

鏡筒光学製品モデルを用いた 仮想量産試作システムによる統計的公差設計

学位論文内容の要旨

一眼レフ・カメラの交換レンズに代表される撮像系光学製品は、一本の共通光軸を中心とした回転対称な構造を持つために、一般に「鏡筒光学製品」と呼ばれている。

光学製品に限らず、量産製品の製品性能を安定的に維持しながら、低コストで製品を製造するためには、公差をどのように決定するかが製品設計上の大きな課題である。特に、光学製品では設計自体が「光学設計」と「鏡筒(機械)設計」の二工程にまたがるため、単に各部品の公差を適切に決定するだけでなく、光学部品と鏡筒部品との公差配分をも適切に決定しなければならない。そのためには、量産光学製品の設計段階において、量産時の「光学性能」や「生産性」を、設定公差と関連付けて正確かつ定量的に予測・判断することが必要となる。また、適切な公差設計を行う上で、公差が製品(光学)性能に与える影響の度合い、すなわち公差感度を正確に把握することも、光学製品の設計において必要不可欠である。光学製品では、設計段階において、任意に想定された誤差(偏差)状態での光学性能を、個々に計算(光学シミュレーション)し予測することが可能である。しかし、「量産時の光学性能」や、光学性能に対する「量産時の実効的な公差感度」、更には複数の公差が複合した状態での「複合公差感度」などを、正確かつ定量的に判断することは極めて困難であった。このために光学製品の製品開発においては、設定された公差の適切性やそれによる量産性(能)を、設計段階で十分検証できず、量産工程の初期段階において予想外のトラブルを招き、製品開発期間の長期化や製造コストの増加などの原因となっていた。

以上の背景から、鏡筒光学製品の開発において、真に大量生産を前提とした「高生産性設計」を実現するためには、従来あまり手を着けられてこなかった「製品開発工程」そのものと、その上位工程である「製品設計工程」を対象として、製品設計と量産製造に対する基本的な考え方から改善する必要がある。また同様に、それを実現するための手段・技術の確立ならびに、実用ツール(生産情報システム)の実現が切望されてきた。

本研究では、これら問題を解決するための方法として、鏡筒光学製品開発工程の改善および生産性向上のために、光学製品における「統計的公差設計法の確立」と、光学製品に適した「統計的公差設計システムの実現」を目的とするものである。

本論文では、はじめに、現状の光学製品開発工程の詳細な分析を行い、現工程における問題点を指摘する。特に、大量生産を前提とする光学製品開発の観点から議論を行う。

また、光学分野および機械分野における、公差関連の研究の現状と動向を分析し、更に単一の光学製品としての観点から、製品設計および公差設計の問題点を指摘する。その結果、従来の製品設計及び公差の研究は、光学設計または機械設計に特化したものがほとんどであり、一つの光学機械製品として製品設計や公差設計に着目した研究、つまり、光学と機械の複合問題に対する研究が行われていなかった。

そこで本研究では、対象とする光学製品やその開発工程の特徴を踏まえて、光学製品における統計的公差設計の必要性を議論し、その結果から、大量生産を前提とする新しい製品開発工程の提案を行った。生産工程に統計的な概念を導入する以上、設計対象も統計的な集合体として扱う必要が出てくる。そこで、そのために必要となる機能要件を明らかにすると共に、その機能要件を満たす具体システムとして、仮想量産試作システムの提案を行った。

提案する仮想量産試作システムは、大きく分けて三つの基本要素からなる計算機シミュレーション・システムである。その三つの要素とは、1)光学性能の量産シミュレーション・システム、2)光学性能と公差の複合公差感度解析システム、3)公差と製造コストの自動最適化システムである。これらから構成されるシステムを、光学設計及び鏡筒設計の各段階で適切に用いることにより、量産時の製品性能及び生産性を考慮した、統計的公差設計が実現可能となる。

