

'Funnel control' zur Positionsregelung von starren Drehgelenkrobotern mit grob bekannter Trägheitsmatrix

Christoph Hackl



Technische Universität München
Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik



GMA-FA 1.40 "Theoretische Verfahren der Regelungstechnik"
Anif/Salzburg, 19. September 2012

Gliederung

- 1 Problemstellung
- 2 Motivation: 'Funnel control' für Systeme mit Relativgrad 2 (SISO)
- 3 'Funnel control' zur Positionsregelung von starren Drehgelenkrobotern
- 4 Beispiel: Planarer Roboter
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Positionsregelung von Industrierobotern



Kuka KR 150-2 (Serie 2000)
(<http://www.kuka-robotics.com>)

Anwendungen

- (Punkt-)Schweißen
- Einlegen/Bestücken
- Laserschneiden
- ...

Ziele:

- Genaue Positionsregelung des Endeffektors, d.h. für gegebenes $\lambda > 0$:

$$\forall t \geq t_0: \quad \|e_E(t)\| = \|\mathbf{y}_{\text{ref},E}(t) - \mathbf{y}_E(t)\| \leq \lambda.$$

- Regler: einfach und 'intuitiv' parametrierbar

Starrer Roboter mit n Drehgelenken

Robotermodell (in Gelenkkoordinaten)

$$\left. \begin{aligned} M(\mathbf{y}(t))\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{y}(t), \dot{\mathbf{y}}(t))\dot{\mathbf{y}}(t) + (\mathfrak{F}\dot{\mathbf{y}})(t) + \mathbf{g}(\mathbf{y}(t)) + \mathbf{d}(t) &= \mathbf{u}(t), \\ (\mathbf{y}(0), \dot{\mathbf{y}}(0))^{\top} &= (\mathbf{y}_0, \mathbf{y}_1)^{\top} \in \mathbb{R}^{2n} \end{aligned} \right\}$$

(ROBOT)

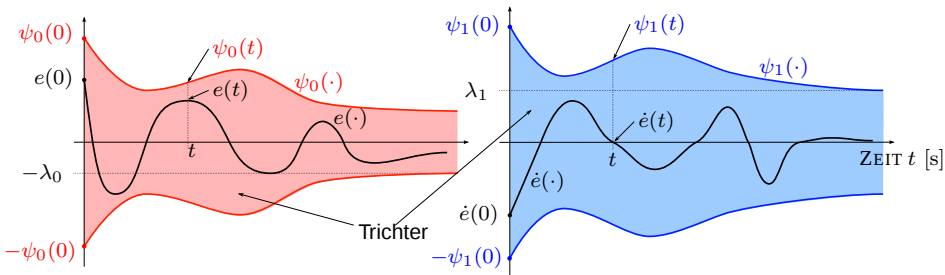
■ Standardannahmen

- $\exists \bar{c}_M, \underline{c}_M > 0 \forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n : 0 < \underline{c}_M \mathbf{I}_n \leq M(\mathbf{y}) = M(\mathbf{y})^{\top} \leq \bar{c}_M \mathbf{I}_n$
- $\exists c_C > 0 \forall \mathbf{y}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^n : \|\mathbf{C}(\mathbf{y}, \mathbf{v})\mathbf{v}\| \leq c_C \|\mathbf{v}\|^2$
- $\mathfrak{F} : \mathcal{C}(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{L}_{\text{loc}}^{\infty}(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R})$ (kausaler Reiboperator)
- $\exists c_g > 0 \forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n : \|\mathbf{g}(\mathbf{y})\| \leq c_g$
- $\mathbf{d}(\cdot) \in \mathcal{L}^{\infty}(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}^n)$ (Störung)
- $\mathbf{u}(\cdot) \in \mathcal{C}(\mathbb{R}_{\geq 0}; \mathbb{R}^n)$ (Stellgröße)
- Messgrößen: $\mathbf{y}(\cdot)$ und $\dot{\mathbf{y}}(\cdot)$

■ 'Strukturelle Eigenschaften'

- (strenger) Relativgrad $r = 2$
- positive instantane Verstärkung (positive definite high-frequency gain)
- 'minimalphasig'
- 'derivative feedback' zulässig

'Funnel control' für Systeme mit Relativgrad 2 (SISO)



- Regelziel: Vorgabe der **'transienten Genauigkeit'** durch Trichterrand ($\psi_0(\cdot)$, $\psi_1(\cdot)$)

