

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：15201
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26350445
研究課題名(和文) ロバストパラメータ設計における技術方法論の開発と大規模コンピュータ実験への応用

研究課題名(英文) statistical modeling approach to robust parameter design and its application

研究代表者
河村 敏彦 (KAWAMURA, TOSHIHIKO)

島根大学・医学部・准教授

研究者番号：70435494
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではモーメント条件とその平均損失最小化による2段階設計法の最適性の特徴づけを行い、一般化SN比を導出できることを示した。ここでは、一般的な2乗損失関数のような対称ではなく非対称損失関数に基づくロバストパラメータ設計を体系化した。非対称べき損失関数から導出されたパフォーマンス測度は算術平均と調和平均の比で表現され、実務的にも扱いやすい評価測度となっている。

研究成果の概要(英文)：Robust parameter design is used to make product or process quality characteristics less sensitive to manufacturing, environmental, and use fluctuations. The quality loss functions play important roles in the development of location and dispersion effect performance measures of these characteristics. We discuss a new class of asymmetric power loss functions for positive characteristics and the associated two-step procedure.

研究分野：品質管理

キーワード：品質管理 統計工学

1. 研究開始当初の背景

近年、製品開発や医薬品開発において、大規模なシミュレーション実験に基づく技術開発が盛んになってきている。設計開発段階で、数値実験の結果から設計することは開発時間の短縮およびコスト低減のみならず極めて重要である。しかしながら、この方法については、次のような問題がある。

第一にシステム内の変数間に存在する関数関係を有限要素法や微分方程式の数値解法に基づきシミュレートするため膨大な計算処理時間を要する。第二に、応答曲面の形状が実実験に比べ複雑なものになる傾向があり、最適設計が困難になる可能性がある。

第一の問題点について：効率的な実験計画としてSpace-Filling計画の一つ一様計画 (uniform design) を適用し、意図的に疎 (スパース) な実験点を生成させるとよい。これは「実験空間上に一様にランダムに分布している計画で、実験回数と等しい水準数を持つ多水準系の一部実施計画」であり、Fangらより提案された。

第二の問題点について：複雑な応答関数を眺めるための非線形モデリングの手法として、Box流応答曲面モデルのみならず、高次の多項式、B-スプラインやGauss過程モデルなども有効である。

2. 研究の目的

近年、医療の情報システム化が着実に進んでおり、蓄積されるデータは多岐にわたり、その量も膨大になってきている。今後は、データをどのように計画的に採取し、そのデータからどのように本質的な情報を取り出すかが重要になってくる。

本研究の目的は、データに基づいて製品開発および医薬品開発、医療サービス改善のための品質工学的的方法論を開発することである。特に、コンピュータ実験における大規模シミュレーションデータに対して (1) 一様計画に基づく疎 (スパース) な実験点を生成、(2)

予測のための近似モデルを構築、(3) ロバスト性を考慮した多特性最適化による最適化プロセスの体系化を行う。本研究は大きくわけて3つの研究 (実験計画 モデリング 最適化) を取り上げた。

(1) 実験計画：大規模なシミュレーション実験では、システム内の関数関係を有限要素法や微分方程式の数値解法に基づきシミュレートするため膨大な計算処理時間を要していた。これはSpace-Filling計画の一つと知られる。一様計画を適用し、意図的に疎 (スパース) な実験点を生成することで実験回数の低減化が可能となる。本研究では、技術開発への応用を考慮し、実験領域を制限した制約付き一様計画への拡張を試みた。

(2) モデリング：一様計画に基づき得られたデータに対して、モデリングを行い主効果や交互作用の効果を認識する。コンピュータ実験では未知関数に対し、Box流応答曲面モデルだけでなくGauss過程モデルによる平滑化モデルが有効となる。これは誤差のないモデル、すなわち決定論的データを対象としたシミュレーション実験の近似モデル

(surrogate model) を定式化するために広く利用されている。その他、カーネル推定、スプラインおよびニューラルネットなども知られており、これらモデリング手法の有効性を検証した。

(3) 最適化：多特性最適化のアプローチとして、複数の応答から1つの評価測度である満足度関数を用いて、これを最大化する設計パラメータの水準を探索する方法が知られている。満足度関数は、ロバスト設計における損失関数と等価であり、これまで数学的に扱いやすい2次損失関数 (対称関数) が用いられてきた。本研究では非対称損失関数に基づき、多特性最適化問題に応用した。

3. 研究の方法

2つの研究項目において問題の抽出と整理および新たな方法論の開発を中心に行った。

(1) 大規模シミュレーション実験における最適計画：実験回数を低減するため、設計パラメータで規定される内側配置において交互作用や2次が検討できるような計画する。これにより、直交性の崩れた非直交計画に対する最適化が可能となる。このとき、外側配置におけるノイズ因子は可能な範囲で複数取り上げる。多因子から少数の因子を絞り込むための実験として、過飽和計画ないし決定論的スクリーニング計画が知られており、Space-filling計画を行う前段階としてスクリーニング実験を行う。コンピュータ実験では、設計パラメータの水準を実実験よりも大きく振ることが可能である。このとき、一般的に従来の実実験に比べ応答関数の形状が複雑になるため、ランダムな点配置による一様計画が用いる。特に実務上では設計パラメータに制約条件が存在するため制約付き一様計画への拡張を試みた。

