

氏名（本籍）	栗山 嘉文（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 399 号
学位授与日付	平成 23 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	CFD シミュレータを用いた最適化手法に関する研究 (A study on an optimization method using CFD simulator)
学位論文審査委員	(主査) 教授 佐々木 実 (副査) 教授 野方 文雄 教授 山田 宏尚 教授 矢野 賢一 (三重大学)

### 論文内容の要旨

CFD シミュレータは、近年のコンピュータの演算能力の向上と低価格化により、様々な分野で設計・解析支援ツールとして広く利用されるようになり、一部の分野ではこのシミュレータを援用して性能向上を目的とした最適化計算（以下：CFD 最適化問題）へ利用するまでに至っている。しかし CFD 最適化問題には解探索に膨大な計算時間が必要な上、CFD シミュレータが形成する解空間は不安定であるため、多数の局所解が分布する多峰性解空間における最適化問題を解く必要がある。そこで本研究では CFD シミュレータを援用した最適化の設計・構築法を提案するとともに、少ない個体数でも良好な結果を得られる最適化アルゴリズムを構築する。

CFD シミュレータを援用した最適化として 6 自由度マニピュレータを用いた溢流抑制制御を行った。具体的には、スプーンに入った液体の挙動をシミュレータと一致させ、スプーンいっぱい満たされた液体を溢流させない搬送制御入力への導出を行った。結果、高速かつ溢流を抑制させた搬送を行うことが可能となった。ダイカストプランジャの最適速度入力の導出においては、その欠陥原因を流体解析シミュレータを用いて解析を行い、欠陥の原因の一つである空気巻き込み量を抑制するプランジャの最適速度入力を求めた。結果、実験を通して空気巻き込みの欠陥を低減させる最適速度入力を求めることが可能となった。一方で、これらの最適化においては多峰性解空間に対して有効である遺伝的アルゴリズム最適化手法を適用していた。

しかしながら CFD シミュレータを援用した場合、一度の解析に数分～数時間程度の計算時間が必要であったため、最適化を行う際には必然的にその個体数(探索点)を低減する必要があった。それに対して遺伝的アルゴリズムは多くの個体数が使えるという前提で設計されているため、少ない個体数で解を見つける場合は非常に局所解に陥り易く、最適解を見つけるまでに幾度かの試行を行う必要があった。特に、解を算出しても良好な結果を得ることができないという問題点があった。そこで遺伝的アルゴリズムを応用し、実験でも良好な結果を得られるような最適化手法として極値近傍探索アルゴリズムを構築した。得られた評価値から近似曲線を生成し、その近似曲線が形成した極値を判別することで良好な空間を予測できると考えた。ダイカストにおける射出速度最適化問題に極値近傍探索アルゴリズムを適用した結果、実験でも良好な結果を得ることが可能となった。

さらなる探索性能の向上をするため、これまでの個体生成および配置を確率的手法から制御則を応用した手法へと変える。CFD 最適化問題に対して収束性能に大きな差を生む要因として初期個体があげられる。研究ではその初期個体の配置をメルセンヌツイスター法の乱数を利用したランダムによる配置を行っていた。しかしながら、個体数が少ない場合で配置を行った場合、探索点が密もしくは疎となる箇所が発生し、結果的に探索領域に個体配置の偏りを生じさせてしまうことで、局所解に非常に陥りやすい状況を作ることとなる。一方で、良好な解空間を集中的に探索することが収束性能の向上に必要不可欠であることがわかっていて、そこで、多極へと探索点を集中させて探索することのできる最適化アルゴリズムを提案した。探索点を偏り無く配置させるための分散制御則として、被覆制御の考え方を応用し、探索点自身が移動して他の個体との間隔の調整を行うようにする。空間全体への探索点の分散後、探索点周辺に既に評価されている点がある場合、その評価を参照して、探索点同士の間隔を保ちつつ移動する法則を探索点に与える。これにより解の向上が見込まれる空間へと探索点を集中させることができ、収束性能の向上や局所解への陥りも抑制することが期待できる。

また実験でも良好な結果を得るためには、シミュレータの計算誤差などの影響を考慮し、大域的に安定となる解を見つける必要があった。しかしながら極値近傍探索アルゴリズムなど近似曲線を利用して探索する場合、設定する近似曲線の次数に大きく左右されてしまう。そこで大域的に安定な解を導出するアル

