

パラメトリックな不確かさをもつシステムの同定と その構造系とロバスト制御系の同時設計法に関する研究 -- 車両操舵系への応用 --

代表研究者 河 辺 徹 筑波大学電子情報工学系講師

Abstract: This report presents a new approach of control configured optimal design for car steering systems. The aim of this method is designing the car which realize the high-performance in both the stability and maneuverability in high-speed situation such as freeway lane changes and emergency avoidance. For this purpose, the design problem of car steering system is formulated as a kind of simultaneous optimization problem of structure and controller using a new performance index based on the input deviation and the capacity of handling stability. And a new Genetic Algorithm (GA) is also developed for solving this optimization problem. Furthermore, numerical simulation results are included to illustrate the effectiveness of proposed design method.

Key Words: 4輪操舵系, 操縦安定性, 構造系と制御系の同時最適設計, Control configured design, 遺伝的アルゴリズム

1 はじめに

近年、自動車には安全性や快適性ととも、より高性能な操縦性や運動性が求められている。これらの要求に対し、これまでさまざまな制御装置や制御系が開発され組み込まれてきた。例えば、4輪操舵（4WS）、アンチロックブレーキ、アクティブサスペンションといったシステムとその制御方式があげられる。これらの中で、操舵系の制御は自動車の運動における基本的な操縦性と安全性の向上に直接かつ密接に関係しているという点で、4WSシステムの制御は特に重要である。一般的に、4WSシステムには2つの利点がある。一つは、並列駐車などの低速走行時の旋回半径を小さくできるという点であり、もう一方は、車線変更や障害物回避などの高速走行時の操縦性のレスポンスのよさと安定性の向上という点である。これら2つの利点は、4WSシステムを搭載することで後輪をアクティブに制御し、これによって各種運動時における自動車の横方向加速度やヨーレイトの発生を制御し、車体の横滑り角を減少できることに起因する。

一方、機械システムなどの設計時に、構造系だけでなく制御系も同時に設計することで従来の設計法によるシステムに比べ、より高性能なシステムが設計できることが知られている。これは同時最適設計と呼ばれ、元来、CCV（Control Configured Vehicle）の設計思想をもとに航空機や自動車などを対象として様々な研究や開発が続けられてきた[1]。同時最適設計ならびにCCV設計の基本思想は、完成システムに対する要求仕様を高次元で満たすために、構造系の設計時に組み込む制御系を想定し、制御器の性能を十二分に発揮させる構造系を制御系とともに設計することにある。

以上のことを踏まえ、本研究の目的は、旋回運動時における操縦性と安定性をロバストに、より向上させた4WSシステム搭載車両の設計法を、同時最適設計並びにCCV設計の基本思想に基づいて構築することにある。この目的のために、入力偏差[4]と操安性キャパシティ[2]の両方にペナルティーを持つ新しい設計規範を導出し、これを用いた同時最適設計手法を提案する。さらに、定式化された設計問題はいくつかの制約条件を伴った多峰性関数を目的関数とする最適化問題となるため、これを効率的に解くための解法アルゴリズムとして適応符号化戦略を用いた遺伝的アルゴリズム（GA）を用いる[6,7]。

以下、第2章で、旋回運動時の車両モデルとその動特性について述べ、第3章では入力偏差と操安性キャパシティに基づく評価規範とそれを用いた同時最適設計問題の定式化、ならびに適応符号化戦略を用いたGAについて述べる。第4章で、提案手法による設計例を示すとともに、従来法による設計結果との比較を行い、本手法の有効性を示す。

2 車両の旋回運動モデル

旋回運動時の4輪操舵車両モデルとして、Fig. 1 に示す2自由度の簡易モデルを用いる。また、各記号の意味はTable 1 に示すとおりである。

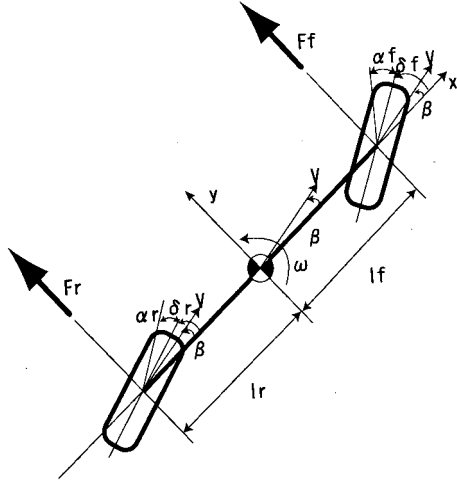


Fig.1 Approximated vehicle model

Table1 Parameters of car model

M	mass
I	yawing moment of inertia
ψ	yaw angle of center of gravity (C.G.)
ω	yawing rate ($\dot{\psi} = \omega$)
β	side-slip angle of C.G.
v	transverse velocity of C.G.
V	longitudinal velocity of C.G.
α_f, α_r	slip angle (*f: front, *r: rear)
F_f, F_r	cornering force
C_f, C_r	cornering stiffness
δ_f, δ_r	steering angle
l_f, l_r	length between C.G.
L	wheel base ($L \equiv l_f + l_r$)

