

機関番号：12605

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20710112

研究課題名 (和文) ナノ・マイクロエンジニアリングにおける数理最適化の展開

研究課題名 (英文) DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL OPTIMIZATION IN NANO-MICRO ENGINEERING

研究代表者

宮代 隆平 (MIYASHIRO RYUHEI)

東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授

研究者番号：50376860

研究成果の概要 (和文)：

ナノ・マイクロエンジニアリングに代表される、非常に小さな物体を扱う精密工学の現場においては、誤差が部品の精度などに大きく影響を与える。このような場合には、従来の最適化計算は誤差に影響されて正しい答えを求めるのが難しかったが、本研究では誤差の影響が少ない、最適な答えを求める数理的手法を開発した。研究の成果は、精密工学の現場においてより小さな製品の開発などに利用できる、有用なものである。

研究成果の概要 (英文)：In nano-micro engineering, observation and implementation errors strongly affects production process. With traditional optimization methods, it is difficult to obtain true optimum solutions due to such errors. In this study, we developed several optimization algorithms avoiding numerical difficulties. The obtained results are robust against observation and implementation errors, and are highly effective in practice.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：最適化

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：OR, 数理工学, 精密工学, 最適化, アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

近年の精密工学はますます微細化・高精度化が進み、ナノレベルの計測・制御・補正が要求されるようになってきている。これにともない、旧来は無視できるレベルにあった様々な要因による誤差が、生産に悪影響を与えるケースが増えてきた。これまでこれらの誤差の影響を排除するためには、最小二乗法や確率的サンプリングなど、主に統計的法則を利用したものが用いられてきた。しかしながら、要求精度が細くなるにつれ、これら統計法

則を利用したマクロレベルの最適化では対処できない問題が多くなっている。

ナノエンジニアリングという言葉に表されるように、現在精密工学の現場では $\mu\text{m}$ オーダーを優に超え、 $\text{nm}$ レベルの制御が行われている。ナノレベルの機械制御では、ありとあらゆるものが誤差の要因となりうるし、また原因が不明な誤差も多く発生する。これらの誤差に対処するには、主に二つの方法がある。ひとつは、誤差の発生を稀なものと考え、多数の観測を平均化することにより影響を薄める、いわばマクロ的な方法である。従

来の精密工学では、最小二乗法に代表されるこれらの統計的手法により誤差の影響を除外してきた。しかしながら、観測・制御・補正に要求されるレベルが $\mu\text{m}$ から $\text{nm}$ のレベルになると、ハードウェアの物理的な限界もあいまって、誤差の発生は稀ではなくなる。同時に、多数の観測で誤差を薄めるという方法より、むしろ逆に誤差そのものを変数として最適化するミクロ的手法が必要になってきている。

## 2. 研究の目的

本研究ではナノ・マイクロエンジニアリングにおける各種の最適化問題に対して、統計法則を利用したマクロ視点の最適化ではなく、数理計画法を利用したミクロ視点の最適化の展開を行う。具体的には、精密工学における観測・制御・補正などの問題を、数理最適化問題としてモデル化し、高速なアルゴリズムの開発を行う。

数理計画法の分野において、精密工学の分野から発生する最適化問題は、これまで散発的にしか扱われてこなかった。これには、主に以下のような理由がある。

(1) 従来は、最小二乗法に代表される統計的手法によって近似的な最適化が行われてきた。また、要求される精度も近似最適でよいとされていた。

(2) 現実の問題を数理計画問題としてモデル化した場合、規模が大きくなり、現実的な時間内に解を求めるのが難しく、リアルタイム制御を要する現場では嫌われていた。

(3) 数値計算の面で困難な点があった。ナノレベルの制御では、入力データに非常に大きな数値と非常に小さな数値が混じることがよくある。このような場合、従来の最適化手法では数値計算が不安定となり、計算が破綻することが多かった。

しかし既に述べたように、近年の高精度化にともない、統計的手法を用いた近似最適化では不十分になりつつある。また、計算機の高速度および数理計画のアルゴリズムの発展により、大規模な数理計画問題でも現実的な時間内に解けるようになってきたが、本研究が対象とするような問題では数値計算の不安定性により、リアルタイム制御が可能なまでには至っていない。本研究は、精密工学に現れる各種の最適化問題について、上記1～3の問題点を解決するアルゴリズムの開発を行う。

