

Phát triển thuật toán điều khiển tích cực phản hồi cho các kết cấu trong điều kiện đo hạn chế đáp ứng : Luận án TS. Cơ học: /Lã Đức Việt

Các hệ điều khiển nhân tạo về nguyên tắc gồm 3 thành phần: cảm biến đo, máy kích động sinh lực điều khiển và bộ điều khiển để xử lý tín hiệu. Bộ điều khiển là một đối tượng toán học và được mô tả trong khuôn khổ của lý thuyết điều khiển nói chung. Đối với các kết cấu lớn, do số lượng bộ cảm biến và máy kích động ít hơn số lượng trạng thái mô tả kết cấu nên dẫn tới vấn đề hạn chế đo (không xác định được toàn bộ trạng thái) và hạn chế đặt lực điều khiển (không đặt được lực điều khiển vào toàn bộ trạng thái). Ngoài ra, kích động ngoài thường mang tính ngẫu nhiên và không thể xác định được bằng phép đo. Các thuật toán kinh điển thường coi kích động là các quá trình ngẫu nhiên ồn trắng để luật điều khiển được hình thành khi đó không phụ thuộc vào kích động ngoài. Trong nhiều trường hợp, phương thức trên chưa thực sự mang lại hiệu quả tối ưu. Với lý do trên, đề tài luận án “Phát triển lý thuyết điều khiển tích cực phản hồi cho các kết cấu trong điều kiện đo hạn chế đáp ứng” đã được hình thành.

Mục tiêu của luận án:

Phát triển các thuật toán điều khiển kinh điển cho các kết cấu có sự hạn chế đo, bằng cách sử dụng tối đa thông tin đo được để xác định kích động ngoài

Đối tượng nghiên cứu:

Các kết cấu có nhiều bậc tự do chịu tải trọng ngẫu nhiên và bị hạn chế đo

Phương pháp và công cụ nghiên cứu:

- Phương trình trạng thái được sử dụng để mô tả kết cấu. Phương pháp Monte Carlo được sử dụng để mô tả tải trọng ngẫu nhiên.
- Mô phỏng số được thực hiện nhờ phần mềm MATLAB và công cụ SIMULINK

Bố cục của luận án

Luận án được chia làm 4 chương và 4 phụ lục

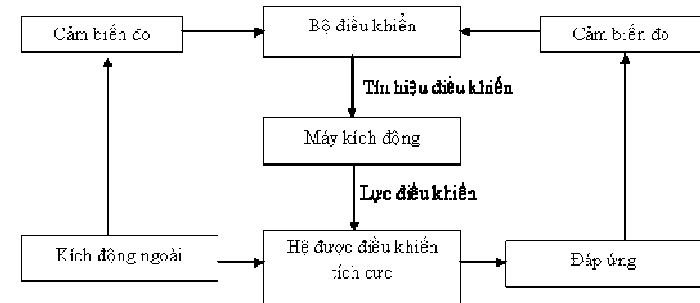
- Chương 1 trình bày tổng quan về lý thuyết điều khiển tích cực, đồng thời chỉ ra vấn đề chính mà luận án tập trung giải quyết.
- Chương 2 trình bày bài toán điều khiển không hạn chế đo. Luận án đề xuất thuật toán điều khiển hồi tiếp - dẫn tiếp kết hợp với nhận dạng kích động để cải thiện bài toán điều khiển không hạn chế đo.
- Chương 3 trình bày bài toán điều khiển không hạn chế đặt lực. Luận án đề xuất thuật toán điều khiển hồi tiếp - dẫn tiếp kết hợp với nhận dạng lực để cải thiện bài toán điều khiển không hạn chế đặt lực.
- Chương 4 trình bày bài toán điều khiển phản hồi đầu ra tổng quát. Phương pháp tách là cơ sở để tách bài toán điều khiển tổng quát thành 2 bài toán được thảo luận trong chương 2 và chương 3. Luận án đưa ra 2 phiên bản điều khiển nâng cao đối với bài toán điều khiển đầu ra tổng quát.
- Các phụ lục trình bày một số cơ sở toán học, chương trình MATLAB và mô hình SIMULINK

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1. Các khái niệm trong điều khiển tích cực

Trong phần này luận án đề cập tới sơ đồ khối cơ bản của một hệ điều khiển tích cực và các khái niệm chủ yếu như đầu ra, đầu vào, điều

khiển dẫn tiếp, điều khiển hồi tiếp. Điều khiển dẫn tiếp (feedforward) là điều khiển đầu vào (tức là kích động ngoài). Điều khiển hồi tiếp (feedback) là điều khiển đầu ra (tức là các đáp ứng). Điều khiển hồi tiếp - dẫn tiếp (feedback - feedforward) là điều khiển cả đầu vào và đầu ra.



Hình 1.1: Sơ đồ khối của một hệ điều khiển tích cực

1.2. Máy kích động và các phương thức điều khiển

Mục này trình bày tổng quan về các loại máy kích động được sử dụng và các phương thức tác động lực để điều khiển. Máy kích động có các dạng: thủy lực, motor điện, điện từ, giảm chấn được điều khiển và vật liệu thông minh. Ba phương thức điều khiển bao gồm: tạo ra ngoại lực, tạo ra nội lực giữa hai bộ phận chuyển động tương đối và tạo ra lực quán tính.

1.3. Ví dụ về các hệ điều khiển tích cực cỡ lớn trong thực tế

Mục này trình bày một số ứng dụng cụ thể của điều khiển tích cực trong lĩnh vực xây dựng dân dụng.

1.4. Tổng quan về các thuật toán điều khiển

Mục này trình bày lịch sử phát triển, những vấn đề nghiên cứu và thành tựu của lý thuyết điều khiển. Trước những năm 1960, lý thuyết điều khiển gọi là cổ điển. Các công cụ chính được sử dụng là phép biến đổi Laplace, đồ thị Nyquist [Nyquist 1932], đồ thị Bode [Bode

1945], và phương pháp Quỹ tích nghiệm (Root Locus) [Evans 1948]. Sau những năm 1960, lý thuyết điều khiển hiện đại ra đời, sử dụng rất nhiều công cụ hiện đại như phép tính ma trận, phương trình trạng thái, lý thuyết các quá trình ngẫu nhiên, các phương pháp tối ưu và các phương pháp trí tuệ nhân tạo như hàm mờ, mạng thần kinh.

