ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Nguyễn Vũ Quang

XÂY DỰNG KHUNG ĐẾ ROBOT CÓ KHẢ NĂNG CÂN BẰNG TRỌNG TÂM

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

HÀ NỘI – 2025

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Nguyễn Vũ Quang

XÂY DỰNG KHUNG ĐẾ ROBOT CÓ KHẢ NĂNG CÂN BẰNG TRỌNG TÂM

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY
Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Cán bộ hướng dẫn: ThS. Đặng Anh Việt

HÀ NỘI – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của ThS. Đặng Anh Việt. Các số liệu, kết quả nêu trong khóa luận là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tôi xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện khóa luận này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong khóa luận đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Sinh viên thực hiện

Nguyễn Vũ Quang

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành khóa luận tốt nghiệp này, tôi đã nhận được rất nhiều sự giúp đỡ và hỗ trợ từ thầy cô, gia đình và bạn bè.

Trước hết, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất đến ThS. Đặng Anh Việt – người đã trực tiếp hướng dẫn, chỉ bảo tận tình và tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình thực hiện khóa luận.

Tôi xin chân thành cảm ơn các thầy cô giáo trong Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội đã trang bị cho tôi những kiến thức quý báu trong suốt thời gian học tập tại trường.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn đến gia đình, bạn bè đã luôn động viên, khích lệ tôi trong suốt quá trình học tập và thực hiện khóa luận.

Hà Nội, tháng 6 năm 2025

Sinh viên

Nguyễn Vũ Quang

TÓM TẮT

Tóm tắt: Khóa luận trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế và chế tạo khung đế robot di động có khả năng tự động cân bằng trọng tâm. Hệ thống sử dụng cảm biến lực (Loadcell) kết hợp với module HX711 để đo chênh lệch trọng lượng giữa hai bên khung. Thuật toán điều khiển PID được áp dụng để điều khiển động cơ bước di chuyển khối đối trọng trên cơ cấu vitme, từ đó bù đắp sự mất cân bằng khi tải thay đổi.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng phát hiện và bù đắp độ lệch trọng tâm trong phạm vi ±50g với thời gian đáp ứng nhanh. Chương trình điều khiển được viết theo kiến trúc Non-blocking, đảm bảo động cơ bước hoạt động mượt mà ở tốc độ cao mà không bị ảnh hưởng bởi các tác vụ đọc cảm biến hay giao tiếp Serial.

Khóa luận cũng đề xuất các hướng phát triển mở rộng như điều khiển vị trí, tốc độ chuyển dịch và tích hợp vào robot di động thực tế.

Từ khóa: *Cân bằng trọng tâm, Loadcell, PID, Động cơ bước, Arduino, Non-blocking, Robot di động.*

Mục lục

Danh sách hình vẽ

Danh sách bảng

Danh sách các từ viết tắt

PID: Proportional-Integral-Derivative – Bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ.

PWM: Pulse Width Modulation – Điều chế độ rộng xung.

ADC: Analog to Digital Converter – Bộ chuyển đổi tương tự sang số.

I2C: Inter-Integrated Circuit – Giao thức truyền thông nối tiếp.

SPI: Serial Peripheral Interface – Giao diện ngoại vi nối tiếp.

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – Bộ thu phát không đồng bộ.

GPIO: General Purpose Input/Output – Chân vào/ra đa mục đích.

RPM: Revolutions Per Minute – Vòng quay trên phút.

ISR: Interrupt Service Routine – Trình phục vụ ngắt.

Chương 1.
Tổng quan

1.1. Đặt vấn đề và lý do chọn đề tài

Trong những năm gần đây, robot di động (Mobile Robot) đã trở thành một trong những lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng phát triển mạnh mẽ nhất trong ngành tự động hóa. Từ các robot vận chuyển hàng hóa trong nhà máy, robot phục vụ trong nhà hàng, đến các robot thám hiểm địa hình phức tạp – tất cả đều đòi hỏi khả năng di chuyển ổn định và thích ứng với các điều kiện tải trọng thay đổi.

Một thách thức kỹ thuật quan trọng trong thiết kế robot di động là vấn đề **cân bằng trọng tâm**. Khi robot mang theo tải trọng hoặc được trang bị cánh tay thao tác (manipulator), trọng tâm của hệ thống sẽ thay đổi theo vị trí và khối lượng của tải. Sự dịch chuyển trọng tâm này gây ra nhiều hệ quả tiêu cực:

- **Giảm ổn định động học:** Robot dễ bị lật hoặc mất cân bằng khi di chuyển trên địa hình không bằng phẳng, đặc biệt khi tải lệch về một phía.
- **Tăng tải không đều lên các bánh xe:** Dẫn đến mài mòn không đồng đều, giảm tuổi thọ cơ cấu truyền động và ảnh hưởng đến độ chính xác điều khiển quỹ đạo.
- **Tăng tiêu hao năng lượng:** Các động cơ dẫn động phải bù đắp momen do tải lệch gây ra, làm giảm hiệu suất và thời gian hoạt động của robot.
- **Ảnh hưởng đến độ chính xác thao tác:** Với robot có cánh tay, sự mất cân bằng của đế ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác định vị của end-effector.

Giải pháp truyền thống cho vấn đề này thường là thiết kế đế robot với trọng tâm thấp và phân bố tải đối xứng. Tuy nhiên, cách tiếp cận này không linh hoạt khi tải trọng thay đổi trong quá trình vận hành. Một giải pháp tiên tiến hơn là sử dụng **hệ thống cân bằng trọng tâm chủ động** (Active Center of Gravity Balancing System), trong đó một cơ cấu chấp hành sẽ tự động di chuyển khối đối trọng để bù đắp sự thay đổi trọng tâm.

Hệ thống cân bằng trọng tâm chủ động đòi hỏi sự kết hợp của nhiều thành phần: cảm biến đo lường độ lệch, cơ cấu chấp hành di chuyển đối trọng, và thuật toán điều khiển để xác định vị trí đối trọng tối ưu. Đây là một bài toán điều khiển vòng kín điển hình, phù hợp để áp dụng các kiến thức về **lý thuyết điều khiển tự động**, **cảm biến và đo lường**, cũng như **hệ thống nhúng thời gian thực**.

Xuất phát từ nhu cầu thực tiễn và tính ứng dụng cao của vấn đề, đề tài *"Xây dựng khung đế robot có khả năng cân bằng trọng tâm"* được lựa chọn làm khóa luận tốt nghiệp. Đề tài hướng đến việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo một khung đế có khả năng tự động phát hiện và bù đắp độ lệch trọng tâm, tạo nền tảng cho việc phát triển các robot di động ổn định hơn trong tương lai.

1.2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của khóa luận là thiết kế và chế tạo một khung đế robot di động có khả năng tự động cân bằng trọng tâm khi tải trọng thay đổi. Để đạt được mục tiêu này, các mục tiêu cụ thể được xác định như sau:

1.2.1. Mục tiêu về nghiên cứu lý thuyết

Nghiên cứu nguyên lý cân bằng trọng tâm dựa trên lý thuyết momen lực và điều kiện cân bằng tĩnh. Tìm hiểu các phương pháp đo lường độ lệch trọng tâm, trong đó tập trung vào việc sử dụng cảm biến lực (Loadcell) để xác định sự chênh lệch tải trọng giữa các điểm tựa.

Nghiên cứu thuật toán điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) và phương pháp tinh chỉnh tham số phù hợp với đặc tính của hệ thống cơ điện tử. Đặc biệt, nghiên cứu các kỹ thuật xử lý vùng chết (Deadzone), độ trễ (Hysteresis) để tránh hiện tượng dao động quanh điểm cân bằng.

Nghiên cứu kiến trúc lập trình thời gian thực cho hệ thống nhúng, đảm bảo khả năng đáp ứng nhanh và ổn định của hệ thống điều khiển.

1.2.2. Mục tiêu về thiết kế và chế tạo

Thiết kế khung cơ khí có kích thước phù hợp với robot di động cỡ nhỏ và vừa (khoảng 35×35cm), đảm bảo độ cứng vững và khả năng tích hợp các thành phần điện tử.

Thiết kế cơ cấu di chuyển đối trọng sử dụng động cơ bước kết hợp truyền động vitme, đảm bảo độ chính xác vị trí và khả năng chịu tải.

Thiết kế mạch điện tử điều khiển bao gồm: mạch đọc tín hiệu từ cảm biến lực, mạch điều khiển động cơ bước, và giao tiếp với vi điều khiển.

Chế tạo và lắp ráp hoàn chỉnh mô hình khung đế cân bằng.

1.2.3. Mục tiêu về phần mềm điều khiển

Xây dựng chương trình điều khiển trên nền tảng vi điều khiển Arduino, tích hợp thuật toán PID để tự động điều chỉnh vị trí đối trọng.

Đảm bảo chương trình hoạt động theo kiến trúc Non-blocking (không chặn), cho phép động cơ bước vận hành mượt mà ở tốc độ cao mà không bị ảnh hưởng bởi các tác vụ đọc cảm biến hay giao tiếp.

Phát triển giao diện giám sát thông qua Serial Monitor để theo dõi các thông số hoạt động và hỗ trợ quá trình tinh chỉnh hệ thống.

1.2.4. Mục tiêu về thử nghiệm và đánh giá

Tiến hành thử nghiệm hệ thống với các kịch bản tải trọng khác nhau. Đánh giá các chỉ tiêu: thời gian đáp ứng, độ chính xác cân bằng, độ ổn định, và phạm vi tải trọng có thể bù đắp.

So sánh kết quả thực nghiệm với mục tiêu thiết kế, phân tích các hạn chế và đề xuất hướng cải tiến.

1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

1.3.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của khóa luận bao gồm các thành phần chính của hệ thống cân bằng trọng tâm:

Cảm biến lực Loadcell và module HX711: Loadcell là cảm biến đo lực dựa trên nguyên lý điện trở biến dạng. Module HX711 là bộ chuyển đổi ADC 24-bit chuyên dụng cho loadcell, có khả năng đọc tín hiệu với độ phân giải cao. Trong dự án này, thư viện HX711_ADC được sử dụng với ưu điểm hỗ trợ chế độ đọc Non-blocking, cho phép vi điều khiển thực hiện các tác vụ khác trong khi chờ dữ liệu từ cảm biến.

Động cơ bước và driver TB6600: Động cơ bước Nema 17 được sử dụng làm cơ cấu chấp hành, với đặc điểm điều khiển vị trí chính xác theo vòng hở. Driver TB6600 hỗ trợ điều khiển vi bước (microstepping) với các mức 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, cho phép tăng độ phân giải và giảm rung động.

Vi điều khiển Arduino: Nền tảng Arduino (chip ATmega328P, tần số 16MHz) được chọn làm bộ xử lý trung tâm do tính phổ biến, dễ lập trình, và có nhiều thư viện hỗ trợ. Thư viện AccelStepper được sử dụng để điều khiển động cơ bước với khả năng điều chỉnh tốc độ và gia tốc mượt mà.

Thuật toán điều khiển PID: Bộ điều khiển PID là thuật toán điều khiển vòng kín phổ biến trong công nghiệp, phù hợp cho các hệ thống yêu cầu độ chính xác và ổn định cao. Thư viện PID_v1 cho Arduino được sử dụng để triển khai thuật toán.

Kỹ thuật lập trình thời gian thực: Nghiên cứu các vấn đề về độ trễ (latency), blocking I/O, và các giải pháp Non-blocking để đảm bảo hệ thống đáp ứng các ràng buộc thời gian thực.

1.3.2. Phạm vi nghiên cứu

Khóa luận tập trung vào các giới hạn sau:

Về không gian: Hệ thống cân bằng trọng tâm theo **một trục** (trái-phải). Việc mở rộng sang hai trục được đề cập như hướng phát triển.

Về kích thước: Khung đế có kích thước 35×35cm, phù hợp với các robot di động cỡ nhỏ và vừa. Hành trình di chuyển đối trọng: 120mm về bên trái, 110mm về bên phải (tính từ vị trí tâm).

Về tải trọng: Cảm biến loadcell có tải trọng định mức 50kg mỗi cụm. Khối lượng đối trọng ban đầu là 200g, có thể điều chỉnh tùy theo yêu cầu cân bằng.

Về điều khiển: Sử dụng điều khiển vòng hở cho động cơ bước (không có encoder phản hồi vị trí). Thuật toán PID với vùng chết ±50g – tức là hệ thống chấp nhận độ lệch trong phạm vi này mà không cần điều chỉnh.

Về hiệu năng: Tốc độ tối đa của động cơ bước bị giới hạn bởi khả năng xử lý của vi điều khiển và đặc tính của thư viện AccelStepper (khoảng 4000 bước/giây trong điều kiện tối ưu).

1.4. Phương pháp nghiên cứu

Khóa luận sử dụng kết hợp các phương pháp nghiên cứu sau:

1.4.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

Thu thập và phân tích các tài liệu về: cơ học lý thuyết (momen lực, điều kiện cân bằng), lý thuyết điều khiển tự động (bộ điều khiển PID, ổn định hệ thống), kỹ thuật cảm biến (nguyên lý loadcell, xử lý tín hiệu), và lập trình hệ thống nhúng (kiến trúc real-time, xử lý ngắt).

Tổng hợp kiến thức từ các nghiên cứu trước đó về điều khiển động cơ bước, đặc biệt là các vấn đề về hiệu năng thời gian thực khi kết hợp nhiều tác vụ (đọc cảm biến, điều khiển động cơ, giao tiếp Serial).

1.4.2. Phương pháp mô hình hóa và thiết kế

Xây dựng mô hình toán học của hệ thống cân bằng dựa trên nguyên lý momen lực. Từ đó xác định mối quan hệ giữa độ lệch tải trọng và vị trí đối trọng cần thiết để cân bằng.

