

# 博士論文

走行中における自動車の等価二輪モデルの  
パラメータ値推定

李 昇勇

## 目次

記号表.....	7
1. 序論.....	8
1.1 背景.....	9
1.2 目的.....	11
1.3 構成.....	13
2 Dual Kalman filter アルゴリズム.....	14
2.1 Kalman filter アルゴリズムの概要.....	15
2.2 Dual Kalman filter アルゴリズムの概要.....	24
3 同定手法.....	28
3.1 パラメータ同定システム.....	29
3.2 運動方程式.....	30
3.2.1 大型車両の等価二輪モデルの運動方程式.....	30
3.2.2 一般乗用車の等価二輪モデルの運動方程式.....	32
3.2.3 カントのある道路上を走行する一般乗用車の等価二輪モデルの 運動方程式.....	34
3.3 自動隊列走行車両の制御.....	36
3.3.1 車間距離制御の概要.....	36
3.3.2 軌道追従制御の概要.....	38
3.4 車体質量と車体重心位置の同定手法.....	40
3.5 Dual Kalman filter によるパラメータ推定手法.....	43
3.5.1 ヨー慣性モーメント推定手法.....	43
3.5.2 コーナリングスティフネス同定手法.....	44
3.5.3 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定手法.....	45
3.6 パラメータ推定値の予測手法.....	46
4 実験.....	48
4.1 車体質量と車体重心位置の同定に関する実験.....	49
4.1.1 実験車両.....	49
4.1.2 計測センサ.....	50
4.1.3 ストローク計測システム.....	51

4.1.4	実験方法.....	52
4.1.5	荷重と各サスペンションの反力.....	55
4.1.6	荷重とサスペンション変位量もしくはベローズ圧の関係.....	56
4.1.7	サスペンション変位量もしくはベローズ圧と荷重の関係.....	58
4.1.8	車体重心位置の推定値の検討.....	62
4.2	ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネス推定の実験.....	63
4.2.1	実験装置.....	63
4.2.2	実験車両.....	66
4.2.3	実験シナリオ.....	68
4.2.4	実験結果.....	69
4.2.5	実験によるパラメータ推定.....	73
4.2.6	状態推定用パラメータの設定.....	74
4.3	ヨー慣性モーメント同定.....	76
4.3.1	$Q_P$ 変化時のヨー慣性モーメントの同定.....	79
4.3.2	$D_d$ の変化時のヨー慣性モーメントの同定.....	89
4.3.3	ヨー慣性モーメントの同定検討のまとめ.....	101
4.3.4	カントがある区間でのヨー慣性モーメントの同定.....	108
4.3.5	ヨー慣性モーメント推定値の予測.....	109
4.4	コーナリングスティフネス同定.....	113
4.4.1	$Q_P$ の $Z$ 値が変化時のコーナリングスティフネスの同定.....	115
4.4.2	$Q_P$ の $X$ 値が変化時のコーナリングスティフネスの同定.....	122
4.4.3	$Q_P$ が固定で $R_P$ 変化時のコーナリングスティフネスの同定.....	128
4.4.4	コーナリングスティフネスの同定検討のまとめ.....	138
4.4.5	カントがある区間でのコーナリングスティフネスの同定.....	144
4.4.6	コーナリングスティフネス推定値の予測.....	145
4.5	ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定.....	148
4.5.1	$Q_P$ 変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時同定.....	149
4.5.2	$D_d$ 変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの	

同時同定.....	160
4.5.3 $Q_P$ の $Z$ 値が変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時同定.....	173
4.5.4 $D_d$ の $W$ 値が変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時同定.....	178
4.5.5 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定検討の まとめ.....	181
4.5.6 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の 推定値の予測.....	183
5 パラメータ推定の数値解析.....	185
5.1 数値解析の設定.....	186
5.1.1 数値解析用ソフト.....	186
5.1.2 数値解析のシナリオ.....	186
5.1.3 車両パラメータ.....	186
5.2 ヨー慣性モーメントの同定.....	188
5.2.1 初期値の設定.....	188
5.2.2 ヨー慣性モーメントの推定結果.....	190
5.2.3 ヨー慣性モーメント推定値の予測.....	192
5.3 コーナリングスティフネスの同定.....	194
5.3.1 初期値の設定.....	194
5.3.2 コーナリングスティフネスの推定結果.....	195
5.3.3 コーナリングスティフネス推定値の予測.....	197
5.4 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時同定.....	199
5.4.1 初期値の設定.....	199
5.4.2 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時同定結果.....	200
5.4.3 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの 同時推定値の予測.....	204

6	自動隊列走行における本手法の有効性検討.....	208
6.1	自動隊列走行において有効性を検討する必要性.....	209
6.2	シナリオ.....	209
6.3	パラメータ推定値の誤差による車間距離の検討.....	211
6.4	パラメータ推定値の誤差による横方向の偏差の検討.....	214
6.5	本研究の成果と今後の課題.....	220
7	結論.....	221
	参考文献.....	225
	謝辞.....	232

## 記号表

以下の記号を使用する.

$d$	: 車間距離
$e_1, e_2, e_3$	: 仮想の参照車両から見た実車両との誤差
$k_1, k_2$	: 正数ゲイン
$l$	: ホイルベース
$l_f$	: 重心位置から前輪軸までの距離
$l_r$	: 重心位置から後輪軸までの距離
$l_{r1}$	: 重心位置から後輪 1 軸までの距離
$l_{r2}$	: 重心位置から後輪 2 軸までの距離
$\hat{p}_k^-$	: パラメータ推定の予測値
$\hat{p}_k$	: パラメータ推定値
$u_i$	: $i$ 番目の車両の駆動力
$v_{1d}$	: 1 番目車両の理想的な速度
$v_{2d}$	: 2 番目車両の理想的な速度
$v$	: 測定ノイズ
$w$	: システムノイズ
$\hat{x}_k^-$	: 現時刻の推定値の予測値
$\hat{x}_k$	: 状態推定値
$x_i$	: 車両の縦方向のサスペンションの座標
$x_{k-1}$	: 前時刻の推定値
$x_k$	: 現時刻の推定値
$x_i$	: 道路上に $i$ 番目の車両の重心位置
$y_i$	: 車両の横方向のサスペンションの座標
$\Delta t$	: 一定時間の間隔
$A B C$	: システムモデル
$A_d B_d C_d$	: 離散化したシステムモデル
$F_{i(i=1\sim 8)}$	: 各サスペンションから車体に加わる反力
$F_f$	: 前輪の横力
$F_r$	: 後輪の横力
$F_{r1}$	: 後輪 1 軸の横力
$F_{r2}$	: 後輪 2 軸の横力

$G_k$	: パラメータ推定用 Kalman gain
$J$	: ヨー慣性モーメント
$J_k$	: k 番目のヨー慣性モーメント推定値
$K_k$	: 状態推定用 Kalman gain
$K_f$	: 前輪のコーナリングスティフネス
$K_r$	: 後輪のコーナリングスティフネス
$K_{r1}$	: 後輪 1 軸のコーナリングスティフネス
$K_{r2}$	: 後輪 2 軸のコーナリングスティフネス
$M$	: 車体質量
$P_k^-$	: 現時刻の誤差共分散の予測値
$P_{k-1}$	: 前時刻の誤差共分散の推定値
$Q_S$	: 状態推定用システムノイズ共分散
$Q_P$	: パラメータ推定用システムノイズ共分散
$R_S$	: 状態推定用測定ノイズ共分散
$R_P$	: パラメータ推定用測定ノイズ共分散
$U_k^-$	: パラメータ推定の誤差共分散の予測値
$U_k$	: パラメータ推定の誤差共分散の推定値
$V$	: 絶対速度
$XX$	: 車両の縦方向の重心位置
$YY$	: 車両の横方向の重心位置
$\beta$	: スリップ角
$\delta$	: 実舵角
$\gamma$	: ヨー角速度
$\theta$	: 回頭角

# 第 1 章

## 序論



## 1 序論

### 1.1 背景

自動車の高性能化の要求が高まることに従い、車両制御の高度化が進んでいる。最近発展している IT 技術を車両制御や交通制御に積極的に利用し、より安全な運転ができる車両・交通の制御システムや運転支援システムの研究が行われている。代表的な運転支援システム中でのものは ACC(Adaptive Cruise Control)、CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)、衝突被害軽減ブレーキ、レーンキープアシスト等がある。ACC は車両の前方に搭載したセンサを用いて、前方を走行する車両との車間距離を一定に維持しながら必要に応じてドライバーへの警告を行うシステムである。CACC は ACC に加えて車車間通信によって他車の加減速情報を共有することで、より精密な車間距離制御を行うシステムである。CACC では ACC より短い車間距離での走行や制御の遅れによる車間の変動の少ない安定した走行が可能となる。衝突被害軽減ブレーキは車両の前方に取り付けられたカメラやレーダ等を利用して前方の障害物等を検知し運転者へ警告する。衝突・追突が避けられない場合にはブレーキの補助操作を行うシステムである。レーンキープアシストは車両の前方に取り付けられたカメラ等を利用して道路の白線等の走行環境を検知し、車両が走行車線を維持するようにハンドル操作を支援するシステムである。前方カメラの画像処理では道路と白線の色のコントラストと白線の長さを検知して車線を判断するため、輝度変化の大きなトンネル内や夜間でも白線の追従が可能となる。Intelligent Transportation Systems(以下 ITS)分野で様々な研究が行われている。例えば、ITS 研究の中で自動隊列走行研究は環境問題や交通問題の改善案として注目されている。自動隊列走行というのは、複数台の車が車間距離制御や車線認識制御、車間通信等の精密な制御により、一定の車間距離を維持しながら自動運転できる交通システムである。自動隊列走行は車間距離を短くして自動で走行できるため、後続車両は先頭車両より低い空気抵抗を車両正面に与えられる。これによって自動隊列走行する後続車両は空気抵抗を減すことができ、燃費の改善効果が期待できる。また、道路密度を高めることによる全般的な交通効率を高めることができる。自動隊列走行は車間距離を短くして走行するので、安全性と信頼性を高めるためには精密な制御が要求される[1-2]。自動隊列走行に関する研究は PROMOTE-CHAUFFEUR, KONVOI, SARTRE, PATH 等のプロジェクトによって全世界的に行われている[3-23]。特に、運輸用トラックの場合は、物流効率向上や燃費向上等の効果が期待される[24,25]。このような高度な車両制御を行うためには、プラントのパラメータと状態量を推定することが重要である。しかし一般の運輸用トラックは積載している荷の状態によって車体質量等のパラメータが大きく変わる。そのため、車両パラメータ同定に関する様々な研究が行われている。本論文と関係がある ITS 技術を利用し同定に関する研究が行われている。衛星からの GPS 信号を利用し、適応アルゴリズムとオ

ブザーバを用いて傾斜道路の角度の推定の研究がある[26,27]. 本論文で使用される Kalman filter アルゴリズムを利用し, 車体スリップ角・タイヤスリップ角の推定の推定によるコーナリングスティフネス推定, ヨー角速度とロール車両状態量推定等の研究がある[28-35]. 走行中に様々な手法で車両質量と重心位置が推定する研究が行われている. 車両質量に対しては傾斜路を走行時に逐次最小二乗法やモデル予測制御の手法, GPS を利用しエンジントルクを利用し実時間で車両質量を推定する研究がある[36-42]. 重心位置に対してはマルチモデルや逐次最小二乗法, 傾斜路上の車両の力学関係を利用し重心位置を推定する研究がある[43-49]. 操舵走行の安全性を高めるためヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスに関する同定に関する様々な研究が行われている. ヨー慣性モーメント, コーナリングスティフネス, 路面摩擦係数などのパラメータ推定する研究がある[50-53]. 実車の慣性モーメント等の車両パラメータを実測し調査した研究がある[54-57]. コーナリングスティフネスに関する様々な研究が行われている. 複数のオブザーバを利用しスリップ角とコーナリングスティフネスを推定する研究がある[58-60]. また, 逐次最小二乗法を用いてコーナリングスティフネスを推定する研究と横加速度とヨー角速度の計測によるコーナリングスティフネスを推定する研究がある[61-62]. GPS/INS センサを用いて状態推定量を求め, コーナリングスティフネスを推定する研究がある[63]. 様々な横ダイナミクス関連方程式を用いて Carsim を用いた数値解析でコーナリングスティフネスを推定する研究がある[64]. Plant とモデルの出力の誤差が最小になるコーナリングスティフネスを推定する研究がある[65]. GPS からの計測データを用いて適応オブザーバによるコーナリングスティフネスを推定する研究がある[66]. 逐次形最小二乗法を用いてヨーモーメントオブザーバによるコーナリングスティフネス, 横すべり角を推定する研究がある[67-71].

## 1.2 目的

運輸用トラックは貨物によって車体重量と車両の重心位置、ヨー慣性モーメント、コーナリングステイフネス等が大きく変わる。このようなトラックの積載状態によって車両パラメータが変わるため、運転状況による適切な車両制御を行うことが困難な場合が多い。この物流用トラックが自動隊列走行を行う場合は、運搬状況に合わせた正確な車両パラメータが要求される。しかし運転者が荷台の貨物の把握が難しいので、実時間の車両のパラメータの予測ができない場合が多く、精密な制御を行うためには実時間で車両パラメータを把握することが要求される。特にトラックの場合は積載状態による車体質量、車体重心位置、ヨー慣性モーメント、また、乗用車も含めた自動車全般においてコーナリングステイフネスも大きく変わるため、このパラメータを走行中に推定し、最適に走行制御を行うことが必要である。

本論文では大型トラックを対象に車体質量、車体重心位置、ヨー慣性モーメント、コーナリングステイフネスの4つのパラメータに対し、走行前もしくは走行中に推定できる同定手法を提案しその有効性を示す。車体質量と車体重心位置に関する同定は、トラックが走行する前に貨物の積載状態による車体質量と車体重心位置の推定ができると仮定すると、その推定値に合わせた精密な車両制御が可能になる。同定手法は荷重に対し車両のサスペンション反力から車体質量と車体重心位置を推定する手法で、実車実験と数値解析を通じてその有効性を確認する。車体質量と車体重心位置の関連研究では車両が走行時に逐次最小二乗法などを用いて走行しながら車体質量と車体重心位置を推定する研究がある[36-49]。この研究ではパラメータ値を推定するまで時間がかかり、道路条件による推定の制約がある同定手法である。それに対し本論文の研究では車両が出発する前に貨物の荷重によるサスペンションの変化量を計測することにより車両質量と重心位置の推定ができ、車両が出発から車両の状態に合う最適な走行制御を行うことができる。ヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスに関しては、車両が走行中に推定できる手法について検討する。車両の操舵走行中にGPS計測システムから絶対速度を計測し、Dual Kalman filter アルゴリズムによるヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスを走行中に同定できる手法を提案する。本研究と関連があるパラメータ推定研究がある[51-53]。この研究では複数の一般のセンサを利用し、複雑な非線形システムの運動方程式を利用しパラメータ同定が行われている。この同定性能が高いことに対し、発散する可能性とパラメータ推定値が収束するまでの時間問題で走行中の実時間でパラメータ同定を行うことは限界がある。そのため、オフラインでパラメータ同定が行われた。それに対し本論文の研究では走行中にヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスの推定ができる案を示す。同提案の有効性を確認するため、実車実験と数値解析を行う。本研究の目的は以下の通りである。

- 1) ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定の初期値として車両の車体質量と車体重心位置が必要であり，車体質量と車体重心位置の同定検討を行う．停車状態で任意の積載状態によるサスペンションの変化量を計測し，トラックの車体重量と車体重心位置の推定する同定手法を提案する．同定手法の妥当性を検討するため実車実験を行い同定手法の有効性を示す．
- 2) ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定に対し，**Dual Kalman Filter** アルゴリズムを用いて走行中にヨー慣性モーメント推定とコーナリングスティフネス推定，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の同定手法を提案する．同定手法の妥当性を確認するため，一般車両を利用した実車実験と大型トラックを利用した数値解析を行い，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定手法の有効性を示す．

### 1.3 構成

本論文の構成は以下のとおりである.

第 1 章では本研究の背景及び目的を述べる.

第 2 章では本研究で使用する **Dual Kalman filter** アルゴリズムの概要について述べる.

第 3 章ではパラメータ同定手法について述べる.

第 4 章では実験を通してパラメータ同定検討する.

第 5 章では数値解析を通して同定検討する.

第 6 章では同定検討結果の有効性を検討する.

第 7 章では本研究の結論を述べる.

## 第 2 章

### Dual Kalman filter アルゴリズム

## 2 Dual Kalman filter アルゴリズム

Dual Kalman filter(以下, DKF)を利用する同定手法は, 実際モデルと異なるシステムモデルから得られた状態推定値が実際の状態量に収束しながら, モデルのパラメータ推定値がその真値に収束することもできる再帰アルゴリズムである[50]. DKFは図 2.1 のように状態推定用 Kalman filter(以下, KF)とパラメータ推定用 KF で構成される. 状態推定用 KF で得られた状態推定値はパラメータ推定用 KF に入力され, パラメータの推定に使われる. 次に, パラメータ推定用 KF で求められたパラメータ推定値は状態推定用 KF にフィードバックされ, 次のステップの状態推定に使われる. この過程を繰り返して行い, 毎時刻ことの状態推定値とパラメータ推定値が求められる.

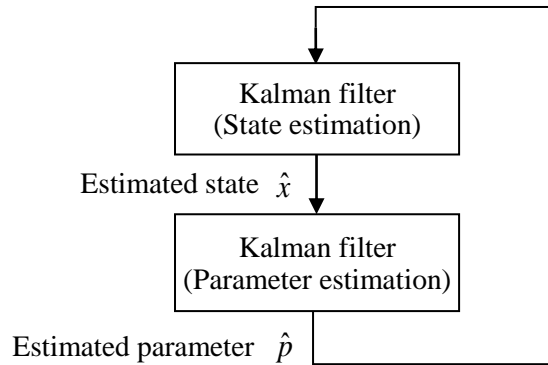


図 2.1 Dual Kalman filter アルゴリズム

### 2.1 Kalman filter アルゴリズムの概要

DKF アルゴリズムによる同定案を説明する前に, DKF の構成要素である Kalman filter アルゴリズムの概要を記述する[72-79]. Kalman filter アルゴリズムは再帰アルゴリズムで, 新たな時系列データが入るたびに状態推定値を更新できるものである. これはある時間までのデータをすべて蓄積しておく必要があった一括処理形式とは異なることで, すべてのデータを保存するのではなく, 直前の時刻の推定値のみを使って計算できるアルゴリズムであり, オンライン処理に適した方式である.

Kalman filter アルゴリズムの概要を記述するため, 式(2.1)-(2.2)の状態空間モデルを用いる.  $A$ ,  $B$ ,  $C$  はシステムモデルの行列で,  $x$  は状態変数,  $y$  は出力を示す.

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (2.1)$$

$$y = Cx \quad (2.2)$$

式(2.3)-(2.4)は式(2.1)-(2.2)を離散化した状態方程式である。式(2.3)-(2.4)の  $A_d$ ,  $B_d$ ,  $C_d$  は式(2.1)-(2.2)のシステムモデル  $A$ ,  $B$ ,  $C$  を離散化した行列である。 $x_k$  は状態ベクトルである。 $v_k$  は平均値 0, 分散  $\sigma_v^2$  の正規性白色雑音でシステム雑音である。 $w_k$  は平均値 0, 分散  $\sigma_w^2$  の正規性白色雑音で観測雑音である。 $v_k$  と  $w_k$  は互いに独立であると仮定する。 $u_k$  は入力を表す。

$$x_k = A_d x_{k-1} + B_d u_k + v_k \quad (2.3)$$

$$y_k = C_d x_k + w_k \quad (2.4)$$

**Kalman filter** を記述するため、二つの値を定義する。 $\hat{x}_k^-$  は事前推定値を示し、時刻  $k-1$  までのデータに基づいて、時刻  $k$  における状態量  $x_k$  の予測推定値を表す。 $\hat{x}_k$  は事後推定値を示し、時刻  $k$  において求める推定値を表す。

**Kalman filter** アルゴリズムは大きく予測過程と推定過程に構成される。予測過程は前時刻から現時刻になる際に前時刻の推定値  $\hat{x}_{k-1}$  が使われて、式(2.5)のように現時刻の推定値の予測値  $\hat{x}_k^-$  を求める。式(2.6)は観測値の予測値を示す。

$$\hat{x}_k^- = A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_k \quad (2.5)$$

$$\hat{y}_k^- = C_d \hat{x}_k^- \quad (2.6)$$

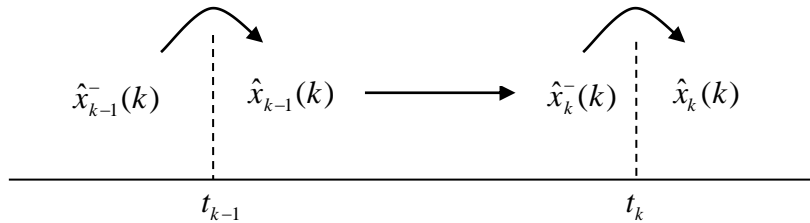


図 2.2 Kalman filter アルゴリズムの計算過程



$\hat{x}_k$  は  $k$  時刻の推定値を示す。Kalman filter アルゴリズムから得られる推定値  $\hat{x}_k$  の良さを計るため、その推定値と真値  $x_k$  との差である状態推定誤差  $\tilde{x}_k$  を式(2.7)のように定義する。

$$\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k \quad (2.7)$$

状態推定誤差  $\tilde{x}_k$  を測るため、平均二乗誤差による評価関数を用いる。式(2.8)の評価関数を最小にすることで、平均二乗誤差による評価関数を最小にする値を最適な推定値  $\hat{x}_k$  として求める。

$$J_k = E[\tilde{x}_k^2] \quad (2.8)$$

事後推定値は事前推定値  $\hat{x}_k^-$  と観測値  $y_k$  に関して式(2.9)の推定値を仮定する。 $G_k$  は  $n \times n$  行列、 $K_k$  は  $n$  次元ベクトルである。

$$\hat{x}_k = G_k \hat{x}_k^- + K_k y_k \quad (2.9)$$

ゲイン  $G_k$  と  $K_k$  を決定することに対し、式(2.10)のように事後状態推定誤差  $\tilde{x}_k$  は観測値  $y_k$  と直交することを利用する[72]。

$$E[\tilde{x}_k y_k] = 0 \quad (2.10)$$

式(2.11)は式(2.10)の展開過程を示す。現時刻の観測雑音  $w_k$  は前時刻の観測値  $y_k$  と無相関で  $E[w_k y_k] = 0$  になる。

$$\begin{aligned} E[\tilde{x}_k y_k] &= E[(x_k - \hat{x}_k) y_k] \\ &= E[(x_k - (G_k \hat{x}_k^- + K_k y_k)) y_k] \\ &= E[(x_k - G_k \hat{x}_k^- - K_k (C_d x_k + w_k)) y_k] \\ &= E[(x_k - G_k \hat{x}_k^- - K_k C_d x_k - K_k w_k) y_k] \\ &= E[(x_k - G_k \hat{x}_k^- - K_k C_d x_k) y_k] \end{aligned} \quad (2.11)$$

