

CHƯƠNG 3. Điều khiển chuyển động (Motion control)

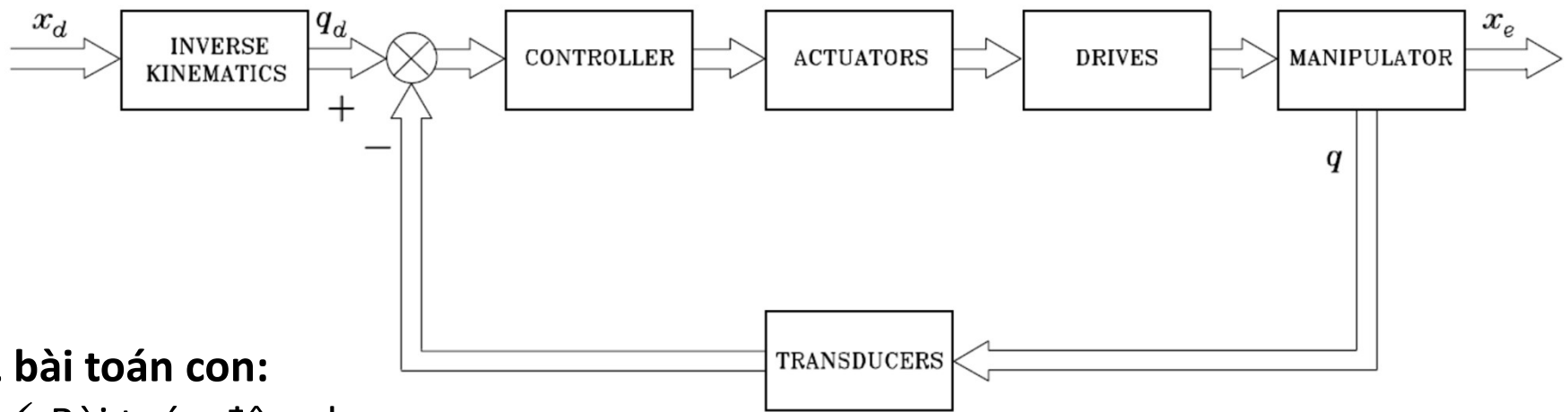
TS. Phạm Duy Hưng,
Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường ĐHCN
Email: hungpd@vnu.edu.vn

1. Bài toán điều khiển (Control problem)

- **Chiến lược điều khiển** (Control strategy) phụ thuộc rất nhiều yếu tố: thiết kế cơ khí, hệ thống dẫn động, ...
- **Hai loại bài toán:**
 - ✓ Điều khiển trong không gian khớp (Joint Space Control)
 - ✓ Điều khiển trong không gian làm việc (Operational Space Control)

