**BỘ GIÁO DỤC & ĐÀO TẠO**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH**

**KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ**

**BỘ MÔN TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN**

**-----------------⸙∆⸙-----------------**



**ĐỒ ÁN ĐIỀU KHIỂN TỰ ĐỘNG**

**Đề Tài:**

**MÔ HÌNH ROBOT 2 BÁNH TỰ CÂN BẰNG**

**SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN LQR**

**GVHD:** ThS. Nguyễn Phong Lưu

**SVTH:** **MSSV:**

Nguyễn Văn Pháp 21151303

Vũ Tiến Phát 21151309

**Tp. Hồ Chí Minh tháng 6 năm 2024**

# **LỜI CAM ĐOAN**

Đề tài này là do nhóm của chúng em tự thực hiện dựa vào một số tài liệu tham khảo và chúng em xin cam đoan đề tài này không sao chép bất kỳ công trình đã có trước đó. Nếu có sao chép nhóm chúng em hoàn toàn chịu trách nhiệm.

# LỜI CẢM ƠN

Trong suốt quá trình thực hiện đề tài, mặc dù gặp nhiều khó khăn nhưng được sự giúp đỡ từ thầy, cô, các anh chị đi trước cũng như các bạn nên Đồ án cũng đã hoàn thành đúng tiến độ. Nhóm thực hiện xin cảm ơn thầy Nguyễn Văn Đông Hải qua những video hướng dẫn cực kỳ hay và bổ ích.

Đồng thời, nhóm cũng xin chân thành cảm ơn các thầy cô trong Khoa Điện Điện Tử đã tạo điều kiện, cung cấp những kiến thức cơ bản cần thiết để nhóm có đủ kiến thức để thực hiện quá trình nghiên cứu.

Ngoài ra, nhóm còn nhận được sự hướng dẫn nhiệt tình từ các anh (chị) đi trước. Anh (chị) cũng giới thiệu thêm các tài liệu tham khảo trong việc thực hiện nghiên cứu.

**MỤC LỤC**

[LỜI CAM ĐOAN ii](#_Toc168314733)

[LỜI CẢM ƠN iii](#_Toc168314734)

[DANH MỤC HÌNH ẢNH v](#_Toc168314735)

[DANH MỤC BẢNG vi](#_Toc168314736)

[CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN 1](#_Toc168314737)

[1.1. Lý do chọn đề tài 1](#_Toc168314738)

[1.2. Mục tiêu đề tài 2](#_Toc168314739)

[1.3. Phương pháp thực hiện 3](#_Toc168314740)

[CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT 4](#_Toc168314741)

[2.1. Mô hình toán học 4](#_Toc168314742)

[2.2. Bộ lọc Kalman 12](#_Toc168314743)

[2.2.1. Giới thiệu về bộ lọc Kalman 12](#_Toc168314744)

[2.2.2. Quá trình ước lượng 12](#_Toc168314745)

[2.2.3. Thuật toán Kalman rời rạc: 13](#_Toc168314746)

[CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG MATLAB 16](#_Toc168314747)

[3.1. Tiến hành mô phỏng 16](#_Toc168314748)

[3.2. Kết quả mô phỏng 19](#_Toc168314749)

[CHƯƠNG 4. MÔ HÌNH THỰC TẾ 20](#_Toc168314750)

[CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN 23](#_Toc168314751)

[TÀI LIỆU THAM KHẢO 24](#_Toc168314752)

# DANH MỤC HÌNH ẢNH

[Hình 1. Mô hình xe 2 bánh tự cân bằng trong mặt phẳng 5](#_Toc168314594)

[Hình 2. Quy trình thực hiện bộ lọc Kalman 14](#_Toc168314595)

[Hình 3. Tổng quan chu trình thực hiện bộ lọc Kalman hoàn chỉnh 15](#_Toc168314596)

[Hình 4. Thông số hệ thống xe 2 bánh tự cân bằng. 16](#_Toc168314597)

[Hình 5. Ma trận A 16](#_Toc168314598)

[Hình 6. Ma trận B 17](#_Toc168314599)

[Hình 7. Thông số ma trận Q và ma trận R. 17](#_Toc168314600)

