

Development of a Direct Adaptive PID Controller for a Quadruped Robot

Bui Manh Huy, Pham Tan Phat, Nguyen Tran Minh Nguyet, and Dang Xuan Ba*

HCMC University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam

* Corresponding author. Email: badx@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 26/1/2022
Revised: 25/5/2022
Accepted: 8/8/2022
Published: 30/8/2022

KEYWORDS

PID Controller;
Adaptive Controller;
Robotics;
Quadruped Robot;
Direct Controller.

ABSTRACT

Recently, research on quadruped robots has not gotten much attention in Vietnam due to complicated mechanical structures of the robots as well as unstructural working environments. Employment of simple control methods such as Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers for such the systems is feasible but the control performances have not been maintained in some cases that could make the robots danger. Obviously, the complicated controllers seem to be promising if the system is equipped with strong hardware. In this paper, we propose a new adaptive Jacobian-based PID controller for low-level control of a quadruped robot system that could possibly be deployed into low-cost hardware. The proposed controller is first built on a conventional PID structure. To suppress internal/external dynamics of the robot in various working conditions for a minimal control error, a nonlinear adaptive rule is then integrated to update the control gains. Effectiveness and feasibility of the designed controller are intensively verified in a simulation environment. The comparative results obtained confirm that the proposed controller is simple, adaptive, robust and efficient.

Xây Dựng Bộ Điều Khiển PID Thích Nghi Trực Tiếp Cho Robot Động Vật Bốn Chân

Bùi Mạnh Huy, Phạm Tấn Phát, Nguyễn Trần Minh Nguyệt, và Đặng Xuân Ba*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM, Việt Nam

* Tác giả liên hệ. Email: badx@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 26/1/2022
Ngày hoàn thiện: 25/5/2022
Ngày chấp nhận đăng: 8/8/2022
Ngày đăng: 30/8/2022

TỪ KHÓA

Bộ Điều Khiển PID;
Điều Khiển Thích Nghi;
Kỹ Thuật Robot;
Robot Động Vật;
Điều Khiển Trực Tiếp.

TÓM TẮT

Hiện nay, tình hình nghiên cứu các robot bốn chân ở Việt Nam ít được quan tâm bởi vì sự phức tạp về cấu trúc cơ khí của robot cũng như môi trường làm việc bất định. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một bộ điều khiển mới, bộ điều khiển PID thích nghi với phương pháp điều khiển trực tiếp điểm đầu cuối sử dụng cách tiếp cận dựa trên phương pháp Jacobian, để áp dụng cho mô hình robot động vật bốn chân có thiết kế phần cứng giá rẻ. Cốt lõi của bộ điều khiển PID thích nghi được xây dựng dựa trên bộ điều khiển PID truyền thống. Trong đó, các thông số bộ điều khiển sẽ cập nhật liên tục nhằm triệt tiêu các động lực học bên trong và nhiễu động từ bên ngoài trong các điều kiện làm việc khác nhau để giảm thiểu sai số điều khiển. Tính hiệu quả và khả thi của bộ điều khiển PID thích nghi được kiểm chứng thông qua mô phỏng thực tế. Các kết quả mô phỏng so sánh đạt được đã xác nhận rằng bộ điều khiển được đề xuất là bộ điều khiển đơn giản, bền vững, thích nghi và có hiệu suất điều khiển cao.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.71B.2022.1130>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Ngày nay, sự phát triển nhanh chóng của nền khoa học quốc tế cũng như nước nhà đã thúc đẩy và tạo tiền đề to lớn cho các ngành công nghiệp mới. Một trong số đó là công nghệ robot và trí thông minh nhân tạo, một hướng đi mũi nhọn nếu chúng ta tập trung khai thác có hiệu quả. Thông qua đó, để thúc đẩy nền khoa học công nghệ của nước nhà, những ứng dụng robot kết hợp với trí tuệ nhân tạo đã và đang bắt đầu khởi sắc mạnh mẽ, thu hút nhiều chuyên gia nghiên cứu trong và ngoài nước, trong đó có các sinh viên theo học tại các trường đại học, cao đẳng chuyên ngành liên quan đến lĩnh vực khoa học và công nghệ vẫn đang tích cực tham gia và đóng góp công sức của mình cho nền công nghiệp chung đó. Nó giống như một thước đo chuẩn mực cho sự đổi mới và phát triển về kỹ thuật của một vài quốc gia. Đáp ứng ngày càng nhiều nhu cầu khắc khe của người tiêu dùng.

