

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC CHUYỂN ĐỘNG TAY MÁY ROBOT THU HOẠCH DỨA TỰ ĐỘNG TRÊN CÁNH ĐỒNG

Bùi Lê Cường Quốc^{1*}, Hoàng Sơn²

¹Trường Cao đẳng nghề Bình Thuận

²Trường Đại học Lâm nghiệp

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.2022.3.124-134>

TÓM TẮT

Tay máy tự động thu hoạch dứa là một tay máy robot được gắn trên khung xe của liên hợp máy thu hoạch hoạt động trong môi trường nông nghiệp, tay máy có 3 bậc tự do (3DOF-Degrees of Freedom), được thiết kế để chuyển động theo ba trục tọa độ X, Y, Z. Bài viết này giới thiệu động lực học chuyển động tay máy có xét tới các yếu tố tác động từ môi trường làm việc và thuật toán điều khiển chuyển động tay máy Robot thu hoạch dứa. Nội dung giới thiệu thuật toán điều khiển PD kết hợp với ước tính nhiễu môi trường để đưa vào thành phần bù nhiễu khi liên hợp máy hoạt động trên cánh đồng thực tế. Tính ổn định trong quá trình làm việc khi sử dụng thuật toán điều khiển được chứng minh thông qua tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Từ kết quả thử nghiệm thu hoạch trên cánh đồng dứa thuộc xã Mỹ Phước, huyện Tân Phước, tỉnh Tiền Giang cho thấy: tay máy đã di chuyển tới vị trí trái dứa cần cắt đạt 95% trong 36 chu kỳ hoạt động. Điều đó chứng minh độ tin cậy và chính xác của thuật toán điều khiển.

Từ khóa: Động lực học chuyển động, liên hợp máy thu hoạch, tay máy tự động (robot), thuật toán điều khiển PD.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cơ giới hóa trong các hệ thống thu hoạch nông sản: lúa, mía, rau, củ, quả... đã được nghiên cứu nhiều trên thế giới, các hệ thống này thường thu hoạch các sản phẩm nông nghiệp cho phép thu hoạch đồng loạt. Tuy nhiên, với một số loại trái cây nói chung và dứa nói riêng có tính chất chín không đều, việc thu hoạch đồng loạt không còn phù hợp vì nhiều trái chưa chín sẽ không đảm bảo được chất lượng hoa quả khi cung cấp cho thị trường.

Để thu hoạch được dứa, một loại trái cây có yêu cầu thu hoạch tuyển chọn do thời điểm chín là không đồng đều (chỉ thu hoạch những trái đã đủ chín, trái xanh chưa thu hoạch) thì hệ thống cơ giới hóa cần phải nâng lên mức tự động hóa cần thiết. Tự động hóa và nông nghiệp thông minh là xu hướng tất yếu của sự phát triển nông nghiệp. Việc thu hoạch chọn lọc, yêu cầu sự tích hợp giữa công nghệ tay máy robot và thị giác máy trong hệ thống. Để biết trái dứa nào cần thu hoạch, hệ thống máy cần được trang bị camera, có khả năng phát hiện, nhận biết đúng trái dứa cần thu hoạch, xác định vị trí (tọa độ) trái dứa đó; tiếp theo tay máy được điều khiển di chuyển tới tọa độ đã xác định của trái dứa, tiến hành thao tác cắt và di chuyển trái dứa đã cắt tới vị trí thùng chứa rồi đặt trái dứa vào thùng trang bị

*Corresponding author: blcquoc@dnbt.edu.vn

trên liên hợp máy.

Máy thu hoạch tự động đầu tiên được phát triển bởi (Schretz, 1968). Từ sự khởi đầu đó, những năm gần đây có các nghiên cứu về các robot thu hoạch tự động gồm: Robot thu hoạch trái chanh (Mehta, 2014), Robot thu hoạch táo (Silwal, 2017), Robot thu hoạch anh đào (Tanigaki, 2008), Robot thu hoạch dâu (Kondo N., 2000). Mặc dù có rất nhiều các công bố trong hàng chục năm qua về các hệ thống robot hoặc liên hợp máy thu hoạch tự động; tuy nhiên sự tác động lớn ngoài mong muốn đến từ môi trường làm việc (nhiều môi trường) là rào cản kỹ thuật dẫn tới ít có các robot thu hoạch trái cây được ứng dụng.

Đối với tay máy Robot thu hoạch dứa khi làm việc tại môi trường đồng ruộng sẽ bị tác động không mong muốn từ nhiều môi trường như: mấp mô bề mặt ruộng gây nên sự biến đổi lực trọng trường; sự mấp mô này cũng gây nên sự không cứng vững của khung công tác cũng dẫn đến sự rung lắc khi hai cánh tay cùng làm việc một lúc, dẫn tới tác động không mong muốn trong chuyển động; tác động của gió cũng là nguyên nhân dẫn đến lực cản chuyển động... Các tác động này thường biến đổi ngẫu nhiên, không xác định được chính xác nhiều để có phương án bù nhiễu khi tay máy chuyển động. Các hệ thống robot được nghiên cứu trong (Bin Li, 2010; Bin Li, 2013) chủ yếu được nghiên

cứu và phát triển trong môi trường phòng thí nghiệm, do vậy các yếu tố nhiễu môi trường chưa được đề cập tới, vì vậy các kết quả nghiên cứu này vẫn chưa đủ điều kiện để đưa ra hoạt động trong thực tế.