[Hình 8. Kết quả tính ma trận K của LQR. 17](#_Toc168314601)

[Hình 9. Mô phỏng Simulink 18](#_Toc168314602)

[Hình 10. Khối Xe\_2\_Banh\_Tu\_Can\_Bang 18](#_Toc168314603)

[Hình 11. Thông số mô hình trong khối Matlab function 19](#_Toc168314604)

[Hình 12. Kết quả mô phỏng. 19](#_Toc168314605)

# DANH MỤC BẢNG

[Bảng 1: Ký hiệu và ý nghĩa các đại lượng 6](#_Toc168309354)

# CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

## Lý do chọn đề tài

Ngày nay, vấn đề về ùn tắc giao thông và ô nhiễm môi trường tại các thành phố lớn do các phương tiện giao thông cá nhân gây ra đang được quan tâm hàng đầu. Vì vậy, việc tìm hiểu và chế tạo ra các loại phương tiện di chuyển cá nhân ít chiếm diện tích không gian và không tạo ra khí thải gây ô nhiễm môi trường đang được quan tâm nghiên cứu bởi nhiều người. Một sản phẩm đã được đưa ra sau sự nghiên cứu, được gọi là xe hai bánh cân bằng, giúp con người di chuyển linh hoạt hơn, ít chiếm không gian và thân thiện với môi trường. Sự thiết thực và hấp dẫn của đề tài này đã được nhận thấy cũng như có liên quan đến những kiến thức được học tại trường, do đó việc thực hiện đề tài này đã được quyết định bởi nhóm chúng em, với mong muốn tìm hiểu về loại hình di chuyển thông minh này.

## Mục tiêu đề tài

Mục tiêu của đề tài là xây dựng mô hình robot cân bằng hai bánh dựa trên lý thuyết về con lắc ngược. Các mục tiêu bao gồm:

* Đưa ra mô hình robot và nguyên lý hoạt động tự cân bằng.
* Tính toán các thông số động học, phương trình trạng thái không gian của mô hình.
* Tính toán, chọn cảm biến, bộ điều khiển động cơ và bộ điều khiển trung tâm. Trong đề tài, cảm biến sử dụng là MPU 6050, bộ điều khiển trung tâm là STM32 (STM32F407VET6).
* Mô phỏng mô hình trên Matlab Simulink.
* Nghiên cứu và ứng dụng bộ lọc Kalman để lọc nhiễu từ cảm biến.
* Đưa ra thuật toán điều khiển động cơ và giữ cân bằng cho robot.
* Robot có thể hoạt động một cách tự động.

## Phương pháp thực hiện

* Thiết kế và thi công phần cứng cho xe hai bánh tự cân bằng.
* Xác định góc nghiêng của xe sử dụng cảm biến MPU 6050 kết hợp với bộ lọc Kalman để lọc nhiễu.
* Sử dụng thuật toán LQR để điều khiển xe cân bằng.
* Sử dụng bộ điều khiển PI để tăng độ đáp ứng của thuật toán LQR.

# CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

## Mô hình toán học

* *Lý thuyết về LQR (Linear – quadratic regulator)*

Đối tượng tuyến tính mô tả bởi phương trình trạng thái:

Ta phải thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái K sao cho hàm mục tiêu J là nhỏ nhất.

Xác định hàm chỉ tiêu chất lượng:

Trong đó Q và R là các ma trận trọng số.

Quy tắc điều khiển phản hồi để giảm thiểu giá trị của hàm J là:

K được xác định là :

Khi S là hằng số thì 𝑆 = 0 ta có phương trình Riccati như sau:

* *Sơ đồ và hệ quy chiếu xe 2 bánh tự cân bằng*

A diagram of a wheel with wheels and arrows

Description automatically generated with medium confidence

Hình 1. Mô hình xe 2 bánh tự cân bằng trong mặt phẳng

Bảng 1: Ký hiệu và ý nghĩa các đại lượng

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ký hiệu | Đơn vị | Ý nghĩa |
| m | Kg | Khối lượng của bánh xe |
| M | Kg | Khối lượng của Robot |
| R | m | Bán kính bánh xe |
| W | m | Chiều ngang của Robot |
| D | m | Chiều rộng của Robot |
| H | m | Chiều cao của Robot |
| L | m | Khoảng cách từ trọng tâm Robot đến trục bánh xe |
| fw |  | Hệ số ma sát giữa bánh xe và mặt phẳng di chuyển |
| fm |  | Hệ số ma sát giữa Robot và động cơ DC |
| Jm | kgm2 | Moment quán tính động cơ DC |
| Rm | Ω | Điện trở động cơ DC |
| Kb | Vs/rad | Hệ số EMF của động cơ DC |
| Kt | Nm/A | Moment xoắn của động cơ DC |
| N |  | Tỉ số giảm tốc |
| G | m/s2 | Gia tốc trọng trường |
| *θ* | rad | Góc trung bình của bánh trái và bánh phải |
| *θl,r* | rad | Góc của bánh trái và bánh phải |
| *ψ* | rad | Góc nghiêng của phần thân Robot |
| *ϕ* | rad | Góc xoay của Robot |
| xl, yl, zl | m | Tọa độ bánh trái |
| xr, yr, zr | m | Tọa độ bánh phải |
| xm, ym, zm | m | Tọa độ trung bình |
| Fθ, Fψ, Fϕ | Nm | Moment phát động theo các phương khác nhau |
| Fl, r | Nm | Moment phát động của động cơ bánh trái, phải |
| il, ir | A | Dòng điện động cơ bánh trái, phải |
| vl, vr | V | Điện áp động cơ bánh trái, phải |

Sử dụng phương pháp Euler – Lagrange để xây dựng mô hình động học. Giả sử tại thời điểm t = 0, Robot di chuyển theo chiều dương trục x, ta có các phương trình sau:

Tọa độ trung bình của Robot trong hệ quy chiếu:

Và

Tọa độ bánh trái trong hệ quy chiếu:

Tọa độ bánh phải trong hệ quy chiếu:

Tọa độ tâm đối xứng giữa hai động cơ trong hệ quy chiếu:

Phương trình động năng của chuyển động tịnh tiến:

Phương trình động năng của chuyển động quay:

Với là động năng quay của phần ứng động cơ trái

là động năng quay của phần ứng động cơ phải

Phương trình thế năng:

Phương trình Lagrange:

Lấy đạo hàm L theo các biến θ, ψ, ϕ ta được:

Momen động lực do động lực DC sinh ra:

Và:

Sử dụng phương pháp PWM để điều khiển động cơ nên chuyển từ dòng điện sang điện áp động cơ:

Xem điện cảm phần ứng tương đối nhỏ (gần bằng 0), có thể bỏ qua, suy ra:

Từ đó, các moment lực sinh ra:

Với và

Thu được phương trình động lực học mô tả chuyển động của robot như sau:

* *Tuyến tính hóa hệ thống*

Giả sử ta đặt các biến trạng thái như sau:

x1 = *θ*, x2 = , là góc quay và vận tốc góc quay bánh xe

x3 = *ψ* , x4 = , là góc nghiêng và vận tốc nghiêng của thân Robot

x5 = *ϕ* , x6 = , là góc xoay và vận tốc xoay của Robot

Với

Nếu chọn điểm làm việc là:

,

Ta có thể tuyến tính hóa hệ thống về dạng:

Với:

Tìm ma trận A như sau:

Tìm ma trận B như sau:

Lúc này ta có ma trận trọng số như sau:

và

Với các thống số , để tinh chỉnh cho bộ điều khiển LQR. Trong đó tham số được coi là trọng số tối ưu tương ứng cho 6 biến trạng thái . Với mô hình hệ xe hai bánh ta có ma trận Q là ma trận 6x6 (tương ứng với 6 biến trạng thái) và R là 2x2 (tương ứng với 2 biến ngõ vào). Sau khi chọn được các tham số điều khiển tương ứng, chúng ta có thể xây dựng được tham số phản hồi K với tín hiệu điều khiển .

Thông số K được tính toán dựa vào phương trình Riccati. Tuy nhiên Matlab đã hỗ trợ việc tính toán thủ công bằng hàm LQR(A,B,Q,R) khi các ma trận A, B, Q, R đã được tìm ra.

