

周期入力によるメカニカルシステムの 動的安定化制御に関する研究

学位論文内容の要旨

非線形なシステムを平衡点のまわりで線形化して制御モデルを作り、線形制御器を設計して制御目的を達成することが多く行われてきた。しかし、非線形なシステムの中には線形制御モデルが可制御とならないものや、従来知られている非線形制御でも制御目的が達成できないものが存在する。このようなシステムの例として支点を鉛直軸方向に拘束して動かす倒立振子の制御問題がある。これまで倒立振子の制御では、支点を水平方向に移動させて振子を倒立させていた。この場合、振子が倒立する平衡点のまわりの線形近似モデルが可制御となるため、線形レギュレータにより簡単に倒立が実現でき、これまでにさまざまなタイプの倒立振子が製作され、その制御方法が議論されてきた。ところが、支点を鉛直軸方向に動かす場合には、線形近似モデルが不可制御となり、線形制御では制御することができない。また、従来の非線形制御でも支点の位置制御と静止倒立とを同時に実現する制御則は今のところ報告されていないようである。ここで、制御目的を静止倒立ではなく平衡点まわりに振子を安定化できればよいとすると、高い振動数で支点を上下させるだけで、振子を平衡点まわりに動的に安定化することが可能となることが知られている。従来の制御では平衡状態への漸近安定化が多く議論されてきたように思われるが、上述の倒立振子のようにシステムに周期入力を加え、システムの「動的な状態」を実現することで制御目的を達成できる場合があり、このような制御アプローチにより、これまで制御が難しいとされてきたシステムでも簡単に制御目的が達成できる可能性があると予想される。このようなことから、本論文ではメカニカルシステムを制御する新しいアプローチとして、メカニカルシステムに周期入力を加えて平衡点まわりで「動的な状態」を実現することで制御目的を達成する制御方法を提案する。

第1章では、序論であり、研究の背景と位置づけ、研究目的と研究方法、ならびに本論文の構成について述べている。

第2章では、周期的な入力によりシステムを「動的な状態」にすることで制御目的を達成できる例として大道芸である皿まわしを取り上げる。周期入力により皿まわしを実現できる条件を皿まわしの竿のたわみも考慮した数理モデルにより解析する。その結果、安定に皿を回すことができるタイミングの存在が明らかになる。さらに竿のたわみの作用により生じる周波数引き込み現象を利用すると、皿の回転周期が竿を振る周期に自動的に引き込まれ、皿の回転運動を全く観測しないオープンループの制御でも安定に皿を回すことができることを示す。

第3章から第6章までの章では、第2章において皿まわしの運動を解析した手法、ならびに皿まわしを簡単に実現することを可能にした制御方法をもとに、メカニカルシステムに対する新しい制御アプローチを提案し、いくつかのメカニカルシステムの制御に本手法を適用した結果について述べる。ここで提案するのは、システムに周期的な入力を加え、その動的状態を制御できるタイミングを解析した後、非線形現象である周波数引き込み現象を利用してこのタイミングを実現し、制御目的を達成する方法である。

第3章では、周期入力を加えるとパラメータ励振現象が起こることで知られているブランコの制御問題を取り上げ、ブランコの振れを大域的に制御できるタイミングをシステムのエネルギー変化率から解析する。さらに、周期入力とブランコの振れのタイミングを合わせる方法として、非線形振動子の引き込み現象を利用することを考え、van der Pol方程式に入力としてブランコの角速度を加え、方程式の周期解で構成される非線形フィードバックによりブランコを制御する方法を提案する。

第4章では、第1リンクが非駆動関節である2リンクの鉄棒ロボットの運動制御を取り上げ、第3章で提案した制御アプローチを適用して、その運動解析及び制御系を設計する。解析の結果、振り始めは共振現象、振れが大きくなった場合はパラメータ共振現象を起こすタイミングで各リンクを同期させると効率よく第1リンクの運動を励起できることが明らかになる。さらに、ブランコの制御方法を適用することにより、上記のタイミングで各リンクを同期させてロボットを制御できることを示す。

