

# ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI CHO HỆ CHUYỂN ĐỘNG TAY MÁY ALMEGA16 TRONG KHÔNG GIAN LÀM VIỆC

## APPLICATION ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM FOR THE MOTION SYSTEM OF ALMEGA16 MANIPULATORS IN CARTESIAN SPACE

Võ Thu Hà

*Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp*

Đến Tòa soạn ngày 21/4/2016, chấp nhận đăng ngày 20/5/2016

**Tóm tắt:** Bài báo đề cập đến vấn đề ứng dụng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine không gian làm việc cho hệ chuyển động tay máy Almega16. Bộ điều khiển này không yêu cầu biết chính xác các tham số hằng bất định của hệ thống và đã được giải quyết bằng việc ước lượng, chỉnh định lại các tham số hằng bất định. Thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine luôn có hệ thống nhận dạng tham số động học của hệ thống, luôn cập nhật các tham số hằng bất định để so sánh giá trị chỉnh định với giá trị thực rồi đưa vào bộ điều khiển để hiệu chỉnh. Kết quả được thể hiện qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink và thực nghiệm cho thấy hệ chuyển động Robot ALmega16 đã đáp ứng được yêu cầu điều khiển: đảm bảo sai số của vị trí của khâu tác động cuối nhanh chóng đạt tới không với thời gian quá độ nhỏ làm cho hệ thống kín ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

**Từ khóa:** Thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine, Robot Almega16.

**Abstract:** This paper presents an application of adaptive Li-Slotine control algorithm in cartesian space for the motion system of Almega16 manipulator. The proposed controller solves the problem of determining the accurate values system parameters by estimation and adjustment for the uncertain parameters. In a adaptive Li-Slotine control algorithm, the kinetic parameters identification system always provides state information update on the time-variant parameters. The true value is compared to the reference set-point and its evaluation result is input to the controller for adjustment. The results from Matlab-Simulink simulations and experiments show that the motion system of Robot Almega16 satisfies the requirement of a control system: the errors of rotating joints and the steady state cartesian position quickly converge to zero within a short transient time, so that closed-loop system is stable based on Lyapunov method.

**Keywords:** Adaptive Li -Slotine control algorithm, Robot Almega16.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô hình tay máy Almega16 là mô hình có chứa tham số hằng bất định và chịu tác động xen kẽ giữa các khớp với nhau [3]. Để xác định lượng mômen điều khiển cho tay máy với mục đích là điều khiển góc khớp thực  $q(t)$ , vị trí tác động cuối  $x(t)$  bám chính xác

theo góc khớp mong muốn  $q_d(t)$ , vị trí cuối mong muốn  $x_d(t)$ , cho hệ chuyển động tay máy Almega16, nếu sử dụng các bộ điều chỉnh với tham số cố định sẽ không đáp ứng được yêu cầu điều khiển vì các phương pháp điều khiển đó không áp dụng được cho các đối tượng chịu ảnh hưởng tác động thành

phản xen kênh. Thông thường được sử dụng các thuật toán điều khiển thích nghi cho tay máy công nghiệp nhiều bậc tự do như phương pháp tuyến tính hóa mô hình động lực học [4], ưu điểm của phương pháp là biến hệ phi tuyến ràng buộc thành hệ tuyến tính độc lập, dễ dàng thiết kế theo các phương pháp kinh điển của hệ thống tuyến tính đảm bảo độ chính xác chuyển động theo yêu cầu nhưng nhược điểm lớn là phải biết chính xác các tham số động lực học và phụ thuộc vào giá trị tính toán các bộ tham số của bộ điều khiển. Vì vậy để xác định được lượng mômen truyền động cần thiết lên các khớp di chuyển theo quỹ đạo, bền vững theo sự thay đổi tham số, có khả năng bù sự thay đổi của tải và khử được các thành phần phi tuyến cũng như phân ly đặc tính động lực học của các thanh nối tay máy thì cần phải sử dụng bộ điều khiển có khả năng chỉnh định được các thông số động lực học của tay máy trong quá trình chuyển động, ví dụ như phương pháp điều khiển thích nghi giả định rõ, [4].