1.5. Các nghiên cứu trong nước

Các nghiên cứu điều khiển đối với rôbot, tàu thủy, phương tiện vận chuyển trên cáp treo có thể tham khảo trong các tài liệu [Dinh Cong Huan vcs 2004, Nguyen Tran Hiep vcs 2004, Do Sanh vcs 2004, Dang Xuan Hoai vcs 2006, Anh vcs 2004a]. Các nghiên cứu về lý thuyết điều khiển kết cấu được trình bày trong [Anh vcs 2004b, 2005, Ninh Quang Hai vcs 2004, Nguyễn Chí Sáng 2004]. Nói chung, trong hầu hết các tài liệu trên, vấn đề về hạn chế đo chưa được đặt ra. Mục tiêu của luận án là tập trung nghiên cứu sâu hơn về vấn đề này.

1.5. Vấn đề đặt ra và được nghiên cứu trong luận án

Thuật toán điều khiển kinh điển có những hạn chế sau:

- Thuật toán kinh điển mang tính phản hồi (feedback), nghĩa là hoàn toàn không phụ thuộc vào kích động ngoài, do đó chỉ tối ưu khi kích động ngoài là quá trình ngẫu nhiên ồn trắng.

- Việc tăng quá lớn ma trận phản hồi sẽ dẫn tới các vấn đề về khuyếch đại sai số tính toán và sai số do thời gian trễ

Ý tưởng của luận án là, thay vì điều khiển bằng cách tăng các ma trận phản hồi, các thành phần dẫn tiếp (feedforward) được bổ sung thêm để triệt tiêu bớt ảnh hưởng của kích động ngoài. Cơ sở cho sự hình thành ý tưởng của luận án là thuật toán nhận dạng kích động ngoài [Anh 2000]. Với thuật toán này, trong quá trình điều khiển, kích động ngoài có thể được xác định trực tuyến nhờ vào các số liệu đo đáp ứng. Thuật toán nhận dạng lực ban đầu mới được đặt ra cho trường

KẾT LUẬN

Mục tiêu của luận án là khắc phục những hạn chế của thuật toán điều khiển phản hồi kinh điển cho các hệ có điều kiện đo hạn chế đáp ứng. Cơ sở cho sự cải thiện này dựa trên thuật toán nhận dạng kích động ngoài. Kích động ngoài sau khi được nhận dạng sẽ được sử dụng để tạo ra thành phần dẫn tiếp bổ sung thêm cho thành phần hồi tiếp của thuật toán kinh điển. Các kết quả chính của luận án bao gồm

- Đề xuất cải thiện thuật toán điều khiển kinh điển LQR đối với bài toán điều khiển không hạn chế đo bằng cách bổ sung thêm một thành phần dẫn tiếp dựa trên kích động ngoài được nhận dạng.

- Đề xuất phương thức xác định vị trí đặt lực tối ưu.

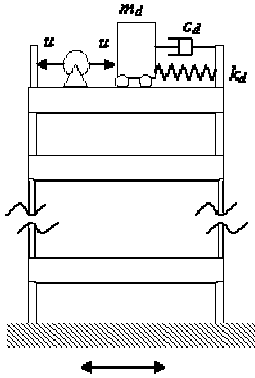
- Đề xuất cải thiện thuật toán điều khiển dạng Kalman Bucy đối với bài toán điều khiển không hạn chế đặt lực bằng cách bổ sung thêm một thành phần dẫn tiếp dựa trên kích động ngoài được nhận dạng.

- Đề xuất phương thức xác định vị trí đặt đầu đo tối ưu.

- Bằng phương pháp tách, bài toán điều khiển phản hồi đầu ra tổng quát của các hệ bị hạn chế điều kiện đo được tách thành 2 bài toán: bài toán điều khiển biến trạng thái xấp xỉ (là bài toán không hạn chế đo) và bài toán điều khiển biến sai số quan sát (là bài toán không hạn chế đặt lực). Trên cơ sở đó, luận án đã đề xuất 2 phiên bản điều khiển nâng cao cho bài toán điều khiển đầu ra tổng quát.

- Mô phỏng số được thực hiện trên một số lượng đáng kể các ví dụ trong nhiều lĩnh vực khác nhau như điều khiển dao động phương tiện chịu tải mặt đường, điều khiển máy bay trong chế độ bay tự động, điều khiển dao động kết cấu chịu tải động đất, điều khiển dao động kết cấu chịu tải sóng và tải gió, điều khiển dao động của dầm ngang chịu tải sóng, điều khiển quỹ đạo của ống ten.

tăng khả năng khuếch đại thời gian trễ và hệ có thể sẽ trở nên không ổn định. Xét hệ có thời gian trễ đo là $\Delta_y=0.1s$ và không có thời gian trễ điều khiển ($\Delta_u=0$).



Hình 4.9: Kết cấu 8 tầng được điều khiển bằng AMD

Bảng 4.7: Đáp ứng khi điều khiển bằng thuật toán LQG

	$\gamma=10^{-1}$	$\gamma=10^{-2}$	$\gamma=10^{-3}$	$\gamma=10^{-4}$
Chỉ tiêu đánh giá J (cm^2s)	165.19	115.04	Mất ổn định	
Chuyển dịch tuyệt đối của tầng 8 (cm)	3.31	2.74		
Chuyển dịch tương đối của AMD (cm)	26.27	31.74		
Lực điều khiển (kN)	50.46	119.75		

Bảng 4.8: Đáp ứng khi điều khiển bằng thuật toán điều khiển nâng cao phiên bản 2

	$\gamma=10^{-1}$	$\gamma=10^{-2}$	$\gamma=10^{-3}$	$\gamma=10^{-4}$
Chỉ tiêu đánh giá J (cm^2s)	126.45	95.57	Mất ổn định	
Chuyển dịch tuyệt đối của tầng 8 (cm)	2.78	2.33		
Chuyển dịch tương đối của AMD (cm)	38.45	41.47		
Lực điều khiển (kN)	265.81	306.13		

Cả thuật toán LQG và thuật toán điều khiển nâng cao phiên bản 2 đều bị mất ổn định khi giảm γ (tức là tăng ma trận phản hồi G_e). Tuy nhiên, khi so sánh chỉ tiêu đánh giá J thì thuật toán điều khiển nâng cao phiên bản 2 có cải thiện hơn.

hợp lý tưởng là đo được hoàn toàn tất cả các trạng thái và đặt được lực điều khiển vào tất cả các trạng thái. Mục tiêu của luận án là phát triển thuật toán nhận dạng lực để có thể áp dụng được vào trường hợp vừa bị hạn chế đo vừa bị hạn chế đặt lực.