Fig. 1 に示されたモデルの線形化された運動方程式は以下のようになる。

$$M \left(\frac{d^2 y}{dt^2} + V \frac{d\psi}{dt} \right) = F_f + F_r \quad (2.1)$$

$$I \frac{d^2 \psi}{dt^2} = F_f l_f - F_r l_r \quad (2.2)$$

$$F_f = C_f \alpha_f ; \quad \alpha_f = - \left(\frac{\dot{y} + l_f \dot{\psi}}{V} - \delta_f \right) \quad (2.3)$$

$$F_r = C_r \alpha_r ; \quad \alpha_r = - \left(\frac{\dot{y} - l_r \dot{\psi}}{V} - \delta_r \right) \quad (2.4)$$

ここで、 $\dot{\psi} = \omega$ と $\dot{y} = V \sin \beta \cong V \beta$ の近似を用いて整理すると、Fig. 1 のモデルの状態方程式が以下のよう求められる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ただし各要素は

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{-C_f - C_r}{MV} & b_{11} &= \frac{C_f}{MV} \\ a_{12} &= \frac{-MV^2 - C_f l_f + C_r l_r}{MV^2} & b_{12} &= \frac{C_r}{MV} \\ a_{21} &= \frac{-C_f l_f + C_r l_r}{I} & b_{21} &= \frac{C_f l_f}{I} \\ a_{22} &= \frac{-C_f l_f^2 - C_r l_r^2}{IV} & b_{22} &= \frac{-C_r l_r}{I} \end{aligned}$$

である。なお、車速 (V) は本来、時変パラメータであるが、本研究においては便宜上これを近似的に定数として取り扱うことにする。

2.1 操安性キャパシティと操縦性

車両の操縦性について前輪舵角とヨーレイトの関係を基に考察する。従来の2輪操舵（2WS）車両の場合、前輪操舵角（ δf ）からヨーレイト（ w ）の伝達関数（ $G_{2w}(s)$ ）は、 $\delta r = 0$ として（2.5）式より

$$G_{2w}(s) := \frac{b_{21}s - (b_{21}a_{11} - b_{11}a_{21})}{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \quad (2.6)$$

となる。この式より、 G_{2w} は2次遅れ1次進みの伝達関数であり、ヨーレイトの応答特性は、

$$\xi := \frac{I(C_f + C_r) + M(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{2L\sqrt{C_f C_r M I(1 + KV^2)}} \quad (2.7)$$

$$\omega_n := \frac{L}{V} \sqrt{\frac{C_f C_r}{MI}(1 + KV^2)} \quad (2.8)$$

で表される減衰率（ ξ ）と固有振動数（ ω_n ）に支配される。ただし、 K は

$$K := \frac{M(C_r l_r - C_f l_f)}{C_f C_r L^2} \quad (2.9)$$

である。このため、 ξ と ω_n の積

$$\xi \omega_n = \frac{C_s}{2V} ; \quad C_s = \frac{C_f + C_r}{M} + \frac{C_f l_f + C_r l_r}{I} \quad (2.10)$$

の値を大きくするほどヨーレイトの応答特性が向上することがわかる。本研究では、 V は一定と仮定しているので、結局、 C_s の値を大きくすることでヨーレイトの応答特性を改善することができ、操縦性の向上が図れるため、これを操縦性の評価規範として $J_1 := -C_s$ とし、 J_1 の最小化問題として考える。 C_s は操安性キャパシティと呼ばれる[2]。ここで、 C_s に含まれているパラメータは（ M, I, C_f, C_r, l_f, l_r ）であり、これらは車両の構造系の代表的パラメータである。よって、操縦性の改善には特に新たな制御装置を組み込む必要はなく、これら代表的な構造系パラメータの設計のみで十分可能である。つまり、 J_1 の最小化という評価規範は、操縦性に対する指標であるとともに、車両の構造系設計のための指標となっていると捉えることができる。

2.2 横滑り0化制御と安定性

Fig. 1における重心点横滑り角（ β ）をできるだけ0に近づけることができれば、車体の向き（姿勢角）と重心点のもつ車速（ V ）方向の差を減らせることが可能となる。この結果、車体の姿勢変化量を減らせることで車両の挙動を安定化できるだけでなく、搭乗者の乗り心地感も向上させることができる。しかし、従来の2WS車両ではこれを効果的に実現することは難しい。このことを簡単に考察しておく。2WS車両の、 δf から横滑り角（ β ）までの伝達関数（ $G_{2\beta}(s)$ ）は、前節同様、 $\delta r = 0$ として（2.5）式より

$$G_{2\beta}(s) := \frac{b_{11}s - (b_{11}a_{22} - b_{21}a_{12})}{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \quad (2.11)$$

となる。安定性は分母多項式より

$$C_f l_f - C_r l_r \leq 0 \quad (2.12)$$

を満たすときに成立するが、本論文では以下この条件が成立することを仮定する。なお、この条件は、ステアリングの特性がアンダーステアまたはニュートラルステアであることを意味している。さらに上式が成立するときには、前節の（2.9）式の K の値が常に正であり、この結果、（2.7）、（2.8）式の ξ と ω_n の根号内の値が正となることから、 C_s の値は常に正である。