式(2.12)は式(2.11)の展開過程を示す．事前状態推定誤差  $\tilde{x}_k^-$  は観測値  $y_k$  と直交することで  $E[\tilde{x}_k^- y_k] = 0$  になる．

$$\begin{aligned}
E[\tilde{x}_k y_k] &= E[(x_k - G_k \hat{x}_k^- - K_k C_d x_k) y_k] \\
&= E[x_k y_k - G_k \hat{x}_k^- y_k - K_k C_d x_k y_k] \\
&= E[(I - G_k - K_k C_d) x_k y_k + G_k (x_k - \hat{x}_k^-) y_k] \\
&= E[(I - G_k - K_k C_d) x_k y_k + G_k \tilde{x}_k^- y_k] \\
&= E[(I - G_k - K_k C_d) x_k y_k] \\
&= (I - G_k - K_k C_d) E[x_k y_k]
\end{aligned} \tag{2.12}$$

ここで  $E[x_k y_k] \neq 0$  なので，成立するためには式(2.13)が求められる．式(2.13)を(2.9)式に代入すると式(2.14)のように求められ，推定値  $\hat{x}_k$  は式(2.15)のように求められる．

$$G_k = I - K_k C_d \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
\hat{x}_k &= G_k \hat{x}_k^- + K_k y_k \\
&= (I - K_k C_d) \hat{x}_k^- + K_k y_k \\
&= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_d \hat{x}_k^-)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_d \hat{x}_k^-) \tag{2.15}$$

現時刻の推定値と事前推定予測値の誤差  $\tilde{x}_k^-$  は，式(2.3)と式(2.5)を用いて，式(2.16)が求められる．

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_k^- &= x_k - \hat{x}_k^- \\
&= (A_d x_{k-1} + B_d u_k + v_k) - (A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_k) \\
&= A_d (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + v_k \\
&= A_d \tilde{x}_{k-1}^- + v_k
\end{aligned} \tag{2.16}$$

時刻  $k$  における事前誤差共分散行列  $P_k^-$  を定義する．時刻  $k-1$  の誤差共分散から時刻  $k$  の事前誤差共分散の更新については，式(2.16)の事前推定予測値の誤差を用いて式(2.17)のように事前誤差共分散  $P_k^-$  を求められる．現時刻での観測雑音  $v_k$  は状態値  $x_k$  若しくは事前推定誤差  $\hat{x}_k^-$  と無相関で  $E[x_k v_k] = 0$  と  $E[\hat{x}_k^- v_k] = 0$  になる．事前誤差共分散は  $k-1$  時刻の事後誤差共分散  $P_{k-1} = E[\tilde{x}_{k-1} \tilde{x}_{k-1}^T]$  とシステムノイズ共分散  $Q = E[v_k^2]$  を用いて，式(2.17)が求められる．

$$\begin{aligned}
P_k^- &= E[\tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T}] \\
&= E[(A_d \tilde{x}_{k-1}^- + v_{k-1})(A_d \tilde{x}_{k-1}^- + v_{k-1})^T] \\
&= E[(A_d \tilde{x}_{k-1}^- + v_{k-1})(\tilde{x}_{k-1}^{-T} A_d^T + v_{k-1}^T)] \\
&= E[A_d \tilde{x}_{k-1}^- \tilde{x}_{k-1}^{-T} A_d^T + v_{k-1} \tilde{x}_{k-1}^{-T} A_d^T + A_d \tilde{x}_{k-1}^- v_{k-1}^T + v_{k-1} v_{k-1}^T] \quad (2.17) \\
&= A_d E[\tilde{x}_{k-1}^- \tilde{x}_{k-1}^{-T}] A_d^T + E[v_{k-1} \tilde{x}_{k-1}^{-T}] A_d^T + A_d E[\tilde{x}_{k-1}^- v_{k-1}^T] + E[v_{k-1} v_{k-1}^T] \\
&= A_d E[\tilde{x}_{k-1}^- \tilde{x}_{k-1}^{-T}] A_d^T + E[v_{k-1} v_{k-1}^T] \\
&= A_d P_{k-1} A_d^T + Q
\end{aligned}$$

整理すると，時刻  $k-1$  の誤差共分散  $P_{k-1}$  から時刻  $k$  の誤差共分散予測値  $P_k^-$  への共分散行列の更新式は式(2.18)である．

$$P_k^- = A_d P_{k-1} A_d^T + Q \quad (2.18)$$

$\tilde{y}_k$  は式(2.19)のように時刻  $k$  での観測推定誤差を示す．推定値  $\hat{x}_k$  は式(2.6)と式(2.19)を用いて式(2.20)のようになる．推定誤差は式(2.20)を用いて式(2.21)のように求められる．

$$\begin{aligned}
\tilde{y}_k &= y_k - \hat{y}_k^- \\
&= C_d x_k + w_k - C_d \hat{x}_k^- \\
&= C_d \tilde{x}_k^- + w_k \quad (2.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_d \hat{x}_k^-) \\
&= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k^-) \\
&= \hat{x}_k^- + K_k \tilde{y}_k \quad (2.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_k &= x_k - \hat{x}_k \\
&= x_k - (\hat{x}_k^- + K_k \tilde{y}_k) \\
&= x_k - (\hat{x}_k^- + K_k (C_d \tilde{x}_k^- + w_k)) \\
&= x_k - \hat{x}_k^- - K_k (C_d \tilde{x}_k^- + w_k) \\
&= \tilde{x}_k^- - K_k (C_d \tilde{x}_k^- + w_k) \\
&= (I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k
\end{aligned} \tag{2.21}$$

観測値  $y_k$  と事後状態推定誤差  $\tilde{x}_k$  は  $E[\tilde{x}_k y_k] = 0$  になり，式(2.22)が求められる．現時刻  $k$  での観測雑音  $w_k$  は状態値  $x_k$  もしくは事前推定誤差  $\hat{x}_k^-$  と無相関であり， $E[w_k x_k] = 0$  と  $E[w_k x_k^-] = 0$  になる．

$$\begin{aligned}
E[\tilde{x}_k \hat{y}_k] &= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\} \{C_d \tilde{x}_k^- + w_k\}] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\} C_d \tilde{x}_k^- + \{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\} w_k] \\
&= E[(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- C_d \tilde{x}_k^- - K_k C_d w_k \tilde{x}_k^- + (I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- w_k - K_k w_k^2] \\
&= E[(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- C_d \tilde{x}_k^- - K_k w_k^2]
\end{aligned} \tag{2.22}$$

式(2.22)で事前誤差共分散  $P_k^- = E[\tilde{x}_k^- (\tilde{x}_k^-)^T]$  と測定ノイズ共分散  $R = E[w_k^2]$  を用いて，式(2.23)が求められる．式(2.23)で  $E[\tilde{x}_k \hat{y}_k] = 0$  を満足するためには式(2.22)にならなければならない．

$$\begin{aligned}
E[\tilde{x}_k \hat{y}_k] &= E[(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- C_d \tilde{x}_k^- - K_k w_k^2] \\
&= E[(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- (\tilde{x}_k^-)^T C_d^T] - E[K_k w_k^2] \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- C_d^T - R K_k
\end{aligned} \tag{2.23}$$

$$(I - K_k C_d) P_k^- C_d^T = R K_k \tag{2.24}$$

時刻  $k$  における事後誤差共分散行列  $P_k$  を定義する．時刻  $k$  の事前誤差共分散  $P_k^-$  から時刻  $k$  の事後誤差共分散  $P_k$  への更新については，式(2.21)の状態推定誤差  $\tilde{x}_k$  を用いて，式(2.25)のように事後誤差共分散  $P_k$  を求められる．現時刻  $k$  での観測雑音  $w_k$  は状態値  $\tilde{x}_k$  もしくは事前推定誤差  $\tilde{x}_k^-$  と無相関で  $E[\tilde{x}_k w_k] = 0$  と  $E[\tilde{x}_k^- w_k] = 0$  になる．

$$\begin{aligned}
P_k &= E[\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\} \{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\}^T] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- - K_k w_k\} \{\tilde{x}_k^{-T} (I - K_k C_d)^T - w_k^T K_k^T\}] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T} (I - K_k C_d)^T - K_k w_k \tilde{x}_k^{-T} (I - K_k C_d)^T \\
&\quad - (I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- w_k^T K_k^T + K_k w_k w_k^T g_k^T\}] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T} (I - K_k C_d)^T + K_k w_k w_k^T K_k^T\}] \\
&= E[\{(I - K_k C_d) \tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T} (I - K_k C_d)^T + K_k w_k w_k^T K_k^T\}] \\
&= (I - K_k C_d) E[\tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T}] (I - K_k C_d)^T + K_k E[w_k w_k^T] K_k^T
\end{aligned} \tag{2.25}$$

式(2.25)で事前共分散  $P_k^- = E[\tilde{x}_k^- (\tilde{x}_k^-)^T]$  と測定ノイズ共分散  $R = E[w_k^2]$  を表記すると、式(2.26)になる。

$$\begin{aligned}
P_k &= (I - K_k C_d) E[\tilde{x}_k^- \tilde{x}_k^{-T}] (I - K_k C_d)^T + K_k E[w_k w_k^T] K_k^T \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- (I - K_k C_d)^T + R K_k K_k^T \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- (I - C_d^T K_k^T) + R K_k K_k^T \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- - (I - K_k C_d) P_k^- C_d^T K_k^T + R K_k K_k^T
\end{aligned} \tag{2.26}$$

求めた式(2.26)に式(2.24)を代入すると次の式(2.27)になる。整理すると時刻  $k$  の事前誤差共分散  $P_k^-$  から誤差共分散推定値  $P_k$  への共分散行列の更新は、式(2.28)を通じて行われる。

$$\begin{aligned}
P_k &= (I - K_k C_d) P_k^- - (I - K_k C_d) P_k^- C_d^T K_k^T + R K_k K_k^T \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- - R K_k K_k^T + R K_k K_k^T \\
&= (I - K_k C_d) P_k^-
\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$P_k = (I - K_k C_d) P_k^- \tag{2.28}$$

Kalman ゲインは式(2.26)の事後誤差共分散を利用し、式(2.29)のように評価関数を最小にする  $K_k$  を求めるものである。

$$\begin{aligned}
J &= E[\tilde{x}_k \tilde{x}_k^T] \\
&= (I - K_k C_d) P_k^- - (I - K_k C_d) P_k^- C_d^T K_k^T + K_k R K_k^T \\
&= P_k^- - K_k C_d P_k^- - P_k^- C_d^T K_k^T + K_k C_d P_k^- C_d^T K_k^T + K_k R K_k^T \\
&= P_k^- - K_k C_d P_k^- - P_k^- C_d^T K_k^T + K_k [C_d P_k^- C_d^T + R] K_k^T
\end{aligned} \tag{2.29}$$

評価関数が最小になる  $K_k$  を求めるため、式(2.30)のように計算すると、評価関数が最小になれる  $K_k$  を式(2.31)のように求められる。 $K_k$  は Kalman filter ゲインを表す。求めたゲイン  $K_k$  は推定誤差が最小になるように毎時刻更新しながら最適の推定値を求めるため、ロバスト安定性を持つことができる。

$$\frac{\partial J_k}{\partial K_k} = -2P_k^- C_d^T + 2K_k [C_d P_k^- C_d^T + R] = 0 \tag{2.30}$$

$$K_k = \frac{P_k^- C_d^T}{C_d P_k^- C_d^T + R} \tag{2.31}$$

以上の記述した数式を整理した Kalman filter アルゴリズムを図 2.3 に表す.

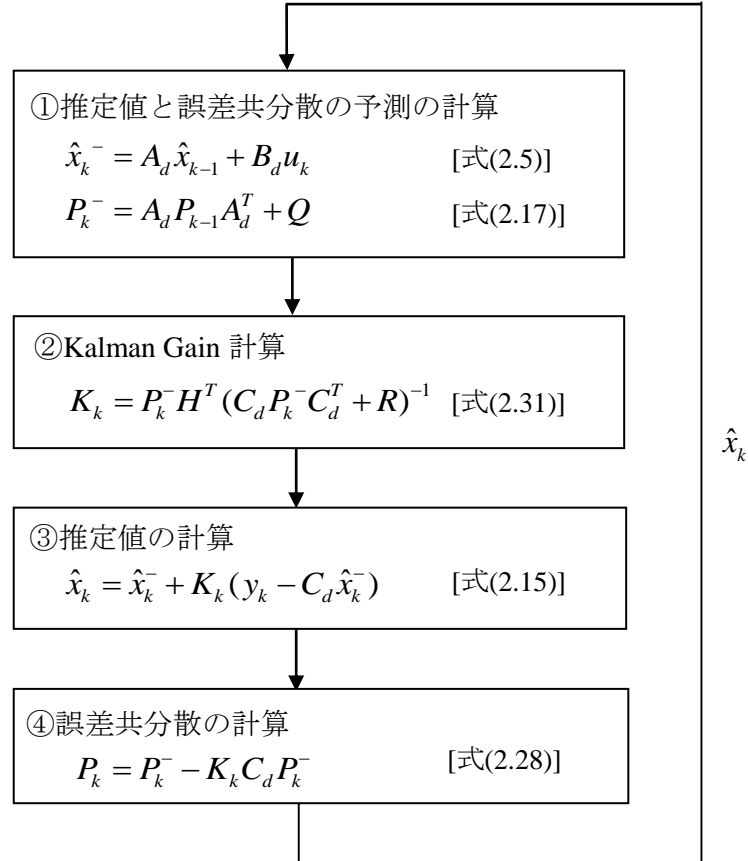


図 2.3 Kalman filter アルゴリズム

## 2.2 Dual Kalman filter アルゴリズムの概要

DKF アルゴリズムは式(2.32)-(2.35)を用いて状態推定とパラメータ推定を行う．式(2.32)-(2.33)のシステムモデル行列 $A_d$ ,  $B_d$ ,  $C_d$ は, 式(2.1)-(2.2)のシステムモデル行列 $A$ ,  $B$ ,  $C$ を離散化したシステムモデルで状態推定に使われる．添字 $k$ は時刻の番号を示す． $x_k$ は状態ベクトル,  $u_k$ は入力ベクトル,  $y_k$ は出力ベクトルを示す． $w_k$ と $v_k$ は状態推定用システムノイズと測定ノイズを示す．次に, 式(2.34)-(2.35)はパラメータ推定に使われる． $D_d$ はパラメータの出力モデル行列,  $h_k$ はパラメータの出力ベクトルを示す． $m_k$ と $n_k$ はパラメータ推定用システムノイズと測定ノイズを示す．

$$x_k = A_d x_{k-1} + B_d u_k + w_k \quad (2.32)$$

$$y_k = C_d x_k + v_k \quad (2.33)$$

$$p_k = p_{k-1} + m_k \quad (2.34)$$

$$h_k = D_d p_k + n_k \quad (2.35)$$

状態推定用 KF は式(2.36)-(2.40)のように構成される． $Q_s$ と $R_s$ は状態推定用システムノイズ共分散と測定ノイズ共分散を示す．式(2.36)の $\hat{x}_k^-$ は状態推定の予測値で, 前時刻で求めた状態推定値とシステムモデルから求められ, 前時刻の推定値が現在時刻になった時の値を予測する．式(2.37)の $P_k^-$ は状態推定の誤差共分散の予測値で, 前時刻の誤差共分散が現在時刻になった時の誤差共分散を予測する．式(2.38)の $K_k$ は状態推定の Kalman gain で, 状態推定値を誤差共分散の正規分布で最も確率が高い値に近づかせる値である．式(2.39)の $\hat{x}_k$ は状態推定値で, 式(2.36)の状態推定予測値に, 状態測定値と状態推定値の誤差と式(2.38)の $K_k$ を乗じた値を加えて, 誤差共分散の正規分布で最も確率が高い値となる状態推定値である．式(2.40)の $P_k$ は求めた状態推定値と誤差共分散の正規分布で確率が最も高い値との偏差を表す．この状態推定用 KF で求められた状態推定値は, 次のパラメータ推定用 KF の式(2.44)に入力され, パラメータ推定値を求める時に使われる．



$$\hat{x}_k^- = A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_k \quad (2.36)$$

$$P_k^- = A_d P_{k-1} A_d^T + Q_s \quad (2.37)$$

$$K_k = P_k^- C^T (C_d P_k^- C_d^T + R_s)^{-1} \quad (2.38)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_d \hat{x}_k^-) \quad (2.39)$$

$$P_k = (I - K_k C_d) P_k^- \quad (2.40)$$

パラメータ推定用 **Kalman filter** は式(2.41)-(2.45)のように構成される． $Q_p$  と  $R_p$  はパラメータ推定用システムノイズ共分散と測定ノイズ共分散を示す．式(2.41)の  $\hat{p}_k^-$  はパラメータ推定の予測値で，前ステップで求めたパラメータ推定値が入力される．式(2.42)の  $U_k^-$  はパラメータ推定の誤差共分散の予測値で，前時刻の誤差共分散とシステムノイズ共分散  $Q_p$  を加えて現在時刻の誤差共分散を予測する．式(2.43)の  $G_k$  はパラメータ推定用 **Kalman gain** で，パラメータ推定値を正規分布で最も確率が高い値に近づかせる値である．式(2.44)の  $\hat{p}_k$  はパラメータ推定値で，式(2.41)のパラメータ推定予測値に，状態測定値と状態推定値の誤差と式(2.43)の  $G_k$  を乗じた値を加えて，誤差共分散の正規分布で確率が最も高い値となるパラメータ推定値を求める．式(2.45)の  $U_k$  は求めたパラメータ推定値と誤差共分散の正規分布で確率が最も高い値との偏差を表す．このパラメータ推定用 **KF** で求められたパラメータ推定値は式(2.1)にフィードバックされ，システムモデルが更新される．次のステップ時間の状態推定が行われる．この過程を繰り返して行うことで，毎時刻ごとの状態推定値とパラメータ推定値を求める．この過程を図 2.4 のように表す．

$$\hat{p}_k^- = \hat{p}_{k-1} \quad (2.41)$$

$$U_k^- = U_{k-1} + Q_p \quad (2.42)$$

$$G_k = U_k^- D_d^T (D_d U_k^- D_d^T + R_p)^{-1} \quad (2.43)$$

$$\hat{p}_k = \hat{p}_k^- + G_k (y_k - C_d \hat{x}_k) \quad (2.44)$$

$$U_k = (I - G_k D_d) U_k^- \quad (2.45)$$

**Dual Kalman filter** アルゴリズムは計測値と状態推定値の誤差を最小になるようにリカッチ方程式の理論を用いて状態の推定用 **Kalman filter** とパラメータ推定用 **Kalman filter** が毎時刻更新しながら最適な状態推定値とパラメータ推定値を求めることでロバスト安定性を持つ推定ができるものである。

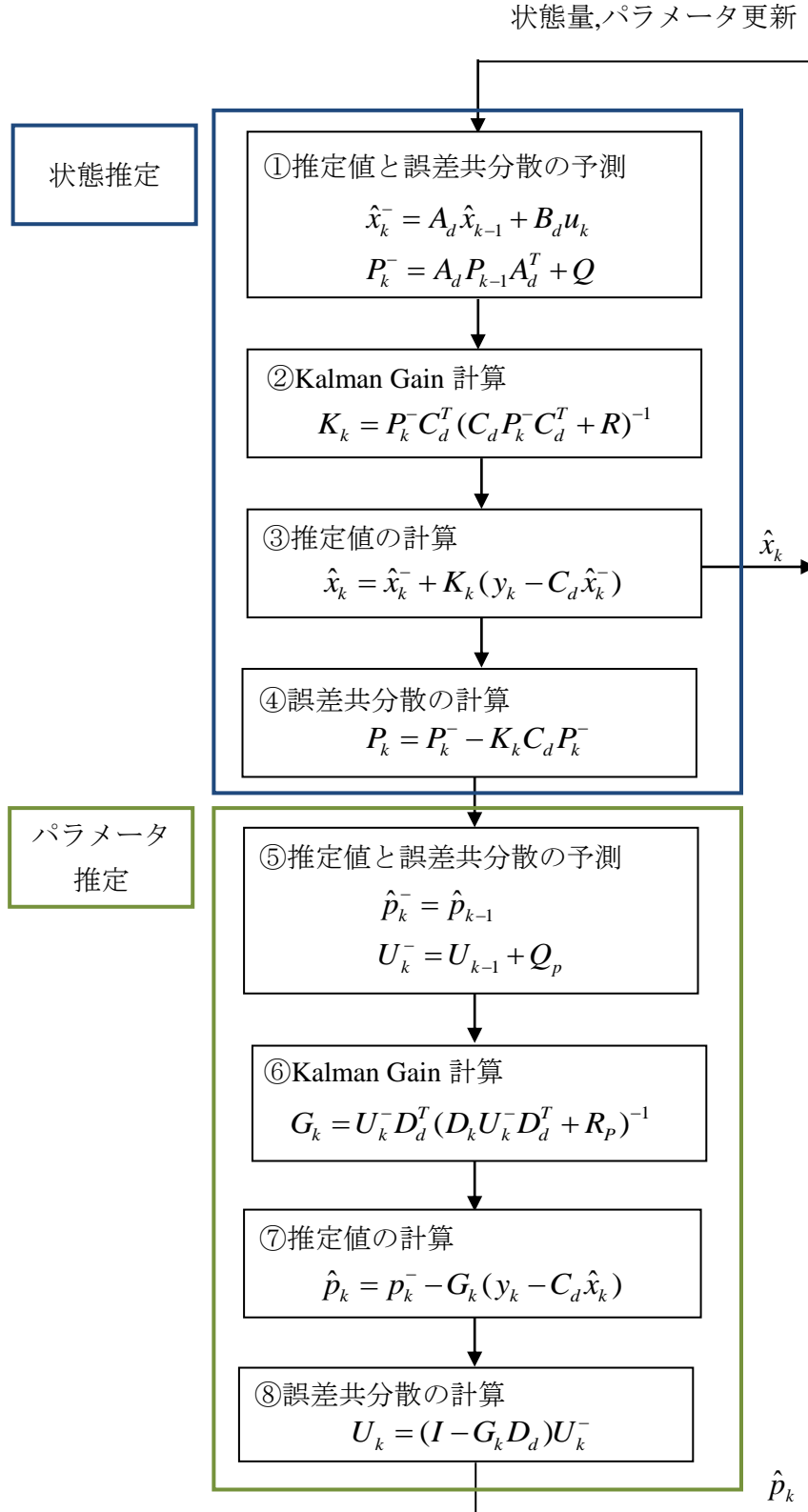


図 2.4 Dual Kalman filter アルゴリズムの計算流れ

## 第 3 章

### 同定手法

### 3.1 パラメータ同定システム

本論文では車両パラメータ中で車体質量と車体重心位置，ヨー慣性モーメント，コーナリングスティフネスに対し，パラメータ同定案を提案しその有効性を示す．一般車両の場合，この車両パラメータ中でコーナリングスティフネスは車両の走行安全性を高めるために重要なパラメータである．貨物の状態が多く変わる運輸用トラックの場合，車体質量と車体重心位置，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスが，走行制御と操舵制御に重要なパラメータである．

