한국산업정보학회논문지 제13권 제2호(2008. 6)

연속반복학습제어의 복수모형 확률설계기법†

Multiple-Model Probabilistic Design of Repetitive Controllers

이수철*
(Soo-Cheol Lee)

요 약 본 논문은 시스템 인자의 변위에 강인한 연속반복학습제어기(Repetitive Controller, RC)를 설계하는 방법을 소개하고자 한다. 이 때 사용되는 불확실 인자들은 확률분포함수에 의해 무작위로 설정되게 된다. 분포함수를 직접 적용하는 대신, 본 제어기는 설정된 확률함수로부터 생성된 모형을 기본으로 설계하였다. 이러한 복수모형 설계 기법으로 임의의 분포함수로 구성된 수 많은 불확실 인자들을 다룰 수 있다. 그러므로, 제어기는 반복영역에서 수렴성을 보장하는 비용함수를 주파수영역에서 최소화함으로써 유도할 수 있다. 모의실험은 제안된 복수모형설계 기법으로 구한 RC가 단수모형 설계기법을 이용한 RC보다 강인한 것을 보여 주고 있다.

핵심주제어 : 연속반복학습제어, 나이키스트 최적화, 주파수 영역 해석

Abstract This paper presents a method to design a repetitive controller that is robust to variations in the system parameters. The uncertain parameters are specified probabilistically by their probability distribution functions. Instead of working with the distribution functions directly, the repetitive controller is designed from a set of models that are generated from the specified probability functions. With this multiple-model design approach, any number of uncertain parameters that follow any type of distribution functions can be treated. Furthermore, the controller is derived by minimizing a frequency-domain based cost function that produces monotonic convergence of the tracking error as a function of repetition number. Numerical illustrations show how the proposed multiple-model design method produces a repetitive controller that is significantly more robust than an optimal repetitive controller designed from a single nominal model of the system.

Key Words : Repetitive Control, Multiple Mode Probabilistic Design, Frequency Domain

1. 서 론

다양한 산업현장에서 고속회전체를 갖고 있는 로봇이나 공작기계로 자동화생산라인을 구축하고 있다. 이러한 특정 연속 반복 작업을 위한 연속반복학습제어기(Repetitive Controller: RC)가 주기적인 외란을 제거하는데 사용 될 수 있다. 본 논문에서 소개하고자 하는 연속반복학습제어기는 연속반복되는 주기 궤적운동에 적용되는 특별한 형태의 되먹임제어이다. 이는 되먹임제어기의 설계단계에서 주기적인 궤적운동을 특별히 고려하기 때문이다.

주기적으로 발생하는 입출력 정보를 이용함으로

† 이 논문은 2006학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

* 대구대학교 자동차산업기계공학부 교수

써 연속반복학습제어기는 반복적인 운동과 관련된 임의의 반복오차를 완벽하게 제거할 수 있다.[1,2] 임의의 시간대에서 연속반복제어기는 이전 주기나 반복에서의 궤적오차를 활용하여 현재 반복영역에서 사용하여야 할 제어 량을 조정하여 주어야 한다. 최근 깊은 관심을 갖고 있는 유사 제어기로 반복학습제어기(Iterative Learning Controller:ILC)가 있다. 이 제어기는 다음 반복을 진행하기 전에 매 반복 같은 초기조건을 시스템에 적용하여야 하는 차이점이 있다.[3-8] 이들 제어기들을 산업현장에 적용하기 위하여 실용적인 이유로 두 가지 특성이 요구된다. 첫째, 임의의 불확실시스템요인에 민감하지 않아야 하고(건실성), 둘째, 반복이 진행됨에 따라 목표궤적에 대한 수렴정도가 단순하여야 한다.

최근에 확률분포함수 형태의 무작위로 규정되는 모형을 바탕으로 불확실성이 고려된 새로운 형태의 건실 반복학습제어설계기법이 시간영역에서 연구 개발되었다.[9-13]

본 논문에서는 시간영역에서 주파수영역으로 설계기법을 확장하였다. 이는 주파수영역에서 궤적오차의 수렴성(안정성)을 보장하기 위한 것이다. 단순 수렴성의 특징이 궤적오차의 각 주파수영역대에서 잘 나타나고 있다.

본 논문은 주파수영역에서 궤적오차의 단순수렴에 필요한 나이키스트 안정성 조건을 연구하는 데서 시작된다. 그리고, 무작위로 구현된 복수 모형에 대한 비용함수를 최소화한 복수모형 연속반복학습제어기 설계기법을 소개한다. 한편, 복수모형설계에서의 안정성 검증을 위하여 NASA로봇 모형에 대한 수학적 모의실험이 사용되었다.