Thiết kế cơ khí sử dụng phương pháp thiết kế mô-đun, cho phép dễ dàng điều chỉnh và thay thế các thành phần. Thiết kế mạch điện theo sơ đồ khối, xác định rõ chức năng và giao tiếp của từng module.

Thiết kế phần mềm theo kiến trúc phân tầng: tầng phần cứng (Hardware Abstraction Layer), tầng điều khiển (Control Layer), và tầng ứng dụng (Application Layer).

1.4.3. Phương pháp thực nghiệm

Chế tạo mô hình thực tế dựa trên thiết kế đã xây dựng. Tiến hành hiệu chuẩn (calibration) các cảm biến loadcell để đảm bảo độ chính xác đo lường.

Thực hiện các bài test với nhiều kịch bản tải trọng khác nhau: tải tĩnh (đặt vật nặng cố định), tải động (di chuyển vật nặng trong quá trình hoạt động), và tải biến thiên (thay đổi khối lượng tải).

Thu thập dữ liệu thông qua Serial Monitor, bao gồm: giá trị đọc từ loadcell, sai số (Input), tín hiệu điều khiển (Output), và tốc độ động cơ. Phân tích dữ liệu để đánh giá hiệu quả của thuật toán điều khiển.

1.4.4. Phương pháp phân tích và đánh giá

So sánh kết quả thực nghiệm với các chỉ tiêu thiết kế ban đầu. Phân tích nguyên nhân của các sai lệch (nếu có) và đề xuất giải pháp khắc phục.

Đánh giá định lượng các thông số: thời gian đáp ứng (từ khi có tải lệch đến khi đạt cân bằng), độ chính xác cân bằng (sai số còn lại sau khi ổn định), và phạm vi hoạt động (độ lệch tối đa có thể bù đắp).

Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống, bao gồm: tham số PID, tốc độ lấy mẫu, độ phân giải microstep, và các vấn đề về lập trình thời gian thực.

1.5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

1.5.1. Ý nghĩa khoa học

Khóa luận đóng góp vào việc nghiên cứu ứng dụng lý thuyết điều khiển tự động trong bài toán cân bằng trọng tâm cho robot di động. Các kết quả nghiên cứu về ảnh

hưởng của kiến trúc phần mềm (blocking vs non-blocking) đến hiệu năng điều khiển động cơ bước có giá trị tham khảo cho các nghiên cứu liên quan.

Việc phân tích chi tiết các vấn đề thời gian thực trong hệ thống nhúng – từ độ trễ của giao tiếp Serial đến ảnh hưởng của tần số lấy mẫu – cung cấp cơ sở lý thuyết và thực nghiệm cho việc thiết kế các hệ thống điều khiển tương tự.

1.5.2. Ý nghĩa thực tiễn

Sản phẩm của khóa luận là một khung đế robot có khả năng tự cân bằng, có thể được tích hợp vào các robot di động thực tế để cải thiện độ ổn định khi vận hành.

Các kinh nghiệm thiết kế và chế tạo (lựa chọn linh kiện, giải quyết các vấn đề kỹ thuật, tinh chỉnh hệ thống) được tài liệu hóa trong khóa luận, có thể làm tài liệu tham khảo cho các dự án tương tự.

Mã nguồn chương trình điều khiển được cung cấp đầy đủ trong phụ lục, có thể được sử dụng lại hoặc phát triển thêm cho các ứng dụng khác.

1.6. Bố cục khóa luận

Khóa luận được trình bày trong 5 chương với nội dung như sau:

Chương 1: Tổng quan – Trình bày bối cảnh và lý do chọn đề tài, xác định mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, các phương pháp nghiên cứu được sử dụng, cũng như ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết – Trình bày các kiến thức nền tảng về nguyên lý cân bằng trọng tâm và momen lực, cảm biến lực Loadcell và module HX711, động cơ bước và kỹ thuật vi bước, vi điều khiển Arduino, thuật toán điều khiển PID, và các vấn đề lập trình thời gian thực cho hệ thống nhúng.

Chương 3: Thiết kế hệ thống – Mô tả chi tiết quá trình thiết kế gồm: phân tích yêu cầu, thiết kế cơ khí (khung, cơ cấu vitme-thanh trượt, bố trí loadcell), thiết kế mạch điện (sơ đồ khối, kết nối phần cứng), và thiết kế phần mềm (cấu trúc chương trình, quy trình Homing, logic điều khiển PID với Deadzone và Hysteresis).

Chương 4: Thực nghiệm và đánh giá – Trình bày môi trường và điều kiện thử nghiệm, quá trình tinh chỉnh tham số PID, kết quả thực nghiệm với các kịch bản tải trọng khác nhau, phân tích hiệu năng hệ thống, và đánh giá so với mục tiêu đề ra.

Chương 5: Kết luận và hướng phát triển – Tổng kết các kết quả đạt được của khóa luận, nêu rõ các hạn chế còn tồn tại, và đề xuất các hướng phát triển tiếp theo bao gồm: tăng tốc độ phản hồi, mở rộng cân bằng hai trục, và tích hợp điều khiển vị trí/tốc độ.

Chương 2.
Cơ sở lý thuyết

Chương này trình bày các kiến thức nền tảng cần thiết cho việc thiết kế và xây dựng hệ thống cân bằng trọng tâm tự động. Các nội dung được trình bày bao gồm: lý thuyết cơ học về cân bằng và momen lực, nguyên lý hoạt động của cảm biến lực và module chuyển đổi tín hiệu, đặc tính của động cơ bước và kỹ thuật điều khiển vi bước, nền tảng vi điều khiển Arduino, thuật toán điều khiển PID, và đặc biệt là các vấn đề về lập trình thời gian thực trong hệ thống nhúng.

2.1. So sánh các phương pháp cân bằng robot

Trong lĩnh vực robot di động, có nhiều phương pháp khác nhau để duy trì sự cân bằng và ổn định. Mỗi phương pháp có nguyên lý hoạt động, ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các ứng dụng cụ thể. Phần này trình bày và so sánh bốn phương pháp cân bằng phổ biến nhất.

2.1.1. Các phương pháp cân bằng chính

Phương pháp 1 - Điều khiển bánh xe (Wheel-based Balancing): Đây là phương pháp phổ biến nhất, được sử dụng trong robot tự cân bằng hai bánh như Segway. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc di chuyển bánh xe theo hướng robot đang nghiêng để "đuổi theo" trọng tâm, tương tự như cách con người giữ thăng bằng khi đứng. Cảm biến IMU (gyroscope và accelerometer) đo góc nghiêng, sau đó bộ điều khiển tính toán tốc độ bánh xe cần thiết để giữ thăng bằng.

Phương pháp 2 - Bánh đà/Con quay hồi chuyển (Reaction Wheel/CMG): Phương pháp này sử dụng momen động lượng của một hoặc nhiều bánh đà quay tốc độ cao. Khi cần tạo momen cân bằng, động cơ tăng hoặc giảm tốc độ bánh đà, theo định luật bảo toàn momen động lượng, một momen phản lực sẽ tác động lên thân robot. Control Moment Gyroscope (CMG) là biến thể sử dụng hiệu ứng tiến động của con quay hồi chuyển.

Phương pháp 3 - Khối lượng di động (Moving Mass): Nguyên lý hoạt động dựa trên việc di chuyển một khối lượng đối trọng để thay đổi vị trí trọng tâm của hệ thống. Khi phát hiện độ lệch, khối đối trọng được di chuyển về phía đối diện để bù đắp momen lực gây mất cân bằng. Đây chính là phương pháp được áp dụng trong đề tài này.

Phương pháp 4 - Mở rộng đa giác đỡ (Support Polygon Expansion): Phương pháp này tăng độ ổn định tĩnh bằng cách mở rộng diện tích tiếp xúc với mặt đất. Các robot có thể sử dụng chân chống, bánh xe phụ, hoặc thay đổi tư thế để mở rộng đa giác đỡ. Tuy nhiên, phương pháp này làm giảm tính linh hoạt của robot.

2.1.2. Bảng so sánh tổng hợp

Bảng 2.1 trình bày so sánh chi tiết bốn phương pháp cân bằng theo các tiêu chí quan trọng.

Bảng 2.1. So sánh các phương pháp cân bằng robot

Tiêu chí	Điều khiển bánh xe	Bánh đà/CMG	Khối lượng di động	Mở rộng đa giác đỡ
Nguyên lý	Di chuyển bánh xe theo hướng nghiêng	Thay đổi tốc độ bánh đà tạo momen phản lực	Di chuyển đối trọng thay đổi trọng tâm	Tăng diện tích tiếp xúc mặt đất
Cảm biến chính	IMU (gyro + accel)	IMU (gyro + accel)	Loadcell hoặc IMU	Cảm biến tiếp xúc, IMU
Cơ cấu chấp hành	Động cơ DC/BLDC cho bánh xe	Động cơ BLDC tốc độ cao	Động cơ bước + vitme/đai	Động cơ servo, xi-lanh
Thời gian đáp ứng	Rất nhanh (ms)	Nhanh (ms)	Trung bình (100ms-1s)	Chậm (giây)
Khả năng cân bằng tĩnh	Không (cần di chuyển liên tục)	Có (giới hạn bởi saturation)	Có (trong phạm vi hành trình)	Có (ổn định nhất)
Tiêu hao năng lượng	Cao khi đứng yên	Cao (bánh đà quay liên tục)	Thấp khi đã cân bằng	Rất thấp
Độ phức tạp điều khiển	Cao (hệ bất ổn định)	Rất cao	Trung bình	Thấp
Độ phức tạp cơ khí	Thấp-Trung bình	Cao	Trung bình	Thấp-Cao
Khả năng chịu tải thay đổi	Hạn chế	Hạn chế	Tốt (thiết kế phù hợp)	Tốt
Tính linh hoạt di chuyển	Cao	Cao	Cao	Thấp
Ứng dụng tiêu biểu	Segway, robot giao hàng	Vệ tinh, xe đạp tự lái	Robot mang tải, cần cẩu	Robot công nghiệp, xe nâng
Chi phí triển khai	Trung bình	Cao	Thấp-Trung bình	Thấp

2.1.3. Phân tích ưu nhược điểm chi tiết

Điều khiển bánh xe: Ưu điểm bao gồm khả năng đáp ứng rất nhanh, cấu trúc cơ khí đơn giản, và robot có thể di chuyển linh hoạt. Nhược điểm chính là không thể cân bằng tĩnh (phải di chuyển liên tục để giữ thăng bằng), tiêu hao năng lượng cao khi đứng yên, và yêu cầu mặt sàn phẳng để hoạt động hiệu quả. Phương pháp này phù hợp với các ứng dụng di chuyển liên tục như robot giao hàng, xe cân bằng cá nhân.

Bánh đà/CMG: Ưu điểm là có thể cân bằng mà không cần di chuyển bánh xe, đáp ứng nhanh, và hoạt động được trên nhiều loại địa hình. Nhược điểm bao gồm tiêu hao năng lượng liên tục (bánh đà phải quay), vấn đề bão hòa momen động lượng (saturation) khi nhiễu kéo dài, độ phức tạp cơ khí cao, và tiếng ồn từ bánh đà tốc độ cao. Phương pháp này phù hợp với vệ tinh, tàu vũ trụ, và các robot cần cân bằng chính xác trong thời gian ngắn.

Khối lượng di động (Phương pháp được chọn): Ưu điểm là tiêu hao năng lượng thấp sau khi đã cân bằng (động cơ dừng), cấu trúc đơn giản với linh kiện phổ biến, có thể đo trực tiếp phân bố tải bằng loadcell, và phù hợp với ứng dụng cân bằng tĩnh hoặc bán tĩnh. Nhược điểm bao gồm thời gian đáp ứng chậm hơn (phụ thuộc vào tốc độ vitme), giới hạn bởi hành trình di chuyển của đối trọng, và khả năng bù đắp phụ thuộc vào khối lượng đối trọng. Phương pháp này phù hợp với robot mang tải có trọng tâm thay đổi chậm, khung đế cân bằng cho cánh tay robot.

Mở rộng đa giác đỡ: Ưu điểm là độ ổn định cao nhất, không cần điều khiển phức tạp, và tiêu hao năng lượng rất thấp. Nhược điểm là làm giảm tính linh hoạt và khả năng di chuyển, tăng kích thước và khối lượng robot, và thời gian chuyển đổi trạng thái chậm. Phương pháp này phù hợp với robot công nghiệp cố định, xe nâng hàng, và các ứng dụng ưu tiên độ ổn định tuyệt đối.

2.1.4. Lý do lựa chọn phương pháp khối lượng di động

Đề tài này lựa chọn phương pháp khối lượng di động dựa trên các lý do sau:

Thứ nhất, về đặc điểm ứng dụng: Khung đế robot được thiết kế để cân bằng khi tải thay đổi (ví dụ: cánh tay robot gắp vật), không yêu cầu thời gian đáp ứng cực nhanh như robot tự cân bằng động.

Thứ hai, về hiệu quả năng lượng: Sau khi đạt vị trí cân bằng, động cơ bước có thể dừng hoàn toàn (giữ vị trí bằng momen từ tính), tiết kiệm năng lượng đáng kể so với phương pháp bánh đà.

Thứ ba, về khả năng đo lường: Việc sử dụng loadcell cho phép đo trực tiếp chênh lệch trọng lượng giữa hai bên, cung cấp phản hồi chính xác về trạng thái cân bằng mà không cần tính toán phức tạp từ góc nghiêng.

Thứ tư, về tính khả thi: Các linh kiện cần thiết (động cơ bước, vitme, loadcell, Arduino) đều phổ biến và có giá thành hợp lý tại Việt Nam, phù hợp với điều kiện nghiên cứu và triển khai.

