# Ứng dụng điều khiển bám thích nghi thông minh nhờ học lặp và bù bất định cho hệ chuyển động robot công nghiệp

Võ Thu Hà[1*], Thân Thị Thương[1], Bùi Huy Hải[1], Võ Quang Vinh[2]

[1]Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp;
[2]Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực.
[*]Email: vtha@uneti.edu.vn
*Nhận bài: 12/9/2023; Hoàn thiện: 06/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.*
**DOI:** https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.78-83

## TÓM TẮT

*Một hệ chuyển động robot luôn phụ thuộc vào các tham mô hình toán bất định hoặc không biết được chính xác và bị nhiễu ngoại tác động là không thể tránh khỏi. Đã có rất phương pháp điều khiển thích nghi, bền vững, trượt,... để xử lý trường hợp này, tuy nhiên, các phương pháp điều khiển đó đều dựa vào mô hình toán học robot bất định, lúc đó ít nhất cần ước lượng các tham số đó, hoặc phải giả thiết các tham số là hằng bất định. Nội dung của bài báo là trình bày một phương pháp điều khiển để robot chuyển động bám quỹ đạo chính xác mà không dựa hoàn toàn vào mô hình đó là bộ điều khiển thích nghi thông minh nhờ học lặp loại D và được kết hợp với điều khiển tuyến tính hóa chính xác. Kết quả mô phỏng cho tay máy hai bậc tự do cho thấy, sai số vị trí của khớp tác động cuối nhanh tiến tới không và chính xác.*

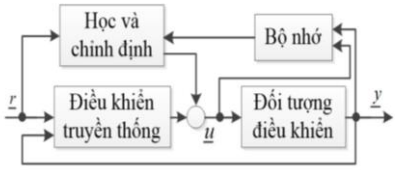
**Từ khoá:** Điều khiển học lặp; Robot 2 bậc tự do; Điều khiển thích nghi thông qua điều khiển tuyến tính hóa chính xác.

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Robot đã và đang được ứng dụng rất nhiều trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, vì vậy, cũng đã có vô vàn các phương pháp điều khiển robot được nghiên cứu và ứng dụng sử dụng, đã giúp cho robot đạt được chất lượng bám quỹ đạo chính xác đạt yêu cầu. Nhưng những phương pháp này đều được xây dựng dựa vào mô hình toán mô tả robot và chúng được phân loại tùy theo mức độ chính xác của mô hình toán đó. Dạng mô hình toán thường dùng cho việc thiết kế, tổng hợp bộ điều khiển là mô hình Euler – Lagrange bị tác động bởi nhiễu ngoại đầu vào d(t) như sau:

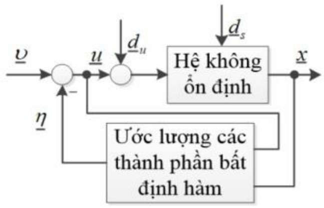
$$u = M\left(q,\theta\right).\ddot{q} + C(q,\dot{q},\theta)\dot{q} + G(q,\theta) + F(\dot{q},\theta) + d(t) \tag{1}$$

