

氏名（本籍） ^{おか} ^{もと} ^{こう} ^{へい} 岡 本 光 平（茨城県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第 950 号
学位授与の日付 平成 29 年 3 月 18 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 **デジタルフィルタによる音叉センサの応答
性と精度向上に関する研究**

論文審査委員 （主査）教授 相川 直幸
教授 伊丹 誠 教授 谷口 淳
教授 原田 哲也 教授 木村 真一

論文内容の要旨

デジタル信号処理技術は、情報、通信、計測・制御、医療など様々な分野で必要不可欠な技術となっている。その中において、デジタルフィルタは、音響信号や通信、画像、環境や生体信号などのノイズ抑制に用いる重要な技術の一つである。

近年、厳しい品質管理が要求される製薬業界や自動車業界等では国内外問わず、更なる信頼性の向上や適切な品質管理のために高精度な質量測定が要求されている。質量測定のための計測器として、一般に、はかりが用いられている。また、生産の自動化も進められ、生産ラインでは、はかりを計量システムに組み込んで使用される。しかし、完成品のはかりの形では、設置に必要なスペースが大きい等、適していない場合がある。また、測定範囲が大きくなるほどはかりのサイズが大きくなり、海外への輸送コストが高くなるという問題もある。そのため、測定範囲が広く、分解能が高く、モジュール化された組み込みが容易なセンサが望まれる。

現在、はかりの荷重検出装置に使用されている主なセンサは、フォースバランス式、ひずみゲージ式及び音叉振動式がある。その中において、音叉振動式は、消費電力が少なく、長期安定性に優れるという特徴があるため、多くの業界から注目を集めている。さらに、音叉振動式ロードセルは、ひずみゲージ式やフォースバランス式では実現が難しいレベルである、OIMLR60 : 2000[E]のクラス B に適合できる可能性を秘めている。しかしながら、音叉センサを含め

振動式センサでは、空気密度の影響で振動周波数が変動することが問題となる。つまり、音叉センサを用いた計量システムの計測精度を上げるためには、空気密度の影響を補正する技術が重要となる。この補正技術に気圧センサや温度センサの情報に基づき、温度と空気密度による音叉の振動数を補正することが考えられる。しかしながら、これらのセンサの出力にはノイズが含まれており、直接音叉センサの補正に使用すると、ノイズ誤差が重畳され計測精度が悪くなる。そこで、従来計測精度保証のために、温度センサと気圧センサの出力から計算された空気密度に対し、平均化してノイズを減衰させた後に補正を行っている。しかしながら、平均化による遅れのため実際の空気密度変化の時定数とずれが出てしまい、急激な空気密度変化に対して十分な補正が出来ないと考えられる。

また、音叉センサを用いてベルトコンベアラインで次々と搬送される物品の重量計測を行う場合、床振動や電氣的なノイズ、荷物搬送のための駆動装置のノイズなどもはかりの表示を変動させる原因になる。これらのノイズは、空気密度の変化によるノイズと異なり、特定の周波数成分を持っていることが多い。しかしながら、設置場所の床の強度や測定物の搬送速度が異なるため、装置ごとにノイズの周波数が異なるため、フィルタの特性を設置環境に合わせて変化できることが、フィルタ次数の低減につながり応答性の観点から望ましい。そのような問題を解決するために阻止域周波数や阻止域の特性が可変なデジタルフィルタが提案されている。しかしながら、この設計法は、半正定値計画問題を用いており、可変させるパラメータを増加させた場合に、設計に必要なメモリが増大しフィルタ設計が困難となる場合がある。また、可変させるパラメータの増加は、フィルタ係数を近似する多項式係数の増加を招く。

以上のことから、本論文では、音叉センサの応答性を考慮したデジタルフィルタの設計法と計測精度向上に関する検討を行う。本論は、第 1 章から第 5 章までで構成され各章の概要は以下の通りある。

第 1 章は、本研究の背景と目的について述べた緒論である。

第 2 章では、音叉センサについて測定原理や特徴を示し、開発したモジュール化された音叉振動式ロードセルが、OIMLR60 : 2000[E]のクラス B に適合できることを示す。開発した音叉振動式ロードセルは、音叉振動式センサユニットと電子回路を耐久性、気密性、腐食性及び防塵性に優れたステンレスケースに内蔵している。また、音叉振動式センサユニットは、金属ブロックからロバール機構とてこ機構を一体加工した起歪体に音叉振動式センサを取り付けた構造にしている。実際に OIMLR60 : 2000[E]に基づいた性能試験を行い、クラス B の規格を満足していることを確認する。

第 3 章では、音叉センサを含め振動式センサで問題となる空気密度の変化による誤差の補正について、カルマンフィルタを用いて高精度に補正する方法を提案する。ここでは、まず、音叉センサの振動数と温度変化空気密度変化の関係を明らかにする。次に、空気密度変化によって変動する音叉センサの振動周波数に対する補正法を状態空間モデルに応用することを考え、カルマンフィルタを設計する。最後に、実際に得られた計測データに対して提案するカルマンフィルタを用いた場合と従来法を用いた場合との比較を行い、提案法の有効性を確認する。

