
Nichtlineare Beobachter: Kollisions- und Fehlerdetektion

- Sichere, zuverlässige physische Mensch-Roboter Interaktion
- Erhöhung der Reglerperformanz (z.B. Bahngenauigkeit oder Nachgiebigkeit) durch Reibungskompensation

Allgemeiner Zugang zur sicheren Mensch-Roboter Interaktion:

- leichte, nachgiebige mechanische Konstruktion
- Benutzung zusätzlicher Sensoren (z.B. Kamera, Näherungssensoren...
- Mensch-zentrierte Bewegungsplanung
- sichere, robuste Regelungsstrategien
- Prevention, Vorhersage, **Erkennung und Handhabung von Kollisionen**

Kollision als Systemfehler

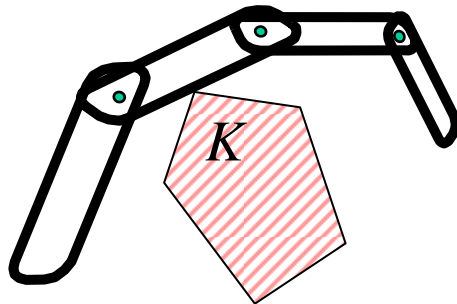
- Robotermodell:

- Kollisionskraft
- Reibmoment
- Gelenkausfall

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_K \dots$$

Bei externer Kollision: $\tau_K = J_K^T(q)F_K$

transponierte Jacobimatrix
im Kontaktpunkt K

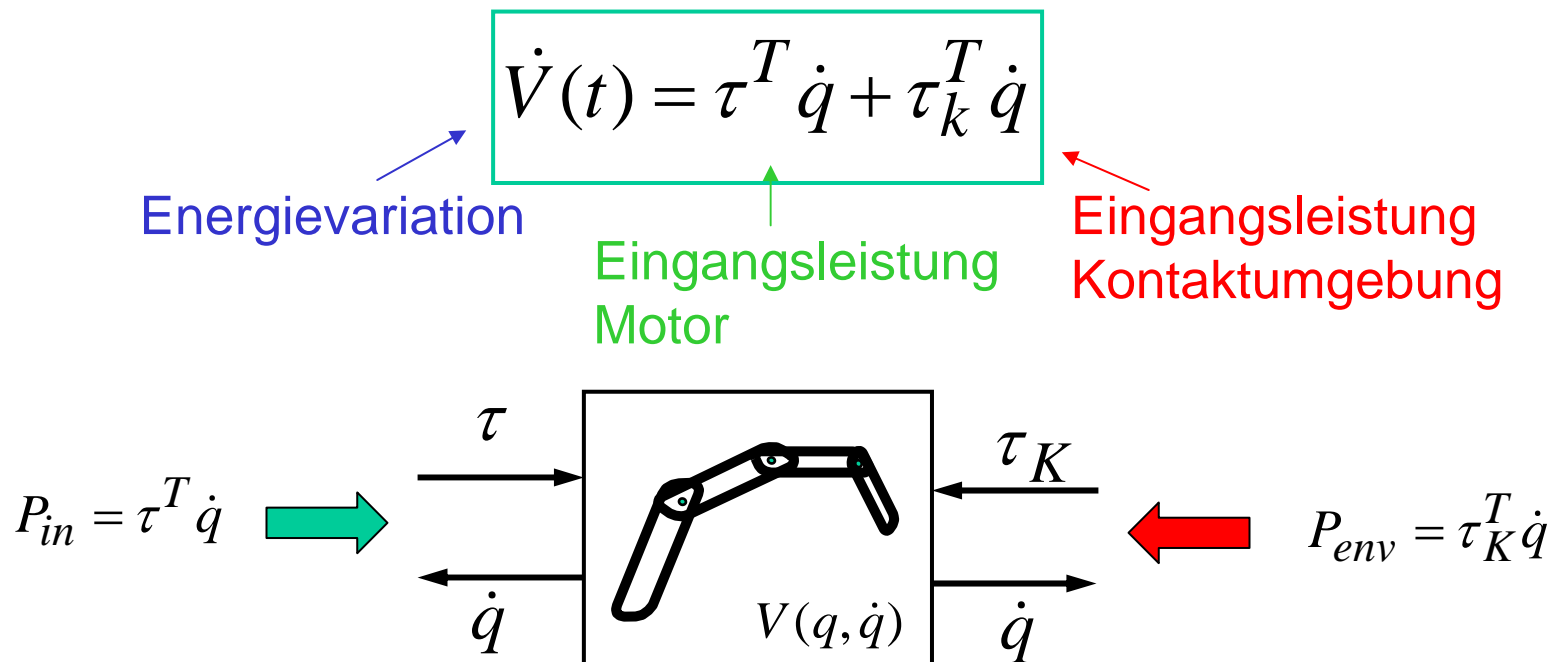


- Benutzung der robotereigenen Sensoren (Position, evtl. Moment)
- Kontakt an beliebigem, unbekanntem Punkt des Roboters
- Vereinfachende Annahmen
 - ein einziger Kontakt
 - Roboter ist eine offene kinematische Kette