Ưu điểm của phương pháp điều khiển thích nghi giả định rõ là hệ điều khiển phân ly được từng trục chuyển động, điều chỉnh được lượng  $\tau_{dk}$  tác động vào từng trục khớp khác nhau. Nhược điểm là nếu mô hình ngược  $\hat{M}^{-1}$  lớn dẫn đến  $\tau_{dk}$  tác động vào từng trục khớp sẽ lớn dẫn đến các thuộc tính phương trình động lực học nằm ngoài giới hạn cho phép thì hệ dao động, sai số giữa các góc khớp thực với các góc khớp đặt lớn.

Do vậy một vấn đề được đặt ra: cần phải tìm cách chỉnh định các tham số hằng bất định để có được  $e(t) \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ . Nội dung chính của bài báo trình bày các nghiên cứu về lý thuyết và được kiểm chứng bằng kết quả mô phỏng, kết quả thực nghiệm ứng dụng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine trong không gian làm việc cho hệ chuyển động tay máy Almega16, thay đổi tham số hằng bất định bằng cơ cấu chỉnh

định để cuối cùng vẫn đạt được  $r \rightarrow 0$ , tức là vẫn có được điều kiện bám ổn định  $e \rightarrow 0$ , [1], [2], [3], [4].

## 2. ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI LI-SLOTINE CHO HỆ CHUYỂN ĐỘNG TAY MÁY ALMEGA16 TRONG KHÔNG GIAN KHỚP VÀ KHÔNG GIAN LÀM VIỆC

### 2.1. Mô hình động lực học tay máy công nghiệp

Phương trình động lực học tổng quát của tay máy được xác định, [1]:

$$\tau = M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1)$$

Trong mô hình động lực học, ma trận quán tính  $M$  là ma trận quán tính đối xứng xác định và  $S = C(q, \dot{q}) - \frac{1}{2}\dot{M}(q)$  là ma trận đối xứng lệch  $S = -S^T$ . Để áp dụng được luật điều khiển thích nghi Li-Slotine cho hệ chuyển động tay máy công nghiệp điều khiển bám quỹ đạo chính xác cần có các giả thiết sau: Mô hình động lực học đủ cơ cấu chấp hành; mô hình động lực học tính bất định là ở tham số hằng không biết chính xác hoặc không biết. Thành phần tham số hằng bất định luôn được viết tách riêng ra, xác định bởi (2), [2], [4]:

$$\begin{aligned} \tau &= M(q, p)\ddot{q} + C(q, \dot{q}, p)\dot{q} + G(q, p) \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q})p \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2. Thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine trong không gian khớp

Luật điều khiển thích nghi Li-Slotine được đưa ra như sau, [1], [2], [3], [4]:

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{M}(q)\ddot{v} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{v} + \hat{G}(q) - K_d \dot{r} \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{v})\hat{p} - K_d \dot{r} \end{aligned} \quad (3)$$

Kết hợp phương trình (2) và (3) được phương trình động lực học kín của tay máy:

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \\ = \hat{M}(q)\ddot{v} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{v} + \hat{G}(q) - K_d \dot{r} \end{aligned} \quad (4)$$