Để hoàn thiện tay máy tự động thu hoạch dứa và đưa liên hợp máy vào hoạt động thực tế, bài báo này giới thiệu động lực học tay máy Robot thu hoạch dứa tự động với thuật toán điều khiển PD, các nhiễu môi trường và phương pháp ước tính nhiễu môi trường, thực nghiệm liên hợp máy trên đồng để lấy số liệu mô phỏng và chứng minh độ tin cậy của mô hình nghiên cứu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nguyên cứu lý thuyết

Từ cấu tạo và nguyên lý hoạt động của liên hợp máy và hệ thống tay máy tự động thu hoạch trái dứa, nghiên cứu sử dụng cơ học lý thuyết và lý thuyết động lực học tay máy để xây dựng mô hình, thiết lập phương trình động lực học cơ cấu. Sử dụng camera xử lý ảnh để nhận diện và xác định tọa độ trái dứa cần thu hoạch. Sử dụng lý thuyết điều khiển tự động để xây dựng hệ thống điều khiển và truyền động cho tay máy thu hoạch dựa trên thuật toán PD kết hợp với ước tính nhiễu môi trường, sử dụng phần mềm Matlab – Simulink để khảo sát các phương trình vi phân động lực học của tay máy trong quá trình chuyển động thu hoạch dứa, ảnh hưởng tới các thông số thời gian, vị trí, điểm

đặt quả dứa, vận tốc.

2.2. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

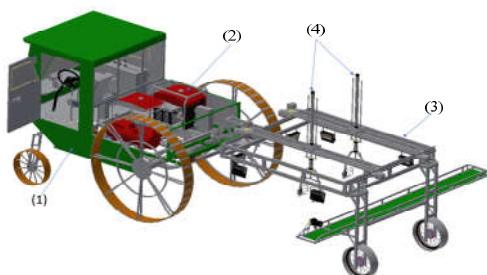
Sử dụng các thiết bị đo và các phần mềm xử lý số liệu hiện đại để xác định các thông số phục vụ cho khảo sát bài toán lý thuyết như vị trí tay máy theo trục X, Y. Nghiên cứu sử dụng tiêu chuẩn Cochran và tiêu chuẩn Fisher để kiểm tra tính đồng nhất của phương sai mẫu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cấu tạo hệ thống liên hợp máy thu hoạch dứa

Hình 1 mô tả cấu tạo chung của liên hợp máy bao gồm: máy động lực (1) có chứa tủ điều khiển trong cabin, thùng xe (2) phía sau chứa máy phát điện và bình nhiên liệu, khung công tác (3) được gắn 02 cánh tay máy Robot dùng để thu hoạch trái dứa.

Hình 2 mô tả cấu tạo của bộ phận làm việc gồm: 02 tay máy robot (3, 4) được di chuyển trên khung công tác (1); bộ phận thị giác là camera (2) được gắn trên khung công tác (1) có chức năng nhận diện trái dứa cần cắt, xác định tọa độ trái dứa làm đầu vào cho bài toán điều khiển chuyển động 02 cánh tay robot; trên mỗi cánh tay được thiết kế bàn tay có dao để cắt rời cuống trái dứa ra khỏi thân cây, đồng thời bàn tay có bộ phận bao để giữ và đưa trái dứa được cắt thả tại vị trí băng tải để vận chuyển tới thùng chứa.



Hình 1. Cấu tạo chung của liên hợp máy thu hoạch dứa tự động
1- Thùng xe 2- Máy phát điện 3- Khung công tác 4- Hai tay máy hái dứa



Hình 2. Cấu tạo tay máy Robot thu hoạch dứa
1-Khung công tác; 2-Camera để nhận dạng trái dứa; 3, 4- Hai tay máy hái dứa;
5-Bàn tay máy gắn dao cắt dứa.

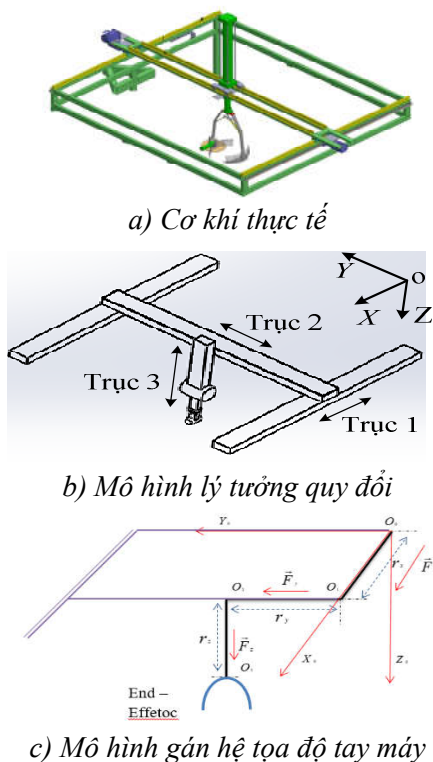
3.2. Động lực học tay máy Robot thu hoạch dứa

3.2.1. Mô hình động lực học tay máy trong trường hợp lý tưởng

Với mô hình động lực học lý tưởng, nghiên cứu bỏ qua ảnh hưởng của nhiều môi trường: mấp mô bề mặt ruộng làm ảnh hưởng tới tác dụng của trọng lực, mấp mô bề mặt ruộng làm ảnh hưởng tới rung lắc khung công tác, tác động

của gió và các tác động khác... Do vậy, mô hình quy đổi cho việc tính toán động lực học được thể hiện trên hình 3.

Để xây dựng được mô hình động lực học cho tay máy, nghiên cứu sử dụng hệ tọa độ gốc cho tay máy $\{O_0X_0Y_0Z_0\}$ được xác định từ mô hình động học (hình 3-c).