1. Bài toán điều khiển (Control problem)

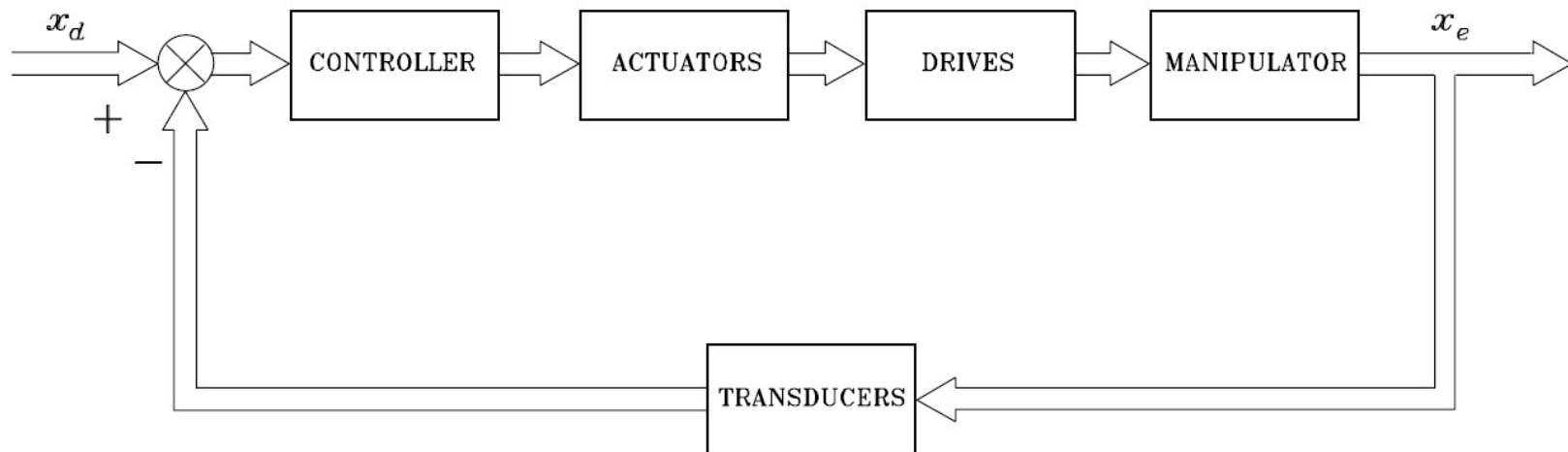
Bài toán 1: Điều khiển trong không gian khớp



- **2 bài toán con:**
 - ✓ Bài toán động học ngược: $x_d \rightarrow q_d$
 - ✓ Điều khiển không gian khớp: q bám theo q_d
- **Nhược điểm:** tác động gián tiếp tới biến không gian hoạt động $x_e \Rightarrow$ **CÓ THỂ ẢNH HƯỞNG ĐỘ CHÍNH XÁC TRONG KHÔNG GIAN LÀM VIỆC**

1. Bài toán điều khiển (Control problem)

Bài toán 2: Điều khiển trong không gian làm việc



- Tiếp cận toàn cục, yêu cầu thuật toán phức tạp hơn.
- Động học ngược được nhúng trong vòng điều khiển phản hồi: tác động tới các biến trong không gian làm việc từ các biến khớp đo được.

2. Điều khiển không gian khớp

- Phương trình chuyển động của tay máy:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + g(q) = \tau \quad (3.1)$$

- Quan hệ truyền động: $K_r q = q_m \quad (3.2)$

$$\tau_m = K_r^{-1} \tau \quad (3.3)$$

- Hệ thống dẫn động (driving system) dùng động cơ điện: $K_r^{-1} \tau = K_t i_a \quad (3.4)$

$$v_a = R_a i_a + K_v \dot{q}_m \quad (3.5)$$

$$v_a = G_v v_c. \quad (3.6)$$

2. Điều khiển không gian khớp

- $\mathbf{K}_r^{-1}\tau = \mathbf{K}_t \dot{i}_a$ (3.4) $\rightarrow \tau = \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \dot{i}_a$

- $v_a = \mathbf{R}_a \dot{i}_a + \mathbf{K}_v \dot{q}_m$ (3.5) $\rightarrow \dot{i}_a = \mathbf{R}_a^{-1} v_a - \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{K}_v \dot{q}_m$

$$\mathbf{K}_r \mathbf{q} = \mathbf{q}_m, \quad (3.2)$$

$$v_a = \mathbf{G}_v v_c \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow \dot{i}_a = \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{G}_v v_c - \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{K}_v \mathbf{K}_r \dot{q}$$

$$\Rightarrow \tau = \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{G}_v v_c - \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{K}_v \mathbf{K}_r \dot{q}$$

$$\Rightarrow \mathbf{B}(q) \ddot{q} + \mathbf{C}(q, \dot{q}) \dot{q} + (\mathbf{F}_v + \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{K}_v \mathbf{K}_r) \dot{q} + g(q) = \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{G}_v v_c$$

2. Điều khiển không gian khớp

- Phương trình chuyển động của tay máy được viết lại:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) = u \quad (3.7)$$

