

고전제어와 현대제어의 비교 (Comparison of Classical Control and Modern Control Methods ; Practical Issues)

저자 (Authors)	이건복
출처 (Source)	대한기계학회 춘추학술대회 , 1999.1, 1-5(5 pages)
발행처 (Publisher)	대한기계학회 The Korean Society of Mechanical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00333289
APA Style	이건복 (1999). 고전제어와 현대제어의 비교 (Comparison of Classical Control and Modern Control Methods ; Practical Issues). 대한기계학회 춘추학술대회, 1-5
이용정보 (Accessed)	경북대학교 상주캠퍼스 220.66.218.*** 2021/07/08 16:20 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

고전제어와 현대제어의 비교 Comparison of Classical Control and Modern Control Methods ; Practical Issues

이 건 복*(숭실대학교)

Gun Bok Lee(Soong Sil Univ.)

Key Words: Classical and Modern Control(고전과 현대제어), H_∞ Control(H_∞ 제어), μ -synthesis (μ -설계법), Loop Shaping(루프 성형), Sensitivity and Complementary Sensitivity(감도 및 보감도 함수), Controller Reduction(제어차수 축소화)

ABSTRACT : This work briefly presents some major differences in system synthesis techniques in classical control and modern control. They include problem formulation, stabilization controller design, performance specification, robustness, easiness in practical application, etc. Especially comparison is made on how both schemes describe performance specification, robustness in stability and performance, and incorporate such design requirements and constraints. Also compares those two in view of design simplicity, conservativeness, degree of freedom in design parameters. Conclusive remarks are each has its own advantages from practical viewpoints.

1. 서 론

제어이론은 대체로 1960년대까지를 고전제어, 그 이후를 현대제어로 구분하여 부르고 있으며 현대제어는 1980년대에 이르러 H_∞ 제어가 등장하여 모든 제어기법을 포괄하는 탁월성을 발휘하고 있으며 μ -설계, LMI(선형 행렬 부동식)등으로 발전을 거듭하고 있다. 1950년대에 체계화된 고전제어 이론은 근계적법, 주파수 응답법 등을 이용하여 단일 입출력 시스템의 설계에 적용되었으며 특히 제어기 구조로서 PID제어를 많이 사용하였다. 1960년대에 이르러 우주선제어와 항공기 제어등의 필요성에 따라 최대원리를 적용한 최단 시간제어 또한 성능사양의 표현으로서 2차 형식의 평가함수를 최소로 하는 최적제어(LG 또는 LQG제어) 등이 수많은 연구되어 그 체계가 확립되었다. 이 시대의 제어이론은 주파수 응답 대신에 상태방정식을 도입하고 제어대상도 다입력 다출력계를 취급하였으며 1970년대에는 상태 피드백제어를 중심으로 극배치 제어, 최적제어와 관측기를 결합한 LQG 제어 등이 확고하게 지위를

점하게 되었다. 1980년대에는 마이컴 등장으로 이전보다 간단하고 쉽게 실제의 제어문제를 구현할 수 있게 되었다. 그러나 이론적으로 모델화오차를 평가하여 제어기 설계시 반영하고자 하는 배려는 그다지 많지 않았다.

고전제어에서는 계인여유, 위상여유를 이용해서 모델오차의 영향을 평가하고 있습니다만 제어한계를 명백히 하기 어렵고 또한 다입력 다출력 시스템(MIMO)에 적용하기 어렵다는 문제가 있다. LQG 제어에서도 관측기의 존재로 인하여 제어대상의 파라메타 변화를 허용치 않으며 고차 공진계를 저차로 근사화한 모델을 사용하여 설계했을 때 스텝오버 현상으로 공진극이 불안정축으로 이동하는 문제가 발생한다. 그러나 제어방식에서 이러한 현상을 방지하기 위한 장치는 없다. 이러한 미비점을 배경으로 1980년대부터 로버스트 안정성에 관한 연구가 중요시되어 로버스트 안정조건을 기술하기 위해 상태방정식 대신에 다시 주파수 응답을 이용하게 되었으며 그 이론적 토대가 H_∞ 제어이론으로서 확립되었다. 모델오차에 대해 외란제거나 저감도 특성등을 달성하기 위한 제어기 설계문제를 페루프 전달함수와 계인