Thứ năm, về độ phức tạp: So với phương pháp bánh đà hoặc CMG, phương pháp khối lượng di động có độ phức tạp cơ khí và điều khiển thấp hơn, thuận lợi cho việc nghiên cứu và phát triển trong khuôn khổ đồ án tốt nghiệp.

2.2. Lý thuyết cân bằng trọng tâm và momen lực

2.2.1. Khái niệm trọng tâm

Trọng tâm (Center of Gravity - CoG) của một vật thể hoặc hệ vật là điểm mà tại đó toàn bộ trọng lượng của hệ có thể được coi như tập trung. Đối với một hệ thống gồm n vật thể rời rạc, vị trí trọng tâm theo trục x được xác định bởi công thức:

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot x_i}{M} \tag{1}$$

trong đó x_G là tọa độ trọng tâm của hệ, m_i là khối lượng của vật thể thứ i, x_i là tọa độ của vật thể thứ i theo trục x, và $M = \sum m_i$ là tổng khối lượng của hệ.

Công thức tương tự được áp dụng cho các trục y và z trong không gian ba chiều. Trong phạm vi khóa luận này, bài toán được đơn giản hóa thành cân bằng theo một trục (trái-phải), tương ứng với việc xét trọng tâm trên trục x.

2.2.2. Momen lực và điều kiện cân bằng tĩnh

Momen lực (Torque) là đại lượng vật lý đặc trưng cho tác dụng làm quay của một lực đối với một trục quay. Độ lớn của momen lực được tính theo công thức:

$$M = F \times d \tag{2}$$

trong đó M là momen lực (đơn vị N.m hoặc N.mm), F là lực tác dụng (N), và d là cánh tay đòn – khoảng cách vuông góc từ đường tác dụng của lực đến trục quay (m hoặc mm).

Quy ước dấu: Momen làm vật quay theo chiều kim đồng hồ thường được quy ước là âm, ngược chiều kim đồng hồ là dương (hoặc ngược lại, tùy theo hệ quy chiếu được chọn).

Điều kiện cân bằng tĩnh của một vật rắn yêu cầu tổng các momen lực tác dụng lên vật đối với một trục quay bất kỳ phải bằng không:

$$\sum M = 0 \tag{3}$$

Điều kiện này có nghĩa là tổng các momen theo chiều dương phải cân bằng với tổng các momen theo chiều âm.

2.2.3. Áp dụng nguyên lý momen vào bài toán cân bằng khung robot

Xét mô hình khung đế robot như một thanh cứng được đỡ tại điểm tựa ở giữa (tâm khung). Khi có tải trọng đặt lệch về một phía, momen do tải gây ra sẽ làm khung mất cân bằng. Để khôi phục cân bằng, cần di chuyển một khối đối trọng về phía đối diện sao cho momen do đối trọng tạo ra bù đắp momen do tải.

Điều kiện cân bằng được viết như sau:

$$m_{slider} \times d_{slider} = m_{load} \times d_{load} \tag{4}$$

trong đó m_{slider} là khối lượng của khối đối trọng (kg hoặc g), d_{slider} là khoảng cách từ đối trọng đến tâm khung (mm), m_{load} là độ chênh lệch khối lượng tải giữa hai bên (kg hoặc g), và d_{load} là khoảng cách từ điểm đặt tải đến tâm khung (mm).

Từ phương trình (4), có thể suy ra vị trí cần thiết của đối trọng:

$$d_{slider} = \frac{m_{load} \times d_{load}}{m_{slider}} \tag{5}$$

Phương trình này cho thấy một hạn chế quan trọng: với khối lượng đối trọng cố định m_{slider} và hành trình giới hạn $d_{slider,max}$, độ lệch tải tối đa có thể bù đắp là:

$$m_{load,max} = \frac{m_{slider} \times d_{slider,max}}{d_{load}} \tag{6}$$

Ví dụ cụ thể từ hệ thống được thiết kế: với $m_{slider} = 200$g, $d_{slider,max} = 120$mm, và $d_{load} = 175$mm (một nửa chiều rộng khung 35cm), độ lệch tải tối đa có thể bù đắp là:

$$m_{load,max} = \frac{200 \times 120}{175} \approx 137 \text{ g} \tag{7}$$

Kết quả này cho thấy để tăng khả năng cân bằng, có thể: (1) tăng khối lượng đối trọng, (2) tăng hành trình di chuyển, hoặc (3) bố trí tải gần tâm hơn.

2.3. Cảm biến lực Loadcell và module HX711

2.3.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của Loadcell

Loadcell là cảm biến chuyển đổi lực cơ học thành tín hiệu điện, hoạt động dựa trên hiệu ứng điện trở biến dạng (Piezoresistive effect). Cấu tạo cơ bản của loadcell gồm:

Thân đàn hồi (Elastic element): Thường làm từ thép hợp kim hoặc nhôm, được gia công với hình dạng đặc biệt để biến dạng theo hướng xác định khi chịu lực.

Điện trở biến dạng (Strain gauge): Là các dải điện trở mỏng được dán trực tiếp lên bề mặt thân đàn hồi. Khi thân đàn hồi biến dạng, điện trở của strain gauge thay đổi theo quan hệ:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \times \varepsilon \tag{8}$$

trong đó $\Delta R/R$ là tỷ lệ thay đổi điện trở, GF là hệ số gauge (Gauge Factor, thường từ 2 đến 4 cho strain gauge kim loại), và ε là biến dạng tương đối của vật liệu.

Cầu Wheatstone: Bốn strain gauge được mắc theo cấu hình cầu Wheatstone để chuyển đổi sự thay đổi điện trở thành sự thay đổi điện áp. Cấu hình cầu đầy đủ (Full-bridge) cho độ nhạy cao nhất và khả năng bù nhiệt tốt.

Điện áp đầu ra của cầu Wheatstone:

$$V_{out} = V_{exc} \times \frac{\Delta R}{R} \tag{9}$$

trong đó V_{exc} là điện áp kích thích (thường 5V hoặc 10V).

2.3.2. Loadcell 3 dây và cách ghép thành cầu đầy đủ

Trong dự án này, loadcell 3 dây (half-bridge) được sử dụng. Loại loadcell này chỉ chứa hai strain gauge, cần ghép hai loadcell lại để tạo thành cầu Wheatstone đầy đủ.

Cách đấu nối hai loadcell 3 dây thành một cầu cho module HX711:

– Loadcell 1: Dây trắng vào E-, dây đen vào E+

– Loadcell 2: Dây trắng vào A-, dây đen vào E+

– Kết nối chung: Nối hai dây đỏ của cả hai loadcell lại với nhau và đưa vào chân A+

Với cách ghép này, hệ thống sử dụng 4 loadcell 50kg (2 cặp), tạo thành 2 cụm cảm biến độc lập cho bên trái và bên phải, mỗi cụm có khả năng chịu tải tổng cộng 100kg.

2.3.3. Module HX711 và giao thức truyền thông

HX711 là IC chuyển đổi tương tự sang số (ADC) 24-bit được thiết kế chuyên dụng cho các ứng dụng cân điện tử. Các đặc tính kỹ thuật chính:

– Độ phân giải: 24-bit (tương đương khoảng 16.7 triệu mức lượng tử hóa)

– Tốc độ lấy mẫu: 10 SPS (Samples Per Second) hoặc 80 SPS, tùy thuộc vào mức logic của chân RATE

– Bộ khuếch đại tích hợp: Độ lợi (Gain) có thể chọn 32, 64, hoặc 128

– Giao tiếp: Giao thức nối tiếp đồng bộ 2 dây (DOUT và SCK)

– Nguồn cấp: 2.6V đến 5.5V

Giao thức truyền thông của HX711 hoạt động như sau: Vi điều khiển tạo xung clock trên chân SCK và đọc dữ liệu từ chân DOUT. Mỗi lần đọc, HX711 truyền 24 bit dữ liệu ADC, sau đó 1-3 xung clock bổ sung để chọn kênh và độ lợi cho lần đọc tiếp theo.

2.3.4. Thư viện HX711_ADC và cơ chế Non-blocking

Một trong những quyết định kỹ thuật quan trọng của dự án là sử dụng thư viện `HX711_ADC` của tác giả Olav Kallhovd thay vì thư viện `HX711` chuẩn (của Bogde). Sự khác biệt cốt lõi nằm ở cơ chế đọc dữ liệu:

Thư viện HX711 chuẩn (Blocking):

– Hàm chính: `scale.get_units(n)`

– Cơ chế: Khi gọi hàm, vi điều khiển **dừng lại và chờ** cho đến khi HX711 hoàn thành chuyển đổi

– Thời gian chờ: Ở tốc độ 10Hz, mỗi lần đọc mất 100ms. Nếu lấy trung bình 5 mẫu (`get_units(5)`), thời gian chờ lên đến 500ms

– Hậu quả: Trong thời gian chờ, các lệnh điều khiển động cơ không được thực thi, gây hiện tượng động cơ chạy giật cục hoặc dừng hẳn

Thư viện HX711_ADC (Non-blocking):

– Hàm chính: `LoadCell.update()` và `LoadCell.getData()`

– Cơ chế: Hàm `update()` chỉ kiểm tra xem có dữ liệu mới hay không. Nếu chưa có, hàm trả về ngay lập tức (tốn vài micro-giây). Nếu có dữ liệu mới, hàm đọc và lưu vào biến nội bộ

– Hàm `getData()` lấy giá trị từ biến nội bộ ra một cách tức thì, không cần chờ đợi

– Lợi ích: Vi điều khiển có thể thực hiện các tác vụ khác (như điều khiển động cơ) trong khi chờ dữ liệu từ cảm biến

Sự khác biệt này có ý nghĩa quyết định đối với hiệu năng hệ thống. Với kiến trúc Non-blocking, hàm `stepper.runSpeed()` có thể được gọi liên tục trong vòng lặp chính mà không bị gián đoạn bởi việc đọc cảm biến, đảm bảo động cơ bước hoạt động mượt mà ở tốc độ cao.

2.4. Động cơ bước và driver TB6600

2.4.1. Nguyên lý hoạt động của động cơ bước

Động cơ bước (Stepper Motor) là loại động cơ điện chuyển đổi các xung điện rời rạc thành chuyển động quay theo từng bước góc cố định. Khác với động cơ DC thông thường (có tốc độ phụ thuộc vào điện áp), vị trí và tốc độ của động cơ bước được xác định hoàn toàn bởi số lượng và tần số của các xung điều khiển.

Động cơ bước lai (Hybrid Stepper Motor) – loại phổ biến nhất trong các ứng dụng công nghiệp và được sử dụng trong dự án này (Nema 17) – kết hợp ưu điểm của động cơ bước nam châm vĩnh cửu và động cơ bước biến từ trở. Cấu tạo gồm:

Stator: Chứa các cuộn dây được quấn theo cặp (Phase A và Phase B cho động cơ lưỡng cực). Khi có dòng điện chạy qua, các cuộn dây tạo ra từ trường.

Rotor: Gồm lõi nam châm vĩnh cửu được bọc bởi hai đĩa răng lệch pha nhau. Kết hợp với răng trên stator, cấu trúc này cho phép góc bước nhỏ (thường 1.8°, tương đương 200 bước/vòng).

Nguyên lý hoạt động: Khi dòng điện trong các cuộn dây thay đổi theo trình tự xác định, từ trường stator quay theo, kéo rotor quay theo từng bước. Mỗi bước tương ứng với một góc cố định:

$$\theta_{step} = \frac{360}{N_{steps}} \tag{10}$$

trong đó N_{steps} là số bước trên một vòng quay (200 cho động cơ 1.8°).

2.4.2. Chế độ vi bước (Microstepping) và ảnh hưởng đến hiệu năng

Vi bước là kỹ thuật điều khiển dòng điện trong các cuộn dây theo dạng sóng sin/cosin thay vì dạng bước vuông. Điều này cho phép chia nhỏ mỗi bước đầy đủ thành nhiều bước nhỏ hơn.

Số bước trên mỗi vòng quay khi sử dụng vi bước:

$$N_{micro} = N_{full} \times k \tag{11}$$

trong đó $N_{full} = 200$ bước/vòng (cho động cơ 1.8°) và k là hệ số vi bước (1, 2, 4, 8, 16, 32...).

Với chế độ 1/16 microstep được sử dụng trong dự án:

$$N_{micro} = 200 \times 16 = 3200 \text{ bước/vòng} \quad (12)$$

Ưu điểm của vi bước:

– Chuyển động mượt mà hơn, giảm rung động và tiếng ồn

– Độ phân giải vị trí cao hơn

– Giảm hiện tượng cộng hưởng ở một số dải tốc độ

Nhược điểm và thách thức:

– Yêu cầu tần số xung điều khiển cao hơn để đạt cùng tốc độ quay

– Tăng tải xử lý cho vi điều khiển

– Momen xoắn giảm nhẹ so với chế độ full-step

Phân tích ràng buộc thời gian thực:

Xét yêu cầu tốc độ 300 RPM (5 vòng/giây):

– Ở chế độ Full-step: Tần số xung = $200 \times 5 = 1000$ Hz. Khoảng cách giữa các bước = 1000 μs

– Ở chế độ 1/16 Microstep: Tần số xung = $3200 \times 5 = 16000$ Hz. Khoảng cách giữa các bước = 62.5 μs

Con số 62.5 μs là "ngân sách thời gian" (time budget) tối đa mà vi điều khiển có để hoàn thành mọi tác vụ giữa hai lần tạo xung. Nếu bất kỳ tác vụ nào (đọc cảm biến, tính toán PID, giao tiếp Serial) chiếm thời gian lớn hơn ngưỡng này, hệ thống sẽ vi phạm ràng buộc thời gian thực và động cơ sẽ mất bước.