本論文の研究では，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定検討に初期値として車体質量と車体重心位置が使われるので，車体質量と車体重心位置を求めるための同定検討を行う．走行する前の停車時に貨物の積載状態による車体質量と車体重心位置の推定ができると，車両が出発から推定値に合わせた精密な車両制御が可能になるため，静的に同定できる手法について検討を行う．ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスに関する同定は，車両が走行しながら未知のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスが推定できる手法で，車両の操舵走行中に GPS 計測システムから計測する車両走行データを用いてヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスが走行中に同定できる手法について検討を行う．図 3.1 は本論文の同定研究のシステム構成を示す．走行前にサスペンション変化量計測し車体質量同定と車体重心位置同定を行う．車両が出発後，走行中にヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定を行う仕組みである．

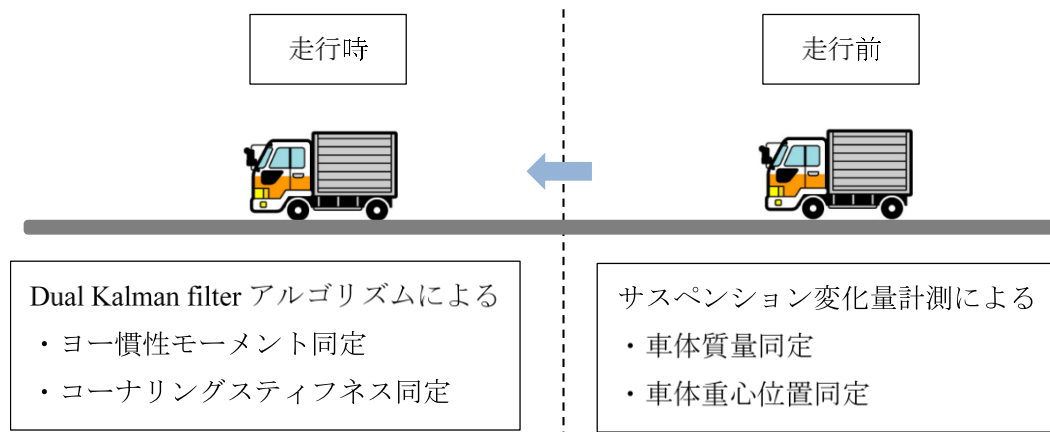


図 3.1 同定システムの構成

## 3.2 運動方程式

### 3.2.1 大型車両の等価二輪モデルの運動方程式

大型車両の同定検討は3軸の大型トラックを対象にする．検討用車両モデルは図3.2のように3軸の等価二輪車モデルを用いる．

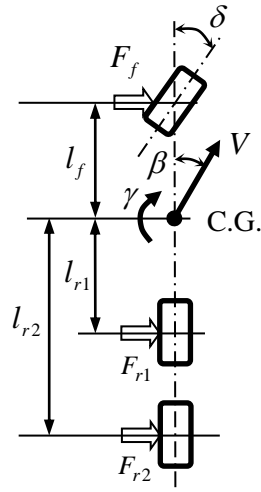


図 3.2 3 軸等価二輪モデル

等価二輪モデルを用いた車両の運動方程式は式(3.1)と式(3.2)で示することができる[80]．式(3.1)-(3.2)の車両の運動方程式を基に，式(3.3)-(3.8)のように状態方程式を導くことができる．実舵角  $\delta$  は入力， $y$  は出力を示す．

$$\begin{aligned}
 MV(\dot{\beta} + \gamma) = & 2K_f\left(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma\right) + 2K_{r1}\left(-\beta + \frac{l_{r1}}{V}\gamma\right) \\
 & + 2K_{r2}\left(-\beta + \frac{l_{r2}}{V}\gamma\right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 J\dot{\gamma} = & 2K_f\left(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma\right)l_f - 2K_{r1}\left(-\beta + \frac{l_{r1}}{V}\gamma\right)l_{r1} \\
 & - 2K_{r2}\left(-\beta + \frac{l_{r2}}{V}\gamma\right)l_{r2}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (3.3)$$

$$y = Cx \quad (3.4)$$

$$x = [\gamma \quad \beta]^T \quad (3.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2}{JV}(K_f l_f^2 + K_{r1} l_1^2 + K_{r2} l_2^2) & -\frac{2}{J}(K_f l_f - K_{r1} l_1 - K_{r2} l_2) \\ -\frac{2}{MV^2}(K_f l_f - K_{r1} l_1 - K_{r2} l_2) - 1 & -\frac{2}{MV}(K_f + K_{r1} + K_{r2}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2}{J} K_f l_f \\ \frac{2K_f}{MV} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.2.2 一般乗用車の等価二輪モデルの運動方程式

一般乗用車の同定検討は図 3.3 のように等価二輪モデルを用いる．二輪等価モデルの車両の運動方程式は式(3.9)-(3.10)である．

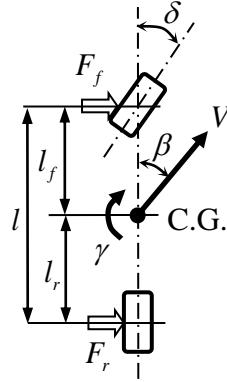


図3.3 2軸等価二輪モデル

$$MV(\beta + \gamma) = 2K_f(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma) + 2K_r(-\beta + \frac{l_r}{V}\gamma) \quad (3.9)$$

$$J\dot{\gamma} = 2K_f(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma)l_f - 2K_r(-\beta + \frac{l_r}{V}\gamma)l_r \quad (3.10)$$

式(3.9)-(3.10)の車両の運動方程式を基に，式(3.11)-(3.16)のように状態方程式を導くことができる．実舵角  $\delta$  は入力， $y$  は出力を示す．

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (3.11)$$

$$y = Cx \quad (3.12)$$

$$x = [\gamma \quad \beta]^T \quad (3.13)$$



$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2}{JV}(K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{J}(K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{MV^2}(K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{MV}(K_f l_f + K_r l_r) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2}{J} K_f l_f \\ \frac{2}{MV} K_f \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

### 3.2.3 カントのある道路上を走行する一般乗用車の等価二輪モデルの運動方程式

車両が道路上を走行時には平道路だけではなくカントのある道路でコーナリングも行う。道路条件に従って車両ダイナミクスは影響を受ける。そのため車両パラメータの同定はどの道路条件にも適用ができることが要求される。カントのある道路上を走行時の同定について検討が必要であるため、同定検討を行う。パラメータ同定の検討用車両モデルとして図3.4のように等価二輪モデルを用いる。図3.5はカントがあるコーナリング時の車に関する力学関係である。

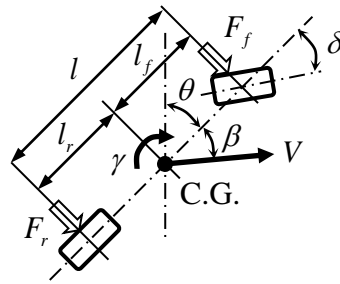


図3.4 等価二輪モデル

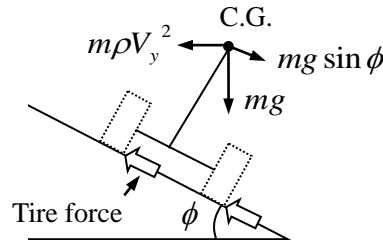


図3.5 カント角による力学関係

二輪等価モデルの車両の運動方程式は式(3.17)-(3.18)である[70,24]。式(3.17)-(3.18)の車両の運動方程式を基に、式(3.19)-(3.25)のように状態方程式を導くことができる。実舵角 \$\delta\$ は入力、\$y\$ は出力を示す。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = 2K_f(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma) + 2K_r(-\beta + \frac{l_r}{V}\gamma) + Mg \sin \phi \quad (3.17)$$

$$J\dot{\gamma} = 2K_f(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma)l_f - 2K_r(-\beta + \frac{l_r}{V}\gamma)l_r \quad (3.18)$$

$$\dot{x} = Ax + B\delta + E \sin \phi \quad (3.19)$$

$$y = Cx \quad (3.20)$$

$$x = [\gamma \quad \beta]^T \quad (3.21)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2}{JV}(K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{J}(K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{MV^2}(K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{MV}(K_f l_f + K_r l_r) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2}{J} K_f l_f \\ \frac{2}{MV} K_f \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{g}{V} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

### 3.3 自動隊列走行の制御

自動隊列走行の制御は車間距離制御と軌道追従制御が主な制御である．この制御の概要を記述する．

#### 3.3.1 車間距離制御の概要

複数台の車両が図 3.6 のように自動隊列走行を行っている想定する．道路上に各車両の重心位置を  $x_i$  とすると，車間距離  $d$  は次の式(3.26)で示すことが出来る．ここですべて車両の長さ  $L$  は同じである[81]．車両運動は式(3.27)-(3.28)のように表現される． $u_i$  は  $i$  番目の車両の駆動力である．

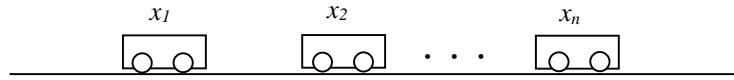


図 3.6 自動隊列走行

$$d = x_{i-1} - x_i - L \quad (3.26)$$

$$\dot{x}_i = v_i \quad (3.27)$$

$$\dot{v}_i = -\frac{1}{T_i} v_i + \frac{K_i}{T_i} u_i \quad (3.28)$$

制御の目的は各車両の理想的な速度を  $v_{1d}$  及び  $v_{2d}$  とする．リアプノフ関数の候補を式(3.29)に決めて，時間微分すると式(3.30)になる．ここで  $k_1$ ,  $k_2$  は正数ゲインとする．

$$V = \frac{k_{i-1}}{2} (x_{i-1} - x_i - L - d)^2 + \frac{k_i}{2} (v_{i-1} - v_{i-1d})^2 + \frac{k_i}{2} (v_i - v_{id})^2 \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & k_{i-1} (x_{i-1} - x_i - L - d) (v_{i-1} - v_i) + k_i (v_{i-1} - v_{i-1d}) \left( -\frac{1}{T_{i-1}} v_{i-1} + \frac{K_{i-1}}{T_{i-1}} u_{i-1} - \dot{v}_{i-1d} \right) \\ & + k_i (v_i - v_{id}) \left( -\frac{1}{T_i} v_i + \frac{K_i}{T_i} u_i - \dot{v}_{id} \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

式(3.30)で、 $\dot{\mathbf{V}} \leq \mathbf{0}$ になる入力について次のように求められる．式(3.31)は先頭車( $i=1$ )の入力，式(3.32)は中間車の入力( $i \neq 1, n$ )，式(3.33)は最後尾の車の入力( $i=n$ )を表す．

$$u_1 = \frac{T_1}{K_1} \left( \frac{1}{T_1} v_1 + \dot{v}_{1d} - c_1(v_1 - v_{1d}) \right) + \frac{K_1}{K_2} (x_1 - x_2 - L - d) \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} u_i = & \frac{T_i}{K_i} \left( \frac{1}{T_i} v_i + \dot{v}_{id} - c_i(v_i - v_{id}) \right) + \frac{K_{i-1}}{K_i} (x_{i-1} - x_i - L - d) \\ & - \frac{K_i}{K_{i+1}} (x_i - x_{i+1} - L - d) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$u_n = \frac{T_n}{K_n} \left( \frac{1}{T_n} v_n + \dot{v}_{nd} - c_n(v_n - v_{nd}) \right) + \frac{K_{n-1}}{K_n} (x_{n-1} - x_n - L - d) \quad (3.33)$$

### 3.3.2 軌道追従制御の概要

軌道追従制御は図 3.7 のように仮想の参照車両が仮想の軌道上を走行することを合わせて実車両が走行できるように制御するものである．仮想の参照車両から見た実車両との誤差として式(3.34)のように  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  に表現できる．その両辺を時間微分したものを 式(3.35) に示す[82].

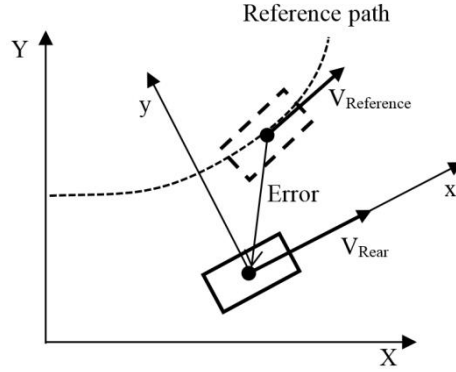


図 3.7 軌道追従制御の誤差

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \beta) & \sin(\theta + \beta) & 0 \\ -\sin(\theta + \beta) & \cos(\theta + \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ (\theta + \beta) - (\theta_r + \beta_r) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos e_3 - V_r + e_2 \omega_r \\ V \sin e_3 - e_1 \omega_r \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$e_1 = 0$ ,  $\dot{e}_1 = 0$  を式(3.35)に代入すると，参照車両の車速は式(3.36)になる．また，誤差微分方程式は式(3.37)になる．

$$V_r = V \cos e_3 + e_2 \omega_r \quad (3.36)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin e_3 \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

リアプノフ関数の候補を式(3.38)のように定義する. 軌道追従制御の入力を式(3.39)のように決めると式(3.40)が $\dot{V} \leq 0$ となり安定性能が保される.

$$V = \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1 - \cos e_3}{K_2} \quad (3.38)$$

$$\delta_c = \frac{MV}{2K_f} \left\{ - \left( -\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta \right) + \omega_r - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \right\} \quad (3.39)$$

$$\dot{V} = \frac{\sin e_3}{K_2} \left( -\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta + \frac{2K_f}{MV} \delta - \omega_r + K_2 e_2 V \right) \quad (3.40)$$

### 3.4 車体質量と車体重心位置の同定手法

提案する同定手法は車両の各サスペンションに掛かる荷重と荷重による各サスペンションの変化量を計測し，車体質量と車体重心位置を同定する手法である．この同定手法では車体のフレームの曲げ剛性は考慮しないことに想定する．サスペンションの種類による特性を検討するため，2種類のサスペンションで構成されている4軸の大型トラックを用いて同定案の検討を行う．実験車両で前輪の1軸と2軸はリーフサスペンションで，後輪の3軸と4軸はエアサスペンションに構成される．荷重によるリーフサスペンションにおいてはサスペンション変位量，エアサスペンションにおいてはベローズ圧でサスペンションの変化量の計測結果を用いて同定を行う．タイヤの質量は車体質量に含まれている固定質量で車体質量と車体重心位置の同定に影響しないものである．車体質量と車体重心位置の同定に使われた手法は，図3.8と図3.9の車両モデルを基に求められた式(3.41)-(3.43)を用いて推定することができる．図3.8の $F_1 \sim F_8$ は各サスペンションから車体に加わる反力を示す． $F_w$ は車体重心位置の荷重を示す．図3.9は反力が掛かる位置と車体重心位置を示す．車体重量は式(3.41)のようにサスペンション反力の合計値から推定することができる．また，車両の縦方向のサスペンションの座標を $x_i$ とすると，重心位置 $XX$ は式(3.42)によって求めることができる．また，車両の横方向の座標を $y_i$ とすると，重心位置 $YY$ は式(3.43)によって導かれることができる．

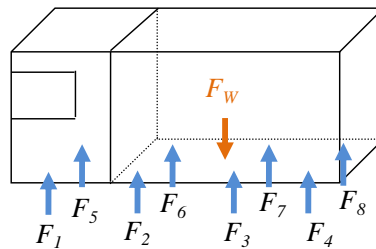


図 3.8 荷重による反力

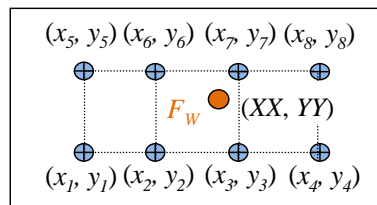


図 3.9 反力の位置



$$F_W = \sum_{i=1}^8 F_i \quad (3.41)$$

$$XX = \frac{\sum_{i=1}^8 F_i \cdot x_i}{F_W} \quad (3.42)$$

$$YY = \frac{\sum_{i=1}^8 F_i \cdot y_i}{F_W} \quad (3.43)$$

リーフサスペンションは図 3.10 のように複数の鋼の板を重ねたばねで構成されている。鋼板の曲げに対する弾力を利用し、路面からの振動を吸収する。リーフサスペンションの反力とサスペンションの変位量は比例関係である。リーフサスペンションはトラックの懸架装置に多く使われているものである。

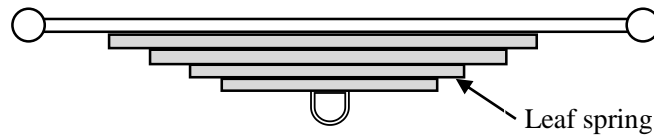


図 3.10 リーフサスペンション

エアサスペンションとは空気の圧縮弾性を利用するもので、走行中に荷台へ加わる衝撃や振動を効果的に吸収し、荷崩れや荷傷みを大幅に低減することができるものである。平常時はリーフスプリングよりも軟らかいばね係数の設定ができるし、積載時は強い反発力を得られることもできる。また、金属ばねでは吸収しきれない微細な振動を減衰できる。空気の量を変えることで任意にばね係数や車高を設定できるが、図 3.11 のように空気源や弁装置、車高のセンシング等が必要のためシステムとしては複雑である。ベローズ圧センサは図 3.11 のようにベローズ室内の空圧の計測するためベローズ室の上端部に設置され、空圧を計測する。

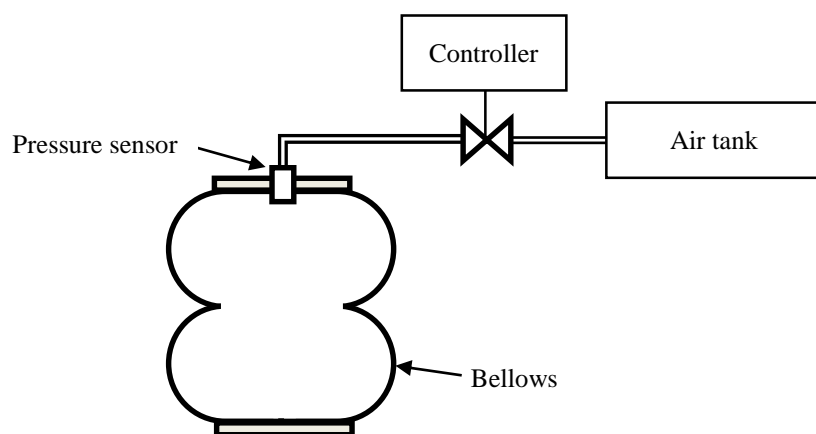


図 3.11 ベローズ式エアサスペンション

### 3.5 Dual Kalman filter によるパラメータ推定手法

#### 3.5.1 ヨー慣性モーメント推定手法

DKF アルゴリズムを用いて、走行中に未知の車両パラメータであるヨー慣性モーメントを推定する手法を提案する．この手法は式(3.6)と式(3.7)の状態方程式の行列に未知のパラメータを含んでいることになり，全ての条件においてパラメータ推定が安定して得られることではないことを前提で推定を行う．また，車体のフレームの曲げ剛性は考慮しないことに想定する．パラメータ推定に使われる状態変数は式(3.44)のようにヨー角速度 $\gamma$ と車体スリップ角 $\beta$ にする．また，パラメータ変数は式(3.45)のようにヨー慣性モーメント $J$ とコーナリングステイフネス $K$ にする．ヨー慣性モーメント推定の場合はコーナリングステイフネス値が既知として一定であると想定する．図 3.12 のように DKF アルゴリズムで，パラメータ推定用 Kalman filter でヨー慣性モーメントの推定値 $\hat{J}$ のみフィードバックされ，次の時刻の状態推定を行う仕組みにする．DKF アルゴリズムによるヨー慣性モーメント推定する場合，2.2 節の DKF アルゴリズムでパラメータの出力モデル行列 $D_d$ ，状態推定用ノイズ共分散 $Q_s$ と $R_s$ ，パラメータ推定用ノイズ共分散 $Q_p$ と $R_p$ は推定する前にチューニングし値を決めてパラメータ推定を行う．

$$x = [\gamma \quad \beta]^T \quad (3.44)$$

$$p = [J \quad K]^T \quad (3.45)$$

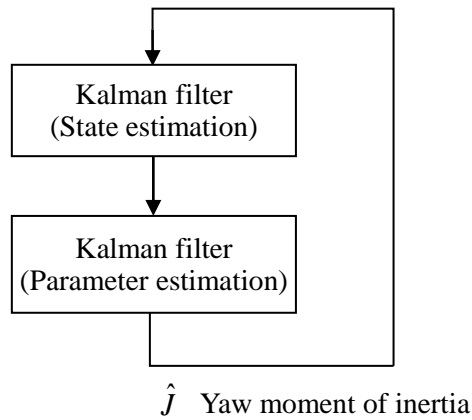


図 3.12 ヨー慣性モーメント推定のアルゴリズム

### 3.5.2 コーナリングスティフネス同定手法

DKF アルゴリズムを用いて，走行中に未知の車両パラメータであるコーナリングスティフネスを推定する手法を提案する．この同定手法では車体のフレームの曲げ剛性は考慮しないことに想定する．パラメータ推定に使われる状態変数は式(3.44)のようにヨー角速度 $\gamma$ と車体スリップ角 $\beta$ にする．また，パラメータ変数はコーナリングスティフネス $K$ にする．コーナリングスティフネス推定の場合はヨー慣性モーメント値が既知として一定であると想定する．図 3.13 のように DKF アルゴリズムで，パラメータ推定用 Kalman filter でコーナリングスティフネスの推定値  $\hat{K}$  のみフィードバックされ，次の時刻の状態推定を行う仕組みにする．DKF アルゴリズムによるヨー慣性モーメント推定する場合，2.2 節の DKF アルゴリズムでパラメータの出力モデル行列  $D_d$ ，状態推定用ノイズ共分散  $Q_s$  と  $R_s$ ，パラメータ推定用ノイズ共分散  $Q_p$  と  $R_p$  は推定する前にチューニングし，値を決めてパラメータ推定を行う．

