

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330274

研究課題名(和文) 知能情報処理技術を融合した自動車乗員保護システム設計手法の開発

研究課題名(英文) Development of Vehicle Occupant Restraint System Design Method integrating Intelligent Information Processing Technologies

研究代表者

堀井 宏祐 (HORII, Hirosuke)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号：00447715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：種々の知能情報処理技術を融合し、自動車乗員保護システム設計に適用することによって、設計者に有用な設計情報を提示できるシステムを構築した。進化的多目的最適化の評価計算を機械学習を用いて構築した高精度な応答曲面モデルで代替し、大域的かつ多峰性の強い設計空間内での解候補群の高速な探索をおこない、得られた非劣解集合を分析することによって、安全性能のトレードオフ関係や設計変数との相互作用・相関関係の可視化を実現した。また、多目的ロバスト設計最適化によって、不確実性の想定される設計変数に確率的揺動を与え、解の安全性と安定性を同時に提示し、設計者が解の安定性を考慮して解を選択できるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This research constructed a system indicating valuable design information for design engineers at vehicle occupant restraint system design by integrating and applying various intelligent information processing techniques. Accurate response surface models of objective functions were constructed by machine learning method. Then, design candidates in large-scale and multi-modal design space were explored fast by evolutionary multi-objective optimization with the response surface model. Trade-off relationship, interaction and correlation among objective functions and design variables were visualized and valuable design information was obtained by analyzing non-dominated solutions. Furthermore, a system indicating optimality and stability under uncertainty of perturbation of design variables simultaneously by using multi-objective robust design optimization was constructed. The system provides an environment for design engineers who need to consider optimality and stability simultaneously.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：遺伝的アルゴリズム 多目的最適化 機械学習 ロバスト設計 衝突安全設計

### 1. 研究開始当初の背景

自動車乗員保護システム設計はエアバッグ、シートベルト等の動作制御、シート等の車内機器設計、乗員の体格、姿勢、衝突条件等の多くの設計変数の複合的な相互作用を考慮する必要があり、設計空間は大域かつ多峰性が強い。また、頭部、胸部等の人体各部の安全性向上にはトレードオフの関係があり、バランス良く安全性を向上させるには、パレート最適性に基づいた設計が求められる。しかし、現在の乗員保護システム設計において、実機試作コストはもとより、計算機シミュレーションによる仮想試作においても時間的な計算コストが高いため、基本デザインの周辺、または設計変数を絞り込んだ局所的な単目的探索が一般に用いられている。

研究代表者は進化的多目的最適化によって、トレードオフを考慮した大域的探索を実現しているが、繰返し計算による計算コストが高い点が課題として残されている。また、計算コストを低減させる方法として、少数のサンプル計算を元に近似モデルを構築し、実計算を代替する手法が提案されているが、提案手法では設計変数を少数に限定し、狭い探索空間の近似にとどまっている。衝突応答は非線形性、多峰性が強いいため、設計変数、評価指標が多い実際の設計開発に適用するには課題が多い。

### 2. 研究の目的

本研究では自動車乗員保護システム設計に対して、知能情報処理技術を融合し、適用することによって、大域かつ多峰性の強い設計空間の中でのパレート最適性に基づく解候補群(非劣解集合)の高速な探索、複数の安全指標のトレードオフ関係や設計変数との相互作用・相関関係の可視化を実現し、設計者を支援する設計手法を確立することを目的とする。

目的を達成するために解決しなければならない課題を以下の3点に分類し、それぞれに有効な知能情報処理技術により解決し、さらに相互の特長を融合することで画期的な設計手法を確立する。

- (1) 進化的多目的最適化手法を用いた大域かつ多峰性の強い設計空間の効率的な探索
- (2) 機械学習を用いた高精度な応答曲面モデルの構築による適合度評価に要する計算コストの低減
- (3) 非劣解集合の分析による多設計変数・多目的関数間の相互作用・相関関係の多次元情報可視化

### 3. 研究の方法

前述した3点の課題を下記の方法により解決し、相互の特長を融合することで、設計者を支援する設計手法を確立する。

- (1) 進化的多目的最適化手法を用いた大域かつ多峰性の強い設計空間の効率的な探索：

実問題の大域的探索能力に優れている進化的多目的最適化手法の1つである、領域適応型多目的遺伝的アルゴリズム (ARMOGA) を用いることで、大域かつ多峰性の強い衝突解析問題である、自動車乗員保護システム設計の効率的な探索を実現する。

