

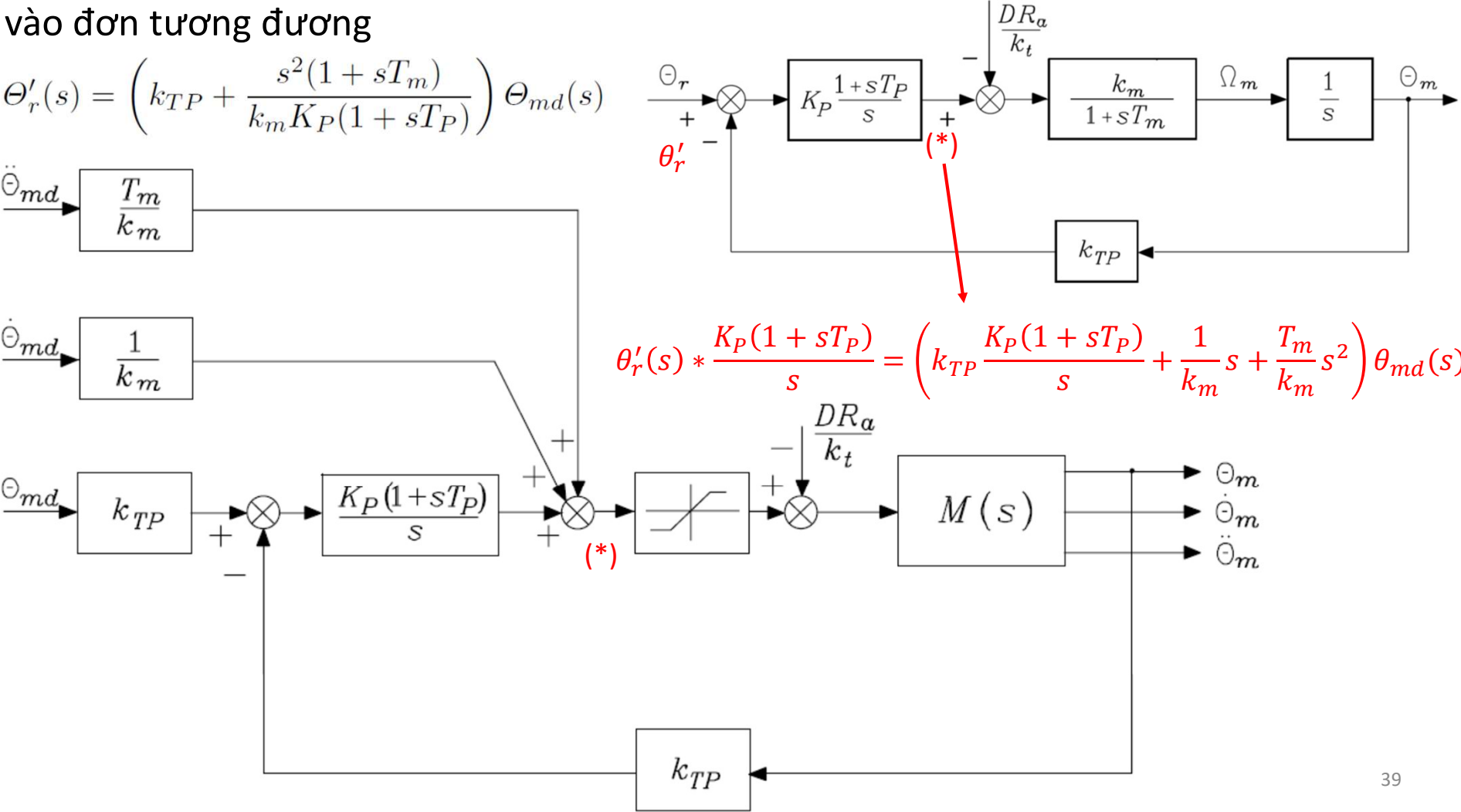
2.2 Bù feedforward phân tán (decentralized feedforward compensation)

- Khi yêu cầu bám quỹ đạo tham chiếu (reference trajectory) với vận tốc và gia tốc lớn, **sơ đồ tổng quá trong slide 19 kém hiệu quả. Sử dụng điều khiển bù feedforward phân tán cho phép giảm lỗi bám quỹ đạo (tracking error)**

- Position feedback + decentralized feedforward action**

Lỗi vào đơn tương đương

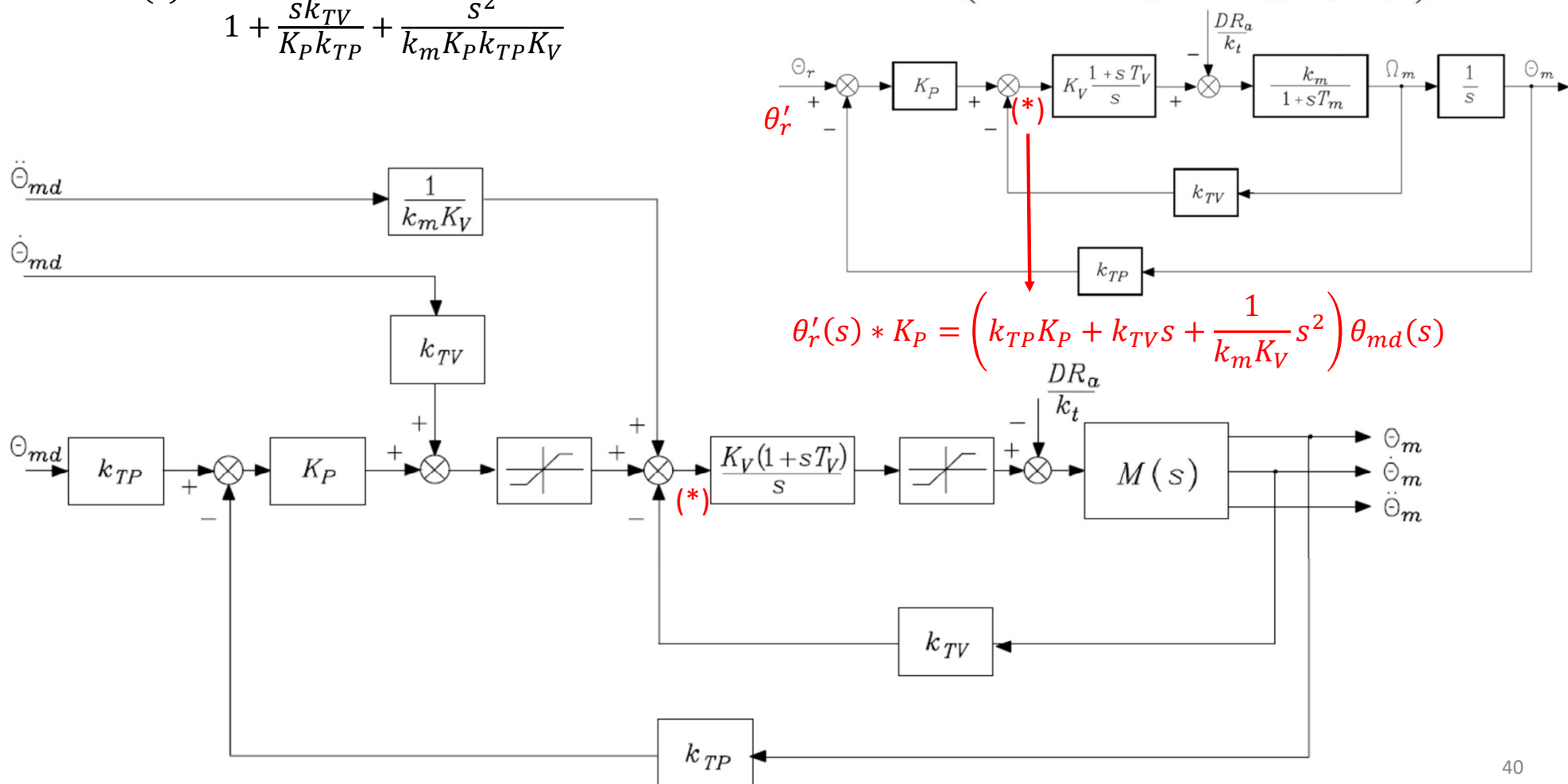
$$\Theta_r'(s) = \left(k_{TP} + \frac{s^2(1 + sT_m)}{k_m K_P(1 + sT_P)} \right) \Theta_{md}(s)$$



