特集

最適化の手法と適用

自動化・統合化・最適化ソフト「iSIGHT」 の最新の技術動向と事例紹介*

米 澤 智 志**

Latest Technology Trend and Case of Automation/Integration/Optimization Software
“iSIGHT”*

by YONEZAWA Satoshi**

キーワード 最適化, ロバスト設計, 多目的最適化, 自動化, 統合化, 遺伝的アルゴリズム,
満足化トレードオフ法

1. はじめに

近年, 設計の多くの分野で CAE (Computer Aided Engineering) の活用が一般的になっているが, 今日では CAE をさらに進めた CAO (Computer Aided Optimization) が用いられ, 実際の設計分野で成果を上げている。

米国エンジニアソフトウェア社の iSIGHT はその様な CAO ソフトウェアの代表的なものである。iSIGHT は, 設計プロセスに,

- (1) 自動化
- (2) 統合化
- (3) 最適化

の3つの環境を提供し, 著しい業務効率の改善を可能にする。さらに, 上記の自動化・統合化・最適化に加え, 最近注目されている

(4) パラッキを考慮したロバスト設計のための機能を提供しており, 設計現場で活用されている。

本稿では, 2章で自動化・統合化・最適化を中心に iSIGHT を, 3章で多目的最適化機能を, 4章で適用事例の1つを, 5章でまとめを, それぞれ示す。

2. iSIGHT

2.1 概要

iSIGHT は米国エンジニア・ソフトウェア社が開発・保守を行う自動化・統合化・最適化システムである。米国 GE (General Electric) 社の複合領域最適化システム構築プロジェクトであった Engineous プロジェクトに由来し, タービン設計など GE 社内の各種製品開発への適用

で高い実績を持つ。当時 GE のタービン設計部門では, 構造解析・熱解析・空力解析・疲労解析等の各解析分野にまたがる数十のソフトウェアが利用されており, それらの入力データ生成・実行・計算結果の収集等の作業に, 設計者は膨大な時間を費やしていた。iSIGHT は設計者の替わりとなって, これらの機械的作業を代行する「ソフトウェアロボット」という概念を実現するために開発された。iSIGHT によって, 設計者は解析実行と結果収集を iSIGHT に任せて結果の分析と利用に専念出来る, というより生産性の高い環境を得た。

現在の iSIGHT は, これに複合領域最適化, 信頼性最適化, タグチメソッド, DFSS (Design For Six Sigma) 等の機能を積み重ねる形で構成されている。

2.2 自動化・統合化

プログラム実行の「自動化」の目的は, 例えば解析実行を一連の所定のパラメータ組で実行する様な簡単な場合もあるが, より一般的には, 複数のプログラム間・解析領域間でデータの受け渡しと依存関係を伴う複合領域・マルチレベル問題がその最終形態であると考えられる (図1)。このシステムの構築を iSIGHT では「統合化」と呼んでいる。この自動化・統合化によって, 設計者は CAE を行う中での非生産的な単純作業から解放される。

図1 マルチレベル問題の一例

*原稿受付 平成16年1月20日
** エンジニア・ジャパン(株)

図1のイメージを iSIGHT の GUI 上で定義したものの一例が図2である。一連のプログラム実行の手順が階層的にフローチャートとして定義されることで、アプリケーションの実行順序、データの流れとその依存関係が iSIGHT によって自動的に定義される。GE のタービン設計の例では、200 以上の設計変数と数十の制約条件と解析プログラムが使用された。この事は、iSIGHT が大規模問題を十分に扱える能力を有している証明の一つと言える。

2.3 最適化

上記の自動化・統合化でアプリケーションを自動実行し、設計者の非生産的な単純作業が最も少ない状態で、設計案の検討・創出・最適化を行うのが、iSIGHT による設計最適化のプロセスである。

最適化では、非線形計画法や遺伝的アルゴリズム (GA) 等が手法として広く利用されている。これらは強力な道具であり iSIGHT でも多くのアルゴリズムを有している。しかし広範な工学問題を取り扱う為には、これらのみでは不十分な場合も存在する。そこで iSIGHT では、実験計画法や近似モデルを利用し、より効率的に解を探索する。

2.4 ロバスト最適設計

製造・使用過程では材料特性や環境条件などのバラツキが必ず存在し、最適設計で求めた性能は必ずしも実現できない。そこで、性能やコストの最適化とともに、誤差による性能のバラツキの最小化を追求するロバスト最適設計が、最近多くの分野で注目を集めている。これに対応するために、iSIGHT は信頼性解析法、タグチメソッド、DFSS (Design For Six Sigma)¹⁾の3つの手法を有している。