- (2) 機械学習を用いた高精度な応答曲面モデルの構築による適合度評価に要する計算コストの低減：

少数の実計算サンプルを基に機械学習を用いて高精度な応答曲面モデルを構築する。適用する機械学習アルゴリズムや取得サンプル数などによる応答曲面モデルの近似精度を評価し、高精度な応答曲面モデルで適合度評価を代替することにより、計算コストを低減する。

- (3) 非劣解集合の分析による多設計変数・多目的関数間の相互作用・相関関係の多次元情報可視化：

多くの設計変数・目的関数の相互作用や相関関係の理解：最適化の過程で得た非劣解集合を分析し、得られた多次元情報を可視化することで解決する。これにより衝突現象を定性的に理解し、相関性の強い変数を統合することで次元削減により探索空間を縮小することができる。

### 4. 研究成果

本研究では自動車乗員保護システム設計問題として、フルラップ前面衝突試験を対象に、乗員とその周囲のシートやステアリングなどの自動車装備、およびエアバッグ、シートベルトなどの乗員保護装置をモデル化し、衝突時の乗員挙動の解析モデルを構築した。構築した乗員挙動解析モデルを図1に示す。

この乗員挙動解析モデルを用いて自動車アセスメント(JNCAP)に基づく安全指標を算出し、「応答曲面モデルを利用した進化的計算法による自動車乗員保護システムの多目的最適化」「多目的ロバスト設計最適化による不確実状況下における自動車乗員保護システム設計」をおこなった。

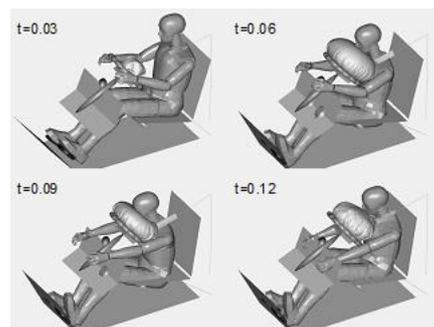


Figure 1: Occupant behavior model

- (1) 応答曲面モデルを利用した進化的計算法による自動車乗員保護システムの多目的最適化

機械学習を用いて高精度な応答曲面モデルを構築し、進化的多目的最適化における適合度評価を代替することによって、大域的かつ多峰性の強い設計空間の高速・効率的な探索を実現した。また、得られた非劣解集合を分析することによって、多設計変数・多目的関数間の相互作用・相関関係を明らかにした。

- ① 機械学習を用いた高精度な応答曲面モデルの構築

フルラップ前面衝突試験における乗員とその周囲の自動車装備、乗員安全装置をモデル化し、衝突時の乗員挙動解析モデルを構築した。解析モデルのエアバッグ、シートベルト、ニーボルスタの設計パラメータ 6 変数を設計変数(入力変数)とした。設計変数の一覧を表 1 に示す。

Table 1: Design variables

	Variable
Airbag:	Time to fire (sec.)
	Mass flow rate
	Vent hole factor
Seatbelt:	Time to fire (sec.)
	Load limit (N)
Knee bolster:	Stiffness factor

また、JNCAP における 3 種の安全指標、「頭部傷害基準値(Head injury criterion, HIC)」「胸部合成加速度(Chest resultant acceleration, ChestG)」「大腿部荷重(Femur fracture load, FL)」を出力変数とした。

入出力変数の訓練データセットを 100, 200, 300, 400 組として、機械学習の 1 種であるガウシアンプロセスを用いて応答曲面モデルを構築し、評価データセット 100 組で近似精度を評価し、最も精度の高かった訓練データセット 300 組の応答曲面モデルを以後の最適化計算で利用することとした。応答曲面モデル(RSM)の精度評価結果を図 2 に示す。

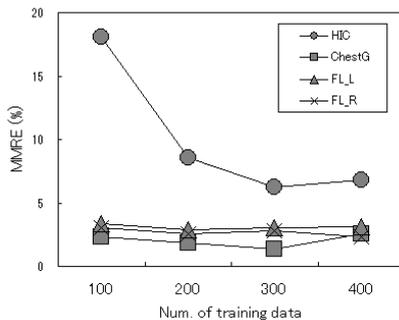


Figure 2: Accuracy of RSM

- ② 応答曲面モデルを用いた進化的多目的最適化と非劣解集合の分析  
実問題の大域的探索能力に優れている進

化的多目的最適化手法の 1 つである、領域適応型多目的遺伝的アルゴリズム (ARMOGA) を用いて、適合度計算に前項で構築した応答曲面モデルを用いることで、大域的かつ多峰性の強い設計空間の高速・効率的な探索を実現した。

