



In Laboratory Now

## 研究室訪問 4

# 新しい制御のカタチ

井村 順一 研究室～情報環境学専攻



井村 順一 教授

壁にぶつかるボールの運動のように、物体の運動には本来、連続的な変化だけでなく不連続な変化も生じている。今まで連続的な運動しか考慮に入れていなかった制御の世界に新たな切り口を与えたのは、不連続な運動の変化をも扱うハイブリッドシステム論と呼ばれる理論であった。しかし今の制御理論に比べ、この理論は膨大な計算量を要し、現実的に実用可能な代物ではなかった。

井村研究室ではハイブリッドシステムの制御理論を確立するため、この理論の持つ様々な問題に立ち向かい、理論を重視した研究を続けている。



## その名はハイブリッドシステム

私たちが車がある速度で運転したい場合を考えてほしい。その時私たちはまず車の外の情報を目や耳で感知し、目標とする速度を決め、今の速度を知る。そして今の速度が目標速度より遅ければアクセルを踏み、速ければ緩めるだろう。つまり、今の速度と目標速度の差をより小さくするように操作することで車を目標速度へと到達させるのだ。このように、対象(システム)をうまく操作し目標とする動作を行わせることを制御と呼ぶ。

近年の大きな技術発達のために機械はさらに複雑化してきた。そのため、システムに最適な運動をさせるための制御の理論がますます重要となり、それに応じる形で制御の技術は向上した。しかし未だ現在の制御理論は世の中の全てのシステムを完全に制御できるまでには至っていない。

制御に関し様々な提案がなされ、理論が構築されてゆく中、2000年前後にシステムの新しい捉え方が考えられ始めた。それがハイブリッドシステムだ。「混在した」という意味を持つハイブリッド。近年様々な学問領域で聞かれる言葉であるが、ここでは連続的な運動と離散的な運動の混在の意味で使われる。

例えば、車の走行運動は全てが連続的なものではなく、複数のギアによる切り替わり(離散的变化)が存在する。このように、物体には単一の連続的な運動だけではなく運動形式の変化も存在すると考えた新しいシステム表現がハイブリッドシステムだ。これは、図1に示すようにモードとその切り替わりによって表現することができる。

この表現はロボットの二足歩行で特に有効となる。右足、左足そして両足モードにおいて運動の形式が異なるため、ハイブリッドシステムとしてのモード表現が適切であろう(図1)。

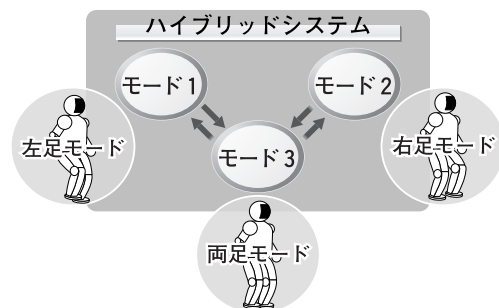


図1 ハイブリッドシステムのイメージ

現在の二足歩行ロボットの動きは、人が歩く運動に比べ一歩一歩の踏み出しがぎこちなく、最適な制御とは言い難い。しかしハイブリッドシステムの制御理論を適用すれば、離散変数と連続変数の両方を常に考慮することによって、さらに最適な運動が実現可能となる。したがって、ロボットの歩行は、今までの制御を適用するよりも人の歩行に近いスマートなものになるという。

世の中に存在しているシステムの多くは、連続的变化と離散的变化を含むハイブリッドシステムであると言える。しかし、それらは現在離散的变化を考えない連続的運動のみに基づいた制御理論が適用されているのが現状である。将来、ハイブリッドシステムの制御理論が発達し、多くのシステムに適用することができれば、システムの運動をさらに最適なものとするのが可能なのだ。



## 可制御性解析は確率的に

生まれて間もないハイブリッドシステムの制御理論は、現在基礎理論を構築する段階にある。その中でも特に重要な位置を占めるのが可制御性解析だ。システムを制御する際に果たしてそのシステムは制御できるか否か。工学的に言うならば、システムの状態を「初期状態」から「目標とする状態」へと移す操作方法が一つでも存在するかを解析すること、これが可制御性解析である。簡単なシステムの場合はさも当然のごとく感じられるかもしれない可制御性なのだが、複雑なシステムになればこの解析は必要不可欠となってくる。