DFSS では性能のバラツキをシグマレベル (標準偏差シグマの大きさ) で評価し、シグマレベルが大きいほどロバストな設計となる。iSIGHT の DFSS は、

- 1) バラツキを持つ因子を確率変数として連続分布関数で表す。
- 2) 応答の平均値と分散の両方を目的関数と制約条件として扱う。
- 3) 目的関数と制約条件を陽に定式化する。

という特徴があるので、以下のことが同時に達成可能である。

- a) 目的とされる応答の平均値を最小または最大にする。

- る。
- b) 応答の標準偏差を最小にする
- c) 制約条件に対するシグマレベルを満足させる。

3. 最新技術：多目的最適化

3.1 概要

複数の目的関数を同時に検討する必要がある、かつそれらの内の2つ以上が互いに競合する関係にある場合、一般的にこれを多目的最適化 (Multiobjective Optimization) 問題と呼ぶ。多目的最適化においては、目的関数間の競合により、全ての目的関数が最適である唯一解 (完全最適解) は存在しない。そのため目的関数間のトレードオフ関係を求めることが主眼となる。このトレードオフの関係の最も基本となるものは、「ある目的関数の改善は、必ず残りの目的関数の最低一つ以上を犠牲にする」という基準で V. Pareto (1848-1923) により最初に提案された。現在でも Pareto 解集合、Pareto カーブ等と呼ばれる。

図3に2目的関数の多目的最適化問題での Pareto 解集合を示す。ここでは、2つの目的関数 *Obj 1* と *Obj 2* は共に最小化を目的としている。

Pareto 解集合を求めるには遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) が用いられる場合が多く、それを多目的 GA と呼ぶ。

一方、Pareto 解集合を全て求めず、パレート解集合上の幾つかの解を対話的に、ユーザの要求に基づいて探索を行う方法がある。満足化トレードオフ法はそのひとつである。パレート解集合全てを求めることを必要としないため、少ない計算量で、合理的にトレードオフ検討を進めることが出来るという利点を持つ。

3.2 多目的 GA (NCGA, NSGAI) と EDM (Engineering Data Mining)

GA は生物の進化過程を模した多点同時探索型最適化アルゴリズムであり、近年様々な工学問題に積極的に適用されている。遺伝的アルゴリズムは目的関数の扱い方によって単一目的 GA と多目的 GA に分類される。

多目的 GA は1980年代から数多くの手法が提案されており、iSIGHT に搭載される NCGA (Neighborhood Cultivated Genetic Algorithm) は同志社大 (三木・廣安研

図2 iSIGHT によるマルチレベル問題の設定

図3 パレート解集合

研究室) 渡邊らによって2002年に、NSGAII (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) はインド工科大 Prof. K.Deb, S.Agrawl らによって2000年に提案されたもっとも新しい多目的 GA である。多目的 GA の代表的な手法のリストを表1に示す。

多目的 GA に求められる能力として、1) 真のパレートフロントに出来るだけ近接する能力、2) パレートフロントを広範囲にカバーする能力、3) パレートフロント上で均一に分布する能力の三つが挙げられる。iSIGHT に搭載されている NCGA と NSGAII はこの3つの性能において90年代に提案された多目的 GA より優れた性能を持っていることが様々なテストによって明らかになっている。多峰性を有する Kur テスト関数を用いたパレート解集合探索結果を図4に示す。

多目的最適化による複数の最適解は、人間の知覚を超えた多次元空間に存在するため、その結果を解釈し、適切な意思決定を行うことが極めて困難である。複雑かつ大量の多次元解空間の中から、望ましい応答値の組み合わせに絞り込んでいくことを可能にするツールが必須といえる。そのために開発されたのが EDM (Engineering Data Mining) である。図5に EDM の GUI を示す。EDM は次のような機能を有している。

- (1) 設計変数間の関係を視覚的に表示：パラメータの

上下限の範囲内での位置、応答間でのトレードオフや相関性など

- (2) 各種ソート機能：任意の応答値に対するソート、スピンボタンによるランク順表示など
- (3) すべての応答値の組み合わせの散布図をサムネイル表示：

散布図のデータ分布形状を事前に確認し、評価すべき軸を持つ散布図を任意にボタン形式で選択・切り替え可能。また、メイングラフと散布図をダイナミックに連動可能。

- (4) フィルタ処理後のデータの保存。

3.3 満足化トレードオフ法 STA (Satisfying Trade-Off Analysis)