如何なるシステムにおいても、何らかのシミュレーションを行うためには、その問題に適した計算機モデルが必要となる。そこで本研究では、光学製品開発工程と計算機モデルとの関係および必要性を明らかにした上で、統計的公差設計に適した鏡筒光学製品モデルの提案を行う。その製品モデルの特徴は、鏡筒構造や誤差（製造・組立など）による各光学機能面の位置と姿勢を、座標変換連鎖の関係で統一的に表現できることである。更に、各機能面間の接続関係に対し、統計公差の情報を陽に定義できる。更に、その製品モデルが正しいかどうかを検証するために、簡易的な方法でソフトウェアとして実装し、実際に製品モデルとしての正当性および機能を確認した。

有効性を確認するために、実際に提案するシステムをソフトウェアとして構築した。量産シミュレーションは、モンテカルロ法を基本にして実現した。このシステムは、製造・組立誤差に基づく誤差データ発生機能と、その誤差データから鏡筒の組立・調整を簡易的にシミュレートする機能を持つ。そして、結果を逐一光学設計システムに渡しながら光学性能を計算し、最後に統計的処理を行って生産性と量産性能を定量評価する。また、複合公差感度解析システムは、モンテカルロ法で得られた誤差データと光学性能データとから、重回帰分析法によって相互作用までを考慮した分析計算を行う。これらにより、設計段階で量産時の製品性能や生産性並びに複合公差感度が容易に得られる。

実装された仮想量産試作システムを用いて、システムの実証実験を行った。結果の信頼性を検証するために、実際に鏡筒光学製品の製造工程を調査し、工程能力データを蓄積した。そして、それらの結果とシミュレーション結果を比較することで、システムの信頼性を検証する。最後に、提案システムを用いた公差設計法について統計的公差設計の観点から考察し有効性を明らかにした。

学位論文審査の要旨

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

学 位 論 文 題 名

鏡筒光学製品モデルを用いた

仮想量産試作システムによる統計的公差設計

光学製品に限らず、量産製品の製品性能を安定的に維持しながら、低コストで製品を製造するためには、公差をどのように決定するかが製品設計上の大きな課題である。特に、光学製品では設計自体が「光学設計」と「鏡筒（機械）設計」の二工程にまたがるため、単に各部品の公差を適切に決定するだけでなく、光学部品と鏡筒部品との公差配分をも適切に決定しなければならない。そのためには、量産光学製品の設計段階において、量産時の「光学性能」や「生産性」を、設定公差と関連付けて正確かつ定量的に予測・判断することが必要となる。本論文は光学製品の量産を考慮した適切な公差設計に必要な鏡筒光学製品モデルの導入と、製造ラインの量産性能を考慮した仮想量産試作システムを開発することによる光学製品の統計的公差設計に関する研究について論じたものである。

光学製品の設計において、光学製品では、設計段階において、任意に想定された誤差（偏差）状態での光学性能を、個々に計算（光学シミュレーション）し予測することが可能である。しかし、「量産時の光学性能」や、光学性能に対する「量産時の実効的な公差感度」、更には複数の公差が複合した状態での「複合公差感度」などを、正確かつ定量的に判断することは極めて困難であった。このために光学製品の製品開発においては、設定された公差の適切性やそれによる量産性（能）を、設計段階で十分検証できず、量産工程の初期段階において予想外のトラブルを招き、製品開発期間の長期化や製造コストの増加などの原因となっていた。

このような背景から、鏡筒光学製品の開発において、真に大量生産を前提とした「高生産性設計」を実現するためには、従来あまり手を着けられてこなかった「製品開発工程」そのものと、その上位工程である「製品設計工程」を対象として、製品設計と量産製造に対する基本的な考え方から改善する必要があることが指摘され、それを実現するための手段・技術の確立ならびに、実用ツール（生産情報システム）の実現が切望されてきた。本論文では、これら問題を解決するための方法として、鏡筒光学製品開発工程の改善および生産性向上のために、光学製品における「統計的公差設計法の確立」と、光学製品に適した「統計的公差設計システムの実現」を目的としたものである。

