

K6-17

操舵応答の確率的ロバスト性を考慮した車両操縦安定性の多目的最適化と最適解の特性

Multi-Objective Optimization of Road Vehicle Handling Performance

Considering Stochastic Robustness on Steering Response and the Property of the Optimal Solutions

○山田大貴¹, 堀内伸一郎²*Hiroki Yamada¹, Shinichiro Horiuchi²

Abstract: This paper examines the property of the Pareto solutions that are obtained based on the desktop analytical design process of vehicle handling performance proposed by the authors. From the analysis on the correlation between objective functions of the optimal solutions, it is found that initial yaw acceleration has a trade-off relationship to other objective functions such as yaw rate phase at 1Hz, yaw rate overshoot, and TB factor. Also, it is confirmed that the design purpose of achieving a good handling performance with minimum tire force is accomplished in the optimal solutions. Finally, the importance of considering the robustness of vehicle handling performance in the optimization process is clarified.

1. 緒言

従来の自動車開発において、操縦安定性の客観的な設計指針は確立されておらず、操縦安定性はドライバによる実験を通して設計されてきた。しかし、この手法は多大な時間や費用を要するため、開発初期において操縦安定性に対する机上解析手法が望まれている。

Miano ら^[1]のは、多目的最適化を適用することで高い操縦安定性を実現する最適な前後輪コーナリングステイフネスを決定した。この研究では操縦安定性に関するドライバの主観的評価を陽には考慮していない。

そこで本研究では、ドライバの主観的な操縦性^[2]に関する確率的ロバスト性を考慮した操縦安定性の多目的最適化手法を提案し、その有効性を検討する。

2. 解析モデル

2.1 車両モデル

本研究では、並進およびヨー回転運動を考慮する線形二輪車モデルを用い、運動方程式は

$$\dot{\beta} = -\frac{2(K_f + K_r)\beta}{mV} - \left\{ 1 + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{mV^2} \right\} r + \frac{2K_f \delta}{mV} \quad (1)$$

$$\dot{r} = -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)\beta}{I} - \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)r}{IV} + \frac{2l_f K_f \delta}{I} \quad (2)$$

となる。ここで、 β は車体横すべり角[rad]、 r はヨーレート[rad/s]、 δ は前輪実舵角[rad]、 V は走行速度[m/s]、 K_f と K_r は前後輪コーナリングステイフネス[N/rad]である。その他の車両諸元は Table 1 に示す。

Table 1. Vehicle data

| Definition | Value | Unit |
|--|-----------|---------------------|
| Vehicle mass : m | 1299 | kg |
| Yaw moment of inertia : I | 1627 | kg · m ² |
| Vehicle speed : V | 22.3 (50) | m/s (mph) |
| Distances to C.G. from front axle : l_f | 1.00 | m |
| Distances to C.G. from rear axle : l_r | 1.45 | m |
| Steering gear ratio : δ_{SV}/δ | 15 | - |

2.2 評価関数

本研究では必要なタイヤ力を最小限に抑制しつつ高い操縦安定性を提供することを設計目標とする。そこで、以下の評価関数（ステップ操舵に対する初期ヨー角加速度 f_1 、ヨーレート位相@1Hz f_2 、ヨーレートオーバーシュート量 f_3 、TB ファクタ^[3] f_4 ）を最小化する。

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2l_f K_f}{I} \\ \tan^{-1}(2\pi T_r) - \tan^{-1} \left\{ \frac{2\pi 2\zeta \omega_n}{\omega_n^2 - (2\pi)^2} \right\} \\ e^{-\zeta \omega_n T_p} \sqrt{\omega_n^2 T_r^2 - 2\zeta \omega_n T_r + 1} \\ T_p \frac{l_r}{V^2} \left(1 - \frac{ml_f}{2ll_r K_r} V^2 \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 l はホイールベース[m]、 ω_n はヨー共振周波数[rad/s]、 ζ は減衰比[-]、 T_p 、 T_r は以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_p &= \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n T_r}{\zeta \omega_n T_r - 1} + \pi \right) \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \\ T_r &= \frac{mV l_f}{l K_r} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.3 設計変数と制約条件

設計変数は K_f 、 K_r とし、それぞれの範囲制約を20,000~100,000[N/rad]とする。また、不等式制約として車両のアンダステア特性 $l_f K_f - l_r K_r \leq 0$ を考慮する。

3. 操縦性に関する確率的ロバスト性解析^[4]

3.1 ドライバの主観的な操縦性評価

操舵に対するヨーレート応答は、(5)式のように等価応答時間 T_e [sec]および定常ゲイン K [1/s]で一次系伝達関数に近似できる。Weir ら^[2]は、 $V = 50$ [mph]における T_e 、 K と熟練・一般ドライバの操縦性評価の関係を明らかにした。そこで、最適な T_e 、 K の領域より、多目的最適化問題から得られるパレート解の集合を縮約する。

1 : 日大理工・院 (前)・機械、2 : 日大理工・教員・機械

$$\frac{r(s)}{\delta_{sw}(s)} = G_{\delta_{sw}}^r(0) \frac{\omega_n^2(T_r s + 1)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \approx K \frac{1}{T_e s + 1} \quad (5)$$

3.2 不確定な車両諸元変動に対するロバスト性評価

ドライバの主観的評価に基づいて縮約されたパレート解から定義される公称(T_e, K)に対して、不確定車両諸元とした乗客、燃料、荷物質量[kg]、および前後輪コーナリングスティフネスの変動分[N/rad]を現実的な範囲内で確率的に 1,000 種類の諸元変動を与える。これにより観測されるステップ応答から $j = 1 \sim 1,000$ の (T_{ej}, K_j) が得られ、それらの公称(T_e, K) に対するばらつきからパレート解が有するロバスト性を評価する。