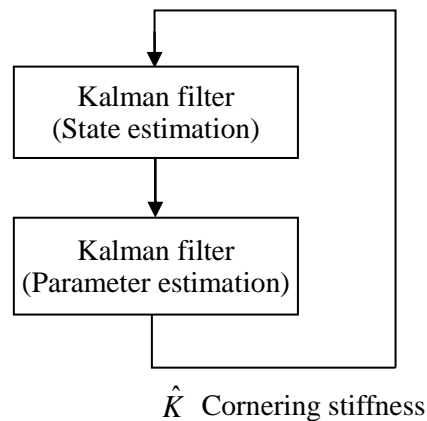


図 3.13 コーナリングスティフネス推定のアルゴリズム

### 3.5.3 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定手法

DKF アルゴリズムを用いて，走行中に未知の車両パラメータであるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスを同時同定する手法を提案する．この同定手法では車体のフレームの曲げ剛性は考慮しないことに想定する．パラメータ推定に使われる状態変数は式(3.44)のようにヨー角速度 $\dot{\gamma}$ と車体スリップ角 $\beta$ にする．また，パラメータ変数はヨー慣性モーメント $J$ とコーナリングスティフネス $K$ にする．図 3.14 のように DKF アルゴリズムで，パラメータ推定用 Kalman filter でヨー慣性モーメントの推定値 $\hat{J}$ とコーナリングスティフネスの推定値 $\hat{K}$ が同時にフィードバックされ，次の時刻の状態推定を行う仕組みにする．DKF アルゴリズムによるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスを推定する場合，2.2 節の DKF アルゴリズムでパラメータの出力モデル行列 $D_d$ ，状態推定用ノイズ共分散 $Q_s$ と $R_s$ ，パラメータ推定用ノイズ共分散 $Q_p$ と $R_p$ は推定する前にチューニングし値を決めてパラメータ推定を行う．

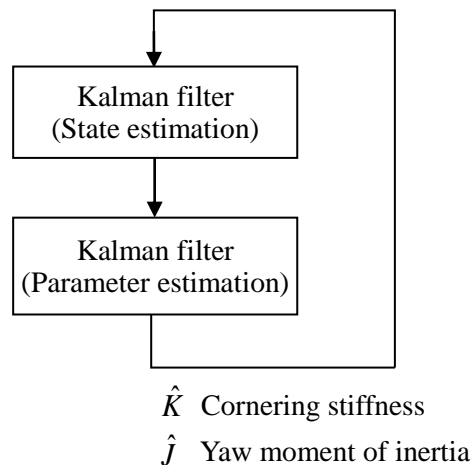


図 3.14 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定のアルゴリズム

### 3.6 パラメータ推定値の予測手法

同定案によるパラメータ推定値に対し，より速く収束値を求めるため，図 3.15 のようにパラメータ推定値の予測手法を提案する．図 3.15 はパラメータの推定値の予測の例で，この予測手法は二つの DKF を用いて真値より低い初期値と真値より高い初期値に対し，同時に DKF によるパラメータ推定を行い，予測値を求める手法である．横軸はレーンチェンジの回数で，縦軸はパラメータの推定値を示す．レーンチェンジを  $n$  回目行う時に，真値より高い初期値から求められたパラメータ推定値  $P_{H(n)}$  と，真値より低い初期値から求められたパラメータ推定値  $P_{L(n)}$  が求められる．この  $P_{H(n)}$  及び  $P_{L(n)}$  と，レーンチェンジを  $n-1$  回目行った時に求められた  $P_{H(n-1)}$  及び  $P_{L(n-1)}$  と共に，式(3.46)-(3.48)のようにパラメータ推定値の傾向を方程式に具現することができる．式(3.46)-(3.47)で  $x$  は任意のパラメータである．式(3.46)は真値より高い初期値から求められたパラメータ推定値  $P_{H(n)}$  と  $P_{H(n-1)}$  を利用した方程式である．式(3.47)は真値より低い初期値から求められたパラメータ推定値  $P_{L(n)}$  と  $P_{L(n-1)}$  を利用した方程式である．この式(3.46)-(3.47)を用いて式(3.48)のように  $n$  回目のレーンチェンジ時のパラメータ推定予測値  $P_{Pre(n)}$  が求められる．推定予測値  $P_{Pre(n)}$  は  $n$  回目のレーンチェンジを行ってパラメータ推定値を求めると予測値が計算されることである．

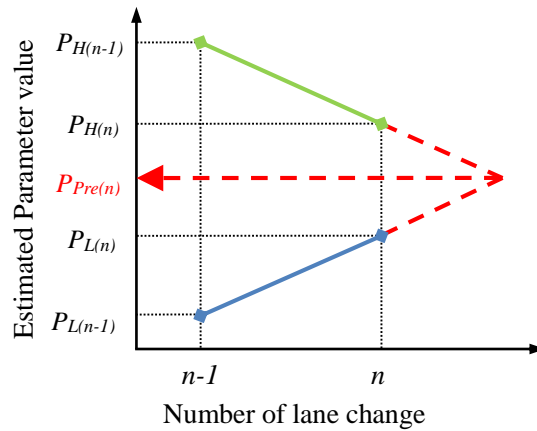


図 3.15 推定パラメータの予測

$$P_{Pre(n)} = (P_{H(n)} - P_{H(n-1)})x + P_{H(n-1)} \quad (3.46)$$

$$P_{Pre(n)} = (P_{L(n)} - P_{L(n-1)})x + P_{L(n-1)} \quad (3.47)$$

$$P_{Pre(n)} = \frac{-\left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)P_{L(n-1)} + P_{H(n-1)}}{1 - \left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)} \quad (3.48)$$

## 第 4 章

### 実験



## 4.1 車体質量と車体重心位置の推定に関する実験

### 4.1.1 実験車両

車体質量と車体重心位置の推定実験を行うため，実験用車両は図 4.1 のように最大重量 25ton 級の 4 軸車を利用する．実験車両の仕様は表 4.1 に示す．



図 4.1 実験車両

表 4.1 実験車両の仕様

満車時の重量		25 ton
空車時の重量		13 ton
車両の長さ		11.99 m
車両の高さ		3.34 m
トレット		2.49 m
ホイールベース	1 軸から 2 軸まで	1.85 m
	1 軸から 3 軸まで	6.23 m
	1 軸から 4 軸まで	7.43 m
サスペンション	1 軸， 2 軸	リーフ式
	3 軸， 4 軸	エア式

#### 4.1.2 計測センサ

実車実験を行うため、図 4.2 のように 3 種類のセンサを実験車両に設置した。トラックに荷物を積載する際に車両の各輪の荷重を計測するため、図 4.3 のようにタイヤと地面の間に Bridgestone HS1005 の Force Plate センサ(Sensor 1)を設置した。Force Plate センサの測定原理は荷重に対しその反力を計測することである。荷重による各サスペンションの垂直方向の変位量を計測するため、図 4.4 のように Mutoh D-5400 Linear encoder のストロークセンサ(Sensor 2)をサスペンションに設置した。ストロークセンサの原理は車体にセンサを装着しサスペンションとセンサのワイヤを連結する。荷重によるサスペンションが変化すると、センサのワイヤの変動量が Linear encoder 信号に出力されてサスペンションの変位量を計測することである。後輪の 3, 4 軸はエアサスペンションであり、荷重によるベローズ圧の変化を計測するため図 4.5 のようにベローズ圧力センサ(Sensor 3)を設置した。ベローズ圧力センサ計測原理は一般圧力センサのように空圧を計測するものと同様である。

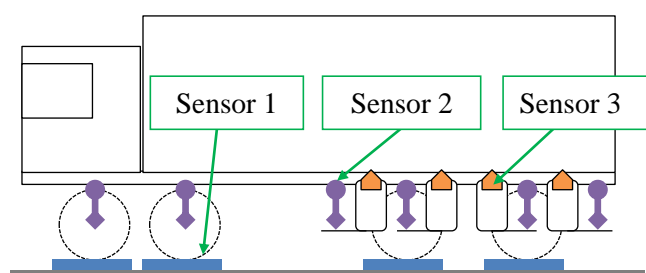


図 4.2 測定センサ



図 4.3 Force Plate センサ (Sensor 1)



図 4.4 ストロークセンサ (Sensor 2)



図 4.5 ベローズ圧力センサ (Sensor 3)

#### 4.1.3 ストローク計測システム

荷重による各サスペンションの変位量を計測するため、図 4.6 のような計測システムを構築した。ストローク計測システムはサスペンションの変位量が Linear encoder の信号に変換されて CONTEC 社製の CNT32-8M のカウンタに入力される。カウンタで求めたカウント信号は Labview で設計されたシステムを通じてノートパソコンに保存する仕組みである。

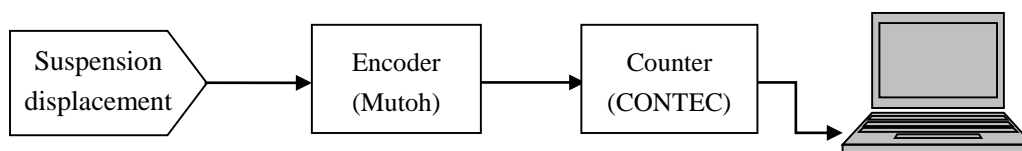


図 4.6 サスペンションのストローク計測システム

#### 4.1.4 実験方法

車体質量と車体重心位置の推定実験はつくば市にある産業技術総合研究所の北サイトでを行った。実験は車両が停車時に積載状態の変化によるサスペンションの変化を計測する実験である。実験車両に荷重を加えるため、トラックの荷台の右側ウィングを開けた状態で、図4.7のように1tonの重り12個をトラックの荷台内に載せて総重量25tonの状態を作った。

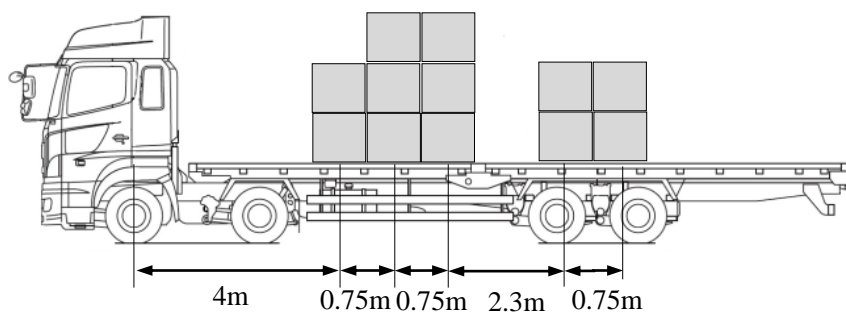


図 4.7 重りの位置

実車実験は荷台上の重り12個に対し、図4.8のようにフォークリフトを用いて、重り1個ずつ降ろしながらサスペンション変位量とベローズ圧を計測した。



図 4.8 実験方法

荷台の初期荷重 12ton に対し、荷重 12ton から 0ton まで 1 個ずつ降ろす順番は図 4.9 と図 4.10 に示す。

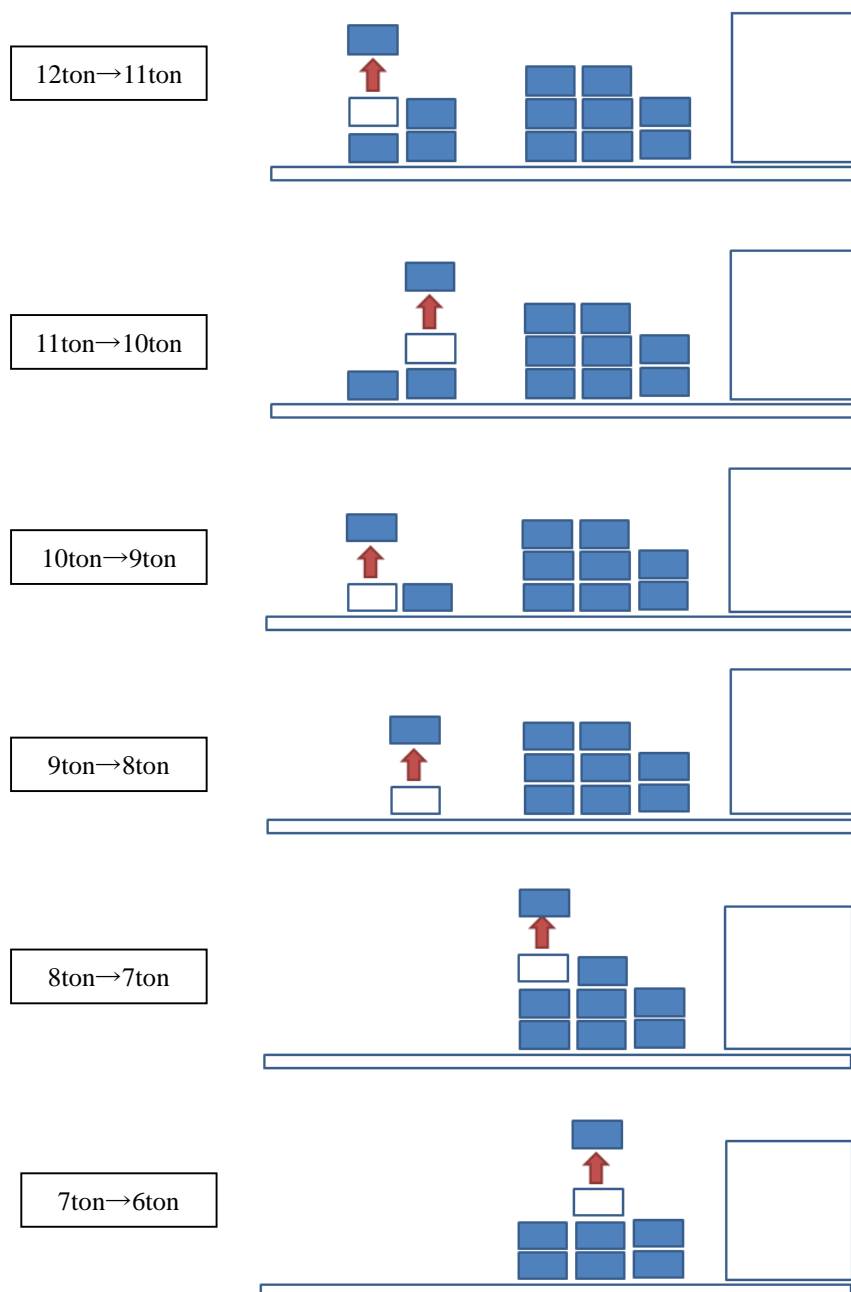


図 4.9 重りを降ろす順[12ton→6ton]

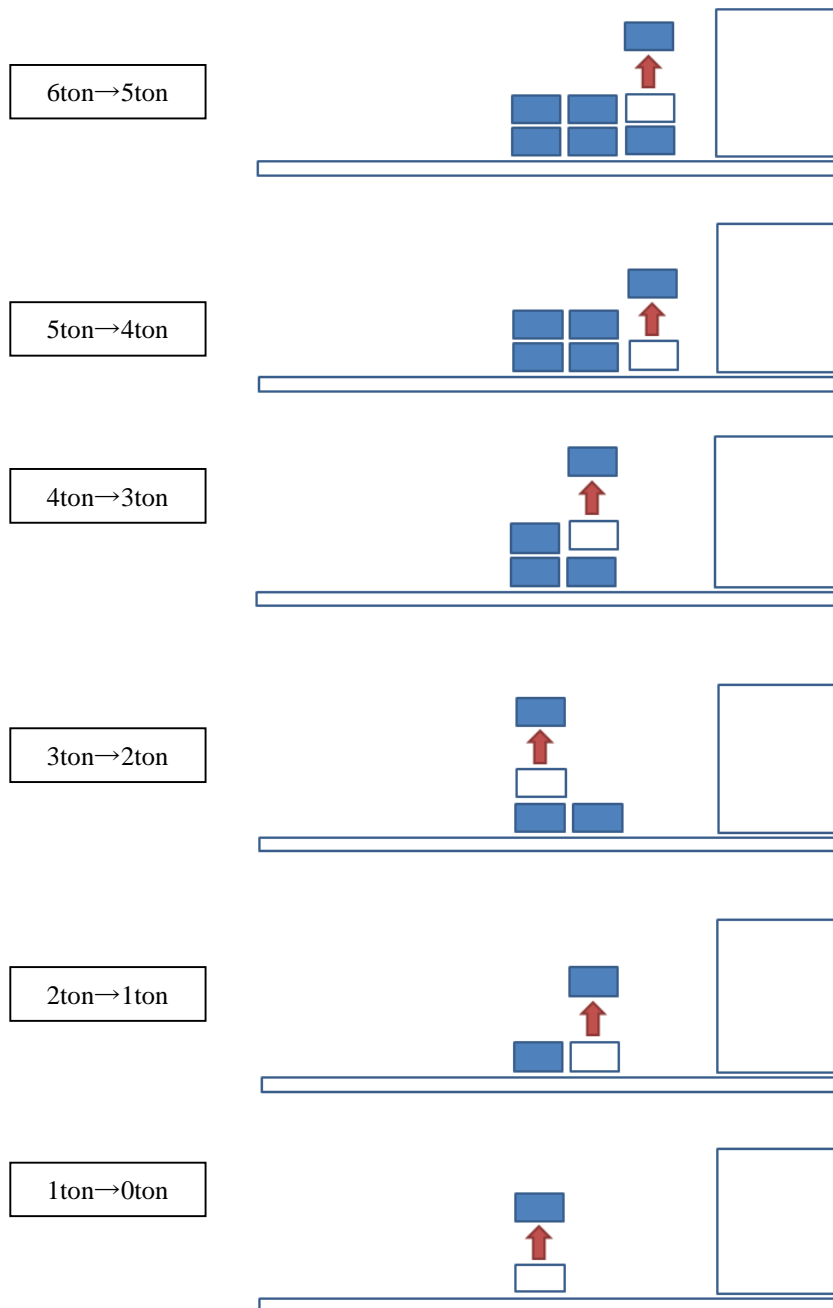


図 4.10 重りを降ろす順[6ton→0ton]

#### 4.1.5 荷重と各サスペンションの反力

車体重量と車体重心位置のパラメータ同定を行うためにはサスペンションからの反力を求めるのが必要であり、各輪の下に Force Plate センサを置き、実車実験による Force Plate センサの出力を測定した。

図 4.11 はリーフサスペンション側の測定結果で、荷重が 0ton から 7ton までには荷重と反力が比例関係であるが、荷重が 7ton 以上になるとサスペンション反力は荷重とは比例関係ではないことが分かる。図 4.12 はエアサスペンション側の測定結果で、荷重が 0ton から 12ton までには荷重と反力は比例関係であることが分かる。

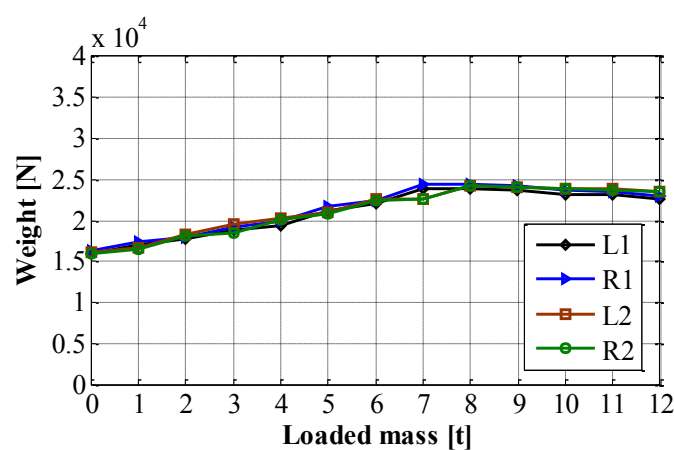


図 4.11 前輪 1 軸と 2 軸のリーフサスペンションの荷重

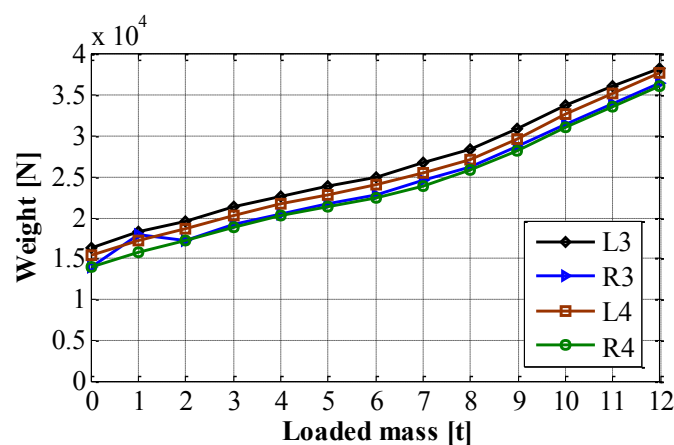


図 4.12 後輪 3 軸と 4 軸のエアサスペンションの荷重

#### 4.1.6 荷重とサスペンション変位量もしくはベローズ圧の関係

図 4.13 は前輪側のリーフサスペンションに対し、荷重を 12ton から 0ton まで減らす際のサスペンション変位量の計測した結果を示す。この実験結果は荷重と変位量の間は反比例関係である。荷重とサスペンション変位量が比例関係のことを検討するため、荷重 0ton 時にリーフサスペンションの変位量が 0m になれるように変換した関係は図 4.14 ように求められる。図 4.15 は後輪側のエアサスペンションに対し、荷重によるエアサスペンションのベローズ圧の計測した結果を示す。荷重が 0ton から 12ton までのベローズ圧力の測定結果は荷重と比例関係であることが分かる。また、荷重が 0ton から 8ton までには車体を水平調節するためエアサスペンションのベローズ圧の制御が作動していることが分かる。

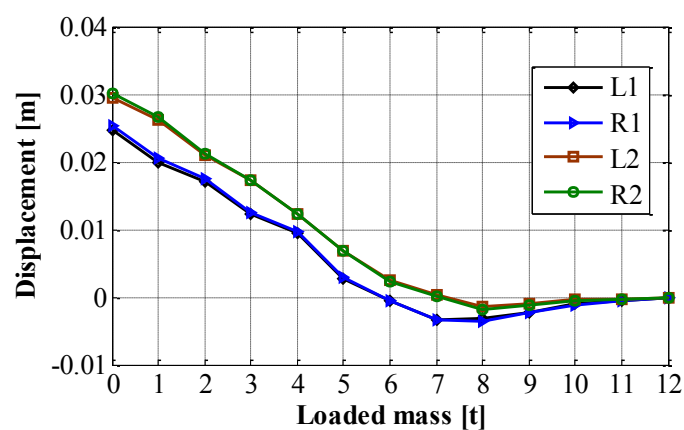


図 4.13 荷重によるリーフサスペンションの変位量

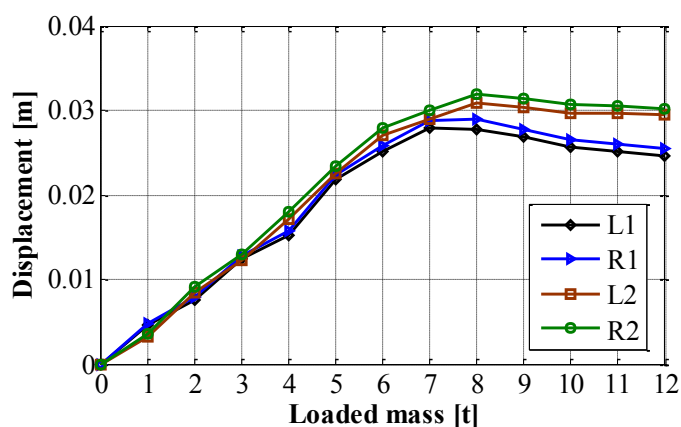


図 4.14 リーフサスペンションの変換変位量



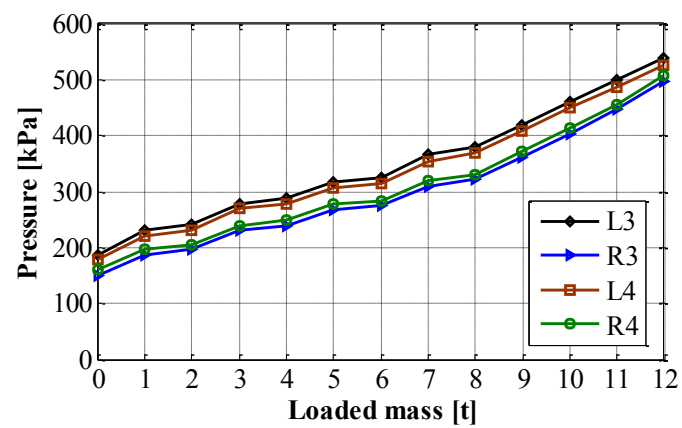


図 4.15 荷重によるベローズ圧の変化量

#### 4.1.7 サスペンション変位量もしくはベローズ圧と荷重の関係

荷重によるサスペンション反力とサスペンションの変位量もしくはベローズ圧の関係を求めた。図 4.16 から図 4.19 までの結果は、前輪 1, 2 軸のリーフサスペンションの変位量と荷重の関係を表す。変位量と反力には線形の関係がある。図中の式は変位量と反力の関係を 1 次近似で表したものである。この式からリーフサスペンションの変位量から反力を求められる。図 4.20 から図 4.23 までの結果は、後輪 3, 4 軸のエアサスペンションのベローズ圧と荷重の関係を表す。ベローズ圧と反力には線形の関係がある。図中の式はベローズ圧と反力の関係を 1 次近似で表したものである。この式からエアサスペンションのベローズ圧から荷重を求めることができる。次の式は全サスペンションから求めた 1 次近似式である。