특성을 성형(shaping)하는 문제로 전환하고 이는 H_∞ 제어이론으로 해결할 수 있게 되었다. 이로써 고전제어의 루프성형법 같은 주파수 영역설계를 보다 체계적으로 행할 수 있게 되었다. H_∞ 제어이론은 LQ나 LQG 제어이론을 포함하는 일반적 제어이론으로서의 그 가치를 인정받고 있으며 LQ제어이론의 리카티 방정식의 해를 구하는 정도의 계산량으로 수치제안에 의해 해를 구할 수 있다. 이는 H_∞ 제어문제가 주파수 영역과 시간영역의 양자(兩者)로부터 해석이 가능함을 의미하며 따라서 우수한 제어기 설계를 위해서는 양쪽을 모두 잘 이해하는 것이 대단히 중요하다. 90년대에는 최선단 이론으로서 μ -설계법과 LMI를 이용한 제어기 설계법이 출현하여 계속 연구가 진행되고 있으며 이들은 모두 H_∞ 제어이론을 바탕으로 하고 있다.

본 기고문에서는 앞에서 언급한 제어이론의 역사적 배경을 바탕으로 고전제어와 현대제어의 차이점을 보다 구체적으로 기술하고 실제 문제에 적용할 때 특히 배려해야 할 사항을 이론전개 과정에 비추어 비교한다. 이러한 비교를 통하여 제어이론을 공부하는 연구자나 이론의 응용에 관심이 있는 현장 제어 엔지니어들에게 조금이라도 두 제어이론의 장점에 바탕한 우수한 제어시스템 설계의 동기를 촉발하는 계기가 되기를 바란다.

2. 두 제어이론의 특징

제어계를 설계하는 경우 대략 다음의 다섯가지 사항에 대해 주의를 기울이지 않으면 안된다. 즉 설계된 제어계가 ‘안정한가’, ‘정상특성이 사양을 만족하는가’, ‘응답성이 양호한가’, ‘외란의 영향을 그다지 받지 않는가’, ‘모델오차가 있거나 파라메타가 변할 지라도 제어성능에 그다지 변화가 없는가’, 등이 이에 해당된다.

고전제어에서는 시스템 표현으로서 전달함수와 주파수특성을 설계사양으로서는 게인여유, 위상여유, 정상편차, 정정시간 등이 이용되고 있다. 사용되는 주요 수학적 기법으로는 Routh-Hurwitz법에 의한 안정도 판별법, 근궤적법, Bode 선도나 Nyquist 선도 등이 있으며 이들을 이용하여

위상진상, 위상지상 등을 중심으로한 출력 피드백, PID 보상기 등을 설계하고 주로 상기 5가지 중 안정성, 정상특성, 응답성 등을 만족시키고자 한다.

현대제어에서는 먼저 LQ제어의 특징을 살펴보면 제어대상을 상태방정식으로 표현하고 2차형식 평가함수를 최소화하는 제어 u 를 상태 피드백으로 구한다.