JNCAP における 3 種の安全指標のうち、生命に重篤な影響を及ぼす頭部傷害基準値と胸部合成加速度を目的関数、左右の大腿部荷重を拘束条件として、2 目的最小化問題として、個体数 40, 探索世代数 50, 試行回数 10 回の最適化をおこない、総計 20,000 回の解探索で 157 組の非劣解集合を得た。得られた非劣解集合を図 3 に示す。この結果から頭部と胸部の安全性がトレードオフ関係にあることが確認できる。

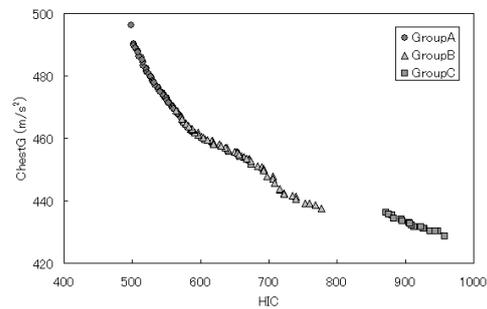


Figure 3: Non-dominated solutions on Pareto optimal front

頭部と胸部の安全性のトレードオフ関係を制御する設計変数を明らかにするために、非劣解集合を A, B, C の 3 つのグループにクラスタリングし、グループごとに目的関数と設計変数間の相互作用・相関関係を分析した。一例として頭部傷害基準値と設計変数間での相関係数を表 2 に示す。また、図 4~9 に頭部傷害基準値(HIC)と各設計変数の関係をプロットした図を示す。

Table 2: Correlation coefficients among HIC and Design Variables

	Group A	Group B	Group C
AB_TTF	-0.80	0.20	0.08
AB_MFR	-0.82	-0.99	-0.39
AB_VHF	0.90	-0.02	-0.25
SB_TTF	0.77	0.75	0.99
SB_LL	-0.92	-0.23	0.32
KB_SF	0.86	0.40	-0.05

これらの結果から、頭部傷害基準値はグループ A の領域では全ての設計変数と強い相関性を持ち、頭部と胸部の安全性のトレードオフの制御には各設計変数の複雑な組み合わせが必要とされることが明らかとなった。一方でグループ B と C の領域では特定の設計変数を制御することでトレードオフを制御することが明らかとなった。グループ B ではエアバッグの質量流量(AB\_MFR)とシートベ

ルートの動作タイミング(SB\_TTF)の制御, グループ C ではシートベルトの動作タイミング(SB\_TTF)のみで頭部と胸部の安全性のトレードオフを制御できることが明らかとなった.

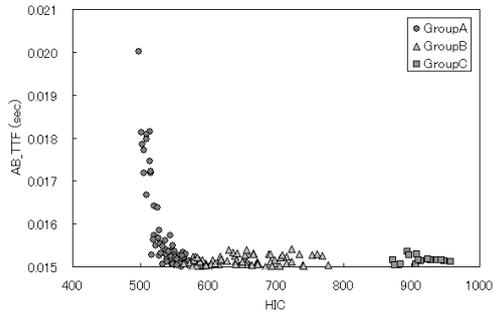


Figure 4: Correlation between HIC and time to fire of airbag (AB\_TTF)

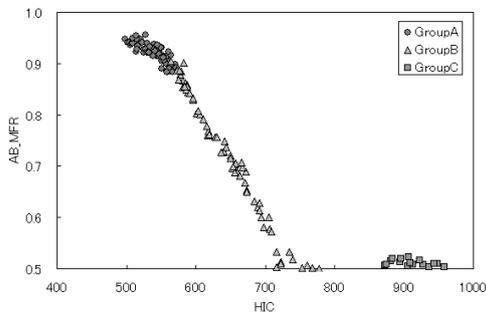


Figure 5: Correlation between HIC and mass flow rate of airbag (AB\_MFR)

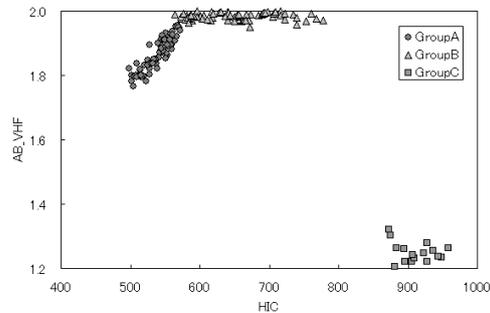


Figure 6: Correlation between HIC and vent hole factor of airbag (AB\_VHF)