Trong đó: $q$ là vector các biến khớp; $\theta$ là vector các tham số bất định; $M\left(q,\theta\right)$ là ma trận quán tính luôn đối xứng xác định dương; $C(q,\dot{q},\theta)\dot{q}$ là vector của các thành phần Coriolis và centrifugal; $G(q,\theta)$ mô tả ảnh hưởng của ma sát; $F(\dot{q},\theta)$ là vector trọng trường, $d(t)$ là vector nhiễu ở cơ cấu chấp hành và $u$ là tín hiệu điều khiển. Với các biến khớp bằng với số các tín hiệu đầu vào thì hệ robot như vậy là đủ cơ cấu chấp hành. Nhiệm vụ điều khiển robot là xây dựng bộ điều khiển phản hồi sao cho đầu ra là các biến khớp *q* bám theo được quỹ đạo đặt mong muốn *r(t)* và chất lượng bám không phụ thuộc vào các tham số bất định $\eta$ và thành phần nhiễu ngoại *d(t)*. Đã có nhiều phương pháp điều khiển giải quyết bài toàn trên, ví dụ như phương pháp tuyến tính hóa chính xác [1]. Nếu thành phần nhiễu ngoại bỏ *d(t)* qua được nhưng vẫn tồn tại tham số hằng bất định thì ta có phương pháp điều khiển nghịch đảo mô hình [2]. Trong trường hợp đều tồn tại cả thành phần nhiễu ngoại và tham số hằng bất định thì có phương pháp điều khiển trượt [3]. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp điều khiển trượt là có hiện tượng rung (chattering) khi hệ trượt trên mặt trượt với tần số cao. Để cải thiện hiện tượng rung này cũng có phương pháp điều khiển trượt bậc cao [4], song vẫn cần tới giá trị ước lượng của chuẩn cực đại sai lệch mô hình gây ra bởi $\eta$ và *d(t)* và cũng không loại bỏ được hoàn toàn hiện tượng rung, nên vẫn có nguy cơ làm các thành phần thiết bị cơ khí robot nhanh hỏng. Để khắc phục tất cả các nhược điểm trên có thể sử dụng bằng phương pháp điều khiển thông minh, đó là xu hướng điều khiển không sử dụng mô hình động lực học của robot (1), để chất lượng điều khiển không chịu ảnh hưởng bởi thành phần *q(t)*và *d(t).* Phương pháp điều khiển thông minh áp dụng chủ yếu cho robot được nội dung bài báo đề cập là phương pháp học lặp [5]. Đây là phương pháp điều khiển tích hợp với các hệ làm việc tuần hoàn và đòi hỏi trạng thái giống nhau. Đồng thời cũng đòi hỏi các tham số *q(t), d(t)* là tuần hoàn và có cùng chu kỳ thay đổi giống nhau như chu kỳ làm việc của robot công nghiệp. Trong thực tế, phương pháp điều khiển học lặp không phải lúc nào cũng áp dụng đáp ứng được chất lượng điều khiển mong muốn. Hiện nay, đã có nhiều cải tiến cho học lặp để cải tiến chất lượng điều khiển và mở rộng phạm vi ứng dụng trong thực tế. Đó là cải tiến kết hợp học lặp với phương pháp điều khiển truyền thống, như tách riêng thành phần ma sát trong [6], đó là khi không đó được $\dot{q}$ của [7] như hình 1.




***Hình 1.*** *Sơ đồ cấu trúc cải tiến kết hợp học lặp với phương pháp điều khiển truyền thống.*

Tuy nhiên, nhược điểm của việc ổn định hóa đối tượng điều khiển bằng bộ điều khiển truyền thống như hình 1 đã làm mất tính "thông minh" của bộ điều khiển cuối cùng. Nói cách khác bộ điều khiển học lặp tiền xử lý và học lặp truyền thẳng như trên không còn là bộ điều khiển thông minh. Vì vậy, để ổn định hóa nhờ điều khiển thích nghi "thông minh" theo mô hình mẫu với cấu trúc như hình 2 [8]. Tính "thông minh" được hiểu là khối ước lượng các thành phần bất định không sử dụng tới mô hình toán của hệ (đối tượng điều khiển). Các thành phần bất định của hệ gồm nhiễu đầu vào và sai lệch mô hình (so với mô hình mẫu) và đây là một xu hướng điều khiển có thể được ứng dụng vào điều khiển cho robot công nghiệp.




***Hình 2.*** *Sơ đồ biểu diễn khối ước lượng các thành phần bất định không sử dụng mô hình toán của hệ.*

Nội dung chính bài báo sẽ trình bày thuật toán điều khiển sao cho nhằm ổn định hóa hệ robot mà không cần thiết sử dụng các phương pháp điều khiển truyền thống. Điều này tạo khả năng áp dụng được điều khiển học lặp cho cả những hệ không ổn định mà không cần sử dụng tới mô hình toán của hệ robot, áp dụng cho cả trường hợp *q(t), d(t)* phụ thuộc vào thời gian, không cần tuần hoàn. Phương pháp điều khiển này được xây dựng trên cơ sở lý thuyết về điều khiển tối ưu từng đoạn trên trục thời gian [9] Nội dung bài báo gồm 4 phần. Phần 1 là đặt vấn đề nghiên cứu điều học lặp cho hệ robot. Phần 2 sẽ trình bày bộ điều khiển thích nghi thông minh theo mô hình mẫu cho hệ robot. Phần 3 sẽ áp dụng phương pháp đề xuất cho robot hai bậc tự do để kiểm chứng phương pháp điều khiển. Phần 4 là các kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

