Nguyễn Thu Hà, Nguyễn Hoài Nam, Nguyễn Doãn Phước

ĐIỀU KHIỂN HỌC LẶP

NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

Bản quyền thuộc về Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Mọi hình thức xuất bản, sao chép mà không có sự cho phép bằng văn bản của Trường là vi phạm pháp luật.

Authors: **Nguyen Thu Ha, Nguyen Hoai Nam, Nguyen Doan Phuoc**
Department of Automatic Control, Hanoi University of Science and Technology.

Title: **Iterative learning control**

This book aims to provide basic knowledges and conceptual methods for solving practical control problems based on iterative learning approach. Some detailed explanations and numerical examples are also given in the book to illustrate this control concept.

This book is written for control engineering students and master students as a course and self study textbook belonging to the intelligent control discipline at the Hanoi University of Science and Technology (HUST).

Biên mục trên xuất bản phẩm của Thư viện Quốc gia Việt Nam

Nguyễn Thu Hà

Điều khiển học lặp = Iterative learning control / Nguyễn Thu Hà, Nguyễn Hoài Nam, Nguyễn Doãn Phước. - H. : Bách khoa Hà Nội, 2021. - 176tr. : hình vẽ, bảng ; 21cm

1. Điều khiển học 2. Phương pháp lặp 3. Giáo trình

629.80711 - dc23

BKM0153p-CIP

Lời nói đầu

Gần đây nổi lên mạnh xu hướng điều khiển thông minh, được hiểu là những phương pháp điều khiển xây dựng dựa trên cơ sở suy luận của thế giới tự nhiên, kết hợp với nền tảng lý thuyết điều khiển truyền thống, thay vì chỉ tập trung vào phương pháp truyền thống với phần phân tích và thiết kế bộ điều khiển dựa chủ yếu vào mô hình toán học mô tả đối tượng điều khiển. Một đặc điểm dễ nhận biết của các phương pháp điều khiển thông minh là chúng ít phụ thuộc, thậm chí gần như không sử dụng tới mô hình toán mô tả tính chất động học của đối tượng cho việc thiết kế bộ điều khiển. Bởi vậy, việc cập nhật và đưa dần các phương pháp điều khiển thông minh vào chương trình giáo dục đại học cho phù hợp với xu thế "4.0" hiện nay là cần thiết.

Điều khiển thông minh xuất hiện dưới nhiều hình thái khác nhau, gồm có điều khiển mờ, điều khiển bằng mạng neural, điều khiển học có giám sát và không có giám sát, điều khiển học lặp, điều khiển học tăng cường, học sâu. Ở cuốn giáo trình này, chúng tôi giới hạn chỉ trình bày riêng phần nội dung "Điều khiển học lặp" của môn học "Điều khiển thông minh".

Ý tưởng về điều khiển học lặp lần đầu tiên được trình bày bởi Uchima năm 1978 dưới tên "điều khiển thông qua phép thử (trial)". Cấu trúc của nó đơn giản có thể nói là bất ngờ và gần như áp dụng được một cách hiệu quả cho lớp rộng các thiết bị công nghiệp làm việc theo chu trình tuần hoàn, đặc biệt là các robot công nghiệp, đã gây ấn tượng mạnh với cộng đồng khoa học thế giới. Tuy nhiên, mặc dù ra đời sớm, nhưng vì được công bố bằng tiếng Nhật, nên ở thuở ban đầu, nó chưa đến ngay được tới cộng đồng các nhà khoa học trên thế giới. Chỉ mãi sau khi có các bản công bố nghiên cứu mở rộng của nó bởi Arimoto, Furuta, Kawamura xuất bản bằng tiếng Anh, thế giới mới biết tới phương pháp điều khiển "thông minh" này. Kể từ đó, nó có bước phát triển vượt bậc, cả về số lượng các nghiên cứu lý thuyết được công bố lẫn các patent về giải pháp ứng dụng thực tế của nó. Góp phần vào sự phát triển, hoàn thiện phương pháp điều khiển này còn là những kết quả của nhiều nhóm nghiên cứu về Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa tại nhiều trường đại học ở châu Âu (Italy, Thụy Điển, Hà Lan v.v.), châu Á (Hàn Quốc, Nhật Bản v.v.) và Mỹ.

Các trào lưu nghiên cứu ứng dụng của điều khiển học lặp trên thế giới như được chỉ ra ở trên cho thấy sự cần thiết phải đưa nhanh phần môn học này vào chương trình đào tạo ở Đại học Bách khoa Hà Nội về điều khiển thông minh, đó chính là động lực để chúng tôi viết cuốn giáo trình này cho môn học có mã số học phần EE4451.

Một động lực nữa giúp chúng tôi viết cuốn sách này là mong muốn cung cấp cho các bạn sinh viên đang theo học ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa thêm một tài liệu bổ trợ cho việc hiểu kỹ, hiểu sâu bài giảng về Điều khiển thông minh, cũng như hỗ trợ việc tự học của sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh thuộc các ngành liên quan.

Cuốn giáo trình đã được hoàn thành với sự động viên, khuyến khích của tập thể cán bộ Bộ môn Điều khiển Tự động, Viện Điện, Đại học Bách khoa Hà Nội. Chúng tôi chân thành cảm ơn.

Mặc dù đã rất nỗ lực, song cuốn sách không thể tránh khỏi thiếu sót. Do đó, chúng tôi rất mong nhận được những góp ý sửa đổi, bổ sung thêm của bạn đọc để sách được hoàn thiện trong những lần xuất bản sau. Thư góp ý xin gửi về:

Đại học Bách khoa Hà Nội
Viện Điện, Bộ môn Điều khiển Tự động
C9-P.318, Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Mục lục

Những ghi chú cần thiết 1

1 Thiết kế bộ điều khiển 3

1.1 Nguyên tắc học và chỉnh định 5

1.1.1 Học từ dữ liệu quá khứ để chỉnh định lại tín hiệu điều khiển 5

1.1.2 Một số hàm học và chỉnh định cơ bản 8

1.1.3 Tổng kết 9

1.2 Minh họa việc cài đặt bộ điều khiển 10

1.2.1 Điều khiển đối tượng rời rạc, tuyến tính 10

Trường hợp hệ ổn định 10

Trường hợp hệ không ổn định 15

1.2.2 Điều khiển đối tượng liên tục, tuyến tính 17

Trường hợp hệ ổn định 18

Trường hợp hệ không ổn định 20

1.2.3 Điều khiển đối tượng liên tục, phi tuyến 22

1.2.4 Điều khiển đối tượng có nhiễu chu trình tuần hoàn bất định tác động ở đầu ra 28

1.2.5 Kết luận 34

Câu hỏi ôn tập và bài tập 35

2 Đánh giá chất lượng học và chỉnh định 37

2.1 Tính hội tụ của quá trình học và chỉnh định SISO 38

2.1.1 Tính hội tụ của quá trình học và chỉnh định tuyến tính 38

Điều kiện đủ tổng quát 39

Triển khai điều kiện đủ khi sử dụng hàm truyền 40

Triển khai điều kiện đủ khi sử dụng mô hình trạng thái 43

2.1.2 Tính hội tụ của quá trình phi tuyến 52

Tính hội tụ khi hệ là tuyến tính và hàm học là phi tuyến 52

Tính hội tụ khi hệ là phi tuyến và hàm học là tuyến tính 54

2.2 Tính hội tụ của quá trình học và chỉnh định MIMO 55

2.2.1 Tính hội tụ của quá trình học và chỉnh định tuyến tính 55

Hàm học tuyến tính kiểu D 55

Hàm học tuyến tính kiểu PD 57

Hàm học tuyến tính kiểu PID 58

2.2.2 Tính hội tụ của quá trình học và chỉnh định phi tuyến 63

2.3 Kết luận 64

Câu hỏi ôn tập và bài tập 65

3 Một số nội dung nâng cao 67

3.1 Hội tụ theo tổng bình phương sai lệch bám 67

3.1.1 Với quá trình học và chỉnh định SISO tuyến tính 68

Điều kiện hội tụ khi sử dụng hàm học tuyến tính kiểu D 68

Điều kiện hội tụ khi sử dụng hàm học tuyến tính kiểu PD 71

Điều kiện hội tụ khi sử dụng hàm học tuyến tính kiểu PID 74

3.1.2 Với quá trình học và chỉnh định MIMO tuyến tính 75

3.1.3 Với quá trình học và chỉnh định phi tuyến 77

3.2 Học tối ưu với tổng bình phương sai lệch bám 79

3.2.1 Xác định tham số tối ưu cho hàm học SISO 80

Tham số tối ưu cho hàm học tuyến tính kiểu D 80

Tham số tối ưu cho hàm học tuyến tính kiểu PD 83

Tham số tối ưu cho hàm học tuyến tính kiểu PID 87

3.2.2 Xác định tham số tối ưu cho hàm học MIMO 90

3.2.3 So sánh với phương pháp tối ưu hóa tín hiệu điều khiển 91

3.3 Học và chỉnh định bậc cao 96

3.3.1 Học bậc 2 97

3.3.2 Học bậc 3 100

3.4 Giả thiết về tính ổn định và hệ học lặp truyền thẳng 101

3.4.1 Ổn định hóa hệ điều khiển truyền thống và sai lệch chất lượng trong quá trình làm việc 101

3.4.2 Chỉnh định sai lệch chất lượng nhờ học lặp 107

Bộ điều khiển học lặp là khâu tiền xử lý 107

Bộ điều khiển học lặp là khâu truyền thẳng 110

Nâng cao tốc độ hội tụ nhờ tối ưu hóa tham số học 113

3.5 Những vấn đề liên quan 117

3.5.1 Phiên bản repetitive 117

3.5.2 Phiên bản run to run 119

3.5.3 Xác định thông minh tham số hàm học 120

Hàm học kiểu P 120

Hàm học kiểu D 125

Về bộ điều khiển học lặp có tham số học thông minh 127

3.6 Kết luận 128

Câu hỏi ôn tập và bài tập 130

4 Nâng cao chất lượng các quá trình công nghiệp nhờ học lặp 131

4.1 Điều khiển robot công nghiệp 132

4.1.1 Điều khiển truyền thống 133

Mô hình toán 133

Phương pháp PD bù trọng trường 134

Những vấn đề nảy sinh trong quá trình làm việc và các giải pháp khắc phục 134

4.1.2 Điều khiển thông minh 139
Điều khiển tuyến tính hóa chính xác 140
Điều khiển bám thích nghi thông minh nhờ học lặp và bù bất định 141
4.2 Điều khiển quá trình khuấy trộn **147**
4.2.1 Tổng quan các phương pháp điều khiển truyền thống 148
4.2.2 Điều khiển học lặp 150
Thiết kế bộ điều khiển học lặp 151
Thiết kế bộ ước lượng nhiễu 152
Đánh giá chất lượng điều khiển thông qua mô phỏng 153
4.3 Kết luận **157**
Câu hỏi ôn tập và bài tập **158**
Tài liệu tham khảo **159**
Phụ lục **161**
Chuẩn của vector 161
Chuẩn của ma trận 162
Chỉ mục **166**

Giáo trình này được viết trong khuôn khổ chương trình nghiên cứu cấp Bộ, có mã số đề tài: B2021-BKA-10.

Những ghi chú cần thiết

Sau đây là một số giải thích về các ký hiệu được sử dụng trong giáo trình để việc tự học được thuận tiện.

1) Đối tượng điều khiển của điều khiển học lặp là các quá trình, các hệ thống làm việc theo mẻ, tức là có chu trình làm việc tuần hoàn với chu kỳ T cố định cho trước. Trong giáo trình này, biến thời gian t sẽ được sử dụng để chỉ thời điểm tương đối của hệ trong một chu kỳ. Như vậy, biến thời gian t này sẽ luôn thuộc khoảng $[0, T]$ và được sử dụng lại trong mọi chu kỳ. Thời điểm làm việc thực (tuyệt đối) trên trục thời gian của hệ, tính từ gốc 0, ký hiệu bởi t_r, sẽ được xác định từ t và số thứ tự k của chu kỳ như sau:

   $t_r = kT + t,\ k = 0,1,\ \ldots$ và $0 \le t \le T$.

2) Vì bộ điều khiển học lặp chỉnh định lại tín hiệu điều khiển cho chu kỳ tiếp theo dựa trên các dữ liệu vào ra đo được của hệ ở chu kỳ hiện tại bằng cách *thử* dùng một công thức học và chỉnh định chọn trước, sau đó kiểm tra hiệu quả của phép thử đó, nên chỉ số chu kỳ k cũng còn được gọi là chỉ số của *lần thử*. Trong một lần thử k sẽ có nhiều *bước thử*, tương ứng với chu kỳ trích mẫu và được ký hiệu bởi τ hoặc t.

3) Chỉ những chu kỳ làm việc mà ở đó có sự tham gia của việc chỉnh định lại tín hiệu điều khiển mới được gọi là *lần thử*.

4) Trong giáo trình, *công thức* học và chỉnh định nhiều khi còn được gọi là *hàm* học và chỉnh định, hay đơn giản chỉ là *hàm học*. Đôi lúc nó còn được gọi là *quá trình* học và chỉnh định nếu được kết hợp thêm việc xét tính hội tụ mà nó mang lại.

5) Tương ứng với khái niệm về thời gian tương đối và tuyệt đối t, t_r như trên, cũng như chỉ số k của lần thử (và t của bước thử) và cũng là số thứ tự chu kỳ làm việc, thì giá trị tín hiệu $x(t_r)$ ở một thời điểm tuyệt đối t_r trên trục thời gian sẽ được biểu diễn thông qua thời điểm tương đối t như sau:

   $x(t_r) = x(kT + t) = x_k(t)$.

6) Quá trình chỉnh định lại tín hiệu điều khiển thuộc chu kỳ làm việc thứ k (còn gọi là lần thử thứ k) sẽ không được thực hiện liên tục trên thời gian $0 \le t \le T$, mà là rời rạc ở những thời điểm cách đều nhau một khoảng cách T_S (gọi là chu kỳ cập nhật hay trích mẫu). Tương ứng, việc thu thập dữ liệu đầu ra hay trạng thái của hệ thống cũng sẽ được thực hiện rời rạc ở các thời điểm này. Trong giáo trình, chu kỳ cập nhật T_s luôn được chọn là ước số của T.

7) Ký hiệu thời điểm tín hiệu được cập nhật là τ thì trong một chu kỳ nó sẽ được cập nhật $M = T/T_s$ lần. Giá trị tín hiệu $x(t_r)$ ở thời điểm cập nhật τ thuộc chu kỳ (lần thử) thứ k sẽ được ký hiệu ngắn gọn bằng số thứ tự của thời điểm đó như sau:

   $x_k(\tau)$ với $\tau = 0,1, \ \dots \ ,M$.

8) Lưu ý: Biến τ là biến thời gian, song ở công thức trên, nó lại có nghĩa của chỉ số của thời điểm cập nhật. Điều này thoạt đầu có vẻ bất tiện, song nếu thống nhất rằng τ và τT_s là giống nhau, tức là có $\tau \triangleq \tau T_s$ thì sẽ không phải sử dụng quá nhiều ký hiệu.

9) Tương tự, giá trị tín hiệu $x(t_r)$ thuộc thời điểm i trong khoảng $[0, \tau T_s]$ của lần thử thứ k sẽ được ký hiệu ngắn gọn là

   $x_k(iT_s) \triangleq x_k(i)$ với $i = 0,1, \ \dots \ ,N$ và $N \in [0,M]$.

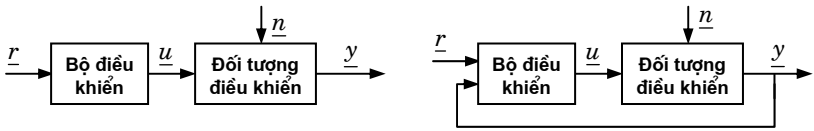
   Khi $N = M$ thì hai ký hiệu $x_k(i)$, $x_k(\tau)$ là tương đương.

10) Do bộ điều khiển học lặp đo tín hiệu trạng thái, tín hiệu đầu ra của hệ liên tục tại các thời điểm rời rạc, rồi cập nhật, tính toán ra giá trị tín hiệu điều khiển để tác động ngược vào hệ thống cũng ở các thời điểm rời rạc, nên nó là một *bộ điều khiển số*. Hệ thống có bộ điều khiển là số còn đối tượng điều khiển là liên tục thì được gọi là *sampled data*.

1 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Kết quả đánh giá cuối cùng cho lời giải của một bài toán điều khiển tự động luôn là chất lượng điều khiển của hệ thống đó, rằng nó phải thỏa mãn được các yêu cầu đặt ra mà thực tế đòi hỏi, trong đó khả năng (vector) các tín hiệu đầu ra của hệ bám ổn định theo được (vector) quỹ đạo mẫu cho trước là then chốt. Hình 1.1 mô tả hệ thống điều khiển này, ở đó đối tượng điều khiển là chủ thể khách quan (khách thể), còn bộ điều khiển, lời giải của bài toán điều khiển, là chủ thể chủ quan (chủ thể). Các (vector) tín hiệu trong hình được hiểu là:

- $\underline{r} = (r_1, \ \dots \ , r_m)^T$ là vector các tín hiệu đặt mà đầu ra của hệ cần phải bám theo;
- $\underline{u} = (u_1, \ \dots \ , u_n)^T$ là vector các tín hiệu điều khiển (đầu vào) của đối tượng;
- $\underline{y} = (y_1, \ \dots \ , y_m)^T$ là vector các tín hiệu đầu ra của hệ và cũng là đầu ra của đối tượng;
- $\underline{n} = (n_1, \ \dots \ , n_p)^T$ là vector các tín hiệu nhiễu tác động (không mong muốn vào hệ (đối tượng điều khiển).



Hình 1.1: Cấu trúc vòng hở và vòng kín (có phản hồi) của một hệ thống điều khiển.

Nếu một hệ thống mà ở đó bộ điều khiển (kết quả bài toán điều khiển), để tạo ra được $\underline{u}$, cần phải có thêm tín hiệu đầu ra $\underline{y}$ như ở hình 1.1, thì hệ thống đó được gọi là *hệ kín*, hay hệ có phản hồi, ngược lại, nó được gọi là *hệ hở*. (hệ không có phản hồi).

Hiện nay có rất nhiều phương pháp phục vụ cho việc tìm lời giải của bài toán điều khiển nêu trên, song phần lớn chúng đều yêu cầu phải có mô hình toán mô tả đủ chính xác đối tượng điều khiển. Tuy nhiên, do yếu tố khách quan, yêu cầu này không phải lúc nào cũng đáp ứng được. Nguyên nhân có thể là do chúng ta, người giải quyết bài toán điều khiển, chưa hiểu đầy đủ về đối tượng điều khiển, hoặc nếu có hiểu đầy đủ thì cũng chưa có được các công cụ toán – lý biểu diễn được sự hiểu biết đó. Chính vì thế mới sinh ra các chuyên ngành con, chuyên biệt trong điều khiển như điều khiển bền vững, điều khiển thích nghi v.v. cho bài toán mà ở đó mô hình toán không thể mô tả được đủ chính xác đối tượng.

Điều khiển học lặp (iterative learning control) là một trong số ít các phương pháp thiết kế bộ điều khiển mà không cần đến mô hình toán của đối tượng điều khiển. Bởi vậy, nó thoát ra được nhược điểm nêu trên của các phương pháp truyền thống. Trong nhiều trường hợp ứng dụng, khi mà ở đó một mình bộ điều khiển học lặp không thể giải quyết được các nhiệm vụ điều khiển đặt ra, người ta có thể kết hợp thêm với nó những bộ điều khiển truyền thống [1] – [10].

Điều khiển học lặp được giới thiệu lần đầu tiên ở tài liệu [1], sau được hoàn thiện, mở rộng với [2], [3], [4] cho hệ tuyến tính và [6], [7], [8], [9] cho hệ phi tuyến. Một tóm tắt sơ lược nhưng khá đầy đủ về nguyên lý điều khiển học lặp này và các phương pháp thiết kế bộ điều khiển của nó được trình bày trong tài liệu [10], [11].

Bộ điều khiển học lặp này có tên gọi là "học", vì thay cho mô hình toán, nó lấy thông tin động học của đối tượng điều khiển qua các lần "thử" rồi "chỉnh sửa" tín hiệu điều khiển nhằm làm giảm sai lệch bám (sau một số lần "thử" và "chỉnh sửa" hữu hạn), cho tới khi có được vector tín hiệu điều khiển cuối cùng thỏa mãn chất lượng yêu cầu, được hiểu là tín hiệu điều khiển mà với nó, đáp ứng được yêu cầu đặt ra về sai lệch bám theo nghĩa:

$$\left\| \underline{r} - \underline{y} \right\| \approx 0 \text{ hoặc } \left\| \underline{r} - \underline{y} \right\| < \varepsilon \tag{1.1}$$

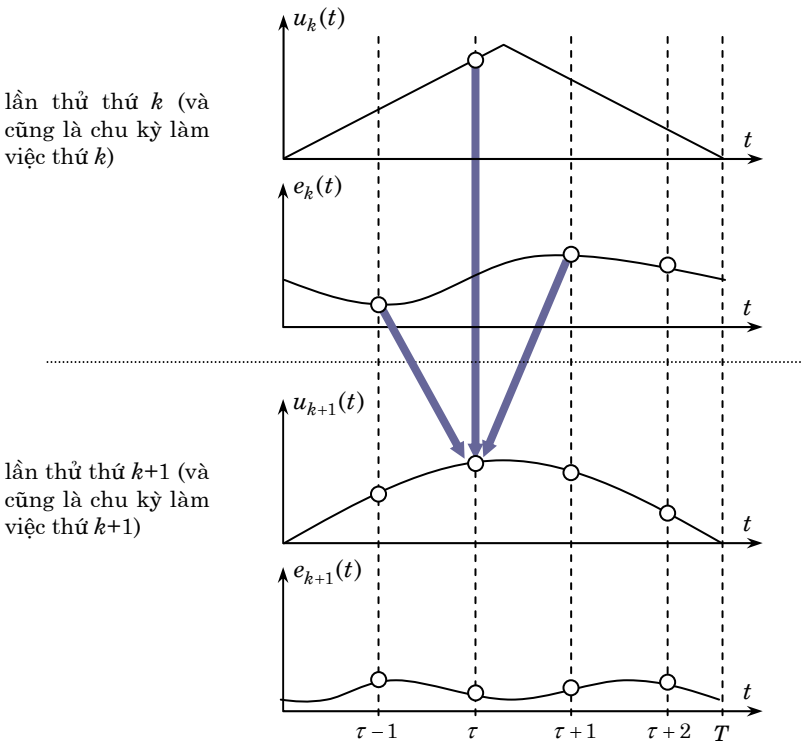
với một chuẩn tín hiệu nào đó, chẳng hạn như chuẩn bậc p, chuẩn Euclid, chuẩn hàm mũ, chuẩn vô cùng v.v., trong đó ε là một số thực dương đủ nhỏ cho trước. Cũng chỉ sau khi có được chất lượng (1.1), tín hiệu điều khiển cuối cùng tìm được mới thực sự đủ điều kiện để áp dụng vào thực tế. Vì lẽ đó mà

phương pháp này có tên gọi là "lặp" (iterative). Đây cũng là điểm khác biệt so với những thuật toán điều khiển "hồi quy" (recursive), là phương thức mà ở đó những kết quả trung gian cũng vẫn có thể tạm dùng để điều khiển.

1.1 Nguyên tắc học và chỉnh định

1.1.1 Học từ dữ liệu quá khứ để chỉnh định lại tín hiệu điều khiển

Hình 1.2 mô tả quá trình học và chỉnh định tín hiệu điều khiển từ dữ liệu quá khứ của hệ thống trong một chu kỳ làm việc $0 \le t \le T$ của hệ.



Hình 1.2: Minh họa quy tắc chỉnh định tín hiệu điều khiển thông qua "học" từ các dữ liệu quá khứ của hệ thống.