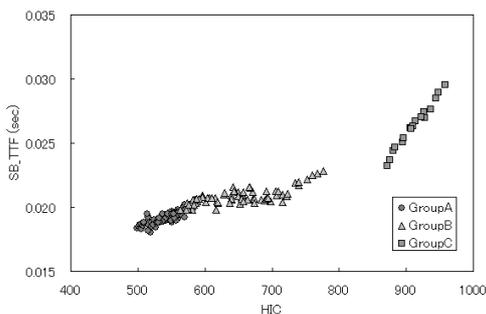


Figure 7: Correlation between HIC and time to fire of seatbelt (SB\_TTF)

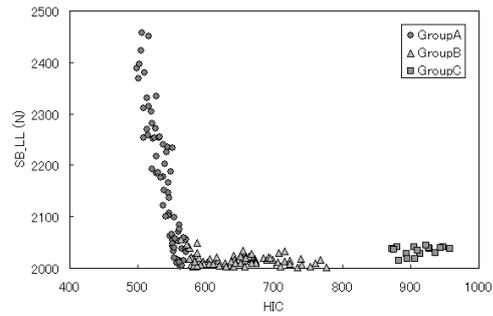


Figure 8: Correlation between HIC and load limit of seatbelt (SB\_LL)

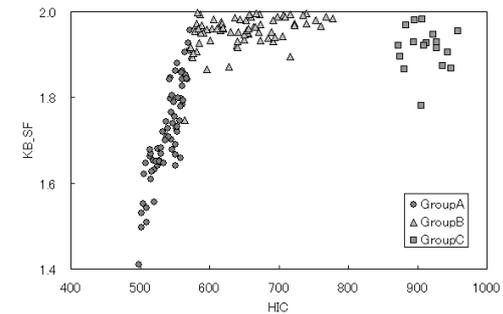


Figure 9: Correlation between HIC and stiffness factor of knee bolster (KB\_SF)

(2) 多目的ロバスト設計最適化による不確定状況下における自動車乗員保護システム設計

前節で明らかとなったように自動車乗員保護システムの安全性能はエアバッグやシートベルトなどの乗員保護装置の相互作用に影響される。さらに衝突速度や乗員の姿勢などの事故状況にも影響される。したがって、最適設計においてもある一点の最適性を評価するだけでなく、様々な状況下での安定した性能(ロバスト性)を評価することが求められる。

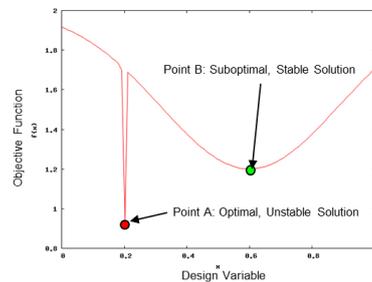


Figure 10: Conceptual diagram of stability of design

図 10 に設計の安定性についての概念図を示す。最小化問題においてある設計変数の安定性が高い場合、目的関数が最小値を取るポイント A が適していると考えられる。一方、設計変数が大きく揺動する場合、ポイント B が次善の解として適していると考えられる。

しかし、どちらか一方の解を探索するのではなく、解候補群の最適性と安定性の両者を提示し、設計者がバランスを考慮して選択できることが求められる。

本節では多目的ロバスト設計最適化(MORDO)によって、自動車乗員保護システム設計における安全性能の安定性を考慮した最適化をおこない、設計者にその結果を提示するシステムを構築した結果を記す。

Table 3: Summary of objective functions and constraints

	Name
Minimize:	Mean of HIC, $\mu(HIC)$
	Mean of T3MS, $\mu(T3MS)$
	Std. Dev. of HIC, $\sigma(HIC)$
	Std. Dev. of T3MS, $\sigma(T3MS)$
Subject to:	$\mu(HIC) + 3\sigma(HIC) \leq 1000$
	$\mu(T3MS) + 3\sigma(T3MS) \leq 588$
	$FL\_L \leq 1000$
	$FL\_R \leq 1000$

Table 4: Summary of robust setting

Robust setting	
Robust Parameter	AB_TTF
	Belt_Preten_TTF
Probabilistic distribution	Normal distribution
Std. Dev. of perturbation	$\sigma = 5.0 \times 10^{-4} sec.$
Number of sampling	100

多目的ロバスト設計最適化では、解の評価を一点でおこなうのではなく、モンテカルロ・シミュレーションによって、不確実性の想定される設計変数に確率的揺動を与え、目的関数値の平均値と標準偏差を評価関数として扱う。一点の評価に多数のサンプル計算を要するため、計算コストが高いが、実計算を応答曲面モデルによる近似計算に代替することで計算コストの問題を解決した。