- Position and velocity feedback + decentralized feedforward control action

$$W(s) = \frac{\frac{1}{k_{TP}}}{1 + \frac{sk_{TV}}{K_P k_{TP}} + \frac{s^2}{k_m K_P k_{TP} K_V}}$$

$$\Rightarrow \Theta'_r(s) = \left(k_{TP} + \frac{sk_{TV}}{K_P} + \frac{s^2}{k_m K_P K_V} \right) \Theta_{md}(s)$$

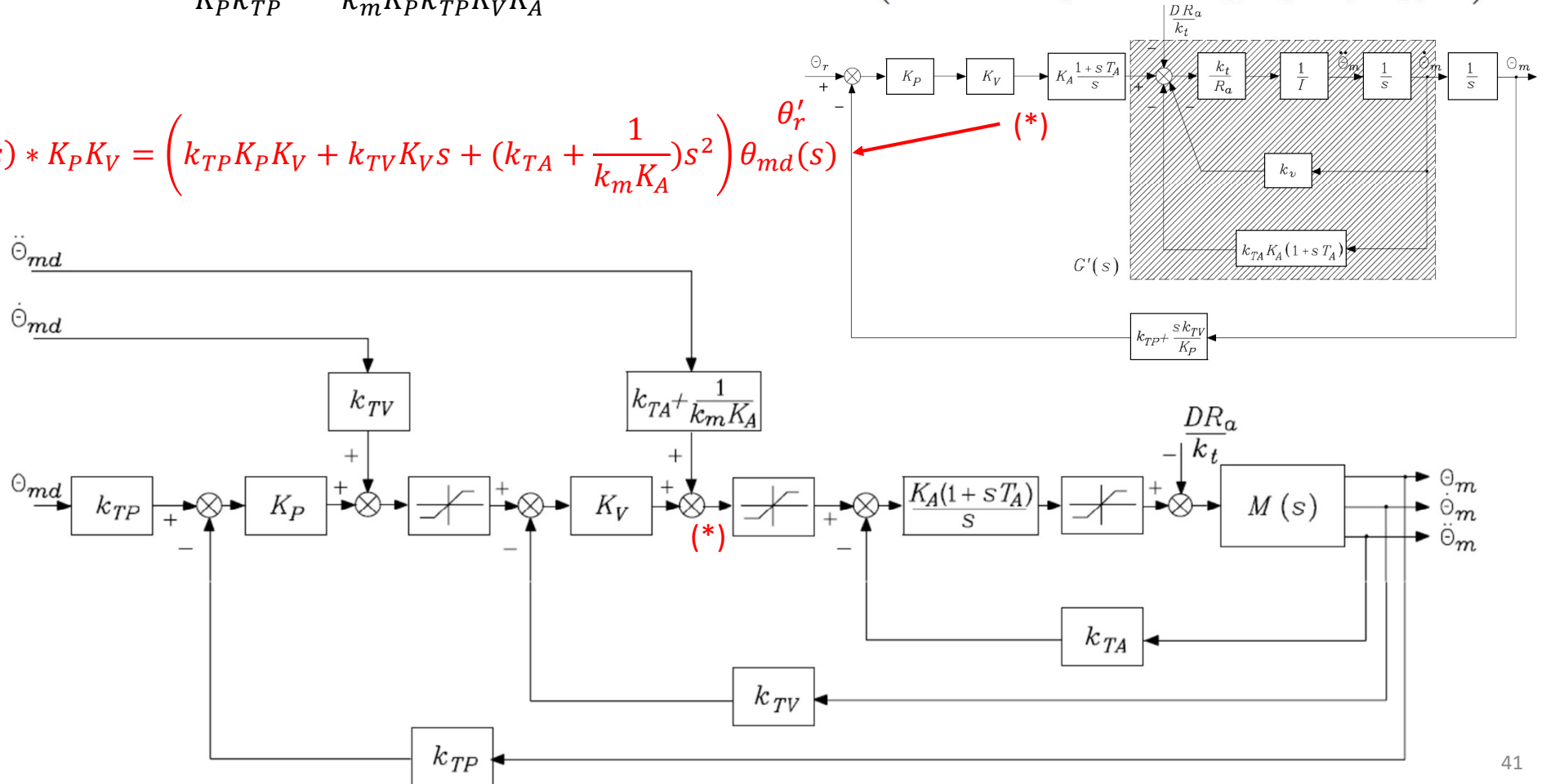


- **Position, velocity and accelerometer feedback + decentralized feedforward control action**

$$W(s) = \frac{1/k_{TP}}{1 + \frac{sk_{TV}}{K_P k_{TP}} + \frac{s^2(1 + k_m K_A k_{TA})}{k_m K_P k_{TP} K_V K_A}}$$