2.4.3. Driver TB6600 và cấu hình điều khiển

TB6600 là driver công suất cao cho động cơ bước, được thiết kế để điều khiển các động cơ Nema 17 và Nema 23. Thông số kỹ thuật:

– Điện áp làm việc: 9-42V DC

– Dòng điện tối đa: 4A/pha (có thể điều chỉnh bằng DIP switch)

– Hỗ trợ vi bước: Full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32

– Tín hiệu điều khiển: PUL+ (xung bước), DIR+ (chiều quay), ENA+ (kích hoạt)

– Cách ly quang học giữa tín hiệu điều khiển và mạch công suất

Giao thức điều khiển đơn giản: Mỗi xung trên chân PUL làm động cơ quay một vi bước. Mức logic trên chân DIR quyết định chiều quay (HIGH = thuận, LOW = nghịch). Chân ENA thường được bỏ trống hoặc nối với mức logic phù hợp để luôn kích hoạt driver.

2.4.4. Thư viện AccelStepper và cơ chế Polling

Thư viện AccelStepper của Mike McCauley là thư viện phổ biến nhất cho điều khiển động cơ bước trên Arduino. Thư viện hoạt động theo cơ chế **Polling** (hỏi vòng), không phải Interrupt-driven (ngắt).

Hàm cốt lõi `runSpeed()` hoạt động như sau (mã giả):

```
boolean AccelStepper::runSpeed() {
    unsigned long time = micros();
    if (time >= _nextStepTime) {
        step(_direction);  // Thuc hien buoc
        _nextStepTime = time + _stepInterval;
        return true;
    }
    return false;  // Chua den luc, khong lam gi
}
```

Thiết kế này đặt ra yêu cầu quan trọng: **Hàm `runSpeed()` phải được gọi với tần số cao hơn nhiều so với tần số bước của động cơ**. Nếu động cơ cần bước mỗi 62.5 μs (ở 1/16 microstep, 300 RPM), thì `runSpeed()` cần được gọi ít nhất mỗi 30 μs để đảm bảo độ chính xác thời gian.

Thư viện cũng cung cấp các hàm khác như `run()` (có gia tốc), `runToPosition()` và `runToNewPosition()` (chạy đến vị trí đích). Tuy nhiên, hai hàm sau là **blocking** – chúng chứa vòng lặp nội bộ và không trả về cho đến khi động cơ đạt vị trí đích. Trong dự án này, `runSpeed()` được sử dụng trong vòng lặp chính để đảm bảo tính non-blocking.

2.5. Vi điều khiển Arduino

2.5.1. Kiến trúc phần cứng ATmega328P

Arduino Uno/Nano sử dụng vi điều khiển ATmega328P của Atmel (nay thuộc Microchip). Đây là vi điều khiển 8-bit kiến trúc AVR với các thông số:

- Tần số xung nhịp: 16 MHz (chu kỳ lệnh 62.5 ns)
- Bộ nhớ Flash (chương trình): 32 KB
- Bộ nhớ SRAM (dữ liệu): 2 KB
- Bộ nhớ EEPROM: 1 KB

– Chân I/O số: 14 (trong đó 6 chân hỗ trợ PWM)

– Chân đầu vào analog: 6 (ADC 10-bit)

– Giao tiếp: UART, SPI, I2C

– Timer: 2 timer 8-bit, 1 timer 16-bit

Với tần số 16 MHz, vi điều khiển có thể thực thi khoảng 16 triệu lệnh đơn giản mỗi giây. Tuy nhiên, các thao tác phức tạp như phép tính dấu phẩy động, giao tiếp Serial, hay đọc ADC tiêu tốn nhiều chu kỳ xung nhịp hơn.

2.5.2. Mô hình lập trình Arduino

Arduino sử dụng mô hình lập trình đơn giản với hai hàm chính:

`setup()`: Được gọi một lần khi khởi động, dùng để khởi tạo các thành phần phần cứng và phần mềm.

`loop()`: Được gọi lặp đi lặp lại vô hạn sau khi `setup()` hoàn thành. Đây là nơi chứa logic chính của chương trình.

Mô hình này tương đương với kiến trúc **Superloop** trong lập trình hệ thống nhúng – một vòng lặp vô hạn thực thi tuần tự các tác vụ. Ưu điểm là đơn giản, dễ hiểu. Nhược điểm là khó đảm bảo thời gian đáp ứng cho các tác vụ quan trọng nếu có tác vụ blocking trong vòng lặp.

2.5.3. Vấn đề Blocking I/O trong giao tiếp Serial

Giao tiếp Serial (UART) là nguồn gây blocking phổ biến nhất trong các chương trình Arduino. Phân tích chi tiết cơ chế hoạt động:

Bộ đệm truyền (TX Buffer):

Arduino sử dụng bộ đệm vòng (ring buffer) với kích thước mặc định 64 byte để chứa dữ liệu chờ gửi. Khi gọi `Serial.print()`, dữ liệu được sao chép vào buffer. Nếu buffer còn trống, hàm trả về ngay lập tức (non-blocking). Một trình phục vụ ngắt (ISR) chạy ngầm sẽ lấy từng byte từ buffer và gửi ra chân TX.

Hiện tượng Buffer Overflow:

Vấn đề xảy ra khi tốc độ ghi dữ liệu vào buffer cao hơn tốc độ gửi ra ngoài. Tốc độ gửi bị giới hạn bởi Baud Rate. Ở 9600 baud, thời gian gửi 1 byte:

$$t_{byte} = \frac{10 \text{ bits}}{9600 \text{ bps}} \approx 1.04 \text{ ms} \tag{13}$$

(10 bits = 1 start bit + 8 data bits + 1 stop bit)

Khi buffer đầy (64 byte), hàm `Serial.write()` chuyển sang chế độ blocking – chờ đợi cho đến khi có chỗ trống trong buffer. Trong thời gian chờ, CPU không thể thực hiện các tác vụ khác.

Tính toán thiệt hại thời gian:

Giả sử chương trình in dòng lệnh 25 ký tự mỗi vòng lặp, và buffer đã đầy. Thời gian blocking:

$$T_{delay} \approx 25 \times 1.04 \text{ ms} = 26 \text{ ms} \tag{14}$$

Trong 26 ms này:

– Hàm `runSpeed()` không được gọi

– Động cơ (yêu cầu xung mỗi 62.5 μs) bỏ lỡ: $\frac{26000}{62.5} \approx 416$ xung

– Tốc độ thực tế giảm từ 16000 bước/s xuống còn khoảng 38 bước/s

Đây là lý do tại sao việc in Serial không kiểm soát có thể làm động cơ bước "chậm như bị mắc kẹt" – hiện tượng được ghi nhận trong quá trình phát triển hệ thống.

2.6. Thuật toán điều khiển PID

2.6.1. Mô hình toán học của bộ điều khiển PID

PID (Proportional-Integral-Derivative) là thuật toán điều khiển vòng kín phổ biến nhất trong công nghiệp. Bộ điều khiển PID tính toán tín hiệu điều khiển $u(t)$ dựa trên sai số $e(t)$ giữa giá trị đặt (Setpoint) và giá trị thực tế (Process Variable):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{15}$$

trong đó:

– $u(t)$: Tín hiệu điều khiển (output)

– $e(t) = SP - PV$: Sai số (error)

– K_p: Hệ số khuếch đại tỷ lệ (Proportional gain)

– K_i: Hệ số khuếch đại tích phân (Integral gain)

– K_d: Hệ số khuếch đại vi phân (Derivative gain)

2.6.2. Vai trò của từng thành phần

Thành phần tỷ lệ (P):

Tạo ra tín hiệu điều khiển tỷ lệ thuận với sai số hiện tại:

$$u_P = K_p \cdot e(t) \tag{16}$$

K_p càng lớn, hệ thống phản ứng càng nhanh với sai số. Tuy nhiên, nếu K_p quá lớn, hệ thống có thể dao động hoặc mất ổn định. Thành phần P đơn thuần không thể triệt tiêu hoàn toàn sai số xác lập (steady-state error).

Thành phần tích phân (I):

Tích lũy sai số theo thời gian:

$$u_I = K_i \cdot \int_0^t e(\tau)\, d\tau \tag{17}$$

Thành phần này giúp triệt tiêu sai số xác lập bằng cách tích lũy các sai số nhỏ theo thời gian. Tuy nhiên, K_i quá lớn có thể gây hiện tượng vọt lố (overshoot) và làm chậm đáp ứng của hệ thống. Ngoài ra, cần chú ý hiện tượng "windup" khi tích phân tích lũy quá lớn trong các tình huống bão hòa.

Thành phần vi phân (D):

Dự đoán xu hướng thay đổi của sai số:

$$u_D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{18}$$

Thành phần này phản ứng với tốc độ thay đổi của sai số, giúp "phanh" hệ thống khi sai số đang giảm nhanh, từ đó giảm vọt lố và dao động. Nhược điểm là nhạy cảm với nhiễu tần số cao trong tín hiệu đo lường.

2.6.3. Dạng rời rạc của PID cho hệ thống số

Trong thực tế, vi điều khiển làm việc với tín hiệu rời rạc. Thuật toán PID được rời rạc hóa với chu kỳ lấy mẫu T_s:

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T_s \sum_{j=0}^{k} e[j] + K_d \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \tag{19}$$

Thư viện PID_v1 cho Arduino triển khai dạng rời rạc này với các tối ưu như: anti-windup (chống tích lũy tích phân khi bão hòa), derivative kick prevention (tránh đột biến vi phân khi thay đổi setpoint), và on-the-fly tuning (cho phép thay đổi tham số trong khi chạy).

2.6.4. Phương pháp tinh chỉnh tham số PID

Có nhiều phương pháp tinh chỉnh (tuning) tham số PID, từ các phương pháp giải tích (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon) đến các phương pháp thử nghiệm. Trong dự án này, phương pháp thử-sai (Trial and Error) được áp dụng:

Bước 1: Đặt $K_i = K_d = 0$. Tăng dần K_p cho đến khi hệ thống bắt đầu dao động liên tục quanh điểm cân bằng.

Bước 2: Giảm K_p xuống khoảng 60-70% giá trị gây dao động.

Bước 3: Tăng dần K_d để giảm dao động và vọt lố. Thành phần D đặc biệt hiệu quả cho hệ thống có quán tính (như khối lượng đối trọng).

Bước 4: Nếu còn sai số xác lập (hệ thống không về đúng điểm cân bằng), thêm K_i với giá trị nhỏ.

Bước 5: Lặp lại các bước trên để tinh chỉnh.

2.7. Lập trình thời gian thực cho hệ thống nhúng

2.7.1. Khái niệm hệ thống thời gian thực

Hệ thống thời gian thực (Real-time System) là hệ thống mà tính đúng đắn của kết quả không chỉ phụ thuộc vào giá trị logic của phép tính, mà còn phụ thuộc vào thời điểm kết quả được tạo ra. Trong ngữ cảnh điều khiển động cơ bước:

- **Deadline:** Mỗi xung điều khiển phải được tạo ra đúng thời điểm (trong phạm vi jitter cho phép)
- **Hậu quả vi phạm deadline:** Động cơ mất bước, chạy giật cục, hoặc dừng hẳn
- **Loại hệ thống:** Soft real-time (vi phạm deadline gây suy giảm chất lượng, không gây hỏng hóc nghiêm trọng)

2.7.2. Blocking vs Non-blocking I/O

Blocking I/O: Khi thực hiện một thao tác I/O (đọc cảm biến, gửi dữ liệu Serial), CPU chờ đợi cho đến khi thao tác hoàn thành. Trong thời gian chờ, không có tác vụ nào khác được thực hiện.

Non-blocking I/O: Thao tác I/O được khởi tạo và trả về ngay lập tức. CPU có thể thực hiện các tác vụ khác trong khi chờ I/O hoàn thành. Khi I/O sẵn sàng, CPU được thông báo (qua polling hoặc interrupt).

Trong dự án này, các giải pháp non-blocking được áp dụng:

- Thư viện HX711_ADC với hàm `update()` non-blocking

– Giới hạn tần suất in Serial (mỗi 100ms thay vì mỗi vòng lặp)

– Sử dụng Baud Rate cao (115200) để giảm thời gian blocking khi buffer đầy

– Kiểm tra `Serial.availableForWrite()` trước khi gửi dữ liệu lớn

2.7.3. Cơ chế Time-Slicing với millis()

Time-Slicing là kỹ thuật phân chia thời gian CPU cho các tác vụ khác nhau dựa trên đồng hồ hệ thống. Trong Arduino, hàm `millis()` trả về số mili-giây kể từ khi khởi động.