Robot được nhắc đến ngày càng nhiều trên các trang tạp chí, báo chí và truyền thông trong nước và quốc tế. Việc hàng loạt robot ra đời với nhiều ứng dụng đa dạng trong hầu hết các lĩnh vực vừa là lợi thế, cũng vừa là thách thức cho các thế hệ trẻ tiếp theo. Mỗi một sản phẩm robot là sự kết hợp hài hòa giữa cấu trúc cơ khí linh hoạt và một bộ điều khiển tối ưu [1-8]. Kể từ khi robot bốn chân ra đời [6], ngành robot đã nhanh chóng phát triển lên một tầm cao mới. Nhiều kiểu Robot bốn chân đã ra đời như StarETH [7], MIT Cheetah 3 [1], ANYmal [4], ANYmal Wheeled-Legged Robots [5], etc. StarETH [7] và MIT Cheetah 3 [1] sử dụng cơ cấu truyền dây đai và cao su giảm chấn ở điểm đầu cuối chân giúp giảm thiểu phản lực từ mặt đất lên thân robot. Trong khi đó, ANYmal [4] có các khớp được trực tiếp truyền động từ motor, điều này sẽ giúp robot giảm trọng lượng cũng như mở rộng vùng làm việc của các khớp chân robot lên đến 360 độ, phạm vi hoạt động rộng hơn sẽ giúp robot di chuyển được trên nhiều dạng địa hình gồ ghề, bậc thang cao hơn. Một loại robot bốn chân kết hợp với bánh xe cũng được ra đời (ANYmal Wheeled-Legged Robots [5]) để đáp ứng nhu cầu cao hơn về tốc độ và sự linh hoạt trên các địa hình khác nhau [9], [10] nhưng nó cũng có một nhược điểm là thay đổi hướng di chuyển chưa được linh hoạt ở những góc cua gấp.

Trong các nhiệm vụ điều khiển thực tế, bộ điều khiển vi tích phân tỷ lệ (Proportional-Integral-Derivative (PID)) thường được ưu chuộng do tính đơn giản của nó [11], [12]. Nếu một bộ điều khiển tốt hơn được sử dụng thì hiệu suất điều khiển sẽ đạt được cao hơn [13], [15]. Rất nhiều nghiên cứu đã được đề xuất để cải thiện hiệu suất của bộ điều khiển PID bằng cách sử dụng các phương pháp tiếp cận thông minh như tối ưu hóa tiến hóa và logic mờ [14]. Các phương pháp này cho thấy kết quả điều khiển đầy hứa hẹn nhờ sử dụng cả phản thích nghi trực tuyến và ngoại tuyến [16]. Bộ điều khiển thích nghi trực tuyến có thể linh hoạt lựa chọn các thông số PID thích hợp dựa trên độ vọt lố, thời gian quá độ và sai số xác lập, trong khi bộ điều khiển thích nghi ngoại tuyến sẽ sử dụng các sai số điều khiển để điều chỉnh các thông số logic mờ nhằm tối ưu hóa lại hệ thống, cải thiện đáng kể chất lượng hệ thống. Tuy nhiên, phương pháp điều chỉnh của bộ điều khiển logic mờ chủ yếu dựa trên kinh nghiệm của người vận hành [17]. Một loạt các phương pháp điều khiển thông minh dựa trên các đặc tính sinh học của động vật, trong đó thuật toán di truyền được kết hợp với phương pháp tìm kiếm thức ăn của vi khuẩn để mô phỏng các quá trình tối ưu hóa tự nhiên như lai ghép, sinh sản, đột biến, chọn lọc tự nhiên, ... [18]. Sự phát triển này có thể mang lại giải pháp tối ưu nhất. Quá trình giải quyết yêu cầu một số lượng lớn mẫu thử và mất một thời gian dài để thu được kết quả như mong muốn đôi khi hạn chế khả năng áp dụng của hệ thống. Gần đây, việc điều chỉnh các thông số điều khiển PID bằng mạng nơron đã trở thành một phương pháp tiếp cận hiệu quả với nhiều đóng góp quan trọng [19], [20]. Bản thân PID thông thường là một bộ điều khiển bền vững [21]. Các bộ điều khiển tích hợp có khả năng học sẽ làm cho nó linh hoạt hơn với môi trường làm việc. Việc chưa xem xét một cách thấu đáo các quy tắc học trong trạng thái xác lập có thể làm cho hệ thống mất ổn định trong một thời gian dài sử dụng [3], [22], [23].

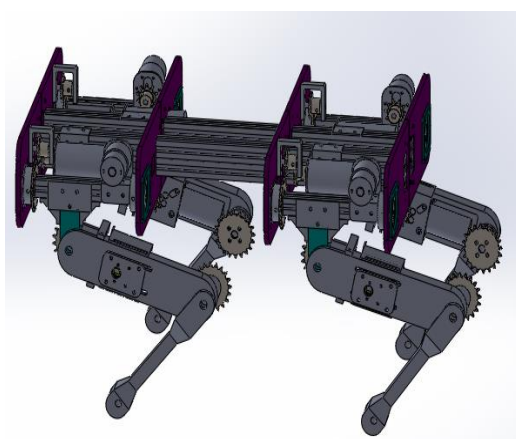
Trong bài báo này, một bộ điều khiển PID thích nghi trực tiếp cho bài toán điều khiển vị trí sẽ được nghiên cứu và ứng dụng cho mô hình robot động vật bốn chân. Phương pháp này có ưu điểm là không cần giải quyết bài toán động học nghịch của robot, người vận hành chỉ cần đưa ra giá trị vị trí mong muốn, bộ điều khiển sẽ tự tính toán và điều khiển robot về vị trí mong muốn đó [24-26]. Quá trình này sẽ giúp ích rất nhiều vì trong thực tế có khá nhiều robot với cấu trúc phần cứng khá phức tạp càng làm

cho việc tính toán động học nghịch trở nên khó khăn. Robot càng có nhiều bậc tự do thì quá trình tính toán càng khó, đòi hỏi nhiều thời gian và công sức hơn.