現在までの制御理論は連続運動のみを考慮すれば良かったため可制御性解析は容易であった。しかしハイブリッドシステムの可制御性解析はそう単純ではない。複数の連続的運動と、その離散的切り替わりを考慮に入れて計算する必要があるため、計算量が膨大となり実用的な時間で可制御性の判定ができないのだ。

ここで3モードのハイブリッドシステムについて見てみよう。単位時間(ステップ)毎にモードを切り替え、10ステップのモード切り替えを行う時(予測10ステップ)の可制御性解析を考える。ステップ毎に取りうるモードは3通り存在し、その各々に対して次のステップに対するモードの取り方も3通り存在する。それが10ステップ続けばモードの経路(モード軌跡)の組み合わせ数は $3^{10}$ 、すなわち約60,000通り存在する。しかし実際のシステムに適用するには、それだけでは十分ではない。より大きなモード数と予測ステップ数での解析が必要になるのだ。例えば5モードで予測50ステップの場合、取りうるモード軌跡の組み合わせ数は $5^{50}$ 、なんと $8.8 \times 10^{34}$ 通りにも達する。

可制御性解析を行う際、最悪の場合はこのすべての組み合わせ数に対して解析を行う必要がある。また制御を行う際に目標は一つに定めるのだが、初期状態は複数考えなければならない。車の

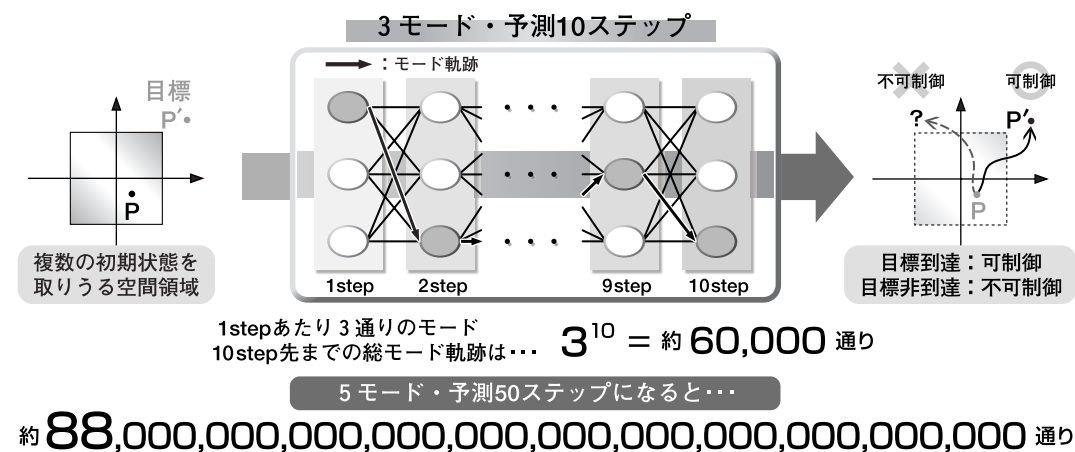


図2 ハイブリッドシステムのモード遷移

運転において目標速度を40km/hと定めたとしても、停止状態から40km/hにする場合、10km/hから40km/hにする場合と様々な初期状態を考えなければ実用的でない。このように、考えられる初期状態を全て考慮に入れ解析を行わなければならないとなると、結局解析を行う対象の組み合わせ数は無限大となってしまうのだ。

先生はCPU 2.5GHz・メモリ2GByteの通常のコンピュータを用い、5モードのハイブリッドシステムにおいて予測ステップ数を増やしながらか可制御性解析を試みた。その結果、予測ステップ数が3、4の場合は数秒、数分で計算が可能であった。ところが、予測ステップ数が6になるだけで24時間を越える計算が必要となってしまった。たとえ世界最速のコンピュータを用いることでこの問題の解析が可能となったとしても、さらにシステムが複雑になってしまえばより膨大な計算時間を要するため、解析は事実上不可能となる。