一方、 $G_{2\beta}$ の零点 z は

$$z = \frac{ML_f V^2 - C_r l_r L}{IV} \quad (2.13)$$

となるため、車速（ V ）が

$$V \geq \sqrt{\frac{C_r l_r L}{M l_f}} \quad (2.14)$$

の条件を満たすときに、 z が正となって、 $G_{2\beta}$ は非最小位相推移系になり動作遅れを生じる。この動作遅れが結果的に横滑り角 β を発生させ、車体の姿勢変化量を大きくし、車両の安定性と乗員の乗り心地感を悪化させる。これが 2WS 車両の問題点であり、前節の操縦性の場合と異なり、これに対して構造系を的確に設計することだけでは、十分な対処をすることは不可能である。そこでこの動作遅れを補償するために、後輪に適切な操舵角を与える制御装置を付加し 4WS 車両として設計する。4WS の制御方式には各種あるが、ここでは横滑り角 β の発生を 0 に近づけることで、動作遅れを補償し車体の姿勢変化量を最小限に抑え、安定性と乗員の乗り心地感の向上を図る横滑り 0 化制御を採用する。また、後輪舵角の制御則にも各種あるが、ここではよく知られている次の方式を採用し、横滑り 0 化制御の実現を目指す。

$$\delta_r = k_\delta \delta_f + k_\omega \omega \quad (2.15)$$

ここで、 k_δ と k_ω は、この制御方式を実現するための補償器のゲインであり、設計変数である。これらの設計のための評価規範には、入力偏差を用いた規範[4,5]を適用する。この評価規範ならびに設計方法は以下のとおりである。

2.2.1 入力偏差による評価規範

まず、車両操舵システムの δ_f と β における理想的な入出力関係を次のように定義する。

$$\forall \delta_f \longrightarrow \beta = \dot{\beta} = 0 \quad (2.16)$$

これは、任意の状況においてドライバーが前輪舵角としてどのような入力を行っても、常に横滑り角が 0 であることを意味する。また、この理想出力を必ず出力させるための理想前輪舵角入力（ δ^o ）を導出する。これには、（ $\beta = \dot{\beta} = 0$ ）の関係と（2.15）式を（2.1）式に代入することで、次のように求まる。

$$\delta^o = C \exp(\Phi t) \quad (2.17)$$

ただし C は積分定数であり、 Φ は以下のとおり。

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{(a_{22} + b_{22}k_\omega)(b_{11} + b_{12}k_\delta)}{(b_{11} + b_{12}k_\delta)} \\ & - \frac{(a_{12} + b_{12}k_\omega)(b_{21} + b_{22}k_\delta)}{(b_{11} + b_{12}k_\delta)} \end{aligned} \quad (2.18)$$

次に、実際にドライバーが与える前輪舵角（ δ_f ）として、ここでは設計の一例として次の 5 つの代表的な状況を想定する。設計の仕様に応じてこの他に別の評価したい状況を追加することや、逆にこれらからあまり評価する必要がない状況を削除することも可能である。

- (I). $\delta_{f,1}$: U-turn
- (II). $\delta_{f,2}$: cornering
- (III). $\delta_{f,3}$: left or right turn
- (IV). $\delta_{f,4}$: slalom
- (V). $\delta_{f,5}$: lane change

これらの前輪舵角入力是人間のステアリング操作によるものなので、1 次の時間関数を想定し、Fig. 2 に示すようなものを用いる。

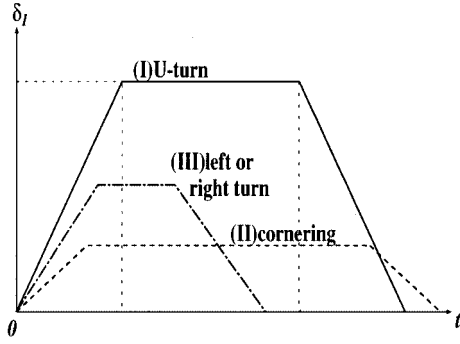


Fig. 2 (a) Input patterns [(I)~(III)]

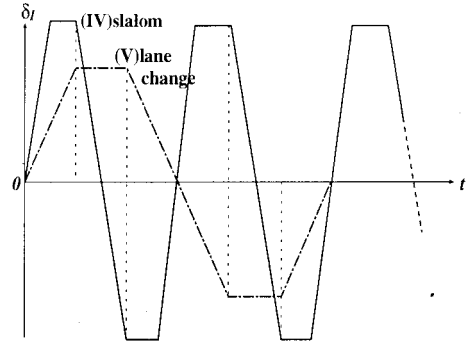


Fig. 2 (b) Input patterns [(IV) & (V)]

そして、理想入力 δ^o と代表パターン $\delta_{f,i}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) から次の評価関数を考える。

$$J_2 := \sum_{i=1}^5 \|\delta^o - \delta_{f,i}\| = \sum_{i=1}^5 \left[\int_0^\infty |\delta^o - \delta_{f,i}|^2 dt \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

ここで、 $|\delta^o - \delta_{f,i}|$ を入力偏差と呼ぶ[4, 5]。この評価関数を最小化することで、5つのパターンに代表される実際の入力を理想入力に近づけ、横滑り0化制御を実現する補償器のゲイン k_δ と k_w を設計することができる。つまりこの評価規範は横滑り0化による安定性を向上させる制御系設計のためのものと捉えることができる。

ただし、この方法では横滑り0化のみを指標としており、操縦性の指標が入っていないために、この評価規範だけを用いて設計を行った場合には、ステアリング入力に対するヨーレート (ω) や横方向加速度 (i) の反応が遅くなりがちであり、また十分に発生させられず、操縦性能が不十分な車両となる。そこで、前節で述べた操安性キャパシティを用いた操縦性に対する評価規範と本節の横滑り0化制御による安定性のための規範とを組み合わせた評価規範を用いて、構造系と制御系の同時最適設計のための定式化とその設計方法について次章で述べる。