2. 연속반복학습제어 시스템의 안정성 학습

p를 한 반복영역에서의 시간대역(time steps)의 갯수라고 하자. 직접적 외란이 없는 불연속시간시스템의 연속반복학습제어의 간단한 형태에서, 현재의 제어량 $u(k)$는 직전 반복영역에서의 제어량 $u(k-p)$와 $u(k-p)$ 에 발생된 궤적오차 $e(k-p+1)$ 으로 부터 기인한다.

$$u(k) = u(k-p) + \phi e(k-p+1) \tag{1}$$

상기 연속반복학습제어 법칙에서 ϕ는 단수입력 단수출력(SISO) 시스템에서의 스칼라 학습이득 량이다. 그리고, 궤적오차는 목표궤적 $y^*(k)$와 실제 출력 $y(k)$ 과의 차이로 정의된다.

$$e(k) = y^*(k) - y(k) \tag{2}$$

상기 연속반복학습제어 법칙의 일반 형태는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) = u(k-p) + a_1 e(k-p+m-1) + \cdots + a_m e(k-p) \\ + a_{m+1} e(k-p-1) + \cdots a_n e(k-n+m-p) \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)에서 n개의 스카라 제어이득이 있고, $e(k-p+m-1)$는 a_1과 일치하는 최근 과거의 궤적오차이고, $e(k-n+m-p)$는 a_n과 일치하는 가장 먼 과거의 궤적오차이라고 할 수 있다. 그리고, 식(3)에서의 제어법칙은 z-영역에서 다음과 같이 기술할 수 있다.

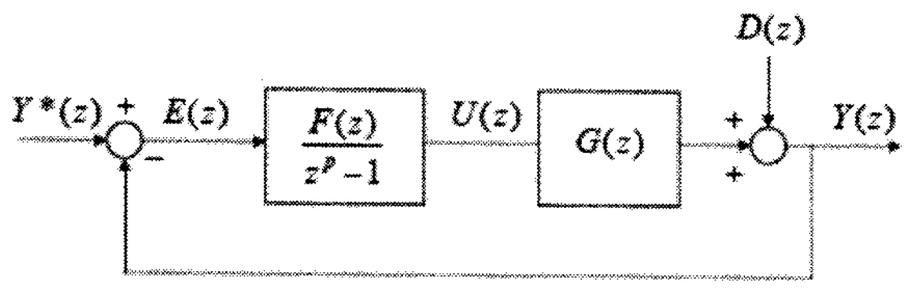
$$U(z) = \left[\frac{F(z)}{z^p - 1} \right] E(z) \tag{4}$$

여기서,

$$F(z) = a_1 z^{m-1} + \cdots + a_{m-1} z + a_m + a_{m+1} z^{-1} + \cdots + a_n z^{-(n-m)} \tag{5}$$

식(3)은 연속반복학습제어기 식(1)의 일반화 형태이고, z-domain에서 $F(z)$는 간단히 $F(z) = \phi z$로 서술 할 수 있다. 본 논문에서 전체 되먹임시스템이 안정화 되도록 제어이득 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 을 설계하고 싶어 한다. 즉, 반복 숫자가 무한대로 가면서 궤적오차가 0으로 수렴하게 된다. 그러므로, 산업현장에서 발생하는 실제적 이유로서 반복이 연속되면서 궤적오차의 수렴이 단순하게 진행되기를 바란다.

산업현장에서 발생되는 외란을 고려한 시스템 궤적오차는 다음과 같이 서술할 수 있다. 그리고, 연속반복학습제어시스템의 토막선도를 소개하면 그림1과 같다.



(그림 1) 주기 외란에 노출된 연속반복학습제어 시스템의 토막선도

$$\{1-z^{-p}[1-G(z)F(z)]\}E(z)=(1-z^{-p})[Y^*(z)-D(z)] \quad (6)$$

여기서, $G(z)$는 제어대상 시스템의 변환함수이다.

p 시간대역을 한 주기로 하는 외란 $d(k)$와 목표 궤적 $y^*(k)$ 을 갖고 있다고 하자. 연속반복학습제어 설계를 위해 다음과 같이 우측 항을 무시하여야 한다. $(1-z^p)[Y^*(z)-D(z)]=0$

식(6)을 다시 정리하면,

$$z^pE(z)=[1-G(z)F(z)]E(z) \quad (7)$$

여기서, 시스템이 정상상태라고 가정하면 $z^pE(z)$는 다음 반복영역에서의 궤적오차의 z-transform로 해석된다. 그리고, $E(z)$는 현재 반복영역에서의 궤적오차의 z-transform 이고, $1-G(z)F(z)$는 두 궤적오차 사이의 전달함수이다.

