

進化的多目的最適化による自動車乗員保護システム設計

堀井 宏祐[†], 大谷 朝彦^{††}, 野間 宏平[‡]

[†] 山梨大学工学部機械システム工学科

^{††} 株式会社シーディー・アダプコ・ジャパン

[‡] TNO-Automotive ジャパン株式会社

本研究ではパラメトリックな前面衝突時の乗員挙動解析モデルをマルチボディ解析手法を用いて構築し、頭部、胸部の傷害指標を目的関数とする進化的多目的最適化を行った。その結果、得られたパレート解からトレードオフ情報や設計変数との相関関係を分析し、設計変数の安全性に対する定性的な傾向を把握することができ、自動車乗員保護システム設計に対する進化的多目的最適化の有効性を確認した。また、単目的最適化の結果と比較し、多目的最適化の優位性を検証した。

Vehicle Occupant Protection System Design by Using Evolutionary Multi-objective Optimization

Hirosuke Horii[†], Asahiko Otani^{††}, and Kohei Noma[‡]

[†] Dept. of Mechanical Systems Engineering, University of Yamanashi

^{††} CD-adapco JAPAN Co., LTD.

[‡] TNO-Automotive Japan K.K.

In this paper, a parametric model of the behavior of the occupant at a vehicle frontal crash was constructed by using multi-body dynamics simulation. Then an evolutionary multi-objective optimization for reducing injury criteria of head and chest was done. The results were that 1) qualitative trend was understood by analyzing the trade-off information and the correlation among the objective functions and the design variables, and 2) the advantage of the multi-objective optimization was validated by comparing to a result of a single-objective optimization.

1 はじめに

前面衝突時の乗員の運動エネルギーの大部分は頭部とエアバッグ、胸部とシートベルト、下肢部とニーボルスタの接触により消費され、頭部を過剰に保護しようとするとう胸部の安全性が低下してしまう等、人体各部の安全性にはトレードオフの関係があり、衝突安全性能の全体最適のためには、各部でバランス良く運動エネルギーを消費させる必要がある。

進化的多目的最適化の利点として、多峰性関数最適化に適している点、得られたパレート解からトレードオフ情報や設計変数との相関関係が分析できる点が挙げられる。このことから進化的多目的最適化を適用することによって、衝突安全性能に対する有用な情報を得ることができると考えられる。そこで本研究ではマルチボディ解析によって構築したパラメトリックな衝突解析モデルを用いて、自動車乗員保護システム設計の進化的多目

的最適化を行い、その有効性を検証する。

2 衝突解析モデル構築

自動車乗員保護システムの性能を評価するために、マルチボディ解析を用いて図1に示す前面衝突時の乗員挙動解析モデルを構築した。以下に、構築した前面衝突解析モデルの構成と乗員保護性能の評価指標について述べる。

日本の保安基準で定められているフルラップ前面衝突試験を想定した解析モデルを構築した。解析モデルは前面衝突用ダミー人形の Hybrid-III ダミーのマルチボディモデルを中心に、シート、ステアリング等の乗員回りの機材と、エアバッグ、シートベルトの乗員保護装置によって構成され、フルラップ前面衝突時の加速度の時間波形を解析モデルに与えることで衝突後、0.12秒間の乗員挙動をシミュレートする。

第1章で述べたように、人体各部の安全性には

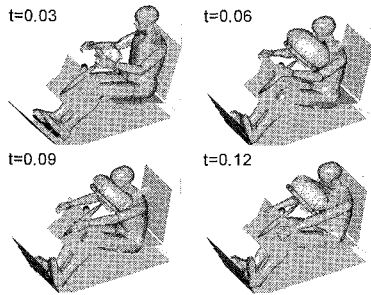


図 1: 前面衝突解析モデル

トレードオフの関係があり、衝突安全性能の全体最適のためには、各部でバランス良く運動エネルギーを消費させる必要がある。そこで本研究では頭部、胸部の安全性に強く影響を及ぼすエアバッグとシートベルトの動作を制御する5つの変数を設計変数とする。設計変数を表1に示す。

エアバッグでは、衝突検知の AB_TTF 秒後にインフレータのガス発生剤が着火され、発生したガスがエアバッグを展開する。通常、ガスの発生後、エアバッグが展開を完了するまでの時間は約0.04-0.05秒であり、発生ガスの質量流量 AB_MFR で展開速度を制御する。エアバッグ展開後、乗員頭部がエアバッグと接触し、エアバッグに設置されたベントホールからエアバッグ内のガスを放出することで、乗員の運動エネルギーが消費される。ベントホール径の設定係数 AB_VHF でガスの放出効率を制御する。

シートベルトではプリテンション機構とロードリミット機構をモデル化している。プリテンションは衝突時にシートベルトを引き込むことで乗員をシートに固定し、シートベルトの効果を高める機構であり、衝突検知の SB_Preten_TTF 秒後に作動する。ロードリミットはシートベルトに規定の荷重が掛かった後、規定荷重を保ちながらシートベルトを繰り出すことで胸部への衝撃を緩和する機構であり、規定荷重を $SB_LL(N)$ で制御する。