Với $F = F_v + K_r K_t R_a^{-1} K_v K_r$ (3.8)

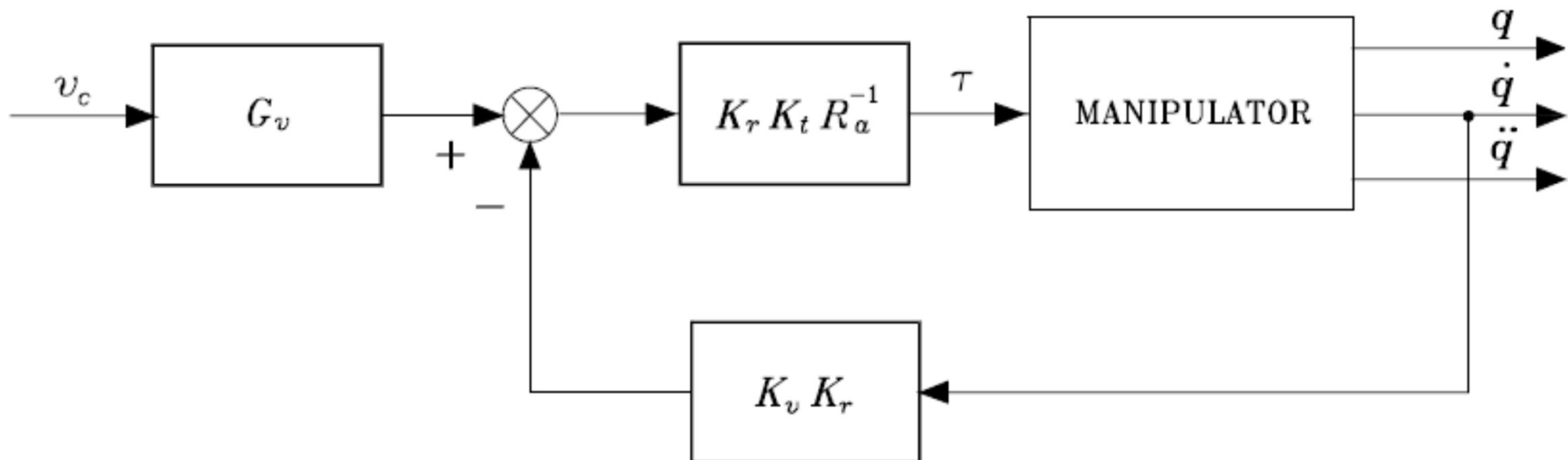
$$u = K_r K_t R_a^{-1} G_v v_c \quad (3.9)$$

Vì $\tau = K_r K_t R_a^{-1} G_v v_c - K_r K_t R_a^{-1} K_v K_r \dot{q}$

$$\Rightarrow \tau = K_r K_t R_a^{-1} (G_v v_c - K_v K_r \dot{q}) \quad (3.10)$$

2. Điều khiển không gian khớp

- Sơ đồ hệ thống được điều khiển bằng thế (voltage-controlled system)



$$\tau = K_r K_t R_a^{-1} (G_v v_c - K_v K_r \dot{q})$$

2. Điều khiển không gian khớp

- Nếu các giả thiết sau thỏa mãn: $\tau = K_r K_t R_a^{-1} (G_v v_c - K_v K_r \dot{q})$
 - ✓ Hệ số truyền K_r : lớn ($\gg 1$).
 - ✓ Trở kháng cảm ứng R_a : có giá trị rất nhỏ (động cơ có hiệu suất cao)
 - ✓ Mô men lực τ : không quá lớn.

thì:

$$G_v v_c \approx K_v K_r \dot{q} \quad (3.11)$$

$$v_c \approx G_v^{-1} K_v K_r \dot{q}$$

Vì kết hợp (3.3), (3.5) và (3.6) có: $R_a \dot{a}_a = G_v v_c - K_v K_r \dot{q} \approx 0$



Hệ thống điều khiển vị trí khớp có thể được thiết kế theo cấu trúc phân tán (Decentralized Control Structure)

2. Điều khiển không gian khớp

- Ngược lại, tay máy yêu cầu vận tốc và/hoặc gia tốc khớp lớn
=> Yêu cầu hiểu biết chính xác về mô hình động lực học tay máy.