Hình 3. Mô hình quy đổi cho việc tính toán động học, động lực học

Tại vị trí P bất kỳ trong hệ $\{O_0X_0Y_0Z_0\}$ ta có vector

$$\vec{P}_{O_0} = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T \quad (1)$$

và biến khớp

$$q = [q_i]_{i=1,2,3}^T = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T \quad (2)$$

Gọi khối lượng của các khớp hay khối lượng các khớp của cánh tay máy là: m_i ($i=1 \div 3$), vì tay máy có 3 khớp tương ứng với 3 bậc tự do.

Gọi lực tác động lên các khớp để di chuyển cánh tay theo 3 trục OX_0, OY_0, OZ_0 trong trường hợp lý tưởng là:

$$\vec{F}_0 = [F_{x_0} \quad F_{y_0} \quad F_{z_0}]^T \quad (3)$$

Sử dụng phương pháp Euler-Lagrange II, phương trình động lực học tay máy được xây dựng tại hệ phương trình (4):

$$\begin{cases} F_{x_0} = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{r}_x \\ F_{y_0} = (m_2 + m_3)\ddot{r}_y \\ F_{z_0} = m_3\ddot{r}_z + m_3g \end{cases} \quad (4)$$

Hệ phương trình động lực học (4) cũng có thể viết dưới dạng ma trận (5) như sau:

$$F_0 = H_0\ddot{q} + G_0 \quad (5)$$

với $F_0 = [F_{x_0} \quad F_{y_0} \quad F_{z_0}]^T$ là ma trận biểu diễn lực lên 3 khớp để di chuyển bàn tay máy (điểm tác động cuối, chứa dao cắt) chuyển động theo 3 trục tọa độ; $G_0 = [0 \quad 0 \quad m_3g]^T$ là ma trận biểu thị tác động của trọng lực lên các thanh của tay máy trong trường hợp lý tưởng; $\ddot{q} = [\ddot{r}_x \quad \ddot{r}_y \quad \ddot{r}_z]^T$ là ma trận biến khớp;

$$H_0 = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

là ma trận đặc trưng cho quán tính của các khớp tay máy trong trường hợp lý tưởng.

Do khớp 1 và khớp 2 cánh tay được truyền động thông qua động cơ điện, khớp 3 được truyền động qua hệ xilanh khí nén, do vậy mô hình động lực học quy đổi ra mô men đầu trục động cơ được viết như sau:

$$M_{d_0} = H_{d_0} \ddot{q} + G_{d_0} \quad (6)$$

với:

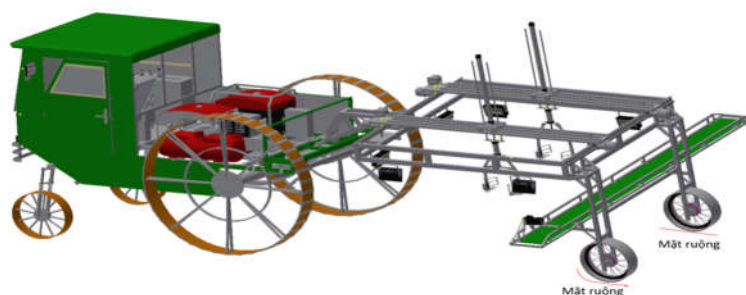
$M_{d_0} = [M_{d_{01}} \ M_{d_{02}} \ F_{z_0}]^T$ là thành phần chứa mômen đầu trục hai động cơ và của xilanh khí nén. Tức momen 2 động cơ và lực xilanh cần sinh ra để tạo chuyển động cho tay máy;

$$H_{d_0} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ k_x & & \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ & k_y & \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

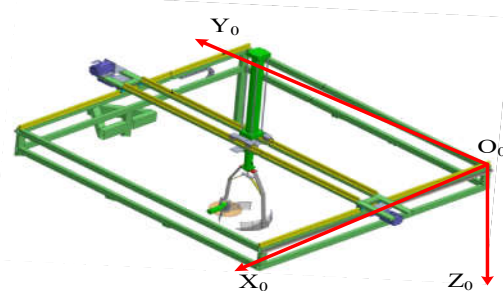
là ma trận đặc trưng cho quán tính được quy đổi; $G_{d_0} = [0 \ 0 \ -m_3 g]^T$ là ma trận biểu thị thành phần trọng lực được quy đổi; k_x, k_y là các hệ số quy đổi từ lực di chuyển khớp sang momen đầu các trục động cơ, các hệ số này được xác định thông qua tỷ số chuyển của các bộ phận cơ khí có chức năng chuyển từ chuyển động quay của động cơ thành chuyển động tịnh tiến của hai khớp 1,2.

3.2.2. Mô hình động lực học tay máy trong khi làm việc trên cánh đồng dứa

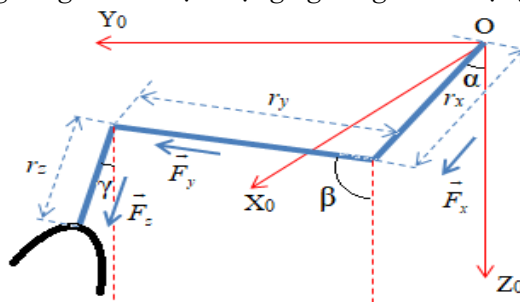
Khi liên hợp máy làm việc trên ruộng dứa, do bề mặt mấp mô tạo ra độ nghiêng của khung (hình 4-a), chịu tác động do rung lắc, chịu tác động gió... sau đây gọi là nhiễu môi trường tác động lên mô hình động lực học. Do vậy, mô hình quy đổi để xác định phương trình động lực học trong trường hợp này được thể hiện trên hình 4-b,c.



