데 사용된다. 그때의 이득 값들은 다음과 같은 형태로 정해진다.

$$K_p = (1 + \alpha - \mu_1 - \mu_2) / t \quad (20)$$

$$K_i = (1 - \mu_1 - \mu_2 + \mu_1 \mu_2) / (b \delta_{\omega}) \quad (21)$$

여기서, $\mu_{1,2}$ 는 페루프의 원하는 극점.

제안된 외란 관측자가 모델과 플랜트의 차이에 관한 문제점을 해결한다고는 하지만, 시스템의 계수들이 매우 큰 폭으로 변한다면 이 서보 시스템의 안정성은 치커지기 힘들어진다. 이런 경우의 문제점 해결 방법은 추정자를 이용하여 변화하는 계수들을 추정하는 것이다. 추정자에서 추정된 값들이 포워드 제어기의 이득 값을 조절하는데 사용되는 동안, 이것들은 또한 외란 관측자로 보내져서 관측자내의 $1/G_n$ 의 계수들로 사용되어 계수들이 큰 폭으로 변하여도 거기에 대응하는 외란 관측자가 구성된다.

3. 모의 실험 결과

제안된 시스템의 구현을 위해 앞에서 언급한바와 같이 서보 시스템을 등가적으로 변환한다. 그림 3은 Type 1의 서보 시스템을 변환한 것인데 다음과 같이 수정함으로써 유도된다.

$$\frac{1}{rs+1} \frac{J+\bar{B}}{1.5K_t} = \frac{1}{1.5K_t} \left(\frac{J}{\tau} - \frac{J/\tau - \bar{B}}{rs+1} \right) \quad (22)$$

Type 2 역시 같은 방법으로 변화하여 구현한다. 그리고, 시스템의 타입이 증가할 수록 성능이 좋아질 것을 기대할 수 있다. 다음에는 몇 가지의 모의 실험을 통하여 시스템의 각 타입에 대한 외란 억제 및 계수 변화에 대한 견실성 등을 보여준다.

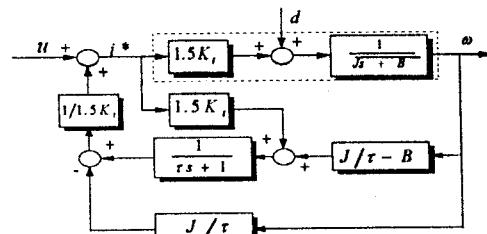


그림 3 외란 관측자의 제구성

3.1 외란 억제 효과

그림4(a),(b),(c)는 $\omega_r = 0$ 일 때, 크기가 +/- 1.5 [Nm]를 갖는 구형 파의 부하 외란이 가해졌을 때, 각 타입의 속도리를 보여 준다. Type 0의 서보 시스템이 외란에 매우 많은 영향을 받아 외란이 들어오는 매 스텝마다 오버슈트가 크게 생기는 반면, Type 1과 Type 2의 서보 시스템의 오버슈트는 Type 0의 2%정도에 불과해서 외란 관측자에 의해 시스템의 부하 외란이 효과적으로 억제되는 것을 알 수 있다.

3.2 매개변수의 변화에 대한 견실성

그림 5 (a),(b),(c)는 모터의 관성 모멘트가 공칭치의 10배까지 변할 때(매우 드문 경우이지만)의 속도 지령치를 0 → 50 → 0 [rad/sec]로 변화를 시켰을 때의 응답 곡형이다. 관성 모멘트가 변하는 동안 계수 추정기가 변화하는 값을 추정하여 외란 관측자에 보내주기 때문에 시스템의 타입에 많은 차이없이 모두 안정된 응답을 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문은 2차유도 쥐용제어기에 의한 AC서보 모터의 속도제어를 제안했다. 이러한 접근에 의해, 시스템의 변화와 외란 등에 견실성을 유지하면서 원하는 기준입력 응답을 얻을 수 있었다.

