

Regelung für sichere Mensch-Roboter-Interaktion

Melanie Kimmel *

Sandra Hirche **

* Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Barer Straße 21
089 289 25739
089 289 25724
melanie.kimmel@tum.de

** Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Barer Straße 21
089 289 25722
089 289 25724
hirche@tum.de

Schlüsselwörter: nichtlineare Regelung, beschränkte Regelung, Eingangs-Ausgangslinearisierung, Invarianz

Die direkte Interaktion von Mensch und Maschine stellt höchste Sicherheitsanforderungen. Die Anwendungen für Mensch-Maschine-Interaktion sind vielfältig und finden sich unter anderem in modernen (teil-)autonomen Fahrzeugen oder in der Mensch-Roboter-Kooperation im industriellen und häuslichen Umfeld. Derartige regelungstechnische Anwendungen erfordern die künstliche Beschränkung des nichtlinearen Systemverhaltens auf eine beschränkte, "sichere" Untermenge des Zustands- oder Ausgangsraumes.

Die beschränkte Regelung liefert geeignete Methoden, die Einhaltung von sicherheitsrelevanten Limits zu garantieren. Unter anderem bieten sich die modellprädiktive Regelung [1], Ansätze basierend auf Barrierefunktionen [2] oder die Invarianzregelung [3] an. Vorteilhafterweise kann die Invarianzregelung in ein bestehendes Regelungskonzept eingefügt werden, ohne dass das Nominalverhalten innerhalb des zulässigen Gebiets zu beeinflusst wird. Die Invarianzregelung bestimmt mit Hilfe von Eingangs-Ausgangslinearisierung ein effizient lösbares, konvexes Optimierungsproblem im Eingangsraum. Diese Optimierung liefert auch außerhalb der zulässigen Zustandsmenge eine eindeutige Lösung, die den Zustand auf die erlaubte Untermenge zurückführt. Auf Grund der vorgenannten Vorteile bietet sich die Invarianzregelung für die sichere Mensch-Maschine-Kooperation an.

Nichtlineare, steuerungsaffine Systeme mit einer existierenden Regelstruktur (Nominalregelung), die das Regelziel im unbeschränkten Fall forciert, werden mittels Invarianzregelung erweitert, um die Einhaltung der Schranken zu garantieren [4]. Dieses Grundkonzept der Invarianzregelung ist in Abb. 1 dargestellt. Der Regelungsentwurf basiert auf einer Definition der Schranken als ausreichend oft stetig ableitbare, analytische Beschränkungsfunktionen, mit deren Hilfe sich die sogenannte Invarianzmenge bestimmen lässt. Diese bestimmt den Zeitpunkt für einen korrektiven Regeleingriff, vgl. Abb. 2. Während sich der Systemzustand innerhalb der Invarianzmenge befindet, wird der nominale Stelleingriff an den Systemeingang weitergegeben. Befindet sich der Zustand allerdings am Rand oder

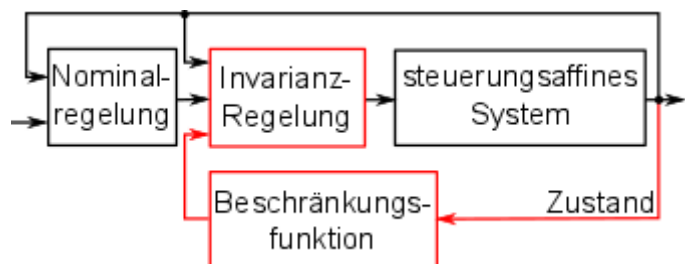


Abb. 1: Konzept der Invarianzregelung

außerhalb der Invarianzmenge, wird mittels Eingangs-Ausgangslinearisierung und konvexer Optimierung ein korrigierender Stelleingriff bestimmt, der eine Verletzung der Grenzen verhindert, bzw. den Zustand in die Invarianzmenge zurückführt.

Die Anwendungen für das Regelkonzept sind vielfältig, da es sowohl statische als auch dynamische Beschränkungen forciert [5,8]. Statische Grenzen können im Kontext der Mensch-Maschine-Kooperation zum Beispiel durch Gelenkwinkel- und Geschwindigkeitsbeschränkungen des Roboters oder auch durch die Umgebung gegeben sein. Menschen oder weitere Fahrzeuge/Maschinen in der näheren Umgebung werden durch dynamische Beschränkungen abgebildet. Zusätzlich zur reinen Einhaltung von Limits ist es durch Augmentation möglich, das dynamische Verhalten des Systemeingangs an die jeweilige Anwendung anzupassen [6]. Dies ist speziell bei der Kooperation mit Menschen interessant, da sich so das Systemverhalten an die menschlichen Erwartungen anpasst. Das Schnattern am Ausgang, das durch die reale Implementierung des schaltenden Regelkonzepts entsteht, kann außerdem durch geeignete Ansätze deutlich reduziert oder sogar vermieden werden [7]. Experimente an anthropomorphen Manipulatoren unterstützen die theoretischen Überlegungen und zeigen die Vorteile der Invarianzregelung für die sichere Mensch-Maschine-Kooperation.