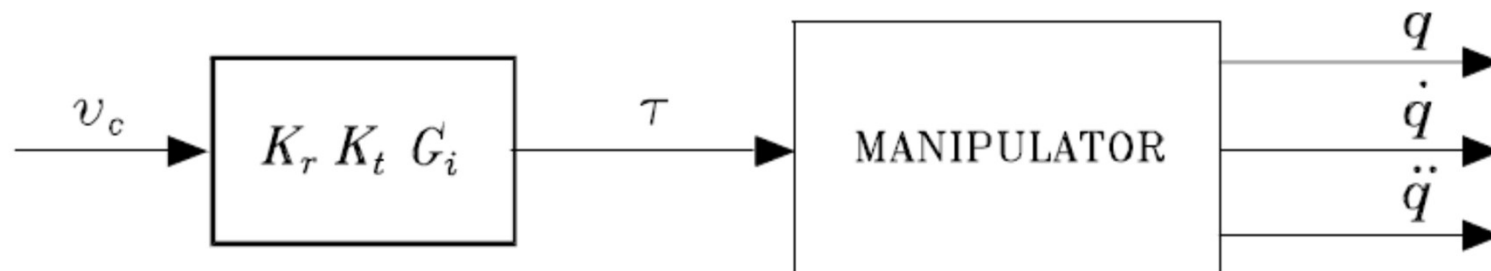
Hệ thống điều khiển vị trí khớp có thể được thiết kế theo cấu trúc tập trung (Centralized Control Structure)

$$\tau = K_r K_t R_a^{-1} G_V v_c - K_r K_t R_a^{-1} K_v K_r \dot{q}$$

- **Điều khiển dòng** (Current control): $i_a = G_i v_c$ (3.12)

 $\tau = K_r K_t G_i v_c$

2. Điều khiển không gian khớp



Hệ thống được điều khiển theo mô men lực (Torque-Controlled System)

2. Điều khiển không gian khớp

- **Các hệ thống điều khiển:**

- ✓ Phân tán: đặc tính bền vững (robustness), hệ thống điều khiển phản hồi.
- ✓ Tập trung: cần tính động lực học ngược, hệ thống điều khiển feedforward, vẫn yêu cầu error giữa quỹ đạo yêu cầu và quỹ đạo thực theo kiểu feedback hoặc feedforward.

2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

- Hệ thống n khớp độc lập
- Điều khiển mỗi khớp là hệ thống một đầu vào/một đầu ra (Single-Input/Single-Output System).
- Ảnh hưởng liên kết giữa các khớp được xem như các lỗi vào nhiễu (Disturbance Input).

2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

- Biến đổi phương trình chuyển động (3.1), ta có:

$$K_r^{-1}B(q)K_r^{-1}\ddot{q}_m + K_r^{-1}C(q, \dot{q})K_r^{-1}\dot{q}_m + K_r^{-1}F_vK_r^{-1}\dot{q}_m + K_r^{-1}g(q) = \tau_m \quad (3.14)$$

$$B(q) = \bar{B} + \Delta B(q) \quad (3.15)$$



$$K_r^{-1}\bar{B}K_r^{-1}\ddot{q}_m + F_m\dot{q}_m + d = \tau_m \quad (3.16)$$

Với $F_m = K_r^{-1}F_vK_r^{-1}$ (3.17)

$$d = K_r^{-1}\Delta B(q)K_r^{-1}\ddot{q}_m + K_r^{-1}C(q, \dot{q})K_r^{-1}\dot{q}_m + K_r^{-1}g(q) \quad (3.18)$$