Roboter: Passive Darstellung

Energie:
$$V(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + V_g(q)$$

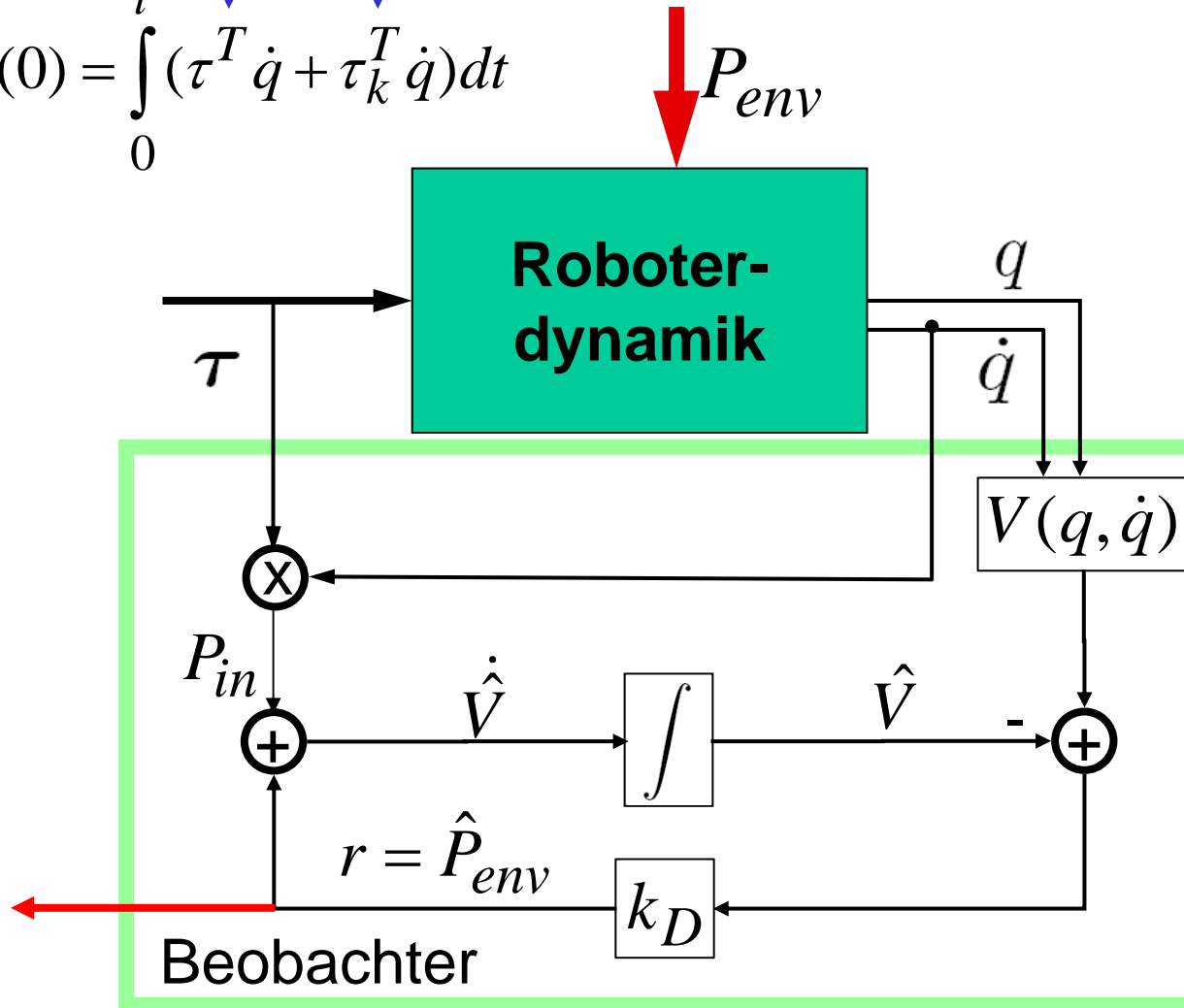
Roboterdynamik:
$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_K$$



Energiebasierte Kollisionsdetektion

Integralform:

$$V(t) - V(0) = \int_0^t (\tau^T \dot{q} + \tau_k^T \dot{q}) dt$$



Energiebasierte Kollisionsdetektion

- Skalare Störgrößendetektion (Leistungsbeobachter)

$$\hat{P}_{env}(t) = k_D \left[V(t) - \int_0^t (P_{in}(\xi) + \hat{P}_{env}(\xi)) d\xi - V(0) \right]$$

$$\hat{P}_{env}(0) = 0, \quad k_D > 0$$

- Durch Differentiation und einsetzen von $\dot{V}(t)$ resultiert die (lineare) Dynamik des Beobachters

$$\dot{\hat{P}}_{env} + k_D \hat{P}_{env} = k_D P_{env}$$

Analyse der Energiebasierten Methode

- sehr einfach (skalar)
- Es können nur Kontaktkräfte detektiert werden, die mechanische Leistung gegen die Kontaktgeschwindigkeit umsetzen

Wenn

$$\tau_K^T \dot{q} = F_K^T V_K = 0 \quad \text{d.h. } F_K \text{ und } V_K \text{ reziprok}$$

wird keine Leistung zugefügt, also wird auch keine Kollision detektiert.

(z.B. beim Drücken gegen den still stehenden Roboter)

Mögliche Ansätze zur Beobachtung der Kontaktkraft

1. $\tau_d \leftrightarrow \tau$: Vergleich der Momente entlang der Solltrajektorie mit Motormomenten

$$\tau_d = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q_d)$$

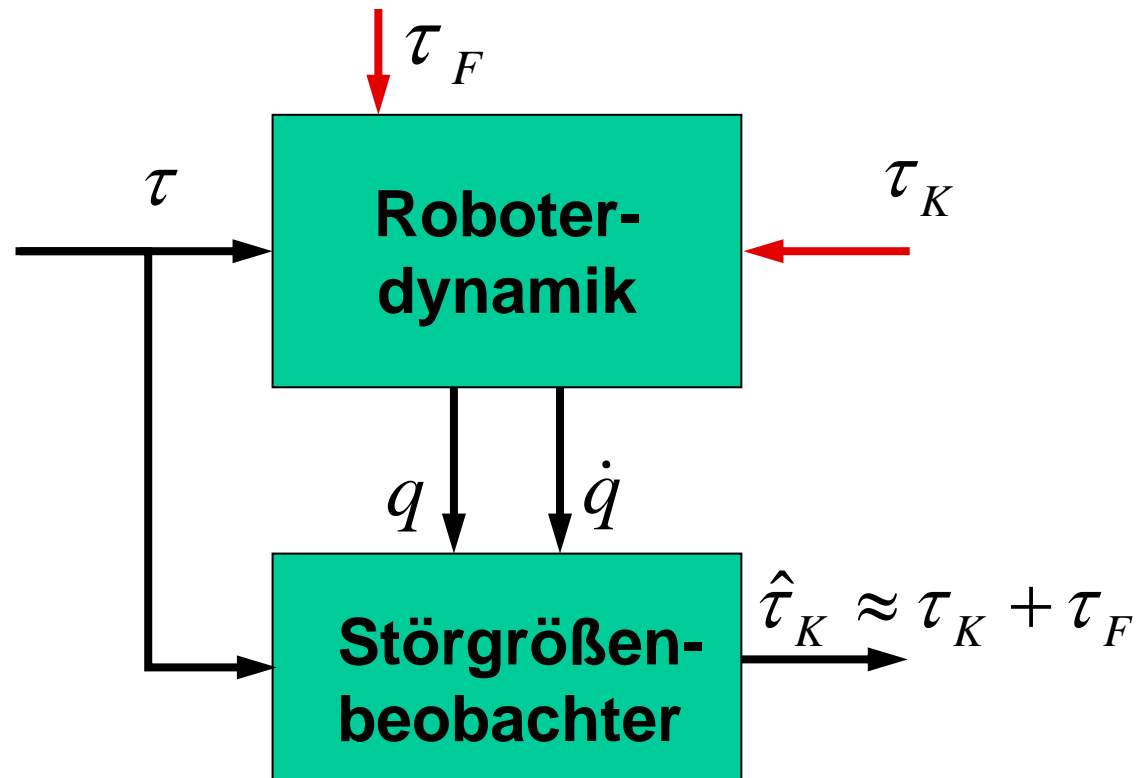
Nachteil: Reglerdynamik nicht berücksichtigt