Để cho gọn:



biến vị trí và  $x_d \in R^n$  là quỹ đạo mong muốn trong không gian làm việc,

$$\dot{x}_d = \frac{dx_d}{dt} \in R^n.$$

Theo luật điều khiển thích nghi Li-Slotine (3), luật cập nhật thích nghi (13) và hàm xác định dương (8), chứng minh tương tự như trên, dẫn đến tính được:  $\dot{V} = -r^T K_d r$  xác định âm, có nghĩa là hệ thống đảm bảo:

$$r = \dot{e} + \Lambda e \rightarrow 0 \text{ khi } t \rightarrow \infty$$

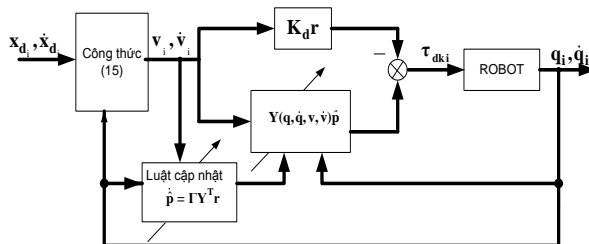
Suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -r^T K_d r \\ &= -[\dot{x}_d + \Lambda \tilde{x} - Jq] J^T K_d J^{-1} [\dot{x}_d + \Lambda \tilde{x} - Jq] \leq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Điều này có nghĩa là  $x - x_d \rightarrow 0$  và

$$\dot{x} - \dot{x}_d \rightarrow 0 \text{ khi } t \rightarrow \infty$$

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển thích nghi Li-Slotine trong không gian làm việc, biểu diễn hình 2.



Hình 2. Sơ đồ hệ thống điều khiển thích nghi Li-Slotine trong không gian làm việc

### 3. MÔ PHỎNG KIỂM CHỨNG QUA TAY MÁY ALMEGA16 VỚI 3 BẬC TỰ DO

#### 3.1. Mô phỏng tay máy Almega16 với 3 bậc tự do trong không gian khớp

Để áp dụng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine ta sử dụng phương trình động lực học của tay máy Almega16 với 3 khớp (khớp 1, khớp 2, khớp 3) đã thiết lập ở [3], [4].

Thông số của Robot Almega16: Do tổng khối lượng của tay máy Almega16 là 250kg

và dựa vào số liệu của 3 khớp nên tính được gần đúng các thông số cơ bản của 3 khớp như sau:

$$\begin{aligned} \hat{m}_1 &= 67 \text{ [kg]}; \hat{m}_2 = 52 \text{ [kg]}; \hat{m}_3 = 16 \text{ [kg]}; \\ \hat{l}_1 &= 0,1 \text{ [m]}; \hat{a}_2 = 0,065; \hat{a}_3 = 0,047 \end{aligned}$$

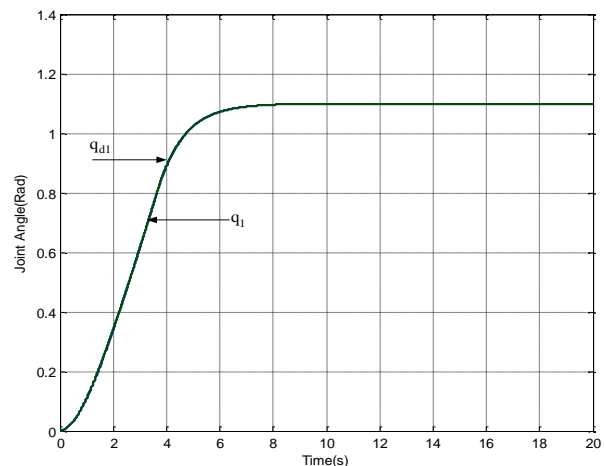
Tính toán tham số và khảo sát hệ thống bằng phần mềm Matlab/Simulink và Matlab/Simechanic, với bảng tham số của bộ ĐKTN Li-Slotine (bảng 1) cho kết quả được biểu diễn (hình 3).