Bố cục của bài báo được sắp xếp như sau: *Phần 1* trình bày tổng quan đề tài và các đóng góp của bài báo; *Phần 2* trình bày cấu hình của robot động vật bốn chân và vấn đề điều khiển cần giải quyết; *Phần 3* trình bày chi tiết quá trình thiết kế bộ điều khiển và các phân tích lý thuyết liên quan; *Phần 4* thảo luận về các kết quả mô phỏng; và các kết luận được tóm tắt lại ở *Phần 5*.

2. Thiết kế robot động vật bốn chân

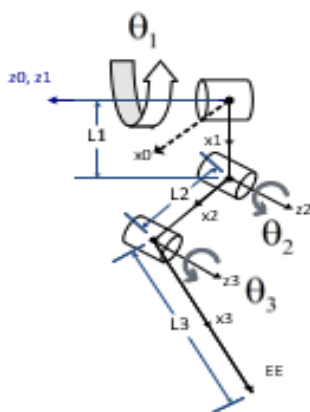
Robot động vật bốn chân được thiết kế với mười hai bậc tự do, trong đó mỗi chân có ba bậc tự do với cơ cấu truyền động bánh răng nhông xích với tỉ số truyền 1:2. Mô hình robot được thiết kế trong Solidworks và mô hình thực tế được thể hiện lần lượt qua Hình 1 và Hình 2.



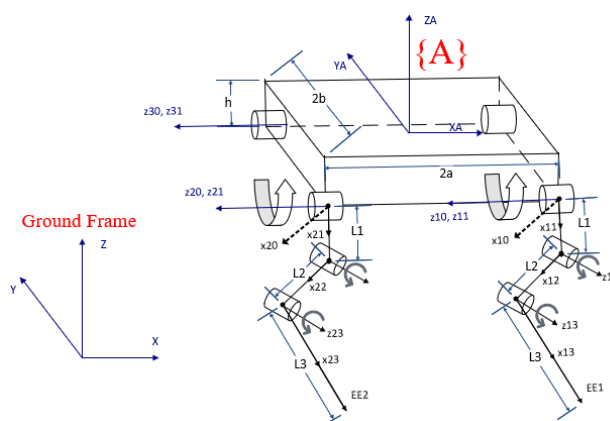
Hình 1. Mô hình Solidworks của Robot



Hình 2. Mô hình thực tế của Robot



Hình 3. Cấu hình mỗi chân của Robot



Hình 4. Cấu hình robot động vật bốn chân

Các hệ trục thích hợp được đặt cho mỗi chân và cho cả robot được phức tạp như trong Hình 3 và Hình 4. Để điều khiển robot này một cách dễ dàng và hiệu quả, một bộ điều khiển PID thông minh sẽ được thiết kế dựa trên phương pháp điều khiển vị trí trực tiếp kết hợp với một cơ chế thích nghi hệ số điều khiển mới. Việc hợp nhất này là một bước ngoặt lớn.

Thứ nhất, bộ điều khiển được đề xuất sẽ giúp người vận hành bỏ qua khâu tính toán động học nghịch của Robot. Đây là một công việc phức tạp và khó khăn trong việc điều khiển robot.

Thứ hai, bộ điều khiển thích nghi đem lại các kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển PID thông thường về độ vọt lố, thời gian quá độ, sai số xác lập. Bộ điều khiển thích nghi giúp robot hoạt động chính xác hơn, đồng thời tối ưu hóa không gian làm việc của robot.

3. Bộ điều khiển PID thích nghi trực tiếp (APID)

Cấu trúc của bộ điều khiển thích nghi dựa trên cấu trúc của bộ PID truyền thống [16] như trình bày ở phương trình (1).

$$\tau = J^+ \left(K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_{\sigma=0}^t e d\sigma \right) \quad (1)$$

trong đó, $e = x_d - x$ là vector sai số điều khiển, x là vector vị trí điểm đầu cuối thực tế của chân robot, x_d là vector vị trí đặt trước của chân robot, J^+ là nghịch đảo của ma trận Jacobian J , τ là vector mô men của các khớp. K_p, K_d, K_i là các hệ số điều khiển. Khi điều khiển thực tế, thì các hệ số điều khiển cần được chọn khác nhau đối với từng trường hợp làm việc cụ thể. Ý tưởng chính là bộ điều khiển sẽ thu thập sai số điều khiển hiện tại để thực hiện các thay đổi thích hợp trên hệ số điều khiển. Luật thích nghi này sẽ đẩy các sai số điều khiển hội tụ về các vùng sai số mong muốn. Để hỗ trợ tính năng này, cơ chế điều chỉnh tự động được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} \dot{K}_p = \beta_p (|e|^{f_e} \operatorname{sgn}(|e| - e_0)) \\ \dot{K}_i = \beta_i (e^{1/3} (\int e_1 dt) \operatorname{sgn}(|e| - e_0)) \\ \dot{K}_d = \beta_d (e^{5/3} \dot{e}_1 \operatorname{sgn}(|e| - e_0)) \\ f_e = 1 + \lambda \operatorname{sgn}(|e| - 1) \quad (0 < \lambda < 1) \end{cases} \quad (2)$$