数理計画の研究分野においては、近年「ロ

バスト最適化」や「精度保証付き数値計算」などの研究がさかんになっている。これらはそれぞれ「入力に誤差がある」「計算中に誤差がある」場合のための汎用的な手法である。本研究が扱うナノエンジニアリングにおける最適化問題では、上記二種類の誤差もさることながら、『最適制御がわかっても（誤差のため）その通りに制御できない』という場合が多い。これは言うなれば「誤差を生み出さない出力を求める」という、新しいタイプの問題であり、このような問題を扱うことが本研究の大きな特色のひとつとなっている。もちろん、ロバスト最適化や精度保証付き数値計算などの研究成果が本研究に応用できる部分も多い。ただし、これらの手法は一般の最適化問題に対する汎用的な手法であるため、計算時間の面で難点があるケースがある。本研究では、あえて対象を精密工学における最適化問題に絞ることにより、問題の特徴を利用した高速化を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究は「ナノ・マイクロエンジニアリングにおける数理的最適化の展開」を目標とするものである。研究は大きく二段階に分けられ、「データ収集および数理的構造の解明およびモデル化」と「得られた問題に対する、高速な数理最適化アルゴリズムの構築」の部分からなる。前者では、精密工学から発生した最適化問題について、これまでの典型的な最適化問題とは異なる構造について数学的に解析を行い、後者は解析の結果得られた特徴的な数理構造を利用して、高速なアルゴリズムを構築するものである。

研究は以下のプロセスからなる。

### (1) 問題の収集

既に述べたように、精密工学の分野では数理的最適化手法は種々の理由よりあまり普及しておらず、むしろ統計的手法、制御理論による最適化が一般的に用いられている。したがって、最近の微細化にともない発生した新たな最適化問題だけではなく、従来は統計的な手法により近似最適化で許されていた問題についても深く分析する必要がある。

### (2) データ収集

得られた最適化問題について、実データの収集を行う。申請者のグループでは、精密工学の製品開発を行っている複数の企業と共同研究を継続的に行っており、様々な実データが入手可能な環境にある。この種の最適化問題では、人工的なデータでは不具合が出ず、実データによる計算になって初めて数値的な不安定性が発覚することが多いため、実デ

一タによる検証は非常に重要である。

### (3) 問題構造の解明

実データをもとに、最適化問題を従来の統計手法、また一般的な数理最適化手法で解き、問題点の把握を行う。特に、数値的不安定性、計算精度、計算時間などの点については、重点的に解析を行う必要がある。

本研究においては、「精密工学に現れる最適化問題に特有な構造を解明する」というのが非常に重要な要素であるので、この部分は重点的に研究を行う。

### (4) 高速に良い解を発見する手段の構築

一般に最適化問題では、アルゴリズムの初期段階ではいかに良い解を発見できるかが高速化への鍵となる。これまでに様々な手法が提案されているが、そのいずれも精密工学との関連は全く無いため、この部分で精密工学の特徴を生かした手法が提案できれば、アルゴリズムの高速化に大きく寄与することは間違いないと思われる。

### (5) 高速に最適性を証明する方法の構築

最適化問題に対しては、最終的に得られた解が「最も良い」ということを証明できて計算が終了するが、これには長い計算時間がかかることが多い。しかし、解の分布などの特徴を把握することにより、この計算時間を短縮できることが知られている。

また、問題の種類およびデータのサイズによっては、構築した高速アルゴリズムをもってしても、現実的な計算時間内に最適解が得られないという可能性も考えられる。このような場合については、確率的なアルゴリズム、近似アルゴリズム（最適解との比が何%ということを保証できるアルゴリズム）の構築を行う。

本研究は、数理的最適化手法を精密工学の分野に大きく展開しようという、萌芽的な性格も含む試みである。ゆえに、数理的最適化手法だけにとらわれず、精密工学における最適化問題に対して有効な手法については積極的に取り入れるつもりである。例えば、人工知能における探索理論、既にあげたロバスト最適化や精度保証付き数値計算の技術、あるいは各種のメタ・ヒューリスティクスなどのテクニックなどである。

## 4. 研究成果

本研究の成果を以下に列挙する。

### (1) 制約2次計画法および2次錐計画法を用いたアルゴリズムの開発

目的関数が複数の項の最大値という形で表され、なおかつ2次関数を含むタイプの問題は、目的関数が滑らかでないため従来の微分情報を利用するタイプのアルゴリズムはうまく動作しなかった。この種の問題に対して、制約2次計画法および2次錐計画法を用いたモデル化を行い、最適解を高速に求めることに成功した。

### (2) 混合0-1整数計画法を用いたアルゴリズムの開発

精密工学の分野に現れる、ある種類の最適なフィッティングを求める問題に対して、混合0-1整数計画法を用いたモデル化を行い、最適解を求めるアルゴリズムを開発した。従来この種の問題は、最小2乗法もしくはその改良法などを用いて答えが求められていたが、ある種の近似を行った結果であり、あくまでも得られる出力は近似最適解にすぎなかった。本研究の成果を利用することにより、真の最適解を求めることができ、また従来の近似最適解の精度があまり高くないことが判明した。