第 4 章では、繰り返し最小二乗法を用いた複数の要素が可変可能な準等リブル可変 FIR フィルタの設計法を提案する。提案するフィルタは、様々な要因のノイズを取り除き応答性を向上させるために、阻止域の複数箇所に大きな減衰量を持ち、その帯域の減衰量と位置が可変可能とする。さらに、阻止域端周波数のノイズが、遷移域に入ることも考慮するために阻止域端周波数も可変可能とする。さらに、フィルタ係数を近似する多項式次数が高次になった場合に多項式係数を低減する方法を示す。最後に、実際にベルトコンベアラインから得られた計測データに対して、提案する可変デジタルフィルタを用いた場合と非可変の直線位相 FIR フィルタを用いた場合と比較を行い提案法の有効性を確認する。

第 5 章は、結言であり本論文の概要と得られた成果、今後の研究課題について述べる。

論文審査の結果の要旨

デジタル信号処理技術は、情報、通信、計測・制御、医療など様々な分野で必要不可欠な技術となっている。その中において、デジタルフィルタは、計測信号や音響、画像、生体信号などのノイズ抑制に用いる重要な技術の一つである。

近年、厳しい品質管理が要求される製薬業界や自動車業界等では国内外を問わず、更なる信頼性の向上や適切な品質管理のために高精度な質量計測が要求されている。質量計測のための計測器として、一般に、はかりが用いられている。また、生産の自動化も進められ、生産ラインでは、はかりを計量システムに組み込んで使用する。しかし、完成品のはかりの形では、計量システムへの組み込みに適していない。また、測定範囲が大きくなるほどはかりのサイズが大きくなり、設置に必要なスペースが大きい、海外への輸送コストが高くなるなどという問題もある。そのため、測定範囲が広く、分解能が高く、モジュール化された組み込みが容易なセンサが望まれる。

現在、はかりの荷重検出装置に使用されている主なセンサは、フォースバランス式、ひずみゲージ式及び音叉振動式がある。その中において、音叉振動式は、消費電力が少なく、長

期安定性に優れるという特徴があるため、多くの業界から注目を集めている。さらに、音叉振動式ロードセルは、ひずみゲージ式やフォースバランス式では実現が難しいレベルである、OIMLR60 : 2000[E]のクラス B に適合できる可能性を秘めている。しかしながら、音叉センサを含め振動式センサでは、空気密度の影響で振動周波数が変動することが問題となる。さらに、音叉センサを用いてベルトコンベアラインで次々と搬送される物品の重量計測を行う場合、床振動や電氣的なノイズ、荷物搬送のための駆動装置のノイズなどもはかりの表示を変動させる原因になる。これらの問題を解決するために、温度センサと気圧センサの出力から計算された空気密度に対し補正を行ったり、床振動や電氣的なノイズ、荷物搬送のための駆動装置のノイズなどを除去するフィルタを用いて測定精度の保証を行っている。しかしながら、OIMLR60 : 2000[E]のクラス B への適合やベルトコンベアラインでの動的計測のためには、計測精度や分解能、計測速度という点において不十分である。よって、本論文では、音叉センサの応答性を考慮したデジタルフィルタの設計法と計測精度向上に関する検討について示したものである。

本論文の成果は以下のように要約される。

- 1) 音叉振動式ロードセルが、フォースバランス式やひずみゲージ式では実現が難しいレベルである、高ひょう量で OIMLR60 : 2000[E] のクラス B に適合できることを示している。この音叉振動式ロードセルは、音叉振動式センサユニットと電子回路を耐久性、気密性、腐食性及び防塵性に優れたステンレスケースに内蔵している。また、音叉振動式センサユニットは、金属ブロックからロバーバル機構とてこの機構を一体加工した起歪体に音叉振動式センサを取り付けた構造にしている。これにより、非自動はかりや自動はかりの精度向上が期待できる。
- 2) 音叉振動式センサで問題となる空気密度の変化による計測誤差の補正について、離散カルマンフィルタを用いた方法を提案している。提案法では、空気密度変化によって変動する音叉センサの振動周波数と空気密度、温度との関係を明らかにし、状態空間モデルで表される線形確率システムを考える。このシステムを離散カルマンフィルタで実現することで、従来実現できていなかった空気密度の変化に対して 1/2000 万の分解能を有するはかりを実現するために必要となる空気密度補正が可能となる。
- 3) 動的重量計測における高速高精度計測のための準等リプル特性を有する阻止域の複数要素が可変な直線位相可変 FIR フィルタの設計法を提案している。この可変フィルタは、スペクトルパラメータを用いた多項式によりフィルタ係数が構成され、阻止域端周波数、部分的に大きな阻止域減衰量の位置など複数のスペクトルパラメータを変化させることで、従来のものと比べて計測精度を保ちながら、フィルタの次数を低減することで計測時間を短縮できる。また、このフィルタにおいて、多項式の高次の項がフィルタ係数に及ぼす影響が少ないことを利用した多項式係数の低減法を提案している。これにより、組み込み機器に用いられるマイコンのメモリ量の低減が行われる。

以上、本論文は、音叉振動式センサの空気密度変化に伴う計測誤差を離散カルマンフィルタによる補正法を提案した。また、高速高精度計測のための阻止域の複数要素が可変である直線位相可変 FIR フィルタの設計法を提案した。それらの成果は学問的、工学的に貴重な貢献をするものと判断される。よって、論文は博士（工学）の学位を授与するに十分価値あるものと認める。