日本の保安基準では「前面衝突時の乗員保護の技術基準」において下記の判定基準が定められている。

- 頭部傷害基準値 ≤ 1000
- 胸部合成加速度 $\leq 588\text{m/s}^2(60\text{G})$

頭部傷害基準値 (Head Injury Criterion, HIC) は頭部傷害の程度を示す指数であり、衝突時の頭部加速度の時間波形 $a(t)$ を用いて次式で算出される。

表 2: ARMOGA のパラメータ設定

Generic Parameters	
Population Size	40
Num. of Generation	50
Crossover	BLX-0.5
Crossover Rate	1.0
Mutation Rate	0.1
Range Adaptation Operation	
Starting Generation	20
AR Interval	5

$$HIC = \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right]_{\max} \quad (1)$$

ただし $t_2 - t_1 \leq 0.036\text{sec}$.

また、胸部合成加速度 ($ChestG$) は胸部重心位置に取り付けられた3軸加速度計によって得られた計測値により算出される。

本研究では HIC と $ChestG$ の2つを目的関数とした多目的最適化を行う。

3 進化的多目的最適化による自動車乗員保護システム設計

本章では進化的多目的最適化手法の自動車乗員保護システム設計に対する有効性を検証する。本研究では進化的多目的最適化手法として領域適応型多目的GA (Adaptive Range Multi-objective Genetic Algorithms, ARMOGA)³⁾を適用した。ARMOGAは解探索領域を一定の世代数ごとに適応的に変化させる。通常の世代においては一般的な遺伝的オペレータを適用し、領域適応世代において、それまでに得られたアーカイブ集団における各設計変数の平均と分散を計算し、その分布に適応した領域内に探索集団を再初期化することで効率的な探索を実現している。

ARMOGAによって初期集団を変えて10試行の最適化を行った。ARMOGAのパラメータ設定を表2に示す。10試行で計20400個体の評価を行い、計1050個体のパレート解を得た。

10試行全体の中でのパレート解は199個体であった。この199個体から目的関数のトレードオフ情報および設計変数との相関を分析する。パレート解の設計変数の頻度分布を図2に示す。

AB_TTF , AB_VHF , SB_LL は定義域の上限、または下限に収束しており、これらの設計変数については最適値が存在することが判った。

また、 AB_MFR は0.65~1.1の領域に分布していることと、 SB_Preten_TTF は定義域全域に分

表 1: 設計変数

Variable		Range and Name	Base Design
Air Bag:	Time to Fire (sec.)	$0.015 \leq AB_TTF \leq 0.035$	0.02
	Mass Flow Rate	$0.5 \leq AB_MFR \leq 2.0$	1.0
	Vent Hole Factor	$0.5 \leq AB_VHF \leq 2.0$	1.0
Seat Belt:	Time to Fire (sec.)	$0.01 \leq SB_Preten_TTF \leq 0.03$	0.02
	Load Limit (N)	$2000 \leq SB_LL \leq 6000$	4000

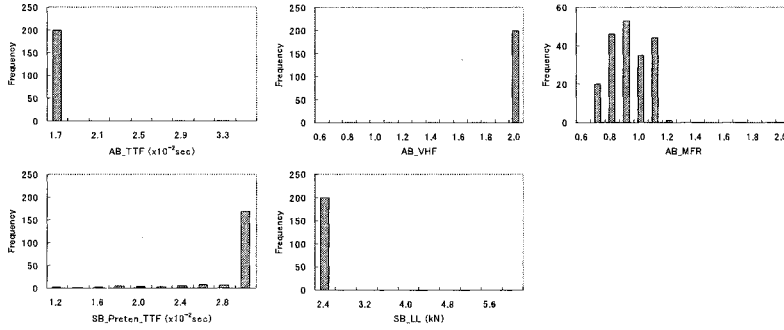


図 2: パレート解を構成する設計変数の頻度分布

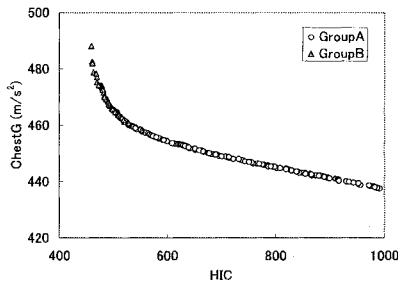


図 3: 10 試行全体の中でのパレート解

布しているが、0.029 秒以上に多数集中していることが確認できる。ここで SB_Preten_TTF が 0.029 秒以上のパレート解をグループ A、0.029 秒未満のパレート解をグループ B として、各グループでの設計変数と目的関数との相関関係を分析する。グループ A は 158 個体、グループ B は 41 個体となった。図 3 にグループ分けしたパレート解を、図 4 に設計変数と目的関数との関係を図示する。