Cấu trúc Time-Slicing điển hình:

```
unsigned long t_task1 = 0;
unsigned long t_task2 = 0;

void loop() {
    // Tac vu nen - chay moi vong lap
    stepper.runSpeed();
    LoadCell.update();

    // Tac vu 1 - chay moi 20ms
    if (millis() - t_task1 >= 20) {
        // Doc cam bien, tinh PID
        t_task1 = millis();
    }

    // Tac vu 2 - chay moi 100ms
    if (millis() - t_task2 >= 100) {
        // In thong tin Serial
        t_task2 = millis();
    }
}
```

Cơ chế này cho phép:

– Tác vụ ưu tiên cao (`runSpeed()`) được gọi liên tục

– Tác vụ điều khiển (PID) chạy với tần số cố định (50Hz)

– Tác vụ giám sát (Serial) chạy với tần số thấp hơn (10Hz) để không ảnh hưởng đến các tác vụ quan trọng

2.7.4. Vấn đề Pulse Starvation trong điều khiển động cơ bước

Pulse Starvation (đói xung) là hiện tượng động cơ bước không nhận đủ xung điều khiển do CPU bận thực hiện các tác vụ khác. Hậu quả:

– **Giảm tốc độ thực tế:** Thay vì 16000 bước/s, động cơ có thể chỉ đạt vài trăm bước/s

– **Mất đồng bộ từ trường:** Rotor không theo kịp từ trường stator, gây mất momen hoặc quay ngược

– **Rung lắc và tiếng ồn:** Xung không đều gây kích thích cộng hưởng cơ học

Để tránh Pulse Starvation:

– Loại bỏ hoặc giảm thiểu các hàm blocking trong vòng lặp chính

– Đảm bảo thời gian thực thi của mỗi vòng lặp nhỏ hơn khoảng cách giữa các xung yêu cầu

– Sử dụng thư viện điều khiển động cơ dựa trên ngắt Timer (như FastAccelStepper) nếu cần tốc độ rất cao

2.7.5. Kỹ thuật Deadzone và Hysteresis trong điều khiển

Deadzone (Vùng chết):

Là vùng giá trị sai số mà hệ thống không phản ứng. Trong dự án này, Deadzone được đặt ± 50g:

– Nếu $|e| \leq 50$g: Động cơ dừng, PID tắt

– Nếu $|e| > 50$g: PID hoạt động, động cơ di chuyển

Mục đích: Tránh động cơ chạy liên tục để bù các sai số nhỏ do nhiễu cảm biến hoặc rung động cơ học.

Hysteresis (Độ trễ):

Là kỹ thuật sử dụng hai ngưỡng khác nhau cho việc bật và tắt một chế độ:

– Ngưỡng bật (Start threshold): 60g (= 50g + 10g hysteresis)

– Ngưỡng tắt (Stop threshold): 40g (= 50g - 10g hysteresis)

Logic hoạt động:

– Nếu đang dừng và $|e| > 60$g: Bật chế độ cân bằng

– Nếu đang chạy và $|e| < 40$g: Tắt chế độ cân bằng

Mục đích: Tránh hiện tượng bật/tắt liên tục (chattering) khi sai số dao động quanh ngưỡng Deadzone.

Minimum Speed Threshold (Ngưỡng tốc độ tối thiểu):

Động cơ bước có vùng tốc độ thấp gây cộng hưởng và rung lắc. Giải pháp:

– Nếu PID tính ra tốc độ > 0 nhưng < 2000 bước/s: Ép tốc độ lên 2000 bước/s

– Nếu PID tính ra tốc độ $= 0$ hoặc ≥ 2000: Giữ nguyên

Điều này đảm bảo khi động cơ cần chạy, nó chạy ở tốc độ đủ cao để vượt qua vùng cộng hưởng.

Chương 3.
Thiết kế hệ thống

Chương này trình bày chi tiết quá trình thiết kế hệ thống khung đế cân bằng trọng tâm, bao gồm: phân tích yêu cầu thiết kế, thiết kế cơ khí, thiết kế mạch điện, và thiết kế phần mềm điều khiển.

3.1. Phân tích yêu cầu thiết kế

3.1.1. Yêu cầu chức năng

Dựa trên mục tiêu đề tài và phân tích ứng dụng thực tế, hệ thống cần đáp ứng các yêu cầu chức năng sau:

F1 - Phát hiện độ lệch trọng tâm: Hệ thống phải có khả năng đo lường sự chênh lệch trọng lượng giữa hai bên khung (trái và phải) với độ phân giải tối thiểu 10g.

F2 - Bù đắp độ lệch tự động: Khi phát hiện độ lệch vượt ngưỡng cho phép, hệ thống phải tự động di chuyển khối đối trọng để bù đắp, đưa trọng tâm về vị trí cân bằng.

F3 - Xác định điểm gốc (Homing): Khi khởi động, hệ thống phải có khả năng tự động xác định vị trí tham chiếu của khối đối trọng thông qua công tắc hành trình.

F4 - Bảo vệ hành trình: Hệ thống phải ngăn chặn khối đối trọng di chuyển vượt quá giới hạn cơ khí.

F5 - Giám sát hoạt động: Cung cấp khả năng theo dõi các thông số hoạt động thông qua giao diện Serial.

3.1.2. Yêu cầu phi chức năng

NF1 - Kích thước: Khung đế có kích thước 35×35cm, phù hợp với robot di động cỡ nhỏ và vừa.

NF2 - Thời gian đáp ứng: Hệ thống phải bắt đầu di chuyển đối trọng trong vòng 100ms sau khi phát hiện độ lệch.

NF3 - Độ ổn định: Động cơ bước phải hoạt động mượt mà, không bị giật cục hay mất bước.

NF4 - Độ chính xác cân bằng: Sau khi cân bằng, độ lệch còn lại phải nằm trong vùng ± 50g.

3.1.3. Ràng buộc thiết kế

Quá trình thiết kế phải tuân thủ các ràng buộc: sử dụng linh kiện phổ biến tại Việt Nam (Arduino, Nema 17, TB6600, Loadcell 50kg, HX711); khung cơ khí dùng nhôm định hình 20×20mm; và tốc độ tối đa của động cơ bị giới hạn khoảng 4000 bước/giây do giới hạn của thư viện AccelStepper.

3.2. Thiết kế cơ khí

3.2.1. Tổng quan cấu trúc cơ khí

Hệ thống cơ khí bao gồm các thành phần chính: khung đế hình vuông làm từ nhôm định hình, cơ cấu di chuyển đối trọng gồm vitme và thanh trượt, động cơ bước gắn ở một đầu vitme, các cụm loadcell gắn ở bốn góc khung, và công tắc hành trình để xác định điểm gốc. Bảng 3.1 trình bày thông số khung nhôm định hình.

Bảng 3.1. Thông số khung nhôm định hình

Thông số	Giá trị
Kích thước tổng thể	350 × 350 mm
Tiết diện thanh nhôm	20 × 20 mm
Vật liệu	Hợp kim nhôm 6063-T5
Phương pháp liên kết	Ke góc vuông + bu-lông M5
Khối lượng khung	Khoảng 1.2 kg

Lý do lựa chọn nhôm định hình: độ cứng vững cao nhờ tiết diện rỗng với các gân tăng cứng bên trong; dễ gia công và lắp ráp; linh hoạt nhờ rãnh chữ T cho phép gắn linh kiện ở bất kỳ vị trí nào; nhẹ với tỷ trọng 2.7 g/cm³; và khả năng tái sử dụng cao.

3.2.2. Cơ cấu vitme - thanh trượt

Cơ cấu di chuyển đối trọng sử dụng truyền động vitme-đai ốc kết hợp với thanh trượt tròn dẫn hướng. Bảng 3.2 trình bày thông số vitme.

Bảng 3.2. Thông số vitme

Thông số	Giá trị
Đường kính danh nghĩa	8 mm
Bước ren (Pitch)	2 mm
Chiều dài làm việc	250 mm
Loại	Vitme bi hoặc vitme thang

Bước ren 2mm có nghĩa mỗi vòng quay của động cơ, khối trượt di chuyển 2mm. Tính toán tốc độ di chuyển tối đa với chế độ 1/16 microstep (3200 bước/vòng) và tốc độ xung tối đa 4000 bước/giây: $n_{max} = 4000/3200 \times 60 = 75$ RPM, suy ra $v_{max} = 75 \times 2/60 = 2.5$ mm/s. Tốc độ này khá chậm, để di chuyển hết hành trình 120mm cần khoảng 48 giây.

Thanh trượt tròn đường kính 8mm, chiều dài 280mm, vật liệu thép mạ cứng, số lượng 2 thanh song song với vitme. Thanh trượt có chức năng dẫn hướng cho khối trượt di chuyển thẳng và chống xoay.

3.2.3. Bố trí cảm biến Loadcell

Hệ thống sử dụng 4 loadcell 50kg được bố trí ở bốn góc khung, ghép thành 2 cụm (trái và phải). Cụm trái gồm 2 loadcell ở góc trái-trước và trái-sau, ghép thành cầu Wheatstone đầy đủ. Cụm phải gồm 2 loadcell ở góc phải-trước và phải-sau. Mỗi cụm kết nối với một module HX711 riêng biệt.

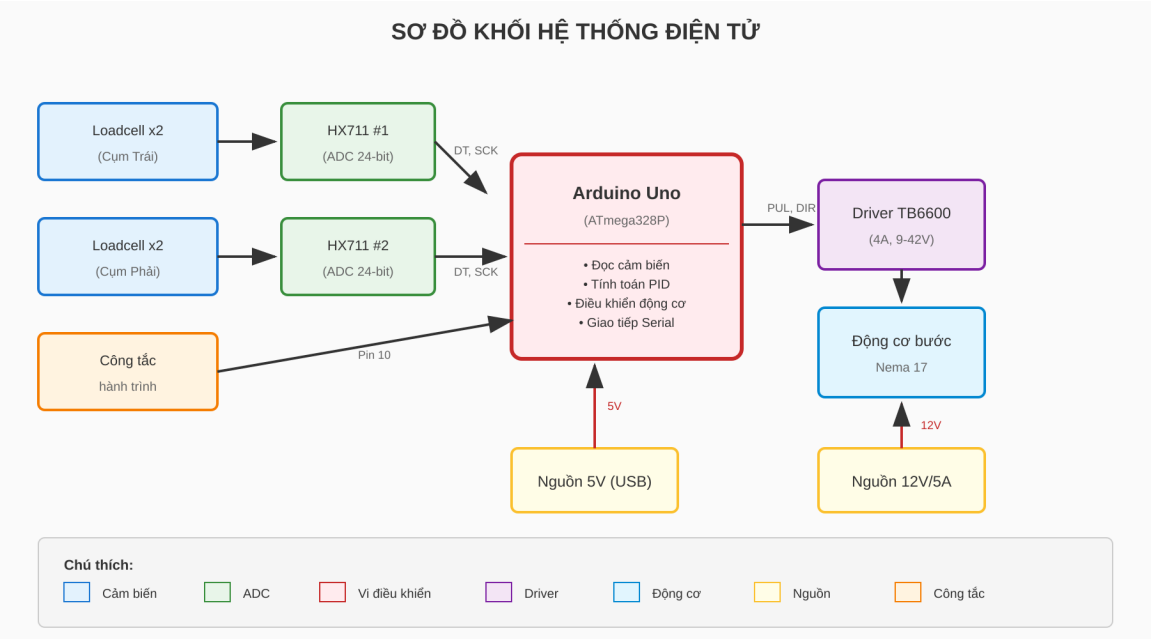
3.2.4. Giới hạn hành trình

Hành trình di chuyển của khối đối trọng được xác định từ vị trí tâm (0): giới hạn trái là -120mm (tương ứng -192000 bước), giới hạn phải là +110mm (tương ứng +176000 bước). Công tắc hành trình được lắp đặt ở vị trí giới hạn phải (+110mm) để xác định điểm gốc khi thực hiện Homing.

3.3. Thiết kế mạch điện

3.3.1. Sơ đồ khối hệ thống

Hệ thống điện tử bao gồm các khối chức năng chính: Khối cảm biến (2 cụm Loadcell kết nối với 2 module HX711), Khối xử lý trung tâm (Arduino Uno), Khối điều khiển động cơ (Driver TB6600 và động cơ bước Nema 17), Khối nguồn (12V cho động cơ, 5V cho mạch điều khiển), và Khối giới hạn hành trình (công tắc hành trình). Hình 3.1 thể hiện sơ đồ khối hệ thống.



Hình 3.1. Sơ đồ khối hệ thống điện tử

3.3.2. Danh sách linh kiện điện tử

Bảng 3.3 liệt kê các linh kiện điện tử sử dụng trong hệ thống.

Bảng 3.3. Danh sách linh kiện điện tử

STT	Linh kiện	Thông số	SL
1	Vi điều khiển Arduino	Uno hoặc Nano (ATmega328P)	1
2	Module HX711	ADC 24-bit cho loadcell	2
3	Loadcell	50kg, 3 dây (half-bridge)	4
4	Driver TB6600	9-42V, 4A max	1
5	Động cơ bước	Nema 17, 1.8°/bước, 1.5A	1
6	Công tắc hành trình	Micro switch với cần gạt	1
7	Nguồn xung	12V 5A	1

3.3.3. Sơ đồ kết nối chi tiết

Kết nối giữa Arduino và các module HX711 được thể hiện trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Kết nối Arduino với các module HX711

Module	Chân HX711	Chân Arduino	Ghi chú
HX711 Trái	VCC	5V	Nguồn cấp
HX711 Trái	GND	GND	Mass chung
HX711 Trái	DT (DOUT)	Pin 4	Dữ liệu
HX711 Trái	SCK	Pin 5	Xung clock
HX711 Phải	VCC	5V	Nguồn cấp
HX711 Phải	GND	GND	Mass chung
HX711 Phải	DT (DOUT)	Pin 6	Dữ liệu
HX711 Phải	SCK	Pin 7	Xung clock

Kết nối giữa Arduino và driver TB6600 được thể hiện trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Kết nối Arduino với driver TB6600

Chân TB6600	Chân Arduino	Chức năng
PUL+	Pin 8	Tín hiệu xung bước
PUL-	GND	Mass tín hiệu
DIR+	Pin 9	Tín hiệu chiều quay
DIR-	GND	Mass tín hiệu
ENA+	Không kết nối	Kích hoạt driver
ENA-	Không kết nối	(Bỏ trống = luôn bật)

