

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07234

研究課題名(和文)時刻情報を利用した省データネットワーク化制御

研究課題名(英文)Data rate constrained control using time-stamps

研究代表者

岡野 訓尚 (Okano, Kunihisa)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：80778209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、データレートが有限な通信路を用いたネットワーク化制御系を対象に、通信制約を考慮した安定化可能条件の導出に取り組んだ。通信パケットに含まれる情報のうち、ペイロード部に格納される制御対象の状態に関する情報に加えて、ヘッダ部等に記録される時刻情報(タイムスタンプ)を用いた制御手法について検討した。この手法において誤差の原因となる不確かさとして、時刻同期誤差とモデルのパラメータの不確かさを取り上げ、安定化可能な制御器が存在するために必要または十分な条件を導出し、安定化のために許容可能な不確かさの大きさを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have dealt with stabilization of networked control systems where the data rate of the network is limited. We have studied stabilization methods which utilize time-stamp information attached to transmitted packets as well as finite bit data on the plant outputs. Specifically, we have analyzed the effects of uncertainties that will cause state estimation errors at the controller side in this setup. We have focused on time synchronization errors and parameter uncertainty in the plant model. Necessary conditions and sufficient conditions for stabilizability have been derived. These results characterize limitations for stabilizability because of the uncertainties.

研究分野：工学

キーワード：制御工学

1 . 研究開始当初の背景

通信路を含む制御系（ネットワーク化制御系）は、近年の情報通信技術の発展を背景に急速に利用が広がっている。ネットワーク化制御系の設計に際しては通信設備への投資や負荷をなるべく低く抑えたいとの要求がある。一方で、低速・低信頼な通信路の使用は制御に利用可能な情報量が乏しいことを意味し、所望の制御性能を達成できないおそれがある。そこで、通信路の使用に起因する制約（データレート制約、パケット損失、通信遅延など）を陽に考慮した制御系の解析が盛んに行われてきた。

とくに、不安システムを安定化するために最低限必要なデータレートを明らかにした結果（Data rate theorem と呼ばれる）は、2000 年前後から近年まで続くネットワーク化制御系に関する活発な研究活動の先駆的の結果である。この結果は、データレートが有限な通信路を使用することに起因して、制御器では取り除けない基本的限界が存在することを示し、多くの注目を集めた。Data rate theorem によると、安定化を達成するためには、制御対象の状態について、制御対象の不安定極の積で定まる、あるビット数を超える情報量が必要である（さらに十分でもあることが示されている）。このデータレート限界は、制御工学の議論においてよく仮定される線形時不変な制御器に限らず、どんな因果的なシステムを用いても突破できない限界であることが証明されている。

Data rate theorem に関する一連の研究では、通信されるパケットが含む情報として、制御対象の状態またはその推定値を有限ビット数で表現したものとすることがほとんどである。そして、その情報量がいくらならば安定性が確保できるか、ということが興味の対象であった。ところで、通信パケットにはペイロード部に格納される情報以外に、通信元、送信時刻、宛先など通信プロトコルが要求する情報が付加される。とくに時刻情報については、制御において重要な意味をもつが、これらの情報を制御に用いることについては、これまで十分な検討がなされてこなかった。

2 . 研究の目的

本研究では、データレート制約のある通信路を用いたネットワーク化制御系において、通信パケットに付与される時刻情報を陽に用いた制御手法を考案する。制御対象の状態を知るためには、「いつ」「どのような状態」であったかと、その後の動特性を記述する「モデル」を知ることが重要である。データレート制約によって「どのような状態」であったかに関する情報量は制約されるため、前述のようなデータレート限界が生じる。ここで、「いつ」その状態をとったかは、

通信パケットに含まれるタイムスタンプから取得することができる。たとえば、リアルタイム通信に用いられるプロトコル的一种である Real-time Transport Protocol では、ヘッダに 32 ビットのタイムスタンプが含まれる（図 1）。このタイムスタンプを制御対象の状態推定と制御に利用する方法と、その際のデータレート限界について解析する。

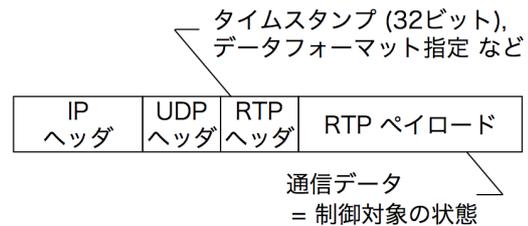


図 1 Real-time Transport Protocol のパケット構成

3 . 研究の方法

本研究で扱うタイムスタンプを利用した制御手法を考える上で、伝達される情報の不確かさが状態推定や制御に与える影響を解析することが主な課題となる。具体的には、以下に示す小課題に取り組んだ。

(1) タイムスタンプを用いた状態推定における時刻同期誤差の考慮

制御対象に配置されたセンサは出力をサンプルし、その値を取得時刻のタイムスタンプとともに制御器に通信する。ここで問題となるのは通信路を介して接続された機器間で同一の時刻を保持することが困難であるという事実である。時刻情報を生成する水晶振動子には個体差がある。また、温度や振動など動作環境によってもずれが生じる。時刻同期を行う手法は GPS や電波時計のように外部の参照信号を用いる手法や NTP や FTSP のように機器間の通信によって同期を図る手法など多数提案されているが、通信遅延のために完全な同期は不可能である。センサと制御器が同期していなかった場合、タイムスタンプが無限の精度で伝達されたとしても、タイムスタンプが意味する時刻は両者で異なる。

時刻同期誤差が存在するもとでタイムスタンプとモデルに基づき状態推定を行うと、推定誤差が生じ、最悪の場合安定化が達成できないおそれがある。そこで、どの程度の同期誤差までなら、安定化を達成するために許容できるか、解析する。

(2) 有限データレート信号を用いた制御におけるモデルの不確かさの考慮

データレートが有限の場合、実数の精度で制御対象の状態を知ることはできない。有限ビット数に量子化された情報を復号することで、ある幅をもつ、状態が含まれる区間のみ得ることができる。この状態の推定区間が制御対象の動特性によってどう遷移するかを制御対象のモデルによって予測することが重要となる。しかし、ほとんどの場合完全なモデルは利用不可能で、不確かさが存在する。モデルの不確かさは、ロバスト制御の発展に見られるように、制御において重要な関心事であった。ここでは、制御対象の状態とモデルの不確かさが同時に存在する場合の状態推定区間の算出方法を確立することが課題となる。

以上の課題について、理論的な検討を中心に取り組んだ。理論的検討の初期段階や、有効性の確認のためには計算機を用いた数値実験も行った。

4. 研究成果

以下では主な研究成果について、3節で述べた課題ごとに説明する。

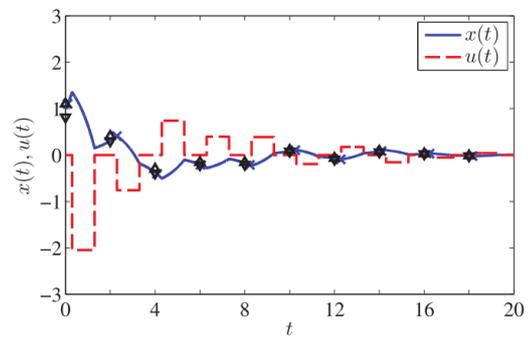
課題(1)について、つぎの成果が得られた。

(1) 時刻同期誤差の安定化限界

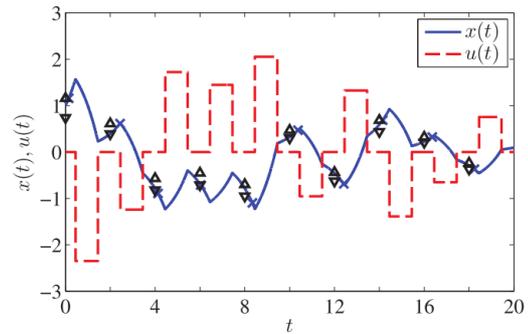
タイムスタンプを用いて状態推定を行い、それをもとに線形時不変不安定システムの安定化を行うフィードバック系を考え、安定化制御器が存在するための必要十分条件を導出した。安定化のために許容される同期誤差の大きさについて、1次元システムについては、制御対象とサンプル周期によって定まる安定化限界が存在し、2次以上のシステムについては、相異なる固有値をもつ場合は実質的には安定化限界が存在しないことを示した(これは本研究課題に先駆けて行った研究代表者らの研究において限定的な場合に導出されていたが、これが拡張された)。

相異なる固有値をもつ場合にこのような直観に反した結果となるのは、異なるモードに対応する状態の時間変化の差に注目することで、同期誤差を推定できるからである。

図2は、1次元システムを対象に、同期誤差の最大値が導出された安定限界より小さい場合(a)と、安定限界を超える場合(b)の制御対象の振る舞いを示している。制御器における状態推定区間の両端は赤点線で示されている。赤点線は制御入力であり、(a)では区分的定数入力によって状態(青線)が原点に漸近している。一方(b)においては、推定区間



(a) $\Delta = 0.30 < \bar{\Delta} \approx 0.32$



(b) $\Delta = 0.45 > \bar{\Delta} \approx 0.32$

図2 時刻同期誤差の大きさによる制御対象の振る舞いの違い

が縮小していかず、安定化が達成できていないことがわかる。

(2) 有限データレート信号と不確かなタイムスタンプを用いた安定化

前述の結果を有限データレート信号を用いた場合へ拡張した。データレート制約により生じる状態空間の不確かさと、時刻同期誤差によって生じる不確かさを同時に考慮し、安定化限界を導出した。1次元の場合は、制御目的を、漸近安定化ではなく状態をある原点近傍に留めることと緩和することで安定化限界を導出できた。2次以上の場合については、多次元に拡張する推定集合を解析的に求めることは難しいが、数値的なアプローチによって状態の算出することは可能である。

課題(2)について、以下の成果が得られた。

(1) 不確かなモデルを用いた有限データレート制御

モデルの不確かさを考慮した上で、安定化に最低限必要なデータレートと、十分なデータレートを導出した。モデルの不確かさとしては、ARXモデルを考え、その係数がある区間のどこかをとるというパラメトリックな不確かさを想定した。とくに、従来研究で扱われなかった入力に関する係数についても不確かさを考慮した。不確かさが存在する場合

は状態空間の量子化を、原点付近を粗く、原点から遠い、つまり絶対値が大きい領域を細かくとることで、よく使われるような量子化器を用いた場合より低いデータレートで安定化が達成できる。

また、確率的なパケットロスの発生を考慮した場合についても、データレートとパケットロス限界について安定化限界を導出した。

以上の成果より、有限データレート信号とともに時刻情報を用いてフィードバック制御を行う際に問題となる不確かさについて、それが制御にどの程度影響するか、明らかにすることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Kunihisa Okano, Masashi Wakaiki, Guosong Yang, Joao P. Hespanha, Stabilization of networked control systems under clock offsets and quantization, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, vol. 63, no. 6, 2018, 1618-1633, DOI: 10.1109/TAC.2017.2753938

Masashi Wakaiki, Kunihisa Okano, Joao P. Hespanha, Stabilization of systems with asynchronous sensors and controllers, Automatica, 査読有, vol. 81, 2017, 314-321, DOI: 10.1016/j.automatica.2017.04.005

Kunihisa Okano, Hideaki Ishii, Stabilization of uncertain systems using quantized and lossy observations and uncertain control inputs, Automatica, 査読有, vol. 81, 2017, 261-269, DOI: 10.1016/j.automatica.2017.03.036

若生将史, 岡野訓尚, 同期誤差を考慮したネットワーク化制御, 計測と制御, 査読有, 55 巻, 2016, 984-989, DOI: 10.11499/sicejl.55.984

[学会発表](計1件)

岡野訓尚, ネットワーク化制御系における基本的限界 時刻同期誤差の影響, ネットワーク上の制御と信号処理調査研究会特別講演会, 2016年11月9日, 北九州市立大学(福岡県北九州市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/kunihisaokano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡野 訓尚 (OKANO, Kunihisa)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 80778209

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者