この問題の解決には計算量の縮少が必須であった。そこで先生のグループは確率的可制御性解析と呼ばれる手法を提案した。この手法は、膨大なモード軌跡、初期状態の中から均等な散らばりを持つ少数のサンプルのみを解析するものである。対象全てを解析するわけではないため、解析結果

は明確に定まるわけではなく、確率的にしか定まらない。しかしその確率はモード数、予測ステップ数がいくら上昇しようとも、採取するサンプル数にしか依存しないのだ。例えばモード軌跡をサンプルし解析した結果、確率的に可制御と判定された場合を考えよう。この場合、解析対象のモード軌跡全てが可制御であるとは限らず、不可制御なモード軌跡が存在する可能性もある。その誤りの存在する割合が0.1%未満であると99.9%以上で保証されるにはほんの7,000未満の解析を行えば良いという。つまり、初期状態、モード軌跡の各々をサンプルし解析する場合、7,000×7,000未満のサンプルに対し計算を行えば良いのである。

先生はこの解析手法を用い、5モード・予測50ステップのハイブリッドシステムの確率的可制御性解析を行ったところ、計算時間を2時間以内にまで縮めることに成功したのだ。

この手法を用いれば、さらに複雑になったシステムに対しても一般のコンピュータでの解析を可能とする。今までハイブリッドシステムの制御理論の研究があまり進まなかった原因の一つに、解析に要する計算時間の膨大さがあった。今回の成果はハイブリッドシステムの制御理論が前進するための大きな一歩と言えるだろう。



## 制御は人をヒントに

可制御性解析により制御可能な状況が判定できた後には、ハイブリッドシステムを制御する段階に入る。しかし制御の際には可制御性解析の時よりも計算時間の問題はシビアである。最適な制御を行うには目標へと到達できる動作の中で最も良いものを1つ決定し、刻一刻と変化する環境に対しリアルタイムで計算する必要があるからだ。

この問題に対し、先生らのグループが着目したのが人の運動であった。ロボットの歩行がハイブリッドシステムと表現できた様に、人の歩行もハイブリッドシステムと表現できるだろう。歩行に限らず人の運動の中には離散的運動と連続的運動が数多く存在している。さらに、人が外界を認識、判断し運動を変えることすらもモードの切り替わりと見なせるため、人は数多くのモード変化を持つ究極のハイブリッドシステムとして表現できるのだ。

ハイブリッドシステムは本来膨大な計算を要するはずだった。それなのになぜ人は瞬時に外部を認識、判断し最適な運動を行うことができているのだろうか。この疑問の答えの中にハイブリッドシステムにおける膨大な計算を瞬時に行う突破口を見出し、人が認識、判断を行い最適な運動を行わせる例として、先生のグループはシューティングゲームに着目した。

シューティングゲームを行う時に、人が自分のビークル(乗り物)を認識して次の操作を与えるまでの一連の過程には数百ミリ秒しか要さないことは既に知られている。その時人は画面上の複雑な形状を見て画面の全てを認識しているだろうか。いや、現実的にはその様なことは考え難い。むしろ画面上の特徴点を的確にとらえ、必要な情報のみを抜き出して状況を認識していると考えの方が妥当であろう。