The left suspension of axle 1 :  $y = 288188x + 15540$

The right suspension of axle 1 :  $y = 254255x + 15994$

The left suspension of axle 2 :  $y = 285046x + 15847$

The right suspension of axle 2 :  $y = 256150x + 15582$

The left suspension of axle 3 :  $y = 64.84x + 3641$

The right suspension of axle 3 :  $y = 67.13x + 4244$

The left suspension of axle 4 :  $y = 64.44x + 3442$

The right suspension of axle 4 :  $y = 67.21x + 3092$

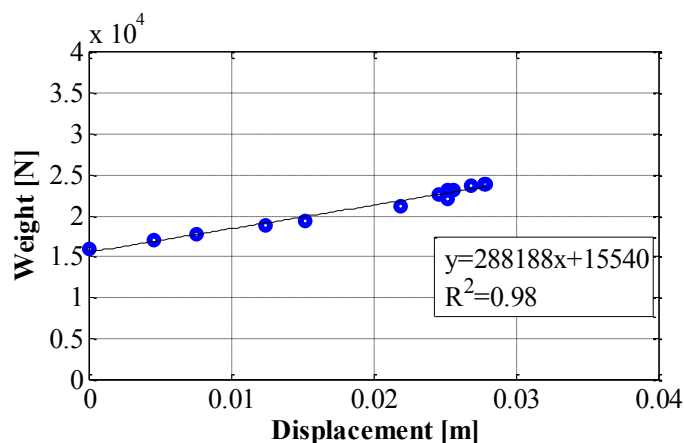


図 4.16 リーフサスペンションの荷重とストロークの関係(1 軸左輪)

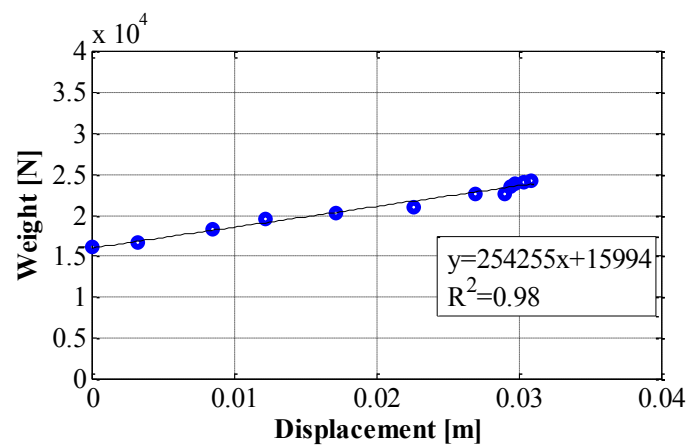


図 4.17 リーフサスペンションの荷重とストロークの関係(1 軸右輪)

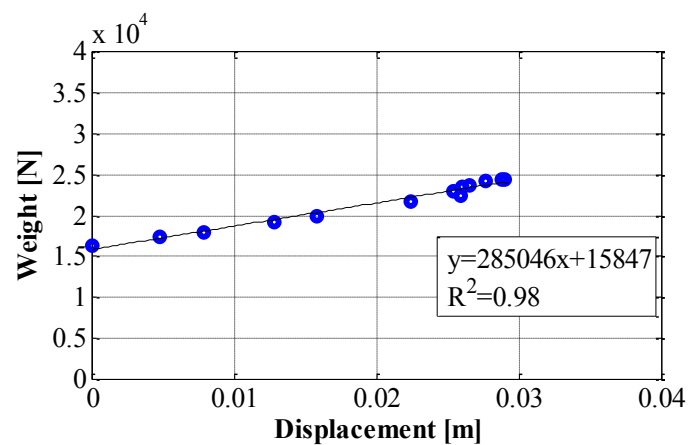


図 4.18 リーフサスペンションの荷重とストロークの関係(2 軸左輪)

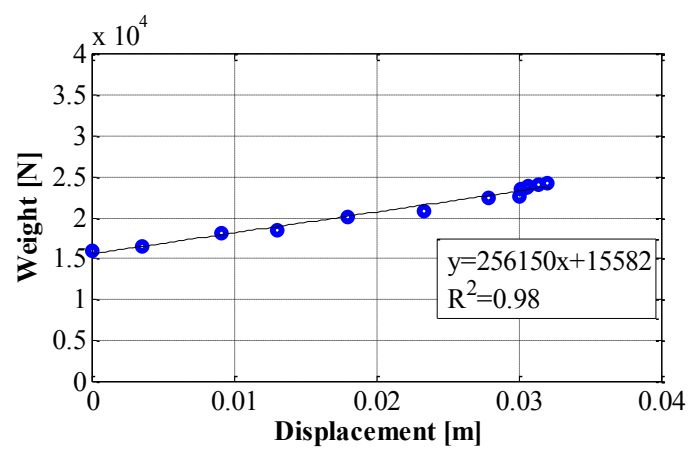


図 4.19 リーフサスペンションの荷重とストロークの関係(2 軸右輪)

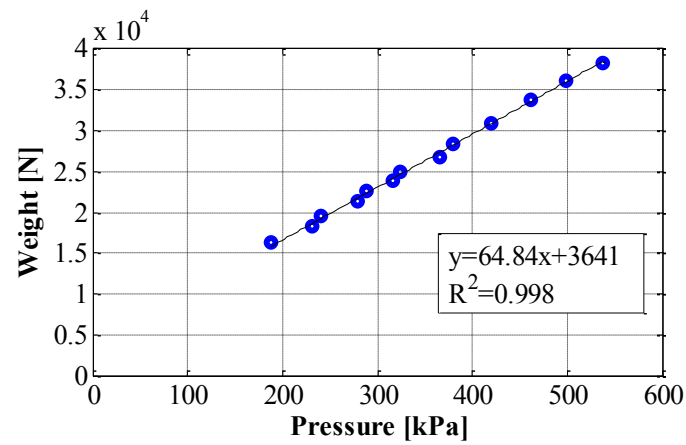


図 4.20 エアサスペンションの荷重とベローズ圧の関係(3 軸左輪)

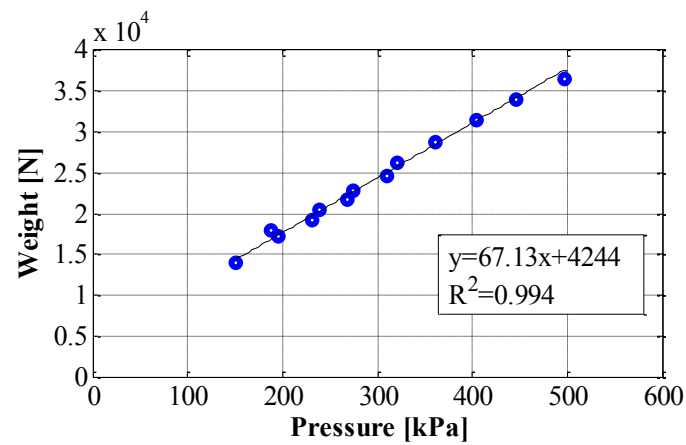


図 4.21 エアサスペンションの荷重とベローズ圧の関係(3 軸右輪)

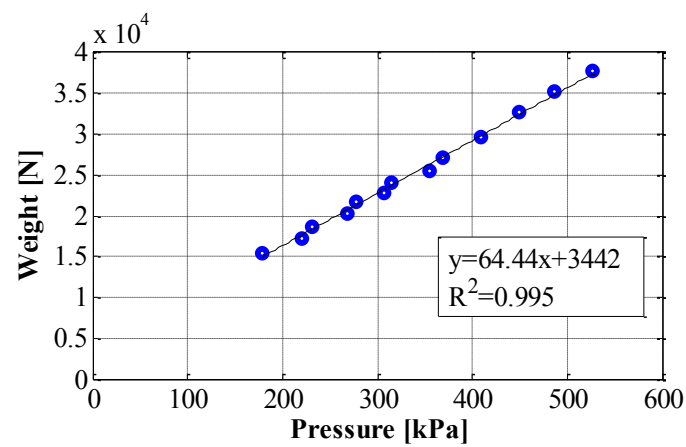


図 4.22 エアサスペンションの荷重とベローズ圧の関係(4 軸左輪)

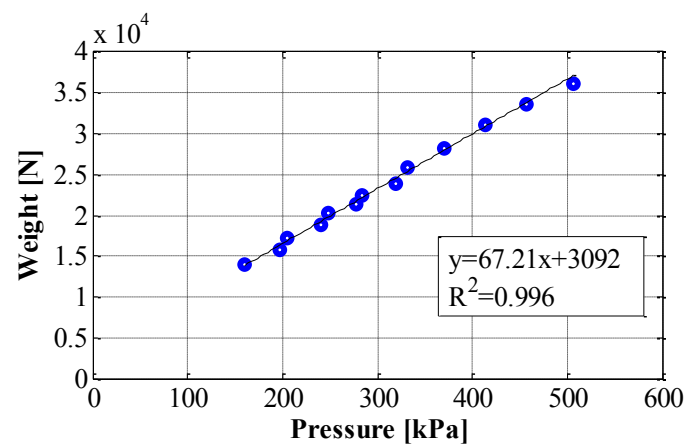


図 4.23 エアサスペンションの荷重とベローズ圧の関係(4 軸右輪)

#### 4.1.8 車体重心位置の推定値の検討

サスペンションの変位量もしくはベローズ圧と反力の関係式を用いて求めた車体重心位置の推定値の精度について検討を行った。荷重を 0ton と 6ton, 12ton を車両に掛かった時、実験車両の車体重心位置を図 4.24 のように推定した。実験から求めた重心位置の真値と同定案による推定された位置の間に 3%の誤差があることを確認した。擬似ペイロードの入れ替えを行うため、右側ウィングを開けた状態にしていたため、重心位置が右側になっていることが分かる。この結果により、停車中に同定案による車両重心位置の同定ができることを示した。

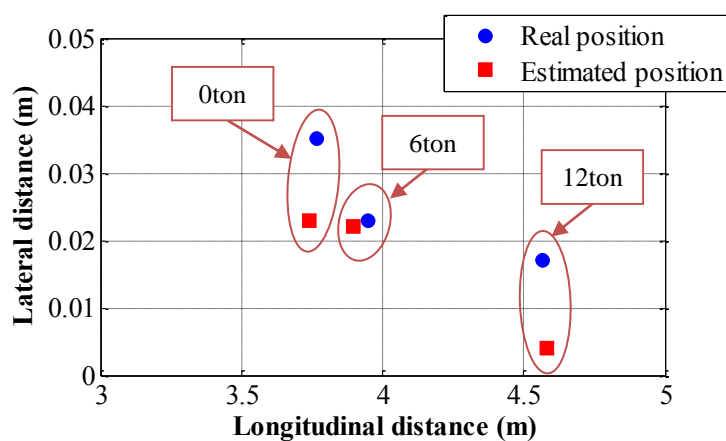


図 4.24 車体重心位置の真値と推定位置の比較

## 4.2 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネス推定の実験

### 4.2.1 実験装置

本研究で同定検討のため, 実車実験に Racelogic 社製 VB20SL の GPS 計測システムを用いる. この GPS 計測システムは衛星からの GPS 信号を 2 個の GPS アンテナで計測し, 走行する車両の絶対速度及びスリップ角, ヨー角速度等のデータを高い精度で計測ができるものである[83]. 車両の絶対速度は GPS 搬送波のドップラー効果を利用する. アンテナの位置情報は衛星からの搬送波の周波数と位相差を用いて測位する干渉測位方式から得られる. スリップ角は図 4.25 のように 2 つのアンテナの位置情報から求められた車両の回頭角と絶対速度の方向を基に求められる. ヨー角速度は車両の回頭角の変化から求められる. センサの精度を表 4.2 に示す.

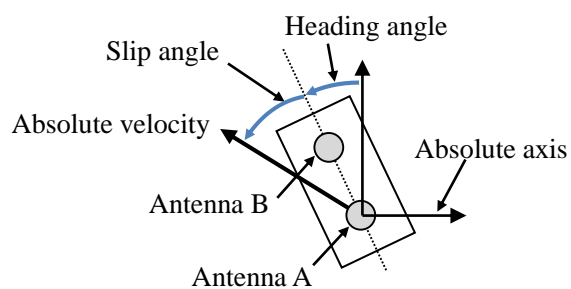


図 4.25 GPS 計測システムの計測

表 4.2 GPS 計測システムの精度

絶対速度	0.1 km/h
距離	0.05 m
スリップ角	0.1 deg
ヨー角速度	0.75 deg/s
加速度	0.5 %

実車実験により正確な計測を行うため、図 4.26 のように 2 つの GPS センサの間の距離を測定し GPS 計測システムに設定する。GPS 計測システムを使用する場合、二つの GPS アンテナを図 4.27 と図 4.28 のように車両の屋根に設置する。二つのアンテナの位置のキャリブレーションを行った後、GPS センサを計測システムと連結し計測を行う。



図 4.26 GPS センサの設置



図 4.27 前方 GPS アンテナ

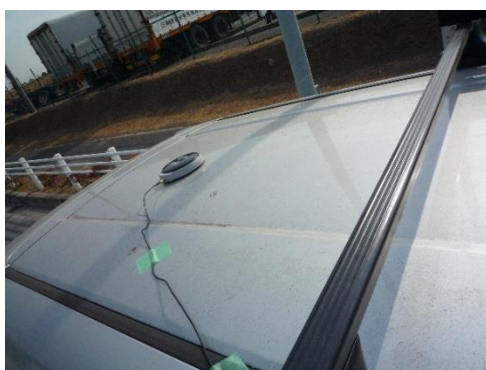


図 4.28 後方 GPS アンテナ



GPS (Global Positioning System) は衛星で物体の位置を計測する測位システムである。GPS の目的は船舶や航空機がリアルタイムに現在の位置を把握することである。副次的に測地・測量等にも利用されている。他の機能として GPS 受信機は移動体の速度情報を知ることができる。GPS による速度情報は位置情報に比べて精度良く測定することができる。GPS を用いた速度測定方法は、2 点の位置から距離を求め、その 2 点間の移動に必要であった時間から車両の速度を得る方法と、図 4.29 のように搬送波のドップラー効果を利用する方法がある。

GPS 衛星は安定した一定の波長・周波数の波を出している。受信機が衛星から遠ざかることにより受信機が受信する搬送波の周波数は連続的に変化する。この周波数の変化から移動体の速度を計算することができる。干渉測位方式 (Real Time Kinematic, RTK) 測位は図 4.30 のように受信機から衛星までの距離を搬送波の波数と位相差から求めるものである。RTK 測位では受信機において観測される搬送波位相を測定する。RTK 測位の受信機は約 0.75mm の分解能で衛星から受信機までの距離の波長の測定が可能で、位置精度が 2cm の高精度な測定が可能となる。

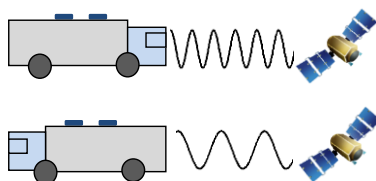


図 4.29 ドップラー効果を利用した絶対速度の計測

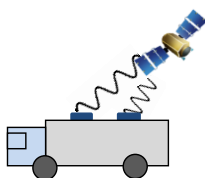


図 4.30 干渉測位方式を利用した位置計測

## 4.2.2 実験車両

実験車両は図 4.31 ように一般乗用車であるトヨタの Estima を用いて実験を行った。実験車両の車体質量は図 4.32 のように各輪の下に Force plate センサを設置し、各輪に掛かる荷重を計測し、表 4.3 のように計測結果を求めた。この計測結果から空車状態の車体質量は 1992kg になることを確認した。実験には 4 人が乗車して実験を行ったので、実験時の車体質量は空車質量で体重 70kg の 4 人が乗車することを想定すると、車体質量は 2270kg に設定した。実験車両の重心位置は前輪側及び後輪側に掛かる荷重とホイールベースを用いて求められる。車両の縦方向の重心位置は前輪からの距離( $l_f$ )が 1.316m、後輪からの距離( $l_r$ )は 1.636m であることを求めた。ヨー慣性モーメントはピッチ慣性モーメントより 2% 大きい値になるとの参考文献を適用する[54]。この参考文献での測定方法は測定装置を用いて 496 台の車両の慣性モーメントを計った結果である。実験車両のヨー慣性モーメントを求めるため、空車状態で 4 人を乗せた時の車体質量と共に重心位置から前・後輪までの距離を用いると、ピッチ慣性モーメントは 4880kgm<sup>2</sup> に求められる。参考文献の結果を適用すると、ヨー慣性モーメントは 5000kgm<sup>2</sup> で求められる。タイヤのコーナリングスティフネスは参考文献の計測値を用いた[84]。コーナリングスティフネスの値は車両が定常円旋回をしている時に横滑り角は 0 であり、ヨー角速度は一定の状態を用いてコーナリングパワーを算出する手法を利用して求められた。以上の車両の仕様は表 4.4 に示す。

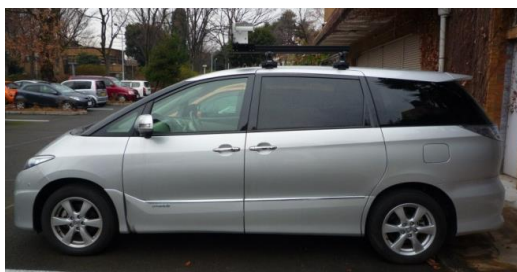


図 4.31 実験車両

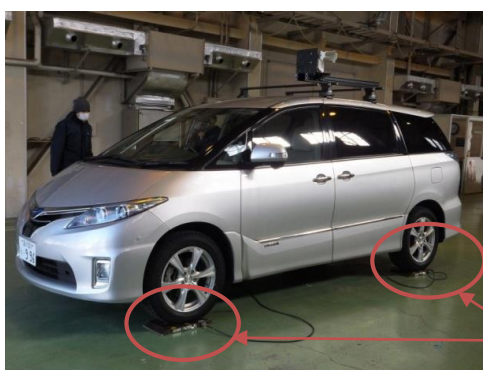


図 4.32 各輪の荷重計測

表 4.3 測定結果

1 軸左輪	561 kg
1 軸右輪	544 kg
2 軸左輪	453 kg
2 軸右輪	434 kg
車両質量	1992 kg

表 4.4 実験車両仕様

車両質量		2270 kg
ホイールベース		2.95 m
トレット		1.55 m
前軸から重心位置までの距離		1.316 m
後軸から重心位置までの距離		1.636 m
ヨー慣性モーメント		5000 kgm <sup>2</sup>
コーナリングスティフネス	前輪	57932 N/rad
	後輪	42037 N/rad

### 4.2.3 実験シナリオ

同提案による妥当性を検証するため, 産業技術総合研究所で実験車両が次の2種類のシナリオの通りに実車実験を行った。実験車両の屋根に GPS 測定システムを装着し, 走行データを計測した。一番目のシナリオは図 4.33 のように直進平地区間でレーンチェンジを繰り返して行うことである。二番目のシナリオは図 4.34 のように実験車両がカントのあるオーバルコースで, コーナリング区間に進入地点(Point A)からコーナリング区間が終わる地点(Point B)までの区間を走行することである。

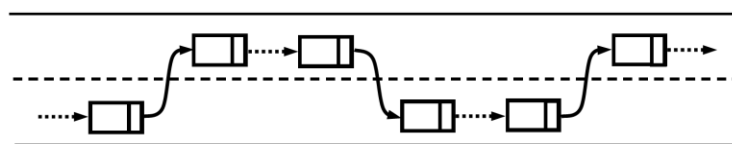


図 4.33 直進平地区間の実験

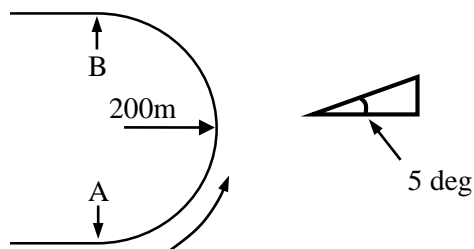


図 4.34 カントのあるコーナリング区間の実験

## 4.2.4 実験結果

### 4.2.4.1 直進平地区間での実験結果

一番目のシナリオの通りに実験を行い、図 4.35 から図 4.38 のように GPS 計測システムからの測定結果が得られた。図 4.35 は実験車両が繰り返してレーンチェンジを行う際の車体の回頭角を示す。角度が 0 は直進走行を示し、左右にレーンチェンジが行われているのが分かる。各レーンチェンジは 1 回目から 3.5 秒間、4.3 秒間、3.3 秒間、3.7 秒間、3.6 秒間に実施された。図 4.36 は実験中の絶対車速  $V$  を計測した結果で、一定の車速を維持していることが分かる。図 4.37 は実験車両のヨー角速度( $\dot{\gamma}$ )を示し、図 4.38 はスリップ角( $\beta$ )を示す。