$$u = -R^{-1}B^TKx$$

K 는 리카티 방정식에서 구할 수 있으며 2차 평가함수의 가중치를 적절히 선정 하는 것에 의해 안정성과 속응성을 갖춘 시스템을 구성할 수 있다. 최적제어에서는 SISO 시스템의 경우 페루프 전달함수의 분모에 해당하는 Return Difference가 1보다 크게 되어 자연히 로버스트성을 갖게 되나 이는 제어기 설계과정에서 결과적으로 된 것으로서 로버스트 시스템을 설계하고자 의도한 바에 의해서 된 것이 아님을 주목해야 한다. 상태나 관측에 잡음이 있는 경우는 Kalman Filter를 구성하며 Filter의 상태를 이용해서 제어 u 를 구하는 방법은 LQG제어기법으로서 잘 알고 있는 바와 같다. LQG 제어에서는 잡음의 통계적 성질을 미리 알고 있어야 한다는 결점이 있다. H_∞ 제어는 기본적으로 2입력 2출력을 갖는 MIMO제어에 해당한다. 제어목적은 보상기에 의해 외란신호와 제어량의 전달함수의 무한대 노음을 설정값 이하로 하도록 함으로써 달성되며 두 개의 Riccati 대수방정식의 안정정해를 이용하여 설계한다. 이러한 설계방식을 통하여 제어대상의 파라메타 변화나 고차 모드와 생략에 의한 모델 오차에도 불구하고 안정성, 정상특성, 속응성, 외란억제 특성을 원하는 정도까지 달성하는 제어시스템 구성이 가능하게 된다.

3. 제어특성과 성능사양 달성방법의 비교

제어특성에는 정상특성, 과도특성, 외란제거능력, 안정성, 감도특성 및 이들의 모델오차에 대한 로버스트성을 열거할 수 있다. 이들 특성간에는 trade-off가 있어서 모든 것을 다 만족시킬 수 없

기 때문에 설계시에는 이들간의 균형을 유지하여야 한다. 제어특성은 감도함수(S)와 보감도함수(T)를 이용하여 나타낼 수 있으며 trade-off는 두 폐루프 전달함수간의 특이점을 이용하여 설명할 수 있다.

3.1 감도함수와 보감도함수

제어대상 P와 제어기 K로 구성되는 Fig. 1의 피드백 시스템에서 감도함수와 보감도함수는 다음과 같이 정의된다.

입력루프전달함수 L_i , 출력루프전달함수 L_o

$$L_i = KP, \quad L_o = PK$$

$$\text{입력감도함수 } S_i = (I + L_i)^{-1}, \quad u_p = S_i d_i \quad (1)$$

$$\text{출력감도함수 } S_o = (I + L_o)^{-1}, \quad y = S_o d \quad (2)$$

$$\text{입력보감도함수 } T_o = I - S_o = L_o(I + L_o)^{-1} \quad (3)$$

$$\text{출력보감도함수 } T_i = I - S_i = L_i(I + L_i)^{-1} \quad (4)$$

두 전달함수 간에는 다음의 관계가 있다.

$$S_i + T_i = I, \quad S_o + T_o = I \quad (5)$$

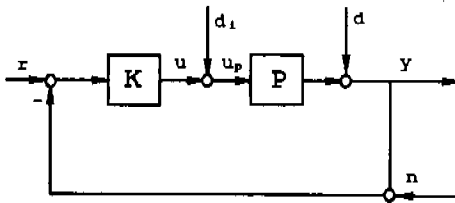


Fig. 1. Standard Feedback Configuration

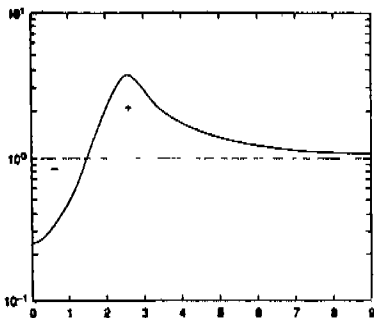


Fig. 2 $|S(j\omega)|$, log scale, versus ω , linear scale

식(5)의 관계로부터 두 함수간에는 모두 루프

인을 동시에 작게하거나 동시에 크게 할 수 없다는 제약을 갖는다. 또한 p 를 $\text{Re } s \geq 0$ 에 있어서 루프 전달함수 L 의 극, z 를 $\text{Re } s \geq 0$ 에 있어서 L 의 영점이라 할 때,

$$S(p) = 0, \quad S(z) = 1 \quad (6)$$

$$T(p) = 1, \quad T(z) = 0 \quad (7)$$

의 관계가 있기 때문에 제어대상 P가 불안정하거나 비최소위상 특성을 가질 때에는 폴렌트의 불안정 영점이나 극점 부근의 $s=j\omega$ 에서는 감도함수와 보감도함수의 주파수 성형이 어렵게 된다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 어떤 주파수 대역에서 $|S(j\omega)| < 1$ 이면 반드시 $|S(j\omega)| > 1$ 인 주파수 대역이 존재하기 때문에 모든 주파수 대역에서 감도함수를 작게 할 수는 없다.