## Bộ lọc Kalman

### Giới thiệu về bộ lọc Kalman

Năm 1960, Rudolf E. Kálmán (1930 – 2016) xuất bản bài báo nổi tiếng của mình mô tả một giải pháp đệ quy (recursive) cho vấn đề lọc dữ liệu tuyến tính rời rạc.

Kalman Filter là một trong những thuật toán ước lượng quan trọng và phổ biến nhất. Bộ lọc Kalman tạo ra các ước tính về các biến ẩn dựa trên các phép đo không chính xác và không chắc chắn.

Ngày nay, Kalman Filter được sử dụng trong theo dõi mục tiêu (Radar), hệ thống định vị, hệ thống điều khiển, đồ họa máy tính và nhiều hơn nữa.

### Quá trình ước lượng

Mô hình của đối tượng tuyến tính rời rạc được biểu diễn thông qua hệ phương trình trạng thái sau:

Trong đó:

* x: biến trạng thái.
* u: biến đầu vào.
* z: trạng thái đầu ra.
* , v: nhiễu quá trình và nhiễu đo lường.

Giả sử các nhiễu quá trình và nhiễu đo lường có các phương sai tương ứng là Q và R.

Những tính toán căn bản của bộ lọc:

Định nghĩa:

* là giá trị ước lượng của trước khi ta xử lý giá trị đo tại thời điểm k.
* là giá trị ước lượng của sau khi ta xử lý giá trị đo tại thời điểm k.
* là giá trị ước lượng trạng thái sau tại bước k có được sau khi so sánh với giá trị đo

Chúng ta có sai số ước lượng trạng thái trước và sau:

Tương quan sai số ước lượng trước “priori”:

Tương quan sai số ước lượng sau “posteriori”:

Khi lấy đạo hàm phương trình bộ lọc Kalman, với mục đích tìm một phương trình để tính toán trạng thái ước lượng posteriori thể hiện sự tương quan giữa giá trị ước lượng priori và độ sai lệch giữa giá trị đo thực và giá trị đo ước lượng H:

Ma trận K trong phương trình trên là ma trận độ lợi hay hệ số trộn để tối thiểu hóa phương trình tương quan sai số posteriori. Biểu thức tính K như sau:

### Thuật toán Kalman rời rạc:

Bộ lọc Kalman ước lượng tiến trình bằng cách sử dụng dạng điều khiển hồi tiếp: bộ lọc ước lượng các trạng thái của quá trình tại một vài thời điểm và sau đó chứa tín hiệu hồi tiếp trong các dạng của giá trị đo lường. Do đó, phương trình bộ lọc Kalman chia làm hai nhóm: *phương trình cập nhật thời gian* và *phương trình cập nhật giá trị đo lường*. *Phương trình cập nhật thời gian* chịu trách nhiệm cho việc dự báo trước (về mặt thời gian) của trạng thái hiện tại và ước lượng sai số tương quan để chứa vào bộ ước lượng trước priori cho bước thời gian tiếp theo. *Phương trình cập nhật giá trị đo lường* chịu trách nhiệm cập nhật cho tín hiệu hồi tiếp, nghĩa là cập nhật giá trị mới vào giá trị ước lượng tước priori để tạo tín hiệu ước lượng sau posteriori tốt hơn.

*Phương trình cập nhật thời gian* cũng có thể được coi là phương trình dự đoán. Trong khi đó *phương trình cập nhật giá trị đo lường* thì được xem như là phương trình hiệu chỉnh.Vì vậy, thuật toán ước lượng cuối cùng đều giống nhau ở thuật toán dự đoán và hiệu chỉnh để giải quyết vấn đề số học như hình vẽ dưới đây:

A diagram of a process

Description automatically generated

Hình 2. Quy trình thực hiện bộ lọc Kalman

Phương trình cập nhật thời gian cho bộ lọc Kalman rời rạc:

Phương trình cập nhật giá trị đo lường cho bộ lọc Kalman rời rạc:

Tổng quan chu trình thực hiện bộ lọc Kalman hoàn chỉnh như hình sau đây:

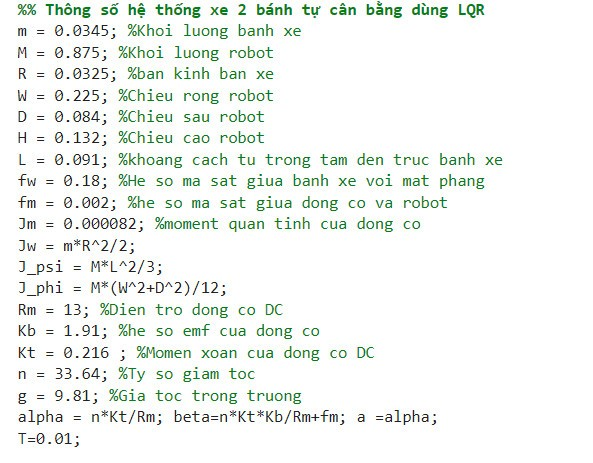
A diagram of mathematical equations

Description automatically generated

Hình 3. Tổng quan chu trình thực hiện bộ lọc Kalman hoàn chỉnh

# CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG MATLAB

## Tiến hành mô phỏng



Hình 4. Thông số hệ thống xe 2 bánh tự cân bằng.

* Sau khi dùng Matlab để tính toán thì ta được ma trận A, B như sau:

A number and numbers on a white background

Description automatically generated

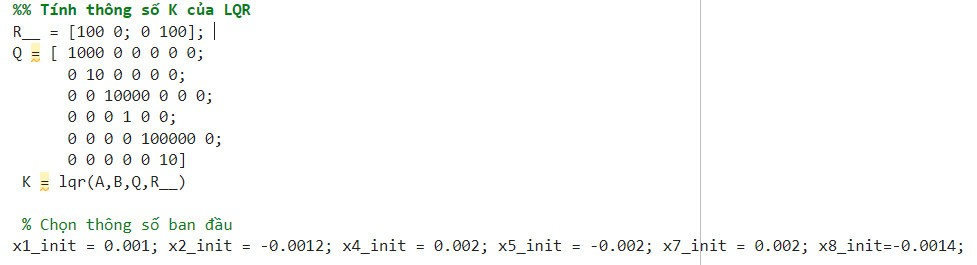
Hình 5. Ma trận A

A number and numbers on a white background

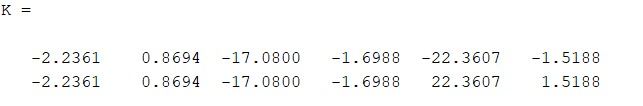
Description automatically generated

Hình 6. Ma trận B

* Chọn ma trận Q và R:



Hình 7. Thông số ma trận Q và ma trận R.



Hình 8. Kết quả tính ma trận K của LQR.

A diagram of a computer

Description automatically generated

Hình 9. Mô phỏng Simulink

A computer screen shot of a computer

Description automatically generated

Hình 10. Khối Xe\_2\_Banh\_Tu\_Can\_Bang

A screen shot of a computer

Description automatically generated

Hình 11. Thông số mô hình trong khối Matlab function

## Kết quả mô phỏng

A graph with lines and a red line

Description automatically generated

Hình 12. Kết quả mô phỏng.

**Nhận xét:** Tín hiệu đáp ứng của hệ thống tương đối tốt, các biến trạng thái của xe cân bằng tại 0, không có sai số xác lập, thời gian đạt xác lập nhanh, có xuất hiện vọt lố nhưng không đáng kể.

# CHƯƠNG 4. MÔ HÌNH THỰC TẾ

A black machine with white wires and wheels

Description automatically generated

Hình 13. Mô hình Robot trên thực tế

## Cấu trúc phần cứng

Nguồn cung cấp sử dụng 3 viên pin 18650 3.7V/2200mA mắc nối tiếp với nhau.

Sử dụng mạch giảm áp 12V → 5V để cấp cho MPU6050 và STM32.

Robot sử dụng vi điều khiển STM32F407VET6 làm trung tâm thu thập dữ liệu và điều khiển khiển hoạt động của Robot.