3 同時最適設計のための評価規範と設計問題

前章の考察より、操縦性と安定性を同時に向上させるためには、従来の2WS車両の構成では不十分であり、4WS車両とすることが不可欠である。また、操縦性に対する評価規範は、構造系に対する設計指標となっており、一方、安定性に対する評価規範は、主に制御系に対する設計指標となっていることから、4WS車両の構造系と制御の同時最適設計問題を

$$\begin{aligned} & \min_{q \in Q, \theta \in \Theta} J \\ & \text{Subj. to } q \text{ は } \forall \theta \in \Theta \text{ に対し閉ループ系をロバスト安定化する} \end{aligned} \quad (3.20)$$

と定式化する。ただし J は

$$J := \rho J_1(\theta) + J_2(q, \theta) \quad (\rho \text{ は正の定数}) \quad (3.21)$$

であり、 $\theta := (M, I, I_f, I_r, C_f, C_r)$ は構造系のパラメータベクトルで、あらかじめ与えられることを仮定する設計のための探索領域 $\Theta := \{\theta | \theta_l \leq \theta \leq \theta_u\} \subset \mathbf{R}^6$ に属するものとする。同様に、 $q := (k_\delta, k_w)$ は補償器のパラメータベクトルで、これもまた、あらかじめ与えられることを仮定する探索領域 $Q := \{q | q_l \leq q \leq q_u\} \subset \mathbf{R}^2$ に属するものとする。この設計問題は、多峰性目的関数 J の最小化問題であるため解法ツールとしては次節で述べる適応符号化戦略を用いたGA [6, 7]を用いる。また、制約条件である閉ループ系のロバスト安定性の判別には Kharitonov の定理を用いた。さらに、実際に上記問題を計算機により解くときには、 q, Θ の値は近似離散値として取り扱った。

3.1 適応符号化戦略を用いたGA

適応符号化戦略を用いたGAは、特に非線形連続関数を目的関数とする最適化問題において、GAの性能に重要な影響を与える符号化を、より効果的で柔軟なものにすることで汎用性の高い効果的な最適化ツールとすることを目的として開発されたものである。ここでは、以下で述べるように、適応符号化戦略として、実数値コードとグレイコードを適応的に用いる戦略を採用する。

目的関数が N 次元である、一般的な場合を考える。このとき、 t 世代目の個体群 $P(t) = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ の i 番目の個体を

$$p_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}]$$

と表す。ただし、 x_{ik} は最適化変数の k 番目の実数値パラメータとし、 M は個体数を表す。このとき、適応符号化戦略を用いたGAは次のようになる。

- Step 1. 世代数 $t_{gene} = 0$ とスイッチ変数 $t_{count} = 0$ を初期値としてセットする。また、初期世代の個体群 $P(0)$ として M 個の個体をランダムに生成する。
- Step 2. もし t_{count} が N_{count} より小さければ、適応符号化戦略として、実数値コードにより符号化を行う。そうでなければ、グレイコードによる符号化を行う。
- Step 3. 個体群 $P(t)$ において各個体の問題に対する適応度を計算し、交叉、突然変異などの遺伝子操作を行い、新しい個体群 $P'(t)$ を生成する。
- Step 4. 淘汰の操作として、 $P(t)$ と $P'(t)$ の両方の個体群の個体に対し、適応度を計算し、適応度の高い順に M 個の個体を次世代の個体群として選ぶ。このとき、もし適応度関数の値が改善されていなければ、 $t_{count} = t_{count} + 1$ とし、そうでなければ $t_{count} = 0$ とする。
- Step 5. 終了条件が満たされればこれで終了。そうでなければ、 $t_{gene} = t_{gene} + 1$ としてStep 2に戻る。

上記のアルゴリズムからもわかるように、ここでは、連続世代モデルを用いている。このため、すべての世代の個体数は常に M である。また、なるべく進化の途中での多様性を保持するために、同一世代において等価な個体は一つとし、重複は認めていない。適応度関数には、線形スケーリング法を用いて適応度の値を $(10.0, 1.0)$ としている。また交叉には、BLX- α 法を採用し、突然変異には境界変異法と非一様変異法を組み合わせ用いている。なお、次章の数値実験においては、GAパラメータは、個体数: 250、突然変異率: 0.1、最終世代: 10000、 $N_{count} = 10$ とした。さらに、GAの終了条件としては、現世代の目的関数値と前世代の時の値との変化が $|1.0 \times 10^{-5}|$ 以下となるか、最終世代(10000)に到達した場合とした。

4 設計例

本章では、いくつかの数値実験結果を示し、提案手法の有効性について検討する。

提案手法においては、設計時には構造系パラメータと制御器のパラメータの探索範囲はあらかじめ与えられることが前提になっている。そこで、これらが以下のように与えられることを仮定する。

$$\begin{aligned} M &\in [1000, 1500], & I &\in [1000, 1600], \\ l_f &\in [0.70, 2.00], & l_r &\in [0.70, 2.00], \\ C_f &\in [20000, 60000], & C_r &\in [20000, 60000] \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$k_\delta \in [-5.0000, 0.0000] \quad , \quad k_\omega \in [0.0000, 5.0000] \quad (4.23)$$

一例として、これらの条件下で、(3.21) 式の評価関数の重みを $\rho = 10000$ とした時の、車速 $V = 60, 100$ [km/h] の場合の 4WS 車両の設計結果を Table 2 に示す。