グループ A では、 SB_Preten_TTF は上限に収束している。 AB_MFR については、定義域が 0.5 ~ 2.0 であるのに対して、パレート解は 0.65 ~ 1.0 の領域に分布しており、 AB_MFR と HIC との相関係数が -0.98 、 $ChestG$ との相関係数が 1.00 と

高い相関を示していることが確認できた。この結果からガスの質量流量を 0.65 ~ 1.0 の範囲で制御することで、グループ A のパレート解が存在する範囲において、頭部と胸部の傷害危険性のトレードオフを制御できることが判る。また、パレート解の AB_MFR が定義域の一部に分布していることから、ARMOGA の領域適応機構が有効に機能していると考えられる。

グループ B では、 AB_MFR は 1.0 ~ 1.1 の範囲に集中している。 SB_Preten_TTF については、0.01 ~ 0.029 秒の広い範囲に分布しており、 AB_MFR と HIC との相関係数が 0.87、 $ChestG$ との相関係数が -0.96 と高い相関を示していることが確認できた。プリテンショナーの作動タイミングを 0.01 ~ 0.029 秒の範囲で制御することで、グループ B のパレート解が存在する範囲において、頭部と胸部の傷害危険性のトレードオフを制御できることが判る。

以上のことから、パレート解を分析することで設計変数をトレードオフを制御するものと、最適値を持つものに分類することができ、自動車乗員保護システム設計に対して進化的多目的最適化が有用な設計情報を提供できることが確認された。

次に US-NCAP で用いられている交通事故傷害者の複合傷害発生確率 P_{comb} を最小化する目的関数として単目的最適化を行い、多目的最適化との比

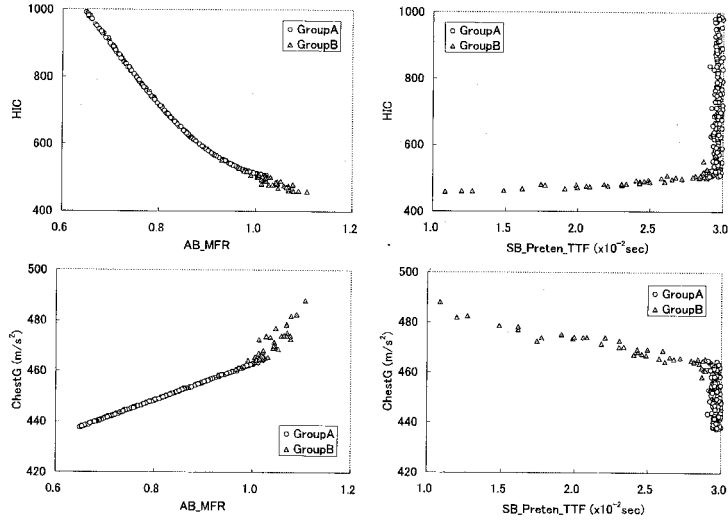


図 4: AB_MFR , SB_Preten_TTF と HIC , $ChestG$ との関係

表 3: 多目的最適化と単目的最適化の P_{comb} の比較

	Multi-Obj.	Single-Obj.
Best	0.1278	0.1277
Average	0.1280	0.1287
Worst	0.1283	0.1301
Stdev ($\times 10^{-4}$)	1.46	7.06

較を行う。単目的最適化は ARMOGA で目的関数を 1 つに設定することで実現している。この場合、ARMOGA は実数値型領域適応型 GA (Real-coded ARG) ²⁾ と同様に機能する。表 2 の ARMOGA と同じパラメータ設定として、初期集団を変えて 10 試行の最適化を行った。

ARMOGA の目的関数を P_{comb} に換算し、多目的最適化と単目的最適化の解探索能力を比較する。各 10 試行で得られた解の比較を表 3 に示す。今回の問題では多目的最適化は単目的最適化と比較して、最良値は同程度の解が得られた。一方で平均値、最悪値、分散は優れており、多目的最適化が安定した解探索能力を有していることが確認できた。

4 おわりに

本研究では、マルチボディ解析手法によって自動車の前面衝突時の乗員挙動解析モデルを構築し、乗員保護システム設計を行った。得られた結果を以下に示す。

- 進化的多目的最適化によって得られたパレ-

ト解から、頭部と胸部の安全性のトレードオフ情報を把握することができた。

- パレト解を分析した結果、設計変数をトレードオフを制御するものと、最適値を持つものに分類することができた。
- 単目的最適化と比較して同程度の解を安定して得ており、多目的最適化が安定した解探索能力を有していることが確認できた。

参考文献

- 1) Fu, Y., Yang, R.J., Yeh, I.: A Genetic Algorithm for Optimal Design of an Inflatable Knee Bolster, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, No. 3-4, pp. 264-271 (2004).
- 2) Oyama, A. and Obayashi, S.: Real-Coded Adaptive Range Genetic Algorithm and Its Application to Aerodynamic Design, *JSME International Journal Series A*, Vol. 43, No. 2, pp. 124-129 (2000).
- 3) Sasaki, D. and Obayashi, S.: Efficient Search for Trade-Offs by Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms, *AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, pp. 44-64 (2005).