a) Mô tả trường hợp khung công tác bị nghiêng khi bề mặt ruộng không bằng phẳng



b) Khung công tác có hiện tượng nghiêng so với hệ tọa độ gốc



c) Mô hình tính toán động lực học tổng quát

Hình 4. Mô hình quy đổi khi xét đến tác động của nhiễu trọng lực trong trường hợp khung công tác nghiêng do mấp mô mặt ruộng

Tương tự như trường hợp lý tưởng, gọi lực tác động lên các khớp để di chuyển cánh tay theo 3 trục OX, OY, OZ là:

$$\vec{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T \quad (7)$$

Áp dụng phương pháp Euler-Lagrange II có phương trình động lực học khi làm việc trên đồng ruộng dưới tác động của nhiễu môi trường là:

$$\begin{cases} F_x = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{x} - (m_1 + m_2 + m_3)g \cdot \cos \alpha + d_x(t) \\ F_y = (m_2 + m_3)\ddot{y} - (m_2 + m_3)g \cdot \cos \beta + d_y(t) \\ F_z = m_3\ddot{z} - m_3g \cdot \cos \gamma + d_z(t) \end{cases} \quad (8)$$

với α, β, γ là góc nghiêng của khung so với khung tạo độ chuẩn ban đầu $\{O_0X_0Y_0Z_0\}$; $d_x(t), d_y(t), d_z(t)$ là các lực ngẫu nhiên tác động lên chuyển động của tay máy đại diện cho tác động của rung lắc khi hai tay máy hoạt động cùng lúc trong khi khung công tác không ổn định, và tác động của gió cùng với các yếu tố từ môi trường thực.

Hệ phương trình (8) cũng có thể được viết dưới dạng ma trận (9).

$$F = H\ddot{q} + G + D(t) \quad (9)$$

với:

$$H = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

là ma trận đặc trưng cho quán tính khi xét đến ảnh hưởng của nhiễu môi trường;

$$\ddot{q} = [\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T \text{ là ma trận biến khớp.}$$

$$G = [-(m_1 + m_2 + m_3)g \cos \alpha \quad -(m_1 + m_2)g \cos \beta \quad -m_3g \cos \gamma]^T$$

là ma trận thành phần trọng lực khi xét tới ảnh hưởng của nhiễu do môi trường làm việc.

$D(t) = [d_x(t) \ d_y(t) \ d_z(t)]^T$ là ma trận đặc trưng cho ảnh hưởng của rung lắc, ma sát (là thành phần ngẫu nhiên).

Tương tự quy đổi ra momen đầu trục động cơ khớp 1 và khớp 2 ta được:

$$M_d = H_d\ddot{q} + G_d + D_d(t) \quad (10)$$

với: $M_d = [M_{dx} \ M_{dy} \ F_z]^T$ là ma trận biểu diễn momen trục động cơ khớp 1, momen trục động cơ khớp 2 cần phải sinh ra để tạo ra chuyển động cho hai khớp và lực do trục của xilanh cần phải

sinh ra khi xét tới ảnh hưởng của nhiễu môi trường làm việc;

$$H_{d_0} = \begin{bmatrix} \frac{m_1 + m_2 + m_3}{k_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_2 + m_3}{k_y} & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

là ma trận đặc trưng cho quán tính của các khớp tay máy đã quy về trục động cơ.

Nhận xét 1: Các góc nghiêng α, β, γ cùng với $D(t)$ là các biến thay đổi ngẫu nhiên, do phụ thuộc và điều kiện làm việc thực tế, việc xác định các biến này là khó và không chính xác. Do vậy, việc xác định chính xác mô hình động lực học trong trường hợp thực tế là khó và không chính xác vì mô hình (10) là mô hình bất định, việc này gây nên khó khăn trong quá trình điều khiển chuyển động cánh tay Robot thu hoạch dứa.

3.2.3. Quy đổi mô hình động lực học tay máy trong khi làm việc trên cánh đồng dứa về mô hình lý tưởng

Từ việc khó và xác định không chính xác mô hình động lực học tay máy Robot khi hoạt động trong thực tế, cần phải quy đổi mô hình thực tế về mô hình lý tưởng để làm cơ sở cho thiết kế bộ điều khiển chuyển động. Từ (10) và (6) chúng ta có thể quy đổi mô hình động lực học tay máy trong thực tế về dạng mô hình lý tưởng như sau:

$$M_d = M_{d_0} + w_d(t) = H_{d_0}\ddot{q} + G_{d_0} + w_d(t) \quad (11)$$

với:

$$w_d(t) = \Delta G_d + D_d(t) \quad (12)$$

là thành phần sai lệch giữa mô hình lý tưởng và mô hình thực tế; trong đó:

$$\Delta G_d = G_d - G_{d_0} = \begin{bmatrix} -\frac{(m_1 + m_2 + m_3)g \cos \alpha}{k_x} \\ -\frac{(m_1 + m_2)g \sin \beta}{k_y} \\ m_3g(1 - \cos \gamma) \end{bmatrix};$$

$$D_d(t) = \begin{bmatrix} \frac{d_x(t)}{k_x} \\ \frac{d_y(t)}{k_y} \\ d_z(t) \end{bmatrix}$$

Nhận xét 2: Từ các nghiên cứu (8, 9, 10) chúng ta có thể thấy thành phần sai lệch mô hình xuất phát từ trọng lực có đặc điểm:

$$\Delta G_d \leq a_0^g + a_1^g \|q\|; a_1^g > 0 \quad (13)$$

và

$$\|D_d(t)\| \leq a_0^d; a_0^d > 0 \quad (14)$$

do vậy

$$\|w_d(t)\| \leq b_0^w + b_1^w \|q\|; b_0^w > 0, b_1^w > 0 \quad (15)$$

Nếu đặt $\theta = \max(1, \|q\|)$ và $b = b_0^w + b_1^w \theta$ thì chúng ta có:

$$\|w_d(t)\| \leq b\theta \quad (16)$$

trong (16) thì $\theta = \max(1, \|q\|)$ là giá trị đã biết thông

qua biến khớp $q = [r_x \ r_y \ r_z]^T$. Do vậy thành phần sai lệch giữa hai mô hình luôn tồn tại giới hạn trên.