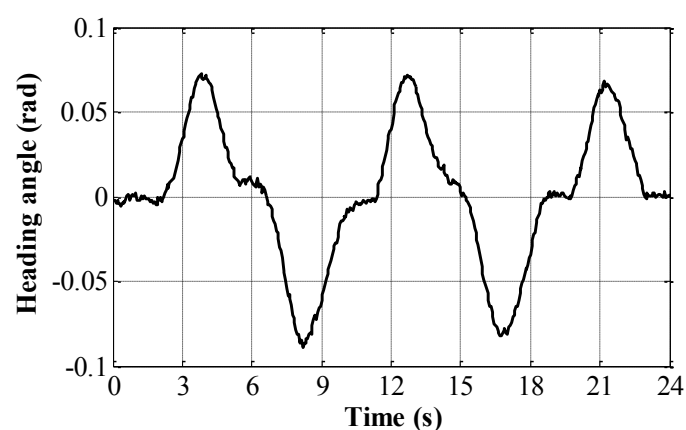


図 4.35 直進平地区間での回頭角の計測結果

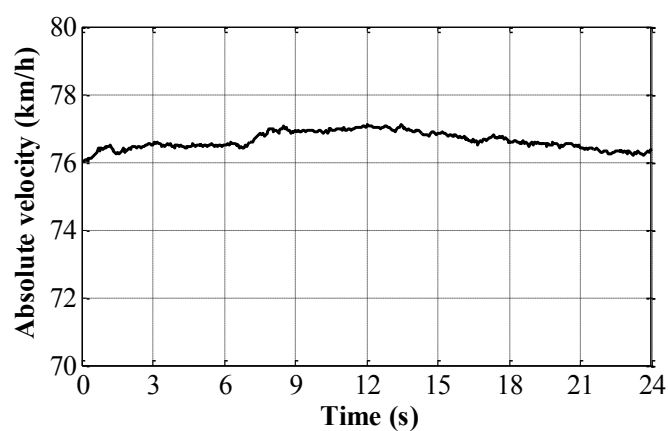


図 4.36 直進平地区間での絶対速度の計測結果

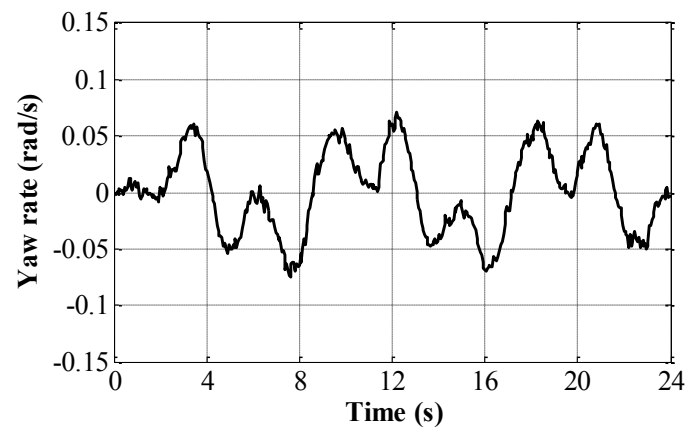


図 4.37 直進平地区間でのヨー角速度の計測結果

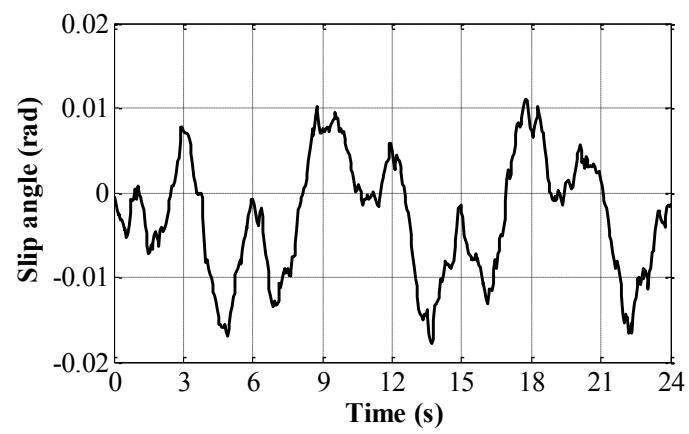


図 4.38 直進平地区間でのスリップ角の計測結果

#### 4.2.4.2 カントのあるコーナリング区間での実験結果

二番目のシナリオの通りに実験を行い，図 4.39 から図 4.42 のように GPS 計測システムからの測定結果が得られた．図 4.39 は回頭角，図 4.40 は絶対速度  $V$ ，図 4.41 はヨー角速度 ( $\dot{\gamma}$ )，図 4.42 はスリップ角( $\beta$ )の測定結果を示す．

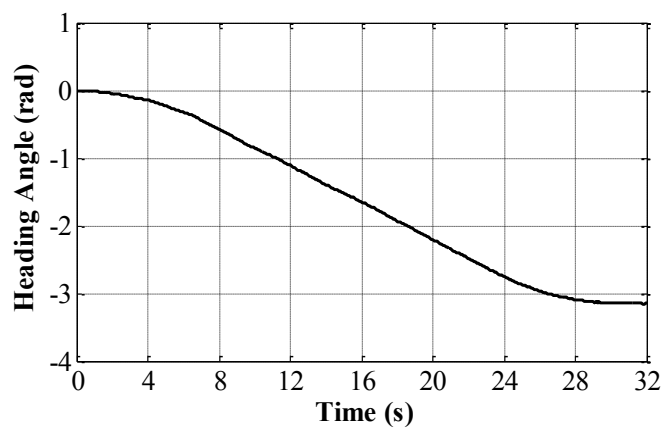


図 4.39 カントのあるコーナリング区間での回頭角の計測結果

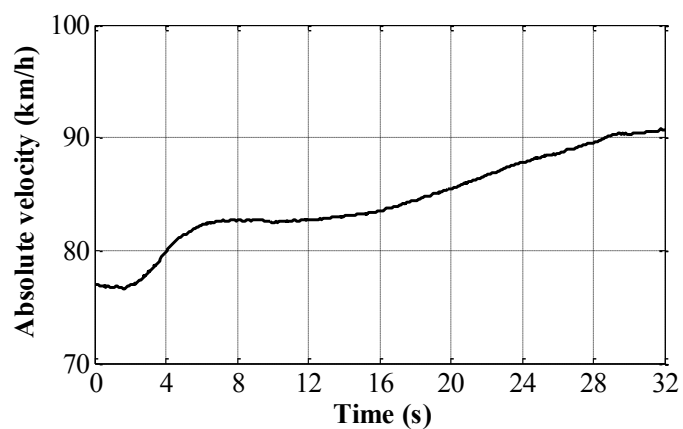


図 4.40 カントのあるコーナリング区間での絶対速度の計測結果

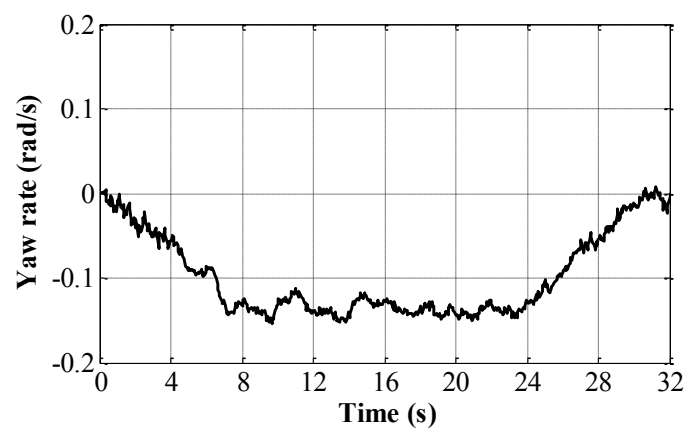


図 4.41 カントのあるコーナリング区間でのヨー角速度の計測結果

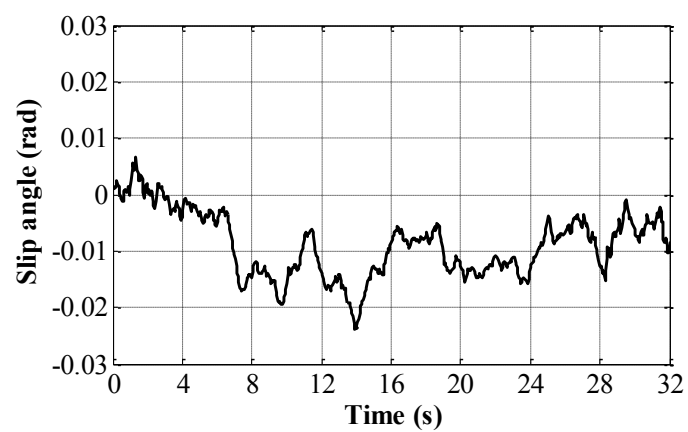


図 4.42 カントのあるコーナリング区間でのスリップ角の計測結果



#### 4.2.5 実験によるパラメータ推定

車両パラメータ中でヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスは、車両が操舵走行中に車両ダイナミクスに影響を与えるパラメータである。このパラメータを同定するためには、ヨー方向の運動が存在する必要があるため、直進走行中の車両が操舵走行を開始してから終了するまでの区間でパラメータ推定を行う。

図 4.43 はパラメータ推定過程を示す図で、車両が  $n$  回目のレーンチェンジを行う場合、前回( $n-1$  回目)の操舵走行区間で求めたパラメータ推定値を、次のレーンチェンジ( $n$  回目)の初期値として利用してパラメータ推定を行う。この推定過程を繰り返してパラメータ推定を行うことでパラメータ推定値が求める。

実験によるパラメータ推定では、図 4.35 のように 5 回のレーンチェンジ実験データを用いてパラメータ推定を行う。6 回目以降のレーンチェンジは、1 回目のレーンチェンジの測定データを 6 回目のデータとして用いる。それ以降は、2 回目のデータを 7 回目というように、繰り返して用いて、多数のレーンチェンジを行ったことを想定してパラメータ推定を行う。コーナリング区間のパラメータ推定は 1 回のコーナリング走行データを用いてパラメータ推定を行う。2 回以上のコーナリングはその 1 回のコーナリング走行データを用いてし、コーナリングを繰り返して行うことと想定して、パラメータ推定を行う。

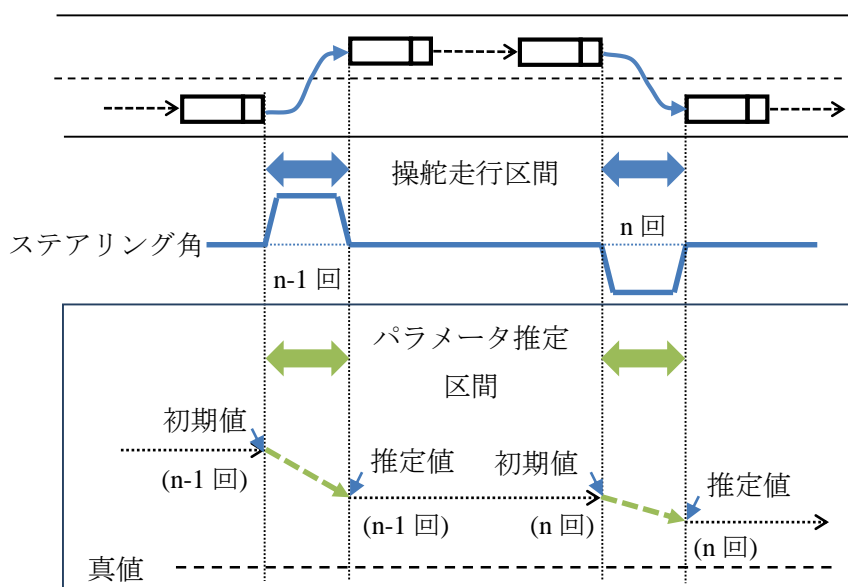


図 4.43 パラメータ推定過程

#### 4.2.6 状態推定用パラメータの設定

DKF アルゴリズムによるパラメータ推定を行うため、先に、式(4.1)-(4.5)の推定状態推定用 DKF アルゴリズムで使われる状態推定用システムノイズ共分散  $Q_S$  と測定ノイズ共分散  $R_S$  の設定を行う。パラメータ推定に使われる最良な  $Q_S$  と  $R_S$  の値は分からない場合が多いので、最良の  $Q_S$  と  $R_S$  の状態を調べるように、 $Q_S$  は式(4.6)のように  $H$  を用いて設定し、 $R_S$  は式(4.7)のように  $I$  を用いて設定する。この  $H$  と  $I$  を調整し最良条件を調べる。

$$\hat{x}_k^- = A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_k \quad (4.1)$$

$$P_k^- = A_d P_{k-1} A_d^T + Q_S \quad (4.2)$$

$$K_k = P_k^- C_d^T (C_d P_k^- C_d^T + R_S)^{-1} \quad (4.3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_d \hat{x}_k^-) \quad (4.4)$$

$$P_k = (I - K_k C_d) P_k^- \quad (4.5)$$

$$Q_S = H^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$R_S = I^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

図 4.44 はヨー角速度について、式(4.6)-式(4.7)の  $H=1$  と  $H=2$  の場合と  $I=1$  と  $I=2$  の場合を適用し求めたヨー角速度の推定結果を示す。  $H$  と  $I$  を調整し、図 4.43 のようにヨー角速度の推定結果を求めた。図 4.45 は図 4.44 を拡大した図である。図 4.44 で  $H=2$  と  $I=1$  の場合の状態推定値が測定値との誤差が最小になる条件であることを求めた。

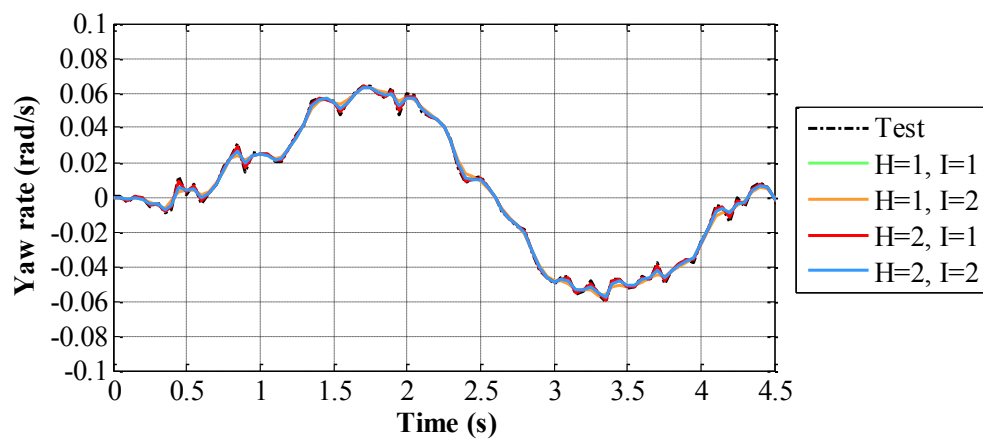


図 4.44 ヨー角速度の推定結果

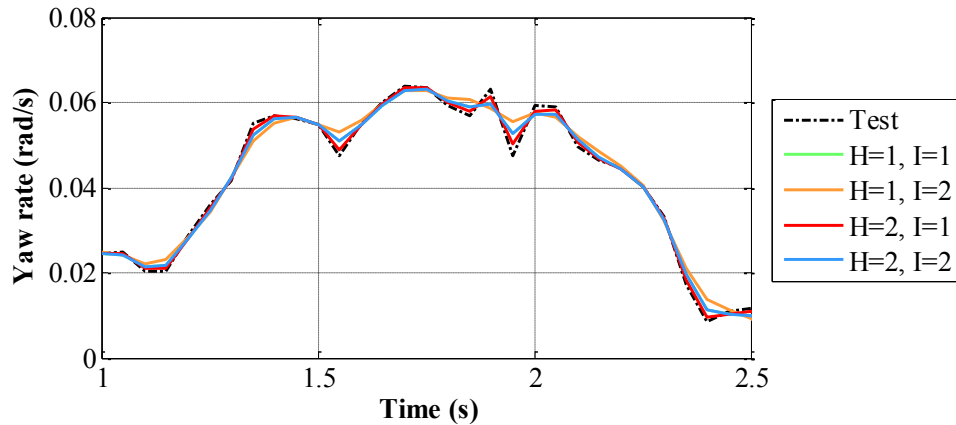


図 4.45 拡大したヨー角速度の推定結果

図 4.46 はスリップ角について、式(4.6)-式(4.7)の  $H=1$  と  $H=2$  の場合と  $I=1$  と  $I=2$  の場合を適用し求めたスリップ角の推定結果を示す。  $H=2$  と  $I=1$  の場合の状態推定値が測定値との誤差が最小になる条件であることを求めた。

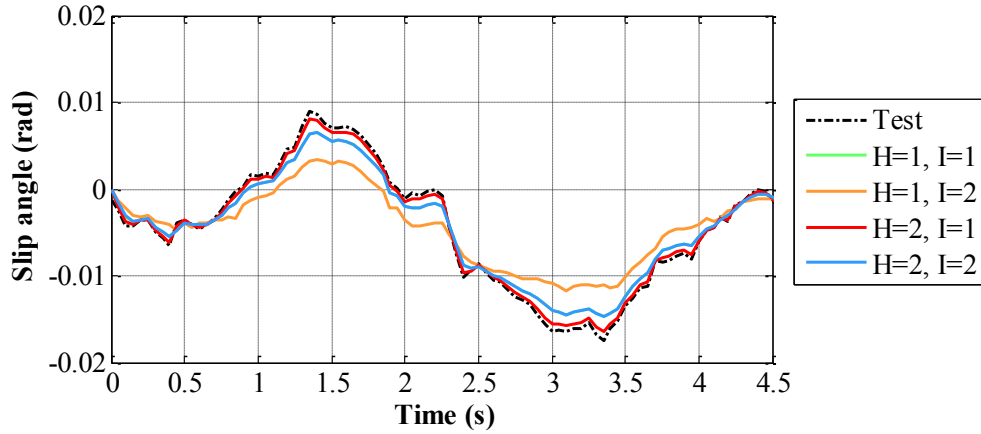


図 4.46 スリップ角の推定結果

求めたヨー角速度の状態推定結果とスリップ角の状態推定結果で、式(4.6)-式(4.7)の  $H=2$  と  $I=1$  の場合の状態推定値が推定条件であることが分かった。DKF アルゴリズムによるパラメータ推定には、式(4.8)-(4.9)のように  $Q_s$  と  $R_s$  を設定し、パラメータ推定を行う。

$$Q_s = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$R_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

### 4.3 ヨー慣性モーメント同定

本節ではヨー慣性モーメントのパラメータ同定検討を行う．コーナリングスティフネスの値は既知として一定であると想定する．ヨー慣性モーメント同定には式(4.10)-(4.14)のパラメータ推定用 DKF アルゴリズムのパラメータ中で，式(4.15)の  $Q_P$  の  $X$ ，式(4.16)の  $R_P$  の  $Y$ ，式(4.17)の  $D_P$  の  $V$  を調整し最良な推定条件を求め，ヨー慣性モーメントの推定値を求める．

$$\hat{p}_k^- = \hat{p}_{k-1} \quad (4.10)$$

$$U_k^- = U_{k-1} + Q_P \quad (4.11)$$

$$G_k = U_k^- D_k^T (D_k U_k^- D_k^T + R_P)^{-1} \quad (4.12)$$

$$\hat{p}_k = \hat{p}_k^- + G_k (y_k - C_d \hat{x}_k) \quad (4.13)$$

$$U_k = (I - G_k D_k) U_k^- \quad (4.14)$$

$$Q_P = X^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$R_P = Y^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

ヨー慣性モーメントの推定検討を行うため、実際の真値と異なるヨー慣性モーメントの初期値を設定する。初期値は真値より高い初期値と真値より小さい初期値の二種類を想定する。真値より高い初期値の設定は、車両質量の半分である 1135kg と全ホイールベース 2.95m を慣性半径にすると想定し 9000kgm<sup>2</sup> に設定する。また、真値より小さい初期値の設定は、車重の半分 1135kg と慣性半径を 1m にすると想定し 1000kgm<sup>2</sup> に設定する。

式(4.15)-式(4.17)の  $V, X, Y$  のパラメータを調整し様々な条件でヨー慣性モーメント推定性能を調べる。

- ・ 式(4.15)の  $Q_P$  の  $X=10, 10^2, 10^3, 10^4$
- ・ 式(4.16)の  $R_P$  の  $Y=10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$
- ・ 式(4.17)の  $D_P$  の  $V=10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}$

図 4.47 は  $V=10^{-7}$  の場合、 $X$  値と  $Y$  値を調整し求めたヨー慣性モーメント推定結果の例で、初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。ヨー慣性モーメント推定結果では、 $X$  値と  $Y$  値がある条件で同様な推定値が求められることを分かる。そのため、これからのパラメータ推定には式(4.16)の  $R_P$  の  $Y$  の値を一定に固定し、他の式(4.15)の  $Q_P$  の  $X$  と式(4.17)の  $D_P$  の  $V$  を調整し最良な推定条件を求めることにする。初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果も同様である。

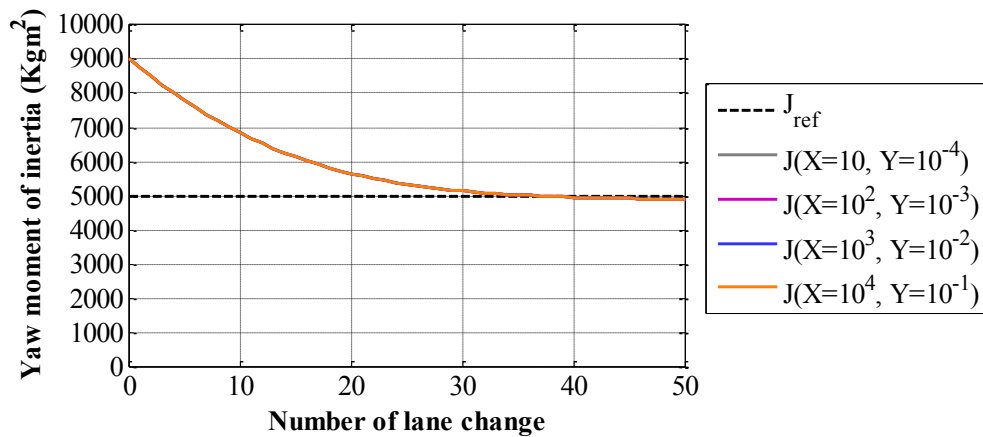


図 4.47 ヨー慣性モーメント推定結果のまとめ(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

#### 4.3.1 $Q_p$ 変化時のヨー慣性モーメントの同定

式(4.18)の  $D_d$  の  $V$  を固定し，式(4.19)の  $Q_p$  の  $X$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う．推定の初期条件は，ヨー慣性モーメントの真値( $J_{\text{ref}}=5000\text{kgm}^2$ )に対し，初期値が真値より高い場合の推定と初期値が真値より小さい場合の推定を行う．真値より高い場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=9000\text{kgm}^2$  に設定し，真値より小さい場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=1000\text{kgm}^2$  に設定する．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

図 4.48 と図 4.49 は式(4.18)で  $V=10^{-2}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.48 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.49 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