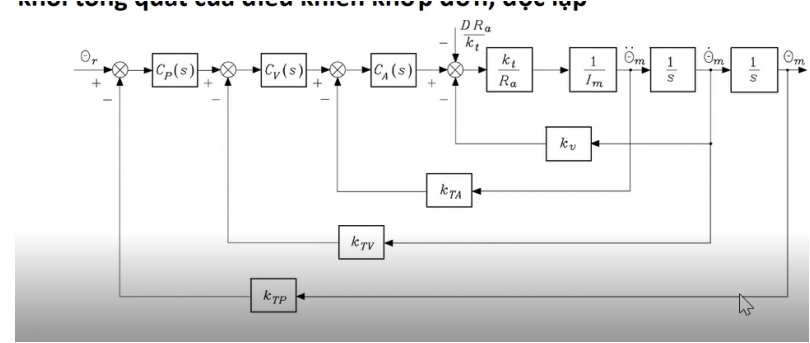
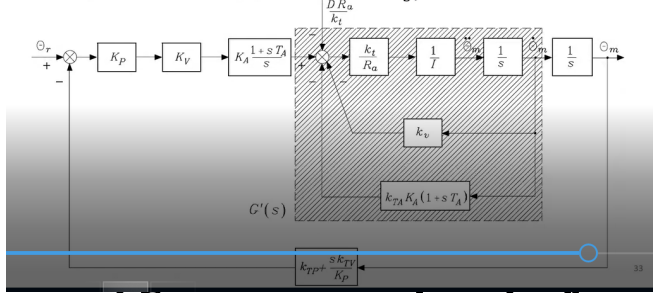
$$\Rightarrow \Theta'_r(s) = \left(k_{TP} + \frac{sk_{TV}}{K_P} + \frac{s^2(1 + k_m K_A k_{TA})}{k_m K_P K_V K_A} \right) \Theta_{md}(s)$$

$$\Theta'_r(s) * K_P K_V = \left(k_{TP} K_P K_V + k_{TV} K_V s + \left(k_{TA} + \frac{1}{k_m K_A} \right) s^2 \right) \Theta_{md}(s) \quad (*)$$



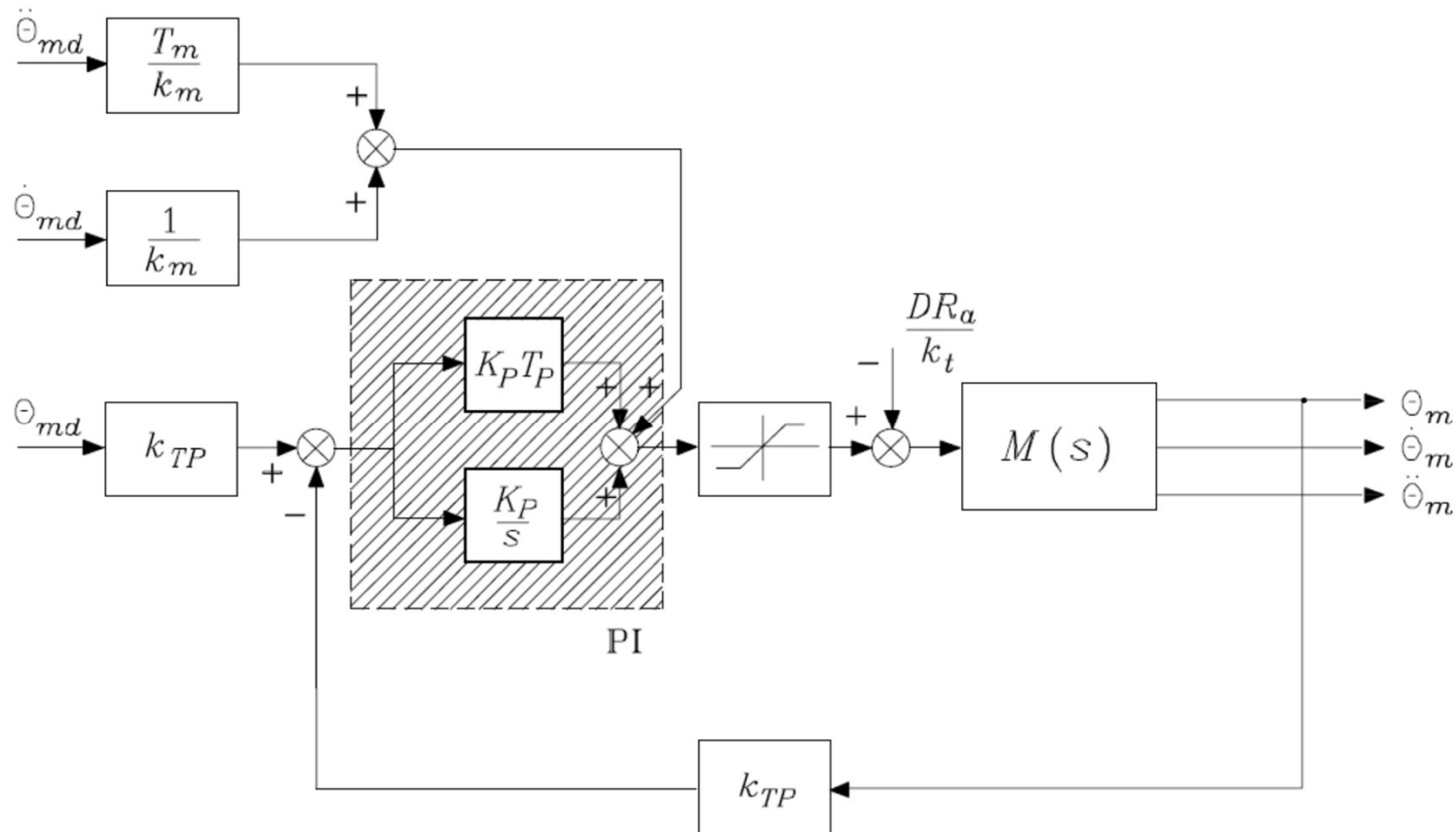
- Phản hồi vị trí, vận tốc và gia tốc (Position, velocity and acceleration feedback)

$$C_P(s) = K_P; C_V(s) = K_V; C_A(s) = K_A \frac{1+sT_A}{s}$$



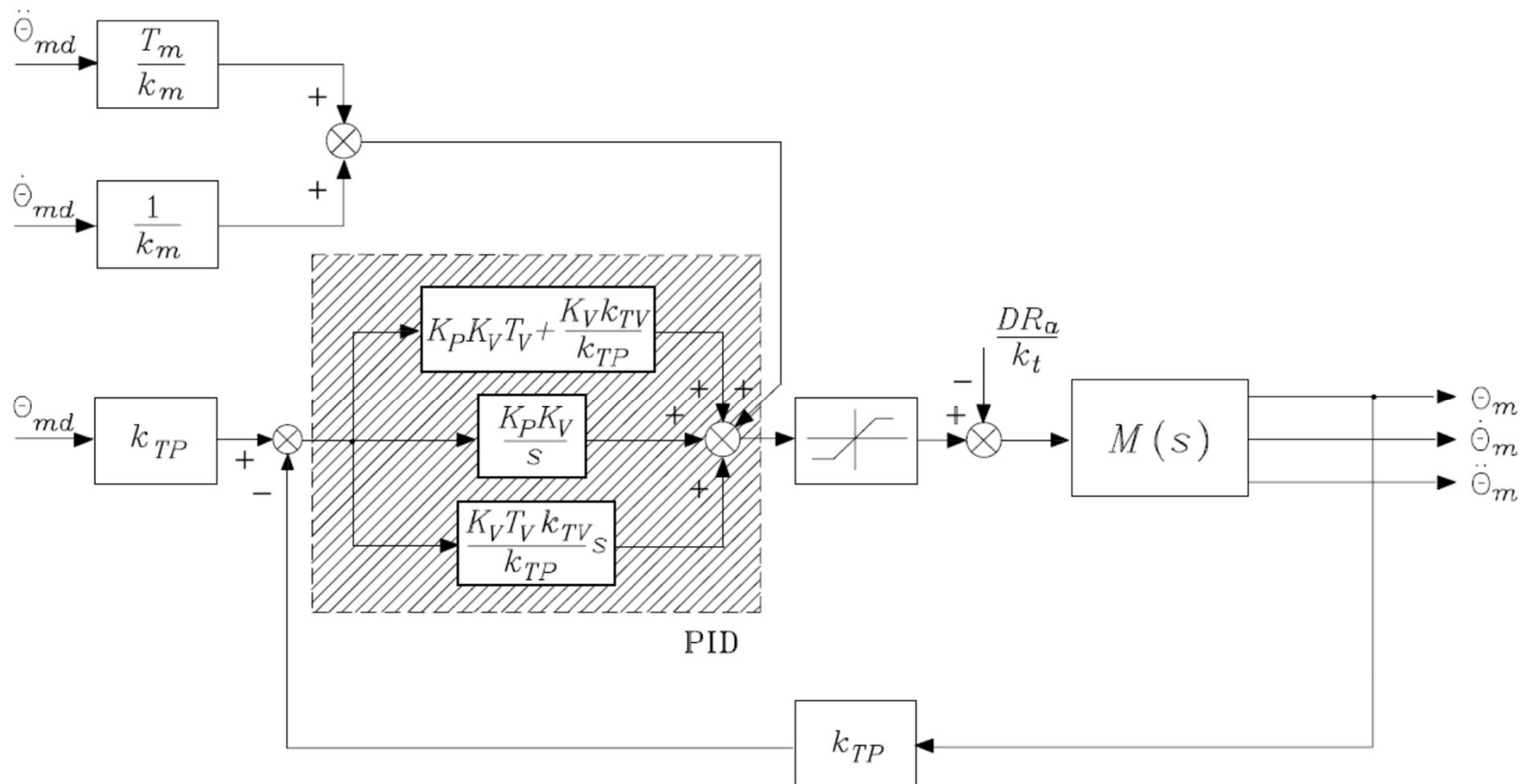
2.2 Bù feedforward phân tán (decentralized feedforward compensation)

- Sơ đồ điều khiển tương đương với điều khiển phản hồi vị trí dùng PI



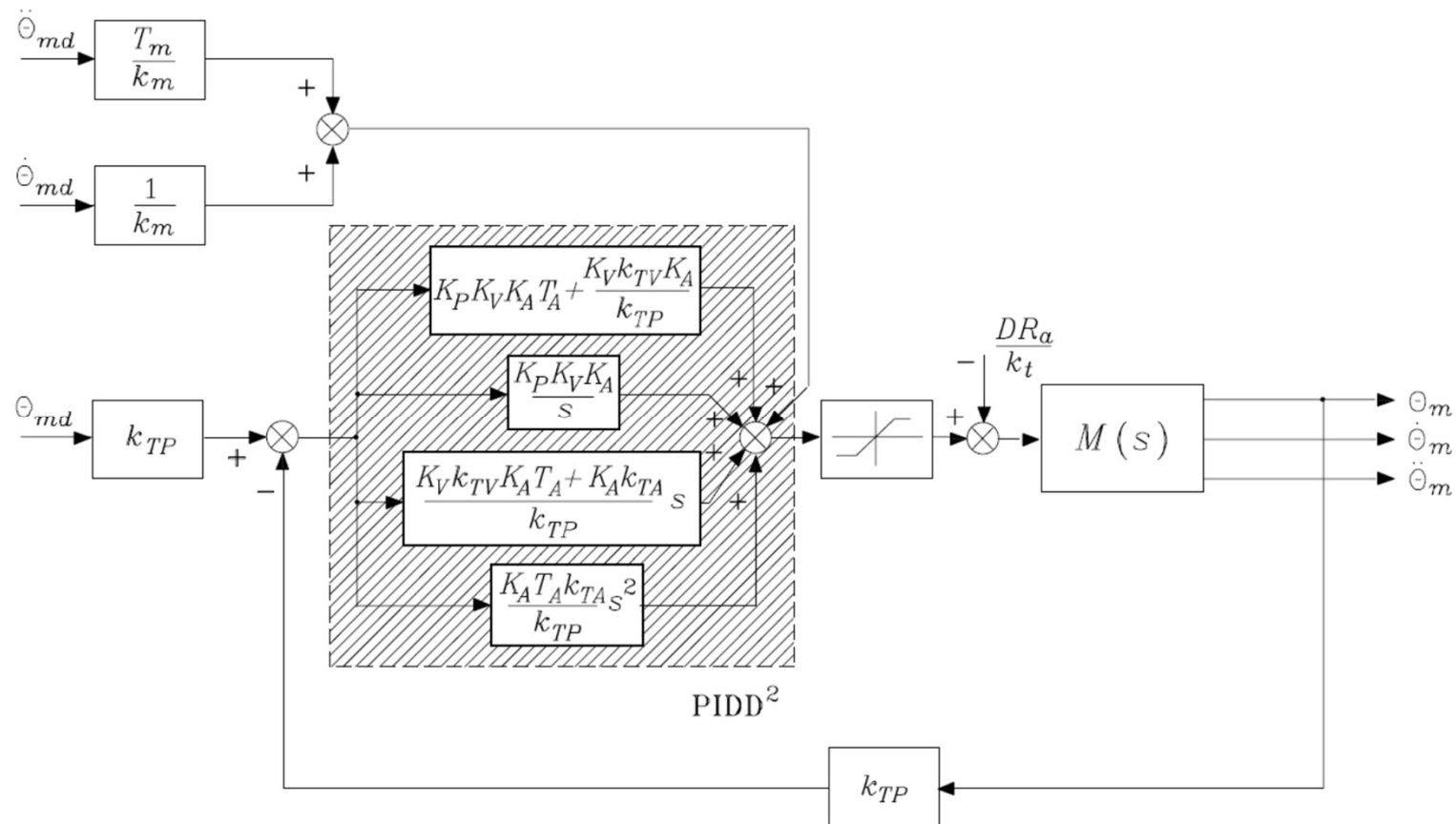
2.2 Bù feedforward phân tán (decentralized feedforward compensation)

- Sơ đồ điều khiển tương đương với điều khiển phản hồi vị trí dùng PID

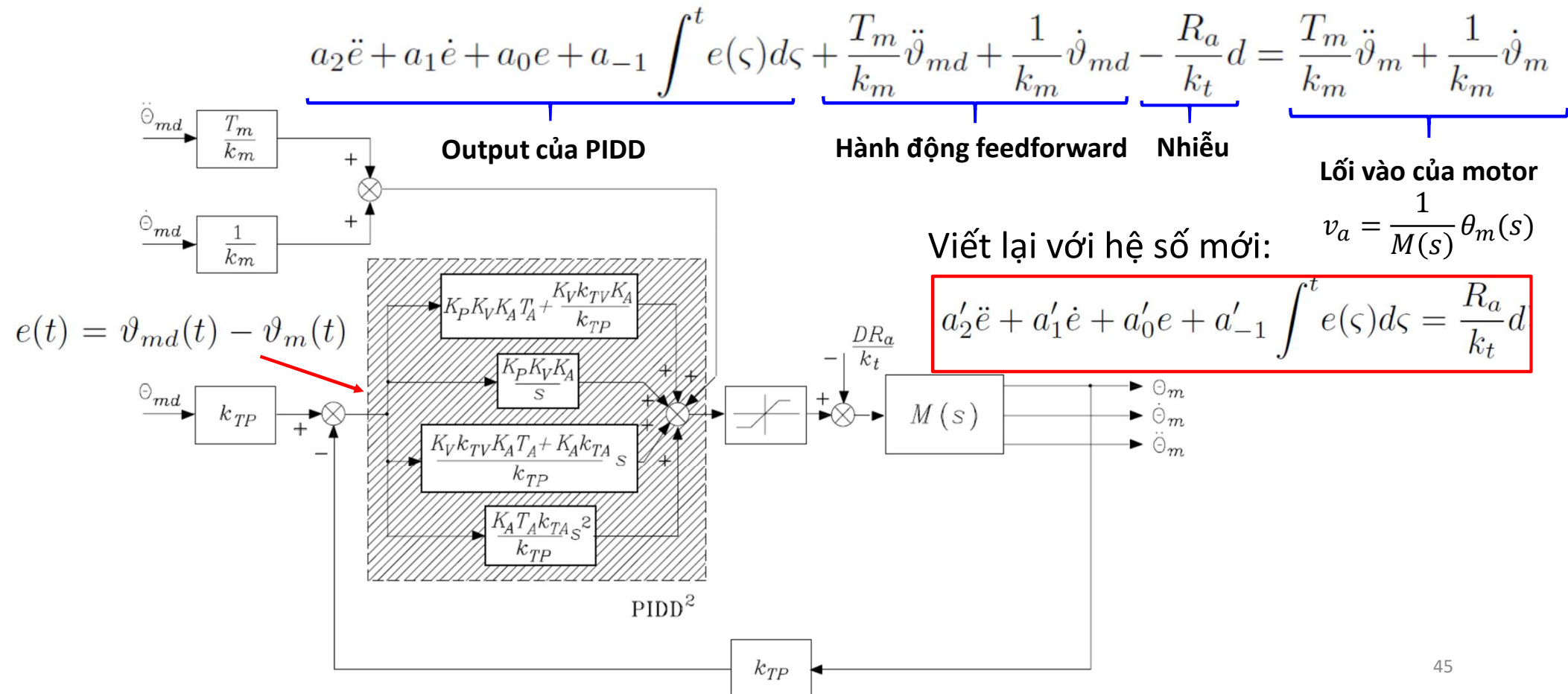


2.2 Bù feedforward phân tán (decentralized feedforward compensation)

- Sơ đồ điều khiển tương đương với điều khiển phản hồi vị trí dùng PIDD



2.3 Điều khiển feedforward tính toán mô men lực



2.3 Điều khiển feedforward tính toán mô men lực

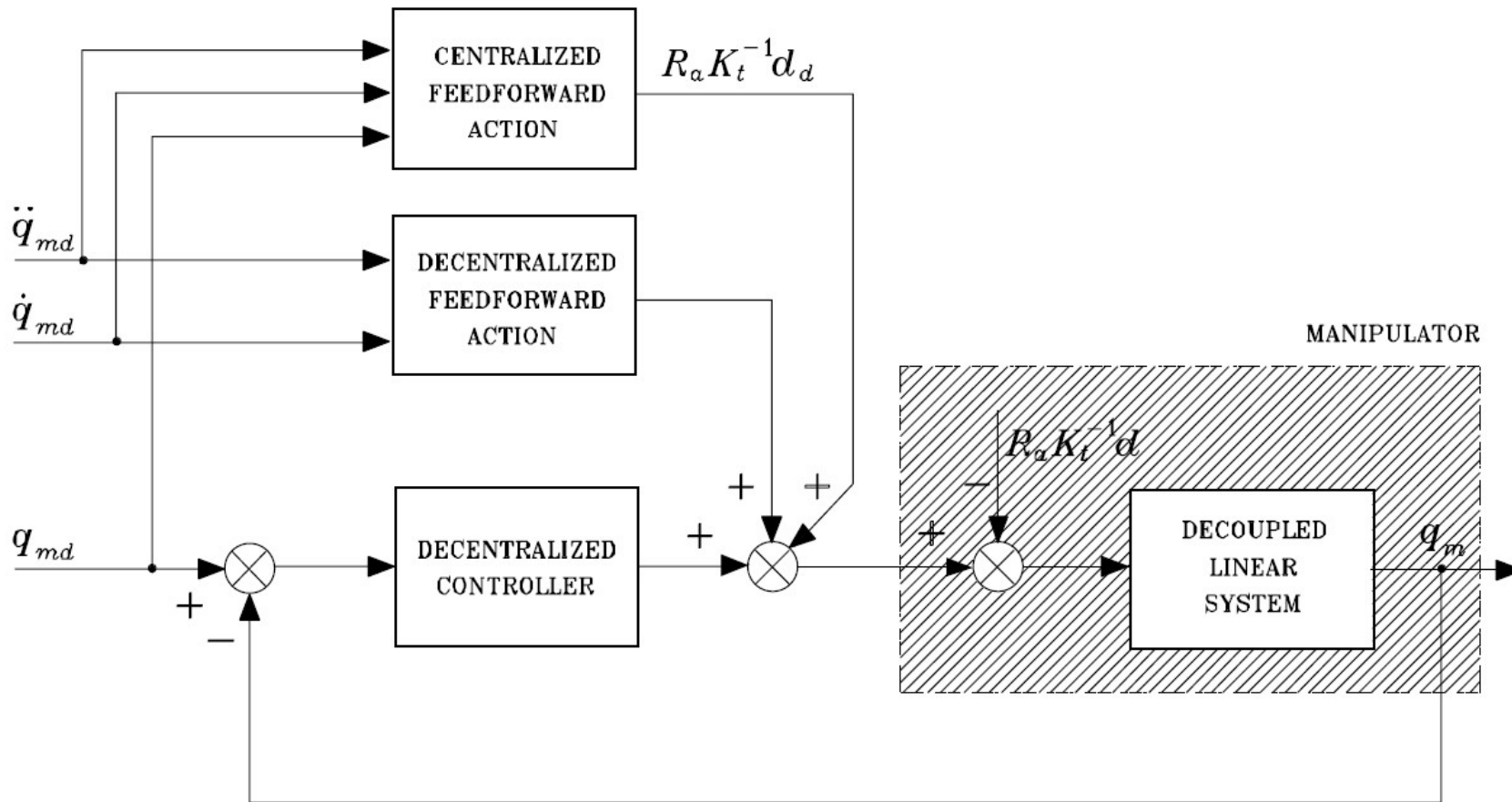
$$a'_2 \ddot{e} + a'_1 \dot{e} + a'_0 e + a'_{-1} \int^t e(\varsigma) d\varsigma = \frac{R_a}{k_t} d$$