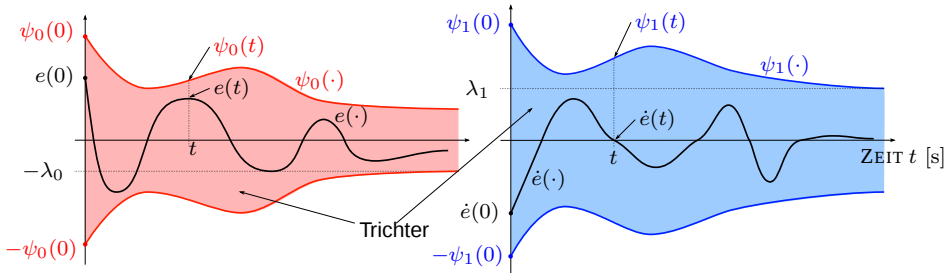
$$\forall t \geq 0: |e(t)| = |y_{\text{ref}}(t) - y(t)| < \psi_0(t) \quad \text{und} \quad |\dot{e}(t)| < \psi_1(t)$$

- Regelgesetz (siehe [Hackl et al. (2010)] und [Hackl (2011)]):

$$u(t) = \underbrace{k_0(t)^2 e(t)}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{k_0(t)k_1(t)\dot{e}(t)}_{\text{D-Anteil}} \quad (\text{FC}_1)$$

wobei $k_0(t) = \frac{s_0(t)}{\psi_0(t) - |e(t)|}$ und $k_1(t) = \frac{s_1(t)}{\psi_1(t) - |\dot{e}(t)|}$.

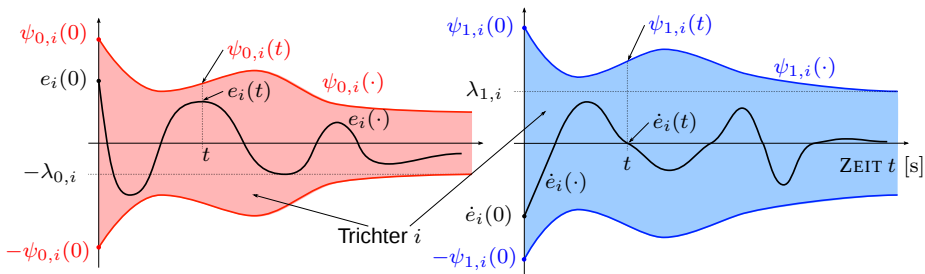
Warum 'funnel control' für Positionieraufgaben?



Vielversprechende Vorteile

- zulässige Systemklasse ('strukturelle Systemkenntnis' $\implies$ Robustheit)
 - bekannter Relativgrad $r = 2$
 - positive instantane Verstärkung (oder bekanntes Vorzeichen)
 - minimalphasig
 - und 'derivative feedback' zulässig
- Hohe Verstärkungen verhindern 'Stick-Slip'
- Vorgabe der Regelgenauigkeit für Position **und** Geschwindigkeit **a priori** möglich

'Funnel control' für Roboter (MIMO)



- Regelziel: Vorgabe der **'transienten Genauigkeit'** für **jedes Gelenk** $i \in \{1, \dots, n\}$:

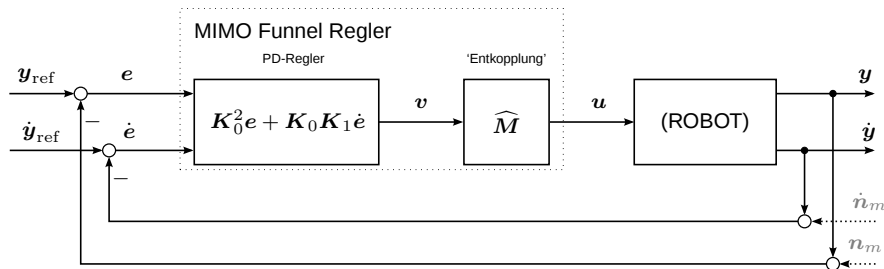
$$\forall t \geq 0: \quad |e_i(t)| = |y_{\text{ref},i}(t) - y_i(t)| < \psi_{0,i}(t) \quad \text{und} \quad |\dot{e}_i(t)| < \psi_{1,i}(t)$$

- Regelgesetz:

$$\mathbf{u}(t) = \underbrace{\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{y}(t))}_{\text{geschätzte Trägheit}} \left(\underbrace{\mathbf{K}_0(t)^2 \mathbf{e}(t)}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\mathbf{K}_0(t) \mathbf{K}_1(t) \dot{\mathbf{e}}(t)}_{\text{D-Anteil}} \right) \quad (\text{FC}_n)$$

wobei $\mathbf{K}_0(t) = \text{diag} \{k_{0,1}(t), \dots, k_{0,n}(t)\}$ & $\mathbf{K}_1(t) = \text{diag} \{k_{1,1}(t), \dots, k_{1,n}(t)\}$.