CHƯƠNG 2: BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN KHÔNG HẠN CHẾ ĐO

2.1. Giới thiệu

Tất cả các bài toán của chương này được đặt ra với giả thiết không hạn chế đo, nghĩa là trạng thái đầy đủ $x(t)$ của hệ được điều khiển có thể được xác định chính xác và hoàn toàn tại mọi thời điểm. Giả thiết này phi thực tế nhưng kết quả của chương này là cơ sở cho trường hợp tổng quát trong chương 4.

2.2. Thuật toán điều khiển kinh điển LQR

2.2.1. Đặt bài toán

Phương trình trạng thái có dạng:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hf(t), \quad x(0) = x_0 \quad (2.5)$$

Trong đó $x(t)$ là vector trạng thái n chiều, A là ma trận hệ thống cỡ $n \times n$, $f(t)$ là vector n_f chiều mô tả kích động ngoài, $u(t)$ là vector n_u chiều mô tả đầu vào điều khiển. Các ma trận B cỡ $n \times n_u$ và H cỡ $n \times n_f$ lần lượt mô tả vị trí đặt lực điều khiển cũng như kích động ngoài. Chỉ tiêu cực tiểu có dạng tích phân trên miền thời gian

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.7)$$

Q là ma trận trọng số đối xứng thực nửa xác định dương cỡ $n \times n$, R là ma trận trọng số đối xứng thực xác định dương cỡ $n_u \times n_u$.

2.2.2. Lời giải tối ưu thực sự

$$u(t) = u_{FB}(t) + u_{FF}(t) \quad (2.24)$$

trong đó u_{FB} và u_{FF} lần lượt là các thành phần hồi tiếp và dẫn tiếp được xác định theo công thức:

$$u_{FB}(t) = -Gx(t) \quad (2.25)$$

$$u_{FF}(t) = -R^{-1}B^T p(t) \quad (2.26)$$

với

$$G = R^{-1}B^T P \quad (2.27)$$

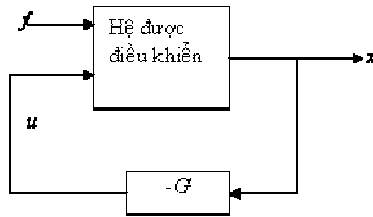
$$PA - PBR^{-1}B^T P + A^T P + Q = 0 \quad (2.22)$$

$$\dot{p}(t) - (G^T B^T - A^T)p(t) + PHf(t) = 0, \quad p(\infty) = 0 \quad (2.28)$$

Do vector $p(t)$ được giải từ hệ phương trình vi phân ngược chiều thời gian (2.28) nên đòi hỏi phải biết trước kích động ngoài trên toàn bộ miền thời gian. Đòi hỏi này là không khả thi và lời giải tối ưu thực sự chỉ mang tính lý thuyết.

2.2.3. Thuật toán điều khiển kinh điển LQR

Luật điều khiển có dạng hồi tiếp $u(t) = u_{FB}(t) = -Gx(t)$ (2.29)



Hình 2.1: Sơ đồ điều khiển LQR

2.3. Các hạn chế của thuật toán kinh điển LQR

2.3.1. Tính không hoàn toàn tối ưu

Ví dụ 2.1: Điều khiển dao động thẳng đứng của ô tô

Trong trường hợp nhiễu đo nhỏ, “phương thức” thứ hai có hiệu quả hơn vì ngoài việc giảm được $e(t)$ trong bài toán điều khiển (4.7) thì giá trị $e(t)$ nhỏ cũng làm giảm $z(t)$ trong bài toán (4.4). Trong khi đó “phương thức” thứ nhất chỉ có tác dụng với bài toán điều khiển $z(t)$. Tuy nhiên khi nhiễu đo lớn thì điều khiển nâng cao phiên bản 2 lại tạo ra lực điều khiển quá lớn, làm tăng chỉ tiêu đánh giá.

4.5. Ảnh hưởng của thời gian trễ

Khi lực điều khiển bị trễ một khoảng thời gian Δ_u và đầu đo bị trễ một khoảng thời gian Δ_y thì phương trình của hệ được điều khiển và phương trình đo có dạng:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \Delta_u) \quad (4.62)$$

$$y(t) = Cx(t - \Delta_y) \quad (4.63)$$

Sử dụng bộ quan sát dạng:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t - \Delta_u) - u_z(t - \Delta_y) \quad (4.64)$$

Trừ hai phương trình (4.62) và (4.64) cho nhau ta thu được:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + u_z(t - \Delta_y) \quad (4.65)$$

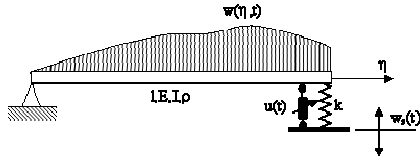
Ta thu được bài toán điều khiển (4.65) độc lập với bài toán điều khiển (4.64). Kết quả này rất thuận lợi cho việc xét ổn định vì nó cũng tách bài toán ổn định dưới tác dụng của 2 thời gian trễ về bài toán ổn định dưới tác dụng của từng thời gian trễ vào từng bài toán đã được thảo luận trong chương 2 và 3.

Ví dụ 4.4: Ảnh hưởng của thời gian trễ đến điều khiển kết cấu chịu động đất

Các ma trận trọng số được cố định, trừ ma trận trọng số V được chọn bằng γI_2 trong đó I_2 là ma trận đơn vị 2×2 còn γ là một tham số có thể thay đổi được. Giảm γ sẽ tăng hiệu quả của bộ quan sát nhưng làm

Có thể so sánh các hình 4.6 và 4.7 với hình 4.1 để thấy rằng phiên bản 1 là sự bổ sung thành phần điều khiển dẫn tiếp vào bài toán điều khiển trạng thái xấp xỉ $z(t)$ (bài toán không hạn chế đo) còn phiên bản 2 là sự bổ sung thành phần điều khiển dẫn tiếp vào bài toán điều khiển sai số $e(t)$ (bài toán không hạn chế đặt lực).