trong đó, β_p, β_i và β_d là hệ số học dương, e là sai số thực tế, e_0 là sai số mong muốn, và λ là độ dốc của hàm f_e .

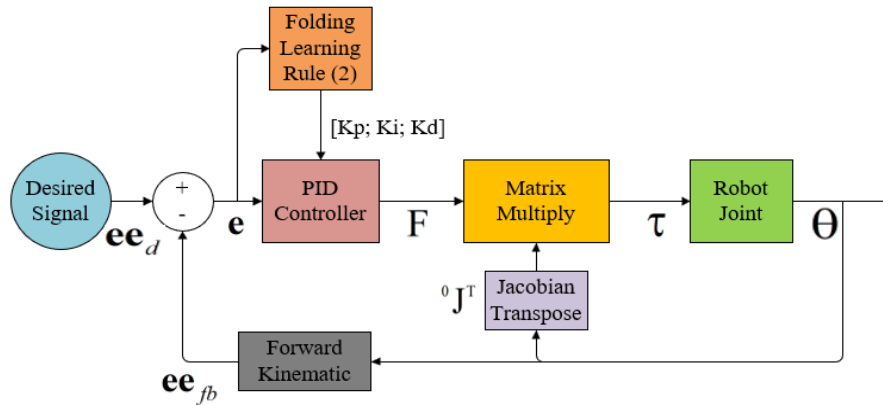
Trong hệ phương trình số (2), hệ số điều khiển K_p sẽ được tăng lên khi sai số điều khiển nằm ngoài khu vực sai số mong muốn. λ càng tiến gần về 1 thì giá trị của hàm f_e càng lớn, điều này có nghĩa là K_p sẽ thay đổi đột ngột và dốc. Bất cứ khi nào sai số tích lũy có cùng dấu với sai số hiện tại, nó có nghĩa là hệ thống cần nhiều năng lượng hơn để loại bỏ sai số điều khiển bù đắp, hệ số điều khiển K_i sẽ tăng khi sai số sai số thực tế e lớn hơn sai số mong muốn e_0 và ngược lại. Trong khi đó, hệ số điều khiển K_d sẽ được giảm khi sai số và đạo hàm theo thời gian của nó có dấu ngược nhau, cho thấy sự hội tụ của hệ thống vòng kín. Một điểm đáng quan tâm hơn nữa có thể được quan sát là tốc độ học tập của hệ số điều khiển là khác nhau tùy thuộc vào sai số hiện tại so với sai số mong muốn. Do đó, luật điều khiển này có thể giảm độ vọt lố của hệ thống.

Cách xác định giá trị ban đầu K_p, K_i, K_d của bộ điều khiển PID thông minh như sau. Nhóm sẽ chọn các trọng số K_p, K_i, K_d theo phương pháp PID truyền thống cho robot trước. Từ tập hợp các hệ số điều khiển đó sẽ cho độ vọt lố, thời gian quá độ, sai số xác lập tốt nhất, nhóm sẽ chọn các giá trị này và đặt chúng làm giá trị khởi tạo đầu tiên của K_p, K_i, K_d của bộ điều khiển PID thích nghi. Bắt đầu từ các giá trị ban đầu đó, robot bắt đầu hoạt động và tự cập nhật sau mỗi chu kỳ để sai số điều khiển là nhỏ nhất. Tùy vào hệ thống điều khiển mà ta chọn λ cho phù hợp. Nếu hệ thống cần đáp ứng vừa phải trong các điều kiện thay đổi tần số làm việc thì ta nên chọn λ nằm từ 0 tới 0.5. Nếu hệ thống cần đáp ứng nhanh trong các điều kiện thay đổi tần số làm việc thì ta nên chọn λ nằm từ 0.5 tới 1.

Ý tưởng thiết kế bộ điều khiển PID thích nghi được phác họa trong Hình 5.

4. Kết quả mô phỏng kiểm chứng

Phần này trình bày các kết quả thử nghiệm của robot động vật và bộ điều khiển thích nghi vừa đề xuất trong mô phỏng trên môi trường Matlab/Simulink. Nhóm sẽ thử nghiệm trên cả 2 bộ điều khiển PID thông thường và PID thích nghi để thấy rõ được sự nổi trội của nó [15]. Các thông số của bộ điều khiển PID thông thường và PID thích nghi đã được lựa chọn như trong **Bảng 1**.