Hệ thống 2
 Vào: $q_m, \dot{q}_m, \ddot{q}_m$ ra: d

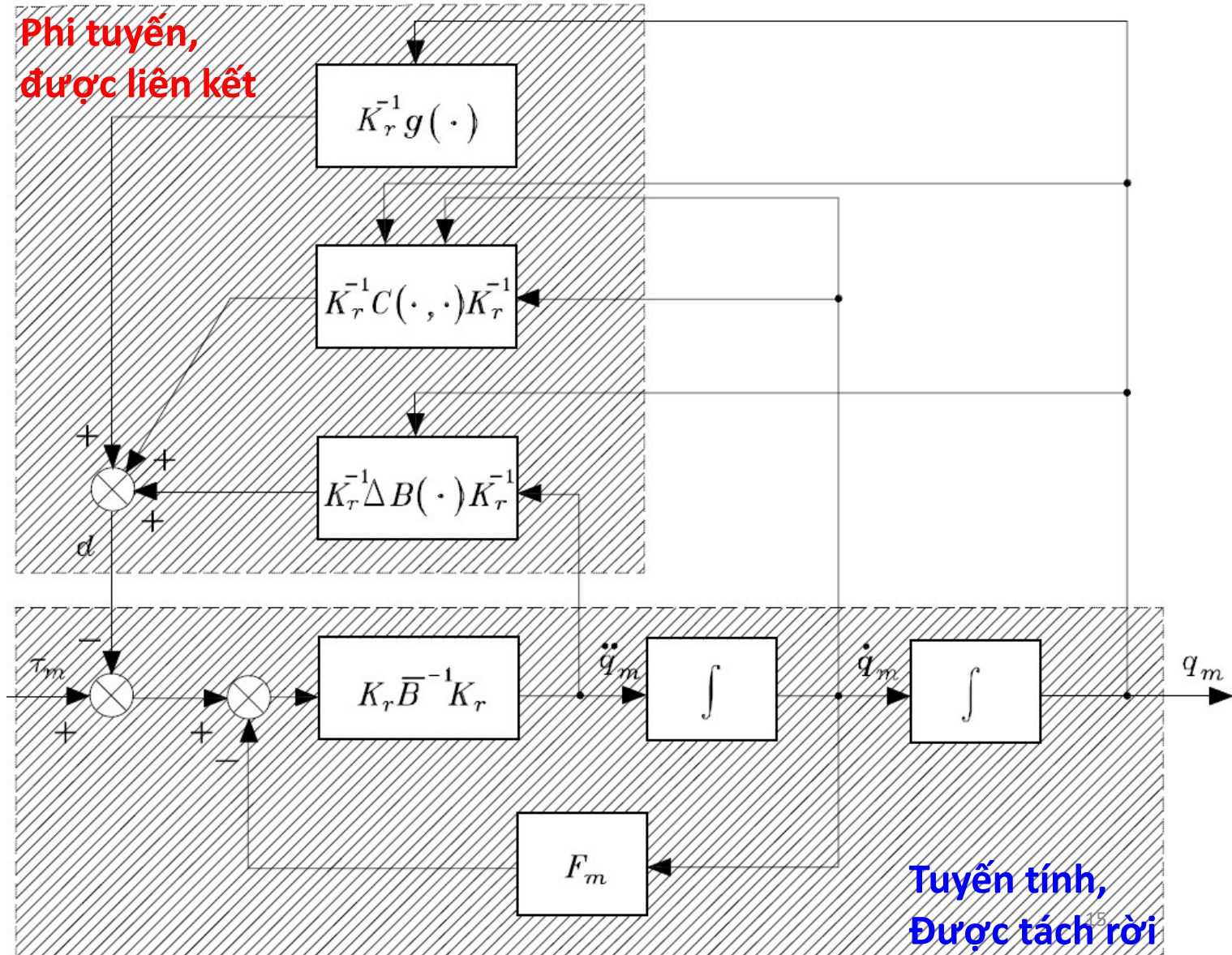
$$G_v v_c - K_v K_r \dot{q} \approx 0$$

được thỏa mãn

→ Coi thành phần phi tuyến d như nhiễu (disturbance) đối với servo khớp đơn

Hai hệ thống con

Hệ thống 1
 Vào: τ_m , ra: q_m



2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

- Mỗi khớp được xem như độc lập => Cấu trúc điều khiển phân tán.
 - ✓ Xem xét bài toán điều khiển khớp độc lập (Independent Joint Control) chấp hành bởi một mô tơ DC.
 - ✓ Single-input/Single output system.