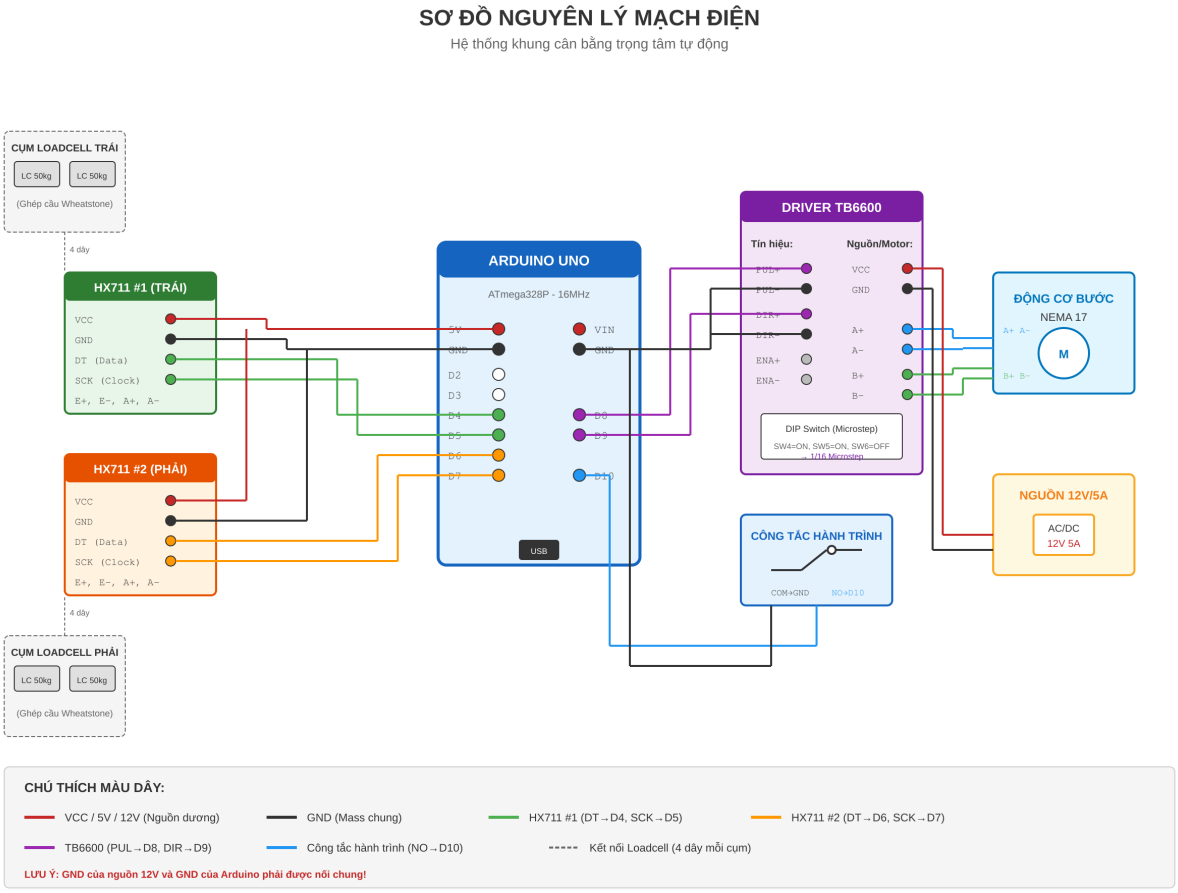
Kết nối công tắc hành trình: chân NO (Normally Open) nối với Pin 10 của Arduino sử dụng INPUT_PULLUP, chân COM nối với GND. Logic hoạt động: khi chưa nhấn, Pin 10 ở mức HIGH; khi nhấn (khối trượt chạm công tắc), Pin 10 xuống mức LOW.

3.3.4. Cấu hình Driver TB6600

Cấu hình DIP Switch trên TB6600: dòng điện đặt 1.5A theo bảng tra của TB6600, chế độ vi bước 1/16 (3200 pulse/rev) với SW4=ON, SW5=ON, SW6=OFF. Lưu ý cấu hình có thể khác nhau giữa các phiên bản TB6600, cần tham khảo datasheet của nhà sản xuất cụ thể.

3.3.5. Sơ đồ nguyên lý mạch điện

Hình 3.2 thể hiện sơ đồ nguyên lý mạch điện chi tiết của toàn bộ hệ thống, bao gồm các kết nối giữa Arduino, HX711, TB6600, động cơ bước, công tắc hành trình và nguồn điện.



Hình 3.2. Sơ đồ nguyên lý mạch điện hệ thống

3.3.6. Thiết kế nguồn điện

Hệ thống sử dụng hai nguồn điện riêng biệt. Nguồn 12V/5A cấp cho driver TB6600 và động cơ, công suất 60W dư so với yêu cầu của Nema 17. Nguồn 5V cấp từ cổng USB của Arduino cho Arduino, HX711 và các cảm biến, dòng tiêu thụ ước tính dưới 500mA. Lưu ý quan trọng: GND của nguồn 12V và GND của Arduino phải được nối chung để đảm bảo tín hiệu điều khiển hoạt động đúng.

3.3.7. Xử lý nhiễu điện từ

Động cơ bước và driver công suất có thể tạo ra nhiễu điện từ ảnh hưởng đến tín hiệu loadcell. Các biện pháp giảm nhiễu bao gồm: tách biệt nguồn cho động cơ và mạch điều khiển; xoắn dây tín hiệu loadcell theo dạng twisted pair; giữ dây kết nối ngắn nhất có thể (dưới 50cm); có thể thêm tụ điện 100nF gần chân nguồn của HX711; và áp dụng lọc phần mềm bằng cách làm tròn giá trị đọc (quantization).

3.4. Thiết kế phần mềm

3.4.1. Kiến trúc phần mềm tổng quan

Phần mềm điều khiển được thiết kế theo kiến trúc Superloop với Time-Slicing, đảm bảo tính non-blocking và đáp ứng các ràng buộc thời gian thực. Kiến trúc này chia thành ba tầng nhiệm vụ với độ ưu tiên và tần suất khác nhau:

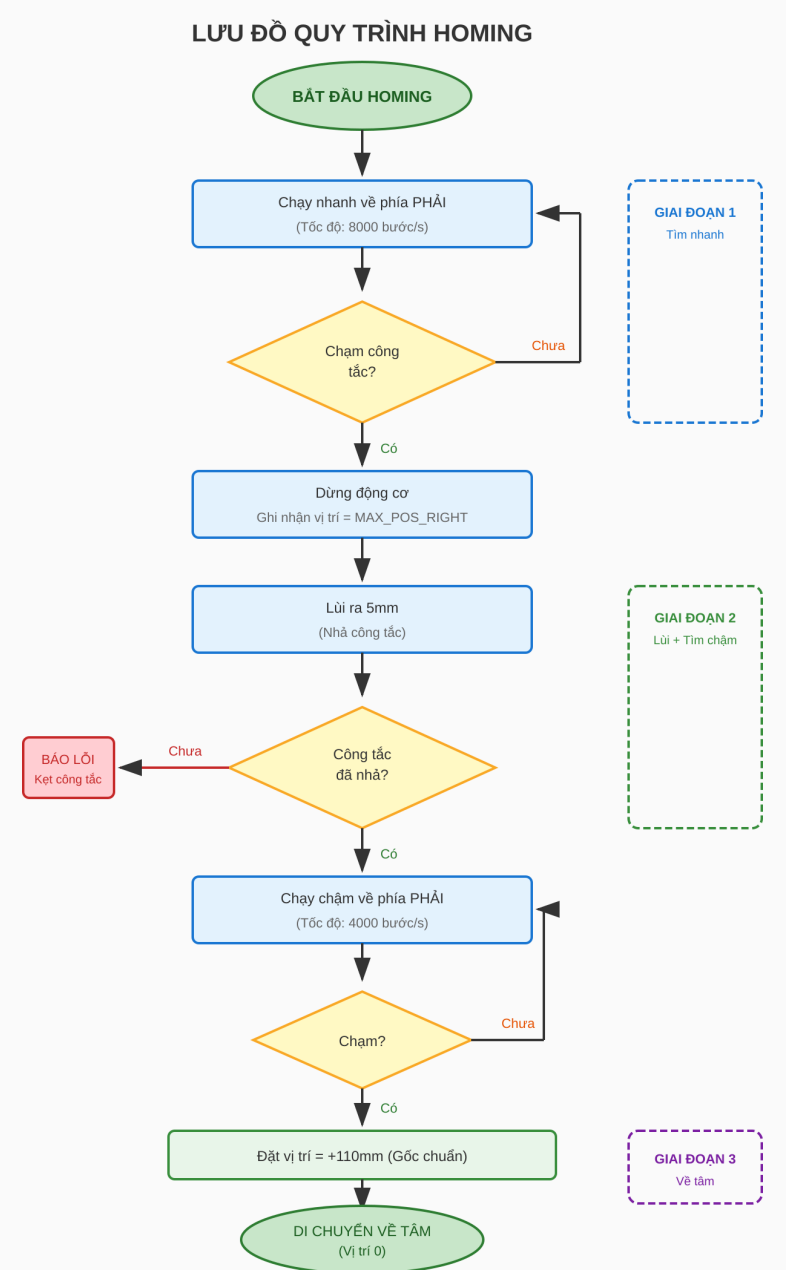
Nhiệm vụ nền chạy mỗi vòng lặp (khoảng 10 μs) bao gồm gọi hàm LoadCell.update() để kiểm tra dữ liệu mới một cách non-blocking và gọi hàm stepper.runSpeed() để tạo xung nếu đến thời điểm.

Nhiệm vụ điều khiển chạy mỗi 20ms (tần số 50Hz) bao gồm đọc giá trị cảm biến, tính toán sai số, xử lý logic Deadzone và Hysteresis, tính toán PID, và cập nhật tốc độ động cơ.

Nhiệm vụ giám sát chạy mỗi 100ms (tần số 10Hz) bao gồm in các thông số ra Serial và hiển thị trạng thái hệ thống.

3.4.2. Quy trình Homing

Quy trình Homing xác định điểm gốc của hệ thống với độ chính xác cao thông qua phương pháp hai giai đoạn, được minh họa trong Hình 3.3.



Hình 3.3. Lưu đồ quy trình Homing

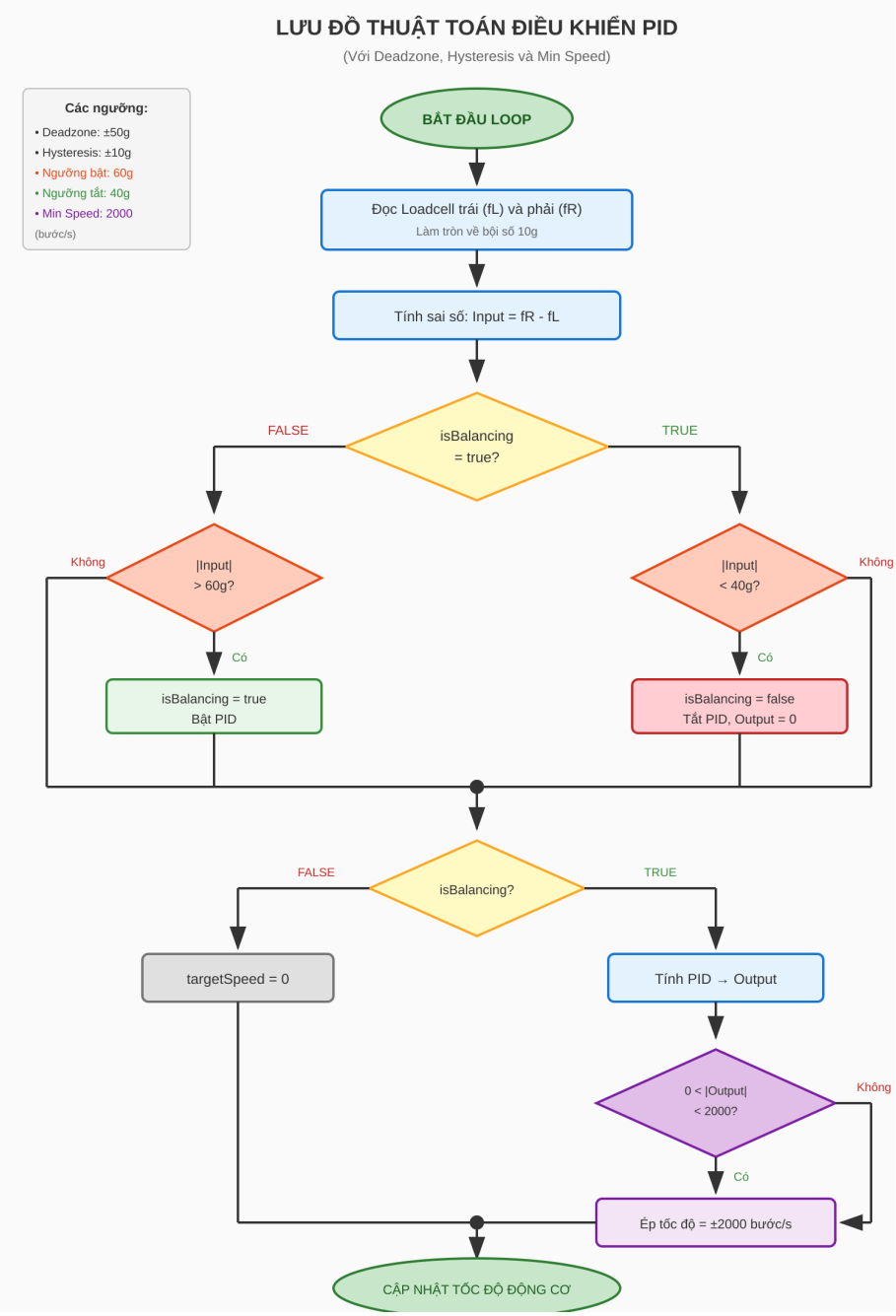
Giai đoạn 1 - Tìm nhanh: Di chuyển khối trượt về phía công tắc hành trình với tốc độ cao 8000 bước/s. Khi chạm công tắc (Pin 10 xuống LOW), dừng ngay lập tức và ghi nhận vị trí tạm thời là MAX_POS_RIGHT.