Hình 5. Sơ đồ điều khiển của bộ điều khiển thích nghi PID

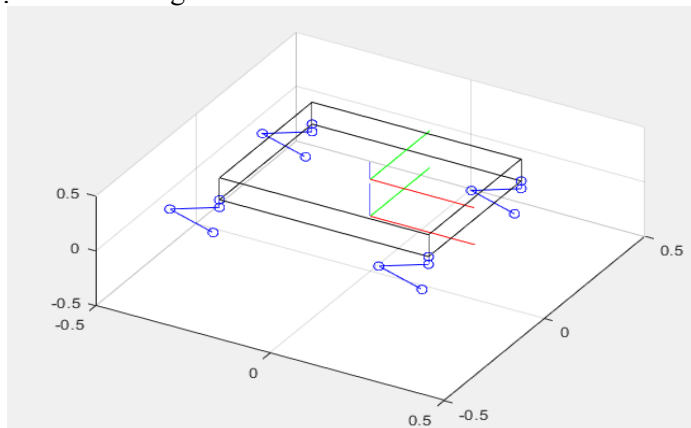
Bảng 1. Các thông số điều khiển và thông số thích nghi được sử dụng bởi các bộ điều khiển PID và APID trong các thí nghiệm mô phỏng.

PID			
	X	Y	Z
K_p	400	45	125
K_i	39.9	10.97	35.1
K_d	4	7	2

PID thích nghi			
	X	Y	Z
β_p	3000	3000	3000
β_i	60	60	60
β_d	300	300	300
λ	0.9	0.9	0.9

Nhóm thực hiện mô phỏng robot động vật bốn chân như sau: từ 0 giây tới 5 giây, robot sẽ đứng yên để ổn định trước. Tiếp đến, robot sẽ thực hiện động tác nhấc thân và hạ thân với tần số $f_1 = 0.5\text{hz}$ trong khoảng từ 5 giây tới 15 giây. Sau đó, robot sẽ tiếp tục nhấc thân và hạ thân với tần số cao hơn là $f_2 = 1\text{hz}$ từ 15 giây tới 25 giây. Và cuối cùng, robot sẽ trở lại động tác nhấc thân và hạ thân với tần số ban đầu là $f_1 = 0.5\text{hz}$ từ 25 giây đến 35 giây.

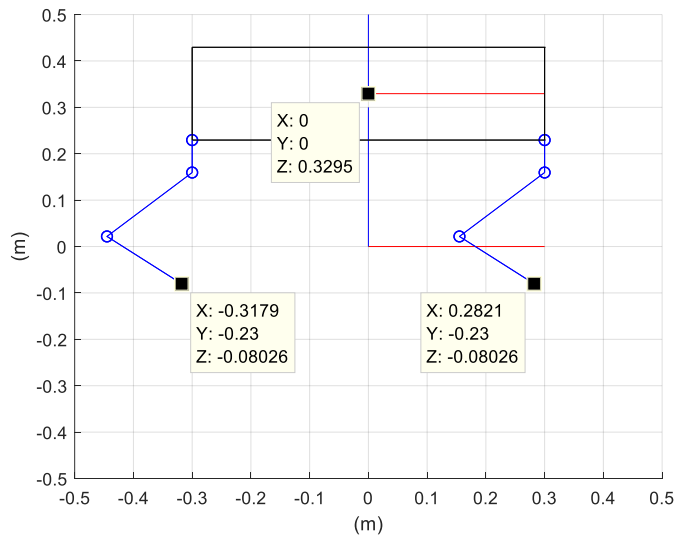
Tư thế của Robot động vật bốn chân trong thí nghiệm nhấc thân và hạ thân được thực hiện trên môi trường mô phỏng, được vẽ như trong Hình 6.



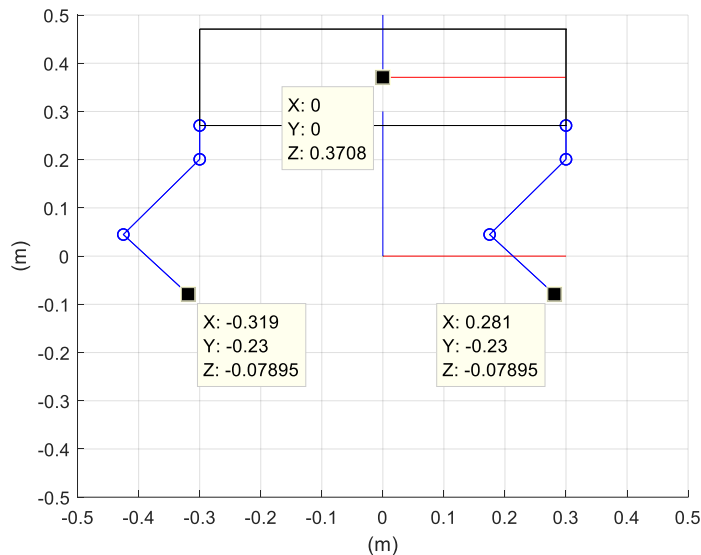
Hình 6. Robot động vật bốn chân thực hiện động tác nhấc thân và hạ thân

Quy trình Robot động vật bốn chân nhắc thân và hạ thân bao gồm hai giai đoạn. Giai đoạn 1 được thể hiện như ở Hình 7. Robot ở trạng thái thấp nhất có độ cao tính từ tâm thân robot so với điểm đầu cuối của chân là 409.76 mm. Sau đó, Robot sẽ từ từ nhắc thân lên với độ cao $\Delta h = 0.04m = 40mm$.