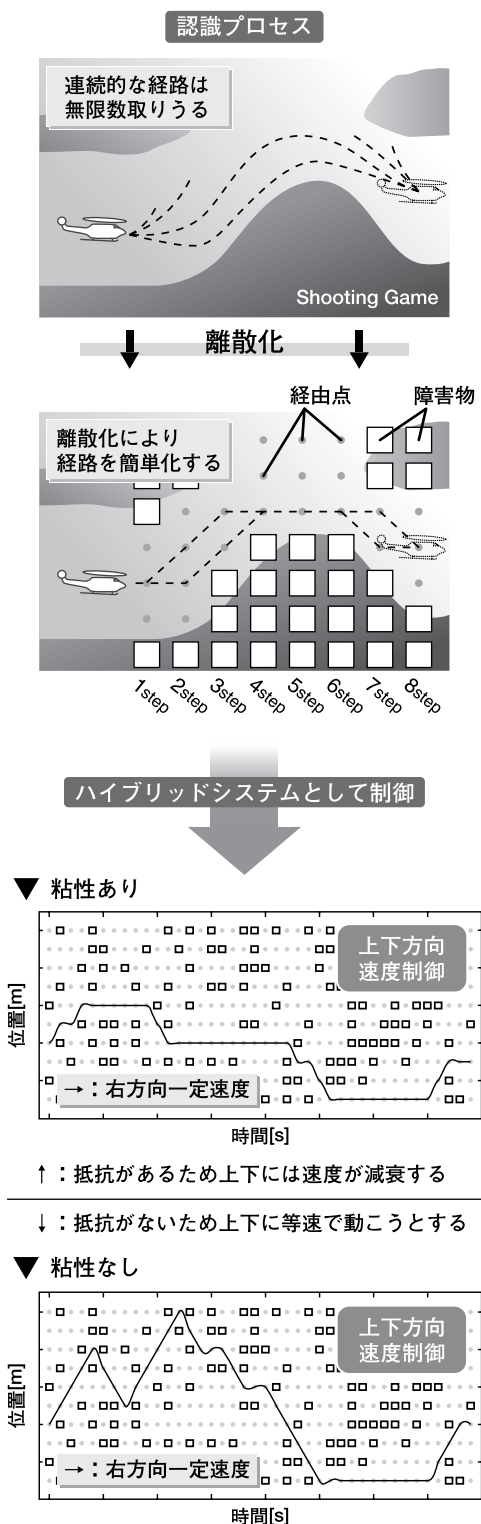


図3 障害物回避シミュレーション

人はシューティングゲームの画面を見て全てを連続的に認識するのではなく、一部を離散的に認識することで問題を簡単化している。そして、上下左右のキーで操作する場合、人は認識された情報をもとにどちらに移動するかという4通りの離散的判断を下し、目標とする位置まで連続的な運動をピークルに行わせる。このことから、先生らのグループは、人の運動が「認識プロセス」と「判断・運動プロセス」の2つに分けられると考えたのだ。この枠組みの下、先生らのグループは障害物回避のシミュレーションを試みた。

先ほどの2つのプロセスのうち、まずは認識プロセスにおいて、ピークルが通過できる部分を認識するため、画面上を一定間隔(ステップ)毎に障害物と経路点に分け、離散化する(図3上)。次に離散化されたデータをもとに、判断・運動プロセスにおいてハイブリッドシステムの制御理論を用いて最適な経路と運動を決定する。

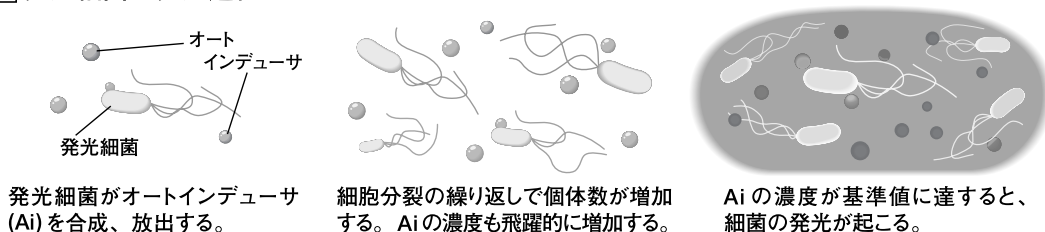
シミュレーションの条件としては、20ステップ先までの動作を予測しながらピークルは一定速度で右に進み、上下方向の速度を制御により操作することで障害物を回避する場合を考えた。

シミュレーション結果(図3下)は左から右へピークルが進んだ経路を表している。複雑なシステムに対し膨大な計算時間がかかるハイブリッドシステムであっても、問題が簡単になれば実用的時間で計算は可能となる。そのため、このシミュレーションは最悪な状況でさえも数百ミリ秒間の計算で最適経路を導き出した。また、2つの結果は、空気抵抗のような粘性が、ある場合とない場合を示す。環境の異なる両シミュレーションにおいて、ピークルの動きはそれぞれ異なった運動を行っている。それぞれの運動は、ハイブリッドシステムの制御理論に基づき、その環境に適応した最適な移動経路の取り方と運動が決められていることが分かるだろう。

