



IVS-Award 2019

mit Prämierung am 18.11.2019 für

Herrn Michael Hertneck

**für seine am Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik (IST)
durchgeführte Masterarbeit (Abgabe: 04/2019) mit dem Titel**

Nonlinear Periodic Event-Triggered Control Based on Non-Monotonic Lyapunov Functions

Abstract

This thesis investigates the stabilization of nonlinear continuous-time networked control systems with packetized communication employing periodic event-triggered control (PETC) for a given network specification in terms of a bound on the number of successive lost packets.

Assuming knowledge of a stabilizing feedback law for the continuous-time system with a certain convergence rate, first a dynamic, state dependent PETC mechanism is designed. This PETC mechanism uses a zero order hold (ZOH) controller and guarantees on average the same worst case convergence behavior as the system with continuous-time feedback except for tunable deviations. A new approach to determine the sampling period for the proposed ZOH-PETC mechanism is presented. This approach as well as the actual trigger rule of the ZOH-PETC mechanism exploit the theory of non-monotonic Lyapunov functions. Robustness to a bounded number of lost packets is guaranteed by design.

Advanced PETC mechanisms for different setups are deviated from the ZOH-PETC mechanism. A modification to the ZOH-PETC mechanism that shows under some assumptions robustness to bounded state disturbances is presented. Moreover, a PETC mechanism that uses a model-based controller, i.e. a controller that estimates the system state at the actuator between transmission times based on the last successfully transmitted state information and a system model, is introduced. This model-based PETC can improve the system performance and reduce the number of triggered transmissions in comparison to the ZOH-PETC mechanism. To guarantee stability and the desired convergence behavior, the model-based PETC mechanism uses a ZOH controller as backup. It is furthermore shown, how a PETC mechanism with resemblances to self-triggered control can be designed based on the ZOH-PETC mechanism. This mechanism uses the same trigger rule as the ZOH-PETC mechanism does not need an evaluation of the trigger rule at each sampling period of the PETC, which allows to switch sensors off at some times.

In addition, a sparse PETC mechanism is presented, that applies a ZOH controller only for one period after a successful transmission and switches the input off otherwise. In the design of this sparse PETC mechanism, a different methodology as for the previously mentioned mechanisms is used. Thus, this mechanism and the underlying methodology are worthwhile being investigated separately.

The proposed PETC mechanisms are illustrated with a nonlinear numerical example from literature.

The last part of this thesis demonstrates, how some of the main ideas behind the PETC mechanisms that are presented in this thesis can be used to design an event-triggered control (ETC) mechanism for nonlinear discrete-time systems. Some properties of discrete-time systems, as the possibility to compute future system states for deterministic systems exactly are exploited. It is demonstrated how a controller and a Lyapunov function for the ETC mechanism for discrete-time systems can be synthesized automatically. Moreover, we present a statistic approach to obtain an increased number of successive lost packets, for which asymptotic stability can be guaranteed with high confidence if the ETC mechanism is used.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Stabilisierung nichtlinearer, zeitkontinuierlicher, vernetzter Regelungssysteme mit Paket basierter Kommunikation unter Verwendung der periodischen, Ereignis basierter Regelung (engl. Periodic event-triggered control, PETC) für eine gegebene Netzwerkspezifikation im Sinne einer Begrenzung der Anzahl aufeinanderfolgender verlorener Pakete untersucht.

Ausgehend von der Kenntnis eines stabilisierenden Reglers für das zeitkontinuierliche System mit einer bestimmten Konvergenzrate wird zunächst ein dynamischer, zustandsabhängiger PETC Mechanismus entworfen. Dieser PETC Mechanismus verwendet einen Zero Order Hold (ZOH) Regler und garantiert im Durchschnitt das gleiche Worst Case Konvergenzverhalten wie der zeitkontinuierlicher Regler mit Ausnahme von wählbaren Abweichungen. Ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Periodendauer für den vorgeschlagenen ZOH-PETC Mechanismus wird vorgestellt. Dieser Ansatz sowie die eigentliche Übertragungsregel des ZOH-PETC Mechanismus, basieren auf Resultaten für nicht monotone Lyapunovfunktion. Die Robustheit gegenüber einer begrenzten Anzahl von aufeinanderfolgenden verlorenen Paketen wird durch das Design des ZOH-PETC Mechanismus gewährleistet.

Erweiterte PETC Mechanismen für verschiedene Anwendungsfälle werden vom ZOH-PETC Mechanismus abgeleitet. Eine Modifikation des ZOH-PETC Mechanismus, die unter bestimmten Annahmen Robustheit gegenüber beschränkten Zustandsstörungen garantiert, wird vorgestellt. Darüber hinaus wird ein PETC Mechanismus vorgestellt, der einen modellbasierten Regler verwendet, d.h. einen Regler, der die Zustände des Systems am Stellglied zwischen den Übertragungszeiten basierend auf den zuletzt erfolgreich übertragenen Zustandsinformationen und einem Systemmodell schätzt, um die Systemleistung zu verbessern und die Anzahl der vom PETC Mechanismus ausgelösten Übertragungen zu reduzieren. Um Stabilität und das gewünschte Konvergenzverhalten zu gewährleisten, verwendet dieser PETC Mechanismus einen ZOH-Regler als Backup. Weiterhin wird gezeigt, wie ein PETC Mechanismus mit Ähnlichkeiten zur selbst auslösenden Regelung (engl. self-triggered control) basierend auf dem ZOH-PETC Mechanismus entworfen werden kann. Dieser Mechanismus verwendet die gleiche Übertragungsregel wie der ZOH-PETC Mechanismus, benötigt aber nicht zu jeder Abtastzeit eine Auswertung der Übertragungsregel, so dass die Sensoren des vernetzten Regelungssystems zu bestimmten Zeiten ausgeschaltet werden können.

Zusätzlich wird ein PETC Mechanismus vorgestellt, der den Regler nach erfolgreicher Übertragung nur für eine Periodendauer anwendet und den Systemeingang danach abschaltet. Bei der Entwicklung dieses PETC Mechanismus wird eine andere Methodik verwendet als bei den zuvor genannten Mechanismen, so dass es sich lohnt, diesen Mechanismus und die verwendete Methodik separat näher zu untersuchen.

Die vorgestellten PETC Mechanismen werden mit einem nichtlinearen numerischen Beispiel veranschaulicht.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird gezeigt, wie einige der Hauptideen hinter den PETC Mechanismen, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, genutzt werden können, um einen Mechanismus für die Ereignis basierte Regelung (ETC) für zeitdiskrete Systeme zu entwerfen. Eigenschaften von zeitdiskreten Systemen, wie die Möglichkeit, zukünftige Systemzustände für deterministische Systeme exakt zu berechnen, werden hierbei ausgenutzt.

Es wird demonstriert, wie ein Regler und eine Lyapunovfunktion für diesen Mechanismus automatisch synthetisiert werden können. Darüber hinaus wird ein statistischer Ansatz vorgestellt, um die maximal zulässige Anzahl an nacheinander verlorenen Paketen, für die asymptotische Stabilität gewährleistet werden kann, wenn der ETC Mechanismus verwendet wird, zu verlängern.