2. $\tau_M \leftrightarrow \tau_J$: Vergleich der Momente entlang der realen Trajektorie mit Motormomenten

$$\ddot{q}_N = \frac{d\dot{q}}{dt} \quad \tau_M = M(q)\ddot{q}_N + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

Nachteil: verrauschtes Beschleunigungssignal

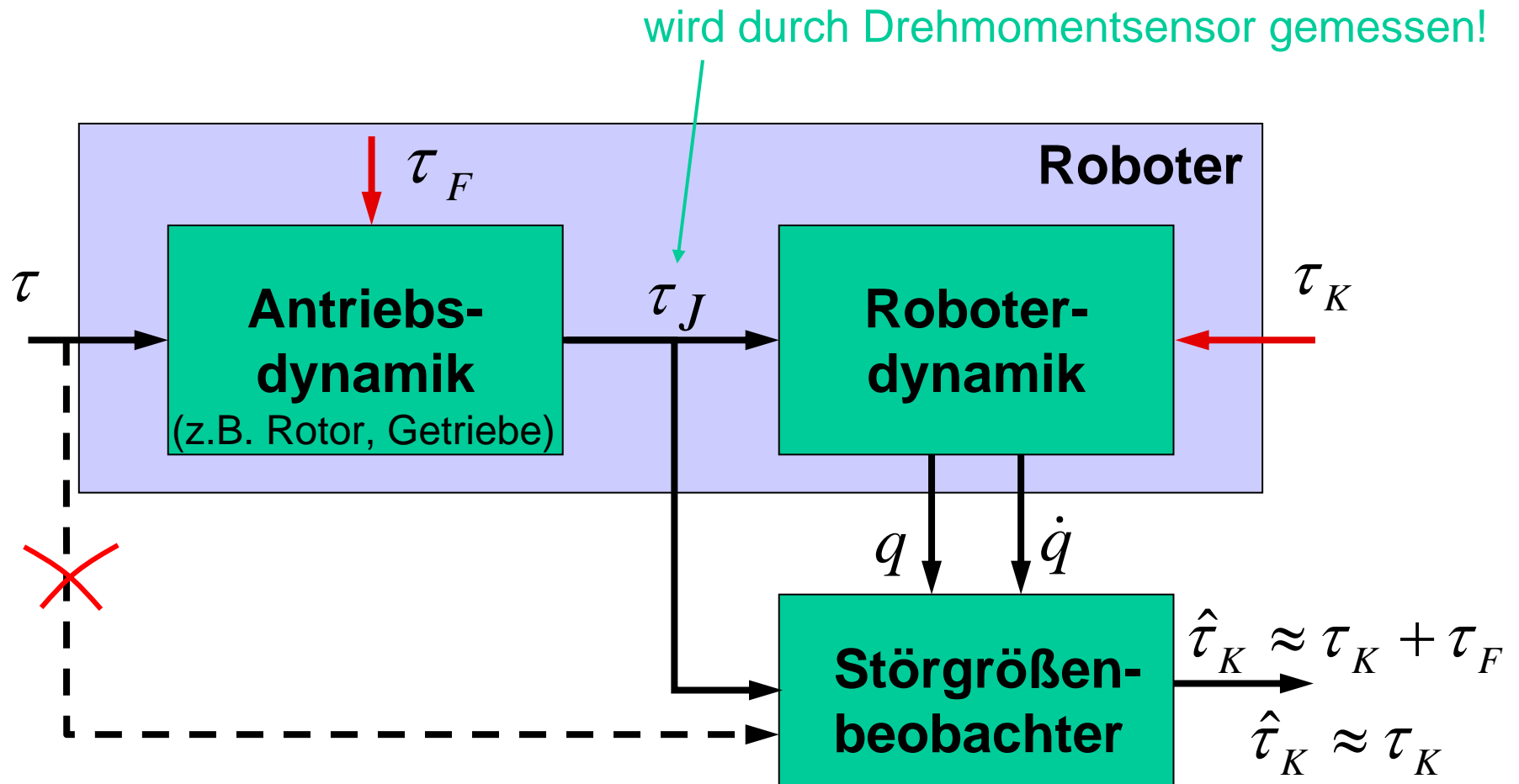
Beobachtung des Störmoments



Man kann nur Summe von Reibmoment und externem Moment beobachten

Diese Struktur kann zur Reibungskompensation eingesetzt werden, nur wenn der Roboter nicht in Kontakt mit der Umgebung ist.

Kollisiondetektion mit Drehmomentsensor



Impulsgleichung

Impuls:

$$p = M(q)\dot{q}$$

$$\dot{p} = M(q)\ddot{q} + \dot{M}(q)\dot{q}$$

$$\Downarrow \dot{M} = C + C^T$$

$$\dot{p} = \underline{M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q}} + C^T(q, \dot{q})\dot{q}$$

Durch Einsetzen der Dynamik-Gleichung

$$\underline{M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q}} + g(q) = \tau_{tot}$$