ゴリズムを構築することを目的として、クラスター分析を応用した探索点の密度で良好な空間を判断することのできるアルゴリズムを提案した。

本研究で提案した最適化アルゴリズムを用いることで実験でも良好な評価を得ることのできる解を効率良く求めることができると共に、ダイカストにおけるプランジャチップ形状の最適化や、ダイカスト以外の、例えば船舶の形状最適化など様々な設計最適化支援ツールとして用いられることが期待でき、生産準備段階におけるコストの削減や、設計期間の短縮などの効果が期待できる。

### 論文審査結果の要旨

本研究では CFD シミュレータを援用した最適化アルゴリズムの実用化を目的として、ダイカストにおける空気巻き込み低減を目指したプランジャ速度の最適化を中心とした、少ない計算回数かつ実験でも良好な結果を得られる解を算出することのできる最適化アルゴリズムの構築を行った。

第 2 章では CFD シミュレータを援用した最適化アルゴリズムとして、6 自由度マニピュレータを用いた溢流抑制制御とダイカストにおける射出速度の最適化について述べた。6 自由度マニピュレータを用いた溢流抑制制御では、CFD シミュレータを用いて液体の溢れを解析し、溢流や 6 自由度マニピュレータ等の制約をペナルティ項付きの最適化問題に定式化して、制約条件を満たしかつ高速な搬送を可能とする搬送速度の最適化を行った。その一方で、第 3 章のダイカストにおける射出速度の最適化では、CFD シミュレータを用いて欠陥原因の一つである空気巻き込み現象を解明、評価方法を構築し、高速かつ空気巻き込みを抑制する射出速度の最適化を行った。最適化アルゴリズムは遺伝的アルゴリズムを用いており、両者とも最適化により良好な結果を得ることができた。

しかしながらダイカストにおいては、最適化を行っても良好な結果を得られない場合があった。そこで大域的に数値が最小となるような解を算出するれば、実験でも良好な結果を得られるという考えに基づき、実験でも良好な結果を得られるような解の算出をすることの出来る最適化アルゴリズムの構築を目的として、第 4 章では極値近傍探索アルゴリズム(EDSA)を提案した。極値と近似曲線を利用して大域的に安定な評価を得ている空間を見つけ出すことで、実験でも良好な結果を得られる解の算出を行うことができた。また良好な解空間へ探索点を集中的に配置することで、結果的に収束性能が向上したことがわかった。

その一方で、近似曲線の次数の設定が収束性能や解の導出に影響を与えるため、他のプラントに適用する時など、多様性に欠ける。さらに、初期値が解の収束性能に大きく影響を及ぼすこと、そして解の向上が見られる空間に探索点を集中させることが収束性能の向上につながることから、第 5 章では分散制御則と集中アルゴリズムからなる多極集中型最適化アルゴリズム(MSSA)を構築した。これにより収束性能は大幅に向上するとともに、局所解への陥りも軽減することができ、良好な実験結果となった。

また実験でも良好な結果を得るために極値近傍探索アルゴリズム(EDSA)を提案し、近似曲線を用いて大域的に安定となる解の算出を行ったが、近似曲線を用いる場合、その次数を設定する必要がある、不用意な次数の設定は良好な結果を算出することが不可能となる。したがって大域的に安定な解を見つけるために近似曲線を用いるのは好ましくない。その一方で、良好な解空間には多数の探索点が集中していることから、第 6 章では密集度から大域的な最適解を導出する空間探索アルゴリズム(SSA)を提案した。多極集中型最適化アルゴリズム(MSSA)に適用した結果、良好な実験結果を得ることが可能となった。

最終的に、多極集中型最適化アルゴリズム(MSSA)と空間探索アルゴリズム(SSA)を複合させた最適化アルゴリズムがもっとも良好な手法であり、これを用いることで解を効率良く求め、さらに実験でも良好な評価を得ることができる(一般的な最適化問題に対する有効性の検証については付録 F に記載されている)。また、今回適用したダイカストだけではなく、重力铸造における傾動速度の最適化や船舶の形状最適化など様々な設計最適化支援ツールとして用いられることが期待でき、生産準備段階におけるコストの削減や、設計期間の短縮などの効果が期待できる。

### 最終試験結果の要旨

最終試験においては、博士論文の内容に従い発表が行われた。論文の内容は、これまで国際会議で 7 件講演発表を行い、学術論文誌に 3 件掲載されている。博士後期課程学生としての必要な単位も修得し、公聴会での質問事項にも適切な回答をしており、学位論文の授与に値するものであると考えられる。