Table 2 Design results ($\rho = 10000$)

Car name	M	I	l_f	l_r	C_f	C_r
PR_{60}	1050	1330	1.37	1.46	25400	37800
	$(V = 60) \quad k_\delta = -0.6710, \quad k_\omega = 0.8965$					
PR_{100}	1110	1030	1.12	1.47	39100	40600
	$(V = 100) \quad k_\delta = -0.9638, \quad k_\omega = 0.4058$					

この結果と従来の設計方法により設計した車両との性能比較を計算機シミュレーションによりいろいろと行ったがそのうちのいくつかについて次節以降で述べる。

4.1 旋回運動における 2WS 車両との比較

定常円旋回運動を想定して 2WS 車両との性能比較を行う。定常円旋回運動であるので前輪舵角入力 (δ_f) は Fig. 3 に示すようにステップ入力となる。

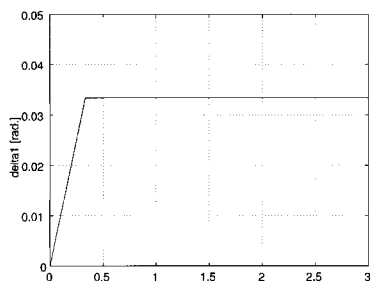


Fig. 3 Step signal for input

比較する 2WS 車両は、評価関数として $J_1 (= -C_s)$ のみを用いて設計したもので、 $V = 60$ の場合の設計結果は Table 3 のように得られた。

Table 3 Design result of 2WS car

Car name	M	I	l_f	l_r	C_f	C_r
$2W_{60}$	1060	1000	1.46	1.41	44600	44700
	$(V = 60) \quad k_\delta = 0, \quad k_\omega = 0$					

Figs. 4 (a)、4 (b)、4 (c) はそれぞれ、2WS 車両 ($2W_{60}$) の速度 $V = 60$ における旋回運動時の横滑り角、ヨーレート、横方向加速度の応答を示しており、一方、Figs. 5 (a)、5 (b)、5 (c) は、4WS 車両 (PR_{60}) の場合の応答を示している。

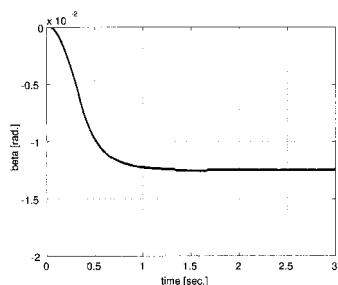


Fig. 4 (a) Side-slip angle ($2W_{60}$)

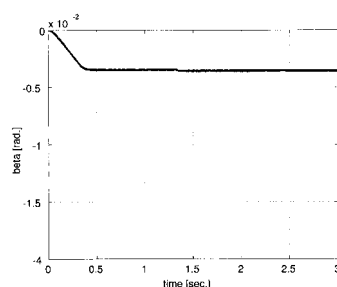


Fig. 5 (a) Side-slip angle (PR_{60})

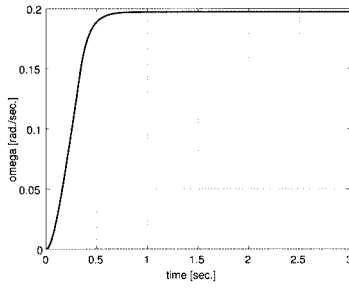


Fig. 4 (b) Yawing rate ($2 W_{60}$)

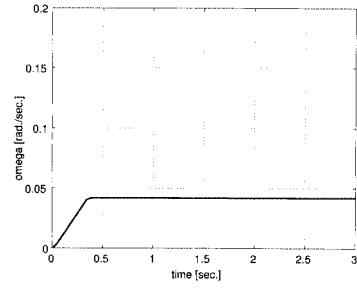


Fig. 5 (b) Yawing rate (PR_{60})

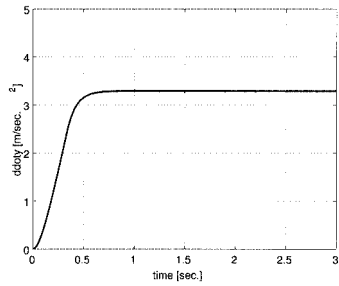


Fig. 4 (c) Lateral acceleration ($2 W_{60}$)

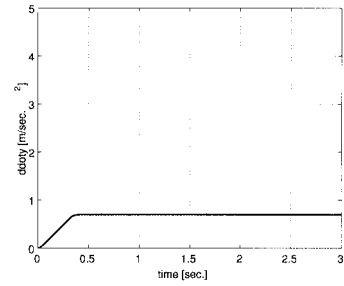


Fig. 5 (c) Lateral acceleration (PR_{60})

これらの図より、まず横滑り角は明らかに $2 W_{60}$ の方が PR_{60} よりも大きいことから、安定性においては当然のことながら、4WS車両が優れていることがわかる。一方、ヨーレイトと横加速度については、その発生量については2WS車両の方が大きく操縦性の良さを示しているといえる。これは、純粋に操縦性のみを追及する評価規範である操安性キャパシティ ($J_1 = -C_s$) のみを用いて構造系パラメータの最適化設計を行ったことに起因している。4WS車両の場合、単純に J_1 のみの評価ではなく、 J_2 との同時評価を閉ループ系のロバスト安定性の制約の基で行っているため、操縦性の尺度において最適な構造系を設計することにある程度犠牲にせざるを得ない。ただし、操縦性をもっと重視したい場合には、評価関数の重み係数 ρ の値をもっと小さくして設計するなど、状況に応じて ρ の値を変えてやることである程度は対応できる。なお、2WS車両のヨーレイトと横加速度の発生仕方、4WS車両と比較した場合に、Fig. 3 に示した想定入力に対し若干の遅れが生じていることがわかる。このことは、車速を大きくした場合の設計結果において同様に数値実験を行った結果、その遅れの差がより顕著に現れることがわかり、車両の挙動としてあまり好ましくないため、この点からは4WS車両が優れているといえる。