本論文では、はじめに、現状の光学製品開発工程の詳細な分析を行い、現工程における問題点を指摘している。特に、大量生産を前提とする光学製品開発の観点から議論を

行ない光学分野および機械分野における、公差関連の研究の現状と動向を分析し、更に単一の光学製品としての観点から、製品設計および公差設計の問題点を指摘している。その結果、従来の製品設計及び公差の研究は、光学設計または機械設計に特化したものがほとんどであり、一つの光学機械製品として製品設計や公差設計に着目した研究、つまり、光学と機械の複合問題に対する研究が行われていなかったことを指摘している。

本論文では、対象とする光学製品やその開発工程の特徴を踏まえて、光学製品における統計的公差設計の必要性を論じ、その結果から、大量生産を前提とする新しい製品開発工程の提案を行なっている。生産工程に統計的な概念を導入するために、設計対象も統計的な集合体として扱う必要が出てくる。そのために必要となる機能要件を明らかにすると共に、その機能要件を満たす具体システムとして、仮想量産試作システムの提案を行っている。

提案する仮想量産試作システムは、大きく分けて三つの基本要素からなる計算機シミュレーション・システムである。三つの要素とは、1) 光学性能の量産シミュレーション・システム、2) 光学性能と公差の複合公差感度解析システム、3) 公差と製造コストの自動最適化システムである。これらから構成されるシステムを、光学設計及び鏡筒設計の各段階で適切に用いることにより、量産時の製品性能及び生産性を考慮した、統計的公差設計が実現可能となることを示している。

如何なるシステムにおいても、何らかのシミュレーションを行うためには、その問題に適した計算機モデルが必要となることから、本論文では、光学製品開発工程と計算機モデルとの関係および必要性を明らかにした上で、統計的公差設計に適した鏡筒光学製品モデルの提案を行なっている。その製品モデルの特徴は、鏡筒構造や誤差（製造・組立など）による各光学機能面の位置と姿勢を、座標変換連鎖の関係で統一的に表現できるだけでなく、各機能面間の接続関係に対し、統計公差の情報を陽に定義でき、更に、その製品モデルが正しいかどうかを検証するために、簡易的な方法でソフトウェアとして実装し、実際に製品モデルとしての正当性および機能を確認する方法を提案している。

提案手法の有効性を確認するために、実際に提案するシステムをソフトウェアとして構築している。特に量産シミュレーションは、モンテカルロ法を基本にして実現している。このシステムは、製造・組立誤差に基づく誤差データ発生機能と、その誤差データから鏡筒の組立・調整を簡易的にシミュレートする機能を持つだけでなく、結果を逐一光学設計システムに渡しながら光学性能を計算し、最後に統計的処理を行って生産性と量産性能を定量評価することを可能としている。また、複合公差感度解析システムは、モンテカルロ法で得られた誤差データと光学性能データとから、重回帰分析法によって相互作用までを考慮した分析計算を行うことにより、設計段階で量産時の製品性能や生産性並びに複合公差感度が容易に得られることを示している。

実装された仮想量産試作システムを用いて、その結果の信頼性を検証するためにシステムの実証実験を行っている。実際に鏡筒光学製品の製造工程を調査し、工程能力データを蓄積し、それらの結果とシミュレーション結果を比較することで、システムの信頼性を検証している。最後に、提案システムを用いた公差設計法について統計的公差設計の観点から考察し有効性を明らかにしている。

これを要するに、著者は光学製品の公差設計において、公差設計を可能とする鏡筒光学製品モデルの提案と量産時の量産性能を考慮した仮想量産試作システムを開発により、光学製品の統計的公差設計を可能とするシステムを実現したものであり、システム光学分野への貢献大なるものがある。

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ものと認める。