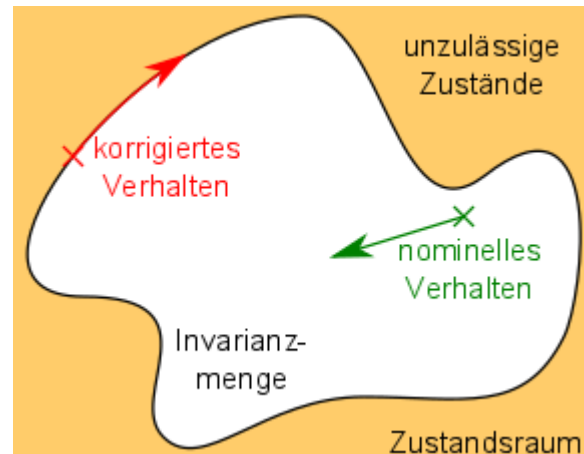


Abbildung 2: Invarianzmenge

Literatur:

- [1] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao, P. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, 36(6):789–814, 2000.
- [2] A. Ames, J. Grizzle, P. Tabuada, "Control Barrier Function based Quadratic Programs with Application to Adaptive Cruise Control," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2014.
- [3] J. Mareczek, M. Buss, M.W. Spong, "Invariance Control for a Class of Cascade Nonlinear Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(4):636-640, 2002.
- [4] J. Wolff, M. Buss, "Invariance Control Design for Nonlinear Control Affine Systems under Hard State Constraints," in *Symposium on Nonlinear Control Systems NOLCOS*, 2004.
- [5] M. Kimmel, S. Hirche, "Invariance Control with Time-varying Constraints," in *European Control Conference*, 2016.
- [6] M. Kimmel, C. Jähne, S. Hirche, "Augmented Invariance Control for Systems with Smoothness Constraints," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2016
- [7] M. Kimmel, S. Hirche, "Invariance Control with Chattering Reduction," in *IEEE Conference on Decision and Control*, 2014.
- [8] M. Kimmel, S. Hirche, "Active Safety Control for Dynamic Human-Robot Interaction," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015

Regelung für sichere Mensch-Roboter-Interaktion

M. Kimmel **S. Hirche**

Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München

51. Regelungstechnisches Kolloquium in Boppard

Sicherheitsrelevante Beschränkungen



[Quelle: Ford]



[Quelle: www.33rdsquare.com]



[Quelle: www.extremetech.com]



[Quelle: www.forbes.com]

System und Regelziel

- Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- Regelung in Realzeit (hohe Abstraten)
- Übertragbarkeit auf reale Systeme

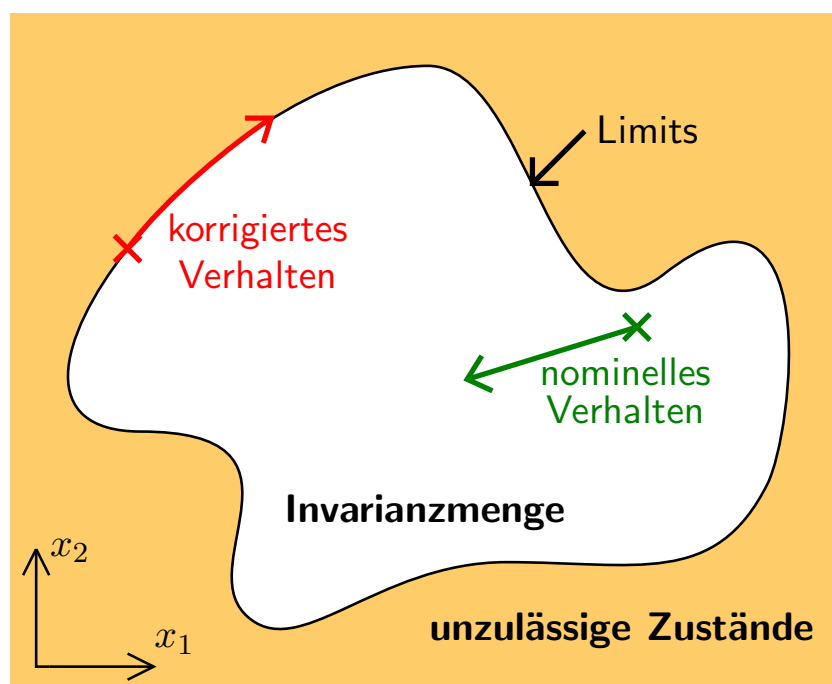
Beschränkungen

- Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- Garantierte Einhaltung
- Hohe Anzahl
- Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Gewünschtes Ergebnis



Kollisionsvermeidung

- Potenzialfelder [Rimon et al. 1992]
- Virtual fixtures [Rosenberg 1993]
- Dynamic Windows [Fox et al. 1997]

⚡ Keine Berücksichtigung der Dynamik

Modellprädiktive Regelung [Mayne et al. 2000]

Reference governor [Gilbert et al. 2002]

⚡ Kostenintensive Optimierung

Barrierenzertifikate (Control barrier functions) [Ames et al. 2014]

⚡ Kein definiertes Verhalten im gesamten Zustandsraum

Invarianzregelung [Mareczek et al. 2000], [Kimmel et al. 2017]

Zustands- und Ausgangsbeschränkungen

Anforderungen an das Regelkonzept

System und Regelziel

- Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
- Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

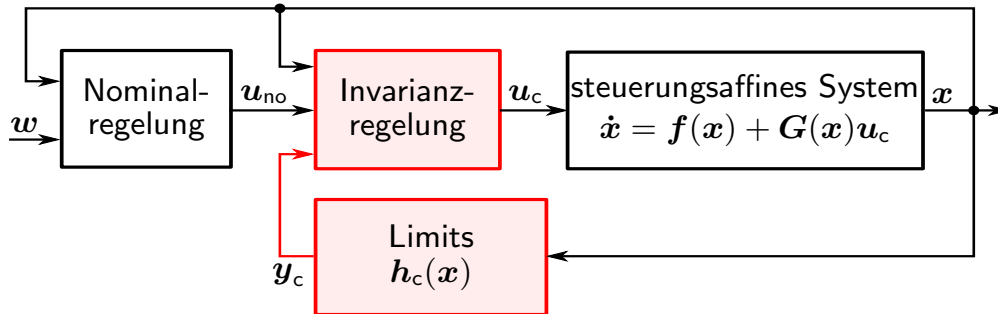
- Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- Garantierte Einhaltung
- Hohe Anzahl
- Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Separater Entwurf:

- Nominalregelung zur Erreichung des Regelziels im unbeschränkten Fall (Stabilität und Performanz)
- Invarianzregelung erweitert den Regelkreis



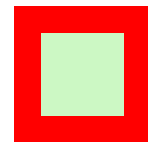
Entwurfsziel

Stellsignal u_c garantiert die Einhaltung der Beschränkungen.

Welchen Einfluß hat die Stellgröße?

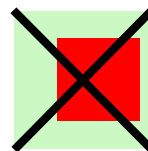
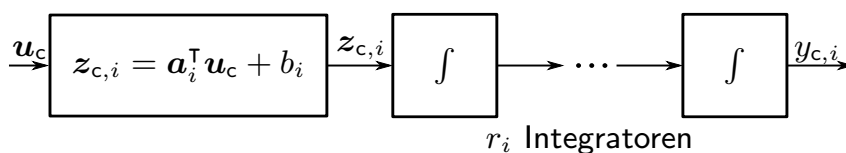
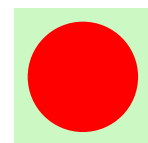
Beliebig viele Grenzen als Systemausgänge

$$y_{c,i} = h_{c,i}(x) \leq 0 \quad \text{for } 1 \leq i \leq l$$



E/A-Linearisierung

$$z_{c,i} = y_{c,i}^{(r_i)} = \mathbf{a}_i^T \mathbf{u}_c + b_i$$



Ergebnis

Linearer Zusammenhang beschreibt den Einfluss des Pseudoeingangs $z_{c,i}$ auf die Beschränkungsfunktion $y_{c,i}$

System und Regelziel

- ✓ **Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen**
 - Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
 - Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

- Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- Garantierte Einhaltung
- Hohe Anzahl
- Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Wann sind Beschränkungen aktiv?

Invarianzfunktion

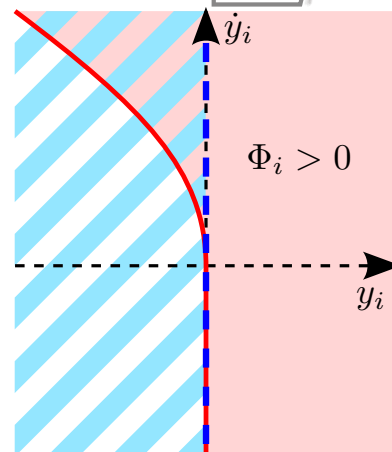
Zukünftiger Maximalwert von $y_{c,i}$ für $z_{c,i} = \gamma_i < 0$

$$\Phi_i(\mathbf{x}, \gamma_i) = \begin{cases} \max_{\tau > t} p_i(\tau, \xi_i, \gamma_i) & p_i > y_i \\ y_i & \text{sonst} \end{cases}$$

Zustände der Integratorkette ξ_i

Menge der aktiven Beschränkungen

$$\mathcal{K}(\mathbf{x}) = \{i \in \{1, 2, \dots, l\} \mid \Phi_i \geq 0\}$$



- Limit i
- $\Phi_i = 0$
- ▨ Zulässiger Bereich
- ▨ Invarianzmenge

Aktive Beschränkungen müssen bei der Berechnung der Stellgröße beachtet werden.

System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
 - Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
 - Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
 - Garantierte Einhaltung
 - Hohe Anzahl
 - Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Invarianzregelung

Korrigierender Stelleingriff mittels konvexer Optimierung

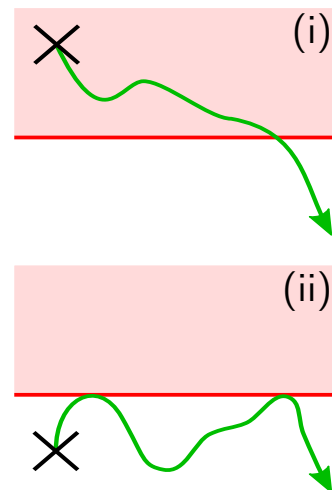
$$\mathbf{u}_c = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{no}\|_2^2$$

u.d.N. $\mathbf{A}_{\mathcal{K}}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{b}_{\mathcal{K}}(\mathbf{x}) \preceq \mathbf{z}_c$

Invarianzmenge: $\{\mathbf{x} | \Phi_i \leq 0, 1 \leq i \leq m\}$

Theorem [Kimmel et al. 2017]

- Durch \mathbf{u}_c wird
- (i) die Invarianzmenge nach endlicher Zeit erreicht und
 - (ii) \mathbf{x} auf die Invarianzmenge beschränkt.



System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- ✓ **Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)**
- Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- ✓ **Garantierte Einhaltung**
- ✓ **Hohe Anzahl**
- Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

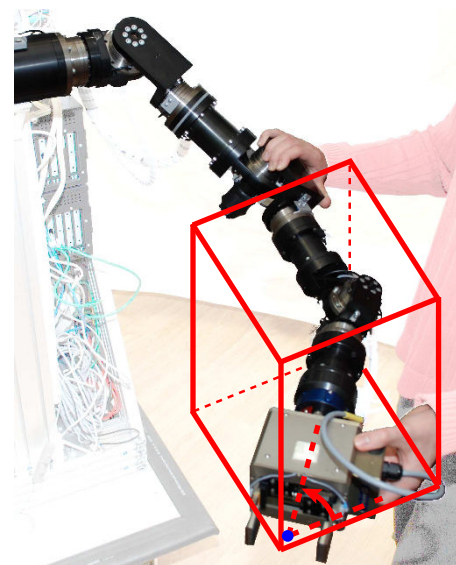
Experimentalaufbau

Robotersystem

- Manipulator mit 7 Aktuatoren
- Abtastrate: 1000Hz
- Kraft-/Momentensensor:
 - Messung am Endeffektor
 - Störgrößenerfassung
 - Impedanzregelung

Statische Grenzen

- 6 Translationslimits
- 2 Rotationslimits



Video im *attachment browser* unter
<https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1155337#>

Anforderungen an das Regelkonzept

System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- ✓ Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
 - Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

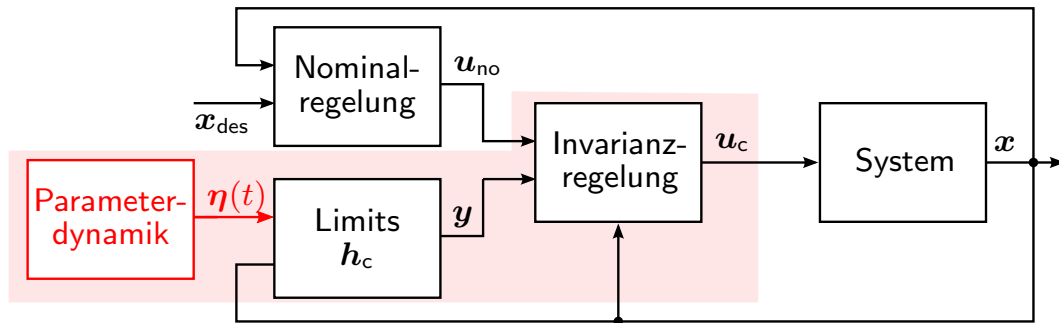
- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- ✓ Garantierte Einhaltung
- ✓ Hohe Anzahl
 - Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- ✓ Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
 - Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Wozu dynamische Limits?

- Veränderliche Umgebung
- Bewegliche Hindernisse



Bedingungen an $\eta(t)$

- Messbarkeit
- Differenzierbarkeit

Wie ändert sich die Regelstruktur?

Parameterabhängige Grenzen und Eingangstransformation

$$y_{c,i} = h_{c,i}(\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\eta}(t)) \leq 0 \quad \text{for } 1 \leq i \leq l$$

$$z_{c,i} = y_{c,i}^{(r_i)} = \mathbf{a}_i^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}(t))\mathbf{u}_c + b_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}(t), \dots, \boldsymbol{\eta}^{(r_i)}(t))$$

Korrigierender Stelleingriff mittels konvexer Optimierung

$$\mathbf{u}_c = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{no}\|_2^2$$

$$\text{u.d.N. } \mathbf{A}_K(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}(t))\mathbf{u} + \mathbf{b}_K(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}(t), \dots, \boldsymbol{\eta}^{(r_i)}(t)) \preceq \mathbf{z}_c$$

Invarianzmenge: $\{\mathbf{x} | \Phi_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}(t), \dots, \boldsymbol{\eta}^{(r_i-1)}(t)) \leq 0 \quad 1 \leq i \leq m\}$

Theorem (Invarianz)

Das Stellsignal \mathbf{u}_c beschränkt den Zustand auf die Invarianzmenge.

System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- ✓ Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
- Übertragbarkeit auf reale Systeme

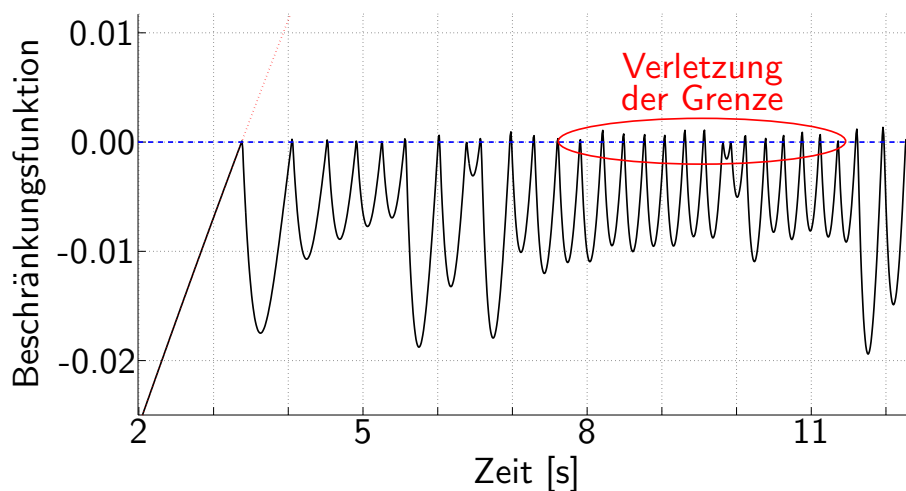
Beschränkungen

- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- ✓ Garantierte Einhaltung
- ✓ Hohe Anzahl
- ✓ **Dynamische Veränderung**

Mensch-Roboter-Interaktion

- ✓ Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Was passiert in der Anwendung?

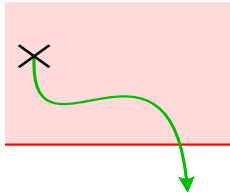


Abgetastetes System

- Bestimmung des Stelleingangs zu jedem Abtastzeitpunkt
- Konstanter Stellwert während der Intervalle
- Hochfrequente Oszillation an der Grenze (Schnattern)

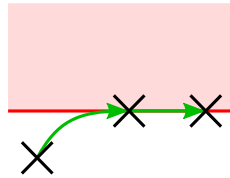
Lösung

- Modell des abgetasteten, linearisierten Systems
- Vorhersage von zukünftigen Werten der Invarianzfunktion



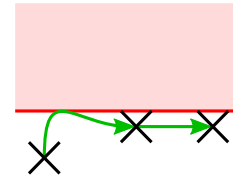
Zur Invarianzmenge:

$$z_{c,i} = \gamma_i < 0$$



Minimaler Eingriff:

$$z_{c,i} = 0$$



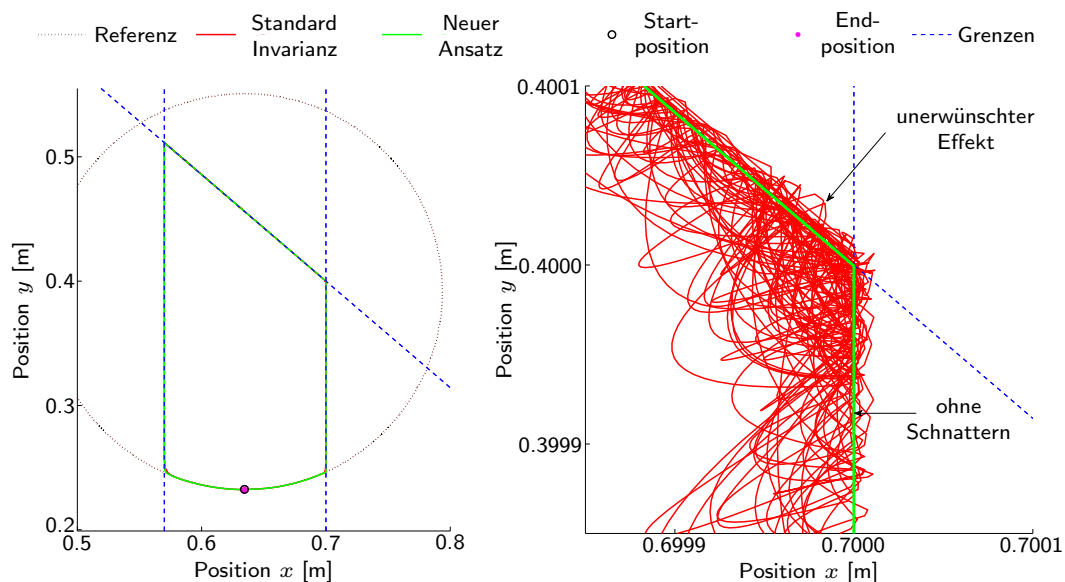
Keine Übertretung:

$$\gamma_i < z_{c,i} < 0$$

Theorem (Invarianz)

Der adaptierte korrigierende Pseudoeingang z_c erreicht eine Beschränkung des abgetasteten Systems auf die Invarianzmenge.

Ergebnis [Kimmel et al. 2014]



Auswirkungen

- Signifikante Verringerung der Oszillation
- Vermeidung von Limitverletzungen

System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- ✓ Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
- ✓ Übertragbarkeit auf reale Systeme

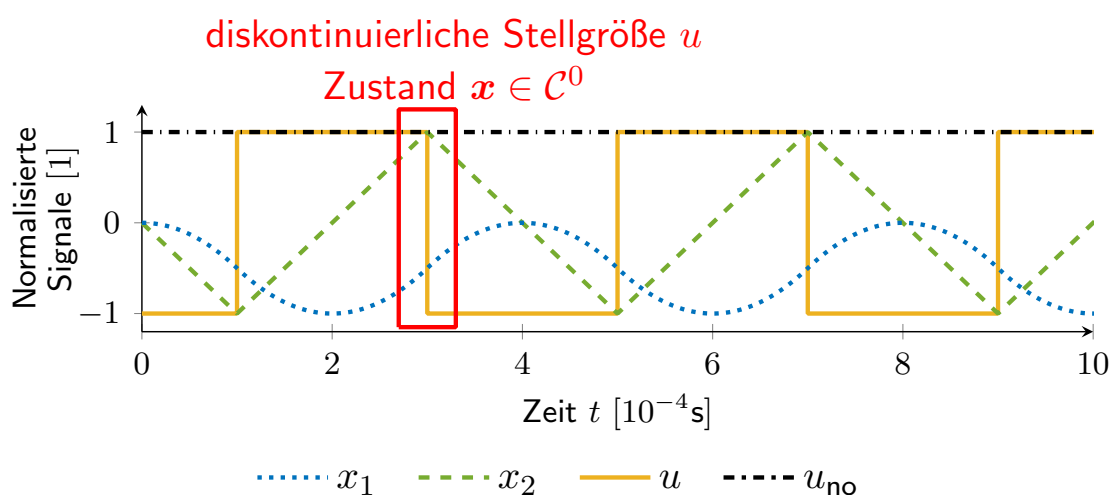
Beschränkungen

- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- ✓ Garantierte Einhaltung
- ✓ Hohe Anzahl
- ✓ Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

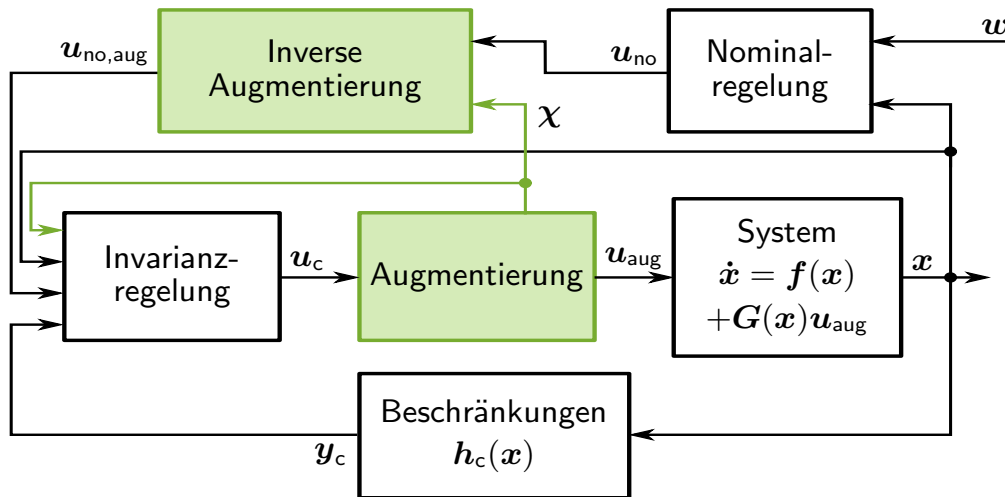
- ✓ Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
 - Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Beispiel: Doppelintegrator



Warum ist eine Anpassung der Eingangsdynamik sinnvoll?

- Beanspruchung der Systemkomponenten reduzieren
- Menschliche Erwartungen an das Interaktionsverhalten



Eigenschaften: Augmentierung und System

- Steuerungsaffin
- E/A-linearisierbar
- Relativer Grad $r_i + v$

Nominalregelung

$$\mathbf{u}_{\text{no,aug}} = \mathbf{A}_{\text{aug}}^{-1}(\boldsymbol{\chi}) \left(\mathbf{u}_{\text{no}}^{(v)} - \mathbf{b}_{\text{aug}}(\boldsymbol{\chi}) - \sum_{j=0}^{v-1} k_j \mathbf{I}_m \mathbf{e}_u^{(j)} \right)$$

\mathbf{u}_{no} : exponentiell stabil \Rightarrow $\mathbf{u}_{\text{no,aug}}$: asymptotisch stabil

Korrigierender Stelleingriff mittels konvexer Optimierung

$$\mathbf{u}_c = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{no,aug}}\|_2^2$$

$$\text{u.d.N. } \mathbf{a}_i^T \mathbf{A}_{\text{aug}} \mathbf{u} + \tilde{b}_i \leq z_{c,\text{aug},i} \quad \forall i \in \mathcal{K}$$

Theorem (Glattheit)

Für exponentiell stabilisierende \mathbf{u}_{no} , erreicht das augmentierte \mathbf{u}_c

(i) $\mathbf{x} \in \mathcal{C}^v$ und

(ii) asymptotisch stabiles Verhalten innerhalb der Limits.

Beispiel: Inverses Pendel

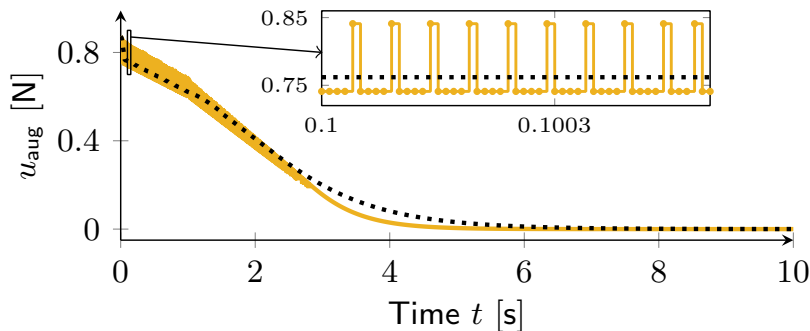
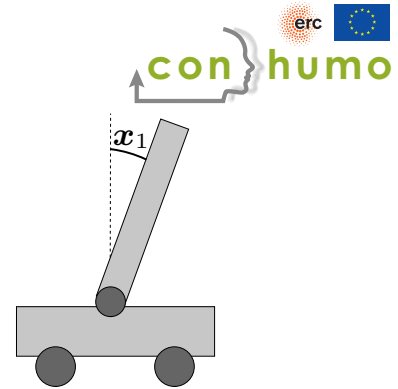
$$u_{no} = -k_P x_1 - k_D x_2$$

$$h_c(\mathbf{x}) = x_2 - \dot{\theta}_{max}$$

Augmentierung um $v = 1$

$$\dot{\chi} = u_c, \quad u_{aug} = \chi$$

$$u_{no,aug} = \dot{u}_{no} - k_0(u_{aug} - u_{no})$$



Kontinuierlicher, glatter Stelleingriff für augmentierte Invarianz.

Anforderungen an das Regelkonzept



System und Regelziel

- ✓ Kompatibilität zu nichtlinearen Systemen
- ✓ Regelung in Realzeit (hohe Abtastraten)
- ✓ Übertragbarkeit auf reale Systeme

Beschränkungen

- ✓ Definiertes Verhalten bei Überschreitungen
- ✓ Garantierte Einhaltung
- ✓ Hohe Anzahl
- ✓ Dynamische Veränderung

Mensch-Roboter-Interaktion

- ✓ Berücksichtigung von Interaktionskräften (externe Störung)
- ✓ Angepasste Interaktionsdynamik (Glattheit)

Karthesische Impedanzregelung:

$$\mathbf{u}_{no} = \mathbf{f}_{ext} + \mathbf{M}_p \ddot{\mathbf{p}}_{des} + \mathbf{D}_p (\dot{\mathbf{p}}_{des} - \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p (\mathbf{p}_{des} - \mathbf{f}_p(\mathbf{q}))$$

Impedanzregelung

- Nachgiebigkeit
- Stabile Kraftregelung

Invarianzregelung

- Einhaltung der Schranken
- Erhaltung der Stabilität

Anwendungsgebiete

- Kontaktfreie Interaktion (z.B. Montage):
 - Zielgerichtete Bewegung
 - Kollisionsvermeidung
- Interaktion im Kontaktfall (z.B. gemeinsame Manipulation):
 - Nachgiebigkeit auf Interaktionskräfte
 - Kollisionsvermeidung trotz Kraftübertragung

Experimentalaufbau

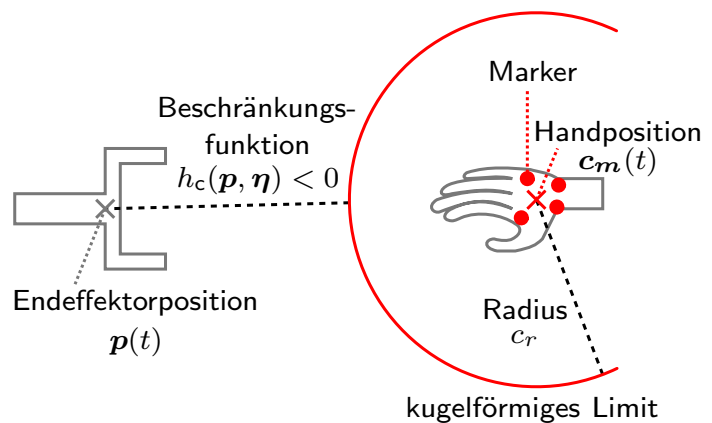
Positionserkennung:

- Qualisys Kamerasystem
- Verarbeitung der Daten in Matlab/Simulink

Beschränkung:

$$y_c = c_r - \|\mathbf{p}(t) - \mathbf{c}_m(t)\|_2$$

- Konstanter Radius c_r
- Variable Position \mathbf{c}_m

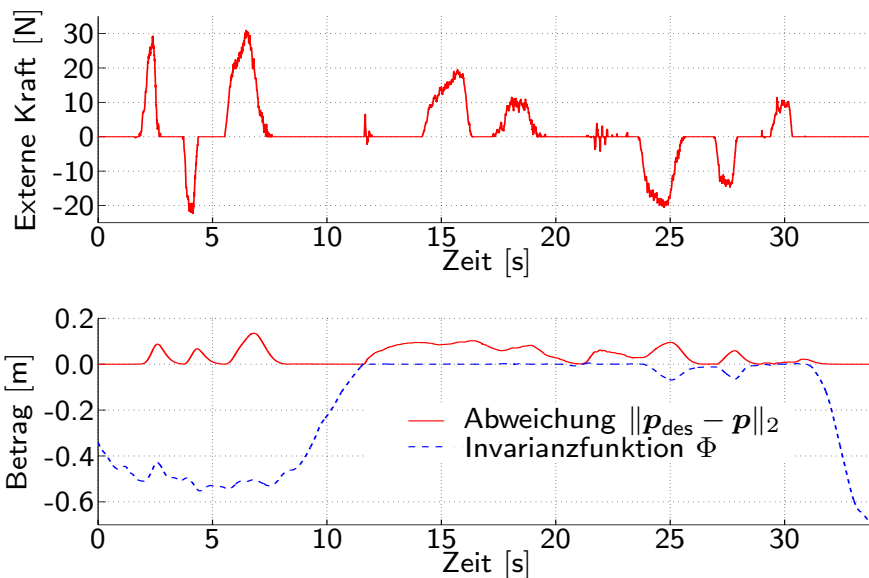


Durchführung

- (1) Annäherung ohne physischen Kontakt
- (2) Annäherung bei gleichzeitigem, physischem Kontakt

Video im *attachment browser* unter
<https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1346232>

Ergebnisse



Resultate

- Nachgiebigkeit
- Einhaltung der dynamischen Grenze

Invarianzregelung für

- nichtlineare Systeme mit hohen Abtastraten
- garantierte Einhaltung vieler dynamischer Limits
- Systeme mit messbaren Störungen
- sichere Mensch-Roboter-Interaktion

- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control for Safe Human-Robot Interaction in Dynamic Environments.** IEEE Transactions on Robotics (conditionally accepted). 2017.
- ▶ M. Kimmel, C. Jähne, and S. Hirche. **Augmented Invariance Control for Systems with Smoothness Constraints.** In: *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2016, pp. 4867–4873.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control with Time-varying Constraints.** In: *European Control Conference (ECC)*. 2016.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Active Safety Control for Dynamic Human-Robot Interaction.** In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2015.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control with Chattering Reduction.** In: *IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2014.
- ▶ M. Kimmel, M. Lawitzky, and S. Hirche. **6D Workspace Constraints for Physical Human-Robot Interaction using Invariance Control with Chattering Reduction.** In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2012.



Anforderungen
○○○○○

Invarianzregelung
○○○○○○○○○○

Erweiterungen
○○○○○○○○○○○○

Anwendung
○○○○●

33



Referenzen I

- ▶ A.D. Ames, J.W. Grizzle, and P. Tabuada. **Control Barrier Function based Quadratic Programs with Application to Adaptive Cruise Control.** In: *IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2014.
- ▶ D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. **The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.** In: *IEEE Robotics Automation Magazine* 4.1 (1997), pp. 23–33.
- ▶ E. Gilbert and I. Kolmanovsky. **Nonlinear tracking control in the presence of state and control constraints: a generalized reference governor.** In: *Automatica* 38.12 (2002), pp. 2063–2073.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Active Safety Control for Dynamic Human-Robot Interaction.** In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2015.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control for Safe Human-Robot Interaction in Dynamic Environments.** IEEE Transactions on Robotics (conditionally accepted). 2017.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control with Chattering Reduction.** In: *IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2014.
- ▶ M. Kimmel and S. Hirche. **Invariance Control with Time-varying Constraints.** In: *European Control Conference (ECC)*. 2016.
- ▶ M. Kimmel, C. Jähne, and S. Hirche. **Augmented Invariance Control for Systems with Smoothness Constraints.** In: *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2016, pp. 4867–4873.
- ▶ M. Kimmel, M. Lawitzky, and S. Hirche. **6D Workspace Constraints for Physical Human-Robot Interaction using Invariance Control with Chattering Reduction.** In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2012.



34



Referenzen II



- ▶ J. Mareczek, M. Buss, and G. Schmidt.
Sufficient Conditions for Invariance Control of a Class of Nonlinear Systems.
In: *39th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2000.
- ▶ D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao, and P.O.M. Scokaert.
Constrained model predictive control: Stability and optimality. In: *Automatica* 36.6 (2000), pp. 789–814.
- ▶ E. Rimon and D.E. Koditschek. **Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions.**
In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 8.5 (1992), pp. 501–518.
- ▶ L.B. Rosenberg. **Virtual Fixtures: Perceptual Tools for Telerobotic Manipulation.**
In: *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*. 1993, pp. 76–82.
- ▶ J. Wolff and M. Buss.
Invariance Control Design for Nonlinear Control Affine Systems under Hard State Constraints.
In: *NOLCOS'2004 Symposium on Nonlinear Control Systems*. 2004.

Diese Arbeit wird unterstützt durch:



ERC Starting Grant Control based on Human Models