$$\tau_{tot} = \tau + \tau_k$$

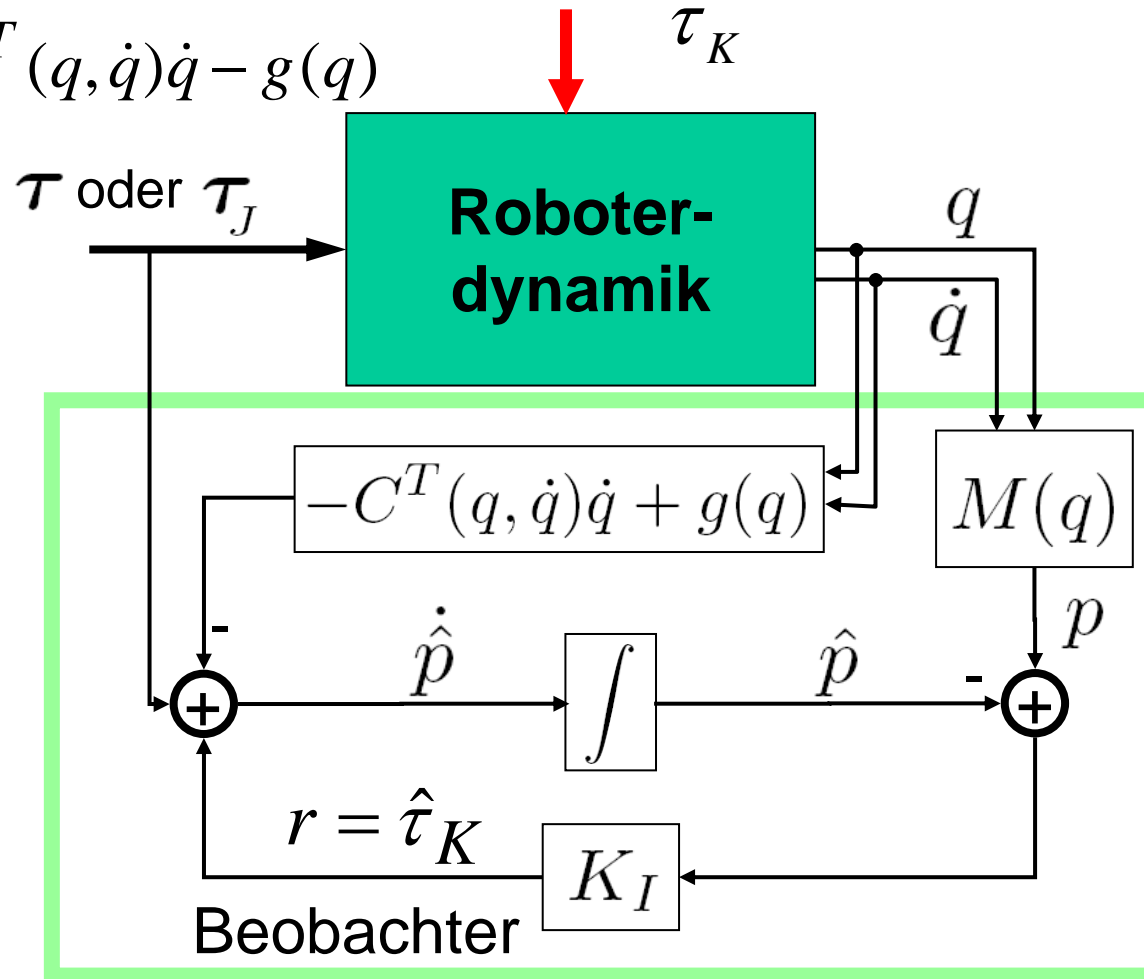
folgt die Impulsgleichung

$$\dot{p} = \tau_{tot} + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)$$

entkoppelter Zusammenhang

Impulsbasierte Kollisionsdetektion

$$\dot{p} = \tau + \tau_k + C^T(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)$$



$$\hat{\tau}_k(t) = K_I \left[p(t) - \int_0^t (\tau + \hat{\tau}_k + C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)) dt - p(0) \right]$$

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_k(0) &= 0 \\ K_I &> 0, \text{ diagonal} \end{aligned}$$

Beobachterdynamik

durch Differentiation erhält man

$$\dot{\hat{\tau}}_k(t) = K_I [\dot{p}(t) - (\tau + \hat{\tau}_k + C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q))]$$

da aber

$$\dot{p}(t) = \tau + \tau_k + C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)$$

=> lineare, entkoppelte Dynamik (stabiles TP Filter erster Ordnung)

$$\dot{\hat{\tau}}_k(t) + K_I \hat{\tau}_k = K_I \tau$$

oder im Laplace-Bereich:

$$\hat{\tau}_{k i}(s) = \frac{\tau_i(s)}{\frac{1}{K_{Ii}} s + 1}$$

Analyse Impulsbasierte Methode

- idealer Fall (kein Rauschen)

$$K_I \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad \hat{\tau}_K \approx \tau_K$$

- Lokalisierung: Kollision findet **oberhalb von Gelenk i** statt

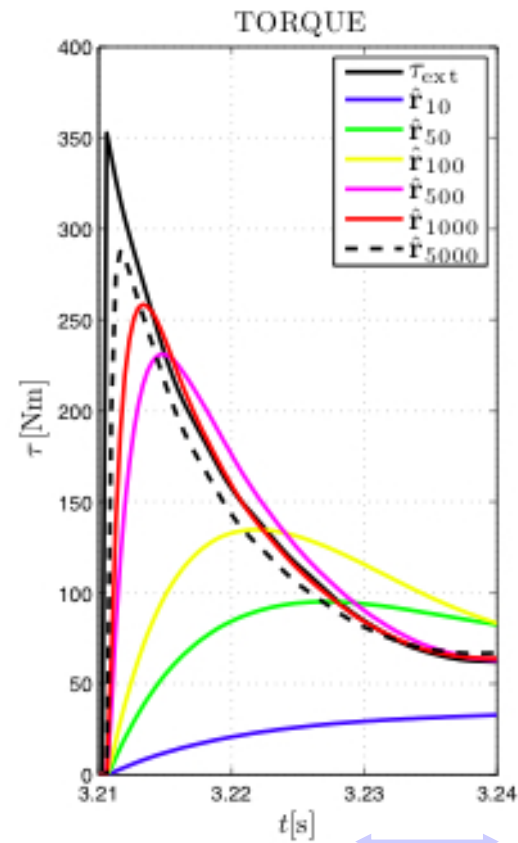
$$\mathbf{r} = \left[* \quad \dots \quad * \quad * \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]^T$$

$\uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow$
 $i + 1 \quad \dots \quad N$