Ví dụ 4.3: So sánh các thuật toán điều khiển cho kết cấu dầm ngang
Xét kết cấu dầm ngang có lực điều khiển ở đầu dầm



Hình 4.8: Kết cấu dầm ngang được điều khiển

Qua các bảng kết quả ta thấy rằng, 2 phiên bản điều khiển nâng cao có “phương thức” khác nhau để tăng hiệu quả giảm dao động. Phiên bản 1 làm giảm chuyển dịch xấp xỉ $z(t)$, tức là nâng cao bài toán điều khiển (4.4). Phiên bản 2 làm giảm sai số quan sát $e(t)$, tức là nâng cao bài toán điều khiển (4.7).

Bảng 4.2: Kết quả mô phỏng số, nhiễu đo nhỏ

	Không điều khiển	LQG	Phiên bản 1	Phiên bản 2
Chuyển dịch (cm)	0.20	0.13	0.12	0.11
Chuyển dịch xấp xỉ (cm)	0.20	0.03	0.02	0.11
Sai số quan sát (cm)	0.00	0.12	0.12	0.002
Lực điều khiển (kN)	0.00	0.67	1.19	1.70
Chỉ tiêu đánh giá	0.42	0.17	0.14	0.13

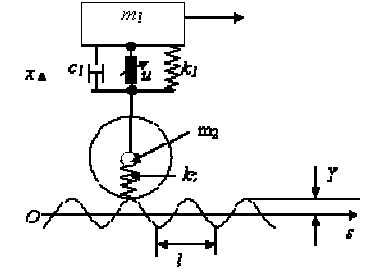
Bảng 4.3: Kết quả mô phỏng số, nhiễu đo lớn

	Không điều khiển	LQG	Phiên bản 1	Phiên bản 2
Chuyển dịch (cm)	0.19	0.16	0.15	0.15
Chuyển dịch xấp xỉ (cm)	0.19	0.03	0.01	0.16
Sai số quan sát (cm)	0.00	0.16	0.16	0.03
Lực điều khiển (kN)	0.00	0.52	1.07	1.61
Chỉ tiêu đánh giá	0.37	0.27	0.24	4.21

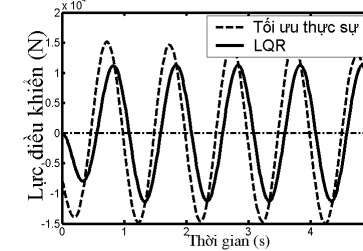
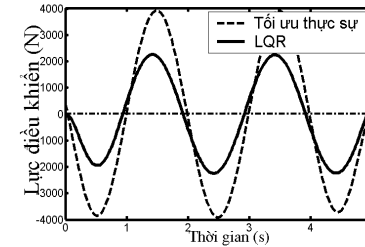
Đường cong mặt đường có dạng sóng điều hoà:

$$y(s) = Y \sin\left(\frac{\pi s}{L}\right) \quad (2.37)$$

trong đó Y là biên độ sóng, L là chiều dài nửa bước sóng. Thuật toán LQR không đạt được tối ưu thực sự.



Hình 2.2: Mô hình ô tô được điều khiển tích cực



Hình 2.3: So sánh lực điều khiển với các bước sóng L khác nhau

2.3.2. Khả năng khuếch đại thời gian trễ

Gọi thời gian trễ của lực điều khiển là Δ_u , phương trình chuyển động của hệ khi xuất hiện thời gian trễ là:

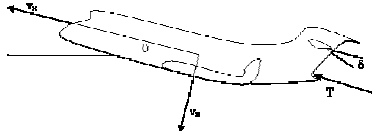
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hf(t) = Ax(t) - BGx(t - \Delta_u) + Hf(t) \quad (2.39)$$

Giá trị riêng của hệ có trễ là nghiệm của phương trình

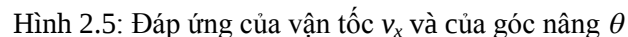
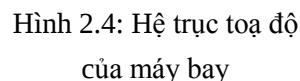
$$\det \left(A - BG + BG \left((\lambda \Delta_u) - \frac{(\lambda \Delta_u)^2}{2} + \frac{(\lambda \Delta_u)^3}{6} - \dots \right) - \lambda I_n \right) = 0 \quad (2.41)$$

Ví dụ 2.2: Điều khiển chuyển động của máy bay

Xét thời gian trễ bằng 0.0336 s (bằng 1% chu kỳ riêng bé nhất của máy bay). Khi giảm trọng số r (tăng ma trận phản hồi) thì các đáp ứng có thể được giảm đáng kể. Tuy nhiên, nếu r quá nhỏ ($r=2 \times 10^{-6}$) thì thời gian trễ làm hệ mất ổn định và đáp ứng của góc nâng lại bị tăng lên.



Hình 2.4: Hệ trục tọa độ của máy bay



Mục tiêu của phần này là cải tiến thuật toán LQR bằng cách thêm vào một thành phần dẫn tiếp có thể làm cho lực điều khiển gần hơn với lực điều khiển tối ưu. Luật điều khiển này gọi là hồi tiếp – dẫn tiếp.

L luận án đề xuất các phiên bản điều khiển nâng cao dựa vào những thuật toán đã đề xuất trong chương 2 và chương 3.

Hình 4.6: Sơ đồ phiên bản điều khiển nâng cao 1

[illegible]

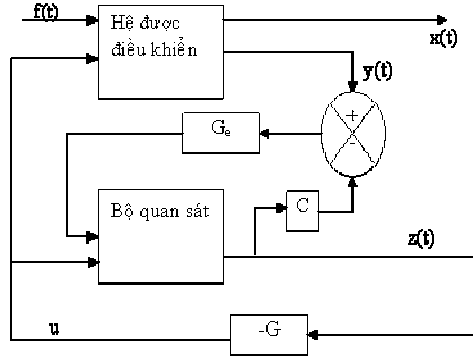
Hình 4.7: Sơ đồ phiên bản điều khiển nâng cao 2

khuyến không hạn chế đặt lực được thực hiện nhờ thuật toán điều khiển dạng Kalman Bucy.

$$u_z(t) = -G_e y_e(t) \quad (4.9)$$

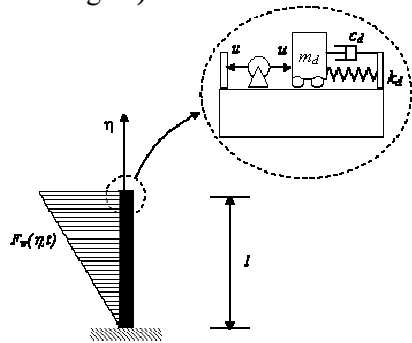
$$u(t) = -Gz(t) \quad (4.12)$$

trong đó G_e được tính theo (3.18), G tính theo (2.27)



Hình 4.1: Sơ đồ điều khiển LQG

Thuật toán điều khiển kinh điển LQG được minh họa qua ví dụ 4.1 (điều khiển kết cấu được điều khiển bằng thiết bị AMD, chịu tải trọng gió ngẫu nhiên) và ví dụ 4.2 (điều khiển quỹ đạo chuyển động của ăngten).