第5章では、支点を鉛直軸方向に動かす倒立振子について、周期入力による振子の安定性を平均化法の考え方を利用して解析する。解析の結果、振幅を変調した周期入力を加えるとシステムはブランコと同じパラメータ励振系となることが明らかになり、第3章の運動解析の結果得られたブランコの振れを抑制するタイミングで周期入力の振幅を変調すると、振子を不安定な平衡点に漸近的に安定化できることを示す。

第6章では、第3章で提案した制御アプローチを回転型2重倒立振子の振り上げ制御問題に適用する。まず、振子が1つの場合について、アームを周期的に動かしたときのエネルギー変化率を調べ、効率よく振子を励起できるタイミングを明らかにする。次に、振子が2つの場合についても解析し、2つの振子と一定の位相関係で同期させた周期入力により各振子を独立に制御できることを示す。その後、非線形振動子の引き込み現象を利用してアームと各振子を同期させることにより、2つの振子の振れを独立に制御できること、選択的に振子を振り上げた後、倒立点まわりでは線形フィードバック制御に切り替えることにより、簡単に振り上げ倒立制御が実現できることを示す。

第3章から第6章ではメカニカルシステムに周期的な入力をタイミングよく加え、システムを「動的な状態」にすることで制御目的を達成した。これらの制御では、周期入力とメカニカルシステムを同期させるタイミングは一定であったが、このタイミングを積極的に変化させることで、希望するエネルギーを持つようにシステムを動的に安定化することも簡単に実現できるのではないかと考えられる。そこで、第7章では制御問題として倒立振子の振り上げ制御を取り上げ、目標とするエネルギーを持つリミットサイクルに振子の周期運動を安定化させて、リアプノフの意味での安定を実現する動的安定化制御について提案する。

第8章では結論として、本研究により得られた成果のまとめ、および今後の課題について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 教 授 島 公 脩
副 査 教 授 岸 浪 建 史
副 査 教 授 五十嵐 悟

学 位 論 文 題 名

周期入力によるメカニカルシステムの 動的安定化制御に関する研究

非線形なシステムを平衡点のまわりで線形化して制御モデルを作り、線形制御器を設計して制御目的を達成することが多く行われてきた。しかし、非線形なシステムの中には線形制御モデルが可制御とならないものや、従来知られている非線形制御でも制御目的が達成できないものが存在する。このようなシステムの例として支点を鉛直軸方向に拘束して動かす倒立振子の制御問題がある。これまで倒立振子の制御では、支点を水平方向に移動させて振子を倒立させていた。この場合、振子が倒立する平衡点のまわりの線形近似モデルが可制御となるため、線形レギュレータにより簡単に倒立が実現でき、これまでにさまざまなタイプの倒立振子が製作され、その制御方法が議論されてきた。ところが、支点を鉛直軸方向に動かす場合には、線形近似モデルが不可制御となり、線形制御では制御することができない。また、従来の非線形制御でも支点の位置制御と静止倒立とを同時に実現する制御則は今のところ報告されていない。ここで、制御目的を静止倒立ではなく平衡点まわりに振子を安定化できればよいとすると、高い振動数で支点を上下させるだけで、振子を平衡点まわりに動的に安定化できることが知られている。従来の制御では平衡状態への漸近安定化が多く議論されてきたようであるが、上述の倒立振子のようにシステムに周期入力を加え、システムの「動的な状態」を実現することで制御目的を達成できる場合があり、このような制御アプローチにより、これまで制御が難しいとされてきたシステムでも簡単に制御目的が達成できる可能性があると予想される。このような背景のもと、本論文ではメカニカルシステムを制御する新しいアプローチとして、メカニカルシステムに周期入力を加えて平衡点まわりで「動的な状態」を実現することで制御目的を達成する制御方法を提案している。

第1章では、序論であり、研究の背景と位置づけ、研究目的と研究方法、ならびに本論文の構成について述べている。

第2章では、周期的な入力によりシステムを「動的な状態」にすることで制御目的を達成できる例として大道芸である皿まわしを取り上げ、周期入力により皿まわしを実現できる条件を皿まわしの竿のたわみも考慮した数理モデルにより解析を行っている。