* ***Cảm biến con quay gia tốc MPU6050***

A blue circuit board with black and silver pins

Description automatically generated

Hình 14. MPU 6050

MPU6050 là cảm biến được sử dụng để đo 6 thông số: 3 trục Góc quay (Gyro), 3 trục gia tốc hướng (Accelerometer), là loại cảm biến gia tốc phổ biến nhất trên thị trường hiện nay.

* ***Driver BTS7960***

A blue circuit board with green and black components

Description automatically generated

Hình 15. BTS7960

BTS7960 là một mô-dun điều khiển động cơ DC, cầu H dòng cao tích hợp đầy đủ cho các ứng dụng truyền động động cơ cần sử dụng dòng cao.

Mạch này chứa một MOSFET bên cao kênh p và một MOSFET bên thấp kênh n, với một vi mạch trình điều khiển tích hợp trong một gói. Việc giao tiếp với vi điều khiển được thực hiện dễ dàng nhờ vi mạch điều khiển tích hợp có các đầu vào mức logic, bảo vệ chống quá nhiệt, quá áp, quá dòng và ngắn mạch...

Mạch chịu được điện áp cung cấp từ 6V đến 27V, đặc biệt có khả năng tự ngắt khi áp dưới 5.5V và mở lại sau khi áp lớn hơn 5.5V. Đồng thời chịu được dòng tải cao lên đến 45A.

## Kết quả thực nghiệm



Hình 16. Ngõ ra góc nghiêng khi Robot giữ thăng bằng

**Nhận xét:** Robot hoạt động ổn định, sai số rất nhỏ, chỉ rơi vào khoảng ± 0.025 rad. Tuy nhiên đôi lúc vẫn bị mất ổn định do một số tác động từ bên ngoài.

# CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN

## Kết quả đạt được

Qua quá trình nghiên cứu và thực hiện đề tài, nhóm xem xin được tổng hợp những thành quả đã đạt được:

* Thiết kế hoàn chỉnh và hoàn thiện được mô hình xe hai bánh tự cân bằng.
* Tính toán mô hình toán học, hàm trạng thái cho hệ thống.
* Thực hiện thành công mô phỏng hệ thống trên Matlab Simulink.
* Hoàn thiện lập trình cho xe hai bánh tự cân bằng trên vi điều khiển STM32.

## Hạn chế

Các mặt hạn chế còn gặp phải trong quá trình nghiên cứu đề tài là:

* Trong quá trình chạy, xe giữ cân bằng khá tốt, tuy nhiên vẫn còn gặp phải tình trạng vọt lố của góc nghiêng.
* Khả năng đáp ứng khi tác động nhiễu còn yếu.
* Khó giữ cân bằng trên những địa hình phức tạp như: gồ ghề, lượn sóng, nghiêng,…
* Xe chưa có khả năng tự di chuyển, tự đứng dậy (swing-up).

## Hướng phát triển

Một vài hướng phát triển trong tương lai như sau:

* Xây dựng khả năng tự hành và tự đứng dậy (swing-up).
* Thay đổi bánh trơn thành bánh đa hướng (mecanum) giúp xe di chuyển linh hoạt hơn.
* Xây dựng bộ điều khiển giúp xe đáp ứng cao hơn khi gặp tác động nhiễu và di chuyển được trên các mặt phẳng phức tạp.

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Alex Becker, *Hướng dẫn về bộ lọc Kalman (Kalman Filter)*, Kalman Filter Tutorial, <https://www.kalmanfilter.net/VI/default_vi.aspx>, 3/6/2024.
2. Nguyen Van Dong Hai, *điều khiển LQR xe hai bánh tự cân bằng*, <https://www.youtube.com/watch?v=81GAAs486a8>, 3/6/2024.
3. Thegioiic, *GY-521 MPU-6050 Cảm Biến Con Quay Gia Tốc*, <https://www.thegioiic.com/gy-521-mpu-6050-cam-bien-con-quay-gia-toc>, 3/6/2024.
4. Thegioiic, *BTS7960 Module Điều Khiển Động Cơ DC 43A*, <https://www.thegioiic.com/bts7960-module-dieu-khien-dong-co-dc-43a>, 3/6/2024.