궤적오차에서 모든 주파수에서 단순수렴(monotonic convergence) 충분조건은 다음과 같다고 할 수 있다.

$$|1-G(z)F(z)|<1\ ,\ z=e^{iw\Delta t} \quad (8)$$

여기서, w 는 나이키스트 주파수로서 그 영역은 $0<\omega\Delta t<\pi$,이고, Δt는 샘플시간 간격이다. 임의의 연속반복학습제어기 $F(z)$ 설계를 위하여, $1-G(e^{iw\Delta t})F(e^{iw\Delta t})$ 는 $\omega\Delta t$ 가 0 에서 π 까지 영역의 복소수 평면에 나이키스도형으로 그려질 수 있다.

모든 주파수대에서 궤적오차가 0 으로 수렴하기 위해서는 복소평면에서 나이키스트 도형이 단위원 안에 존재하여야 한다. 단위원 밖으로 벗어 난 경우, 단순 수렴은 불가능하다. 되먹임 안정성을 고려한다면, 조건(8)은 필요충분조건이 된다. 이 말은 단위원을 벗어 난 경우, 되먹임시스템의 안정성이 가능할 수 있겠으나, 더 이상 단순 수렴이 보장되는 것은 아니다.

3. 복수모형 확률기법 설계

3.1 단수모형 확률기법 설계

복수모형 확률기법 설계에 앞서 먼저 단수모형 확률기법 설계에 대해 학습하여 보아야 한다. Φ를 설계하고자 하는 연속반복학습제어 이득 벡터라고 하자.

$$\Phi=[a_1\ a_2\ \cdots\ a_{m-1}\ a_m\ a_{m-1}\ \cdots\ a_n] \quad (9)$$

그 때, $F(z)$는 다음과 같다.

$$F(z)\ =\ M(z)\Phi \quad (10)$$

여기서,

$$M(z)=[z^{m-1}\ z^{m-2}\ \cdots\ z\ 1\ z^{-1}\ \cdots\ z^{-(n-m)}] \quad (11)$$

궤적오차의 단순수렴을 위해서 나이키스트 도형이 단위원 안에 있어야 한다는 것을 앞 절에서 언급하였다. 이때, 나이키스트 도형의 모양을 최소화함으로써 제어 이득을 구할 수 있다. 이는 다음 비용함수를 최소화함으로써 이뤄진다

$$J=\sum_{i=0}^{N-1}W_i[1-G(z_i)M(z_i)\Phi][1-G(z_i)M(z_i)\Phi]^*+\Phi^TR\Phi \quad (12)$$

여기서, *는 복소수 전환(complex conjugate)을 나타낸다. 이때, $z_i=e^{jw_i\Delta t}$, i = 0,1,2,...,N-1 이다. N은 나이키스트 도형을 구성하는 비연속시간대의 숫자이고 각각은 비연속 주파수 w_i와 일치한다. $0<w_i\Delta t<\pi$. W_i는 각 비연속 주파수 w_i와 관계있는 가중치 인자이고, R 은 제어이득 Φ 과 관계있는 가중치 매트릭스이다. 이득벡터 Φ 에 대해서

J 에 대한 미분을 취하고 그 결과를 0로 둠으로써 원하는 이득을 갖게 된다. J 와 Φ는 실수이고 $G(z_i)M(z_i)$은 복소수이기 때문에 실수부분과 허수부분으로 나누어 Φ를 설계하기 위한 공식을 개발하는 것이 효율적이다. 관련 항목은 $G(z_i)M(z_i)$, $M(z_i)^* G(z_i)^*$과 $M(z_i)^* G(z_i)^* G(z_i)M(z_i)$이 있다.

3.2 복수모형 확률기법 설계

시스템모형이 불확실인자를 갖고 있는 경우를 생각하여 보자. 이때 특정 확률분포함수를 생각할 수 있다(예를 들면, Gaussian, uniform). 복수모형 확률설계를 위해서 불확실인자를 고려한 특정 분포함수와 일치하는 M 개의 서로 다른 모형 $G_m(z)$을 생성하여야 한다. 이때, m =1,2,...,M.

확률기법제어기를 설계한다는 것은 불확실인자를 고려하여 식(12)의 비용 J 의 예상치(평균치)를 최소화하는 것이다. 모형의 수가 충분히 클 경우, J 의 예상치는 조화 평균치에 근사하게 된다. 이때, 비용함수를 최소화하고 싶어 한다.

$$E\{J\} \approx \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} J_m \quad , \quad m = 1,2,\cdots,M \tag{13}$$

여기서, 각각의 J_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$J_m = \sum_{i=0}^{N-1} W_i\left[1 - G_m(z_i)M(z_i)\Phi_P\right]\left[1 - G_m(z_i)M(z_i)\Phi_P\right]^* + \Phi_P^T R \Phi_P \tag{14}$$

전 절에서 언급한 같은 과정을 따라가면 복수모형확률기법 RC이득 Φ_M을 구하기 위하여 다음과 같은 공식이 나온다.

$$\Phi_M = A_M^{-1} B_M \tag{15}$$

여기서,

$$A_m = \sum_{m=1}^{M}\left(\sum_{i=0}^{N-1} W_i\left[Re\left(Q_m(z_i)\right) + Re\left(Q_m(z_i)\right)^T\right]\right) + 2MR \tag{16}$$

$$B_m = \sum_{m=1}^{M}\left(\sum_{i=0}^{N-1} W_i\left[Re\left(S_m^*(z_i)\right) + Re\left(S_m(z_i)\right)^T\right]\right) \tag{17}$$

그리고,

$$Q_m(z_i) = S_m^*(z_i)S_m(z_i) \ , \ S_m(z_i) = G_m(z_i)M(z_i)$$
$$z_i = e^{jw_i\Delta t}, \ 0 < w_i\Delta t < \pi \tag{18}$$

식(16), 식(17), 식(18)에서 $(\cdot)^T$는 실수행렬 $(\cdot)$의 전치행렬이고 $(\cdot)^*$는 복소행렬 $(\cdot)$의 공액전치행렬을 나타낸다.

4. 수학적 모의시험

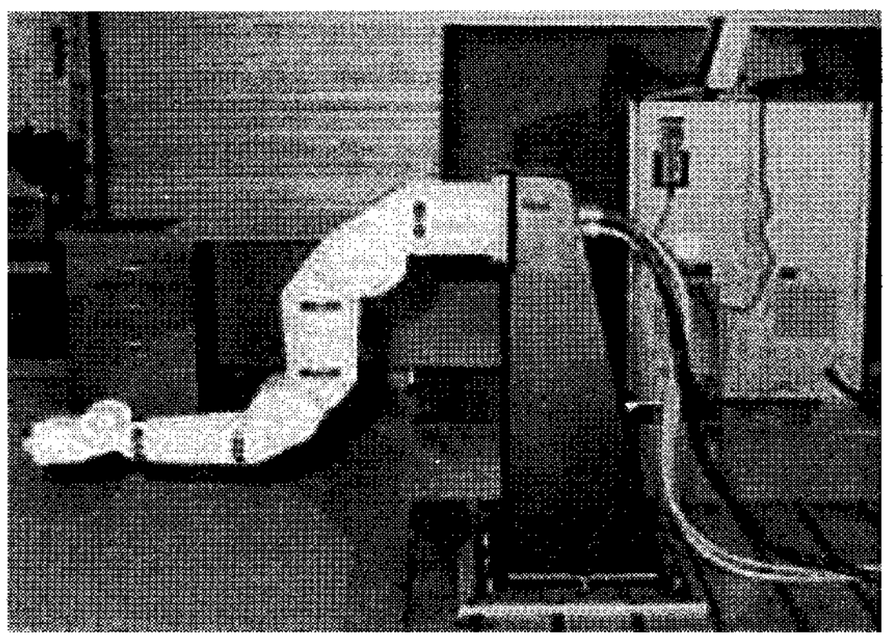
그림2에서 보여준 미항공우주국 7자유도 로봇(Robotics Research Corp. K-series 807iHP manipulator)에서 유도된 모형을 예제로 사용된다.[7] 로봇은 최대 작업반경 0.89m와 20 lbs 최대 하중을 기본사양으로 갖고 있다. 각 관절은 다음 변환함수들로 구성되어 있다.

$$G_n(s) = G_a(s)G_b(s)G_c(s) \tag{19}$$

여기서, 변환함수는 1차 동적 시스템과 2차 동적 시스템으로 구성되어 있다.

$$G_a(s) = \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right) \qquad G_b(s) = \left(\frac{w_{1n}^2}{s^2 + 2\zeta_1 w_{1n} s + w_{1n}^2}\right)$$
$$G_c(s) = \left(\frac{w_{2n}^2}{s^2 + 2\zeta_2 w_{2n} s + w_{2n}^2}\right) \tag{20}$$

모형인자로는 a = 8.8, ζ_1 = 0.1, ζ_2 = 0.1, w_{1n} = 37, w_{2n} = 113 이다.



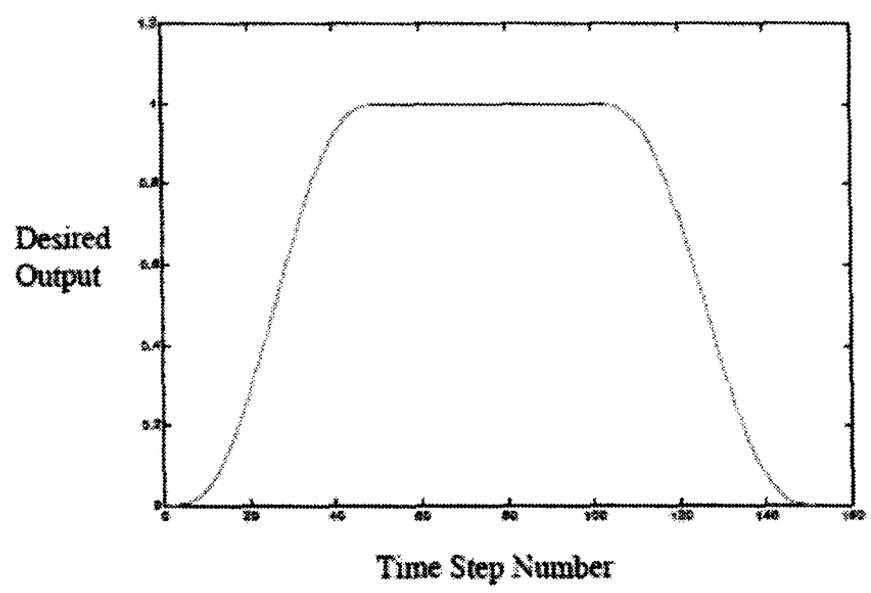
(그림 2) NASA 7 자유도 로봇

주파수 단위는 rad/sec이고, 다섯 개의 인자 각각은 목표치에서 ± 15%의 변위량을 갖고 있다. 샘플간격시간은 0.01초이다.

100개의 모형은 특정화된 분포함수를 기준으로 불특정하게 생성된다. 이들 모형들은 확률학습제어기를 설계하는데 사용된다. 그리고, 이 제어기는 목표모형으로부터 설계된 최적학습제어기와 비교되게 된다. 로봇 조인트의 목표궤적은 주기적이고, 각 주기는 그림3과 같이 각 90도씩 상승, 정지, 복귀로 1.51초 시간이 소요된다.

4.1 정규 단수모형 설계기법

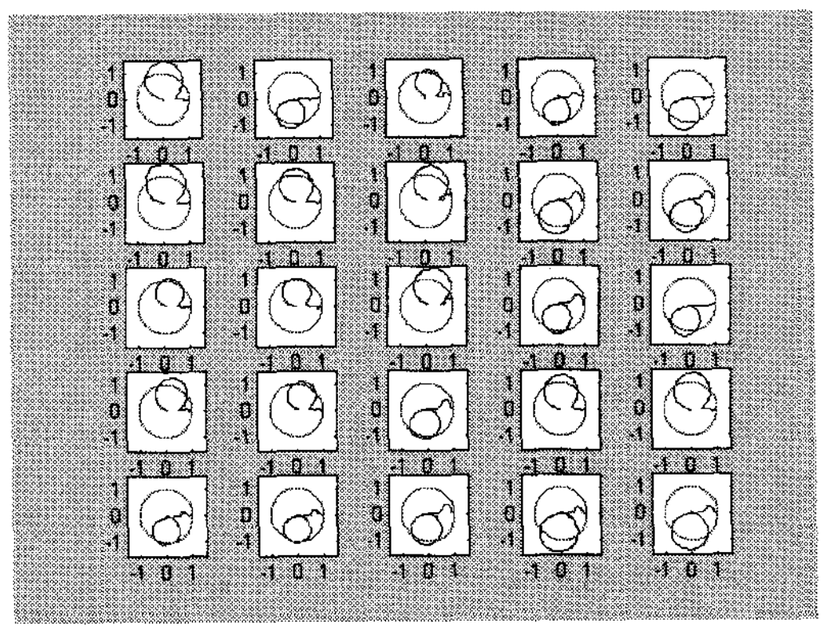
먼저 연속반복학습제어를 위한 정규모형에서 설계된 기법을 소개한다. 모의실험에는 m = 77, n = 151을 사용하였다. m과 n은 어떠한 조합의 경우라도 사용될 수 있으나, 이러한 선택은 반복학습제어의 수학적 조건들과 같은 제어이득을 갖고 있는 연속반복학습제어로 귀결되어야 한다. 같은 제어이득을 연속반복학습제어(RC)와 반복학습제어(ILC)를 위하여 사용할 수 있다. 나이키스트 도형과 궤적오차의 수렴도는 설계의 근본이 된 정규모형에 똑 같이 적용된 이상적인 상황을 나타내 주고 있다. 이들 모의실험의 결과들은 대상 모형을 완벽히 설계에 반영한 가장 이상적인 경우로서 이론적 검증을 나타내 주고 있다.



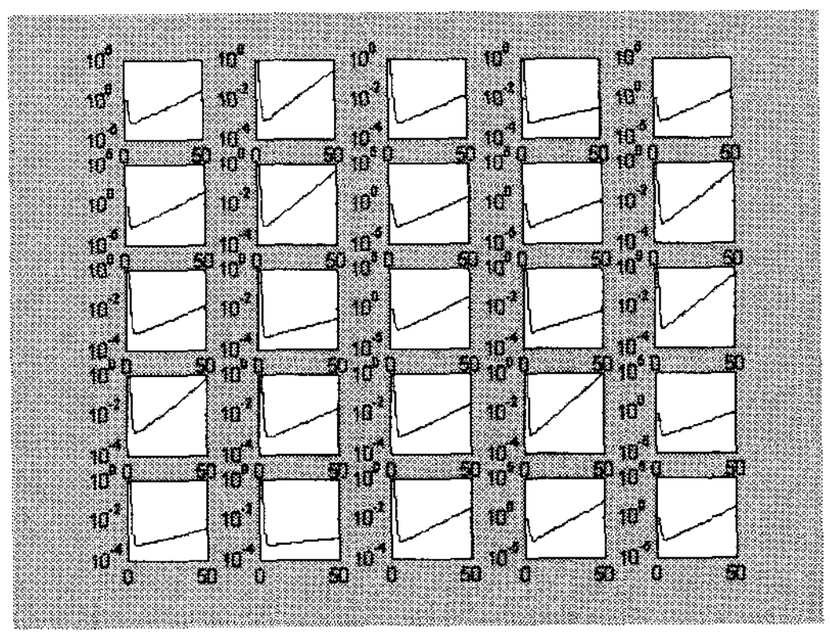
(그림 3) 주기적인 목표 궤적

4.2 정규 단수모형 설계기법 제어기를 복수모형에 적용한 경우

제어기의 건실성을 조사하기 위해, 불확실 분포함수로부터 무작위 생성된 100개의 모형을 대상으로 시험하였다. 정규 단수모형에서 설계한 제어기를 무작위 복수의 모형 100개에 적용할 경우, 100개의 모형 중에서 26개의 발산하는 경우를 발견할 수 있었다. 정규 단수모형을 기저로 설계한 제어기를 불확실성을 갖고 있는 무작위 모형에 적용할 경우 건실성을 보장받기 어렵다는 것을 의미한다. 따라서, 무작위 추출된 복수모형을 기저로 설계한 제어기를 개발하게 되는 가능성을 갖게 하였다. 나이키스트 도형에서 단위 원 밖에 궤적이 있을 경우, 궤적오차는 발산하게 되고, 단위 원 안에 있을 경우 단순 수렴하는 것을 알 수 있다. 발산한 26개 중 25개의 나이키스트 도형과 궤적오차의 수렴정도는 그림4와 그림5에 정리하여 두었다. 그림4는 나이키스트 도형을 나타내고, 동반된 그림5는 궤적오차들이 첫 50번 반복에서 어떻게 변화(발산)하였는지를 나타내고 있다.



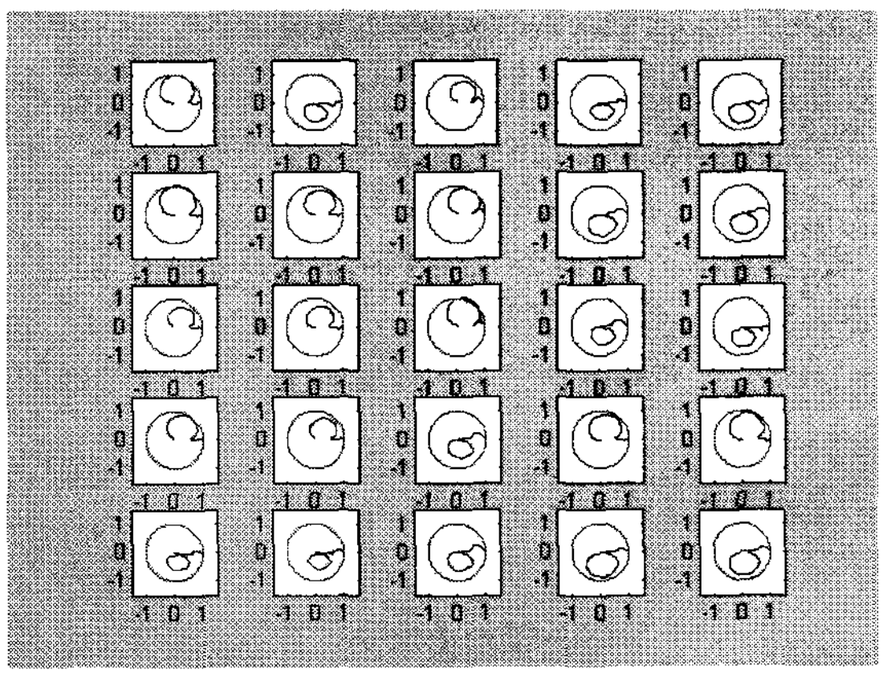
(그림 4) 무작위 복수 모형에 적용한 정규모형 설계의 나이키스트 도형들(25/100)



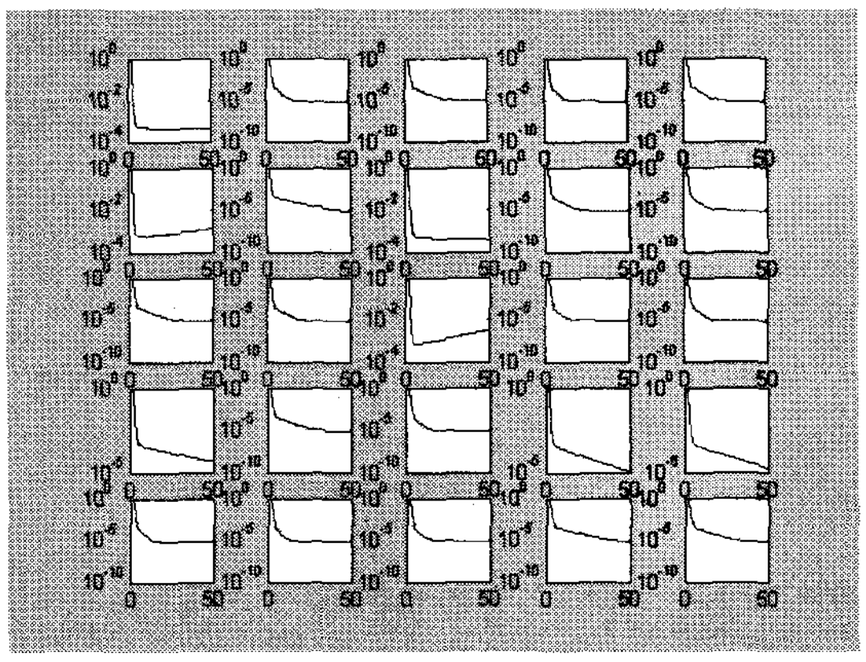
(그림 5) 무작위 복수 모형에 적용한 정규모형 설계의 궤적오차 수렴성(25/100)

4.3 무작위 복수모형 설계기법 제어기를 복수모형에 적용한 경우

정규 단수모형 기법으로 연속반복학습제어기를 설계하는 대신에 100개의 무작위 추출 복수모형을 기저로 하여 설계하고자 한다. 이들 제어기를 100개의 같은 무작위 모형들을 대상으로 실험하여 보았다. 그 결과는 그림 6과 그림 7과 같다. 그림 6의 나이키스트 도형을 그림 4의 것과 비교하면, 복수모형 설계기법으로 인하여 수렴정도에서 개선된 효과를 볼 수 있을 것이다. 그림 6의 나이키스트 도형들은 같은 변이율(±15%)을 적용한 것이다. 대부분 나이키스트 도형들이 복수모형 설계에서 단위 원 안에 존재하는 것을 알 수 있다. 특히, 발산되는 경우가 26개에서 1개로 줄어 든 것을 알 수 있다. 나머지 99개의 모형에서 모두 단순 수렴



(그림 6) 무작위 복수 모형에 적용한 복수모형 설계의 나이키스트 도형(25/100)



(그림 7) 무작위 복수 모형에 적용한 복수모형 설계의 궤적오차의 수렴성(25/100)

성을 보여 주고 있다. 이 결과는 복수모형 설계가 예상한 것과 같이 건실하다는 것을 확인하여 주는 것이다.