前節と同じフルラップ前面衝突試験において、乗員保護装置の6設計変数を入力変数として、不確実性の高い設計変数である、エアバッグとシートベルトの動作タイミング(AB\_TTF, SB\_TTF)に確率的揺動を与える。サンプル数100ケースとして、頭部傷害基準値(HIC)と胸部合成加速度(T3MS)の平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を目的関数、平均値の $+3\sigma$ ( $\mu + 3\sigma$ )と大腿部荷重が法規制値以下となることを拘束条件とする4目的最小化問題として、領域適応型多目的遺伝的アルゴリズム(ARMOGA)を用いて、個体数40、探索世代数50の最適化をおこなった。1回の最適化計算

で評価計算回数は総計200,000回となる。目的関数と拘束条件を表3に、ロバスト設定を表4に示す。また、全ての探索解を図11に、得られた非劣解集合を図12に示す。

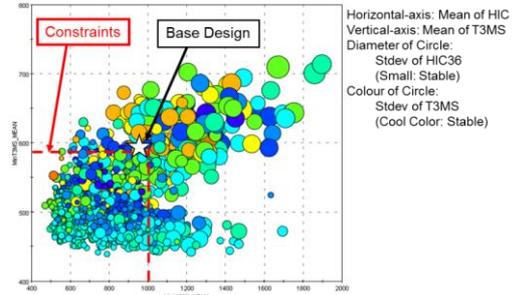


Figure 11: All design candidates explored and evaluated by MORDO

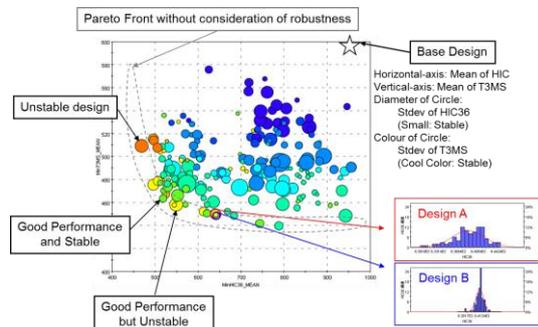


Figure 12: Non-dominated solutions extracted from all design candidates

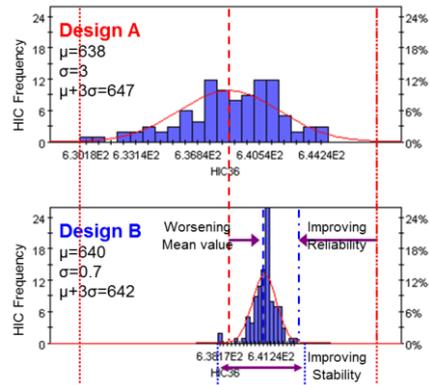


Figure 13: Frequency distribution of Monte Carlo sampling of HIC

図11、図12では横軸に頭部傷害基準値の平均値、縦軸に胸部合成加速度の平均値、円の直径で頭部傷害基準値の標準偏差(小円が安定)、色で胸部合成加速度の標準偏差(寒色が安定)を示している。また、典型的な例として、図12において、安全性能が似通った2点、デザインAとデザインBに着目し、それぞれの頭部傷害基準値の頻度分布を図13に示す。

デザインAの頭部傷害基準値がわずかにデザインBよりも安全性能が高いが、安定性はデザインBが優れていることが確認できる。この結果から、設計者はわずかな安全性の低下を許容することで安定性の高い解を選択

できることが解る。

以上のように安全性と安定性を同時に提示し、設計者が解の安定性を考慮して意思決定をおこなうことができるシステムを構築することができた。

## 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. Hirosuke Horii, Vehicle Occupant Restraint System Design under Uncertainty by Using Multi-objective Robust Design Optimization, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, Vol. 6, No. 4, pp. 827-834 (2018)  
DOI: 10.2495/CMEM-V6-N4-827-834  
(査読有)
2. Hirosuke Horii, Multi-objective Optimization of Vehicle Occupant Restraint System by Using Evolutionary Algorithm with Response Surface Model, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, Vol. 5, No. 2, pp. 163-170 (2017)  
DOI: 10.2495/CMEM-V5-N2-163-170  
(査読有)

[学会発表] (計2件)

1. Hirosuke Horii, Vehicle Occupant Restraint System Design under Uncertainty by Using Multi-objective Robust Design Optimization, 18th International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements, 2017/7/4 (Alicante, Spain)
2. Hirosuke Horii, Multi-objective Optimization of Vehicle Occupant Restraint System by Using Evolutionary Algorithm with Response Surface Model, The 2016 International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials, 2016/9/19 (Siena, Italy)

[その他]

<http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033642/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀井 宏祐 (HORII, Hirosuke)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号 : 00447715