

Abstract

In this thesis, we consider data-driven analysis as well as prediction-based design of aperiodic sampling in control systems. In many modern control applications such as networked control systems, cyber-physical systems and cloud control, the traditional view of sampling and controlling in a periodic fashion must be abandoned due to varying transmission delays, data loss or uneven computational latencies. In addition, methods for targeted aperiodic sampling, such as event-triggered control (ETC), have grown in popularity as they can offer an improved sample efficiency compared to periodic implementations. In the first case, where the aperiodicity of the sampling instants is an undesired phenomenon, it is necessary to *analyze* the effect of aperiodicity on the closed loop, and to ensure that stability and a certain performance level are retained. In the second case, where the aperiodicity is a degree of freedom, it must be *designed* so that control goals are satisfied with a minimum amount of samples or with maximum performance.

Existing approaches for the analysis of aperiodic sampling in control systems rely on the availability of accurate models, which might be difficult to obtain from first principles or noisy data. Conventional methods for the design of aperiodic sampling, in contrast, suffer from serious challenges even when a model is available: Predicting the resulting sampling pattern has turned out to be a very challenging problem for ETC, such that the provisioning of sufficient communication and computation resources in the control loop becomes difficult. The lacking predictability also implicates that ETC design procedures, which guarantee an improved resource efficiency, are rare.

This thesis contributes to both mentioned perspectives, namely to the analysis as well as to the design of aperiodic sampling in control systems. In particular, we close the identified gaps by (i) providing methods to analyze stability of control systems under arbitrary aperiodic sampling directly from recorded data, without requiring any model knowledge; and (ii) proposing a prediction-based approach for design of

Abstract

the aperiodic sampling pattern, called rollout ETC, which allows for predictability of the required resources and a guarantee of improved sample efficiency. For the design of aperiodic sampling, we assume an accurate model of the control system is available. It is reasonable to address the mentioned fundamental challenges in a model-based setting to begin with, since the data-driven setup often comes with additional difficulties.

Data-driven analysis of aperiodic sampling in control systems

In Chapter 3, we consider the direct data-driven analysis of control systems under arbitrary aperiodic sampling patterns, of which only a uniform upper bound on the sampling interval is known. We assume there is only a finite and potentially noise-corrupted set of input-state measurements available, whereas model knowledge is not provided. We propose two data-driven approaches for stability analysis and state-feedback design. The first takes a robust input/output perspective on the system under aperiodic sampling, the second a switched systems perspective. In the former, we also present novel model-based stability conditions as an intermediate result of independent interest. The derived data-driven conditions are formulated as linear matrix inequalities (LMIs), and thus allow for an efficient stability check and controller design directly from the available data and without any intermediate model identification step. We compare the two approaches both in a numerical example and on a conceptual level, with a particular focus on their computational complexity and their conservatism with respect to data quality. Finally, we benchmark the proposed approaches with an established indirect method, consisting of system identification and a subsequent model-based analysis.

Rollout ETC: prediction-based design of aperiodic sampling in control systems

In Chapter 4, we address the prediction-based design of aperiodic sampling for control systems. In particular, our goal is to encode specifications on the sampling pattern a priori and at the same time ensure an improved performance/sampling tradeoff. To this end, we consider *rollout ETC*, where the event-trigger condition is defined implicitly through a model-based prediction and optimization of the sampling instants, and a subsequent rollout of the optimized strategy. We propose a novel analysis of rollout ETC through the lens of model predictive control (MPC),

and exploit the potentials that come with this new viewpoint: We include the token bucket specification, which offers more flexibility for the sampling pattern than previous options; provably exploit the available flexibility; ensure satisfaction of this specification and asymptotic stability of the closed loop; and certify a strict improvement of control performance compared to periodic sampling at the same average rate. In addition, we address the practically relevant case that only noisy output measurements are available and disturbances act on the plant. These enhancements qualify rollout ETC as a serious contender to periodic sampling and conventional ETC, which we also confirm in numerical simulations.

Deutsche Kurzfassung

Diese Doktorarbeit befasst sich sowohl mit der datenbasierten Analyse als auch mit dem prädiktiven Entwurf von aperiodischen Abtastverfahren in Regelungssystemen. In vielen aktuellen Regelungsanwendungen muss die traditionelle Auffassung, dass das Abtasten und Regeln zu periodischen Zeitpunkten geschieht, aufgegeben werden. Dies ist unter anderem in vernetzten Regelungssystemen, cyber-physischen Systemen und cloud-basierten Regelungen der Fall, beispielsweise aufgrund von variierenden Übertragungsverzögerungen, dem Verlust von Datenpaketen oder ungleichmäßigen Latenzzeiten. Außerdem haben Verfahren zur gezielten aperiodischen Abtastung, wie z.B. die ereignisbasierte Regelung (Englisch: *event-triggered control*, ETC), an Popularität zugenommen, da diese oftmals eine höhere Abtast-Effizienz als periodische Verfahren aufweisen. Im ersten Fall, in dem die Aperiodizität der Abtastzeitpunkte ein ungewolltes Phänomen ist, ist es erforderlich, ihren Effekt auf den geschlossenen Regelkreis zu *analysieren* und sicherzustellen, dass Stabilität und eine gewisse Regelgüte erhalten bleiben. Im zweiten Fall, in dem die Aperiodizität ein Freiheitsgrad ist, muss diese auf solch eine Weise *entworfen* werden, dass Regelziele mit einer möglichst geringen Anzahl an Abtastwerten oder einer möglichst hohen Regelgüte erreicht werden.

Bisherige Analysetechniken benötigen ein exaktes Modell des untersuchten dynamischen Systems, wobei es jedoch oft schwierig ist, dieses aus physikalischen Überlegungen oder verrauschten Messungen zu gewinnen. Existierende Entwurfsmethoden für aperiodische Abtastverfahren weisen dagegen auch dann grundlegende Probleme auf, wenn ein genaues Modell verfügbar ist: Es hat sich für ETC als herausfordernd herausgestellt, das im geschlossenen Kreis resultierende Abtastmuster vorherzusagen. Dadurch ist es schwierig sicherzustellen, dass genügend Kommunikations- und Rechenressourcen im Regelkreis bereitgestellt wurden. Die fehlende Vorhersagbarkeit hat auch zur Folge, dass Entwurfsmethoden für ETC,

die eine verbesserte Ressourceneffizienz garantieren, nur eingeschränkt verfügbar sind.

Diese Doktorarbeit leistet einen Beitrag zu beiden Perspektiven, sowohl zur Analyse als auch zum Entwurf von aperiodischen Abtastverfahren in Regelungssystemen. Zur Lösung der genannten Probleme (i) schlagen wir Verfahren vor, um die Stabilität von Systemen mit beliebigen aperiodischen Abtastmustern direkt mithilfe von gemessenen Daten zu untersuchen, wobei kein Modellwissen benötigt wird; und (ii) entwickeln einen prädiktionsbasierten Ansatz zum Entwurf des aperiodischen Abtastmusters, welcher die Prädizierbarkeit der benötigten Ressourcen und eine garantierte Verbesserung der Abtast-Effizienz ermöglicht. Für den Entwurf des Abtastverfahrens nehmen wir an, dass ein genaues Modell des untersuchten Systems verfügbar ist. Es ist sinnvoll, die angesprochenen grundlegenden Fragen zunächst im modellbasierten Fall zu klären, da datenbasierte Methoden oftmals zusätzliche Schwierigkeiten beinhalten.

Datenbasierte Analyse von aperiodischen Abtastverfahren in Regelungssystemen

In Kapitel 3 betrachten wir die direkte datenbasierte Analyse von Regelungssystemen mit beliebigen aperiodischen Abtastmustern, wobei nur eine Obergrenze des Abtastintervalls bekannt sein muss. Wir nehmen an, dass nur eine endliche und möglicherweise verrauschte Menge an Eingangs-Zustands-Messungen verfügbar ist, wobei kein Modellwissen vorliegt. Wir präsentieren zwei unterschiedliche datenbasierte Ansätze zum Zweck der Stabilitätsanalyse und dem Entwurf einer Zustandsrückführung, wobei der Erste das aperiodisch abgetastete System aus Sicht der robusten Regelung betrachtet, während der Zweite es als geschaltetes System auffasst. Als Zwischenergebnis von unabhängigem Interesse entwickeln wir in dem ersten Ansatz auch neuartige modellbasierte Stabilitätsbedingungen. Die hergeleiteten datenbasierten Bedingungen sind als lineare Matrixungleichungen (Englisch: *linear matrix inequalities*, LMIs) formuliert, wodurch sie effizient überprüft werden können, den wirksamen Entwurf von Reglern direkt aus den verfügbaren Daten erlauben und ohne dazwischenliegenden Modellidentifikationsschritt auskommen. Wir vergleichen beide Ansätze hinsichtlich ihrer Rechenkomplexität und ihrem Konservatismus bezüglich der Datengüte, sowohl in numerischen Beispielen als auch auf konzeptioneller Ebene. Schließlich vergleichen wir die entwickelten Ansätze mit

einer etablierten Methode zur datenbasierten Regelung, der Systemidentifikation mit anschließender modellbasierter Analyse.

Rollout ETC: prädiktiver Entwurf von aperiodischen Abtastverfahren in Regelungssystemen

In Kapitel 4 wenden wir uns dem prädiktionsbasierten Entwurf des aperiodischen Abtastmusters für Regelungssysteme zu. Unsere Ziele sind es, Anforderungen an das Abtastmuster im Voraus spezifizieren zu können und gleichzeitig den Zielkonflikt zwischen Regelgüte und Abtastrate garantiert zu verbessern. Zu diesem Zweck betrachten wir *rollout ETC*, worin die Ereignisbedingung implizit durch eine modellbasierte Prädiktion und Optimierung der Abtastzeitpunkte, und einer anschließenden Ausführung (Englisch: *rollout*) der optimierten Strategie definiert ist. Wir entwickeln neuartige Analysewerkzeuge für *rollout ETC*, welche von modellprädiktiver Regelung (Englisch: *model predictive control*, MPC) inspiriert sind, und machen von den Potenzialen dieser geänderten Perspektive Gebrauch: Wir nutzen den Token-Bucket-Algorithmus um Anforderungen an das Abtastmuster zu spezifizieren; wir können garantieren, dass dessen Flexibilität ausgenutzt wird; wir gewährleisten, dass die Anforderungen an das Abtastmuster eingehalten werden und der geschlossene Regelkreis asymptotisch stabil ist; und wir stellen sicher, dass die Regelgüte gegenüber einem periodischen Abtastmuster mit derselben durchschnittlichen Abtastrate strikt verbessert wird. Zusätzlich behandeln wir den praktisch relevanten Fall, in dem lediglich ein verrauschter Ausgang zur Verfügung steht und Störungen auf die Regelstrecke wirken. Die vorgestellten Verbesserungen machen *rollout ETC* zu einer ernsthaften Alternative zu periodischen Implementierungen und konventionellem ETC, was wir auch mithilfe von numerischen Simulationen bestätigen.