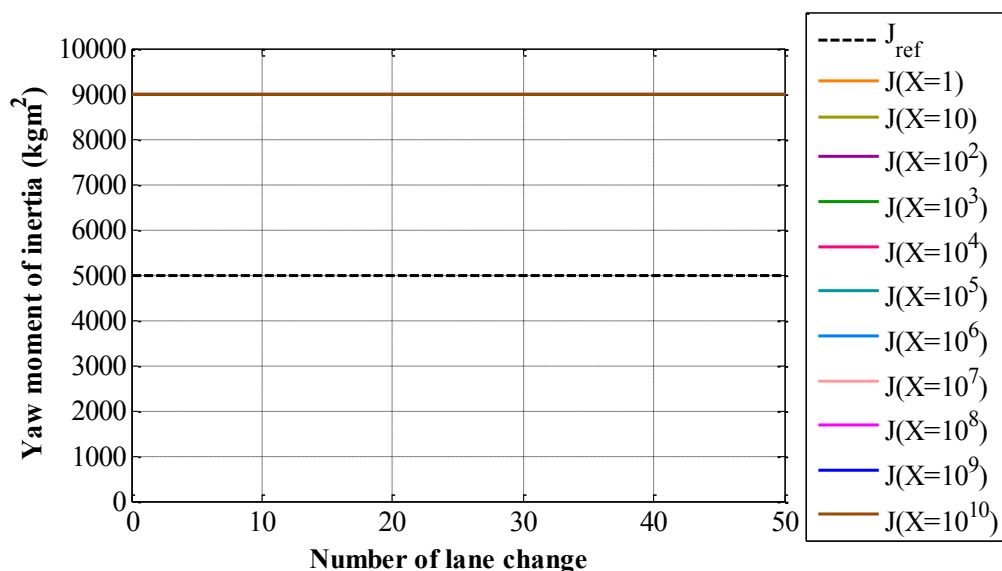


図 4.48 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

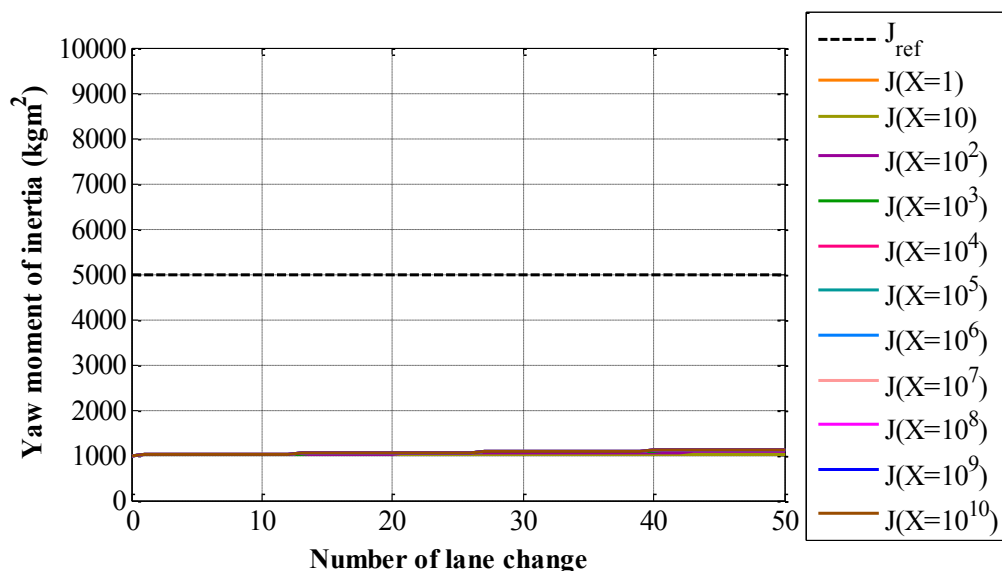


図 4.49 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )



図 4.50 と図 4.51 は式(4.18)で  $V=10^{-3}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.50 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.51 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。この条件では前の  $V=10^{-2}$  の場合の推定結果より変化が見られる。

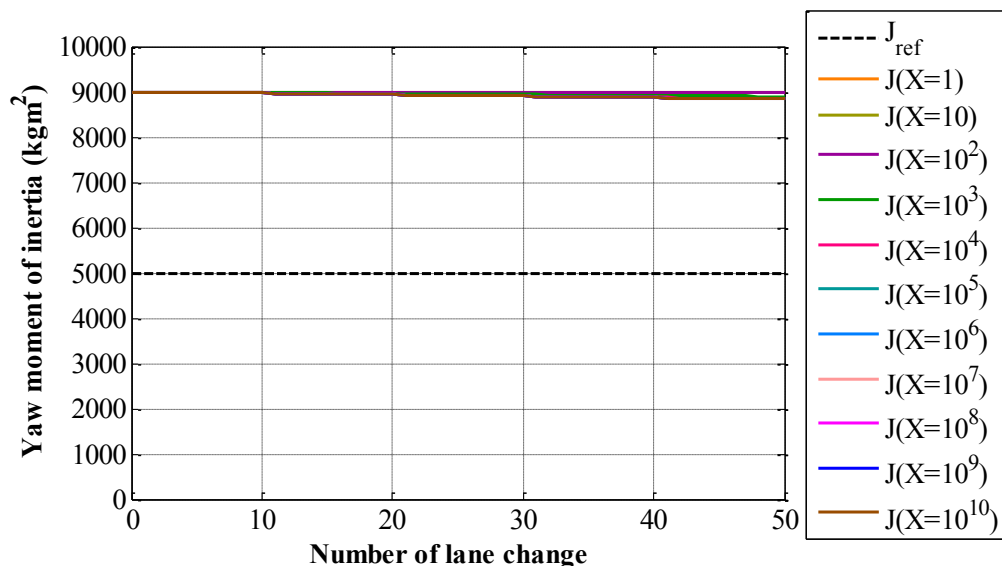


図 4.50 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

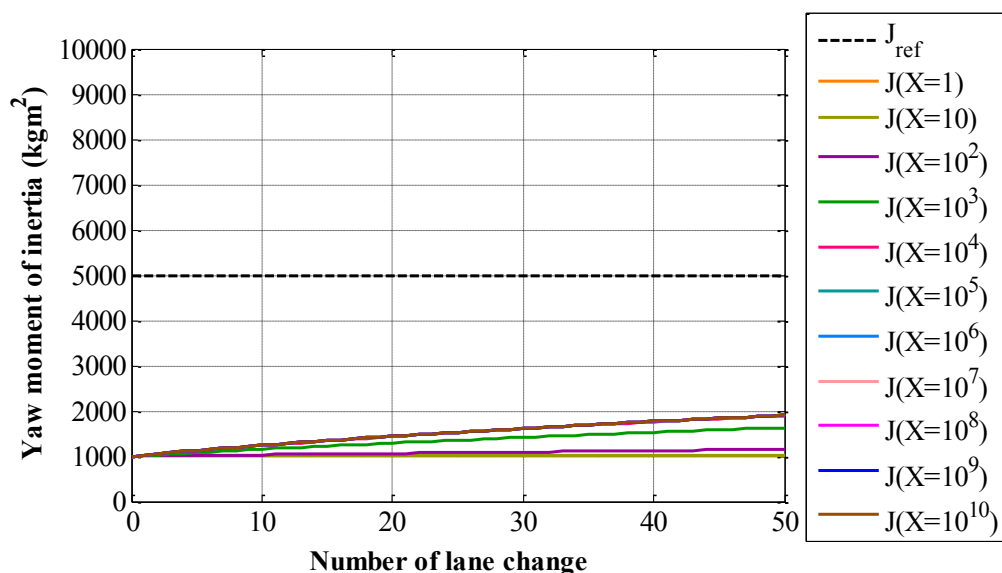


図 4.51 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.52 と図 4.53 は式(4.18)で  $V=10^{-4}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.52 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.53 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。この条件では前の  $V=10^{-3}$  の場合の推定結果より変化が見られる。

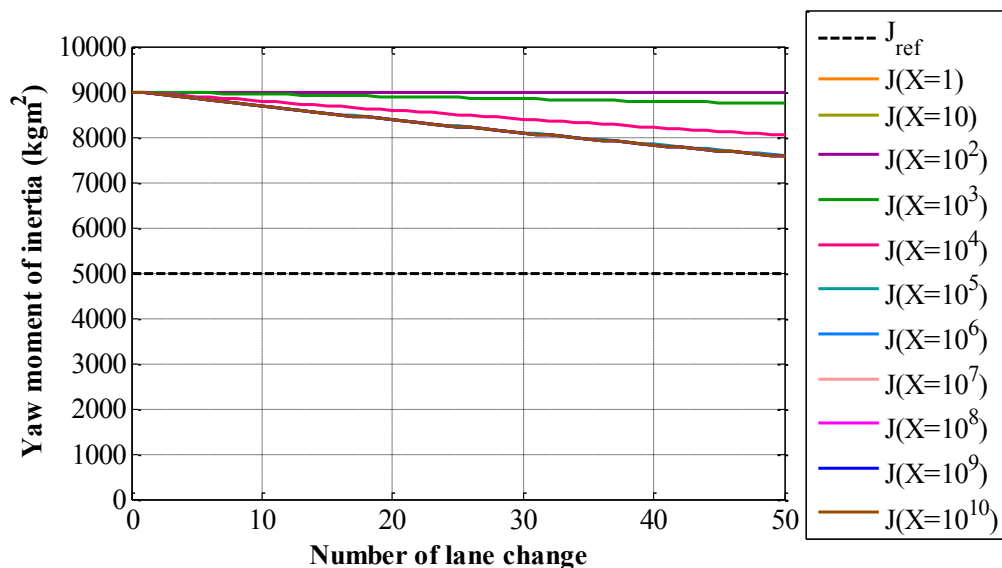


図 4.52 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

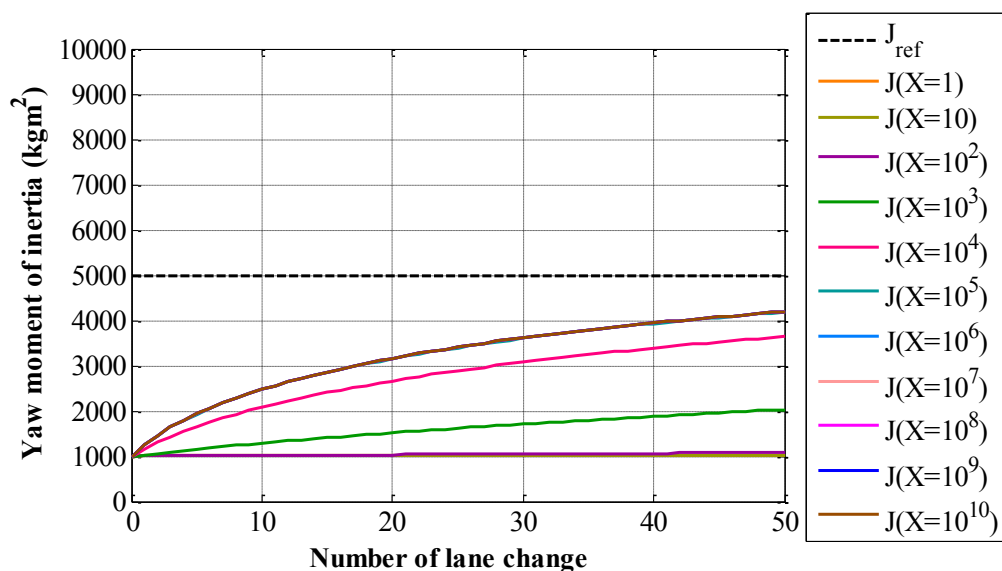


図 4.53 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.54 と図 4.55 は式(4.18)で  $V=10^{-5}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.54 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.55 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

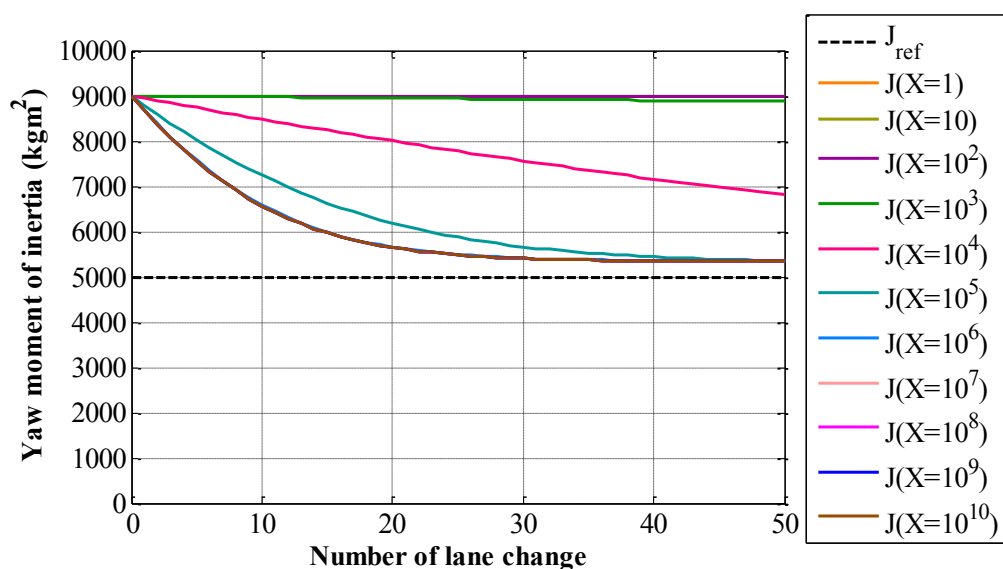


図 4.54 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

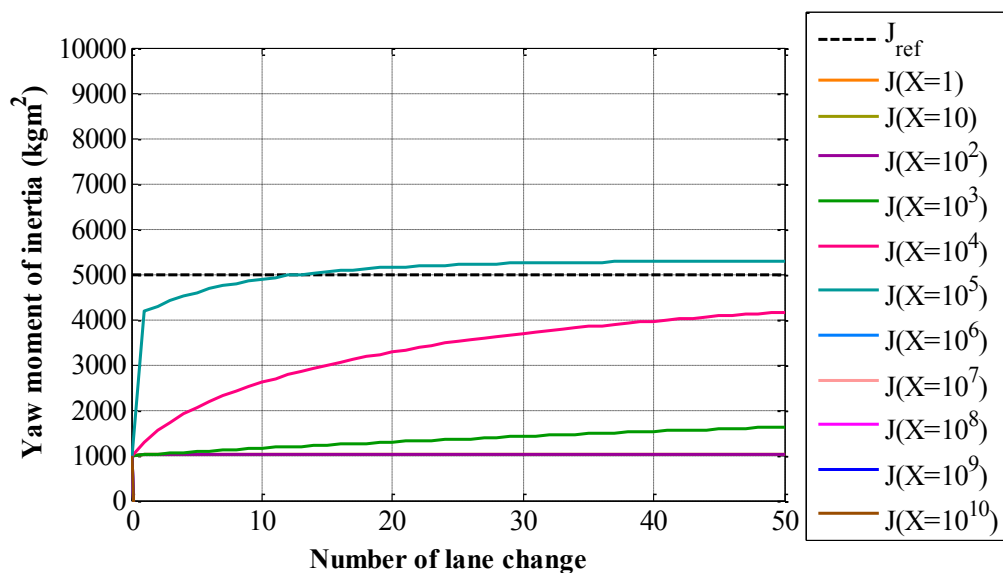


図 4.55 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.56 と図 4.57 は式(4.18)で  $V=10^{-6}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.56 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.57 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

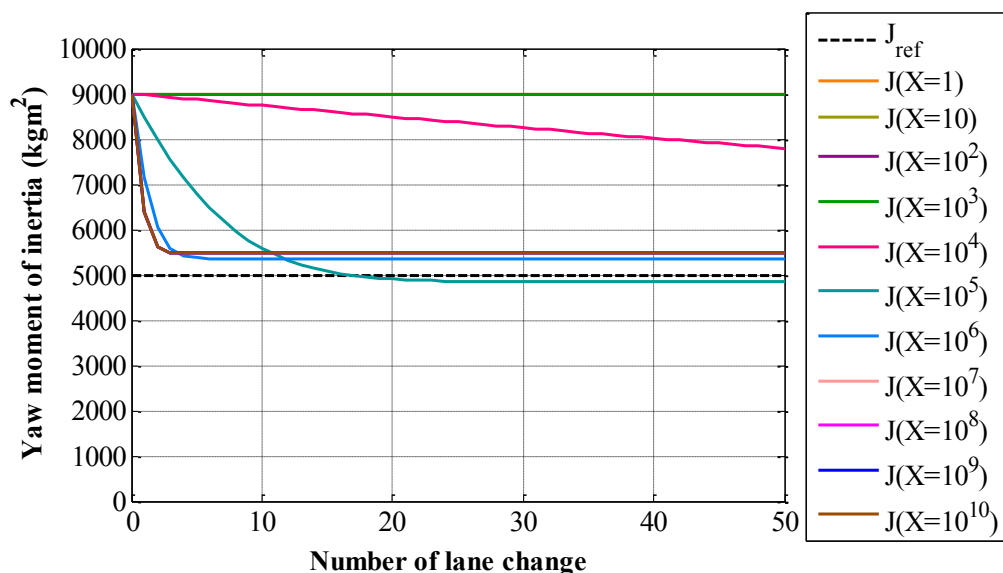


図 4.56 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

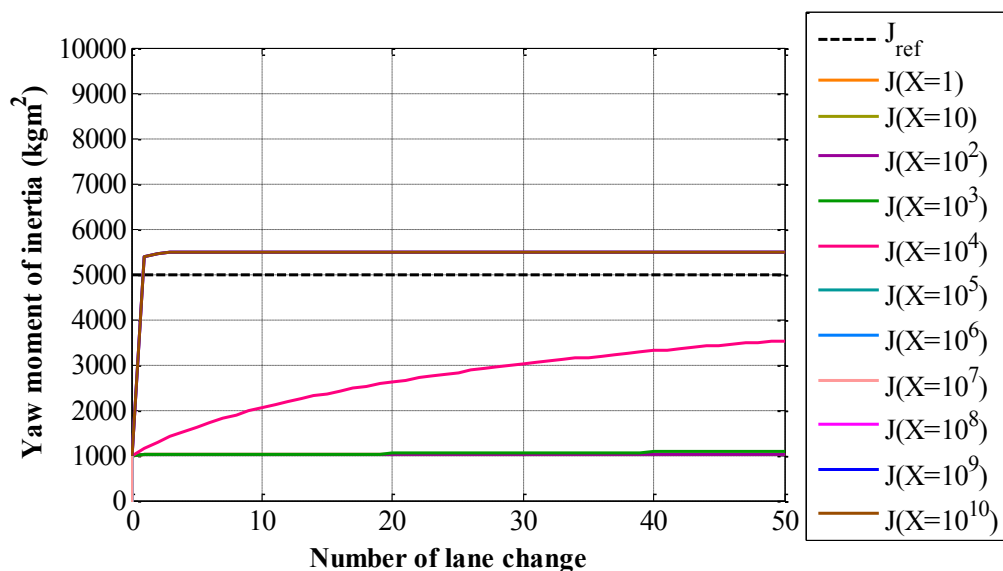


図 4.57 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.58 と図 4.59 は式(4.18)で  $V=10^{-7}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.58 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.59 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

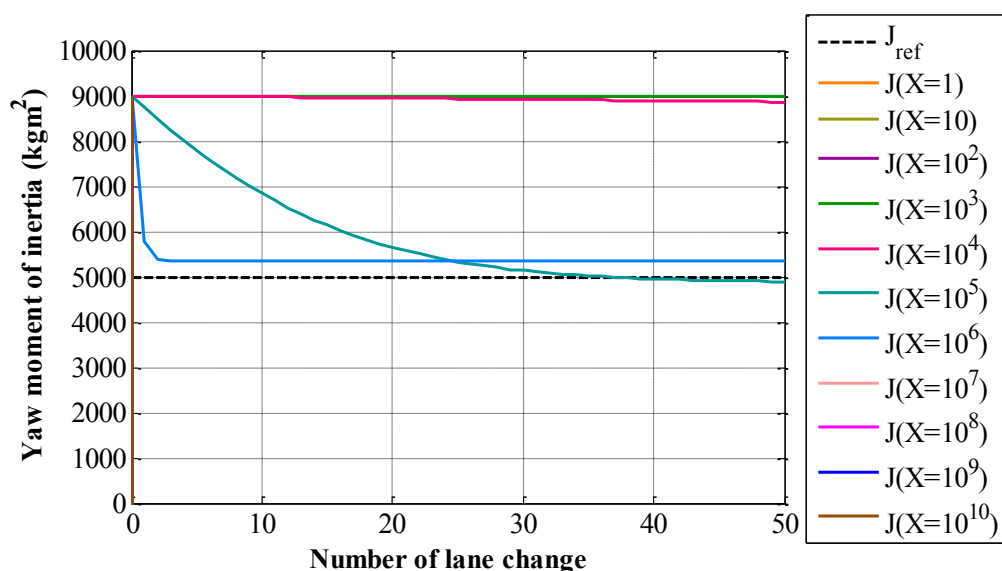


図 4.58 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

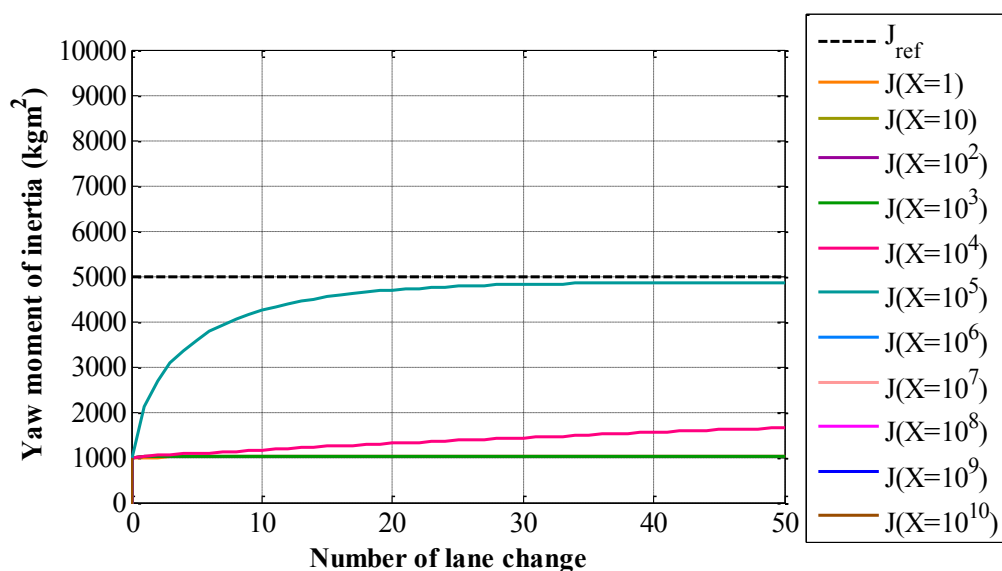


図 4.59 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.60 と図 4.61 は式(4.18)で  $V=10^{-8}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.60 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.61 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