3.2 제어성능간의 Trade-off

$\Delta(s)$ 를 폴렌트의 모델오차라 할 때 $\sigma_{\max}(\Delta(j\omega)) \leq W(j\omega)$ 를 만족하는 오차 $\Delta(s)$ 에 대해 폐루프계가 로버스트 안정이기 위한 필요충분조건은 $T(S)$ 가 안정하고 동시에 모든 주파수 대역에서

$$\sigma_{\max}(T(j\omega)) \leq \frac{1}{W(j\omega)}$$

이 성립하는 것이다. 또

한 그림 1로부터 $\sigma_{\max}(T(j\omega))$ 가 작을수록 잡음에 대한 영향이 감소하게 됨을 알 수 있다. 감도함수도 $\sigma_{\max}(S(j\omega))$ 가 작을수록 외란제거 능력이 증대되기 때문에 작을수록 바람직한 제어성능을 갖게 된다. 이 두 특성이 동시에 작은 것이 바람직 하지만 앞절에서 본 바와같이 동시에 작게 할 수는 없기 때문에 저대역에서는 감도 특성을 작게하고 고대역에서는 보감도함수를 작게 하므로써 루프성형을 달성하게 되며, 이와같이 제어계 특성을 주파수 영역에서 평가하고 실제에 반영하는 방법이 제어계 설계과정에서 대단히 중요하다.

3.3 고전제어의 루프 성형

고전제어에서는 안정여유를 나타내는 지표로서 게인여유와 위상여유를 이용한다(Fig. 3) 그러나 실제 모델오차의 크기를 정량적으로 평가하지 않기 때문에 모델오차가 크면 여유가 있어도 실제

로는 불안정하게 되고 여유가 작아도 모델오차가 작으면 불안정하게 되지 않는다. 이러한 점을 착안하여 H_∞ 제어를 비롯한 현대제어에서는 모델 오차를 정량적으로 평가하여 로버스트 안정조건을 유도한다. 앞서 언급한 페루프 제어 전달함수에 관한 조건을 개루프 전달함수에 관한 조건으로 나타내면 대략적으로 Fig. 4와 같이 되며 고전제어에서는 이와 같은 특성이 얻기 위해 개루프 전달함수를 성형한다 이 경우 고차 주파수 부근에서 충분히 안정여유를 갖도록 설계해야 하며 그 방법으로서 위상진상이나 위상지상 등의 보상방법을 이용한다 이와 같은 방법은

- (1) 도식적으로 설계조건을 만족하는 보상요소를 찾을 수 있다.
 - (2) SISO의 경우 저차의 제어기로도 많은 경우 제어목적달성이 가능하다.
- 는 장점이 있으나

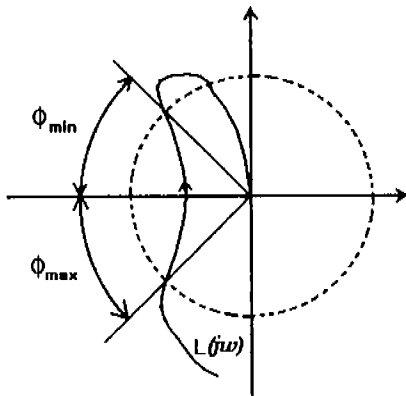


Fig 3 Stability Margin

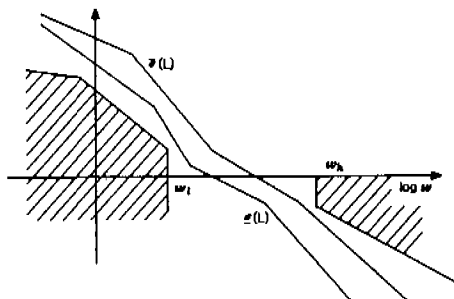


Fig 4. Desired Loop Gain

- (3) 사양을 만족하는 보상기를 찾는 데에 숙련이 필요하다.
 - (4) MIMO계의 경우 페루프 전달함수와 개루프 전달함수의 관계가 복잡하기 때문에 적용이 곤란하다
- 는 등의 단점이 있다.

