

学 位 論 文 題 名

スライディングモードシステムを用いた
非線形デジタルフィルタに関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、「インパルス性雑音を除去する」および「突発的な信号成分の変化を保存する」という相反する要素を満たす、非線形デジタルフィルタに関する研究をまとめたものである。本研究は、自律移動ロボットの研究の一環として行われており、自律移動ロボットに搭載されるセンサに適用する、という強いタスク指向のもとで行われた。

ロボットが自律的に動的環境の中を動き回るためには、センサによる外界の認識が必要不可欠である。しかし、我々が用いることができる現実のセンサは、精度、分解能、情報の獲得にかかる時間、そして情報の獲得の際に混入するエラーなど様々な制限がある。そこで、本研究では、センサによって得られた情報に信号処理を施すことにより、雑音に対してロバストな認識の実現を試みる。

しかし、ロボットに搭載されるセンサと一括りにしてもその種類は膨大である。そこで、本研究では超音波センサを想定して研究を行った。これは、安価でシステムの構成が簡単、さらにはコンピュータとの接続が容易であるなどの特徴を持ち、多くの移動ロボットで用いられているためである。そこで、本研究では超音波センサを用いた測距に際して混入するインパルス性雑音を除去することを主眼に、非線形デジタルフィルタを構成することを目的とする。信号処理を行う際には、信号成分を破壊せず、雑音のみを除去することが望ましい。すなわち、「インパルス性雑音の除去」および「信号成分の保存」という相反する目的を満たすことが望まれる。このような非線形デジタルフィルタとして、本論文では ESDS(the system which Estimate the Smoothed value and the Differential value by using Sliding mode system) を提案した。

本手法は、雑音の混入したデータから平滑値を求めるのみならず、微分値の推定も行うことができる。これまでの研究において、センサ信号のような雑音の混入した信号から微分値を推定する研究も行われているが、インパルス性雑音のような大振幅の雑音に対してロバストなフィルタは提案されていない。微分値を推定することができるということは、たとえば超音波センサの測距データ、すなわち距離情報から速度情報が得られることを意味しており、その有効性は大きいと言える。

また、提案手法である ESDS は、スライディングモードシステムを利用して構成することによりフィルタの安定性を保証している。さらに、スライディングモードシステムの中でも最短時間で収束することが保証されている最短時間系を用いることにより、推

定値が得られるまでの時間を短くすることを目指している。その結果、リアルタイムで得られる時系列データに対して良好な結果を得ることができた。インパルス性雑音を除去するフィルタとしてはメジアンフィルタが良く知られているが、時系列データの処理という点ではESDSに劣る。これは、ESDSで採用されている最短時間系が、リアルタイムでの平滑値・微分値の推定を支えているためである。提案手法はインパルス性雑音の存在を仮定して構成されたフィルタであるが、異なった雑音モデルの信号に対しても適用を試みた。雑音モデルとして一様分布に従う信号を仮定し、この信号に対するシミュレーションを行った。一様分布に基づく雑音モデルは、超音波センサの混信を想定するものである。さらに、提案手法の実世界における有効性を確認するために、実機を用いた実験も行っている。その結果、反射波が得られないという原因に起因するインパルス性雑音、および混信に起因する一様分布に従う雑音に対して、実用上十分な精度で平滑化、および微分値推定が可能であることを示した。

さらに、本論文で提案するESDSの性質を明らかにするために、位相面解析を行った。線形フィルタであれば、周波数領域での議論が可能であるが、非線形フィルタにおいては周波数領域で議論することは非常に困難である。そこで、位相平面における解軌道を求めることによりシステムの解析を行った。ESDSで採用されている最短時間系は、最適制御理論、またはスライディングモード制御の研究において大変よく検討されており、これらの研究において得られた知見が本システムの解析に役立っている。位相面解析を行うことにより、ステップ応答の際の追従性能、インパルス性雑音に対する雑音除去特性などが明らかになった。また、位相面解析を行うことにより、フィルタリングに必要とする計算時間の短縮を可能にした。本研究では、提案手法を自律移動ロボットのセンサ信号処理に応用することを想定している。実世界で働くロボットが環境を認識するためには、リアルタイムで外界の情報を獲得する必要がある。そこで、フィルタリングに必要とする計算時間は可能な限り短いほうが望ましい。ESDSは1階2元連立微分方程式で表現されており、この連立微分方程式を解くことにより平滑値、そして微分値の推定を行う。しかし、一般的な微分方程式の解法であるRunge-Kutta法、あるいはRunge-Kutta Gill法を用いると多大な計算時間を必要とする。そこで、位相面解析によって得られた知見を用いることにより、微分方程式を解くことなく、推定値を求めることを可能にした。さらに、日立製ワンチップマイクロコンピュータH8/3048Fを用いた実験により、計算時間が10～20分の1になることを確認した。

以上、本論文ではスライディングモードシステム、最短時間系という理論体系を組み込んだ、全く新しいタイプの非線形デジタルフィルタを提案した。本手法は、自律移動ロボットへの応用を目的としており、その有効性を検証するために、実環境における実機実験を行った。その結果、インパルス性雑音、一様分布に従う雑音の混入したデータから、平滑値および微分値を推定することが可能であることを示し、実世界でその有効性を明らかにした。