Giai đoạn 2 được thể hiện như ở Hình 8. Robot ở trạng thái cao nhất có độ cao tính từ tâm thân robot so với điểm đầu cuối của chân là 449.75 mm. Tiếp đến, Robot sẽ từ từ hạ thân xuống với độ cao $\Delta h = 0.04m = 40mm$. Sau đó, Robot lặp lại giai đoạn 1 rồi đến đến giai đoạn 2. Độ cao thu được từ mô phỏng là $\Delta h_{Sim} = 39.99mm$ so với mục tiêu đặt ra ban đầu là $\Delta h = 0.04m = 40mm$.



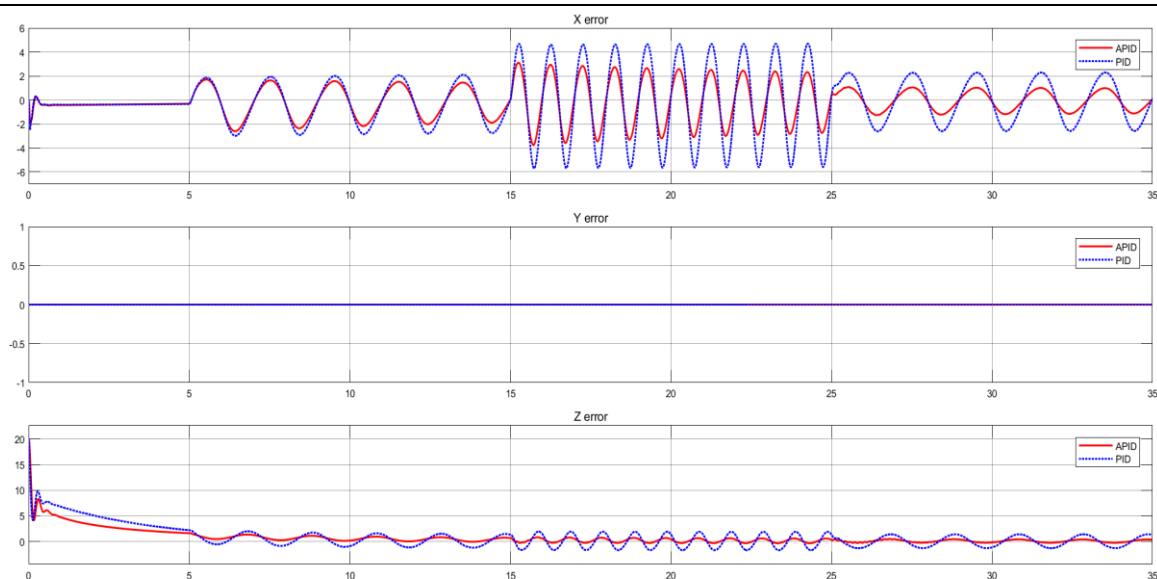
Hình 7. Robot ở trạng thái thấp nhất



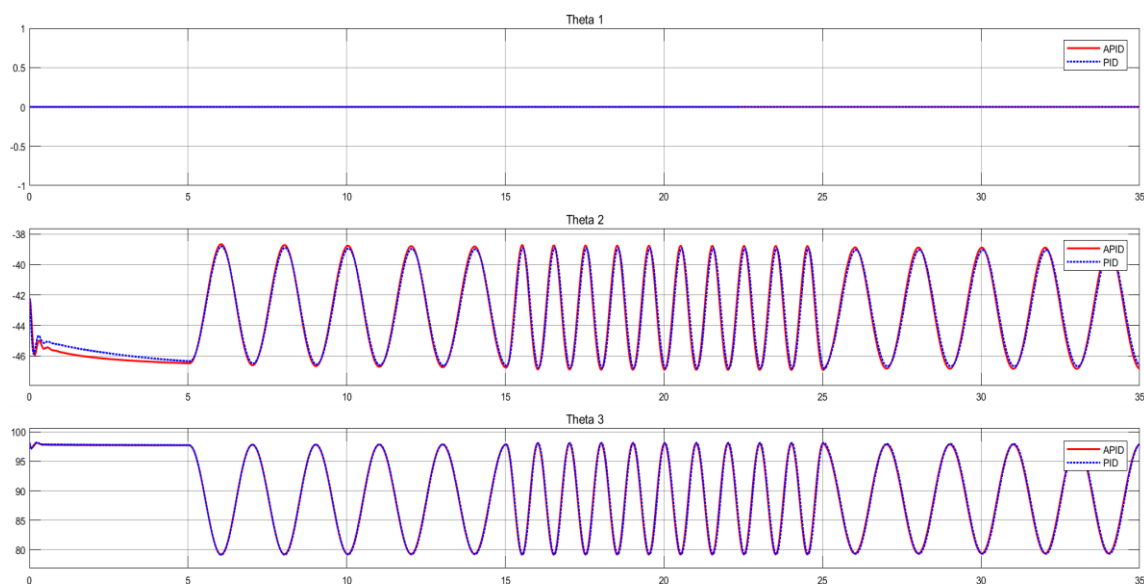
Hình 8. Robot ở trạng thái cao nhất

Để quan sát trực quan hơn, nhóm đã quay lại một video thực hiện mô phỏng trên Matlab và đã upload lên *Youtube* theo đường link sau: [Simulation Nhắc thân và hạ thân 0.5Hz to 1Hz - YouTube](#).

Kết quả sai số của điểm đầu cuối của hai bộ điều khiển được thể hiện thông qua Hình 9. Đơn vị ở Hình 9 là milimet. Dữ liệu điều khiển các khớp của chân Robot của hai bộ điều khiển được thể hiện thông qua Hình 10. Đơn vị ở Hình 10 là độ. Trong đó, đường màu đỏ nét liền là dữ liệu của bộ điều khiển thích nghi APID và đường màu xanh nét chấm là dữ liệu của bộ điều khiển PID truyền thống. Nhóm chọn sai số mong muốn $e_0 = 0.1$ mm cho bộ điều khiển APID.