3.4 현대제어의 루프 성형

대부분의 제어계의 설계문제는 H_∞ 표준문제로 전환하여 해를 구할 수 있으며 H_∞ 제어기법이나 이에 바탕한 μ -설계법, LMI 에 의한 제어기 설계 등이 모두 다양한 설계 자유도를 갖기 때문에 문제에 따라 적절한 설계법을 선택하고 경우에 따라서는 이들을 유연하게 통합하여 제어 시스템 설계를 하는 것이 바람직하다. 여기서는 혼합 감도법을 통하여 루프성형 과정을 보이고 고전제어와 비교한다.

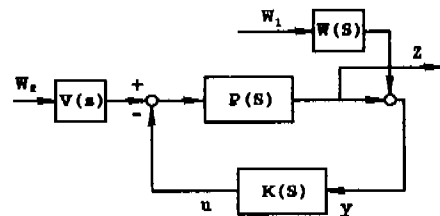


Fig. 5. Mixed Sensitivity Technique

Fig. 5에서 보는 바와 같이 감도함수와 보감도함수의 성형을 위해 $V(s)$ 와 $W(s)$ 라는 하중함수를 도입한다. 제어시스템이 해를 갖기 위해서는

$$\sigma_{\max}(S(j\omega)) < \frac{1}{V(j\omega)}$$

$$\sigma_{\max}(T(j\omega)) < \frac{1}{W(j\omega)}$$

를 만족해야 하기 때문에 S 와 T 를 하중함수에 의해 성형하는 셈이 되는 것이다 물론 설계과정에서 극·영점 상쇄 회피, 모델 오차의 표현방법 등에 따라서 정규화 기약분해법, 로버스트 극배치법 등을 선택적으로 사용하기도 한다. 안정성의 지나친 강조로 제어 시스템이 보존적으로 될 수도 있기 때문에 이를 완화하기 위한 기법으로서 μ -설계법을 채용하기도 하나 기본적으로 루프성형을 위한 하중함수의 선택방법은 모두 같다 이

방법으로는

- (1) 모델오차와 제어성능을 하중함수를 통하여 정량화 하였기 때문에 제어성능의 명확한 범위 예측이 가능하다.
- (2) 직접 페루프 전달함수를 성형하기 때문에 사양을 만족하는 해를 구하는데 숙련이 필요치 않다.
는 장점이 있다 그러나
- (3) 제어이론에 대한 정확한 이해가 요구된다
- (4) 일반적으로 제어기의 차수가 고차이다.
라는 단점을 갖기도 한다

- (6) Katsuhiko Ogata 1997, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall
- (7) 美多勉, 1994, H_∞ 制御, 昭晃堂
- (8) 細江繁幸・慈木光彦, 1994, 制御系設計, 朝倉書店

4. 결 론

이상과 같은 고전제어와 현대제어의 개략적 조망을 통하여 실제로 적용성이 우수한 제어시스템 구축을 위해서는 설계과정에서 고전제어의 단순성과 현대제어의 정확성을 병행하여 해당되는 시스템에 적합한 설계기법을 선택하는 것이 요망된다

참고문헌

- (1) Auton Stoorvogel 1992, *The H_∞ Control Problem, A State Space Approach*, Prentice Hall
- (2) Doyle, J. C , Francis, B. A , Tannenbaum, A. K , 1992, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Company
- (3) Bahram Shahian and Michael Hassul 1993, *Control System Design Using Matlab[®]*, Prentice Hall International Inc
- (4) Michael Green and David J N Limbeer 1995, *Linear Robust Control*, Prentice Hall International Inc.
- (5) Kemin Zhou, John C Doyle and Keith Glover 1996, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall