

# 受動性に基づいた高信頼な非線形制御器が扱える仕様の拡張

航空宇宙工学専攻 制御工学研究室

博士後期課程3回 濱田 聖司

## 研究背景

制御工学とは様々な対象を思った通りに動作させる技術です。身近な例では、車が自動で車間距離等を調整してくれるアダプティブクルーズコントロールなどに制御工学の技術が用いられています。他にも、制御技術のおかげで、JAXA のはやぶさ2のように人工衛星を小惑星に着地させたり、NASA のインジェニイターのように火星で小型ヘリコプターを飛ばしたりといったことが可能になっています。この様に様々な応用分野で既に活躍している制御工学ですが、現在の制御工学では解決することのできない問題も多々存在します。私の研究ではその様な問題のうちの一つである安定化非線形制御器の調整問題に対して、一つの答えを与えました。

制御の基本的な目標は図1にあるように、車などの制御対象に、タイヤの回転などの制御入力を加えて、車両の現在地といった制御対象の状態を表す変数を目標の値まで持っていくことです。状態変数が一定時間経過後必ず目標値に到達するように制御入力を設計する(制御器を設計する)ことを制御工学では安定化と呼びます。安定化を達成する制御器を見つける難易度は制御対象の運動方程式(ダイナミクス)やキネマティクスの性質によって大きく異なります。例えば制御対象が線形な微分方程式で表される場合、すなわち定数行列と状態変数ベクトルとの積や和で微分方程式が書き表されるとき、安定化制御器もまた線形な方程式で与えられることが知られています。このときの安定化制御器の候補は定数行列の要素数分だけ存在します。すなわち、制御器の候補数は有限ですので、安定化制御器は比較的簡単に見つけることができます。しかしながら、制御対象が非線形であるとき、すなわち任意の非線形な関数を用いた微分方程式で制御対象が表現される場合には、安定化制御器もまた非線形な関数で与えられることとなります。非線形な関数の候補は無限にあるため、非線形な制御対象の安定化制御器を見つけることは非常に難しい問題となります。

実は、車や人工衛星、ヘリコプターなど、多くの制御対象は非線形な微分方程式で記述されるシステムです。しかしながら非線形な制御対象の安定化制御器を見つけることは難しいため、多くの場合では微分方程式を線形近似し、その近似した微分方程式に対して安定化制御器を設計することで、制御を行なってきました。線形近似が成り立つ範囲で状態変数が動くのであれば、安定化が達成できるという訳です。しかしながら線形近似制御器では、状態変数が近似可能な範囲を超えて動く場合に安定性を保証することができません。どんな状態であっても安定化を達成する信頼性の高い制御器を作るためには、非線形な安定化制御器を見つける必要があります。近年では、非線形な制御対象を機械、電気システムに限定して非線形安定化制御器を見つける手法が提案されています[a]。これは多くの制御対象が機械、電気システムに含まれており、またこれらのシステムがエネルギーという分かりやすい指標を持つためです。私の研究では制御対象を機械システムに限定し、システムのエネルギーの推移を陽に記述するポート・ハミルトン系という表現方式を用いて制御対象を記述することで、新しい非線形安定化制御器を見つけます。

## 研究内容

制御対象をポート・ハミルトン系で記述すると、非線形安定化制御器の設計は幾分容易になります。ポート・ハミルトン系ではエネルギーの推移が明確に表現されており、そのエネルギーが常に減るように制御器を設計すれば安定化が達成できるからです。もう少し簡単に言うと、運動エネルギーと位置エネルギーが常に減るように制御対象を動かす、運動エネルギーがゼロになったときに丁度目標の場所に制御対象が居るようにすることで安定化を達成するということとなります。

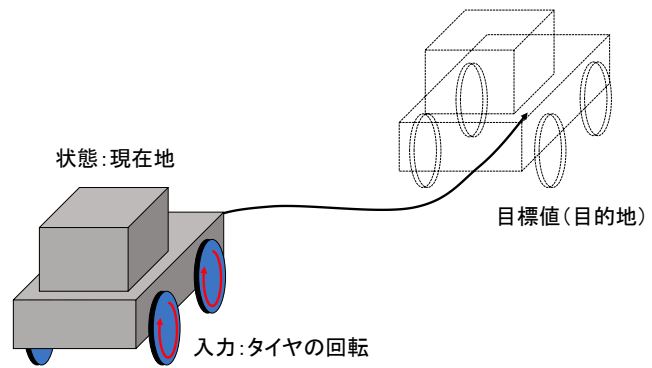


図 1 車の制御の例

さて、このように制御対象を限定してポート・ハミルトン系でシステムを記述すれば非線形安定化制御器の設計は容易になる訳ですが、実用の際には安定化を保証するだけでは十分ではありません。状態が目標値に到達することを保証するだけでなく、その過程で状態が適切に動くことをも保証する必要があります。例えば車の運転であれば、左右にふらついたり(振動)、停止線を超えて停止したり(定常偏差)といった動作は好ましくありません。できるだけ振動せず、かつ目標値に一致するように状態変数を動かすことが求められるのです(図2)。安定化制御器は理想的な環境下では目標値に到達することを保証できますが、想定していない環境下では制御をしていても予期しない摩擦などによって目標値に到達する前に止まってしまう、すなわち定常偏差が生じてしまうことがあります。その際に、定常偏差を低減するように制御器を再調整できれば良いのですが、非線形安定化制御器の場合、どのように調整すればよいのかは今のところ分かっていません。また、振動を抑制するように設計することも難しいことが知られています。

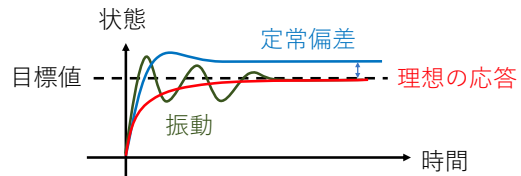


図2 応答の調整

近年では、振動の抑制に関して幾つかの研究がなされてきました[b]。今回の研究は、先の研究を発展させ定常偏差を低減可能な非線形安定化制御器を提案したものです[c]。この制御器は図3に示す形で発見しました。まず線形制御器の中で定常偏差を低減する特性を持つ制御器に着目し、これを非線形なダイナミクスを持つ入力として表現することで非線形制御器へと拡張します。次に、制御器のダイナミクスがもつエネルギーと制御対象の持つエネルギーを使って新しいエネルギーを定義し、このエネルギーが常に減少するようにダイナミクスを調整することで安定化を達成します。これにより、非線形システムの安定化を達成しつつ、定常偏差の低減を行うことが可能になりました。

実際に提案した制御器をマニピュレーター(図4)に適用した結果も図5に示しておきます。青色は定常偏差が残った状態、赤色が提案した制御器によって定常偏差を低減した結果になります。ここでは目標値を1に設定していますが、提案した制御器が確かに定常偏差を低減して状態を目標値に到達させていることが分かります。

**参考文献**

[a] Ortega, Romeo, et al., "Passivity-based control of Euler-Lagrange systems: mechanical, electrical and electromechanical applications", Springer Science & Business Media, 2013.  
 [b] T. C. Wesselink et al. "Saturated control without velocity measurements for planar robots with flexible joint", IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC) 2019, pp. 7093-7098.  
 [c] K. Hamada, P. Borja, J. M. A. Scherpen, K. Fujimoto and I. Maruta, "Passivity-Based Lag-Compensators With Input Saturation for Mechanical Port-Hamiltonian Systems Without Velocity Measurements," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 1285-1290, Oct. 2021, doi: 10.1109/LCSYS.2020.3032890.

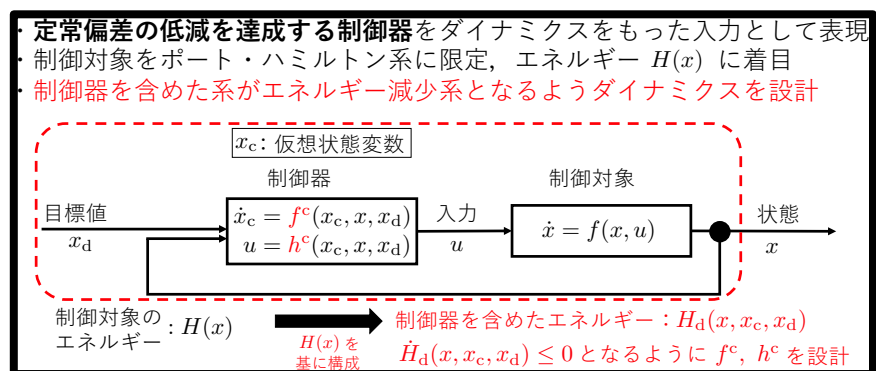


図3 定常偏差が低減可能な非線形安定化制御器の構築

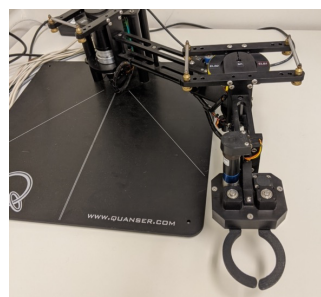


図4 使用したマニピュレーター

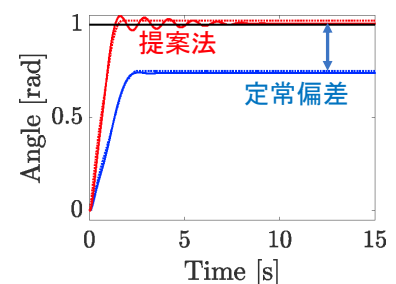


図5 実験結果