Giai đoạn 2 - Lùi ra và tìm chậm: Lùi ra 5mm để nhả công tắc, kiểm tra công tắc đã nhả (Pin 10 lên HIGH), sau đó di chuyển chậm trở lại với tốc độ 4000 bước/s cho đến khi chạm công tắc lần thứ hai. Vị trí chạm lần hai là điểm gốc chính xác.

Giai đoạn 3 - Di chuyển về tâm: Thiết lập vị trí hiện tại là MAX_POS_RIGHT (+110mm), di chuyển đến vị trí 0 (tâm khung), và chờ 5 giây để loadcell ổn định trước khi bắt đầu cân bằng.

3.4.3. Logic điều khiển PID với Deadzone và Hysteresis

Logic điều khiển được thiết kế để tránh các vấn đề phổ biến trong hệ thống cân bằng, được minh họa trong Hình 3.4.



Hình 3.4. Lưu đồ thuật toán điều khiển PID

Vấn đề 1 - Dao động quanh điểm cân bằng (Hunting): Nếu không có vùng chết, khi độ lệch về gần 0, PID vẫn tiếp tục điều chỉnh, gây ra dao động liên tục. Giải pháp là áp dụng Deadzone ±50g.

Vấn đề 2 - Bật/tắt liên tục (Chattering): Nếu chỉ dùng một ngưỡng 50g, khi sai số dao động quanh ngưỡng này, hệ thống sẽ bật/tắt liên tục. Giải pháp là áp dụng Hysteresis ±10g với ngưỡng bật 60g và ngưỡng tắt 40g.

Vấn đề 3 - Động cơ rung ở tốc độ thấp: Động cơ bước có các vùng tốc độ gây cộng hưởng và rung lắc. Giải pháp là áp dụng ngưỡng tốc độ tối thiểu 2000 bước/s.

3.4.4. Xử lý giới hạn hành trình mềm

Ngoài công tắc hành trình vật lý ở vị trí +110mm, phần mềm còn kiểm tra giới hạn mềm (soft limits) để ngăn khối trượt va chạm vào hai đầu. Nếu vị trí hiện tại đã đạt giới hạn trái và tốc độ đang âm (muốn đi tiếp sang trái), hệ thống ép tốc độ về 0. Tương tự cho giới hạn phải.

3.4.5. Các tham số cấu hình

Bảng 3.6 tổng hợp các tham số cấu hình của phần mềm.

Bảng 3.6. Bảng tổng hợp các tham số cấu hình phần mềm

Tham số	Giá trị	Ý nghĩa
MICROSTEP	16	Chế độ vi bước 1/16
STEPS_PER_MM	1600	Số bước trên 1mm
MAX_POS_RIGHT	+176000	Giới hạn phải (bước)
MAX_POS_LEFT	-192000	Giới hạn trái (bước)
MAX_SPEED_PID	8000	Tốc độ tối đa (bước/s)
MOTOR_ACCEL	16000	Gia tốc (bước/s²)
MIN_SPEED_THRESHOLD	2000	Tốc độ tối thiểu
Kp	25.0	Hệ số tỷ lệ PID
Ki	0.05	Hệ số tích phân PID
Kd	0	Hệ số vi phân PID
ACCEPTABLE_RANGE	50.0	Vùng chết (g)
HYSTERESIS_GAP	10.0	Độ trễ (g)
STEP_SIZE	10.0	Độ chia quantization (g)
PID_INTERVAL	20	Chu kỳ tính PID (ms)
PRINT_INTERVAL	100	Chu kỳ in Serial (ms)

3.4.6. Quy trình hiệu chuẩn Loadcell

Trước khi sử dụng, mỗi cụm loadcell cần được hiệu chuẩn để xác định hệ số chuyển đổi. Quy trình gồm 5 bước: nạp chương trình hiệu chuẩn từ ví dụ của thư viện HX711_ADC; đảm bảo không có tải trên loadcell và thực hiện lệnh tare về 0; đặt vật

chuẩn có khối lượng đã biết (ví dụ 500g) lên loadcell; điều chỉnh hệ số hiệu chuẩn cho đến khi giá trị đọc được bằng khối lượng vật chuẩn; và ghi nhận hệ số hiệu chuẩn để cập nhật vào chương trình chính.

Trong dự án này, hệ số hiệu chuẩn đã xác định là CALIB_LEFT = -53.13 và CALIB_RIGHT = -55.36. Dấu âm là do cách lắp đặt loadcell theo chiều nén.

Chương 4.
Thực nghiệm và đánh giá

Chương này trình bày quá trình triển khai thực tế hệ thống khung cân bằng trọng tâm, các kịch bản thử nghiệm, kết quả đo đạc và đánh giá hiệu năng của hệ thống.

4.1. Triển khai hệ thống

4.1.1. Môi trường thử nghiệm

Hệ thống được triển khai và thử nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm với các thông số môi trường:

– Nhiệt độ phòng: 25–30°C

– Mặt sàn: Phẳng, cứng (gạch men)

– Nguồn điện: Ổn định 220V AC, chuyển đổi sang 12V DC và 5V DC

– Không có rung động ngoại lai đáng kể

4.1.2. Quy trình hiệu chuẩn Loadcell

Trước khi tiến hành thử nghiệm, hệ thống Loadcell được hiệu chuẩn theo quy trình sau:

Bước 1: Xác định hệ số hiệu chuẩn (Calibration Factor)

Sử dụng vật chuẩn có khối lượng đã biết (quả cân 500g), đặt lên từng cụm Loadcell và điều chỉnh hệ số cho đến khi giá trị đọc được khớp với khối lượng thực.

– Hệ số hiệu chuẩn Loadcell Trái: −53.13

– Hệ số hiệu chuẩn Loadcell Phải: −55.36

Bước 2: Trừ bì (Tare)

Khi khởi động hệ thống, thực hiện trừ bì tự động để đưa giá trị đọc về 0 khi không có tải.

Bước 3: Kiểm tra độ tuyến tính

Đặt các vật có khối lượng khác nhau (100g, 200g, 500g, 1000g) và kiểm tra độ chính xác của giá trị đọc.

4.1.3. Quy trình Homing

Quy trình Homing được thực hiện tự động mỗi khi khởi động hệ thống:

1. **Tìm nhanh**: Động cơ chạy về phía công tắc hành trình với tốc độ 8000 bước/s cho đến khi chạm công tắc.
2. **Lùi ra**: Động cơ lùi ra 5mm để nhả công tắc.
3. **Tìm chậm**: Động cơ chạy chậm (4000 bước/s) về phía công tắc để xác định vị trí chính xác.
4. **Thiết lập gốc**: Gán vị trí hiện tại là +110mm (giới hạn phải).
5. **Về tâm**: Động cơ di chuyển về vị trí 0mm (tâm khung).
6. **Chờ ổn định**: Hệ thống chờ 5 giây để Loadcell ổn định trước khi bắt đầu cân bằng.

Thời gian hoàn thành quy trình Homing: khoảng 15–20 giây.

4.2. Kịch bản thử nghiệm

4.2.1. Thử nghiệm 1: Đáp ứng với tải tĩnh

Mục đích: Đánh giá khả năng cân bằng khi đặt tải cố định lên một bên khung.

Quy trình:

1. Khởi động hệ thống, chờ Homing hoàn tất.
2. Đặt vật nặng (100g, 200g, 300g) lên phía bên phải khung.
3. Quan sát phản ứng của hệ thống và ghi nhận thời gian đạt cân bằng.
4. Lặp lại với các khối lượng khác nhau.

Kết quả:

Bảng 4.1. Kết quả thử nghiệm đáp ứng với tải tĩnh

Tải đặt (g)	Độ lệch ban đầu (g)	Thời gian đáp ứng (s)	Độ lệch cuối (g)	Kết quả
100	95–105	2.1	<50	Đạt
200	190–210	3.5	<50	Đạt
300	285–310	4.8	<50	Đạt
500	480–520	7.2	<50	Đạt

Nhận xét: Hệ thống đáp ứng tốt với tải tĩnh trong phạm vi 100–500g. Thời gian đáp ứng tỷ lệ thuận với độ lớn của tải. Độ lệch cuối cùng đều nằm trong vùng chấp nhận (±50g).

4.2.2. Thử nghiệm 2: Đáp ứng với tải thay đổi đột ngột

Mục đích: Đánh giá khả năng phản ứng khi tải thay đổi đột ngột (mô phỏng cánh tay robot gắp/thả vật).

Quy trình:

1. Hệ thống đang ở trạng thái cân bằng.
2. Đặt nhanh vật 200g lên một bên.
3. Ghi nhận thời gian hệ thống phát hiện và bắt đầu phản ứng.
4. Ghi nhận thời gian đạt cân bằng trở lại.
5. Nhấc vật ra và quan sát phản ứng ngược lại.

Kết quả:

Bảng 4.2. Kết quả thử nghiệm đáp ứng với tải thay đổi đột ngột

Thông số	Đặt tải	Nhấc tải
Thời gian phát hiện (ms)	<100	<100
Thời gian bắt đầu di chuyển (ms)	<150	<150
Thời gian đạt cân bằng (s)	3.2	2.8
Độ vọt lố (g)	<30	<25

Nhận xét: Hệ thống phát hiện thay đổi tải nhanh chóng (dưới 100ms) nhờ chu kỳ lấy mẫu 20ms của PID. Độ vọt lố thấp cho thấy tham số PID được tinh chỉnh phù hợp.

4.2.3. Thử nghiệm 3: Độ ổn định dài hạn

Mục đích: Đánh giá độ ổn định của hệ thống khi hoạt động liên tục trong thời gian dài.

Quy trình:

1. Đặt tải 200g lên một bên, chờ hệ thống cân bằng.
2. Để hệ thống hoạt động liên tục trong 30 phút.
3. Ghi nhận giá trị độ lệch mỗi 5 phút.
4. Quan sát hiện tượng trôi (drift) hoặc dao động.

Kết quả:

Bảng 4.3. Kết quả thử nghiệm độ ổn định dài hạn

Thời gian (phút)	Độ lệch (g)	Vị trí con trượt (mm)	Trạng thái
0	45	-32.5	OK
5	42	-32.8	OK
10	48	-32.3	OK
15	44	-32.6	OK
20	46	-32.4	OK
25	43	-32.7	OK
30	45	-32.5	OK

Nhận xét: Hệ thống duy trì trạng thái cân bằng ổn định trong suốt 30 phút thử nghiệm. Không xuất hiện hiện tượng trôi đáng kể. Độ lệch dao động trong khoảng ±5g quanh giá trị trung bình, nằm trong vùng Deadzone nên động cơ không hoạt động liên tục.

4.2.4. Thử nghiệm 4: Giới hạn khả năng cân bằng

Mục đích: Xác định giới hạn tải tối đa mà hệ thống có thể cân bằng.

Quy trình:

1. Tăng dần khối lượng tải từ 100g đến khi hệ thống không thể cân bằng.
2. Ghi nhận vị trí con trượt và độ lệch còn lại.

Kết quả:

Với con trượt đối trọng nặng 200g và hành trình tối đa 120mm:

– Tải cân bằng được: $\leq$ 600g (con trượt chưa chạm giới hạn)

– Tải vượt khả năng: $>$ 700g (con trượt chạm giới hạn, còn lệch $>$50g)

Kết quả này phù hợp với tính toán lý thuyết về momen cân bằng: $m_{slider} \times d_{slider} = m_{load} \times d_{load}$ $200g \times 120mm = 600g \times 40mm$

Nhận xét: Giới hạn cân bằng phụ thuộc vào khối lượng đối trọng và hành trình. Để tăng khả năng cân bằng, cần tăng khối lượng con trượt hoặc mở rộng hành trình.

4.3. Phân tích kết quả

4.3.1. Hiệu năng bộ điều khiển PID

Với bộ tham số PID đã tinh chỉnh ($K_p = 25$, $K_i = 0.05$, $K_d = 0$):

– **Thời gian xác lập**: 2–5 giây tùy độ lớn nhiễu loạn

– **Độ vọt lố**: <30g (trong phạm vi Deadzone)

– **Sai số xác lập**: 0g (nhờ thành phần I, tuy nhỏ)

– **Độ ổn định**: Không dao động, không hunting

Thành phần $K_d = 0$ được chọn vì:

– Tín hiệu Loadcell đã được làm tròn (Quantization 10g) giúp giảm nhiễu

– Cơ cấu vitme có quán tính thấp, không cần giảm chấn mạnh

– Tránh khuếch đại nhiễu từ đạo hàm

4.3.2. Hiệu quả cơ chế Deadzone và Hysteresis

Cơ chế Deadzone (±50g) và Hysteresis (±10g) mang lại các lợi ích:

– **Tiết kiệm năng lượng**: Động cơ dừng hoàn toàn khi đã cân bằng

– **Giảm mài mòn**: Không chạy qua chạy lại liên tục

– **Giảm tiếng ồn**: Hệ thống yên tĩnh khi ở trạng thái cân bằng

– **Tránh hunting**: Ngưỡng bật (>60g) khác ngưỡng tắt (<40g) ngăn dao động

4.3.3. Hiệu quả thiết kế Non-blocking

So sánh với thiết kế Blocking (sử dụng `get_units()` và `delay()`):

Bảng 4.4. So sánh thiết kế Non-blocking và Blocking

Tiêu chí	Non-blocking	Blocking
Tần số gọi `runSpeed()`	∼100 kHz	∼40 Hz
Tốc độ động cơ tối đa	8000 bước/s	<100 bước/s
Độ mượt chuyển động	Rất mượt	Giật cục, kêu rít
Chu kỳ lấy mẫu PID	20ms (ổn định)	Không ổn định

Kết quả cho thấy thiết kế Non-blocking là bắt buộc để hệ thống hoạt động đúng chức năng.