'Eingangsentkopplung' durch geschätzte Trägheit



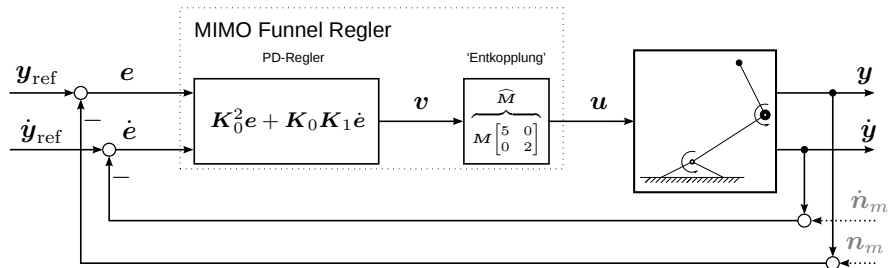
Für

- $\widehat{M}(\cdot) \in \mathcal{C}(\mathbb{R}^n; \mathbb{R}^{n \times n})$
- $\forall y \in \mathbb{R}^n: \widehat{M}(y) = M(y) \text{ diag} \{ \Delta_1(y), \dots, \Delta_n(y) \}$
- $\forall i \in \{1, \dots, n\}: \Delta_i(\cdot) \in \mathcal{C} \cap \mathcal{L}^\infty(\mathbb{R}^n; \mathbb{R}_{>0})$ gleichmäßig von Null weg beschränkt

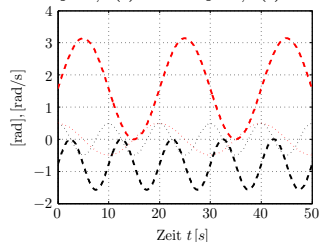
gilt

- $\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists L, \gamma > 0 \forall t \geq 0: -L - \gamma v_i(t) \leq \ddot{e}_i(t) \leq L - \gamma v_i(t)$ [Hackl (2011)] $\implies$
- $\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists \varepsilon_i > 0 \forall t \geq 0: \psi_{0,i}(t) - |e_i(t)| \geq \varepsilon_i \text{ und } \psi_{1,i}(t) - |\dot{e}_i(t)| \geq \varepsilon_i$

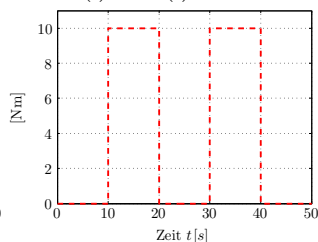
Beispiel: Planarer Roboter & Implementierung



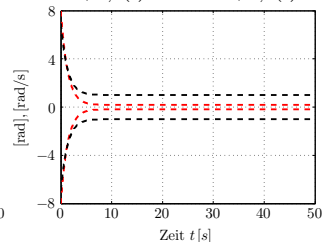
--- $y_{ref,1}(\cdot)$, --- $y_{ref,2}(\cdot)$



--- $d_1(\cdot) = d_2(\cdot)$

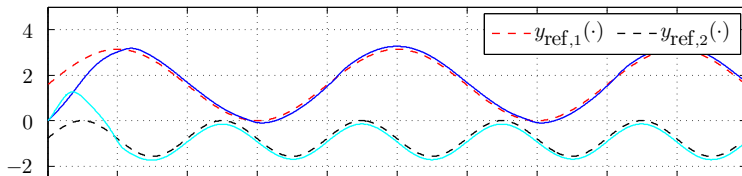


--- $\pm\psi_{0,i}(\cdot)$, --- $\pm\psi_{1,i}(\cdot)$

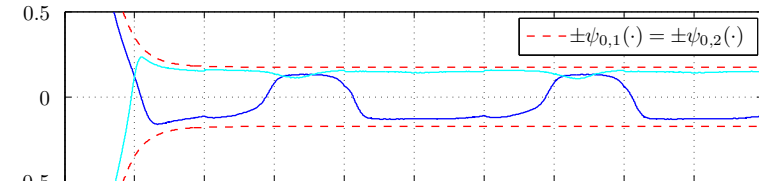


Simulationsergebnisse (Gelenke: — #1, — #2)