- Nếu $d(t) = 0$, phương trình này chỉ ra rằng lỗi tiệm cận bằng 0 với tất cả các quỹ đạo khả thi, tức là mức bão hòa các đại lượng vật lý như dòng điện, điện áp trên động cơ điện không bị vi phạm khi thực hiện quỹ đạo mong muốn
- Nếu $d(t) \neq 0$, hàm truyền nhiễu – lỗi ra là: $\frac{E(s)}{D(s)} = W(s) = \frac{\frac{R_A}{k_t} s}{a'_2 s^3 + a'_1 s^2 + a'_0 s + a'_{-1}}$

Biên độ lỗi giảm nhiều khi tần số nhiễu nhỏ hơn băng thông của hệ thống $W(s)$ (tức là chuyển động chậm).

2.3 Điều khiển feedforward tính toán mô men lực

$$d_d = K_r^{-1} \Delta B(q_d) K_r^{-1} \ddot{q}_{md} + K_r^{-1} C(q_d, \dot{q}_d) K_r^{-1} \dot{q}_{md} + K_r^{-1} g(q_d)$$



2.4 Điều khiển tập trung

- Điều khiển phân tán:
 - Hệ thống điều khiển single input/single output
 - Các yếu tố tương tác, liên kết giữa các khớp -> nhiễu lên hệ thống dẫn động
- Khi hoạt động ở tốc độ lớn hoặc cơ cấu chấp hành sử dụng dẫn động trực tiếp ($K_r = I$), các liên kết phi tuyến ảnh hưởng lớn đến hệ thống.
⇒ Việc coi là nhiễu tạo ra sai số bám quỹ đạo lớn
⇒ Cần thuật toán điều khiển tận dụng các hiểu biết về mô hình động lực học để bù đắp lỗi liên kết phi tuyến.
- Phương pháp điều khiển phân tán -> Giảm tác động nhiễu
- Phương pháp điều khiển tập trung -> Loại bỏ nhiễu dựa vào nguyên nhân gây nhiễu (hiểu biết một phần hoặc toàn bộ về mô hình)

2.4 Điều khiển tập trung

- Tay máy -> Hệ hống đa biến với n đầu vào mô men lực khớp (Joint Torques) và n đầu ra vị trí khớp (Joint Position), tương tác giữa chúng bởi các quan hệ phi tuyến (nonlinear relations)
 - => Hệ thống phi tuyến đa biến (Nonlinear Multivariable System)
 - => Luật điều khiển tập trung phi tuyến (Nonlinear Centralized control law)
- Điều khiển tính toán mô men (Computed Torque Control):
 - Xác định luật điều khiển \mathbf{u} đảm bảo hiệu suất cho trước
 - $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{u} = \mathbf{K}_r \mathbf{K}_t \mathbf{G}_i \mathbf{v}_c$
- **Các điều khiển tập trung**
 - Điều khiển PD bù trọng lực
 - Điều khiển động lực học ngược
 - Điều khiển bền vững (Robust control)
 - Điều khiển thích nghi (Adaptive control)

Điều khiển PD bù trọng lực (PD control with gravity compensation)

- Trạng thái cân bằng bền của hệ thống có biến khớp mong muốn q_d .
- Tìm cấu trúc điều khiển đảm bảo ổn định tiệm cận toàn cục cho trạng thái cân bằng.
- Chọn hàm ứng viên Lyapunov (Lyapunov function candidate):

$$V(\dot{q}, \tilde{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T B(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_P \tilde{q} > 0 \quad \forall \dot{q}, \tilde{q} \neq 0$$

- Lấy đạo hàm theo thời gian, với lưu ý q_d là hằng số.

$$\dot{V} = \dot{q}^T B(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{B}(q) \dot{q} - \dot{q}^T K_P \tilde{q}$$

Lưu ý: $B(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F \dot{q} + g(q) = u \rightarrow B(q) \ddot{q} = u - C(q, \dot{q}) \dot{q} - F \dot{q} - g(q)$

$$\Rightarrow \dot{V} = \frac{1}{2} \dot{q}^T (\dot{B}(q) - 2C(q, \dot{q})) \dot{q} - \dot{q}^T F \dot{q} + \dot{q}^T (u - g(q) - K_P \tilde{q})$$

Điều khiển PD bù trọng lực (PD control with gravity compensation)