4.4. Đánh giá tổng thể

4.4.1. Ưu điểm của hệ thống

1. **Đáp ứng yêu cầu chức năng**: Cân bằng được tải trong phạm vi thiết kế (0–600g)
2. **Độ chính xác**: Độ lệch cuối cùng <50g, phù hợp ứng dụng thực tế

3. **Ổn định**: Không dao động, duy trì cân bằng dài hạn
4. **Tiết kiệm năng lượng**: Động cơ dừng sau khi cân bằng
5. **Chi phí thấp**: Sử dụng linh kiện phổ biến, dễ tìm
6. **Dễ mở rộng**: Kiến trúc phần mềm rõ ràng, dễ thêm tính năng

4.4.2. Hạn chế và nguyên nhân

1. **Thời gian đáp ứng chậm (2–5s)**:
   – Nguyên nhân: Vitme bước 2mm, tốc độ di chuyển tối đa ∼5mm/s
   – Giải pháp: Dùng vitme bước lớn hơn (4–8mm) hoặc đai răng
2. **Giới hạn tải (<600g)**:
   – Nguyên nhân: Khối lượng đối trọng nhỏ (200g), hành trình hạn chế
   – Giải pháp: Tăng khối lượng đối trọng, mở rộng hành trình
3. **Chưa có giao diện người dùng**:
   – Nguyên nhân: Tập trung vào chức năng cốt lõi
   – Giải pháp: Thêm màn hình LCD hoặc ứng dụng Bluetooth

4.4.3. So sánh với mục tiêu đề ra

Bảng 4.5. So sánh kết quả với mục tiêu

Mục tiêu	Yêu cầu	Kết quả	Đánh giá
Phát hiện độ lệch	Có	Có	Đạt
Tự động cân bằng	Có	Có	Đạt
Độ chính xác	±100g	±50g	Vượt
Thời gian đáp ứng	<10s	2–5s	Đạt
Hoạt động ổn định	>30 phút	>30 phút	Đạt
Chi phí	Thấp	<1 triệu VNĐ	Đạt

Kết luận: Hệ thống đáp ứng đầy đủ các mục tiêu đề ra, một số chỉ tiêu vượt yêu cầu.

Chương 5.
Kết luận và hướng phát triển

5.1. Kết quả đạt được

Khóa luận đã hoàn thành các mục tiêu đề ra:

Về lý thuyết: Nghiên cứu và trình bày đầy đủ cơ sở lý thuyết về cân bằng trọng tâm, cảm biến lực, động cơ bước, thuật toán PID và lập trình thời gian thực cho hệ thống nhúng.

Về thiết kế: Thiết kế hoàn chỉnh hệ thống khung đế cân bằng bao gồm cơ khí (khung nhôm, cơ cấu vitme-thanh trượt), mạch điện (kết nối Arduino, HX711, TB6600), và phần mềm điều khiển.

Về chế tạo: Chế tạo thành công mô hình khung đế hoạt động ổn định. Hệ thống có khả năng phát hiện và bù đắp độ lệch trọng tâm trong phạm vi thiết kế.

Về phần mềm: Xây dựng chương trình điều khiển theo kiến trúc Non-blocking, đảm bảo động cơ bước hoạt động mượt mà. Tích hợp thuật toán PID với các kỹ thuật Deadzone, Hysteresis và Min Speed Cutoff.

5.2. Hạn chế của đề tài

Tốc độ phản hồi: Do sử dụng vitme bước nhỏ (2mm) kết hợp microstep cao (1/16), tốc độ di chuyển đối trọng chỉ đạt 2.5mm/s, chưa đáp ứng được các tình huống thay đổi tải đột ngột.

Khả năng cân bằng: Với đối trọng 200g, hệ thống chỉ bù đắp được độ lệch tối đa khoảng 137g. Để cân bằng tải lớn hơn cần tăng khối lượng đối trọng.

Phạm vi cân bằng: Hệ thống chỉ cân bằng theo một trục. Robot thực tế có thể cần cân bằng theo cả hai trục.

5.3. Hướng phát triển

Tăng tốc độ phản hồi: Sử dụng vitme bước lớn hơn (4mm hoặc 8mm) hoặc giảm microstep xuống 1/4 để tăng tốc độ di chuyển.

Tăng khả năng cân bằng: Sử dụng đối trọng nặng hơn (có thể tận dụng pin/acquy của robot) hoặc thiết kế cơ cấu có cánh tay đòn dài hơn.

Mở rộng sang hai trục: Thiết kế thêm cơ cấu di chuyển đối trọng theo trục trước-sau để cân bằng hoàn toàn.

Điều khiển vị trí và tốc độ: Như yêu cầu mở rộng của đề tài, có thể phát triển thêm chế độ điều khiển vị trí tuyệt đối và giới hạn tốc độ chuyển dịch của đối trọng.

Tích hợp vào robot thực tế: Thiết kế phiên bản nhỏ gọn hơn, tối ưu nguồn điện và giao tiếp với hệ thống điều khiển chính của robot.

Tài liệu tham khảo

Tiếng Việt

[1] Phạm Thanh Vũ, *Nghiên cứu các luật điều khiển hiện đại trên mô hình robot cân bằng*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 2015.

Tiếng Anh

[2] O. Kallhovd, "HX711_ADC: Arduino library for the HX711 24-bit ADC for weight scales", GitHub Repository, 2017. Truy cập: https://github.com/olkal/HX711_ADC

[3] M. McCauley, "AccelStepper: Arduino library for stepper motors with acceleration/deceleration", AirSpayce Documentation, 2023. Truy cập: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/

[4] B. Beauregard, "PID_v1: Arduino PID Library", GitHub Repository, 2012. Truy cập: https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library

[5] Avia Semiconductor, "HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales", Datasheet, Avia Semiconductor Co., Ltd., 2014.

[6] Microchip Technology Inc., "ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash", Datasheet, Microchip Technology Inc., 2018.

[7] K. J. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID Control*, ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

[8] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed., MIT Press, 2011.

[9] MDPI Robotics, "Self-Balancing Mobile Robot: Design, Implementation, and Performance Analysis", *MDPI Robotics*, vol. 6, no. 3, 2024.

[10] ResearchGate, "Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope", *ResearchGate Publication*, April 2018.

Phụ lục A.
Mã nguồn chương trình điều khiển

Dưới đây là mã nguồn hoàn chỉnh của chương trình điều khiển khung cân bằng trọng tâm:

```
/*
 * DU AN KHUNG CAN BANG - PHIEN BAN HOAN CHINH
 * Tinh nang:
 * 1. Non-blocking: Dong co chay muot, khong bi khung khi doc cam bien.
 * 2. PID Control: Dieu khien vi tri con truot theo sai so trong luong.
 * 3. Deadzone: Vung chet +/- 50g giup dong co nghi ngoi khi da can bang.
 * 4. Quantization: Lam tron gia tri doc ve boi so cua 10g de giam nhieu.
 */

#include <HX711_ADC.h>
#include <AccelStepper.h>
#include <PID_v1.h>

// === CAU HINH HE THONG ===
const int DOUT_PIN_LEFT = 4; const int SCK_PIN_LEFT = 5;
const int DOUT_PIN_PHAI = 6; const int SCK_PIN_PHAI = 7;
const int STEP_PIN = 8;
const int DIR_PIN = 9;
const int HOME_SWITCH_PIN = 10;

// --- THONG SO CO KHI ---
const int MICROSTEP = 16;
const int MOTOR_STEP = 200;
const int PITCH = 2;
const float STEPS_PER_MM = (float)(MOTOR_STEP * MICROSTEP) / PITCH;

// --- GIOI HAN HANH TRINH ---
const long MAX_POS_RIGHT = 110.0 * STEPS_PER_MM;
const long MAX_POS_LEFT = -120.0 * STEPS_PER_MM;

// --- TOC DO & GIA TOC ---
const float MAX_SPEED_PID = 8000.0;
const float MOTOR_ACCEL = 16000.0;
const float HOMING_SPEED_FAST = 8000.0;
const float HOMING_SPEED_SLOW = 4000.0;

// --- CAU HINH CHONG RUNG ---
const float MIN_SPEED_THRESHOLD = 2000.0;
const float HYSTERESIS_GAP = 10.0;
```

```
40
41 // --- CAU HINH PID ---
42 double Kp = 25.0;
43 double Ki = 0.05;
44 double Kd = 0;
45 double Setpoint = 0, Input, Output;
46 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
47
48 // --- HIEU CHUAN ---
49 float CALIB_LEFT = -53.13;
50 float CALIB_RIGHT = -55.36;
51 const float ACCEPTABLE_RANGE = 50.0;
52 const float STEP_SIZE = 10.0;
53
54 // === KHOI TAO DOI TUONG ===
55 HX711_ADC LoadCellLeft(DOUT_PIN_LEFT, SCK_PIN_LEFT);
56 HX711_ADC LoadCellRight(DOUT_PIN_PHAI, SCK_PIN_PHAI);
57 AccelStepper stepper(AccelStepper::DRIVER, STEP_PIN, DIR_PIN);
58
59 unsigned long t_pid = 0;
60 unsigned long t_print = 0;
61 float fL = 0, fR = 0, targetSpeed = 0, currentSpeed = 0;
62 boolean isBalancing = false;
63
64 void setup() {
65     Serial.begin(115200);
66     pinMode(HOME_SWITCH_PIN, INPUT_PULLUP);
67
68     // Khoi tao Loadcell
69     LoadCellLeft.begin(); LoadCellRight.begin();
70     LoadCellLeft.start(1000, true);
71     LoadCellRight.start(1000, true);
72     LoadCellLeft.setCalFactor(CALIB_LEFT);
73     LoadCellRight.setCalFactor(CALIB_RIGHT);
74
75     // Khoi tao PID
76     myPID.SetMode(AUTOMATIC);
77     myPID.SetOutputLimits(-MAX_SPEED_PID, MAX_SPEED_PID);
78     myPID.SetSampleTime(20);
79
80     // Khoi tao Dong co
81     stepper.setMaxSpeed(MAX_SPEED_PID);
82     stepper.setAcceleration(MOTOR_ACCEL);
83
84     runHomingSequence();
85 }
86
87 void loop() {
88     // Nhiem vu nen
89     LoadCellLeft.update();
```

```
90      LoadCellRight.update();
91      stepper.runSpeed();
92
93      // Nhiem vu dieu khien (20ms)
94      if (millis() > t_pid + 20) {
95          float rawL = LoadCellLeft.getData();
96          float rawR = LoadCellRight.getData();
97          fL = ceil(rawL / STEP_SIZE) * STEP_SIZE;
98          fR = ceil(rawR / STEP_SIZE) * STEP_SIZE;
99          Input = fR - fL;
100
101         float startThreshold = ACCEPTABLE_RANGE + HYSTERESIS_GAP;
102         float stopThreshold = ACCEPTABLE_RANGE - HYSTERESIS_GAP;
103
104         if (!isBalancing && abs(Input) > startThreshold) {
105             isBalancing = true;
106             myPID.SetMode(AUTOMATIC);
107         }
108         else if (isBalancing && abs(Input) < stopThreshold) {
109             isBalancing = false;
110             Output = 0;
111             myPID.SetMode(MANUAL);
112         }
113
114         if (isBalancing) {
115             myPID.Compute();
116             float rawSpeed = Output;
117             if (abs(rawSpeed) > 0 && abs(rawSpeed) < MIN_SPEED_THRESHOLD
    ) {
118                 targetSpeed = (rawSpeed > 0) ? MIN_SPEED_THRESHOLD : -
    MIN_SPEED_THRESHOLD;
119             } else {
120                 targetSpeed = rawSpeed;
121             }
122         } else {
123             targetSpeed = 0;
124         }
125
126         long currentPos = stepper.currentPosition();
127         if (currentPos <= MAX_POS_LEFT && targetSpeed < 0) targetSpeed =
     0;
128         if (currentPos >= MAX_POS_RIGHT && targetSpeed > 0) targetSpeed
    = 0;
129
130         stepper.setSpeed(targetSpeed);
131         currentSpeed = targetSpeed;
132         t_pid = millis();
133     }
134
135     // Nhiem vu giam sat (100ms)
```

```
    if (millis() > t_print + 100) {
        Serial.print("L: "); Serial.print(fL, 0);
        Serial.print(" | R: "); Serial.print(fR, 0);
        Serial.print(" | Lech: "); Serial.print(Input, 0);
        Serial.print(" | Spd: "); Serial.print(currentSpeed, 0);
        Serial.println(isBalancing ? " [RUN]" : " [OK]");
        t_print = millis();
    }
}

void runHomingSequence() {
    Serial.println("[HOMING] Bat dau ve Home...");
    stepper.setSpeed(HOMING_SPEED_FAST);
    while (digitalRead(HOME_SWITCH_PIN) == HIGH) { stepper.runSpeed(); }
    stepper.stop();
    stepper.setCurrentPosition(MAX_POS_RIGHT);

    stepper.moveTo(MAX_POS_RIGHT - (5.0 * STEPS_PER_MM));
    while (stepper.distanceToGo() != 0) { stepper.run(); }

    stepper.setSpeed(HOMING_SPEED_SLOW);
    while (digitalRead(HOME_SWITCH_PIN) == HIGH) { stepper.runSpeed(); }
    stepper.stop();
    stepper.setCurrentPosition(MAX_POS_RIGHT);

    stepper.moveTo(0);
    while (stepper.distanceToGo() != 0) { stepper.run(); }

    delay(5000); // Cho on dinh
    Serial.println("[HOMING] Hoan tat.");
}
```

Listing A.1: Chương trình điều khiển khung cân bằng trọng tâm