Auswahl der Verstärkungen K_f

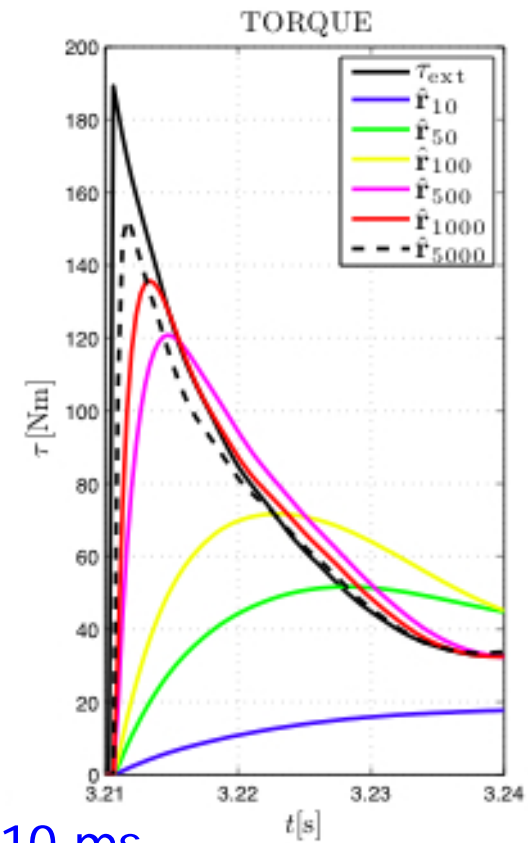
Simulationsergebnisse für der DLR-Leichtbauroboter III (Kollision am TCP)

Achse 2
@30°/s



10 ms

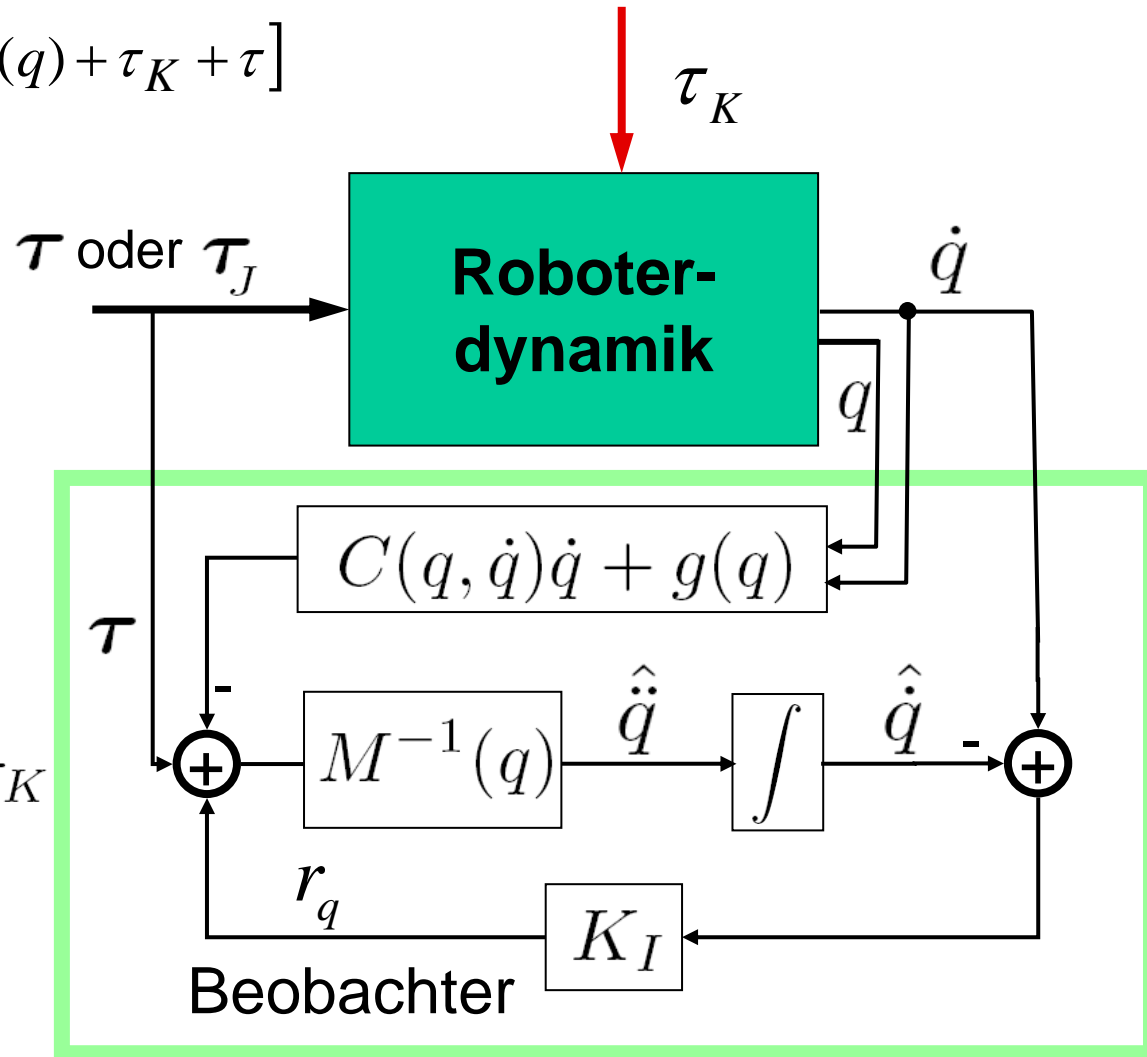
Achse 4
@200°/s



Beschleunigungs-basierte Kollisionsdetektion

(Warum wurde die Impulsableitung und nicht die Beschleunigung benutzt?)

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)[-C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) + \tau_K + \tau]$$



Beobachterdynamik:

$$M(q)\dot{r}_q + K_I r_q = K_I \tau_K$$

gekoppelt, nichtlinear

Übung: Leiten sie diese Dynamikgleichung her

Reaktionsstrategien

Folgende Reaktionsstrategien nach der Detektion während der positionsgeregelten Bewegung sind z.B. möglich:

- **Strategie 1:** Roboter stoppen
- **Strategie 2:** Umschalten auf reine Gravitationskompensation
(Roboter „frei schwebend“, kann weg geschoben werden)

$$\tau = g(q)$$

- **Strategie 3:** „Reflexreaktion“, die Einwirkung der externen Kraft wird durch Drehmomentrückführung verstärkt

$$\tau = g(q) + K_R \hat{\tau}_K$$

- **Strategie 4:** „Reflexreaktion“ auf Positionsschnittstelle
(Admittanzregelung)

$$\dot{\theta}_d = K_R \hat{\tau}_K$$

- **Strategie 5:** Verlangsamung, Anhalten und Rücktreibung des Interpolators (abhängig von der Intensität der externen Kraft) in Positionsregelung

How dangerous is the robot really?



