様　式　C−19、F−19−1、Z−19　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ６ 月　 ７ 日現在

機関番号：１２２０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2013～2016
課題番号：２５４２０４２９

研究課題名（和文）高速高精度メカトロ制御のための位置決め終了判定法の確立

研究課題名（英文）Determination of the end of positioning phase for high-speed precision mechatronic control systems

研究代表者
平田　光男（Hirata, Mitsuo）

宇都宮大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：５０２８２４４７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,900,000円

研究成果の概要（和文）：位置決め制御系では，位置決め動作が完了，つまり出力応答が十分整定してから次のアクションに移らないと問題が生じる場合が多くある。しかし，応答が許容誤差範囲に入った後に再びその範囲外へ出てしまうことがあるため，その判定は簡単ではない。十分な整定時間を設ければ，再び許容誤差範囲から出ることはなくなるが，位置決め時間が長くなってしまう。そこで，本研究では，位置決め制御の終了を必要最小限の待ち時間で正確に判定するためのシステマティックな方法をサポートベクタマシン(SVM)を用いて行う方法を提案し，その有効性をガルバノスキャナやハードディスク装置を使った実機実験で検証した。

研究成果の概要（英文）：In many positioning control systems, the end of positioning phase must be determined correctly in order to initiate the start of the next task. However, the determination is not easy because the output may again exceed the error bound after the output goes into the error bound. If a sufficiently long settling time is introduced to ensure that the output does not exceed the error bound, it results in a longer positioning time. To solve the problem we proposed a systematic method to determine the end of positioning phase in minimum time based on a support vector machine. The effectiveness of the proposed method was verified by performing experiments using a Galvano scanner and a hard disk drive.

研究分野：制御工学

キーワード：位置決め終了判定　サポートベクタマシン　最大出力許容集合　ハードディスク装置　ガルバノスキャナ

１．研究開始当初の背景

位置決め制御系では，位置決め動作が完了，つまり出力応答が十分整定してから次のアクションに移らないと問題が生じる場合が多くある。例えば，ハードディスク装置（HDD）のヘッド位置決め制御系では，ヘッドが目標トラックへ移動したあと，許容される位置決め誤差範囲に収まったことを確認してから，データの読み書きを行う必要がある。もし，位置決め誤差が大きい状態でデータの読み書きを行うと，隣接トラックのデータをアクセスしたり破壊したりするといった問題が生じる。また，レーザ加工機で用いられるガルバノスキャナでは，ガルバノスキャナのミラー角度を目標角度へ動かし，応答が充分整定してから，レーザを照射してプリント基板に穴あけ加工を行う必要があるが，応答が整定する前にレーザを照射してしまうと，加工穴の位置がずれるなどして要求精度が満たされなくなる。

しかし，位置決め終了地点を正確に判定することは簡単ではない。その理由は，図１に示すように，応答が許容誤差範囲に入った後に再びその外へ出てしまうことがあるため，許容誤差範囲に入ったからといって直ちに位置決めが終了したとはいえないからである。したがって，位置決め応答が許容誤差範囲に落ち着くように，整定時間を設けたり，数サンプル連続で許容誤差範囲に入るまで待つ，といったことが行われる。

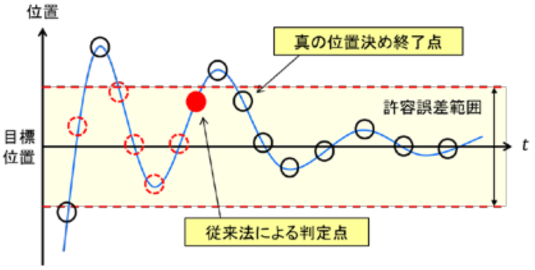

図１：位置決め終了判定の難しさ

整定時間や待ち時間は，短ければ短いほど良いが，判定精度との間にトレードオフが存在する。例えば，図１の例において，５サンプル連続して許容誤差範囲に入った場合に位置決め終了とすると，赤のサンプル点が位置決め終了地点となる。しかし，次のサンプル点で許容誤差範囲を飛び出している。このような問題を避けるには，この待ちサンプル数を長くする以外に方法が無く，位置決め時間の増大は避けられない。

このような理由から，位置決め終了地点を必要最小限の待ち時間で正確に判定するための方法に対するニーズが高まってきた。しかしながら，これまでシステマティックな方法はほとんど存在していなかった。

２．研究の目的

本研究では，位置決め終了地点を必要最小限の待ち時間で正確に判定するためのシステマティックな方法を確立し，その有効性を各種メカトロ機器へ適用することで，明らかにすることを目的とする。