る。その結果、安定に皿を回すことができるタイミングの存在を明らかにし、さらに、竿のたわみの作用により生じる周波数引き込み現象を利用すると、皿の回転周期が竿を振る周期に自動的に引き込まれ、皿の回転運動を全く観測しないオープンループの制御でも皿を安定に回せることを明らかにしている。

第3章から第6章までの章では、第2章において皿まわしの運動を解析した手法、ならびに皿まわしを簡単に実現することを可能にした制御方法をもとに、メカニカルシステムに対する新しい制御アプローチを提案し、いくつかのメカニカルシステムの制御に本手法を適用した結果について述べている。ここで提案しているのは、システムに周期的な入力を加え、その動的状態を制御できるタイミングを解析した後、非線形現象である周波数引き込み現象を利用してこのタイミングを実現し、制御目的を達成する方法である。

第3章では、周期入力を加えるとパラメータ励振現象が起こることで知られているブランコの制御問題を取り上げ、ブランコの振れを大域的に制御できるタイミングをシステムのエネルギー変化率から解析している。さらに、周期入力とブランコの振れのタイミングを合わせる方法として、非線形振動子の引き込み現象を利用することを考え、van der Pol 方程式に入力としてブランコの角速度を加え、方程式の周期解で構成される非線形フィードバックによりブランコを制御する方法を提案している。

第4章では、第1リンクが非駆動関節である2リンクの鉄棒ロボットの運動制御を取り上げ、第3章で提案した制御アプローチを適用して、その運動解析及び制御系の設計を行っている。解析の結果、振り始めは共振現象、振れが大きくなった場合はパラメータ共振現象を起こすタイミングで各リンクを同期させると効率よく第1リンクの運動を励起できることを明らかにし、さらに、ブランコの制御方法を適用することにより、上記のタイミングで各リンクを同期させてロボットを制御できることを示している。

第5章では、支点を鉛直軸方向に動かす倒立振子について、周期入力による振子の安定性を平均化法の考え方を利用して解析している。解析の結果、振幅を変調した周期入力を加えるとシステムはブランコと同じパラメータ励振系となることが示され、第3章の運動解析の結果得られたブランコの振れを抑制するタイミングで周期入力の振幅を変調すると、振子を不安定な平衡点に漸近的に安定化できることを示している。

第6章では、第3章で提案した制御アプローチを回転型2重倒立振子の振り上げ制御問題に適用している。まず、振子が1つの場合について、アームを周期的に動かしたときのエネルギー変化率を調べ、効率よく振子を励起できるタイミングを明らかにしている。次に、振子が2つの場合についても解析し、2つの振子と一定の位相関係で同期させた周期入力により各振子を独立に制御できることが示されている。その後、非線形振動子の引き込み現象を利用してアームと各振子を同期させることにより、2つの振子の振れを独立に制御できること、選択的に振子を振り上げた後、倒立点まわりでは線形フィードバック制御に切り替えることにより、簡単に振り上げ倒立制御が実現できることを示している。

第3章から第6章ではメカニカルシステムに周期的な入力をタイミングよく加え、システムを「動的な状態」にすることで制御目的が達成されている。これらの制御では、周期入力とメカニカルシステムを同期させるタイミングは一定であったが、このタイミングを積極的に変化させることで、希望するエネルギーを持つようにシステムを動的に安定化することも簡単に実現できるのではないかと考えられる。そこで、第7章では制御問題として倒立振子の振り上げ制御を取り上げ、目標とするエネルギー

を持つリミットサイクルに振子の周期運動を安定化させて、リアプノフの意味での安定を実現する動的安定化制御について提案している。

第8章では結論として、本研究により得られた成果のまとめ、および今後の課題について述べている。

これを要するに、著者はメカニカルシステムを制御する新しいアプローチとして、システムに周期的な入力を加えてシステムを動的に制御する方法を提案し、実際にロボットを使用してその有効性を実証したものであり、ロボティクス、制御工学の分野に対して貢献するところと大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格ある者と認める。