Safe Human-Robot Interaction

Impact Experiments

Head

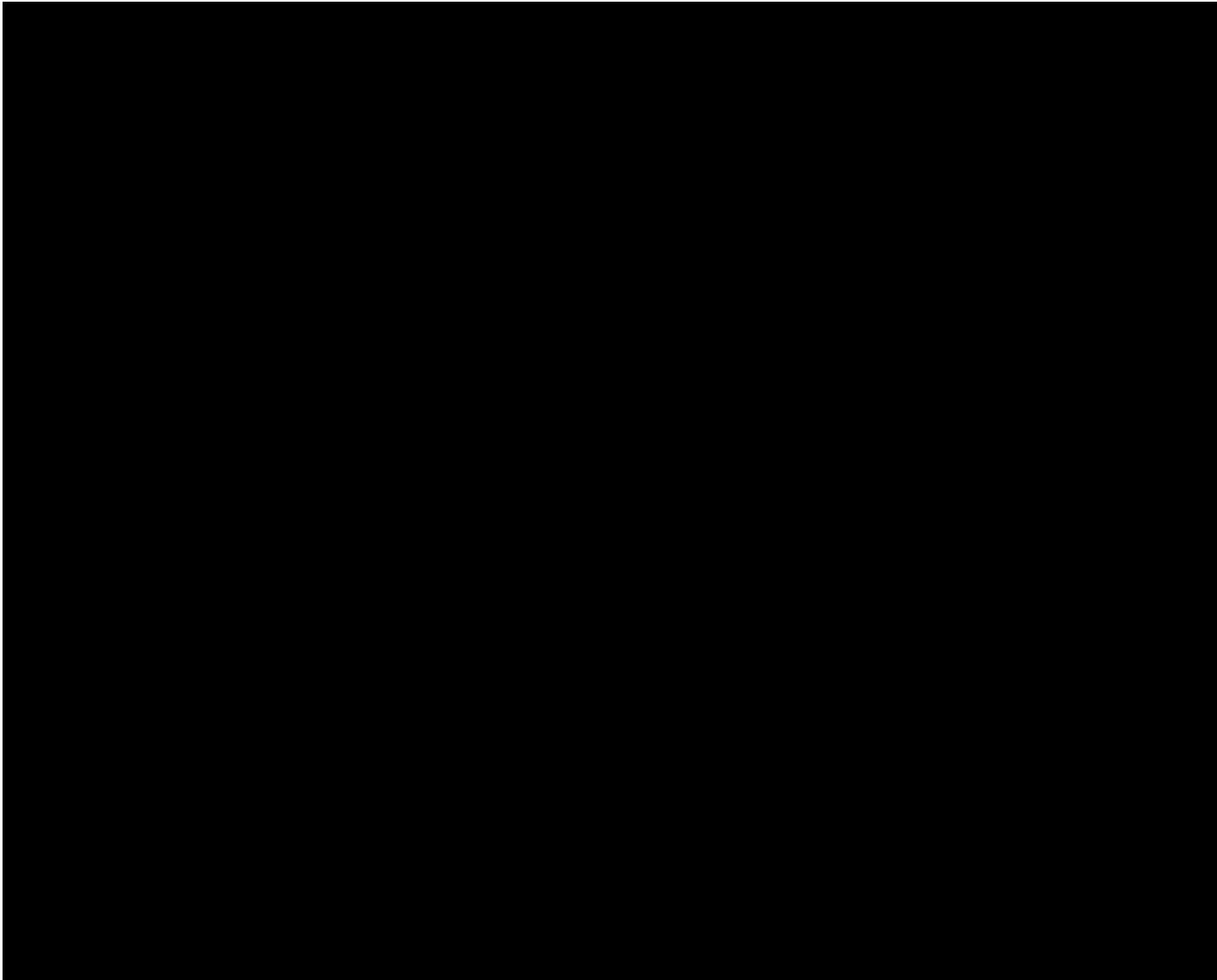
Velocity: 2.0 m/s

Detection: None

Strategy: None

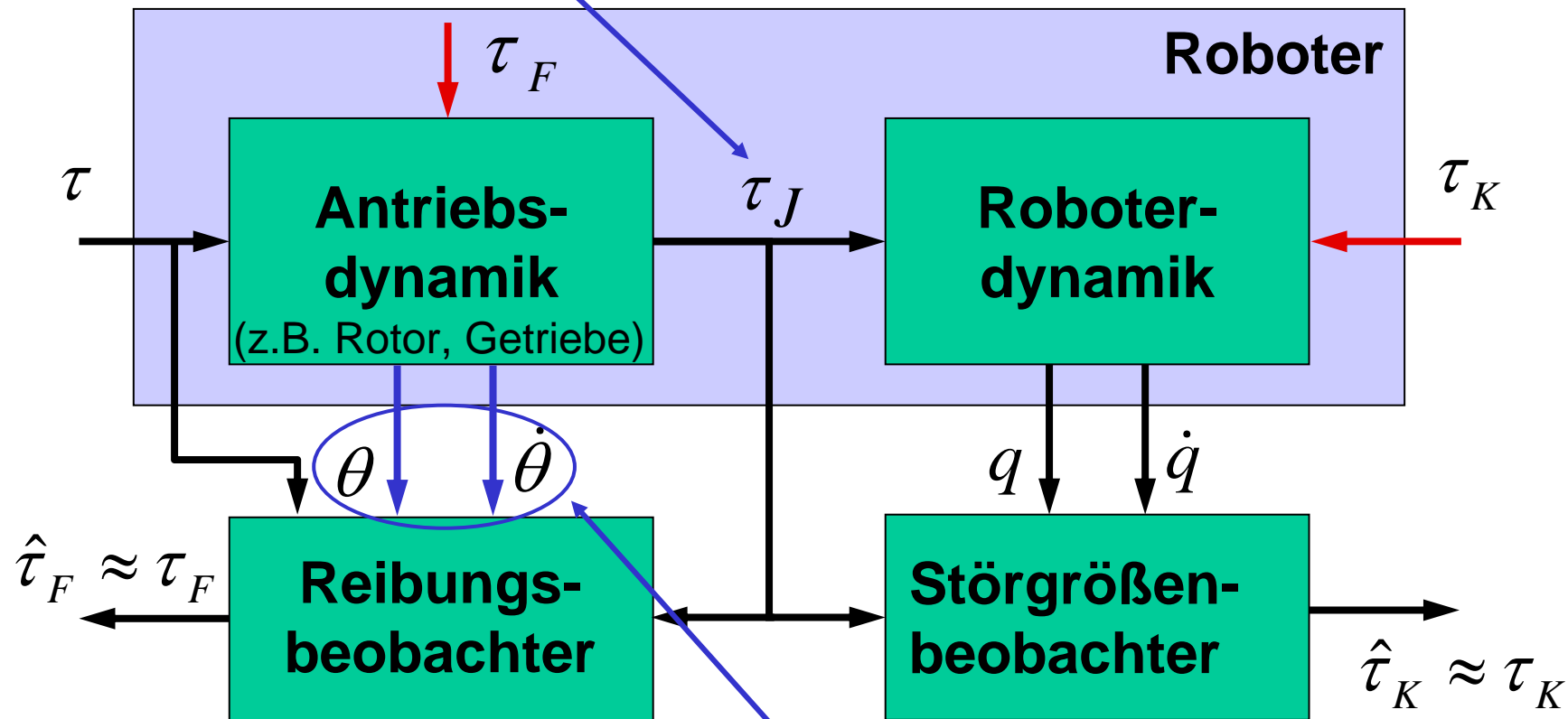


Wie gefährlich ist der Roboter wirklich?



