DuEPublico
Duisburg-Essen Publications online

Vergleich der modellprädiktiven Trajektorienscharregelung mit konventionellen Regelungsverfahren

Makarow, Artemi; Rösmann, Christoph; Keller, Martin; Bertram, Torsten

In: IFToMM D-A-CH Konferenz / Vierte IFToMM D-A-CH Konferenz 2018

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt.

Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: https://doi.org/10.17185/duepublico/45325

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20180213-135623-4

Link: http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet?id=45325

Vergleich der modellprädiktiven Trajektorienscharregelung mit konventionellen Regelungsverfahren

Comparison of model predictive trajectory set control with conventional control approaches

Artemi Makarow, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, artemi.makarow@tu-dortmund.de

Christoph Rösmann, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, christoph.roesmann@tu-dortmund.de

Martin Keller, ehemals Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, martin.keller@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, torsten.bertram@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Zur schnellen und präzisen Regelung mechatronischer Systeme, insbesondere in industriellen Anwendungen, werden zumeist kaskadierte Regelungskonzepte auf Basis von PID-Reglern verwendet [1]. Die einzelnen PID-Regler werden mit nichtlinearen Kennlinien für die integrale und proportionale Verstärkung erweitert, um den Anforderungen an das Systemverhalten gerecht zu werden. Diese Regelungskonzepte weisen eine hohe Anzahl an verkoppelten Reglerparametern auf. Der Reglerentwurf ist somit nicht intuitiv und erfordert zumeist den Einsatz einer automatisierten evolutionären Hardware-in-the-Loop Optimierung [2]. Eine nachträgliche Anpassung des Systemverhaltens ist nur durch einen Prozessexperten möglich. Gesucht ist ein universelles Regelungskonzept, welches garantiert echtzeitfähig ist, eine hohe Regelungsgüte liefert und einen intuitiven manuellen Reglerentwurf ermöglicht. Häufig weist der äußere Regler der Kaskade die höchste Komplexität auf. Für einen geringen Realisierungsaufwand kann der äußere Regler ersetzt und der restliche Regelkreis beibehalten werden.

Die modelprädiktive Trajektorienscharregelung (MPTSC) basiert auf der Idee der klassischen modellprädiktiven Regelung (MPC) mit einem beschränkten gleitenden Horizont [3], die in jedem Abtastschritt ein Optimalsteuerungsproblem löst. Das zukünftige Systemverhalten kann im laufenden Betrieb über ein dynamisches Modell prädiziert werden. Es kann somit einer im Sinne des Gütemaßes optimaler Stellgrößenverlauf aufgeschaltet werden. Während die Regelungsgüte im Vergleich zu den klassischen Regelungskonzepten ansteigt oder ähnlich ausfällt, nimmt die Anzahl an freien Reglerparametern deutlich ab. Darüber hinaus können Stell- und Zustandsbeschränkungen explizit berücksichtigt werden. Allerdings ist der Einsatz von gradienten-basierten Optimierungsalgorithmen mit einer hohen Rechenleistung verbunden und nur beschränkt für mechatronische Systeme mit schnellen Dynamiken echtzeitfähig. Die modellprädiktive Trajektorienscharregelung verwendet keine gradienten-basierte Optimierung und besteht aus zwei wichtigen Teilschritten. Zunächst wird der ursprünglich kontinuierliche Stellgrößenwertebereich zwischen dem minimalem Stellwert $u_{\min}$ und dem maximalen Stellwert $u_{\max}$ grob und äquidistant mit der Schrittweite Δu diskretisiert, um Stellgrößenkandidaten zu generieren:

$$u_{\text{lin}} \in \mathbb{D} := \{u_{\min}, u_{\min} + \Delta u, u_{\min} + 2\,\Delta u, \ldots, u_{\max}\}. \tag{1}$$

Im Vergleich zur klassischen modellprädiktiven Regelung kann nur eine suboptimale Regelung erfolgen, da die optimale Stellgröße eventuell nicht in der diskreten Wertemenge $\mathbb{D}$ enthalten ist. In der Realität ist der Einfluss des Modellfehlers und des Beobachterfehlers allerdings größer als der der suboptimalen Lösung [4]. Wenn der Modellfehler vernachlässigbar ist, kann der Einfluss der suboptimalen Lösung durch eine Adaption der Stellgrößendiskretisierung verringert werden [5]. In diesem Fall erfolgt eine Approximation der klassischen modellprädiktiven Regelung. Die Adaption kann beispielsweise mit Hilfe von zusammengesetzten polynomialen Funktionen erfolgen mit der Abbildung $f(u_{\text{lin}}) : \mathbb{D} \to \mathbb{A}_k$ und von dem letzten Stellgrößenwert u_{k-1} abhängen. Für drei verschiedene letzte Stellwerte u_{k-1} ist die Funktion in **Bild 1** visualisiert. Die adaptive Stellgrößendiskretisierung kann auch genutzt werden, um die Anzahl der möglichen Stellgrößenwerte zu reduzieren.

Im zweiten Schritt der modellprädiktiven Trajektorienscharregelung werden mit Hilfe der möglichen Stellgrößenwerte Zustandstrajektorien auf dem Horizont generiert und mit einem beliebigen Gütemaß J bewertet. Da kein gradientenbasierter Algorithmus zum Einsatz kommt, gibt es keine besonderen Anforderungen wie Glattheit an das Optimierungsproblem. Im einfachsten Fall wird jeder Stellgrößenwert, wie in **Bild 2**, mit dem Stellhorizont $n_{\text{c}} = 1$ auf dem Prädiktionshorizont konstant gehalten. Das Optimalsteuerungsproblem kann mit Hilfe des Minimumoperators gelöst werden:

$$u_k^* = \arg\min_{u \in \mathbb{A}_k} J(\mathbf{x}_k, u) \quad \text{mit dem Zustandsvektor} \quad \mathbf{x}^\intercal = [x_1, x_2, ..., x_n]^\intercal . \tag{2}$$

Für einen höheren Freiheitsgrad auf dem Prädiktionshorizont oder bei der Regelung von Mehrgrößensystemen steigt die kombinatorische Vielfalt. Ein geeigneter Suchalgorithmus bietet hier die Möglichkeit die Anzahl der zu testenden Kombinationen zu reduzieren.

Im realen Experiment hat sich das neue Regelungskonzept bereits für verschiedene mechatronische Systeme bewährt. Stell- und Zustandsbeschränkungen werden stets eingehalten. In **Bild 3** ist das Ergebnis für das System Industrial Plant Emulator (ECP220) dargestellt. Ein Wegeventil mit einem Regelungstakt von 10 kHz ist ein weiteres Beispiel für ein sehr schnelles und industriell geprägtes System. Für dieses System konnte die Komplexität von 24 Parametern auf fünf Parameter reduziert werden [4]. Bekannte Benchmark-Systeme zeigen, dass die Rechenzeit deutlich kürzer ist (Faktor fünf) als bei klassischen modellprädiktiven Konzepten bei vergleichbarer Regelungsgüte.

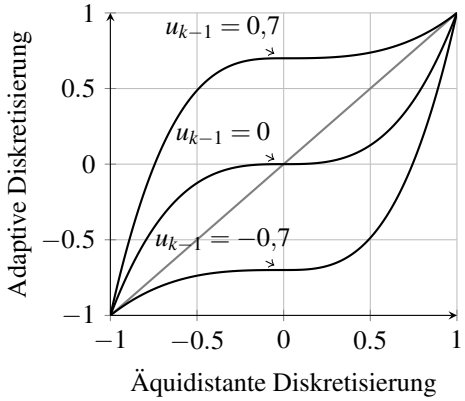

Bild 1 Adaptive Stellgrößendiskretisierung. In jedem Abtastschritt k werden die Kandidaten der äquidistanten Diskretisierung $u \in \mathbb{D}$ auf die Werte $u \in \mathbb{A}_k$ abgebildet.

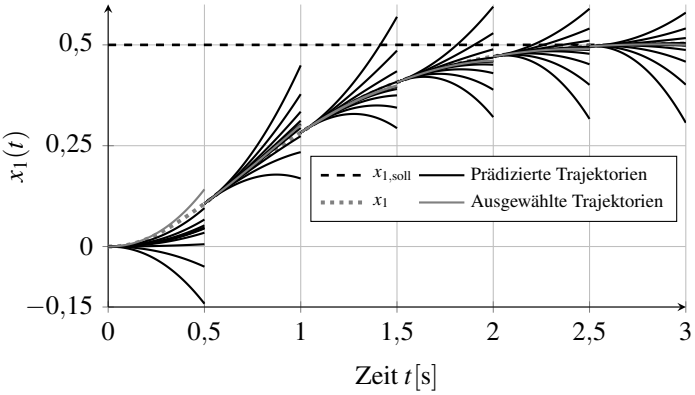

Bild 2 Für sechs Abtastschritte ist der offene Regelkreis für ein Beispiel-Benchmarksystem (Van-der-Pol Oszillator) dargestellt.

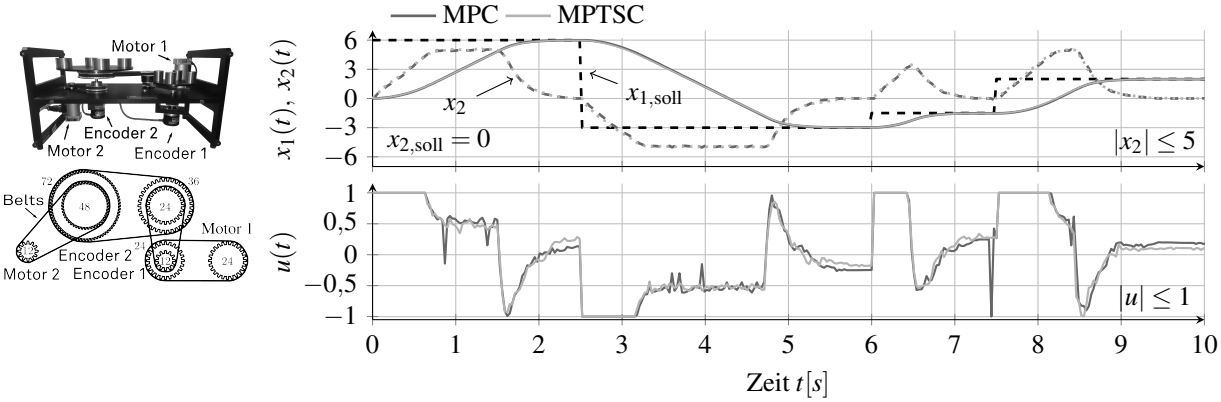

Bild 3 Links: Industrial-Plant-Emulator ECP220. Rechts: Vergleich des geschlossenen Regelkreises von klassischem MPC mit $n_c = 1$ und MPTSC. Das System ECP220 stellt die Regelstrecke und ein nichtlineares Modell zweiter Ordnung das Prädiktionsmodell dar.

Literatur

[1] Åström, K.J.; Hägglund, T.: *The future of PID control*. Control Engineering Practice. (2001) Vol. 9, Nr. 11, S. 1163-1175.

[2] Krettek, J.; Schauten, D.; Hoffmann, F.; Bertram, T.: *Evolutionary hardware-in-the-loop optimization of a controller for cascaded hydraulic valves*. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 2007.

[3] Morari, M.; Lee, J. H.: *Model predictive control: past, present and future*. Computers & Chemical Engineering. (1999) Vol. 23, Nr. 4-5, S. 667-682.

[4] Makarow, A.; Keller, M.; Rösmann, C.; Bertram, T.; Schoppel, G.; Glowatzky, I.: *Model predctive trajectory set control for a proportional directional control valve*. In: IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) 2017.

[5] Makarow, A.; Keller, M.; Rösmann, C.; Bertram, T.: *Model predctive trajectory set control with adaptive input domain discretization*. In: American Control Conference (ACC) 2018, (accepted).