- Bộ điều khiển khớp phải đảm bảo hoạt động tốt với yêu cầu **loại bỏ nhiễu cao và khả năng bám quỹ đạo.**

2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

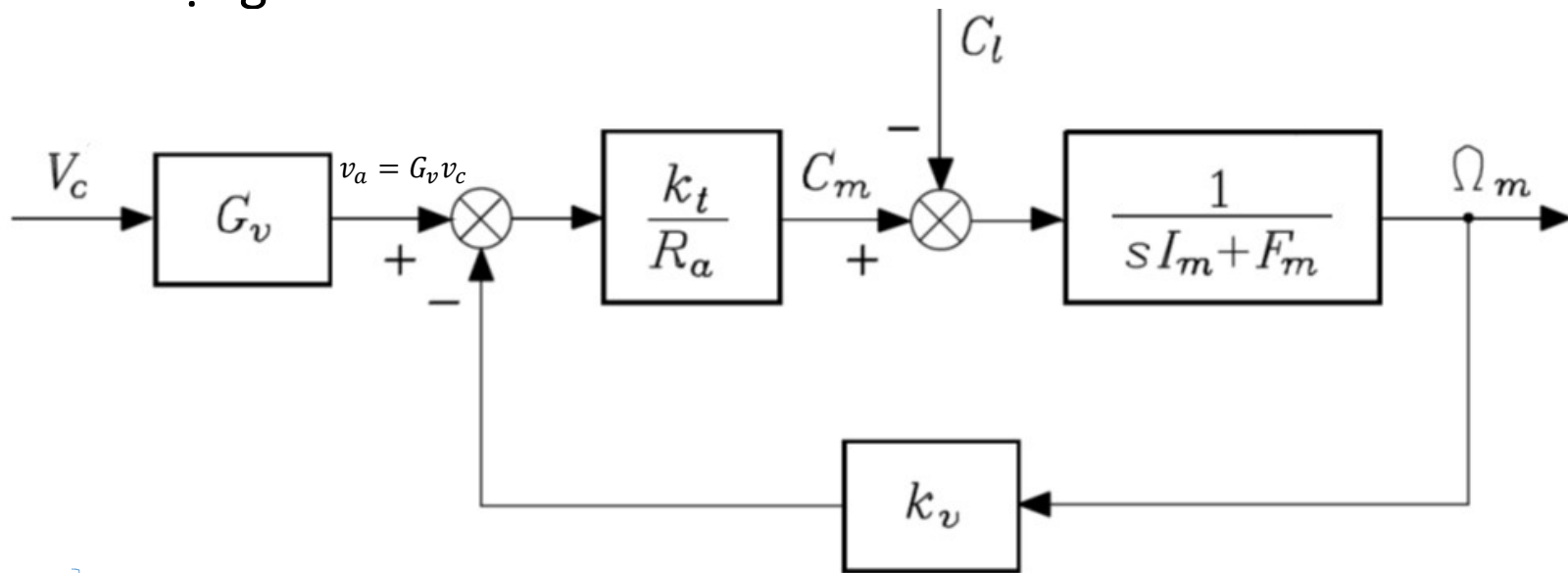
- Việc loại bỏ nhiễu d lên lỗi vào ϑ_m được đảm bảo bởi:
 - ✓ Hệ số khuếch đại lớn trước điểm cam thiệp của nhiễu
 - ✓ Thành phần tích phân trong bộ điều khiển để lỗi ở trạng thái ổn định bằng 0.
- Yêu cầu này gợi ý dùng điều khiển Tỷ lệ - Tích phân PI (Proportional – Integral control) với hàm truyền:

$$C(s) = K_c \frac{1 + sT_c}{s}$$

- ✓ SSE (Steady State Error)=0.
 - ✓ Điểm 0 thực ở $s = -1/T_c$ tạo trạng thái ổn định.
- Nên chọn bộ điều khiển như một chuỗi các hoạt động cơ bản với các vòng phản hồi kín quanh điểm nhiễu.

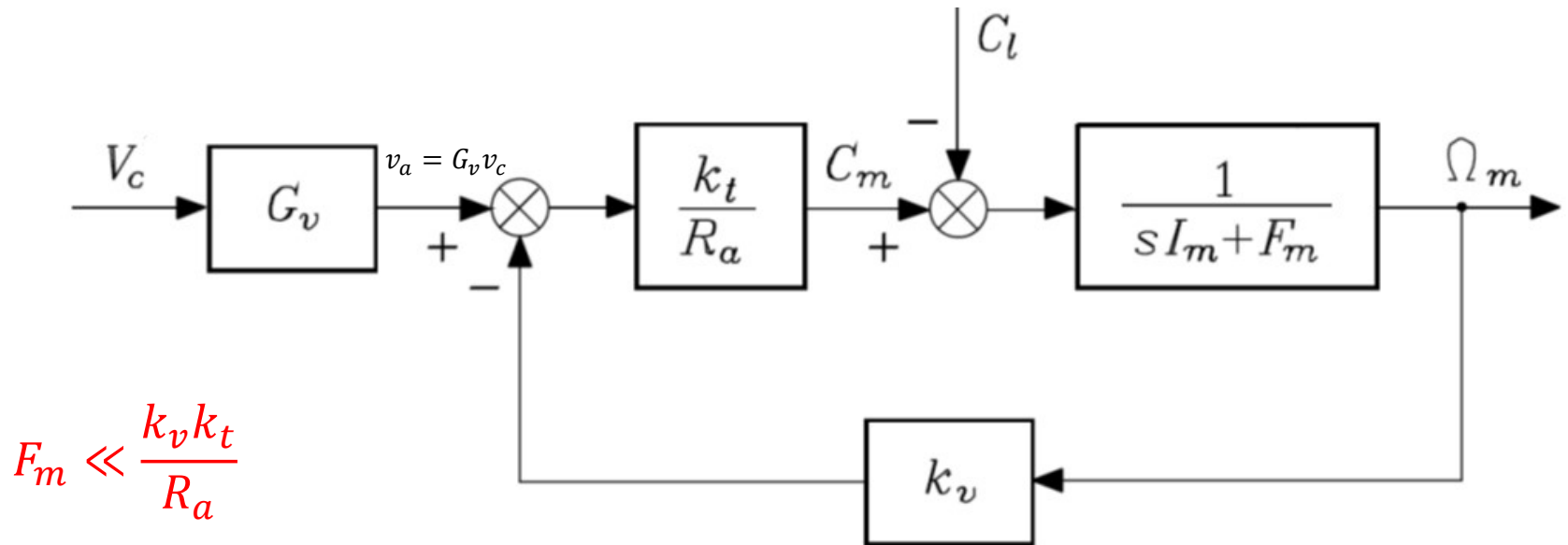
2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

- Mô hình động cơ DC



$$\left. \begin{aligned} i_a &= \frac{v_a}{R_a} - \frac{V_g}{R_a} \\ C_m &= k_t i_a \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_m = k_t \frac{v_a}{R_a} - k_t \frac{k_v \Omega_m}{R_a}$$

$$\begin{aligned} C_m &= (s I_m + F_m) \Omega_m + C_l \\ \Rightarrow \Omega_m &= \frac{1}{s I_m + F_m} (C_m - C_l) \end{aligned}$$



$$\Omega_m = \frac{\frac{1}{k_v}}{1 + \frac{R_a(sI_m + F_m)}{k_v k_t}} G_v V_c - \frac{\frac{R_a}{k_v k_t}}{1 + \frac{R_a(sI_m + F_m)}{k_v k_t}} C_l$$