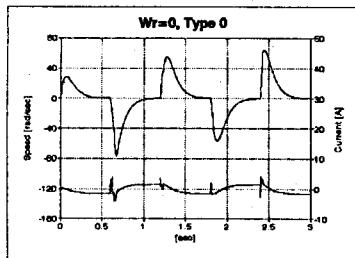
특히, 제안된 서보 시스템에서의 외란 관측자는 시스템의 성능 향상을 위해 매우 중요한 역할을 한다. 또한, 자유 매개변수(free parameter)Q의 설계는 이러한 외란 관측자를 설계하는데 있어서 핵심이라 할 수 있다. Q의 차수가 높아짐에 따라 시스템의 외란의 억제효과는 커지고, 반면에 잡음에 대한 영향은 오히려 높아난다. 다시 말해서, Type 0의 서보 시스템은 외란의 영향을 많이 받는 반면, 잡음에 대해서는 가장 둔감하다고 할 수 있다. 그래서, Q의 차수를 늘리면서 그것의 계수인 τ 값을 조절하여 외란의 영향을 줄이도록 했으나 그것은 매우 좁은 주파수 영역만을 조절 할 수 있다. [3]

본 논문에서는 직용 메커니즘을 사용하여 이러한 문제점을 해결하였다. 외란 관측자에서 사용하는 공정 모델이 계수 추정기에서 보내지는 추정된 값을 사용함으로써 실제의 플랜트와 매우 가깝게 되어 Type 0의 시스템에 비해 Type 1의 성능이 매우 많이 개선되나, Type 1 이후에는 서보 시스템의 타입이 증가하여

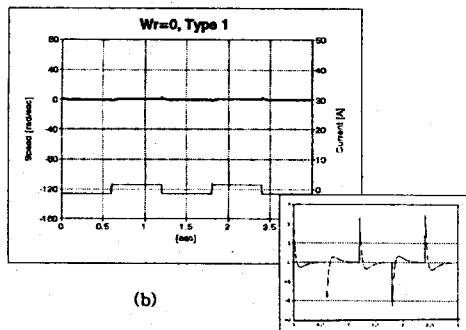
도 시스템의 성능이 많은 차이를 보이지 않음을 모의 실험 결과로 알 수 있다. 그래서, 외란 억제나 매개변수 변동에 대한 견실성의 향상을 위해 Q의 차수를 높은 차수까지 올려 시스템을 잡음에 민감하게 할 필요가 없어졌다.

참고문헌

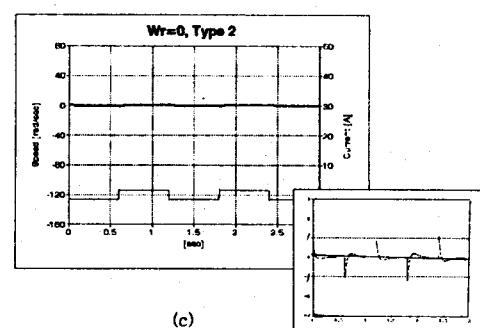
- [1] T. Umeno and Y. Hori, "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," IEEE Trans. Ind. Elec. vol 38, No. 5, pp 363 ~ 368, October 1991,
- [2] Dal Y. Ohm, " Theory and applications of AC motor servo systems", The 23rd annual symposium on incremental motion control systems and devices tutorial notes pp A2.1 ~ A2.9, 1994.
- [3] O. P. Malik, G. S. Hope and S. J. Cheng, " Some issues on the practical of recursive least squares identification in self-tuning control," Int. J. control, vol. 53, No. 5, pp 1021 ~ 1033, 1991.
- [4] K. J. Astöm and B. Wittenmark, Adaptive Control, 1989.



(a)

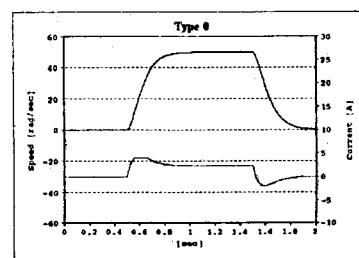


(b)

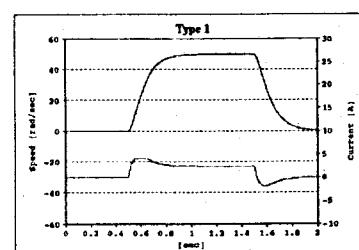


(c)

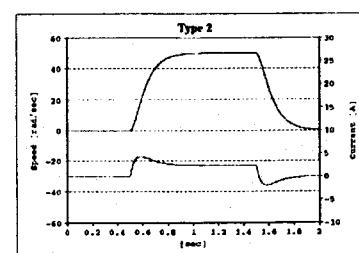
그림 4 구형파의 부하 외란을 가했을 때의 속도 응답
($\tau = 1 \text{ ms}$)



(a)



(b)



(c)

그림 5 관성 모멘트가 공정치의 10 배일 때의 속도응답
($\tau = 1 \text{ ms}$)