Getrennte Beobachtung von Reibung und Kollision

Genau der gleiche Ansatz kann zur Beobachtung der Reibung genutzt werden. Mit **Drehmomentsensor** reduziert sich das Ganze auf entkoppelte Störgrößenbeobachter für jede Achse (jeweils linear).



Übung: Malen sie das Blockschaltbild und leiten sie die Beobachterdynamik für Reibungsbeobachter für ein Gelenk her.

nur für elastische Gelenke, sonst $\theta=q$

-
- Identifikation von Roboterparameter (Regressorbildung)
 - Adaptive Roboterregelung

Problemstellung

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

Das Modell hängt von folgenden Parametergruppen ab:

- variable Gelenkgrößen (q, \dot{q}, \ddot{q}) - gemessen
- kinematische Parameter (z.B. die konstanten DH-Parameter p_{DH}) – aus CAD
- Dynamik-Parameter p (Massen, Schwerpunkte, Massenträgheiten) – oft aus CAD nur ungenau bekannt oder veränderlich (z.B. variable Lasten, evtl. auch entlang der Roboterstruktur angebracht).

τ ist bekannt, da vom Regler vorgegeben (z.B. einfacher PD-Regler)

Ziel der Parameteridentifikation und der adaptiven Regelung ist es unbekannte dynamische Parameter offline oder online zu identifizieren.

(bei ungenauen kinematischen Parametern, existieren ähnliche Identifikationsmethoden)

Lineare Parametrierung des Dynamikmodells

Das Dynamikmodell kann folgendermaßen umgeschrieben werden

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, p_{DH}) p$$

$\tau \in \mathbb{R}^n$
 $Y \in \mathbb{R}^{n \times k}$
 $p \in \mathbb{R}^k, \quad k > n$

Regressor unbekannter Vektor
der Dynamikparameter

Prinzipielle theoretische Vorgehensweise zur Identifikation:

Man macht mehrere Messungen in unterschiedlichen Konfigurationen:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= Y_1 p \\ \tau_2 &= Y_2 p \\ &\vdots \\ \tau_l &= Y_l p \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \tau_{tot} = Y_{tot} p$$

$\tau_{tot} \in \mathbb{R}^{l \cdot n}$
 $Y_{tot} \in \mathbb{R}^{l \cdot n \times k}$
 $p \in \mathbb{R}^k, \quad k \leq l \cdot n$

Wenn $\text{Rang}(Y) = k$, dann kann das System nach p aufgelöst werden.

$$p = Y_{tot}^{-1} \tau_{tot} \quad \text{für } k = l \cdot n \quad \text{oder} \quad p = Y_{tot}^{\#} \tau_{tot} \quad \text{für } k \leq l \cdot n$$

(rechte Pseudoinverse: $Y_{tot}^{\#} Y_{tot} = I_{k \times k}$)

Zusatzfolie: Lineare Parametrierung des Dynamikmodells

(Aus welchen Größen besteht der Parametervektor p ?)

Die Dynamikgleichungen des Roboters erhält man mit dem Lagrange-Formalismus:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL(q, \dot{q})}{d\dot{q}} \right) - \frac{dL(q, \dot{q})}{dq} = \tau \quad \text{mit} \quad L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q)$$

kinetische Energie potentielle Energie

Bemerkung: Der Lagrange-Formalismus wird eher aus didaktischen Gründen benutzt, für die praktische Implementierung der Dynamikberechnung, ist der Newton-Euler Algorithmus wesentlich effizienter ($O(n)$ gegenüber $O(n^3)$).

Die kinetische Energie des Robotersegmentes j ist (alles ohne Herleitung):

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v^T & \omega^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -m\hat{l}_c \\ m\hat{l}_c & J_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

m - Masse

l_c - Schwerpunkt (3 Parameter)

J_I - Trägheitstensor (6Parameter-Tafel)



(Matrixschreibweise für Vektorprodukt, siehe Vorlesung 3)

Alle Größen bezüglich des Koordinatensystems des Gelenks j (Zeichnung an der Tafel)

$$J_I = I_c - m\hat{l}_c\hat{l}_c$$

I_c - Trägheit bezüglich des Schwerpunkts

Die kinetische Energie ist linear in den Parametern $\{m, ml_c, J_I\}$

Bestimmung eines minimalen Parametersatzes

Ähnlich kann nachgewiesen werden, dass die potentielle Energie linear in den Parametern $\{m, ml_c\}$ ist.

Folglich gilt

$$p_0^T = [m_1, m_1 l_{c1}, J_1, \dots, m_n, m_n l_{cn}, J_n] \quad 10n \text{ Parameter!}$$

Im Allgemeinen sind allerdings nicht alle Parameter identifizierbar:

- Wenn die entsprechende Spalte in Y Null ist, kann der Parameter beseitigt werden.
- Wenn zwei Spalten in Y linear abhängig sind, kann nur eine Linearkombination der entsprechenden Parameter identifiziert werden.

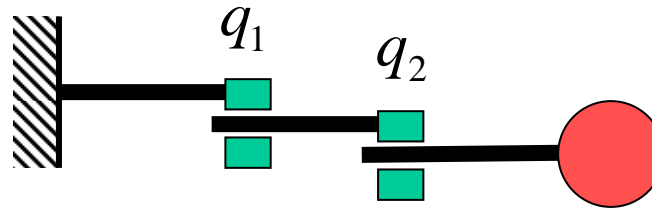
$$\tau = [Y_1, \alpha Y_1, \dots, Y_n] \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_k \end{bmatrix} \equiv \tau = [Y_1, \dots, Y_k] \begin{bmatrix} p_1 + \alpha p_2 \\ \vdots \\ p_k \end{bmatrix}$$

Durch Beseitigung aller Linearabhängigkeiten gelangt man zu einem Satz von Minimalparameter, für die Y vollen Rang haben kann, d.h. die alle unabhängig voneinander identifiziert werden können.