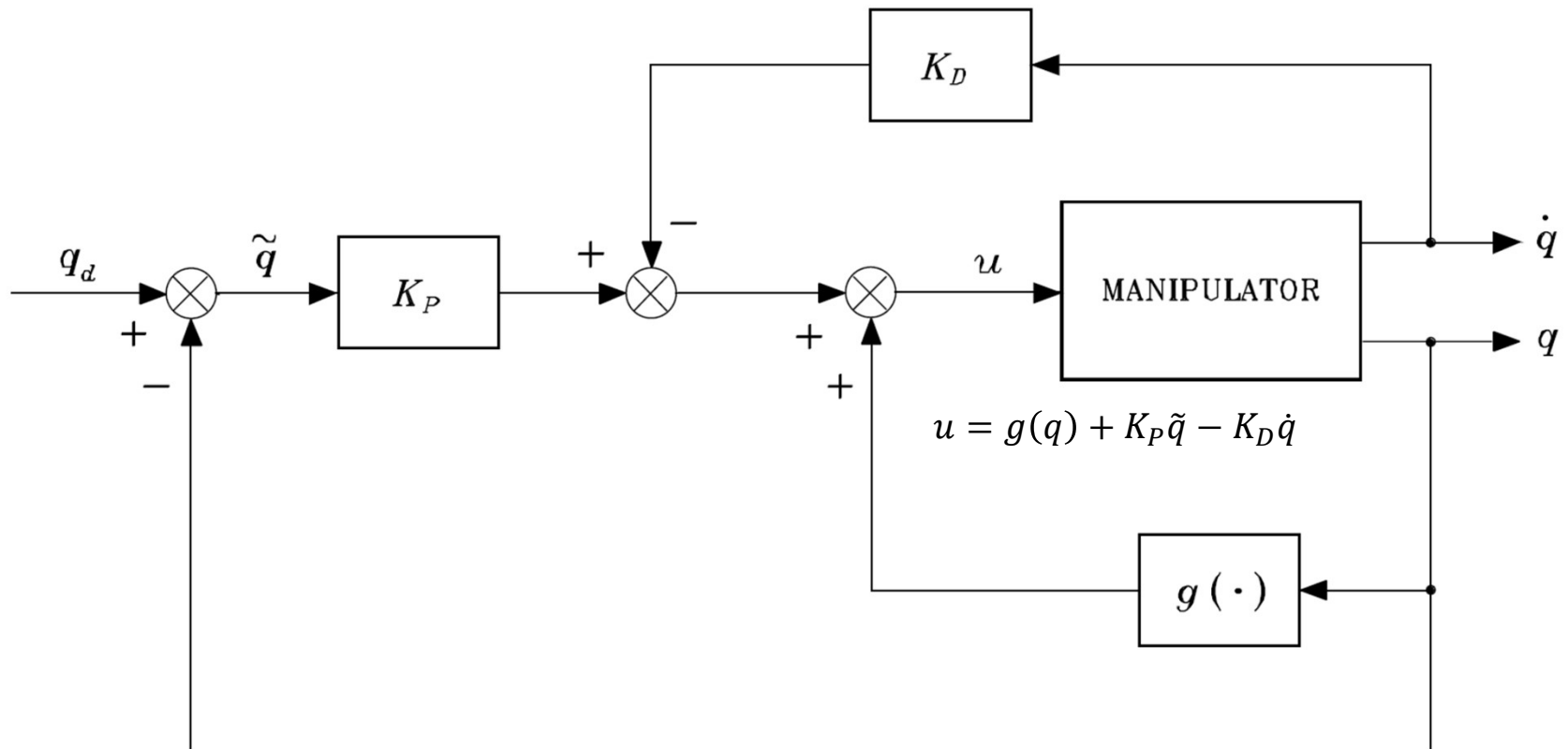
$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{q}^T \underbrace{(\dot{B}(q) - 2C(q, \dot{q}))}_{N = \dot{B} - 2C = 0} \dot{q} - \underbrace{\dot{q}^T F \dot{q}}_{\text{Xác định âm}} + \dot{q}^T \underbrace{(u - g(q) - K_P \tilde{q})}_{\text{Chọn: } u = g(p) + K_P \tilde{q} \text{ để } \dot{V} \leq 0 \text{ (Bán xác định âm)}}$$

- Luật điều khiển: $u = g(q) + K_P \tilde{q} - K_D \dot{q}$ (*)
 ✓ K_D xác định dương, tác dụng bù phi tuyến trọng lực (nonlinear compensation action of gravitational term).
 $\Rightarrow \dot{V} = -\dot{q}^T (F + K_D) \dot{q}$
- Hệ thống tiệm cận trạng thái cân bằng (ổn định) khi $\dot{V} = 0$ (nếu $\dot{q} = 0$)
 Phương trình động lực học khi áp dụng luật điều khiển (*):

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) = g(q) + K_P \tilde{q} - K_D \dot{q}$$

Cân bằng $\dot{q} \equiv 0, \ddot{q} \equiv 0: \Rightarrow K_P \tilde{q} = 0$, tức là: $q = q_d$

Điều khiển PD bù trọng lực (PD control with gravity compensation)



Sơ đồ khối điều khiển PD không gian khớp bù trọng lực

Điều khiển động lực học ngược (Inverse Dynamics Control)

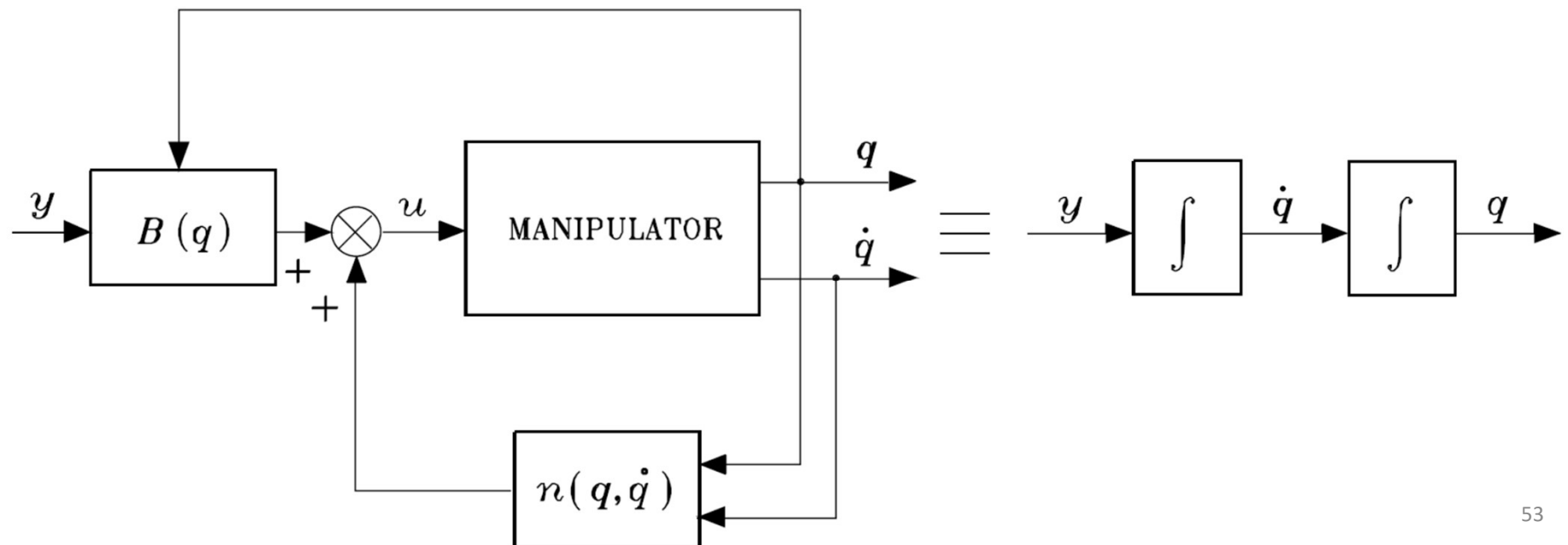
- Hệ thống đa biến phi tuyến: **Nonlinear MIMO system**

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = u \quad (*)$$

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q)$$

- Lấy u là một hàm trạng thái của tay máy: **=> Linear MIMO system**

$$u = B(q)y + n(q, \dot{q}), \text{ với } y = \ddot{q} \quad (**)$$



Điều khiển động lực học ngược (Inverse Dynamics Control)

- Bài toán điều khiển tay máy trở thành bài toán tìm luật điều khiển ổn định cho lỗi vào mới y .