**Hàm truyền biểu diễn quan hệ
lỗi vào điều khiển và lỗi ra vị trí**

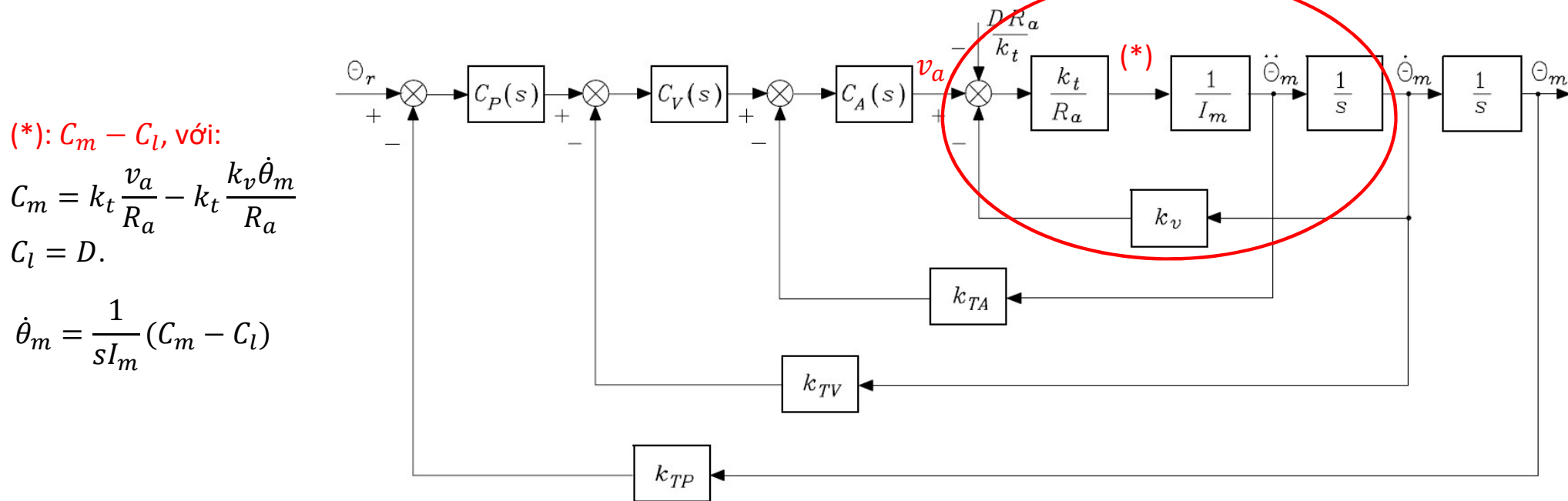
→
$$\Omega_m = \frac{1}{k_v} G_v V_c - \frac{\frac{R_a}{k_v k_t}}{1 + s \frac{R_a I_m}{k_v k_t}} C_l$$

$$M(s) = \frac{k_m}{s(1 + sT_m)}$$

$$k_m = \frac{1}{k_v} \quad T_m = \frac{R_a I_m}{k_v k_t}$$

2.1 Điều khiển phân tán (Khớp độc lập)

- Sơ đồ khối tổng quát của điều khiển khớp đơn, độc lập



- ✓ $C_P(s), C_V(s), C_A(s)$: Bộ điều khiển vị trí, vận tốc, và gia tốc
- ✓ k_{TP}, k_{TC}, k_{TA} : các hằng số đầu đo.
- ✓ Vòng điều khiển trong cùng nên là PI để có SSE=0, với hệ số khuếch đại G_v

$$\theta_r = k_{TP} \theta_m$$