## 2. ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI THÔNG MINH THEO MÔ HÌNH MẪU CHO HỆ ROBOT CÔNG NGHIỆP

### 2.1. Nội dung thiết kế bộ điều khiển

Có nhiều loại cơ cấu chấp hành robot công nghiệp song chung đều có chung mô hình toán học kiểu phương trình Eurler – Lagrange (1). Xây dựng bộ điều khiển thông minh để vector các biến khớp *q* bám theo được quỹ đạo mẫu *r(t)* và chất lượng bám các khớp robot không bị ảnh hưởng bởi $\eta$, *d(t). Để giải quyết vấn đề trên là sử dụng sơ đồ cấu trúc điều khiển như hình 3.* Gồm mạch vòng điều khiển bên trong dùng để nhận dạng các tham số bất định hàm $\eta$ bởi $\hat{\eta}$ nhờ phương pháp phân tích chuỗi Taylor để chuyển hệ robot ban đầu (1) thành hệ (4) bằng phương pháp bù thành phần bất định. Mạch vòng điều khiển bên ngoài là bộ điều khiển lặp để xác định tín hiệu điều khiển *u* làm cho quỹ đạo chuyển động các khớp *q* bám theo quỹ đạo đặt trước *r*. Trong nội dung bài báo sử dụng hàm học kiểu **D** với tham số hàm học $K_k$ được chỉnh định online sau mỗi lần thử thứ *k* theo nguyên tắc cực tiểu hóa tổng bình phương sai lệch bám. Từ (1) có viết lại dưới dạng tương đương với nhiễu tổng $\eta$, gồm *d* ban đầu và sai lệch mô hình như sau:

$$\ddot{q} = u + \eta \tag{2}$$

trong đó: $\eta = d + \left[I_n - M\left(q,\theta\right)\right]\ddot{q} - C\left(q,\dot{q},\theta\right)\dot{q} - F\left(\theta\right)\dot{q} - g\left(q,\theta\right)$ (3)

Và (2) trở thành hệ tuyến tính nhờ việc ước lượng $\eta$ bởi $\hat{\eta}$ rồi sau đó tiến thành bù thông qua tín hiệu đầu vào: $\ddot{q} = u + \eta - \hat{\eta} = u + \delta$ (4)

Với $\delta = \eta - \hat{\eta}$ là phần sai lệch ước lượng còn lại.

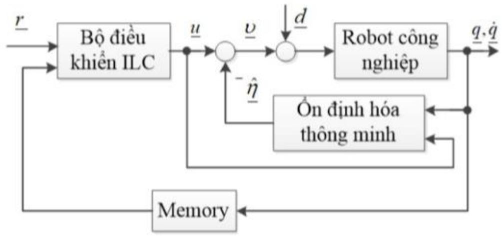
Để thuận tiện cho việc trình bày, sẽ sử dụng ký hiệu vector trạng thái và tín hiệu đầu vào cho hệ (2) thành như sau: $x = \begin{pmatrix} q \\ \dot{q} \end{pmatrix}$ và $u = \upsilon - A_1 q - A_2 \dot{q}$ (5)

Trong đó, $A_1$, $A_2$ là hai ma trận tùy chọn. Khi đó, mô hình tương đương (2) của robot ở trên trở thành dạng phương trình trạng thái chính tắc.

$$\dot{x} = Ax + B\left[\upsilon + \delta\right] \tag{6}$$

Trong đó: $A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -A_2 & -A_2 \end{bmatrix}$ và $B = \begin{pmatrix} 0_n \\ I_n \end{pmatrix}$ , $\delta = \eta - \hat{\eta}$ (7)

Có thể thấy, ngoại trừ $\eta$ trong (3) thì mô hình tương đương này không còn chứa bất cứ thông tin nào về mô hình Euler –Lagrange của hệ chuyển động robot gốc ban đầu. Bởi vậy, nếu khi đã được bù bởi $\hat{\eta}$ theo nguyên tắc phân tích chuỗi Taylor bằng bộ điều khiển vòng trong thì bộ điều khiển này không cần sử dụng đến mô hình (1), đó là mang tính thông minh.