3.3. Đề xuất thuật toán điều khiển chuyển động tay máy robot thu hoạch dứa

3.3.1. Phân tích hoạt động và yêu cầu điều khiển chuyển động

Hoạt động của tay máy trong một chu kỳ hái một trái dứa được thực hiện qua ba bước gồm: bước 1 tay máy di chuyển từ gốc tạo độ $\{O_0X_0Y_0Z_0\}$ (hình 5-a) tới vị trí trái dứa cần cắt theo hai trục XY, kết thúc bước 1 khi bàn tay máy nằm đúng phía trên trái dứa (hình 5-b); bước 2 tay máy hạ bàn tay theo trục Z, đóng bàn tay để dao cắt cắt đứt cuống trái dứa và nhấc lên vị trí cũ theo trục Z (hình 5-c); bước 3 tay máy chuyển động về gốc tạo độ và mở bàn tay để trái dứa rơi vào băng tải vận chuyển (hình 5-d).



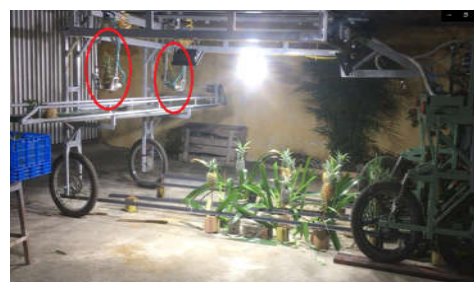
a) Vị trí xuất phát



b) Bước 1



c) Bước 2



d) Bước 3

Hình 5. Mô tả chu kỳ thu hoạch dứa

Chúng ta nhận thấy rằng bước 1 là bước chuyển động quan trọng nhất, nó ảnh hưởng tới độ chính xác của thao tác hái trái và chất lượng trái dứa cần được hái. Bước 2 có chức năng hạ xuống để cắt sau khi vị trí tay đã được xác định chính xác phía trên trái dứa do vậy hoàn toàn có thể điều khiển theo tín hiệu logic được lấy về từ cảm biến tiệm cận lắp tại lòng bàn tay máy. Bước 3 là chuyển động tương tự nhưng ngược

lại của bước 1. Do vậy, thuật toán điều khiển được tiến hành nghiên cứu để áp dụng cho bước 1 của chu kỳ hái trái dứa.

Để điều khiển chuyển động tay máy trong bước 1 chính xác, thuật toán điều khiển cần phải bù được thành phần nhiễu môi trường $w_d(t)$ xuất hiện trong mô hình động lực học. Do bước 1, tay máy di chuyển thông qua khớp 1 và khớp

2, vì vậy mô hình động lực học (11) được viết lại thành (17, 18) như sau:

$$M_d = M_{d_0} + w_d(t) = H_{d_0} \ddot{q} + G_{d_0} + w_d(t) \quad (17)$$

$$w_d(t) = \Delta G_d + D_d(t) \quad (18)$$

với: $H_{d_0} = \begin{bmatrix} \frac{m_1 + m_2 + m_3}{k_x} & 0 \\ 0 & \frac{m_2 + m_3}{k_y} \end{bmatrix}; G_{d_0} = 0;$

$$\Delta G_d = \begin{bmatrix} -\frac{(m_1 + m_2 + m_3)g \cos \alpha}{k_x} & -\frac{(m_1 + m_2)g \sin \beta}{k_y} \end{bmatrix}^T;$$

$$D_d(t) = \begin{bmatrix} \frac{d_x(t)}{k_x} & \frac{d_y(t)}{k_y} \end{bmatrix}^T; q = \begin{bmatrix} r_x & r_y \end{bmatrix}^T$$

3.3.2. Thiết kế thuật toán điều khiển PD kết hợp với ước tính nhiễu môi trường (PD + DE; Proportional Derivative + Disturbance Estimation)

Từ kết quả nghiên cứu mô hình động lực học tay máy Robot hoạt động trong thực tế và biến đổi nó về dạng mô hình lý tưởng. Để đáp ứng được yêu cầu điều khiển chuyển động trong bước 1, thuật toán điều khiển chuyển động được nghiên cứu đề xuất là PD+DE như sau:

$$M_d = K_p \varepsilon + K_D \dot{\varepsilon} + f_w(t) \quad (19)$$

Trong công thức trên, $f_w(t)$ là thành phần biến đổi theo thời gian có chức năng bù nhiễu được định nghĩa như sau:

$$f_w(t) = -\frac{(\hat{b}\theta)^2 \dot{q}}{\hat{b}\theta \|\dot{q}\| + \psi^2} \quad (20)$$

với \hat{b} là giá trị ước tính của b với luật thích nghi là:

$$\begin{cases} \dot{\hat{b}} = \gamma_1 \theta \|\dot{q}\| \\ \hat{b}(0) = 0 \\ \gamma_1 > 0 \end{cases} \quad (21)$$

và

$$\begin{cases} \dot{\psi} = -\gamma_2 \psi \\ \psi(0) = 0 \\ \gamma_2 > 0 \end{cases} \quad (22)$$

Chứng minh tính ổn định của thuật toán:

Chọn hàm năng lượng dương Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T H_{d_0} \dot{q} + \frac{1}{2} \varepsilon^T K_p \varepsilon + \frac{1}{2} \gamma_1^{-1} \hat{b}^2 + \frac{1}{2} \gamma_2^{-1} \psi^2 \geq 0 \quad (23)$$

với: $\forall q, \varepsilon, b, \psi$

$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{r}_x & \dot{r}_y \end{bmatrix}^T$ là tốc độ các khớp

$\varepsilon = q_d - q$ là sai số vị trí của cánh tay

$\tilde{b} = b - \hat{b}$ là sai số ước tính của b

Sau các phép biến đổi tương đương chứng minh được rằng:

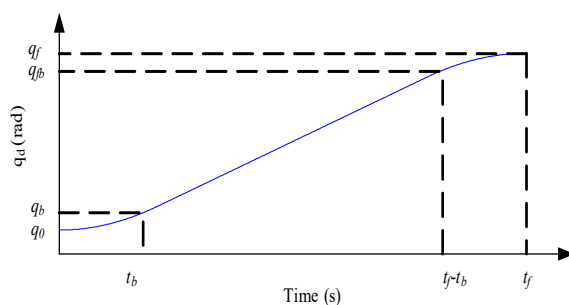
$$\dot{V} \leq -\dot{q}^T K_D \dot{q} - \frac{\psi^4}{\hat{b}\theta \|\dot{q}\| + \psi^2} \leq 0 \quad (24)$$

Theo định lý Lyapunov thì hệ thống ổn định. Từ (24) ta thấy, khi $t \rightarrow \infty$ thì $\lim_{t \rightarrow \infty} V \rightarrow 0$. Theo (23) thì đồng thời $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q} \rightarrow 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon \rightarrow 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{b} \rightarrow 0$, và $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi \rightarrow 0$. $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon \rightarrow 0$ có nghĩa là sai lệch vị trí bằng 0, hay tay máy sẽ di chuyển tới vị trí trái dấu mong muốn $q = \begin{bmatrix} r_x & r_y \end{bmatrix}^T$. $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{b} \rightarrow 0$ có nghĩa là sai lệch ước tính bằng 0 hay $\hat{b} \rightarrow b$, tức là chúng ta đã ước tính được giới hạn trên của nhiễu $w_d(t)$ mà không cần phải tiến hành đo đạc, đảm bảo tính khả thi trong triển khai thực tế.

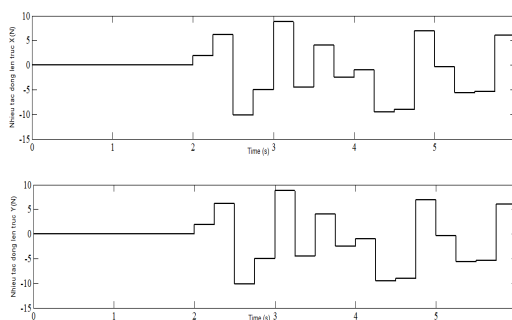
Mô phỏng kiểm chứng kết quả thuật toán điều khiển

Để đánh giá khả năng điều khiển chuyển động của thuật toán PD+DE đề xuất, nghiên cứu tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab với thông số sau:

Giá trị đặt đầu vào $q_d = \begin{bmatrix} X_d & Y_d \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 & 1,5 \end{bmatrix}^T$ (m) sự biến thiên của q_d theo quỹ đạo 2-1-2 trên hình 6 với $t_f = \begin{bmatrix} 4 & 4 \end{bmatrix}^T$ (s), $q_0 = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}^T$; khối lượng hai khớp được xác định từ hệ thống cơ khí $m_1 = 38$ (kg), $m_2 = 9,5$ (kg); $K_p = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$, $K_D = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$; và nhiễu ngẫu nhiên tác động lên tay máy tại 2(s) tới 6(s) như hình 7.



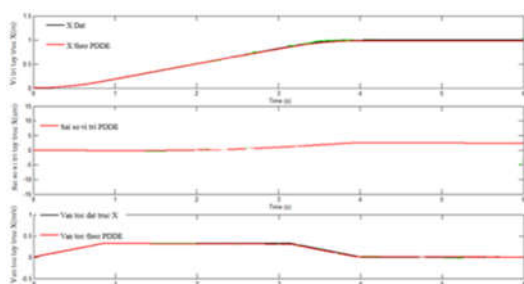
Hình 6. Quỹ đạo đặt đầu vào chuyển động khớp 1, khớp 2



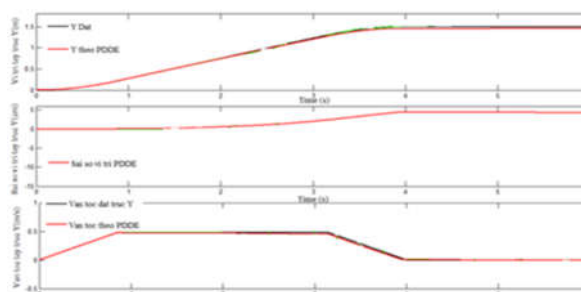
Hình 7. Tín hiệu ngẫu nhiên đặc trưng cho nhiễu môi trường đưa vào mô hình

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 8 và hình 9, thuật toán điều khiển chuyển động đảm bảo hai khớp tay máy bám sát với quỹ đạo đặt, đặc biệt khi có nhiễu tác động từ thời điểm giây thứ 4 thì thuật toán điều khiển vẫn đảm bảo

quỹ đạo di chuyển của hai khớp ổn định với sai số $\varepsilon = q_d - q = [X_d - X \quad Y_d - Y]^T = [2,5 \quad 4]^T (cm)$, sai số này vẫn đảm bảo bàn tay máy khi hạ xuống theo trục z vẫn chụp đúng được trái dừa cần cắt.