4. 最適化結果

既報^[4]では、第 2,3 章で説明した最適化過程に基づいて提供された操縦安定性は主観的に良好であり、車両諸元変動に対してロバストな応答を維持することを示した。本論文では、得られたパレート解から評価関数の相互関係に着目し、操縦安定性の最適化過程および結果について考察する。

そこで、パレート解に対する初期ヨー角加速度 f_1 とその他の評価関数 $f_2 \sim f_4$ の相互関係を図 1 に示す。

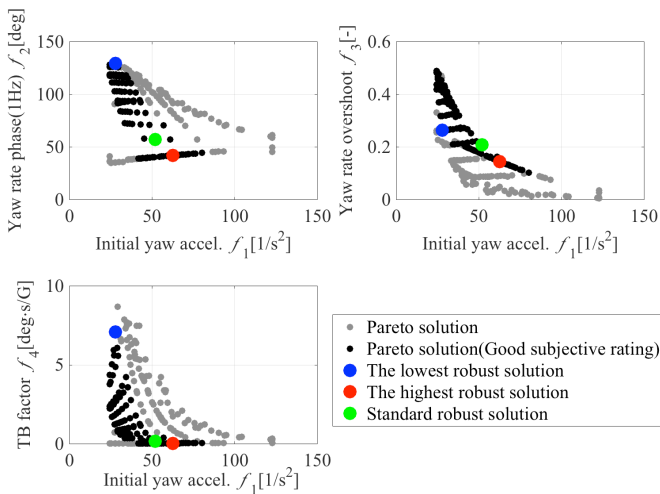


Fig. 1. Correlation between f_1 and other functions

この図から、 f_1 を小さくするにつれて $f_2 \sim f_4$ が大きな値をとる傾向が確認できる。この傾向は、ステップ操舵に対して発生するタイヤ力を抑制することで車両の応答性や操縦性が悪化するというトレードオフ関係を表している。このことから、最小限のタイヤ力で高い操縦安定性を提供するという設計目標を満足する最適な K_f, K_r が算出できたといえる。また、パレート解に対する f_1 以外の評価関数間の相互関係を図 2 に示す。この図から、 f_3 と相関の見られる評価関数はなく、 f_2 と f_4 ではお互いに性能を向上させるような相関があり、評価関数間のトレードオフ関係を確認できなかった。

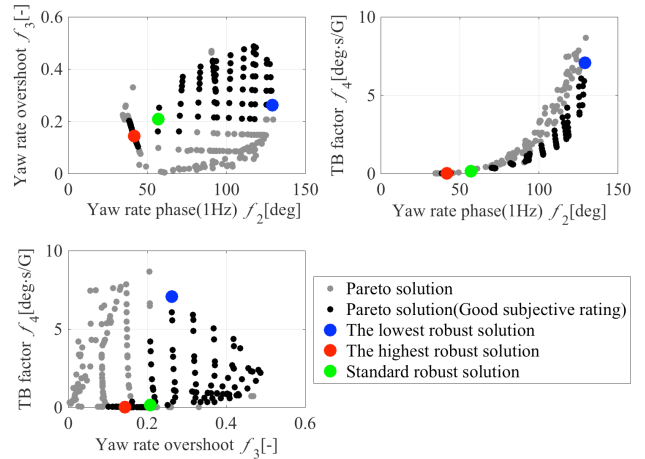


Fig. 2. Correlation between f_2, f_3 , and f_4

さらに、これらの図からドライバの主観的評価に基づいて f_3 の小さい値が縮約されることがわかる。これはオーバシュート量の向上による応答遅れが原因である。また、 f_1 は f_2, f_4 と応答時間に対する反比例の関係がみられ、応答遅れが大きい領域が縮約されている。

最後に、操縦安定性に関する確率的ロバスト性は、 f_1 が小さい値のときに低く、 $f_2 \sim f_4$ が臨界付近まで小さい値のときに高くなる。したがって、操縦安定性に対するタイヤ力の最小化とロバスト性の向上にはトレードオフ関係があり、操縦安定性に関するロバスト性を評価指標に加えて設計することが重要である。

5. 結言

本研究では、車両操縦安定性を多目的最適化する机上解析手法の最適化過程と得られた結果について、評価指標の相互関係の面から考察した。その結果、タイヤ力の最小化に対するトレードオフから設計目標を満足する解が得られていることを明確にした。さらに、操縦安定性に関するロバスト性を評価指標として考慮することが有効であることを確認した。

6. 参考文献

- [1] C. Miano, M. Gobbi and G. Mastinu : “Multi-Objective Optimization of the Handling Performances of a Road Vehicle: A Fundamental Study on Tire Selection”, Journal of Mechanical Design, Vol.126, pp.687-702, (2004).
- [2] D. Weir and R. DiMarco : “Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data”, SAE Technical Paper, 780010, (1978).
- [3] W. Lincke, B. Richter and R. Schmidt : “Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance”, SAE Technical Paper, 730489, (1973).
- [4] H. Yamada, S. Horiuchi : “Multi-Objective Optimization of Vehicle Handling Performances Taking into Account of Vehicle Parameter Uncertainties and Driver’s Subjective Rating”, Proc. of 6th PACME, (2017).