***Hình 3.*** *Điều khiển thích nghi thông minh theo mô hình mẫu cho hệ robot.*

*2.1.1. Mạch điều khiển vòng trong bằng bộ điều khiển tuyến tính hóa thông minh, hình 3*

Phải làm cho kết quả ước lượng $\eta$ bởi $\hat{\eta}$ càng chính xác càng tốt. Nếu kết quả ước lượng càng chính xác thì thành phần bất định $\eta$ còn lại càng nhỏ. Bộ tuyến tính hóa nhờ ước lượng và bù bất định phải mang tính “ thông minh” có nghĩa là không cần dùng đến phương trình động lực học robot (1). Đây là vòng sử dụng phép phân tích chuỗi Taylor để ước lượng $\hat{\eta}$ tại thời điểm

$t = kT + iT_s$ từ 2 giá trị đo được trước đo gồm $q_k(j), \dot{q}_k(j),$ với $j = i, i-1$.

Chuyển hệ khi đã bù thành

$$\Leftrightarrow \frac{dx}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -A_1 & -A_2 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} [\upsilon - \hat{\eta} + \eta] = Ax + B[\upsilon - \hat{\eta} + \eta] \tag{8}$$

Thì công thức ước lượng được xác định như sau:

$$\hat{\eta}(i) = B^T \left[ \frac{x_k(i) - x_k(i)}{T_S} - \mathrm{A}\, x_k(i) \right] \ddot{q} - \upsilon_k(i) + \hat{\eta}(i-1) \tag{9}$$

*2.1.2. Điều khiển vòng ngoài bằng phương pháp học lặp loại kiểu D, hình 3*

Phương pháp học lặp này sẽ sử dụng hàm học kiểu D với tham số hàm học $K_n$ được chỉnh định online sau mỗi lần thử thứ *k* theo nguyên tắc cực tiểu hóa tổng bình thương sai lệch bám.

$$u_{k+1}(i) = u_{k+1}(i) + Ke_k(i+1) \tag{10}$$

Với $K_k = \underset{a \le K \le b}{\arg\min} \left\| \left( I - \Phi K \right) \varepsilon_k \right\|$ (11)

Trong đó:

$$e_k(i) = r(i) - y_k(i);\ \varepsilon_k = \begin{pmatrix} e_k(0) \\ e_k(1) \\ \ldots\ldots \\ e_k(N-1) \end{pmatrix}; \Phi = \begin{pmatrix} CB & 0 & \ldots & 0_n \\ CAB & CB & \ldots & 0_n \\ \ldots & \ldots\ldots & \ldots & \ldots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \ldots & CB \end{pmatrix} \tag{12}$$

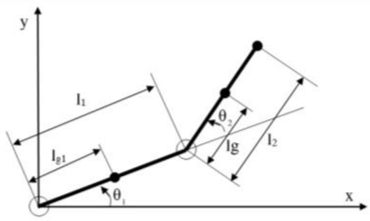
**2.2. Thuật toán điều khiển**

Thuật toán điều khiển có cấu trúc tóm tắt như sau:

| | |
|---|---|
| 1 | Khởi tạo: Chọn $A_1, A_2$ và tham số học *K*. Chọn $T_s$ và tính số bước điều khiển trong một chu kỳ $N = T / T_s$. Gán $\upsilon(i) = r(i), \mathrm{i} = 0,1,\ldots,N-1; z = 0$. Tùy chọn $\hat{\eta}$ |
| 2 | **while** continue the control **do** |
| 3 | **for** $i = 0,1,\ldots,\mathrm{N}-1$ **do** |
| 4 | Đưa $u(\mathrm{i}) = \upsilon(i) - A_1 q - A_2 \dot{q} - \hat{\eta}$ vào điều khiển robot trong khoảng thời gian $T_s$<br>Đo $x$. Tính $e_k(i) = r(i) - q(i)$.<br>Gán $\hat{\eta} \leftarrow B^T [(x - z)/T_s - Ax] - \upsilon(i) + \hat{\eta}; \hat{z} \leftarrow x$ |
| 5 | **end for** |
| 6 | Lập vector tổng $\mathbf{v} = vec(\upsilon(0),\ldots.,\upsilon(N-1)); e = vec(e(0),\ldots.,\mathrm{e}(N-1))$.<br>Tính $v \leftarrow v + K\grave{e}$ |
| 7 | **end while** |