Hình 9. Sai số theo phương X, Y, Z của điểm đầu cuối mỗi chân của hai bộ điều khiển (mm)



Hình 10. Dữ liệu góc khớp 1, 2 và 3 của chân Robot của hai bộ điều khiển (độ)

Từ Hình 9, ta thấy được khi robot hoạt động ở các tần số khác nhau ($f_1 = 0.5\text{hz}$ và $f_2 = 1\text{hz}$) thì với bộ điều khiển thích nghi APID sẽ luôn giảm thiểu sai số của hệ thống nhỏ nhất để thỏa mãn điều kiện sai số mong muốn $e_0 = 0.1 \text{ mm}$. Ở đây, nếu robot được hoạt động với khoảng thời gian lâu hơn ở các tần số f_1 và f_2 thì sai số của hệ thống sẽ tiến tới sai số mong muốn $e_0 = 0.1 \text{ mm}$. Điều này có thể thấy rõ trong Hình 9, khoảng thời gian từ 15 giây tới 25 giây khi đường sai số của điểm đầu cuối bộ điều khiển APID phương X và Z nhỏ dần rồi tiến tới sai số mong muốn e_0 . Trong khi đó, sai số của hệ thống của bộ điều khiển PID truyền thống sẽ không thể đảm bảo nhỏ nhất trong các điều kiện làm việc khác nhau của hệ thống, do bộ điều khiển PID không có luật học thay đổi các hệ số điều khiển K_p , K_i và K_d như bộ điều khiển thích nghi APID. Qua đây, nhóm đã cho thấy được thế mạnh của bộ điều khiển thích nghi APID so với bộ điều khiển PID truyền thống khi áp dụng cho các trường hợp điều khiển phức tạp.

