

並列二重倒立振子の振り上げ安定化制御

櫻井仁貴* 渡辺美知子 鈴木育男 岩館健司

(北見工業大学)[†]

1 はじめに

倒立振子問題は、従来の古典的な手法や最適化手法を用いた制御系設計手法の検証用として古くから知られている。この問題は、単純な倒立振子から振子を直立に接続した直立二重振子や直立三重振子、並列二重振子など難易度の高い倒立振子問題もいくつか成功例が報告されている。

近年、物理エンジンを用いて三次元仮想空間内にロボットや人工生物モデルを作成し、様々な環境下において目的に沿った自律的な行動を獲得させる研究が盛んに行われている。これらの研究で 古川ら^[1]は、自律行動の獲得に学習機能を持たせたモデルをアニボット(Animated Robot, Anibot)と名付けて活発に研究が進められている。

本研究では、三次元空間内に振子二本を並列に接続させた並列二重倒立振子の振り上げ安定化制御を目的とする。安定化制御には、人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network, ANN)、ANN のニューロン間の結合荷重の最適化に進化計算の一手法である遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を採用する。最後に、提案手法の有効性を数値シミュレーション実験で検証する。

2 物理環境

本研究では、NVIDIA 社の物理エンジンである PhysX を用いて三次元物理環境を生成し、モデリングとそのシミュレーションを行う。PhysX では重力や摩擦、衝突判定など高速にシミュレーションすることが可能である。また、これらの機能を用いて環境設定が実現でき、水中や無重力空間などの様々な環境下におけるシミュレーションを可能としている。

3 関連研究

倒立振子関連の研究としては、過去に直列二重倒立振子や直列三重倒立振子などの研究が報告されている。島根大学総合理工学研究科^[2]では、状態フィードバック制御による並列二重振子の倒立安定化制御実験が行われて成功している。また、東京工業大学^[3]では今回の研究テーマと同じ、並列二重倒立振子の振り上げ安定化の研究内容の成功が報告されている。

4 モデル

倒立振子モデルには、レール式、車輪式、アーム式など様々な種類があり、本研究では、レール式を導入して台車に加わる力を制御する台車式倒立振子を採用する。

図 1 は一般的な並列二重倒立振子の概略図、図 2 はモデルの全体図である。図 3 は台車と並列二重振子を示し、この図の左側の棒の長いほうが手前である。図 2 に示すように駆動台車は、移動するレールが 2 本とも左右の支柱で支えられている。支柱の高さは 1m、レールの長さは 500m として実験を行ったが、図では全体が見えるように長さを 20m としている。図 1 では、台車にタイヤが付いているが、今回作成したモデルはレール式を採用しているのでこれをつけていない。台車がスムーズに動くためにレールと台車の間の摩擦はゼロとしている。また振り子と支持柱、台車の接合部の摩擦もゼロとしている。そのため駆動台車が滑り落ちないように、図 3 のように駆動台車は直方体のプリミティブを I 型に組み合わせ、レールを挟む形で作成した。

本研究では、図 3 に示すモデルを採用する。この理由としては、図 1 のモデルを用いた場合に 2 本の振り子が互いにぶつかってしまい動きが制限されるのを考慮し、図 3 に示すよ

うにそれぞれの振り子を手前と奥に配置するという形でモデルを作成した。ここで振り子は全く同じモデルを使用した場合、単振子と変わらないと考えたため、それぞれ長さが異なるように設計した。図 2 の左手前側を pen1、右奥側を pen2 とする。ただし、幅や奥行きは両モデルとも同じ値である。下の表 1 は、それぞれの振り子の設定値を示す。

表 1. 振り子の設定値 [m]