## 3. KIỂM CHỨNG CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH ROBOT HAI BẬC TỰ DO

Để kiểm định chất lượng điều khiển của thuật toán điều khiển trên, đã được cài đặt cho robot 2 bậc tự do, hình 4.




***Hình 4.*** *Hệ robot 2 bậc tự do.*

Hệ robot 2 bậc tự do (hình 4) có mô hình Euler – Lagrange (1) với kết quả cụ thể như sau:

$$\begin{cases} M_{11} = & m_1 l_{C1}^2 + I_1 + m_2\left(l_1^2 + l_{C2}^2 + 2l_1 l_{C2}\cos\theta_2\right) + I_2 \\ M_{12} = & m_2\,(l_{C2}^2 + l_1 l_{C2}\cos\theta_2) + I_2 \\ M_{21} = & m_2\,(l_{C2}^2 + l_1 l_{C2}\cos\theta_2) + I_2 \\ M_{22} = & m_2\, l_{C2}^2 + I_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_{11} = & -m_2 l_1 l_{C2}\sin\theta_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ H_{12} = & m_2 l_1 l_{C2}\left(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\right)\sin\dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_{C2}\sin\theta_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \end{cases}$$

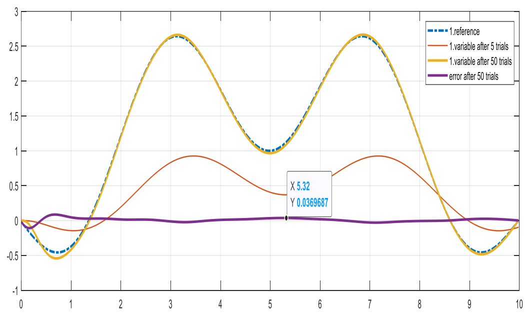
$$\begin{cases} G_{11} = & m_1 l_{C1}\cos\theta_1 + m_2 g\left(l_1\cos\theta_1 + l_{C2}\cos(\theta_1+\theta_2)\right) \\ G_{12} = & m_2 g l_{C2}\cos(\theta_1+\theta_2) \end{cases}$$

Thành phần ma sát:

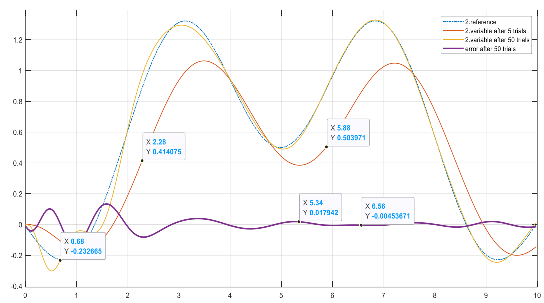
$$F(q,\dot{q},\theta)\dot{q} = \begin{pmatrix} \theta_{11} f_1 \\ \theta_{12} f_2 \end{pmatrix}; f_1 = \dot{q}_1 + q_1\tanh\dot{q}_1; f_2 = \dot{q}_2 + q_2\tanh\dot{q}_2$$

Với nhiễu đầu vào được giả thiết như sau:

$$d_1 = q_1\dot{q}_2\sin(2\pi\,t),\ d_2 = q_2\dot{q}_1\sin(0.6\pi\,t)$$




***Hình 5.*** *Kết quả bám ở khớp thứ nhất.*




***Hình 6.*** *Kết quả bám ở khớp thứ hai.*

Các tham số $\theta_i, i = 1 \div 20$ là ngẫu nhiên. Robot được giả thiết là có chu kỳ làm việc $T_s = 10s$. Thời gian cập nhật tín hiệu điều khiển được chọn $T_s = 0.025s$. Quỹ đạo đặt là hai hàm tuần hoàn chu kỳ T như sau: $r_1 = \sin(\pi\,t/T) + 0.2\sin(3\pi\,t/T); r_2 = 2\sin(\pi\,t/T)$

Thông số robot 2 bậc tự do cụ thể như sau: $l_1 = 0.5, l_2 = 0.8, g = 9.81$. Và tham số bộ điều khiển: $A_1 = \begin{bmatrix} 31 & 0 \\ 0 & 12 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 12 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}$ như thể hiện ở các hình, từ hình 5, hình 6.