4.2 横滑り0化制御のみの場合との比較

本節では、比較車両として操縦性については考慮せず与えられた構造系に対して横滑り0化制御の実現を目指して設計された4WS車両と、提案手法で設計された4WS車両との性能比較を行う。比較車両は、具体的には、(4.22) 式の各構造系パラメータの中間値に対して、(3.21) 式において $\rho = 0$ として、 k_δ , k_w のみを設計した車両である。 $V = 100$ の場合の設計結果をTable 4に示す。

Table 4 Design result by $\rho = 0$

Car name	M	I	l_f	l_r	C_f	C_r
$J2_{100}$	1250	1300	1.35	1.35	40000	40000
	$(V = 100) \quad k_\delta = -1.0000, \quad k_w = 0.8688$					

いくつかのシミュレーションのうち、スラローム走行を想定したFig 6で示す正弦波入力を δ_1 として与えた場合の結果を示す。

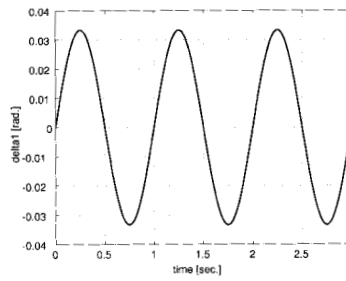


Fig. 6 Sinusoidal signal for input

Figs. 7が $J2_{100}$ 車両のシミュレーション結果、Figs. 8が PR_{100} の結果である。今回は、比較車両も4WS車両であるので、後輪舵角の応答も示す。

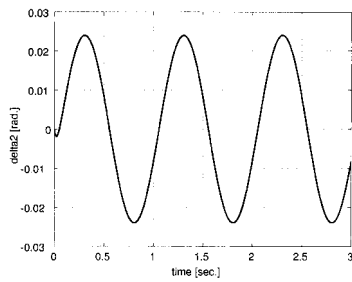


Fig. 7 (a) Rear steering angle ($J2_{100}$)

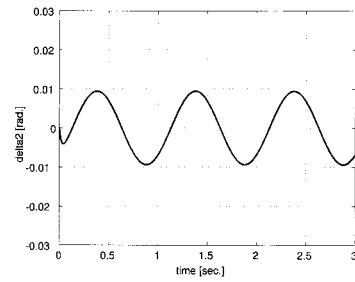


Fig. 8 (a) Rear steering angle (PR_{100})

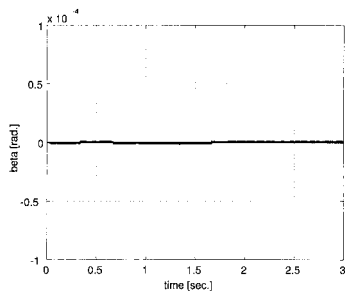


Fig. 7 (b) Side-slip angle ($J2_{100}$)

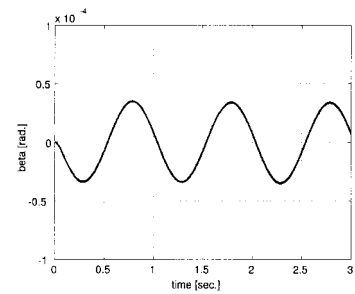


Fig. 8 (b) Side-slip angle (PR_{100})

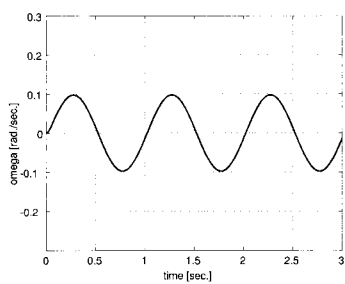


Fig. 7 (c) Yawing rate ($J2_{100}$)

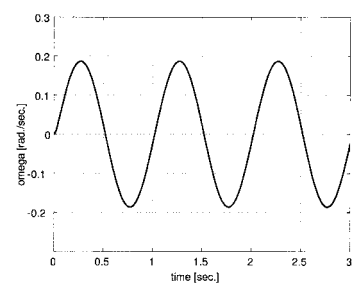


Fig. 8 (c) Yawing rate (PR_{100})

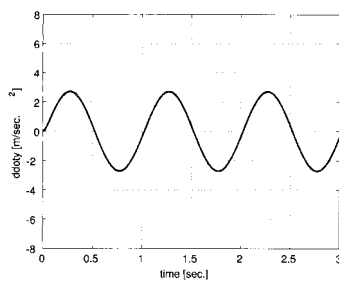


Fig. 7 (d) Lateral acceleration ($J2_{100}$)