満足化トレードオフ法 (STA) は、甲南大学理工学部 中山弘隆教授により 1984年に提案された多目的最適化手法である。この手法の特徴はユーザがパレート解探索を対話的に行い、意思決定を積極的に進められることである。橋梁設計、光学設計、債権ポートフォリオ運用等に適用され成果を挙げている。

STA における最適化プロセスはユーザの要求値に対す

表1 多目的遺伝的アルゴリズムの歴史

	名称	提案者	特徴
2002	NCGA	S.Watanabe	SPEA2に近傍交を導入。更に性能の向上を図る。
2001	SPEA2	E.Zitzler	SPEAの改良版。適合度割り当ての方法やアーカイブの取り扱いが改良された。
2000	NSGA-II	K.Deb	NSGAの改良版。
1999	SPEA	E.Zitzler	エリート主義に基づくアーカイブ個体群を導入。
1994	NSGA	K.Deb	非優越ソートを導入することで、MOGAに対してパレートフロント探索能力の向上を図る。
1993	NPGA	J.Horn	バイナリトーナメント選択を導入。
1993	MOGA	C.M.Fonseca	パレート最適性の概念に基づいてパレート解探索を行う最初の多目的GA。
1993	WBGA	Hajira & Lin	重み係数を導入。各個体で異なる重みを保持することで、パレート解探索を行う。
1985	VEGA	J.D.Schaffer	GAを初めて多目的に拡張

図5 EDM の GUI

図6 STA による最適化のプロセル

図4 90年代と最新の多目的 GA のパレート解比較

図7 STA による2 目的最適化問題の探索例

図8 溶接継ぎ手の解析モデル

図9 最大応力に対する寄与度図

図10 最適化履歴

る最適解の計算を行う内側のループとそれを満足できる解を得るまで繰り返す外側のループに分かれる。図6に最適化プロセスを示す。

図7にSTAでの探索を2目的関数の問題について示す。理想値の設定、要求値の設定、パレート最適解探索を対話的に行うことによって、ユーザーが満足する解を求めている。

4. 適用事例：溶接継ぎ手のロバスト設計²⁾

4.1 解析モデル

図8に溶接継ぎ手の解析モデルを示す。この設計では質量最小化が目的で、最大応力に制約がある。

4.2 モンテカルロシミュレーションの検討結果

溶接モデルにおける各寸法値のバラツキの応力場に対する影響を検討するため、iSIGHTが有するモンテカルロシミュレーションの区分サンプリング手法を用いて100回のサンプリング計算を実施した。各寸法値の最大応力に対する寄与度を図9に示す。この結果から、余盛量のA9と脚長A7が最大応力に最も寄与することが分かった。

図11 最大応力の比較（初期設計とロバスト設定）

図12 最大応力の標準偏差の比較（初期設計とロバスト設計）

4.3 ロバスト最適設計の探索結果

継ぎ手の母材寸法A4とA5を設計変数とした場合のロバスト最適設計を実施した。今回は、ビートの寸法パラメータA6~A9を正規分布のバラツキを持つ変数とした。最大応力の制約条件は初期値の1180.5 MPaとし、シグマレベルを3σに設定した。ロバスト解の探索は応答近似曲面上で実施した。図10にその探索の履歴を示す。質量は初期設計での10.6 gから10.45 gに、最大応力は1180.5 MPaから1087.5 MPaに、それぞれ減少した。

図11に初期設計とロバスト最適設計の応力分布および拡大図を示す。ロバスト最適設計において応力集中の緩和が確認できる。

探索されたロバスト最適設計における最大応力のシグマレベルを、初期設計との比較で図12に示す。ロバスト最適設計解では、最大応力の平均値とバラツキの両方が初期設計より減少し、シグマレベルは初期設計の0.73σから2.7σに改善された。

5. まとめ

iSIGHTの基本機能とロバスト設計について示した。さらに、新しく強化された多目的最適化機能について紹介した。また、設計への適用事例として、溶接継ぎ手モデルでのロバスト設計を紹介し、その有効性を示した。

参考文献

- 1) Koch, "Probabilistic Design: Optimizing For Six Sigma Quality", AIAA-2002-1471, 2002
- 2) 許他, 設計・開発プロセスにおける最適化設計とロバスト設計, JSME 第15回計算力学講演会, 2002