３．研究の方法

研究の目的を達成するために，具体的には下記の点を明らかにする。

- 位置決め終了判定のための理論的枠組みを構築し，メカトロニクス製品への適用を踏まえた実用的な方法を開発する。具体的には，機械学習の１手法であるサポートベクタマシン（SVM）を用いた方法と，モデルベース手法として，最大出力許容集合に基づく方法を検討する。

- 位置決め終了判定の判定精度とそれにかかる時間のトレードオフを明らかにし，判定性能のロバスト化を行う。

- 高速性と高精度性の両立が高い次元で求められる HDD，ガルバノスキャナなど，各種産業機器へ提案法を適用し，その有効性を検証すると同時に，実用化の際の問題点の洗い出しと解決策の検討を行う。

４．研究成果

(1) 位置決め終了判定のための理論的枠組みの構築

最大出力許容集合に基づく方法と，SVM に基づく方法について検討した。最大出力許容集合に基づく方法は，位置決め終了判定条件が，制御対象の線形モデルに基づいて解析的に計算できるのが最大の特徴である。また，サンプル点間応答を考慮することもできる。しかしながら，位置決めが終わろうとしているときの制御対象の挙動は，非線形摩擦の影響などで，線型モデルで表現するのが難しいことがわかった。一方，機械学習の一つの手法である SVM は，大量の位置決めデータに基づいて位置決め終了判定条件を学習することができるので，制御対象に非線形特性を有しても特に問題にならない。そこで，SVM を用いた方法を重点的に研究した。

提案法の概要を図２に示す。提案法では，まず，位置決め終了時の時系列データを大量に集め，それを，位置と速度から成る２次元の位相平面上に配置する。次に，位置決め未終了の点（Class 1:×）と位置決め終了の点（Class 2:○）に分類し，Class 1 と Class 2 を分離する識別関数を SVM により求める。そして，求めた識別関数を用いて，位置決め終了判定を行う。

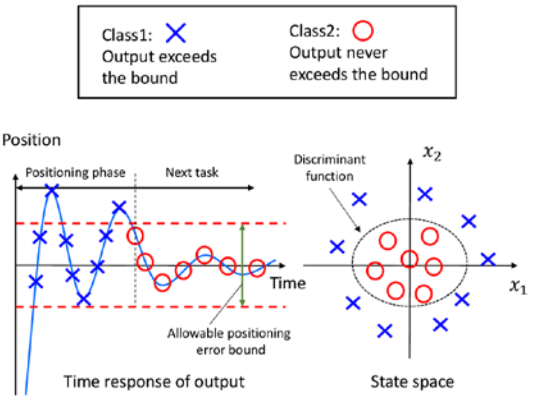

図２：提案法の概要

さて，実際の位置決め応答に対して判定を行うため，誤判定は避けられない。位置決め終了判定における誤判定は

(a) 実際に位置決めが終了しているのにもかかわらず，未終了と誤判定

(b) 実際に位置決めが未終了にもかかわらず，終了と誤判定

の２通りがあるが，両者のリスクは大きく異なる。(a)は単に待ち時間が長くなるというリスクを持ち，(b)は，HDD であれば隣接トラックのデータを読み書きしたり，レーザ加工装置であれば，異なる場所にレーザ加工をしてしまう，という大きなリスクを持つ。したがって，(b)の誤判定をできるだけ減らす必要がある。そこで，SVM については，通常のソフトマージン SVM ではなく，誤判定のコストを最小化できる Cost Sensitive SVM(CSSVM)に基づく方法を用いる事とした。

(2) 実機による有効性検証

提案法の有効性を検証するために，ガルバノスキャナのミラー角度の位置決め制御系と HDD の位置決め制御系を用いて実機実験を行った。ガルバノスキャナについては，一般的なソフトマージン SVM を適用し，提案法の基本的な性能を検証した。HDD については，(1)で説明した CSSVM を適用し，リスクの高い誤判定を低減するように位置決め終了判定条件を求め，従来法（単純に応答が整定するまで充分な時間待つ方法）と比べ，位置決め終了判定にかかる時間と誤判定率の両方で，従来法を凌ぐ性能が得られることを確認した。また，カーネル関数による性能の違いについても検討するため，多項式カーネルとガウスカーネルの性能を比較した。その結果，ガウスカーネルの方が優れた性能が得られることを確認した。

図３に HDD の位置決め応答に対して，ガウスカーネルによる CSSVM を適用して求めた識別関数（黒実線）の一例を示す。位置決め未終了の点（Class 1）を含まないように識別関数が構成されていることが確認できる。