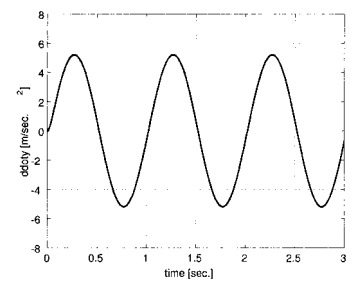


Fig. 8 (d) Lateral acceleration (PR_{100})

$J2_{100}$ の場合には、後輪舵角を大きく発生させることで、完全に横滑り角を0にできる反面、十分なヨーレイト、横加速度が発生できていないことがわかる。もともと、構造系パラメータには操縦性とは無関係に中間値を与えただけであるので、当然の結果ではあるが、このことより、横滑り0化制御だけを満足するような車両を設計しても、操縦性に優れた車両とはなりにくいことを裏付けている。また、 $J2_{100}$ ではロバスト性についてはまったく考慮にいれていないため、もし構造系パラメータが変動した場合に、それでも β を完全に0にできるかどうかは疑問である。一方、 PR_{100} は、横滑り角は多少発生するが、そのオーダーが 10^{-4} であることとこれがパラメータの変動まで考慮したロバストな性能を保証していることを考えれば、現実的には満足できる範囲であるといえる。ヨーレイト、横方向加速度は十分大きく、これらより、安定性と操縦性の両面を高次元で満たした車両となっていることがわかる。

4.3 同時最適設計の有効性の検証

本節では、提案手法のもう一つの特徴である構造系と制御系の同時最適設計の有効性を従来の2段階設計法との比較により示す。2段階設計法とは、構造系設計をあらかじめ行っておき、その後でできあがった構造系に対して制御系を設計するという従来一般に用いられている設計手順である。ここでは、以下のように、 J_1 、 J_2 をこの順番で別々に用いて設計する方法とする。

Step 1 構造系パラメータ (θ) を $\min_{q \in Q} J_2$ により求める

Step 2 制御系の設計を、閉ループ系のロバスト安定性を制約として $\min_{q \in Q} J_2$ により求める。ただし、構造系パラメータの値は、Step 1 で得られたものを用いる。

$V=100$ の場合のこの方法による設計結果をTable 5に示す。

Table 5 Design result by conventional method

Car name	M	I	l_f	l_r	C_f	C_r
$2S_{100}$	1140	1000	1.97	1.96	59900	56700
	(V=100) $k_\delta = -1.0563$, $k_\omega = 1.4180$					

前節同様、スラローム走行を想定し、Fig. 6の正弦波入力に対する $2S_{100}$ 車両のシミュレーション結果をFig. 9に示す。また、比較のため前節でも示した PR_{100} 車両の結果であるFig. 8を再掲する。これらの結果より、 $2S_{100}$ 車両の場合、 PR_{100} 車両と比べ、後輪舵角を大きく発生させている割に、横滑り角の発生量はほぼ同程度であり、安定性に関しては大差ないことがわかる。前節の、中間値に対して設計した場合には、横滑りがほぼ0にできていた結果と比較して、これは、Step 1で設計された構造系が、横滑り0化制御にたいして制御しにくいものであったために、与えられた探索範囲 θ では、十分に制御性能を発揮できる制御器を設計できなかったといえる。このことから、制御を前提とした構造系の設計あるいは、同時最適化による設計方法が重要であることがわかる。

また、ヨーレイト、横加速度の応答から操縦性に関しては、 PR_{100} 車両のほうが優れており、 $2S_{100}$ 車両に比べ、安定性のみならず、操縦性においても十分満足できる性能であるといえる。

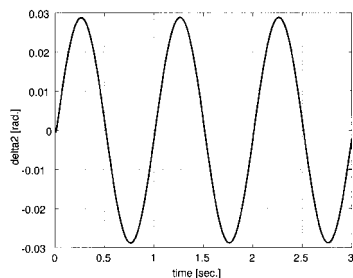


Fig.9 (a) Rear steering angle ($2S_{100}$)

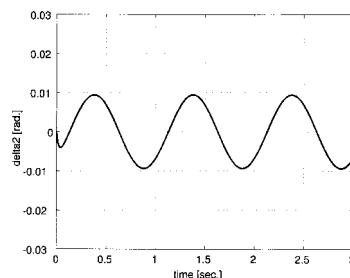


Fig.8 (a) Rear steering angle (PR_{100})

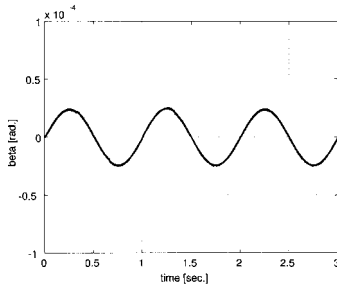


Fig. 9 (b) Side-slip angle ($2S_{100}$)

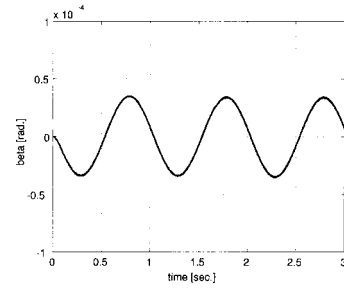


Fig. 8 (b) Side-slip angle (PR_{100})

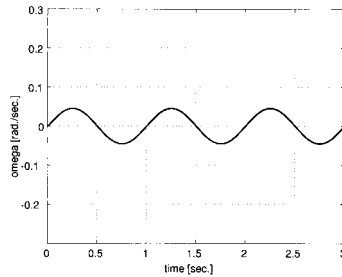


Fig. 9 (c) Yawing rate ($2S_{100}$)