5. Kết luận

Trong bài báo này, một bộ điều khiển thích nghi được thiết kế để tối ưu hóa hiệu suất điều khiển vị trí của robot động vật bốn chân. Bộ điều khiển được phát triển dựa trên cấu trúc PID thông thường. Các hệ số học phù hợp được thêm vào để cải thiện tính bền vững cho hệ thống, đồng thời đem lại độ chính xác cao trong quá trình làm việc phức tạp. Các thí nghiệm so sánh chuyên sâu đã được tiến hành trong môi trường mô phỏng để đánh giá hiệu quả làm việc của bộ điều khiển thích nghi APID này. Các kết quả đạt được cho thấy rằng bộ điều khiển được đề xuất có độ chính xác cao, linh hoạt, và bền vững hơn các bộ điều khiển PID truyền thống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2020.10.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. D. Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, "MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot", 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, October 1-5, 2018.
- [2] H. Yeom, D. X. Ba, and J. B. Bae, "Design Principles and Validation of a Human-sized Quadruped Robot Leg for High Energy Efficiency," J. K. Robotics Society, vol.13, no.2, pp.86-91, 2018.
- [3] D. X. Ba, H. Yeom, and J. B. Bae, "A Direct Robust Nonsingular Terminal Sliding Mode Controller based on an Adaptive Time-delay Estimator for Servomotor Rigid Robots," *Mechatronics*, May 2019.
- [4] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M. Bloesch, R. Diethelm, S. Bachmann, A. Melzer, and M. Hoepflinger, "ANYmal - A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot", 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, 2016, Daejeon, Korea.
- [5] M. Bjelonic, P. K. Sankar, C. D. Bellicoso, H. Vallery and M. Hutter, "Rolling in the Deep – Hybrid Locomotion for Wheeled-Legged Robots using Online Trajectory Optimization", *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*, JANUARY, 2020.
- [6] S. Ruthishauser, Cheetah – compliant quadruped robot, Biologically Inspired Robotics Group, EPFL, 2008
- [7] M. Hutter, C. Gehring, M. Bloesch, and all, StarLETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion, 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2012
- [8] Rémy Siegfried, Effect of Leg Design on Locomotion Stability for Quadruped Robot, WS 2014-2015, STI-SMT, Semester Project, 05.06.2015
- [9] Static Balancing of Wheeled-legged Hexapod Robots, CICATA Instituto Politecnico Nacional – Unidad Queretaro 76090, Mexico, IRCCS Neuromed, 86077 Pozzilli, Italy DIMEG, University of Calabria, 87036 Cosenza, Italy 7, April, 2020
- [10] K. Hashimoto, et al., "Realization by biped leg-wheeled robot of biped walking and wheel-driven locomotion," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005.
- [11] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, F. D. Carlo, P. W. Wensing, and S. Kim, "MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot," 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018.
- [12] P. M. Wensing, A. Wang, S. Seok, A. Otten, J. Lang, and S. Kim, "Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 3, pp. 509-522, 2017.
- [13] H. W. Park, S. Park, and S. Kim, "Variable-speed quadrupedal bounding using impulse planning: Untethered high-speed 3D Running of MIT Cheetah 2," in 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, USA, 2015.
- [14] K. Astrom and K. Hagglund, *PID Controllers: theory, design and tuning*. USA: ISA Press, 1995.
- [15] D. X. Ba and J. B. Bae, "A Nonlinear Sliding Mode Controller of Serial Robot Manipulators With Two-Level Gain-Learning Ability," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 189224 - 189235, 2020.
- [16] G. Z. Tan, Q. D. Zeng, and W. B. Li, "Intelligent PID controller based on ant system algorithm and fuzzy inference and its application to bionic artificial leg," *Journal of Central South University of Technology*, vol. 11, pp. 316-322, 2004.
- [17] C. F. Juang and Y. C. Chang, "Evolutionary-Group-Based Particle-Swarm-Optimized Fuzzy Controller With Application to Mobile-Robot Navigation in Unknown Environments," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 19, no. 02, pp. 379-392, 2011.
- [18] M. Cuciates, D. L. Moreno, A. Bugarin, and S. Barro, "Design of a fuzzy controller in mobile robotics using genetic algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 7, no. 2, pp. 540-546, 2007.
- [19] D. H. Kim and J. H. Cho, "A Biological Inspired Intelligent PID Controller Tuning for AVR Systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 5, pp. 624 - 636, 2006.
- [20] M. J. Neath, A. K. Swain, U. K. Madawala, and D. J. Thrimawithana, "An Optimal PID Controller for a Bidirectional Inductive Power Transfer System Using Multiobjective Genetic Algorithm," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 1523-1531, 2014.
- [21] T. D. C. Thanh and K. K. Ahn, "Nonlinear PID control to improve the control performance of 2 axes pneumatic artificial muscle manipulator using neural network," *Mechatronics*, 2006.

- [22] J. Ye, "Adaptive control of nonlinear PID-based analog neural networks for a nonholonomic mobile robot," *Neurocomputing*, 2008.
- [23] P. Rocco, "Stability of PID control for industrial robot arms," *IEEE Trans. Robot. Automation*, vol. 12, no. 4, pp. 606-614, 1996.
- [24] D. X. Ba and J. B. Bae, "A precise neural-disturbance learning control of constrained robotic manipulators," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50381-50390, 2021.
- [25] D. X. Ba, M.S. Tran, V. P. vu, V. D. Tran, M. D. Tran, N. T. Tai, and C. D. Truong, "A neural-network-based nonlinear controller for robot manipulators with gain-learning ability and output constraints," *In 2021 International Symp. Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, pp. 149-153, 2021.



Bui Manh Huy received the B.S degree from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2022.

He is also a member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include intelligent control, robotics control and their applications.



Pham Tan Phat received the B.S degree from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2022.

He is also a member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include design robot, intelligent control, robotics control and their applications.



Nguyen Tran Minh Nguyet received the B.S and Master of Science in Automation from the Faculty of Electrical Electronic Engineering, HCMC University of Technology and Education (HCMUTE), Viet Nam, in 2004 and 2009, respectively. Currently, she is a lecturer at the Faculty of High Quality Training and the Department of Automatic Control, Ho Chi Minh City University of Technology and Education.

She is also a member of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. Her research interests include machine learning, design intelligent controller for automatic control systems, Intelligent Control and Robotics.



Dang Xuan Ba received the B.S and M.S. degrees from the Ho Chi Minh City University of Technology (BKU), Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2008 and 2012, and the Ph.D. degree in the School of Mechanical Engineering, University of Ulsan (UoU), Ulsan, Korea, in 2016, respectively.

He is currently a lecturer with the Department of Automatic Control, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam. He is also the manager of the Dynamics and Robotic Control (DRC) Laboratory. His research interests include intelligent control, nonlinear control, modern control theories and their applications.