***Nhận xét:*** Các biến khớp $q_1, q_2$ và các giá trị mong muốn $r_1, r_2$ như hình 5, hình 6 cho thấy các biến khớp đều tiến tới giá trị đặt trước với sai lệch bám sau 50 lần thử là đủ nhỏ, chấp nhận được cụ thể đối với khớp thứ nhất là: $-0.083 \le e_1 \le 0.036; -0.02 \le e_2 \le 0.0173$;

## 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo đã xây dựng được thuật toán cài đặt bộ điều khiển học lặp ở vòng ngoài kiểu học loại D và việc xác định online tham số hàm học đã đề xuất. Kết quả mô phỏng cho robot 2 bậc tự do đã chứng minh hiệu quả của phương pháp điều khiển theo mô hình mẫu. Các vấn đề còn tồn tại trong kết quả nghiên cứu tiếp đó là xây dựng các phương pháp xác định tập tham số hội tụ *K* cho hàm phi tuyến có cấu trúc đã biết, ngoài ra vẫn chưa xét đến bài toán điều khiển có ràng buộc bằng học lặp. Vậy hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ là giải quyết bài toán điều kiện học lặp có ràng buộc trong thời gian tới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO


[1]. L.Lewis, D.M. Dawson and C.T.Abdallah, "*Robot manipulator control theory and practice*", Marcel Dekker, (2004).

[2]. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *"Robot modeling and control",* New York, Wiley, (2006).

[3]. Z. S. Jiang, F. Xei, X. Wang anf Z. Li, *"Adaptive dynamic sliding mode control for space manipulator with external disturbance"*, Journal of Control and Decision, (2019).

[4]. A. Goel, A Swarup, "*MIMO uncertain nonlinear system control via adaptive hight-order super twisting sliding mode and its application to robotic manipulator"*, Journal Control Autom. Electr. Syst., 28, 36-49, (2017).

[5]. Wang, Y et.al.; "*Servy on iterative leaning control, repetitive control and run to run control. Journal of process control*", 19, (10), 589-1600, (2009).

[6]. R. Lee, L. Sun, Z. Wang, M.Tomizuka, "*Adaptivebiterative learning control of robot manipulators for friction compensation"*. IFAC PapersOnline 52 (15), 175-180, (2019).

[7]. F. Boiakrif, D.Boukhetala and F.Boudjema, *"Velocity observer-based iterative learning control for robot manipulators".* International Journal of Systems Science 44 (2), 214,222, (2013).

[8]. P.D. Nguyen, N.H Nguyen, "*Adaptive control for nonlinear non-autonomous systems with unknown input disturbance.* International Journal of Control, European Journal of Control, 61,91-100, (2021).

[9]. R. Jeyasenthil and S-B. Choi. *"A robust controller for multivariable model matching system utilizing a quantitative feedback theory: Application to magnetic levitation".* Applied Sciences, 27 April, (2019).



## ABSTRACT

### Application of intelligent adaptive tracking control to iterative learning and uncertainty compensation for industrial robot motion systems

*A robot motion system always depends on mathematical model parameters that are uncertain or not precisely known and are unavoidably affected by external disturbances. There have been many methods of adaptive control, sustainable control, sliding control, etc., to handle this case. However, those control methods are all based on the uncertain robot mathematical model. At this point, estimating those parameters at least or assuming the parameters are constant and uncertain is necessary. The article presents a control method for moving robots to follow precise orbits without relying entirely on the model, which is a D-type intelligent iterative adaptive controller combined with accurate linearization control. Simulation results for a 2-degree-of-freedom manipulator show that the position error of the final impact joint quickly approaches zero and is accurate.*


**Keywords:** Iterative learning control; 2-degree-of-freedom robot; Adaptive control through precise linearized control.