本来コンピュータに判断の機能はなく、決まった動作しか行わせることができない。もし環境が変わればそれに対応するのは不可能なのだ。しかし、このシミュレーションのように、判断を離散変数と見なしハイブリッドシステムの制御理論を適用することで最適な離散的判断を可能とした。この理論は、人のような動きを可能とする知的制御系設計にも大きな期待が寄せられてきている。



## ■発光細菌の発光過程



### 薬剤による発光の制御

オートインデュースや細胞内のタンパク質の濃度によって、可制御性の可否が決まる。

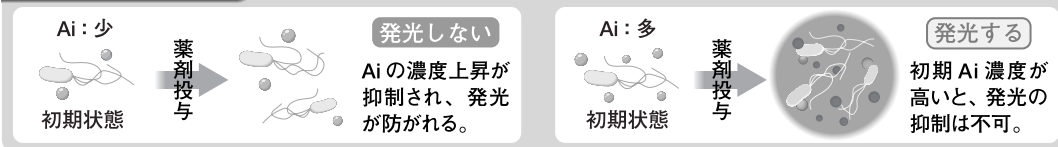


図4 発光細菌 *Vibrio fischeri* の発光制御



## 広がるハイブリッドの世界

ハイブリッドシステムの理論が適用できるのは機械の制御に限ったことではない。連続変数と離散変数が混在したシステムは世の中に数え切れないほど存在するのだ。井村研究室ではハイブリッドシステムの制御理論をバイオシステムに適用し、バイオを制御するためのシステム解析を行った。研究対象としたのは発光細菌であった。

研究に用いた発光細菌 *Vibrio fischeri* (細菌 V.f) は周囲の細菌 V.f の個体数が少ないうちは発光しないのだが、個体数が多くなれば発光する細菌だ。しかし実際には周囲の細菌数を検知しているわけではない。細菌 V.f が放出するオートインデュース (Ai) と呼ばれるタンパク質を介して細菌数を知るのである。細菌 V.f が細胞分裂を繰り返し、個体数が増えるにつれて Ai の数も増える。このようにして周囲の Ai 濃度がある基準値に達すれば細菌 V.f は発光するわけである。

このような発光細菌の中には、発光することで病気を発現する菌もいるため、細菌活動を抑制可能かどうかの可制御性解析が重要となる。

細菌 V.f は周囲の状態に応じて細菌活動が変化する。先生のグループはこれを発光・非発光の各状態で近似を行い離散化することで、細菌活動をモード切り替えを含んだハイブリッドシステムと見なした。この考えの下、細菌モデルを構築し確率的可制御性解析を行った結果、細菌 V.f を非発光の状態に抑制する条件は、細菌 V.f と Ai それぞれの濃度がどの程度かという解析に成功した。

現状では、人が病気の時に投与される薬の量や種類は莫大な試行を経て人が決めたものだ。しかし細菌活動をハイブリッドシステムとして捉え、最適な薬の投与の仕方を理論的に解析すればより効率的に病気を治すことが出来るという。

このように、ハイブリッドシステムの理論は制御以外の工学分野、さらにはバイオロジーや脳科学などといった自然科学分野にまで、幅広い展開が期待されている。ハイブリッドシステムの理論は21世紀の様々な分野に影響を及ぼす重要な学問としてさらに発展するだろう。井村先生はそのフロンティアを駆け抜ける研究者の一人なのだ。

制御の中で益々注目度を上げるハイブリッドシステムの制御理論。将来大きく羽ばたくであろうこの理論について、日本の中で第一人者とも言える井村先生の話は興味の湧くことばかりでした。

最後になりましたが、快く取材に応じてくださいました井村先生と、博士課程の白根さんに厚く御礼申し上げますとともに、研究室のさらなる発展をお祈り致します。  
(末永 昌也)