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

スライディングモードシステムを用いた 非線形デジタルフィルタに関する研究

本論文は、「インパルス性雑音を除去する」および「突発的な信号成分の変化を保存する」という相反する要素を満たす、非線形デジタルフィルタに関する研究をまとめたものである。本研究は、自律移動ロボットの研究の一環として行われており、自律移動ロボットに搭載されるセンサに適用する、という強いタスク指向のもとで行われている。

ロボットが自律的に動的環境の中を動き回るためには、センサによる外界の認識が必要不可欠である。しかし、現実のセンサは、精度、分解能、情報の獲得にかかる時間、そして情報の獲得の際に混入するエラーなど様々な制限がある。そこで、本研究では、センサによって得られた情報に信号処理を施すことにより、雑音に対してロバストな認識の実現を試みている。

しかし、ロボットに搭載されるセンサと一括りにしてもその種類は膨大である。そこで、本研究では超音波センサを想定して研究を行っている。これは、安価でシステムの構成が簡単、さらにはコンピュータとの接続が容易であるなどの特徴を持ち、多くの移動ロボットで用いられているためである。そこで、本研究では超音波センサを用いた測距に際して混入するインパルス性雑音を除去することを主眼に、非線形デジタルフィルタを構成することを目的としている。信号処理を行う際には、信号成分を破壊せず、雑音のみを除去することが望ましい。すなわち、「インパルス性雑音の除去」および「信号成分の保存」という相反する目的を満たすことが望まれる。このような非線形デジタルフィルタとして、本論文では ESDS(the system which Estimates the Smoothed value and the Differential value by using Sliding mode system) を提案している。

本手法は、雑音の混入したデータから平滑値を求めるのみならず、微分値の推定も行うことが可能である。これまでの研究において、センサ信号のような雑音の混入した信号から微分値を推定する研究も行われているが、インパルス性雑音のような大振幅の雑音に対してロバストなフィルタは提案されていない。微分値を推定することができるということは、たとえば超音波センサの測距データ、すなわち距離情報から速度情報が得られることを意味しており、その有効性は大きいと言える。

また、提案手法である ESDS は、原点で大域的一様漸近安定な、最短時間切換曲面を持つ非線形システムを用いて構成されている。このシステムは最短時間系として知られており、スライディングモードシステムと多くのアナロジーを持つ。従って、ESDS を解析するために、最適制御、そしてスライディングモード制御の分野で得られている数々の知見を生かすことができる。その 1

つとして、最短時間での収束が保証されている最短時間系を用いることにより、推定値が得られるまでの時間を短くすることを狙っている。その結果、リアルタイムで得られる時系列データに対して良好な結果を得ることが可能となっている。インパルス性雑音を除去するフィルタとしてはメジアンフィルタが良く知られているが、時系列データの処理という点ではESDSに劣る。これは、ESDSで採用されている最短時間系が、リアルタイムでの平滑値・微分値の推定を支えているためである。提案手法はインパルス性雑音の存在を仮定して構成されたフィルタであるが、異なった雑音モデルの信号に対しても適用を試みた。雑音モデルとして一様分布に従う信号を仮定し、この信号に対するシミュレーションを行った。一様分布に基づく雑音モデルは、超音波センサの混信を想定するものである。さらに、提案手法の実世界における有効性を確認するために、実機を用いた実験も行っている。その結果、反射波が得られないという原因に起因するインパルス性雑音、および混信に起因する一様分布に従う雑音に対して、実用上十分な精度で平滑化、および微分値推定が可能であることを示している。

さらに、本論文で提案しているESDSの性質を明らかにするために、位相面解析を行っている。この解析も、最適制御理論、またはスライディングモード制御の研究において得られた知見が役立っている。線形フィルタであれば、周波数領域での議論が可能であるが、非線形フィルタにおいては周波数領域で議論することは非常に困難である。そこで、位相平面における解軌道を求めることによりシステムの解析を行っている。位相面解析を行うことにより、ステップ応答の際の追従性能、インパルス性雑音に対する雑音除去特性などが明らかになっている。また、位相面解析を行うことにより、フィルタリングに必要とする計算時間の短縮を可能にしている。本研究では、提案手法を自律移動ロボットのセンサ信号処理に応用することを想定している。実世界で働くロボットが環境を認識するためには、リアルタイムで外界の情報を獲得する必要がある。そこで、フィルタリングに必要とする計算時間は可能な限り短いほうが望ましい。ESDSは1階2元連立微分方程式で表現されており、この連立微分方程式を解くことにより平滑値、そして微分値の推定を行っている。しかし、一般的な微分方程式の解法であるRunge-Kutta法、あるいはRunge-Kutta Gill法を用いると多大な計算時間を必要とする。そこで、位相面解析によって得られた知見を用いることにより、微分方程式を解くことなく、推定値を求めることを可能とした。さらに、日立製ワンチップマイクロコンピュータH8/3048Fを用いた実験により、計算時間が10～20分の1になることを確認している。

これを要するに、本論文は自律移動ロボットへの応用を目的とし、スライディングモードシステム、最短時間系という理論体系を組み込んだ、全く新しいタイプの非線形デジタルフィルタを提案したものである。その有効性を検証するために、実環境における実機実験を行い、インパルス性雑音、一様分布に従う雑音の混入したデータから、平滑値および微分値を推定することが可能であることを示し、実世界でその有効性を明らかにしたものであり、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。