Hình 4.2: Hệ dầm đứng chịu tải gió được điều khiển bởi AMD



Hình 4.3: Ăng ten parabol quan sát bầu trời

và viết tắt là FB-FF (Feedback-Feedforward). Luật điều khiển FB-FF được đề xuất có dạng:

$$u(t) = u_{FB}(t) + u_{FF}(t) \quad (2.51)$$

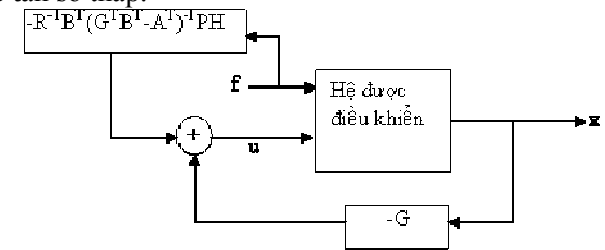
$$u_{FB}(t) = -Gx(t) \quad (2.52)$$

$$u_{FF}(t) = -R^{-1}B^T(G^TB^T - A^T)^{-1}PHf(t) \quad (2.53)$$

Điều kiện để luật điều khiển đề xuất tốt hơn LQR

$$\omega_f = \frac{\max_t \|(G^TB^T - A^T)^{-1}PHf(t)\|}{\max_t \|PHf(t)\|} < 1 \quad (2.59)$$

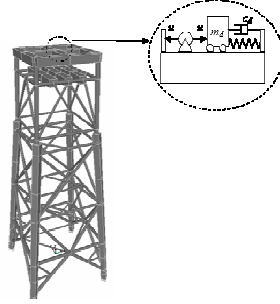
Bất đẳng thức (2.59) cho thấy luật điều khiển FB-FF được đề xuất sẽ chỉ hiệu quả hơn luật điều khiển LQR trong trường hợp kích động ngoài có tần số thấp.



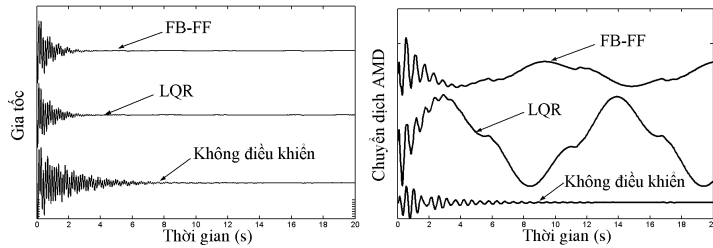
Hình 2.6: Sơ đồ khối của điều khiển FB-FF

Ví dụ 2.3: Điều khiển kết cấu khung không gian chịu tải trọng sóng

Kết cấu khung chịu tải trọng sóng, được điều khiển bằng hệ điều khiển khối lượng AMD. Thuật toán kinh điển LQR và thuật toán FB-FF được đề xuất cùng có khả năng giảm gia tốc như nhau nhưng thuật toán FB-FF có chuyển dịch của AMD bé hơn đáng kể.



Hình 2.7: Kết cấu khung không gian



Hình 2.8: So sánh các đáp ứng của kết cấu khung

2.5. Đề xuất thuật toán nhận dạng kích động ngoài

Do kích động ngoài không đo được nên để hiện thực hoá luật điều khiển FB-FF, thuật toán nhận dạng kích động ngoài [Anh 2000] được sử dụng để tính thành phần dẫn tiếp (2.53)

$$u_{FF}(t) = -R^{-1}B^T \left(G^T B^T - A^T \right)^{-1} \times P \left(\dot{x}(t-\Delta) - (A-BG)x(t-\Delta) - Bu_{FF}(t-\Delta) \right) \quad (2.67)$$

trong đó Δ là một thời gian trễ nhỏ được ta ấn định trước. Sơ đồ khối của điều khiển FB-FF có kết hợp với thuật toán nhận dạng:

Bài toán đặt ra là tìm lực điều khiển $u(t)$ là hàm của biến đo $y(t)$ sao cho giảm được đáp ứng của trạng thái $x(t)$. Xét biến trạng thái $z(t)$ được xác định từ phương trình vi phân được gọi là bộ quan sát:

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) - u_z(t) \quad (4.4)$$

Một trong những ưu điểm nổi bật của bộ quan sát (4.4) là có thể tách được bài toán điều khiển tối ưu phản hồi đầu ra tổng quát thành 2 bài toán dễ giải hơn. Hai bài toán đó lần lượt là bài toán điều khiển không hạn chế đầu đo được thảo luận trong chương 2 và bài toán điều khiển không hạn chế đặt lực được thảo luận trong chương 3. Thật vậy, ký hiệu $e(t)$ là sai số quan sát:

$$e(t) = x(t) - z(t) \quad (4.5)$$

và $y_e(t)$ là vector đo của sai số:

$$y_e(t) = y(t) - Cz(t) = Cx(t) + v(t) - Cz(t) = Ce(t) + v(t) \quad (4.6)$$

Trừ 2 phương trình (4.1) và (4.4) có

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + u_z(t) + Hf(t) \quad (4.7)$$

Ta có:

$$\|x(t)\| = \|z(t) + e(t)\| \leq \|z(t)\| + \|e(t)\| \quad (4.8)$$

Vậy nếu như ta giảm được $z(t)$ và $e(t)$ thì ta có thể giảm trạng thái thực $x(t)$. Tóm lại, bằng việc sử dụng bộ quan sát, bài toán điều khiển đầu ra tổng quát được tách thành 2 bài toán:

- Bài toán (4.7) với phương trình đo (4.6) là bài toán điều khiển không hạn chế đặt lực được thảo luận trong chương 3.

- Bài toán (4.4) là bài toán điều khiển không hạn chế đo được thảo luận trong chương 2.

4.3. Thuật toán điều khiển tối ưu kinh điển LQG

Trong trường hợp kinh điển, bài toán điều khiển không hạn chế đầu đo được thực hiện bằng thuật toán điều khiển LQR còn bài toán điều

Xét kết cấu dầm ngang trình bày trong Ví dụ 3.3. Để có thể đánh giá được đầy đủ hiệu quả thực của việc bổ sung thêm thành phần dẫn tiếp, cần xét đến ảnh hưởng của nhiều đo. Các nhiều đo được mô tả bằng một quá trình ồn trắng có cường độ I_v và thời gian lấy mẫu Δv .

Cường độ nhiễu đo và thời gian lấy mẫu	Điều khiển dạng Kalman Bucy	Điều khiển dạng Kalman Bucy có bổ sung thành phần dẫn tiếp
$I_v=10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}, \Delta_v=5 \times 10^{-4} \text{ s}$	0.139	0.12
$I_v=10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}, \Delta_v=5 \times 10^{-4} \text{ s}$	0.145	0.012
$I_v=10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}, \Delta_v=25 \times 10^{-4} \text{ s}$	0.14	0.05
$I_v=10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}, \Delta_v=25 \times 10^{-4} \text{ s}$	0.173	0.005

Kết quả cho thấy rằng bổ sung thành phần dẫn tiếp sẽ làm giảm đáp ứng chuyển dịch của điểm giữa dầm. Hiệu quả của việc bổ sung thành phần dẫn tiếp sẽ tốt nếu như cường độ nhiễu đo nhỏ cộng với thời gian lấy mẫu đủ lớn.

4.1. Giới thiệu

Chương 2 sử dụng giả thiết không hạn chế đo. Chương 3 sử dụng giả thiết không hạn chế đặt lực. Chương này từ bỏ cả 2 giả thiết lý tưởng đó để hình thành bài toán điều khiển tối ưu phản hồi đầu ra tổng quát.

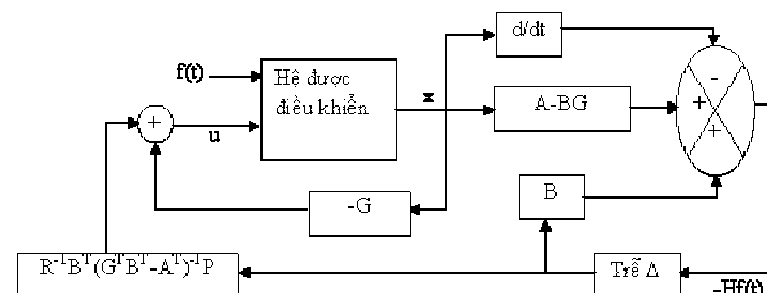
4.2. Phương pháp tách

Xét hệ tuyến tính được điều khiển có phương trình trạng thái sau:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hf(t), \quad x(0) = x_0 \quad (4.1)$$

với phương trình đo là:

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (4.2)$$



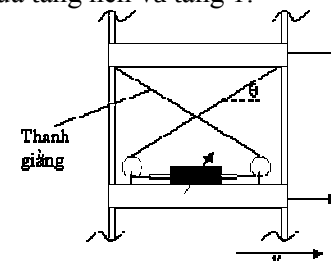
Hình 2.9: Sơ đồ thuật toán điều khiển FB-FF kết hợp với nhân dạng

2.6. Đề xuất cách xác định vị trí đặt lực tối ưu

Luận án đề xuất phương pháp xác định vị trí đặt lực tối ưu dựa trên việc giảm thiểu độ lệch giữa lực điều khiển của thuật toán FB-FF với lực điều khiển tối ưu thực sự. Tiêu chuẩn sau được dùng để xác định vị trí đặt lực tối ưu:

$$J_u = \left\| \left(G^T B^T - A^T \right)^{-1} P H \right\| \quad (2.76)$$

Ví dụ 2.4: Kết cấu 8 tầng, điều khiển bằng các thanh giằng tích cực
Qua bảng tính ta có thể thấy rằng bằng chỉ tiêu J_u thì vị trí tốt nhất để
đặt lực là giữa tầng nền và tầng 1.



Hình 2.10:
Hệ thanh
giằng tích
cực giữa 2
tầng

Bảng 2.2: Chỉ tiêu J_μ với các vị trí đặt lực khác nhau

Vị trí đặt lực điều khiển	Giữa nền và tầng 1	Giữa tầng 1 và 2	Giữa tầng 2 và 3	Giữa tầng 3 và 4	Giữa tầng 4 và 5	Giữa tầng 5 và 6	Giữa tầng 6 và 7	Giữa tầng 7 và 8
J _n	2.21	2.29	2.46	2.77	3.27	4.12	5.65	8.86

CHƯƠNG 3: BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN KHÔNG HẠN CHẾ ĐẶT LỰC

3.1. Giới thiệu

Giả thiết của chương này là không hạn chế đặt lực, nghĩa là lực điều khiển có thể đặt vào mọi điểm một cách tùy ý và không chịu một sự ràng buộc nào về độ lớn. Giả thiết này phi thực tế nhưng kết quả của chương này là cơ sở cho trường hợp tổng quát trong chương 4.

3.2. Luật điều khiển dạng Kalman Bucy

3.2.1. Đặt bài toán

Hệ không hạn chế đặt lực được mô tả bởi phương trình:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + u(t) + Hf(t), \quad x(0) = x_0 \quad (3.1)$$

Do bị hạn chế đo nên chỉ xác định được một tổ hợp tuyến tính của các trạng thái cộng thêm với một nhiễu đo.

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (3.2)$$

trong đó C là ma trận chữ nhật cỡ $p \times n$ có số hàng thường nhỏ hơn số cột ($p < n$). Đại lượng $y(t)$ là biến đo, $v(t)$ được gọi là nhiễu đo. Bài toán đặt ra là tìm lực điều khiển $u(t)$ là hàm của biến đo $y(t)$ sao cho cực tiểu hoá trạng thái $x(t)$.

3.2.2. Luật điều khiển dạng Kalman Bucy

Giả sử các quá trình ngẫu nhiên ồn trắng $Hf(t)$ và $v(t)$ có ma trận cường độ tương ứng là W và V , đồng thời 2 quá trình này cũng độc lập với nhau.

b. Đo chuyển dịch tuyệt đối

Bảng 3.4: Hiệu quả nhận dạng lực (đo chuyển động tuyệt đối)

Đo chuyển dịch tuyệt đối của tầng	1	2	3	4	5	6	7	8
J_y	1.88	1.16	0.79	0.55	0.38	0.3	0.32	0.43
$\frac{\max_t E_r(t) }{\max_t f_c(t) }$	0.32	0.26	0.22	0.19	0.2	0.21	0.21	0.21

Vị trí đo chuyển dịch tuyệt đối của các tầng cao có hiệu quả hơn

3.6. Đề xuất cải thiện điều khiển bằng thành phần dẫn tiếp

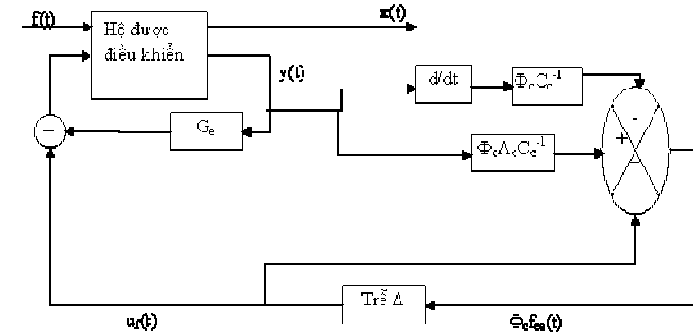
Luận án đề xuất bổ sung thêm một thành phần dẫn tiếp vào lực điều khiển. Cơ sở cho đề xuất này là thuật toán nhận dạng kích động ngoài trình bày trong mục 3.4. Lực điều khiển được đề xuất dạng:

$$u(t) = -G_e y(t) + u_f(t) = -G_e (Cx(t) + v(t)) + u_f(t) \quad (3.96)$$

Thành phần dẫn tiếp $u_f(t)$ được lựa chọn để không tác động vào các dạng riêng tần số cao và triệt tiêu được kích động ngoài tác động vào các dạng riêng tần số thấp

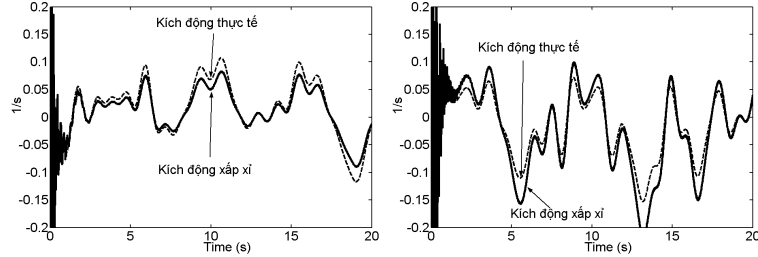
$$u_f(t) = -\Phi_c C_c^{-1} \dot{y}(t - \Delta) + \Phi_c \Lambda_c C_c^{-1} y(t - \Delta) + u_f(t - \Delta) \quad (3.110)$$

Trong đó Δ là một thời gian trễ để khử vòng lặp đại số.



Hình 3.14: Sơ đồ điều khiển có bổ sung thành phần dẫn tiếp

Sự dập dềnh của sóng biển được mô tả bởi một quá trình ngẫu nhiên ồn màu cấp 1. Kết quả xấp xỉ kích động ngoài như sau:



Hình 3.12 và 3.13: Kích động thực và xấp xỉ, vị trí đo tại $l/2$ và $3l/4$. Kết quả cho thấy thuật toán được đề xuất để nhận dạng kích động tác động vào các dạng riêng đầu tiên là có hiệu quả.

3.5. Đề xuất cách xác định vị trí đặt đầu đo tối ưu

Luận án đề xuất phương pháp xác định vị trí đặt đầu đo tối ưu dựa trên việc giảm thiểu sai số của thuật toán nhận dạng kích động ngoài. Tiêu chuẩn sau dùng để xác định vị trí đặt đầu đo tối ưu:

$$J_y = \|C_c^{-1}C_r\| \quad (3.94)$$

Ví dụ 3.4: Xác định vị trí đặt đầu đo tối ưu cho kết cấu 8 tầng

a. Đo chuyển dịch tương đối

Bảng 3.3: Hiệu quả nhận dạng lực (đo chuyển động tương đối)

Đo chuyển dịch tương đối giữa các tầng	nền -1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
J_y	1.84	1.92	2.1	2.42	2.93	3.84	5.7	11.34
$\frac{\max_t E_r(t) }{\max_t f_c(t) }$	0.32	0.21	0.22	0.25	0.27	0.32	0.38	0.42

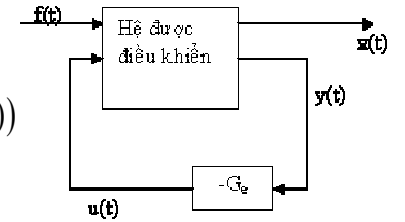
Vị trí đặt đầu đo chuyển dịch tương đối tại các tầng thấp sẽ tốt hơn.

Luật điều khiển Kalman Bucy có dạng phản hồi:

$$u(t) = -G_e y(t) = -G_e (Cx(t) + v(t)) \quad (3.3)$$

$$G_e = P_e C^T V^{-1} \quad (3.18)$$

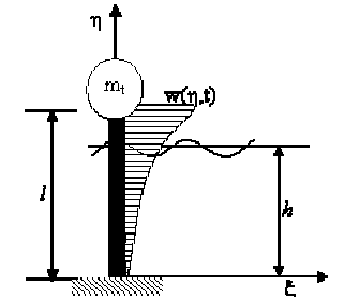
$$AP_e + P_e A^T + W - P_e C^T V^{-1} C P_e = 0 \quad (3.19)$$



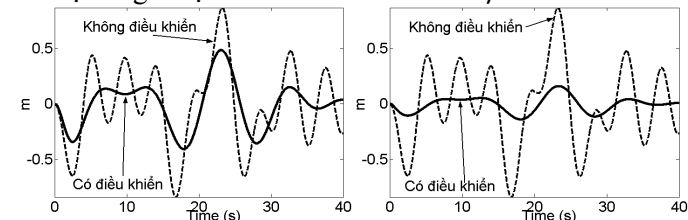
Hình 3.1: Sơ đồ điều khiển dạng Kalman Bucy

Ví dụ 3.1: Thiết kế luật điều khiển dạng Kalman – Bucy cho kết cấu dầm chịu tải trọng sóng

Lực sóng được tính dựa vào lý thuyết sóng tuyến tính Airy và phương trình Morison. Phân bố của chiều cao sóng có dạng phổ Pierson-Moskowitz và sau đó được chuyển thành tiến trình theo thời gian bằng phương pháp Monte Carlo. Đưa vào tham số γ có thể thay đổi được để đạt được sự cân bằng thích hợp giữa 2 ma trận trọng số W và V . Khi giảm γ nghĩa là ta chú trọng giảm trạng thái $x(t)$ hơn khả năng khuếch đại nhiễu đo và ngược lại. Mô phỏng số được thực hiện với một số giá trị khác nhau của tham số γ .



Hình 3.2: Dầm thẳng đứng chịu tải trọng sóng



Hình 3.4 và 3.5: Chuyển dịch đỉnh, $\gamma=10^{-4}$ và $\gamma=10^{-5}$

Kết quả cho thấy rằng giảm γ , tức là giảm độ quan trọng của nhiễu đo thì hiệu quả điều khiển càng tăng.

3.3. Hạn chế của luật điều khiển dạng Kalman Bucy

Xét biến đo không chịu ảnh hưởng của nhiễu đo mà chịu ảnh hưởng của thời gian trễ Δ_y . Phương trình của hệ được điều khiển khi có thời gian trễ trở thành:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - G_e Cx(t - \Delta_y) + Hf(t) \quad (3.49)$$

Giá trị riêng λ của hệ phương trình có trễ (3.49) là nghiệm của

$$\det \left(A - G_e C + G_e C \left((\lambda \Delta_y) - \frac{(\lambda \Delta_y)^2}{2} + \frac{(\lambda \Delta_y)^3}{6} - \dots \right) - \lambda I_n \right) = 0 \quad (3.51)$$

Khi thời gian trễ $\Delta_y=0$ thì λ là giá trị riêng của ma trận $A-G_e C$ và các giá trị riêng này làm hệ ổn định. Khi tồn tại thời gian trễ Δ_y thì việc tăng độ lớn các thành phần của ma trận phản hồi G_e sẽ dẫn tới sự khuếch đại thời gian trễ Δ_y , ảnh hưởng tới hiệu quả điều khiển.

3.4. Đề xuất thuật toán nhận dạng kích động ngoài

Luận án đề xuất phương pháp sử dụng số liệu đo hạn chế để xác định kích động ngoài tác động vào các dạng riêng tương ứng với các giá trị riêng nhỏ. Vì cỡ của vector y là $p \times 1$ nên ta tìm cách nhận dạng kích động ngoài tác động vào p dạng riêng đầu tiên. Giả sử ma trận $A-G_e C$ có n giá trị riêng là λ_i ($i=1, \dots, n$) và các vector riêng tương ứng là Φ_i ($i=1, \dots, n$). Sử dụng ký hiệu:

$$\Phi^{-1} = \Psi = [\Psi_1^T, \Psi_2^T, \dots, \Psi_n^T]^T \quad (3.56)$$

Và xét một loạt các ký hiệu sau:

$$\Phi_c = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p], \Phi_r = [\Phi_{p+1}, \Phi_{p+2}, \dots, \Phi_n] \quad (3.61)$$

$$\Psi_c = [\Psi_1^T, \Psi_2^T, \dots, \Psi_p^T]^T, \Psi_r = [\Psi_{p+1}^T, \Psi_{p+2}^T, \dots, \Psi_n^T]^T \quad (3.62)$$

$$\Lambda_c = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p), \Lambda_r = \text{diag}(\lambda_{p+1}, \lambda_{p+2}, \dots, \lambda_n) \quad (3.63)$$

$$C_c = C\Phi_c, C_r = C\Phi_r \quad (3.64)$$

$$x_c(t) = \Psi_c x(t), x_r(t) = \Psi_r x(t) \quad (3.65)$$

$$f_c(t) = \Psi_c Hf(t) - \Psi_c G_e v(t), f_r(t) = \Psi_r Hf(t) - \Psi_r G_e v(t) \quad (3.66)$$

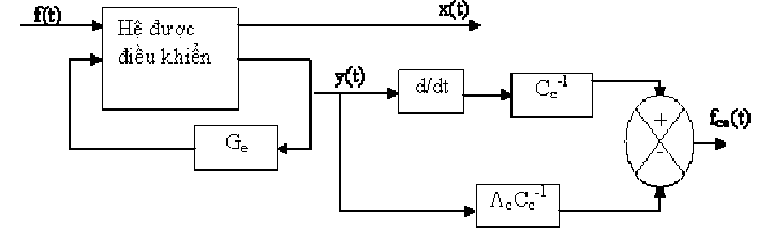
Ký hiệu chỉ số dưới c dùng để chỉ các đại lượng liên quan đến p dạng riêng đầu còn chỉ số dưới r chỉ các đại lượng liên quan đến $n-p$ dạng riêng còn lại. Ta xét một đại lượng là xấp xỉ của $f_c(t)$ và ký hiệu là $f_{ce}(t)$. Xấp xỉ này được xác định bởi

$$f_{ce}(t) = C_c^{-1} \dot{y}(t) - \Lambda_c C_c^{-1} y(t) \quad (3.73)$$

Sai số của sự nhận dạng lực là:

$$E_r(t) = f_{ce}(t) - f_c(t) = C_c^{-1} C_r \dot{x}_r(t) - \Lambda_c C_c^{-1} C_r x_r(t) + C_c^{-1} \dot{v}(t) - \Lambda_c C_c^{-1} v(t) \quad (3.74)$$

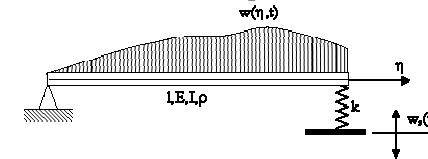
Sai số $E_r(t)$ phụ thuộc vào vị trí đặt đầu đo (các ma trận C_c và C_r), dao động của các dạng riêng tần số cao $x_r(t)$ và nhiễu đo $v(t)$.



Hình 3.9: Sơ đồ nhận dạng lực từ biến đo

Ví dụ 3.3: Nhận dạng kích động ngoài cho kết cấu dầm ngang

Kết cấu dầm ngang mô tả cầu để vận chuyển các phương tiện trên biển [Applebee 1997], đầu tựa đơn được nối với một phần cố định, phần còn lại tựa trên một vật nổi, dập dềnh lên xuống theo sóng biển.



Hình 3.10: Kết cấu dầm ngang chịu tải dập dềnh của sóng