Bảng 1. Tham số của bộ ĐKTN Li-Slotine trong không gian khớp

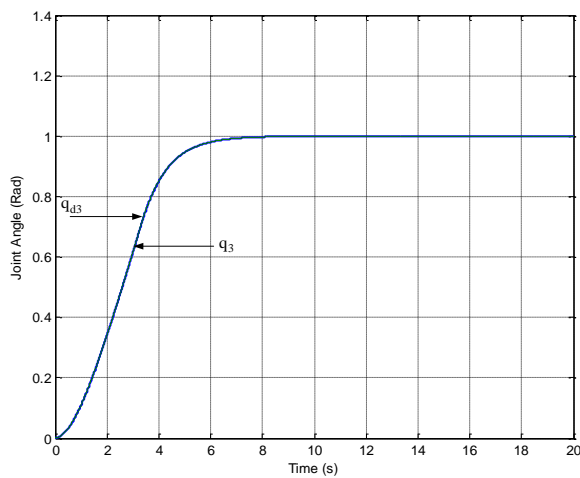
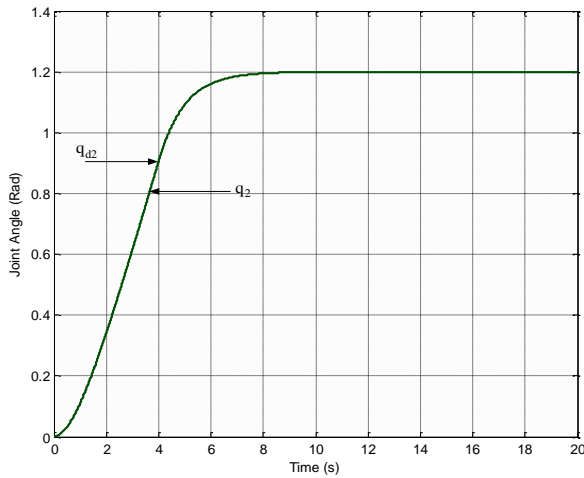
| Ký hiệu  | Tên tham số        | Giá trị tham số các trục khớp                            |
|----------|--------------------|--|
| $K_d$    | Hệ số điều chỉnh   | $K_{d1} = 1000$<br>$K_{d2} = 1500$<br>$K_{d3} = 2000$    |
| $\Gamma$ | Ma trận chéo dương | $\Gamma_1 = 282$<br>$\Gamma_2 = 285$<br>$\Gamma_3 = 282$ |

Muốn cho hệ kín ổn định thì phương trình đặc tính phải xác định dương hay  $K_d$  phải lớn hơn 0. Hệ số điều chỉnh trong bảng tham số của bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine được xác định theo tiêu chuẩn tối ưu động học, [1], [2].

Kết quả mô phỏng:



Hình 3. Biểu diễn giữa góc khớp đặt ( $q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}$ ) và góc khớp thực ( $q_1, q_2, q_3$ )



**Hình 3. Biểu diễn giữa góc khớp đặt ( $q_{d1}, q_{d2}, q_{d3}$ ) và góc khớp thực ( $q_1, q_2, q_3$ ) (tiếp theo)**

**Nhận xét:** Các góc khớp thực ( $q_i$ ) của 3 khớp đều bám góc khớp đặt ( $q_d$ ) với sai lệch lớn nhất, được xác định cụ thể :

$$e_{1\max} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{1} 100\% = 0,05\%$$

$$e_{2\max} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{1} 100\% = 0,06\%$$

$$e_{3\max} = \frac{6,2 \cdot 10^{-4}}{1} 100\% = 0,062\%$$

### 3.2. Mô phỏng tay máy Almega16 trong không gian làm việc

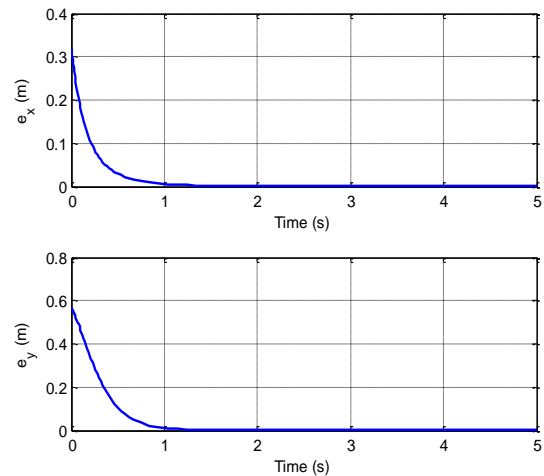
Tính toán tham số và khảo sát hệ thống bằng phần mềm Matlab/Simulink, với bảng tham số của bộ ĐKTN Li-Slotine (bảng 2) cho kết quả được biểu diễn (hình 4).