Hình 8. Chuyển động của cánh tay theo trục X



Hình 9. Chuyển động của cánh tay theo trục Y

3.4. Kết quả thực nghiệm

Để thực nghiệm kiểm chứng thuật toán điều khiển chuyển động được đề xuất dựa trên mô hình động lực học cánh tay robot. Cánh tay robot thu hoạch dừa được tích hợp với liên hợp máy thu hoạch khóm, liên hợp máy được tiến hành thực nghiệm trên cánh đồng dừa thuộc xã Mỹ Phước - huyện Tân Phước - tỉnh Tiền Giang. Hình 10 mô tả toàn bộ liên hợp máy được triển khai trên cái đồng trồng dừa. Hình 11 mô tả hệ thống điều khiển chuyển động tay

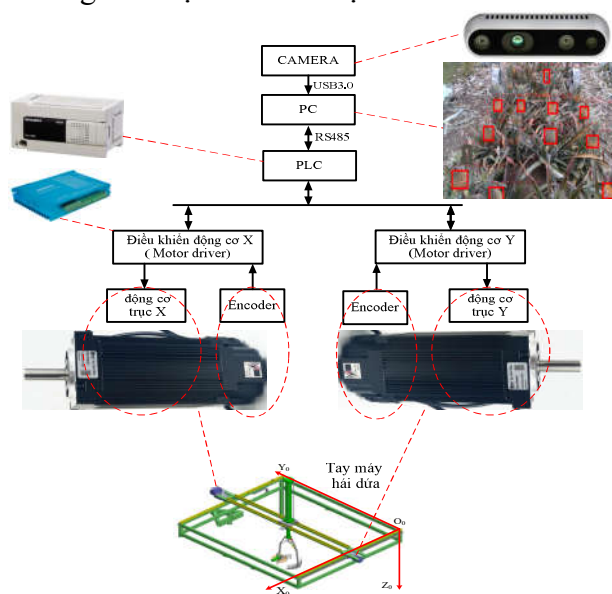
máy robot bao gồm: khối thị giác (camera); khối xử lý trung tâm PC có chức năng đọc tọa độ trái dừa, điều khiển chuyển động hai khớp tay máy (X, Y) dựa trên thuật toán PD+DE; khối thiết bị trường gồm PLC, các bộ driver cho động cơ, động cơ hai khớp 1, 2... Quá trình thử nghiệm được tiến hành với 36 chu kỳ hái dừa (mỗi chu kỳ gồm 3 bước như trên), kết quả chuyển động theo hai trục X, Y của tay máy dưới tác động của nhiễu môi trường được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thực nghiệm trên cánh đồng dưa tại Tiền Giang

TT	Các yếu tố nhiễu tác động tới chuyển động				Vị trí trái dưa		Kết quả thực nghiệm (di chuyển thực tế tay máy Robot)							
	Góc nghiêng khung xe		Độ rung khung xe		Trục X	Trục Y	Lần 1		Lần 2		Lần 3		Trung bình	
	Trục X	Trục Y	Biên độ H	Vận tốc rung V			Trục X	Trục Y	Trục X	Trục Y	Trục X	Trục Y	Trục X	Trục Y
Đơn vị														
	(độ)	(độ)	(mm)	(mm/s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	10	8	6	1,0	915	859	920	850	890	855	890	821	900	842
2	10	8	6	1,0	882	1398	910	1425	910	1425	874	1386	898	1412
3	10	8	6	1,0	615	874	635	910	635	910	614	856	628	892
4	10	8	6	1,0	159	941	150	910	155	910	124	946	143	922
5	10	8	6	1,0	766	1468	790	1495	795	1495	755	1465	780	1485
6	10	8	6	1,0	204	1483	210	1520	210	1515	237	1471	219	1502
7	10	8	6	1,0	395	172	395	160	390	165	370	131	385	152
8	12	15	8	1,4	635	271	630	255	635	255	610	228	625	246
9	12	15	8	1,4	333	1455	335	1490	340	1490	366	1457	347	1479
10	12	15	8	1,4	748	1476	750	1510	755	1510	778	1468	761	1496
11	12	15	8	1,4	164	272	190	300	180	300	167	267	179	289
12	12	15	8	1,4	681	801	665	780	680	775	659	803	668	786
13	12	15	8	1,4	116	831	115	805	105	805	86	832	102	814
14	12	15	8	1,4	559	1505	580	1510	580	1510	556	1549	572	1523
15	8	5	5	0,8	187	1601	185	1600	178	1600	162	1555	175	1585
16	8	5	5	0,8	250	623	245	600	245	590	221	625	237	605
17	8	5	5	0,8	311	1305	330	1310	310	1310	335	1340	325	1320
18	8	5	5	0,8	308	1949	330	1980	330	1990	309	1952	323	1974
19	8	5	5	0,8	634	687	660	700	660	710	630	735	650	715
20	8	5	5	0,8	723	1286	710	1270	710	1270	692	1237	704	1259
21	8	5	5	0,8	250	624	235	610	240	610	215	565	230	595
22	8	5	5	0,8	312	1313	335	1350	320	1355	344	1324	333	1343
23	5	8	5	0,9	309	1953	330	1990	330	1995	312	1958	324	1981
24	5	8	5	0,9	643	684	670	690	665	725	648	712	661	709
25	5	8	5	0,9	166	833	155	790	158	790	137	835	150	805
26	5	8	5	0,9	724	1291	715	1275	715	1275	694	1248	708	1266
27	5	8	5	0,9	249	1414	275	1450	275	1450	257	1423	269	1441
28	5	8	5	0,9	295	172	320	195	300	190	328	221	316	202
29	5	8	5	0,9	635	271	625	230	605	255	621	235	617	240
30	8	10	7	1,1	333	1455	360	1500	365	1500	340	1470	355	1490
31	8	10	7	1,1	748	1476	760	1490	780	1490	767	1541	769	1507
32	8	10	7	1,1	164	272	155	235	145	230	132	261	144	242
33	8	10	7	1,1	681	801	665	780	665	785	647	742	659	769
34	8	10	7	1,1	166	831	195	850	195	855	174	887	188	864
35	8	10	7	1,1	559	1505	570	1545	580	1550	593	1513	581	1536
36	8	10	7	1,1	187	1601	170	1580	180	1585	157	1542	169	1569