(2) 非線形システムに対するモデルアプローチ：コンピュータ実験計画は、物理法則やシミュレーションなどの決定論的データに対して、近似モデルをあてはめる場合に有効となる。コンピュータ実験では、システム内の変数間に存在する関係をシミュレートするため複雑なモデルになり、このときGauss相関構造を仮定したGauss過程モデルおよびB-スプラインやニューラルネットなどの非線形モデリングが有効となる。多水準でも水準範囲が狭ければ、Box流応答曲面法でも十分近似できる。一方、広くとれば高次の多項式やGauss過程モデルが見かけ上のあてはまりがよくなるが、将来の予測能力に欠ける。実際の解析では、(i)グラフによる可視化、(ii)Gauss過程モデルを適合させ要因効果の関数を把握、(iii)技術的に意味のある局所的範囲で2次モデルを当てはめる、という手順により構造を認識する。製造工程のロバスト設計は、変数にばらつきがある状況でも、安定して許容範囲内に製造するための手法である。因子の中

には、「実験の場」で制御可能だが「ユーザの場」では制御できないばらつきをもつノイズ因子がある。一般に因子のもつばらつきは応答に影響を与える。工程におけるロバスト設計では、それら伝達変動が小さくなるように設計パラメータの水準値を決める。これは、設計パラメータに対して、応答曲面が最も平坦になるところを探索し、工程のばらつきを最小限に抑えるアプローチとして知られ、品質工学的なばらつき低減の方法の一つである。

4. 研究成果

本研究は非対称損失に基づく満足度関数によるロバストパラメータ設計を行った。多特性最適化における満足度関数を用いたアプローチは、複数の応答から総合的に評価関数である満足度関数を定め、それを新たに応答とみなし、これを最大化する因子の水準を求める方法である。満足度関数は数学的には損失関数と等価であり、実務的には目標値に関して対称関数ではなく非対称損失関数に基づく最適化が望ましい場合がある。本研究では、Kawamura and Motoyama (2016)により提案された目標値に対して連続的な非対称損失関数を仮定した最適化手法の開発を行った。

製品開発の初期段階では、多くの設計パラメータを同時に取り上げる。しかしながら、因子や水準数が増えれば、実験回数も増してしまうため、推定精度を落とさずに、その回数を減らす効率的な方法として、直交表実験が広く用いられてきた。これは技術的に応答曲面を推論し、その最適条件を探索するという、コンピュータ実験の簡便的なものである。その最適性は、次のように比較的単純な二つの場合に限定される。(i) 実験誤差など偶然変動が大きい場合：この場合、要因効果図や分散分析によって有意性を統計的に推論し、その最大値(最小値)を最適条件とすることは、それほど問題ではない。実実験における

偶然変動が大きい場合、高次のモデルのあてはめにはあまり意味がないため、Box流応答曲面解析で十分である。(ii) 応答と制御因子の関数関係が1次や2次モデルで近似できる場合：制御因子の水準幅が広くなければ、要因効果の非線形性や交互作用があまり存在しないため、1次式なら2水準系直交表、2次式なら3水準直交表を、または量的な制御因子を積極的に利用した最適計画を用いて応答曲面を近似することも、それほど問題ではない。本研究では、コンピュータ実験における大規模シミュレーションデータに対して、(1) 制約付き一様計画に基づき疎(スパース)な実験点を生成、(2) システムの挙動を予測するための近似モデルを構築、(3) ロバスト性を考慮した多特性最適化による最適化プロセスを体系化した。これら基礎研究と産業界をブリッジングすることで、製品の技術開発を加速することが期待される。

また産学官連携ネットワークを通じて産業界への普及を行い、これらの研究成果物として学部・大学院向け、技術者向けの単行本を出版した。

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 2 件)

[1] Toshihiko Kawamura and Hitoshi Motoyama (2016) Performance measure for asymmetric power loss functions, Communications in Statistics -Theory, Vol.45, No.5, 1260-1269. (査読あり)

[2] Toshihiko Kawamura and Hitoshi Motoyama (2015) A test of the equality of SN ratios on the inverse Gaussian Distribution, Journal of Japanese Society for Quality Control, Vol.45, No.1, 76-82. (査読あり)

〔図書〕(計 2 件)

[1] 河村敏彦、近代科学社、製品開発のための実験計画法-JMP による応答曲面法・コンピュータ実験-、2016、144.

[2] 河村敏彦、近代科学社、製品開発のための実験計画法 JMP による品質管理・品質工学、2015、222.

6. 研究組織

(1)研究代表者

河村 敏彦

(KAWAMURA TOSHIHIKO)

島根大学・医学部・准教授

研究者番号：70435494