**Bảng 2. Tham số của bộ ĐKTN Li-Slotine trong không gian làm việc**

| Ký hiệu | Tên tham số      | Giá trị tham số các trục khớp                            |
|---------|------------------|--|
| $x_d$   | Giá trị đặt      | $x_d = 0,3$ [m]; $y_d = 0,5$ [m]                         |
| $K_p$   | Hệ số hiệu chỉnh | $K_{p_1} = 1000$ ; $K_{p_2} = 2000$ ; $K_{p_3} = 1000$ ; |

Muốn cho hệ kín ổn định thì phương trình đặc tính phải xác định dương hay  $K_d$  phải lớn hơn 0. Hệ số điều chỉnh trong bảng tham số của bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine được xác định theo tiêu chuẩn tối ưu động học, [1], [2].

Kết quả mô phỏng:



**Hình 4. Biểu diễn vị trí của khâu tác động cuối**

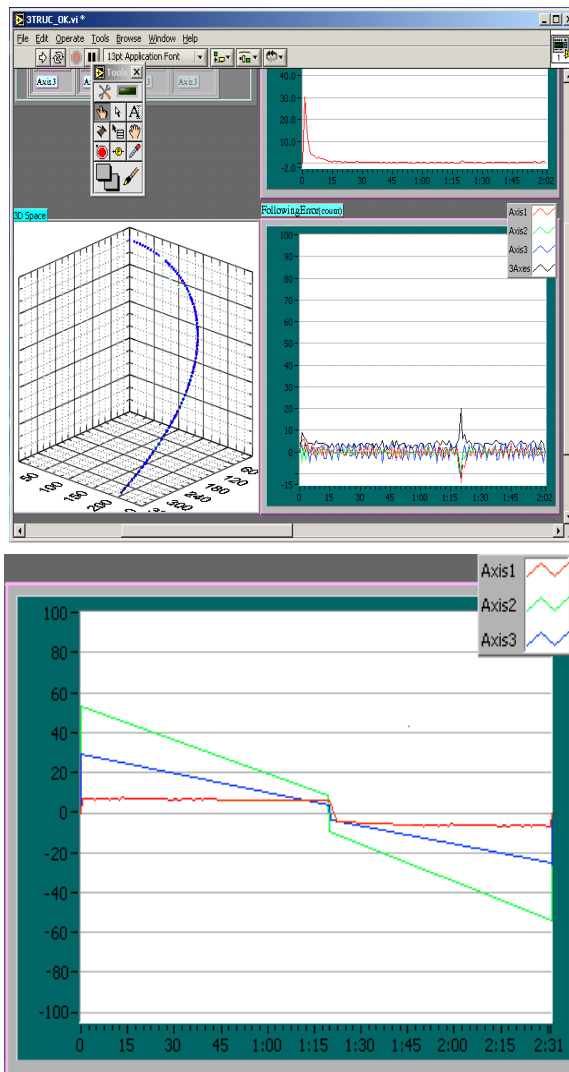
Nhận xét: Vị trí của khâu tác động cuối đảm bảo sai lệch tĩnh, thời gian quá độ nhỏ khoảng 1 s, không có dao động.

### 3.3. Kết quả thực nghiệm

Các thông số trong sơ đồ cấu trúc xác định bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine cho 3 khớp  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  đã được tính toán và cho kết quả với bộ thông số:

$$K_{D_1} = 1000, K_{D_2} = 2000, K_{D_3} = 2000, \Gamma_1 = 282, \Gamma_2 = 285, \Gamma_3 = 282$$

Thực hiện chạy chương trình ta thu được kết quả biểu diễn trên hình 5.