설계의 기저로 사용한 100개의 무작위 추출 모형과는 별개로 서로 다른 무작위 추출 모형들에 복수모형 제어기를 적용하여 보았다. 발산되는 경우의 숫자가 1개에서 2개로 늘어 난 것을 보여 주고 있다. 이로써 복수모형 설계는 당초 설계의 대상과 다른 무작위 추출 모형에 적용하여도 좋은 결과를 보여 주고 있다. 이는 정규 단수모형에서 특정수준의 변위율을 감안한 상태의 복수모형을 기저로 설계된 제어기를 불특정 모형에 적용하여도 아주 건실한 결과를 보여 준다는 것을 의미한다. 설계모형 숫자가 늘어나면 날수록, 연속반복학습제어 이득은 정상상태로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고, 당초 설계한 제어기의 성능과 다른 무작위 추출 모형에서 설계한 제어기의 성능과의 차이는 아주 미미한 것을 알 수 있다. 즉, 어떠한 무작위 추출 모형에서도 건실한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 반복 동작을 수행하는 연속반복학습제어기를 설계하는 방법을 나타내고 있다. 연속반복학습제어기를 실제 현장에 적용함에 있어 중요한 제어목표로 단순 수렴성을 나타내는 안정성에 대한 검증을 들 수 있다. 궤적오차 단순 수렴(안정성)을 보장하기 위해서는 나이키스트 도형이 복소수 단위 원 안에 위치하도록 오차비용을 최소화하는 최적화를 설계의 기본으로 하여야 한다.

그리고, 연속반복학습제어기를 실제 현장에 적용함에 있어 두 가지 현안을 고려하여야 한다. 하나는 단순 수렴성이고, 또 다른 하나는 안정성에 대한 건실성이다. 궤적오차 수렴의 단순화를 보장하기 위해서는 설계가 나이키스트 도형이 복소수 단위 원 안에 위치하도록 최적화 하여야 한다. 그리고, 건실성의 현안을 해결하기 위해서, 이 논문에서는 복수모형 설계 접근 방법을 사용하여 설계가 건실하도록 하는 방법을 보여 주고 있다. 모형의 불확실성에 대한 언급을 직접 다루는 대신, 불확실성으로부터 생성되는 다양한 모형을 다루어 제어

기를 설계하게 된다. 이러한 기법은 연속반복학습 제어기 설계를 건실화 하는 단순한 설계기법을 낳게 한다. 이러한 접근 설계기법으로 모든 모형에서의 안정성이 모두 보장되는 것은 아니지만, 결과적으로 도출된 설계기법은 건실하며, 설계의 단순함은 연속반복학습제어기를 실제 산업현장에 적용할 수 있도록 하는 중요한 요인이 될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Tomizuka, T.-C. Tsao, and K. K. Chen, "Analysis and Synthesis of Discrete time Repetitive Controllers," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 111, 1989, pp. 353-358.

[2] R. W. Longman, "Iterative Learning and Repetitive Control for Engineering Practice," International Journal of Control, Special Issue on Iterative Learning Control, Vol. 73, No. 10, July 2000, pp. 930-954.

[3] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering Operation of Robots by Learning," Journal of Robotic Systems, Vol. 1, No. 2, 1984, pp. 123-140.

[4] K. Moore, "Iterative Learning Control for Deterministic Systems", Springer-Verlag, London, U.K., Advances in Industrial Control, 1993.

[5] Z. Bien and J.-X. Xu, "Iterative Learning Control: Analysis, Design, Integration, and Applications", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.

[6] M. Q. Phan, R. W. Longman, and K. L. Moore, "A Unified Formulation of Linear Iterative Learning Control," Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 105, 2000.

[7] H. Elci, R. W. Longman, M. Q. Phan, J.-N. Juang, and R. Ugoletti, "Simple Learning Control Made Practical by Zero-Phase Filtering: Applications to Robotics," IEEE Transactions on Circuits and Systems.I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 49, No. 6, 2002, pp. 753-767.

[8] B. G. Dijkstra and O. H. Bosgra, "Extrapolation of Optimal Lifted System ILC Solution with Application to a Waferstage," Proceedings of the American Control Conference, 2002, pp. 2595-2600.

[9] T. Ishihara, K. Abe, and H. Takeda, "A Discrete-Time Design of Robust Iterative Learning Controllers," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 22. No. 1, Jan-Feb 1992.

[10] N. Amman, D. H. Owens, E. Rogers, and A. Wahl, "An H-infinity Approach to Linear Iterative Learning Control Design," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 10, pp. 767-781, 1996.

[12] K. Takanishi, M. Q. Phan, and R. W. Longman, "Multiple-Model Probabilistic Design of Robust Iterative Learning Controllers," NAMRI 2005, New York, NY, May 2005.

[13] B. Panomruttanarug and R. W. Longman, "Repetitive Controller Design Using Optimization in the Frequency Domain", AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island, 16-19 August 2004.

이 수 철 (Soo-Cheol Lee)

- 정회원
- 1984년 2월 : 서울대학원 농공학과 졸업 (농학석사)
- 1993년 10월 : 미국 Columbia대학원 기계공학과 졸업 (M.Phil./Ph.D.)
- 2006년 4월~현재 : 대구대학교 자동차산업기계공학부 교수
- 관심분야: 시스템분석기술, 분산 학습제어, 공장자동화