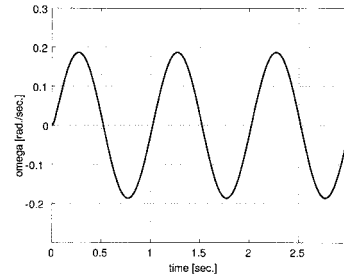


Fig. 8 (c) Yawing rate (PR_{100})

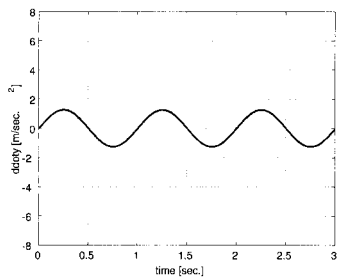


Fig. 9 (d) Lateral acceleration ($2S_{100}$)

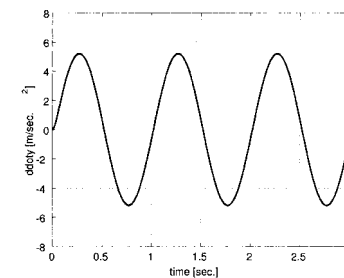


Fig. 8 (d) Lateral acceleration (PR_{100})

5 おわりに

本論文では、4輪操舵車を対象に、構造系とロバスト制御系を同時に最適に設計することにより、車両重心点での横滑り角の発生を抑えつつ、ヨーレイトと横加速度の応答を良くし、操縦性と安定性の両面で高次元の性能を達成する車両を設計する方法を提案した。そして、提案する設計法を用いて数値例により実際に設計を行い結果の評価を行った。

この結果、本論文で提案する設計法で設計した車両の場合、前輪操舵角入力に対する横滑り角の発生を極めて小さく抑えられ、安定性を向上させられるだけでなく、ヨーレイトと横加速度を遅れなく発生させられ、操縦性の面でも高性能化が実現できる。つまり、ドライバーが安全で快適に運転することのできる4輪操舵車両が設計できることが示せた。さらに、設計方法として、構造系パラメータと制御器のパラメータを同時に設計することで、従来の「構造系→制御系」の順による2段階の設計に比較して、より優れた結果が得られることも示した。

ただし、提案方法においては、評価関数の重みパラメータの決定が試行錯誤的にならざるを得なかった。このため、この値を問題に応じて的確に設定することで、より高性能の車両が設計できる可能性がある。それゆえ、今後はこの重みが設計結果に及ぼす影響を解析した上で、適切な重みを決定する方法について開発する必要がある。また、提案手法を実際に生産ベースの市販車両の設計に適用するためには、本論文では想定しなかった様々な制約や制限についても考慮する必要がある。一例をあげれば、乗車空間やラゲージスペースの確保の点から、実際には、後輪舵角の操舵量の上限には前輪舵角よりも厳しい制限があり、これを制約として加味した設計をしなければ、市販車には適用できない。それゆえ、このような様々な観点からの制約や仕様を考慮して、さらに効果的で現実的な設計手法に改良するための工夫の余地がまだまだ残されているといえるが、これらに関しては今後の課題としたい。

最後に、本論文では、平面運動のみを対象とした車両の操舵系の設計に対する設計方法に限定して話をすすめたが、提案手法は鉛直運動を考慮して懸架系まで含めた統合系の設計に対しても、適用可能である。さらに、設計対象は車両だけに限定されるものではなく、一般的な機械システム全般に対しても、基本的な考え方はそのまま、比較的容易に拡張ができる汎用性の高いものである。

謝辞

本研究に関して、有益な議論をしていただき、貴重なご助言をいただいたスイス連邦工科大学（Swiss Federal Institute of Technology）の Manfred Morari 教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] 金井喜美雄, 藤原武史, フライトコントロール, 槇書店, 1986.
- [2] 三浦登, 福田瑞穂, 自動車設計と解析シミュレーション, 培風館, 1990.
- [3] A. L. Hale, R. J. Lisowski and W. E. Dehi, Optimal Simultaneous Structure and Control Design of Maneuvering Flexible Spacecraft, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol.8, no.1, pp. 86—93, 1985.
- [4] 河辺 徹, 得丸英勝, 制御を前提とした設計手法とその車両操舵機構への応用, システム制御情報学会論文誌, Vol.4, No.7, pp. 277—285, 1991.
- [5] T. Kawabe, A New Simultaneous Design Method of Structure and Robust Control for Car Steering System, *Proc. The 5th European Control Conference (ECC '99)*, Session BP-8, Paper-ID F299, 1999.
- [6] T. Tagami and T. Kawabe, Genetic Algorithms with General Encoding for Combinatorial Optimization Problems, *Proc. 4th Asian Fuzzy Systems Symposium*, pp. 284—287, 2000.
- [7] T. Tagami and T. Kawabe, Genetic Algorithms with Adaptive Encoding Method for Nonlinear Function Optimization, *Proc.2000 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 59—62, 2000.

< 発 表 資 料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Bound Estimation Method for Systems with Parametric Uncertainty	Proc. 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	2000年10月
An Extended Set-membership Identification for Time-varying Systems with Random Parametric Perturbation	Proc. IASTED International Conference on Modeling Identification, and Control	2001年 2 月
A daptive encoding GA based Robust Contol Configured Design Method	Proc. IASTED International Conference Artificial Intelligence and Applications	2001年 9 月