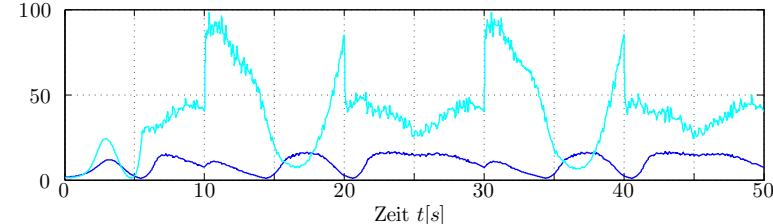
Winkel

 y_1, y_2
[rad]

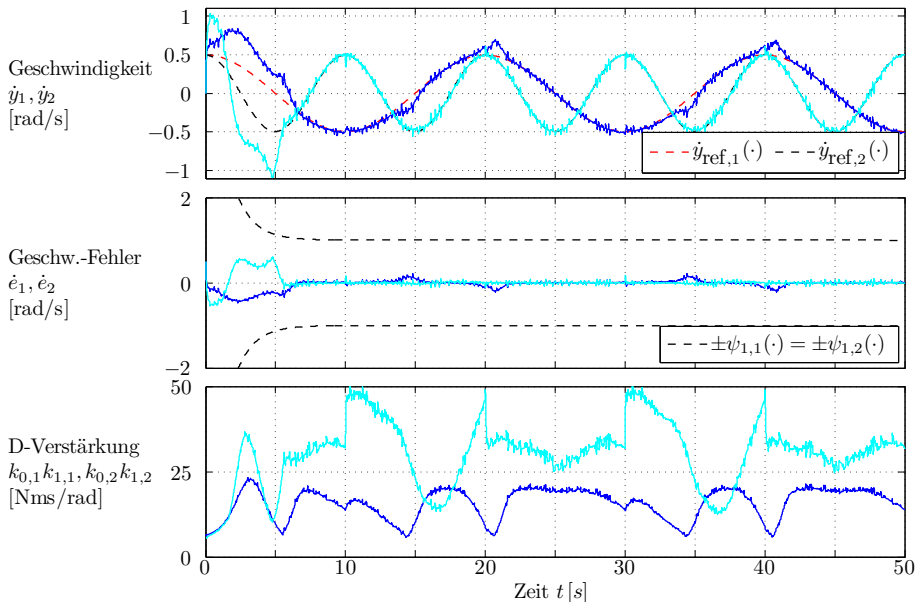
Positionsfehler

 e_1, e_2
[rad]

P-Verstärkung

 $k_{0,1}^2, k_{0,2}^2$
[Nm/rad]

Simulationsergebnisse (Gelenke: — #1, — #2)



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

- einfacher, zeit-varianten (adaptiver) PD Regler
- Vorgabe der 'transienten Genauigkeit' für jedes Gelenk möglich
- Messfehler oder -rauschen zulässig
- keine Kompensation von
 - Reibung
 - Störungen (unbekannt aber beschränkt)
 - Coriolis- oder Schwerkrafteinflüssen
- Trägheitsmatrix muss 'grob strukturell' bekannt sein

Offene Fragen (u.a.):

- real anwendbar (Messergebnisse) ?
- 'Funnel control' von
 - starren Drehgelenkrobotern ohne Kenntnis der Trägheitsmatrix ?
 - elastischen Drehgelenkrobotern mit/ohne Kenntnis der Trägheitsmatrix ? ('optimale Vorsteuerung' zur Bedämpfung der Schwingungen ?)

Literatur



C. M. Hackl, N. Hopfe, A. Ilchmann, M. Mueller, and S. Trenn.

Funnel control for systems with relative degree two.

accepted for publication in SIAM Journal on Control and Optimization, 2010.



C. M. Hackl.

High-gain adaptive position control.

International Journal of Control, 84(10):1695–1716, 2011.



C. M. Hackl and R. M. Kennel.

Position funnel control for rigid revolute joint robotic manipulators with known inertia matrix.

Proceedings of the 20th Mediterranean Conference on Control and Automation (Barcelona, Spain), p. 615–620, 2012.



C. M. Hackl.

Contributions to high-gain adaptive control in mechatronics.

Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme & Leistungselektronik, Technische Universität München, Deutschland, 2012.