Từ kết quả thực nghiệm trong bảng 1, dựa trên phương pháp thống kê thực nghiệm và lý thuyết về phương sai chúng ta nhận được độ chính xác trong chuyển động của tay máy theo trục X là 95% và trục Y là 95%. Điều đó chứng tỏ thuật toán

điều khiển chuyển động được nghiên cứu đề xuất dựa trên mô hình động lực học tay máy đạt độ chính xác và độ tin cậy khi điều khiển tay máy theo hai trục X, Y trong môi trường ruộng dứa thực.



Hình 10. Cấu trúc hệ thống điều khiển tay máy Robot

4. KẾT LUẬN

Bài báo này tiến hành nghiên cứu mô hình động lực học tay máy Robot thu hoạch dứa khi làm việc trong môi trường thực, các yếu tố nhiễu môi trường đã được phân tích trong mô hình động lực học. Từ đặc điểm phân tích về giới hạn trên của nhiễu môi trường xuất hiện trong phương trình động lực học, nhóm tác giả đã đề xuất thuật toán điều khiển chuyển động PD+DE trong đó có ước tính giới hạn trên của nhiễu môi trường để đưa vào thành phần bù nhiễu. Tính ổn định của thuật toán điều khiển chuyển động được chứng minh thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov. Kết quả thực nghiệm trên ruộng dứa tại xã Mỹ Phước, huyện Tân Phước, tỉnh Tiền Giang cho độ chính xác đến 95% đã chứng minh tính đúng đắn của mô hình động lực học và thuật toán điều khiển chuyển động mà nghiên cứu đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Schertz C E, Brown GK, 1968. "Basic considerations in mechanizing citrus harvest", Trans. of the ASAE, pp. 343 -346.
2. Mehta, S.S. T.F. Burksauthor, 2014. "Vision - based control of robotic manipulator for citrus harvesting", Computers and electronics in agriculture, v.102, pp. 146 -158.

3. Silwal, A., Davidson, J.R., Karkee, M., Mo, C., Zhang, Q., Lewis, K., 2017. "Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester", Journal of Field Robotics, pp. 1140 -1159.
4. Tanigaki, K., Fujura, T., Akase, A., Imagawa, J., 2008. "Cherry -harvesting robot", Computers and Electronics in Agriculture 63 (1), pp. 65 -72.
5. Kondo N., 2000. "Strawberry harvesting robot", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers 103(976): 148 -149.
6. Bin Li, Maohua Wang, 2013. "In -field recognition and navigation path extraction for pineapple harvesting robots", Intelligent Automation and Soft Computing, Vol. 19, No.1, pp. 99 -107.
7. Bin Li, Maohua Wang, Ning Wang, 2010. "Development of a real -time Fruit recognition system for pineapple harvesting robots", An ASABE Meeting Presentation.
8. Mezghani Ben Romdhane Neila, Damak Tarak, 2011. Adaptive terminal sliding mode control for rigid robotic manipulators. International Journal of Automation and Computing; 8 (2): 215-220.
9. Sze San Chong, Xinghuo Yu and Man Zhihong, 1996. A robust adaptive sliding mode controller for robotic manipulators. IE- EE Workshop on Variable Structure Systems, Tokyo, Japan; 31-35.
10. Man ZHIHONG, Xinghuo YU, 1997. Adaptive terminal sliding mode tracking control for rigid robotic manipulators with un-certain dynamics. The Japan society of mechanical Engineers; 40 (3): 493-502.

RESEARCH ON DYNAMICS OF MOTION FOR ROBOTIC MANIPULATORS HARVESTING PINEAPPLE IN THE FIELD

Bui Le Cuong Quoc^{1*}, Hoang Son²

¹*Binh Thuan province Vocational College*

²*Vietnam National University of Forestry*

SUMMARY

The automatic pineapple harvesting manipulator is a robotic manipulator mounted on the chassis of a harvester complex operating in an agricultural environment. This manipulator has 3 degrees of freedom (3DOF-Degrees of Freedom) designed in the form of motions in three coordinate axes X, Y, Z. Through the analysis of the dynamics of the movement of the manipulator, considering factors affecting the working environment and the robot hand motion control algorithm for pineapple harvesting, this study has proposed the PD control algorithm combined with environmental noise estimation to include noise compensation when the machine complex is operating in the actual field. The stability in working process when using the control algorithm is proven through the Lyapunov stability criterion. The results of the trial of harvesting pineapple fields in My Phuoc commune, Tan Phuoc district, Tien Giang province show that the manipulator has moved to the position where the pineapple needs to be cut is 95% in about 36 harvesting cycles. That proves the reliability and accuracy of the control algorithm.

Keywords: Combine harvester, harvesting automatic manipulator, motion Dynamics, PD control algorithm.

Ngày nhận bài : 07/5/2022

Ngày phản biện : 08/6/2022

Ngày quyết định đăng : 18/6/2022