### (3) 誤差の不連続性を考慮した精密工学におけるロバスト最適化問題の解法の構築

誤差に強い最適化手法として、従来からロバスト最適化という手法が提案されてきたが、これらの手法では誤差に不連続性がある時のモデル化が議論されていなかった。研究により、この種類の誤差が発生する際の精密なモデル化を行うことに成功し、また計算機実験によって従来の手法より誤差に格段に強い最適解が求まることを確認した。この成果は、従来の（連続的な）ロバスト最適化手法と、整数計画問題に代表される離散的な手法を組み合わせた独創的なものであり、今後の発展が期待される。

### (4) 誤差に強いロバストなアルゴリズムの構築

誤差の絶対値を最小にするような関数に対する最適化問題は、ナノ・マイクロエンジニアリングでしばしば出現する。これらの問題に対し数値計算を行なうと、微分できない点の周辺で数値精度が不安定になり、結果として計算が破綻することが多かった。本研究ではこれらのタイプの関数に対して、変数変換などにより不安定性を解消できることを示し、実際の問題に適用し非常に精度の高い解を得ることに成功した。

### (5) 厳密計算が困難な問題に対する定数近似比率アルゴリズムの開発

本研究課題の対象である「誤差に強いロバストなアルゴリズム」が要求されている問題群の中には、いわゆる NP-困難とよばれる厳

密計算が非常に困難である問題が存在する。このような問題の一種である、ある種類の制約条件付き移動距離最小化問題に対して、定数近似比率で近似を行なうアルゴリズムの開発に成功した。従来この種の問題に対しては経験的解法を使うのが主であったが、近似比率の保証ができていなかった。本研究の成果により、どんな入力パラメータに対しても最適解に対する定数倍の近似比率を保証する、高速な多項式時間アルゴリズムの構築が可能となった。

## 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6件)

(1) Daisuke Yamaguchi, Shinji Imahori, Ryuhei Miyashiro, Tomomi Matsui, An improved approximation algorithm for the traveling tournament problem, Algorithmica, 査読有, 印刷中, 2011

(2) Ryuhei Miyashiro, Shinji Imahori, Tomomi Matsui, An approximation algorithm for the traveling tournament problem, Annals of Operations Research, 査読有, 印刷中, 掲載確定

(3) 山口大輔, 今堀慎治, 宮代隆平, 松井知己, An improved approximation algorithm for the traveling tournament problem, 統計数理研究所共同研究レポート, 査読無, 252巻, 2010, 1-14

(4) Yuji Shinano, Toshiyuki Yoshihara, Ryuhei Miyashiro, Youzou Fukagawa, Optimization of lens adjustment in semiconductor lithography equipment using quadratically constrained and second-order cone programming, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.4, 2010, 785-793

(5) Ryuhei Miyashiro, Youzou Fukagawa, Optimization of alignment in semiconductor lithography equipment, Precision Engineering, 査読有, Vol.33, 2009, 327-332

(6) 品野勇治, 吉原俊幸, 宮代隆平, 深川容三, 制約2次計画法および2次錐計画法を用いた半導体露光装置用レンズの最適調整. 日本機械学会論文集C編, 査読有, 75巻, 2009, 157-163

[学会発表] (計9件)

(1) Shinji Imahori, Tomomi Matsui, Ryuhei Miyashiro, An Approximation Algorithm for the Unconstrained Traveling Tournament

Problem, The 8th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2010), August 10, 2010, Queen's University Belfast, Northern Ireland, United Kingdom

(2) Daisuke Yamaguchi, Shinji Imahori, Ryuhei Miyashiro, Tomomi Matsui, An improved approximation algorithm for the traveling tournament problem, The 20th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2009), December 18, 2009, Honolulu, Hawaii, USA

(3) Daisuke Yamaguchi, Shinji Imahori, Ryuhei Miyashiro, Tomomi Matsui, An improved approximation algorithm for the traveling tournament problem, The 12th KOREA-JAPAN Joint Workshop on Algorithms and Computation (WAAC 2009), July 4, 2009, Kookmin University, Korea

(4) 宮代隆平, 加法的実装誤差の不連続性を考慮したレンズ間隔調整のロバスト最適化. 研究集会「最適化：モデリングとアルゴリズム」, 統計数理研究所, 2010年3月23日, 統計数理研究所

(5) 宮代隆平, 誤差の離散性を考慮したレンズ調整のロバスト最適化, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2009年秋季研究発表会, 2009年9月10日, 長崎大学

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 露光装置、調整方法及びデバイスの製造方法

発明者: 宮代隆平, 品野勇治, 深川容三, 久保諭史, 高野義巳, 吉原俊幸

権利者: キヤノン株式会社、国立大学法人東京農工大学

種類: 特許

番号: 特開 2011-009575

出願年月日: 2011年6月26日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮代 隆平 (MIYASHIRO RYUHEI)

東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授

研究者番号: 50376860