この識別関数を用いて，200 通りの位置決め応答に対して位置決め終了判定実験を行ったところ，100%の判定成功率が得られ，平均待ち時間は２サンプルであった。単純に待ち時間を設ける従来法の場合，100%の判定成功率を得るには，12 サンプルの待ち時間が必要であったことから，提案手法の有効性が確認できる。

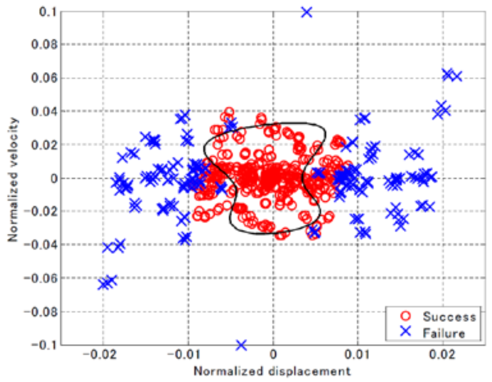

図３：CSSVM とガウスカーネルによる識別関数

(3) 識別関数のリアルタイム実装

CSSVM でガウスカーネルを用いる場合，位置決め終了判定を行う識別関数の計算量が膨大となる。そのため，HDD などの製品にそのアルゴリズムを搭載して，リアルタイムに位置決め終了判定を行うことは難しい。そこで，本研究では，識別関数のルックアップテーブル化を行った。図４に図３の識別関数をルックアップテーブル化したあとの３次元グラフを示す。

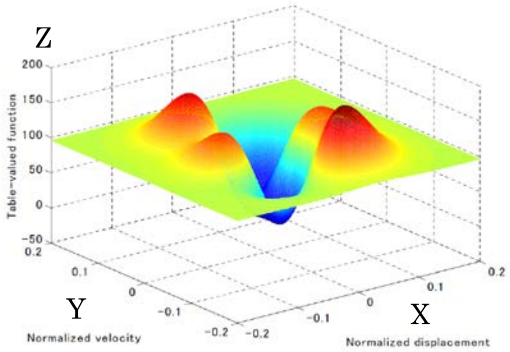

図４：識別関数のルックアップテーブル化

X 軸及び Y 軸が正規化した位置と速度を表し，これらが識別関数への入力となり，Z 軸が識別関数の出力値を表している。このルックアップテーブルを用いることで，識別関数のリアルタイム実装が可能となった。また，判定精度もほとんど劣化しない事を確認した。

以上，得られた一連の成果をまとめ，国際的に著名な学術誌へ投稿するための準備を行っている。

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　０　件）

〔学会発表〕（計　６　件）

[1]
田中 崇裕，平田 光男：
最大出力許容集合を用いたハードディスク装置のシーク終了判定法，
電気学会 メカトロニクス制御研究会，MEC-13-163，pp.25-30，2013.

[2]
田中 崇裕，鈴木 雅康，平田 光男：
サンプル点間応答を考慮した最大出力許容集合によるシーク終了判定，
日本機械学会 情報・知能・精密機器部門 講演会(IIP2014)，C-1-4，2014.

[3]
Mitsuo Hirata and Akira Yokozuka:
Determination of the end of the positioning phase using support vector machine,
Proc. of 10th Asian Control Conference, 2015.（招待講演）

[4]
小野寺 広幸，平田 光男，鈴木 雅康：
サポートベクタマシンによる位置決め制御終了判定：実験による有効性の検証，
日本機械学会 第14回「運動と振動の制御」シンポジウム -MoViC2015-，pp.186--190，2015.（日本機械学会　若手優秀講演フェロー賞受賞）

[5]
小野寺 広幸，平田 光男，鈴木 雅康：
サポートベクタマシンによる位置決め制御終了判定：ハードマージンとソフトマージンを併用した手法
日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会(IIP2016)，C-1-1，2016.

[6]
Mitsuo Hirata, Hiroyuki Onodera, and Masayasu Suzuki:
Determination of the end of positioning phase using SVM: Kernel choice and parameter tuning,
Proc. of the 7th IFAC Symposium on Mechatronic System & 15th Mechatronics Forum International Conference, 2016

〔図書〕（計　０　件）

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

研究室ホームページ
http://hinf.ee.utsunomiya-u.ac.jp/

６．研究組織
(1)研究代表者
平田　光男（HIRATA, Mitsuo）
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：５０２８２４４７

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者
該当なし

(4)研究協力者
鈴木　雅康（SUZUKI, Masayasu）
横塚　晃（YOKOZUKA, Akira）
田中　崇裕（TANAKA, Takahiro）
小野寺　広幸（ONODERA, Hiroyuki）