**Hình 5. Đáp ứng điều khiển khi sử dụng bộ điều khiển thích nghi Li- Slotine cho 3 khớp tay máy Almega16**

Nhận xét: Đường quỹ đạo đặt và đường quỹ đạo đáp ứng của bàn kẹp Almega16 có sai lệch rất nhỏ ( $0.2 \cdot 10^{-3}$ ). Thời gian quá độ lớn của hệ thống là nhỏ ( $t_{qd} = 452$  ms). Giá trị trung bình sai lệch vị trí của cả 3 khớp khi sử dụng bộ điều khiển thích nghi Li- slotine cho 3 khớp là rất nhỏ (0,1 %). Thông qua đồ thị sai lệch vị trí của từng khớp (khớp 1, khớp 2, khớp 3) ta thấy hệ chỉ bị dao động nhỏ khi đã ở trạng thái ổn định.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đề cập đến vấn đề chứng minh lại thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine

trong không gian khớp và không gian làm việc bằng mô hình mô phỏng cho Robot Almega16 thấy rằng: đảm bảo chất lượng bám chính xác quỹ đạo mà không phụ thuộc vào tham số hằng bất định của mô hình động lực học và chịu tác động các thành phần xen kênh giữa các trục khớp. Luật điều khiển thích nghi Li-Slotine đã giải quyết vấn đề này bằng việc chỉnh định lại các tham số bất định bằng luật cập nhật, để so sánh giữa giá trị chỉnh định với giá trị thực rồi đưa vào bộ điều khiển để hiệu chỉnh tính toán mômen điều khiển  $\tau_{dk}$  cho từng khớp, đảm bảo hệ thống ổn định và sai lệch vị trí các khớp quay sẽ hội tụ về không, luật điều khiển xây dựng dựa trên tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

Đồng thời bài báo đề cập đến vấn đề chứng minh lại thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine bằng mô hình thực nghiệm, điều này khẳng định lý thuyết xây dựng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine là đúng đắn, độ bám quỹ đạo đã được cải thiện đảm bảo sự ổn định của hệ thống và phương pháp điều khiển thích nghi Li-Slotine có tính khả thi trong thực tế. Bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine được cài đặt trong Card điều khiển chuyển động FlexMotion-6C kết hợp với hệ truyền động biến tần - động cơ của hãng Omron. Đo thực nghiệm với quỹ đạo 3D (X, Y, Z) hệ chuyển động tay máy công nghiệp Robot Almega16 chạy ổn định cho kết quả bám chính xác quỹ đạo đặt. Ngoài ra với thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine có nhược điểm là khối lượng tính toán lớn và cần phải biết một số thông cơ bản, ngày nay với các bộ vi xử lý kỹ thuật tốc cao đều đáp ứng được theo yêu cầu.

Qua đó có thể đúc kết kinh nghiệm thiết kế và ứng dụng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine phù hợp cho hệ chuyển động tay máy công nghiệp nhiều bậc tự do.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Neil Munro, Frank L.Lewis. *Robot Manipulator Control Theory and Practic*. 2004.
- [2] Mark W.Spong, F. L. Lewis, C. T. Bdallah. *Robot control Dynamic*, Motion planning and Analysis. 1992.
- [3] Võ Thu Hà, Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Phạm Thục Anh. *Xây dựng thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine cho Robot IRB 2400*, Tạp chí khoa học công nghệ các trường đại học kỹ thuật, trang 20, số 69. 2009.
- [4] Võ Thu Hà. *Một số giải pháp điều khiển nhằm nâng cao chất lượng chuyển động của tay máy công nghiệp*. Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. 2012.

---

Thông tin liên hệ:

**Võ Thu Hà**

Điện thoại: 0913 024 989 - Email: vtha@uneti.edu.vn

Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