- Chọn: $y = -K_P q - K_D \dot{q} + r$

$$\Rightarrow \ddot{q} + K_D \dot{q} + K_P q = r$$

Ổn định tiệm cận nếu các ma trận K_P, K_D xác định dương

- Nếu K_P, K_D là các ma trận đường chéo bởi:

$$K_P = \text{diag}\{\omega_{ni}^2\} \text{ và } K_D = \text{diag}\{2\zeta_i \omega_{ni}\}$$

thì thành phần tham chiếu r_i chỉ ảnh hưởng tới biến khớp q_i với tần số riêng ω_{ni} và hệ số tắt dần ζ_i .

- Cho trước quỹ đạo $q_d(t)$, có thể được bám theo bằng việc thỏa mãn:

$$\ddot{q}_d + K_D \dot{q}_d + K_P q_d = r$$

Điều khiển động lực học ngược (Inverse Dynamics Control)

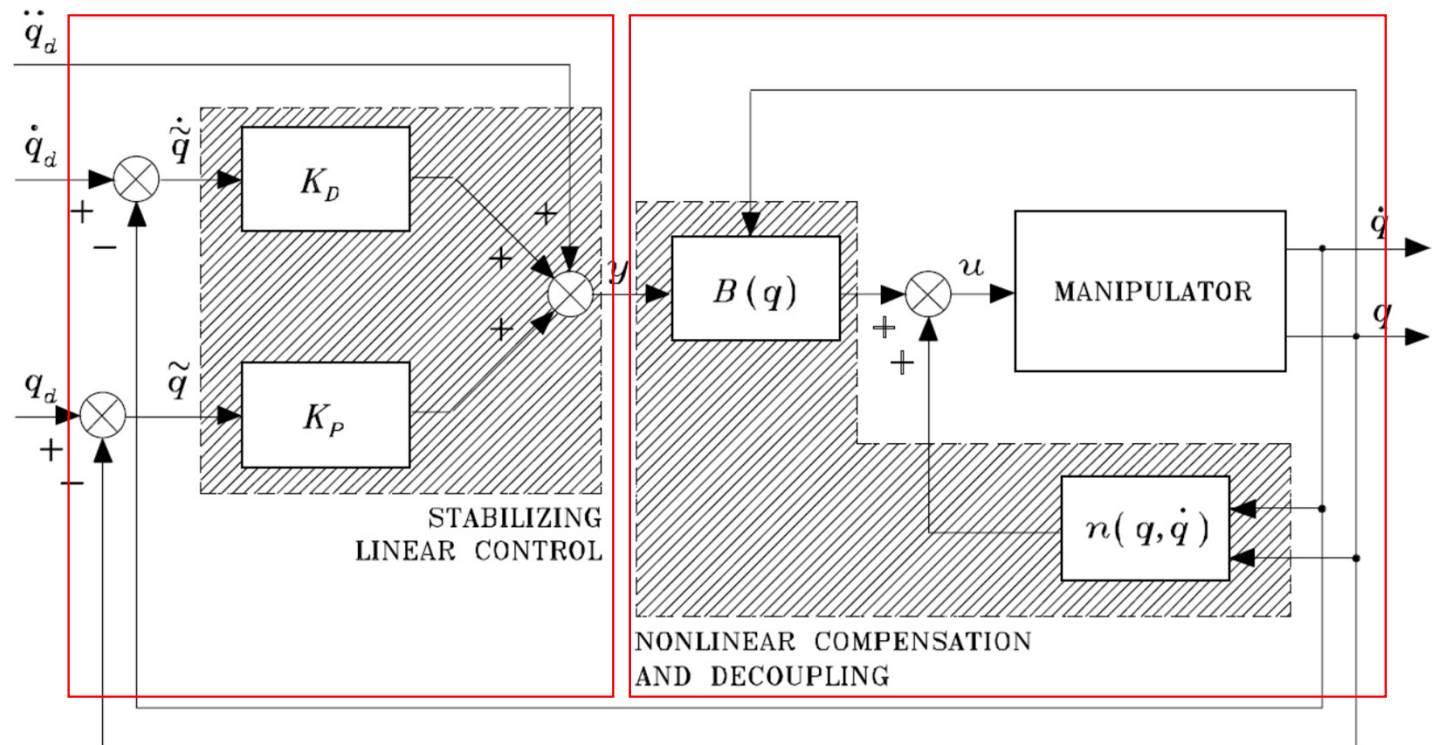
- Biến động lỗi vị trí (Position error) được biểu diễn bởi:

$$\ddot{\tilde{q}} + K_D \dot{\tilde{q}} + K_P \tilde{q} = 0$$

Lỗi này bằng 0 chỉ nếu $\tilde{q}(0) \neq 0$ và/hoặc $\dot{\tilde{q}}(0) \neq 0$ và hội tụ tới 0 với tốc độ phụ thuộc vào K_P, K_D .

Sơ đồ khối điều khiển động lực học ngược không gian khớp

- Hệ thống phản hồi trạng thái nên $B(q), C(q, \dot{q}), F, g(q)$ phải được tính toán theo thời gian thực
- Hai vòng phản hồi:
 - ✓ Vòng trong: dựa trên mô hình động lực học tay máy, phản hồi phi tuyến trạng thái, cung cấp mô hình tuyến tính (linear) và tách biệt (decoupled) giữa y và q thông qua tích phân kép.
 - ✓ Vòng ngoài: hoạt động bám lỗi, được sử dụng để ổn định toàn bộ hệ thống; thiết kế của vòng loop ngoài tương đối đơn giản vì nó hoạt động trên hệ thống tuyến tính.



Điều khiển động lực học ngược (Inverse Dynamics Control)

- Kỹ thuật bù phi tuyến và tách rời (linear compensation and decoupling): Hệ thống phi tuyến MIMO => Hệ thống tuyến tính IMO bậc hai độc lập.
- Yêu cầu biết chính xác mô hình tay máy
- Tính toán hoàn toàn theo thời gian thực (real-time)
- Các kỹ thuật có thể bù lỗi mô hình:
 - **Robust control (điều khiển bền vững)**
 - **Adaptive control (điều khiển thích nghi)**