	Pen1	Pen2
幅 [x]	0.03	0.03
高さ [y]	0.4	0.3
奥行き [z]	0.02	0.02

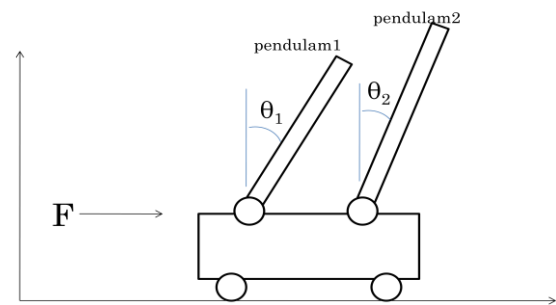


図 1. 一般的な並列二重倒立振子の概略図

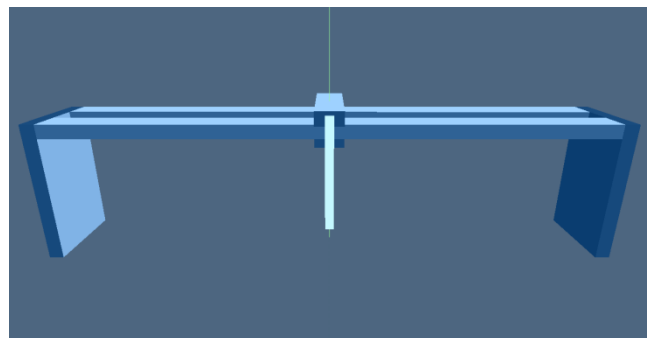


図 2. モデルの全体図

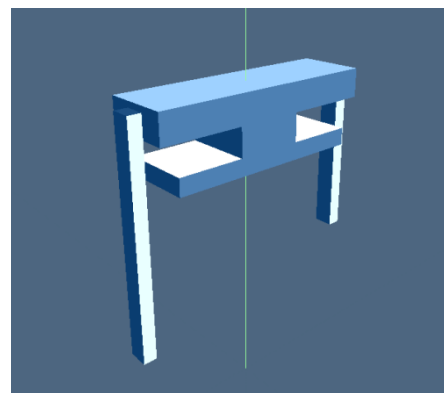


図 3. 台車と並列二重倒立振子

5 制御方法

レール式の並列二重倒立振子の制御に ANN を用いる。ANN の入力値は、2 つの振り子の回転角度 θ と角速度 ω を $[-1,1]$ に正規化した値と、台車の速度 v 、台車の位置 x を与え、

台車に加える力 F を出力させる。また ANN のニューロン間の結合荷重 w の最適化に GA を用いる。

5.1 人工ニューラルネットワーク (ANN)

人工ニューラルネットワーク (ANN) とは、生物の神経回路網の一部を人工的に模倣した手法である。この神経回路網は、複数のニューロンがシナプス結合を通してネットワークを形成している。ANN のネットワーク構造には、階層型のフィードフォワード型と双方向のリカレント型があるが、本研究では前者の階層型ネットワーク構造を用いる。

今回は、倒立振子を制御するコントローラに 3 層の ANN を採用し、入力層 6、中間層 10、出力層 1 とする。また、ANN の出力関数には、式(1)のシグモイド関数を用いる。ANN の出力値の範囲は、 $[1, 0]$ としている。式(2)は、台車に加える外力を示している。Output は、 $f(x)$ によって算出された出力値である。この式(2)の中で、式(1)で求めた Output を $[1, -1]$ の範囲に変換し、これを任意の値である最大の力 F_{max} に乗じて外力の値を算出する。

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\left(\frac{x}{T}\right)}} \quad (1)$$

$$F = F_{max}(2 \cdot \text{Output} - 1) \quad (2)$$

5.2 遺伝的アルゴリズム (GA)

遺伝的アルゴリズムとは、生物が環境に適応して進化していく過程を工学的に模倣したメタヒューリスティックであり、最適化問題に多く利用されている。本報告では、結合荷重 w を最適化することで、振り子の立ち上がりの安定化制御を獲得することを試みる。

遺伝オペレータには、交叉、突然変異、選択、淘汰を用いる。突然変異は、一様突然変異、境界突然変異、微小量を遺伝子要素に加算する方法の 3 種法を併用した。この併用により単に乱数を発生させるだけの時よりも、最適値に収束しやすくなると考えた。選択には、最も優秀な個体を保存するエリート保存を用いた。