In **[Khalil02]** werden detaillierte Regeln zur Aufstellung der Minimalparameter vorgestellt.

Beispiel

(Der vielleicht einfachste redundante Manipulator der Welt)



$$\begin{cases} \tau_1 = (m_1 + m_2)\ddot{q}_1 + m_2\ddot{q}_2 \\ \tau_2 = m_2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \end{cases}$$

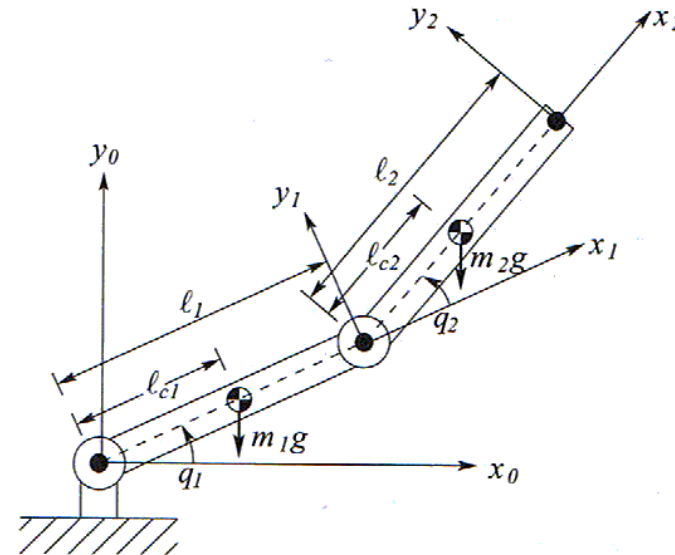
- Schreiben Sie den Regressor für die Bestimmung der dynamischen Parameter für dieses System auf.
- Welche Bedingungen müssen in diesem Fall erfüllt werden, damit alle Parameter identifizierbar sind? Wie viele Messpunkte werden mindestens benötigt? Warum sollten in der Praxis deutlich mehr Messpunkte gewählt werden?

Lösung an der Tafel

(Zusatzfolie) Beispiel: 2DoF Manipulator

Man bestimme den minimalen Parametersatz und den Regressor für folgendes System:

$$\begin{cases} \tau_1 = M_{11}\ddot{q}_1 + M_{12}\ddot{q}_2 + C_{11}\dot{q}_1 + C_{12}\dot{q}_2 + g_1 \\ \tau_2 = M_{21}\ddot{q}_1 + M_{22}\ddot{q}_2 + C_{21}\dot{q}_1 + C_{22}\dot{q}_2 + g_2 \end{cases}$$



$$M_{11} = m_2(l_1^2 + 2l_1l_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2$$

$$M_{12} = M_{21} = 2m_2l_{c2}l_1 \cos(q_2) + I_2$$

$$M_{22} = I_2$$

$$h = -m_2l_1l_{c2} \sin(q_2)$$

$$C_{11} = h\dot{q}_2 \quad C_{12} = h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$C_{21} = -h\dot{q}_1 \quad C_{22} = 0$$

$$g_1 = (m_1l_{c1} + m_2l_1)g \cos(q_1) + m_2l_{c2}g \cos(q_1 + q_2)$$

$$g_2 = m_2l_{c2}g \cos(q_1 + q_2)$$

Übung: Bestimmung Minimalparametersatz und Regressorbildung

Hinweis: Drei Spalten des Regressors stellen sich als linear abhängig heraus => Reduktion des Parametersatzes.

Praktische Aspekte

- In der Praxis wird $l \gg k$ gewählt.
- Die Identifikation kann auch als Minimierungsproblem formuliert werden.

$$\min_p \{\tau - Yp\}$$

Wenn Y vollen Rang hat, liefert die Pseudoinverse die Lösung dieses Optimierungsproblems.

- Es ist sehr wichtig, Messpunkte (z.B. Trajektorien) zu wählen, die alle Parameter gut anregen, d.h. die Parameter haben eine deutliche Wirkung auf die Messung. Ein Indikator dazu ist der Konditionierungsindex von Y

$$\text{cond}(Y) = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \geq 1 \quad \lambda\text{-Singularwerte}$$

der möglichst nahe an 1 sein sollte.

- Es ist nützlich, die Parameter in kleineren Gruppen (z.B. Handachsen, Schulterachsen, bzw. statisch, konstante Geschwindigkeit, ...) einzuteilen und gezielte Trajektorien zu deren Anregung zu optimieren.
- Die Signale müssen meistens gefiltert werden.

Adaptive Regelung

(theoretische Grundlagen in *Adaptive und Prädiktive Regelung* – APR, Prof. Stursberg)

Motivation:

Parameter können sich zeitlich verändern, z.B. variable Last.
In diesem Fall ist eine offline Identifikation nicht ausreichend.

Ausgangspunkt: passivitätsbasierter, g.e.s. Regler



Der Regler wird so modifiziert, dass Konvergenz des Reglerfehlers
auch unter der Annahme ungenauer Dynamikparameter gewährleistet ist.

Adaptiver Regler

(Bekannt als Slotine and Li Regler)

Strecke:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

Regler:

$$\tau = \underline{M(q)\dot{v} + C(q, \dot{q})v + g(q) - Kr}$$

$$\tau = \underline{Y(q, \dot{q}, v, \dot{v})} p - Kr$$

mit $v = \dot{q}_d - \Lambda(q - q_d)$

Tracking Error $\rightarrow r = (\dot{q} - \dot{q}_d) + \Lambda(q - q_d) = \dot{q} - v$

Λ, K - diagonale, konstante Matrizen

Da aber der Parametervektor p nicht genau bekannt ist, wird er mit der Schätzung \hat{p} ersetzt.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, v, \dot{v}) \hat{p} - Kr$$

oder $\tau = M(q)\dot{v} + C(q, \dot{q})v + g(q) + Y(q, \dot{q}, v, \dot{v}) \tilde{p} - Kr, \quad \tilde{p} = \hat{p} - p$

Die geschlossene Reglerschleife ist dann:

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r + Kr = \underline{Y(q, \dot{q}, v, \dot{v}) \tilde{p}}$$

$$r = \dot{e} + \Lambda e$$

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma^{-1} Y^T r$$

Unterschied zum Regler mit bekannten Parametern