評価値には、以下の式(3)を用いる。ここで C_1 、 C_2 は、それぞれ振り子 pen1 と台車、振り子 pen2 と台車の座標の内積値である。並列二重倒立振子の評価は、それぞれの内積値を $[1, 0]$ に正規化して乗じた値の合計値を用いる。

$$E = \sum_{t=0}^S (0.5 \cdot C_1 - 0.5) \cdot (0.5 \cdot C_2 - 0.5) \quad (3)$$

GA の各パラメータは、以下の表 2 に示すとおりである。

表 2. GA のパラメーター	
個体数	200
世代数	200
交叉率	0.5
突然変異率	0.5
淘汰率	0.2
ステップ数	1200

6 数値シミュレーション実験

数値シミュレーション実験は、並列二重倒立振子の立ち上がり安定化行動を獲得するために ANN と GA を用いて行った。実験は、1step を 1/60sec とした。

6.1 実験結果

今回の数値シミュレーション実験では、並列二重倒立振子の立ち上がりの安定化制御までには至らなかった。図 4 は、実際にシミュレーション実験を行った時の学習の収束状況である。このグラフからは、はじめは低い数値から始まり、

徐々に数値が高くなりつつ、ある一定の値に収束していくのがわかる。この結果からは、ステップ数が 1200 なので理論上 C_1 、 C_2 の乗じた値の合計値が 600 を超えていれば、2 つの振子が立ち上がっている状態だと考えられる。シミュレーション途中では、台車が左右に揺れ、振子を立ち上がらせる行動をしているのが観察できた。また、垂直ではないが、数秒間 2 つの振り子が上にあがった状態でバランスを取ろうとしている行動も観察できたので、実際に安定化のための行動を試みているのがわかった。

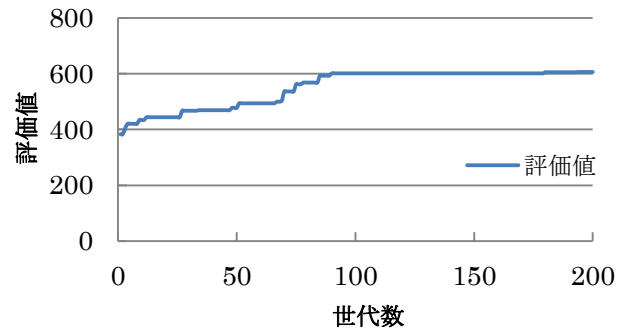


図 4. 評価値の収束状況

6.2 考察

数値シミュレーションの実験結果からは、立ち上がり行動の獲得はできたものの安定化までには至らなかった。直接的な原因としては、GA の世代数が足りなかったことが考えられる。実験自体は良好におこなえていたので、世代数を増やせばより良い結果が出せるのではないかとと思われる。また、世代数だけでなく他の GA のパラメータや、ANN のニューロン数の調整が不十分であることも考えられる。

7 終わりに

本研究では、三次元物理空間内に並列二重倒立振子をモデリングし、その安定化制御に ANN と GA を用いて行った。その結果、立ち上がり行動の獲得はできたが、安定化までには至らなかった。今後の改良点は、以下に挙げられる。

- (1) パラメータの最適値を導き出すこと
- (2) ANN のニューロン数を考慮すること
- (3) 結合荷重の最適化手法に他の手法を利用すること
- (4) ANN の入力値の改良など

以上の改良点を考慮しながら単一倒立振子の安定化制御を獲得後、並列二重倒立振子、更に並列三重倒立振子などの複雑な問題に挑みたいと思っている。

参考文献

- [1] 古川正志他著、メタヒューリスティックスとナチュラールコンピューティング、コロナ社、2012
- [2] 吉田和信、台車移動幅の制限を考慮した直列および並列型二重倒立振子の安定化制御、計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集、19th, pp2-7, 2010
- [3] 井口圭一、木村元、小林重信、GA による並列二重倒立振子の振り上げ安定化制御、自分散システム・シンポジウム資料、13th, pp277-282
- [4] 井上祐平、渡辺美知子、直列二重倒立振子の安定化制御の自律的獲得、情報処理北海道シンポジウム 2011, pp165-166, 2011
- [5] 佐藤航、渡辺美知子、鈴木育男、岩館健司、学習による倒立振子の安定化制御に関する研究、情報処理北海道シンポジウム 2012, pp35-36, 2012
- [6] 次原慧、渡辺美知子、鈴木育男、岩館健司、自律移動ロボットの安定化制御、情報処理北海道シンポジウム 2013, pp9-10, 2013