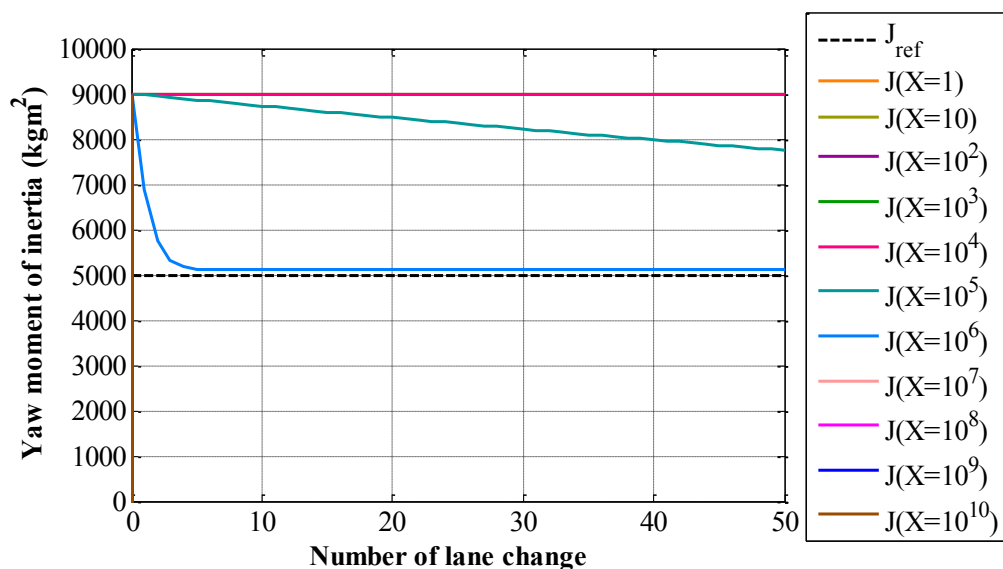


図 4.60 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

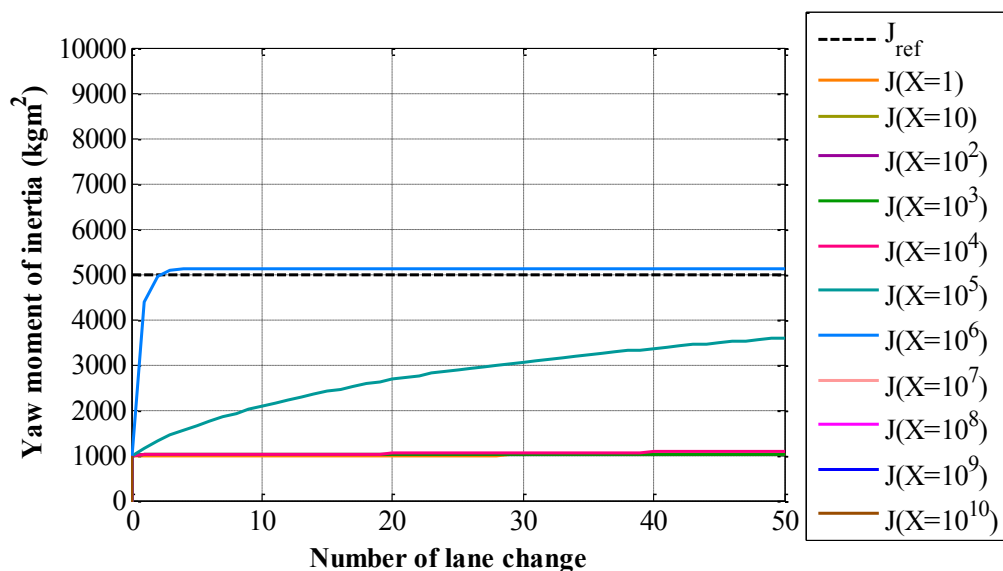


図 4.61 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.62 と図 4.63 は式(4.18)で  $V=10^{-9}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.62 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.63 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

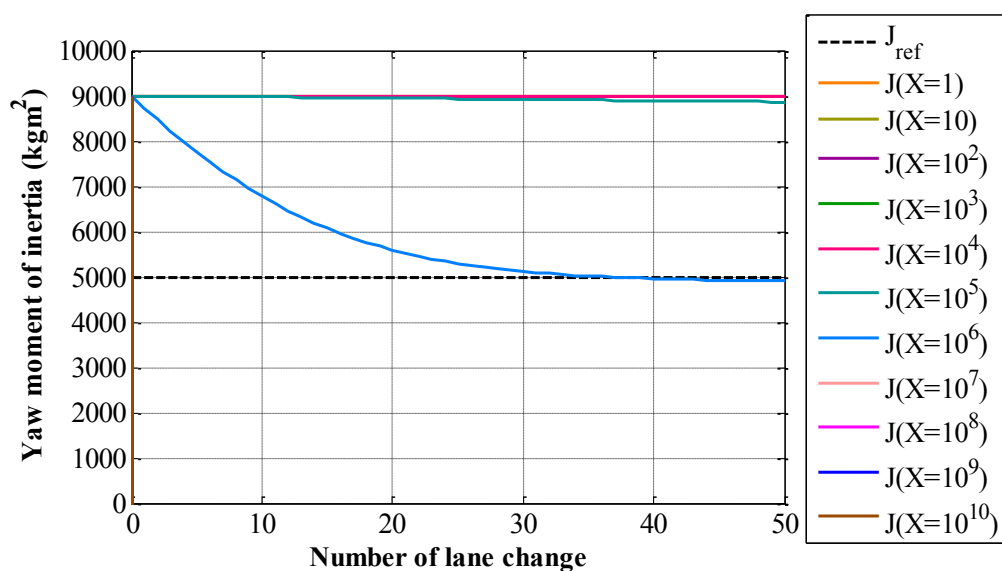


図 4.62 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

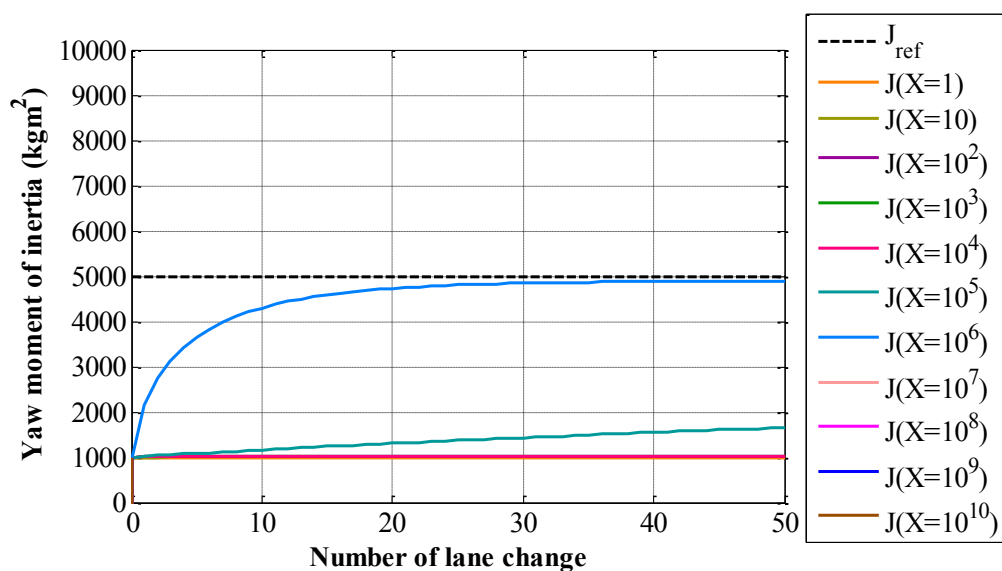


図 4.63 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.64 と図 4.65 は式(4.18)で  $V=10^{-10}$  の場合、式(4.19)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.64 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.65 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

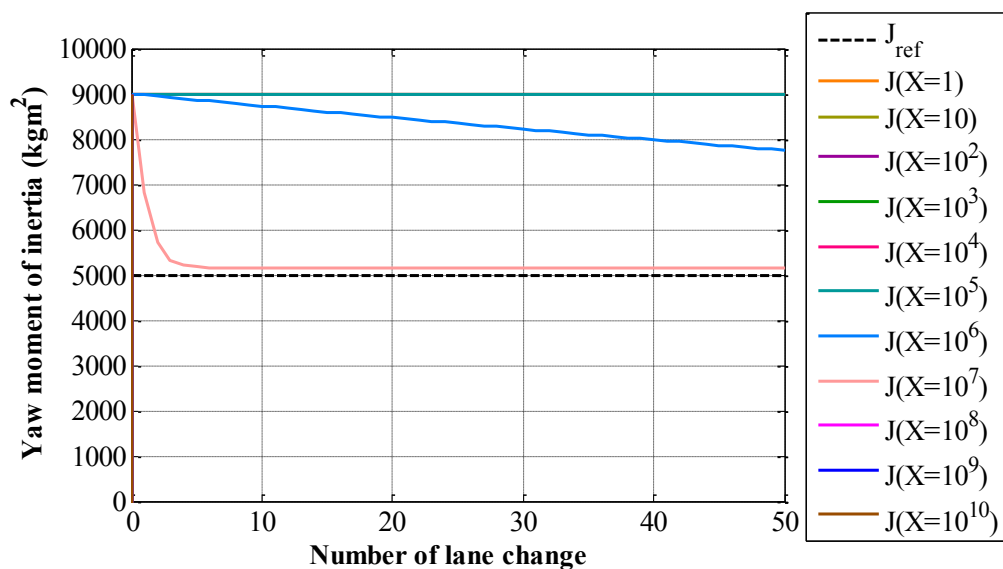


図 4.64 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

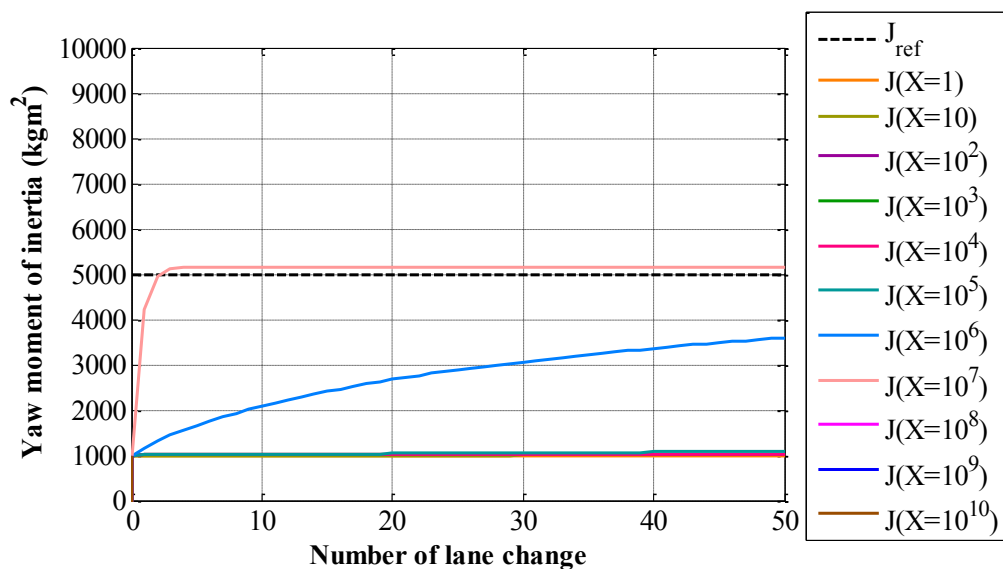


図 4.65 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )



#### 4.3.2 $D_d$ の変化時のヨー慣性モーメントの同定

式(4.21)の  $Q_p$  の  $X$  は固定し，式(4.20)の  $D_d$  の  $V$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う．推定の初期条件は，ヨー慣性モーメントの真値( $J_{\text{ref}}=5000\text{kgm}^2$ )に対し，初期値が真値より高い場合の推定と初期値が真値より小さい場合の推定を行う．真値より高い場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=9000\text{kgm}^2$  に設定する．また，真値より小さい場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=1000\text{kgm}^2$  に設定する．この初期条件を用いて様々な条件を調査し，以下の推定結果を求めた．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

図 4.66 と図 4.67 は式(4.21)で  $X=1$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.66 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.67 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

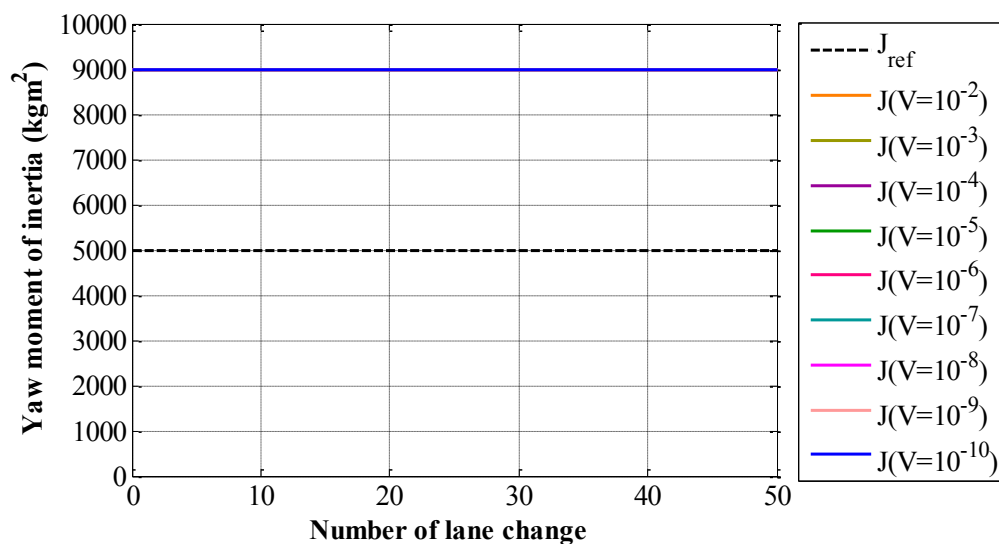


図 4.66 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

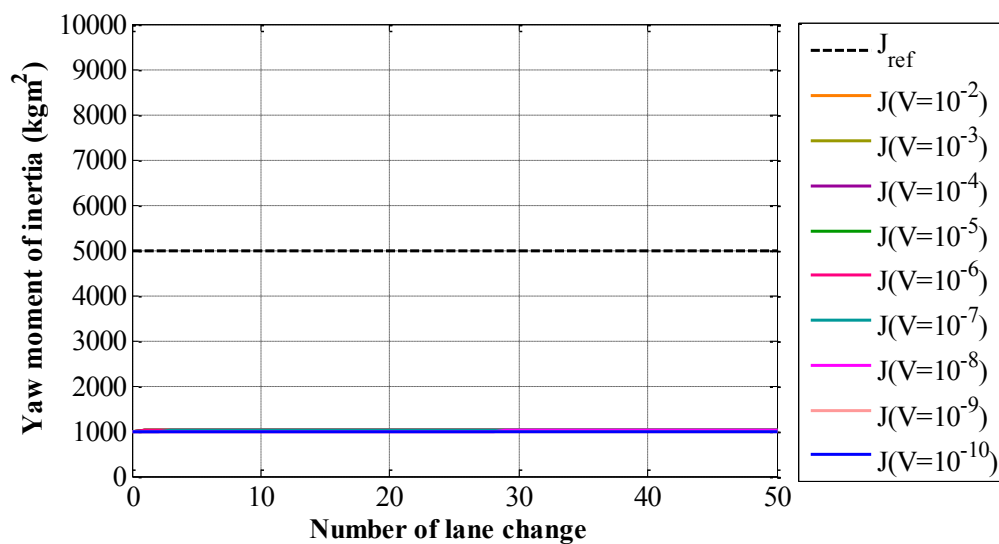


図 4.67 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.68 と図 4.69 は式(4.21)で  $X=10$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.68 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.69 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

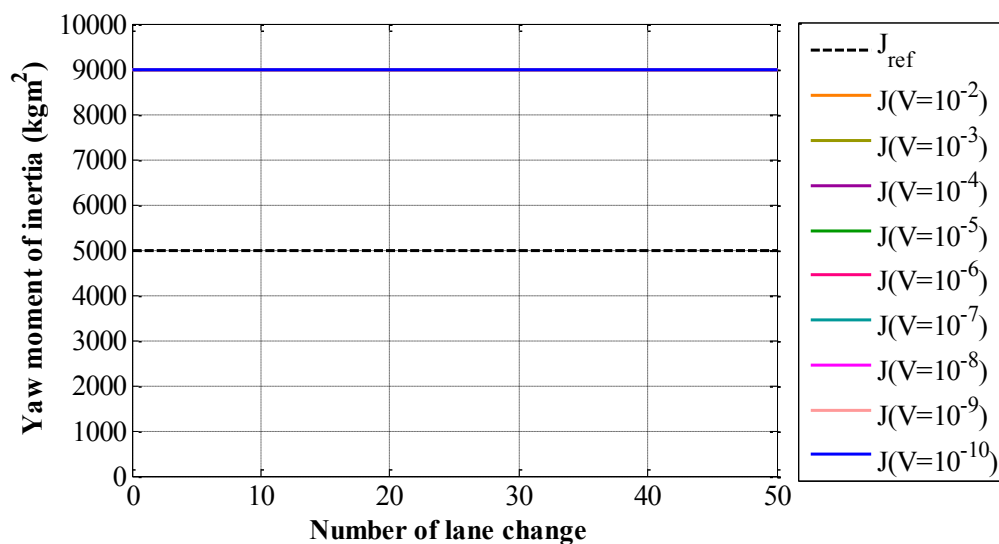


図 4.68 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

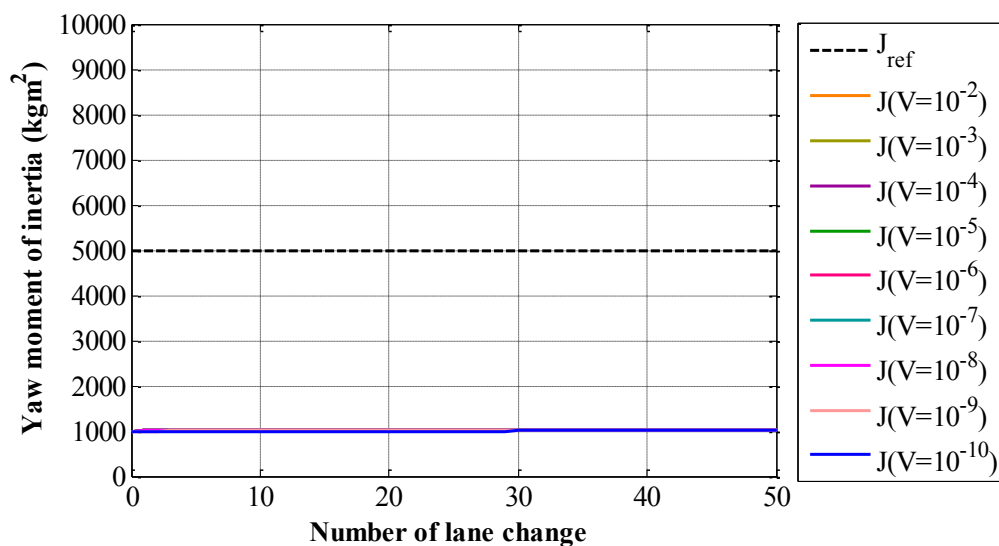


図 4.69 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.70 と図 4.71 は式(4.21)で  $X=10^2$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.70 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.71 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

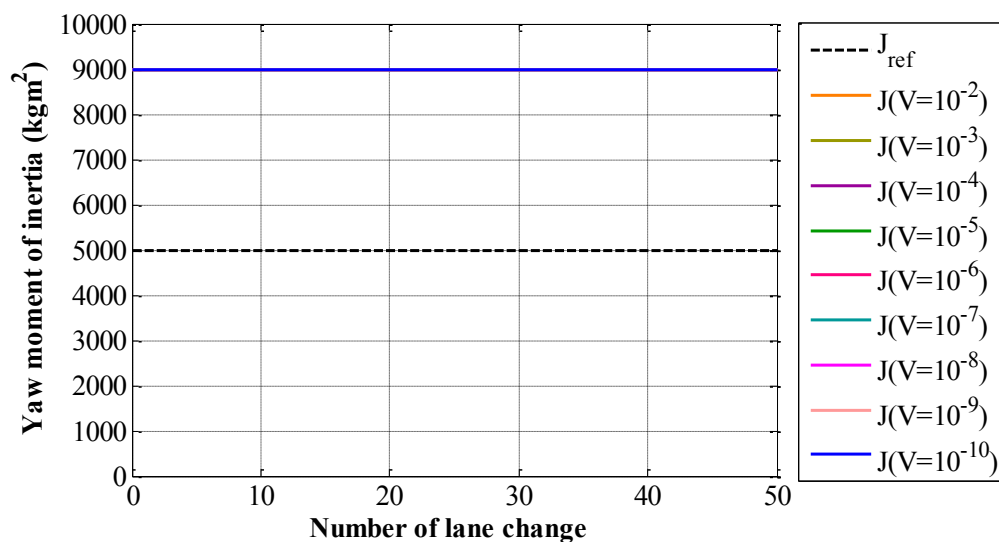


図 4.70 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

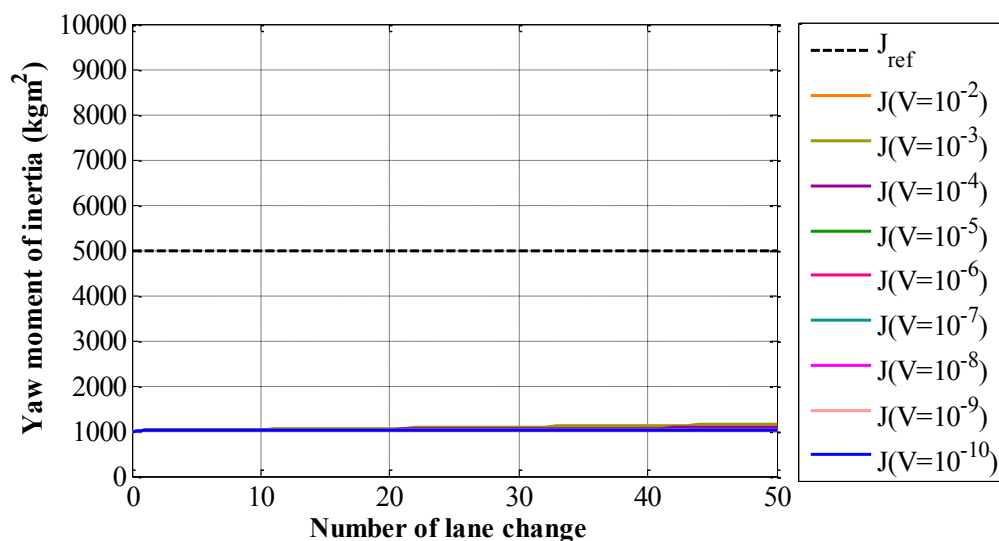


図 4.71 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.72 と図 4.73 は式(4.21)で  $X=10^3$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.72 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.73 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。この条件には前の  $X=10^2$  の場合より変化が見られる。

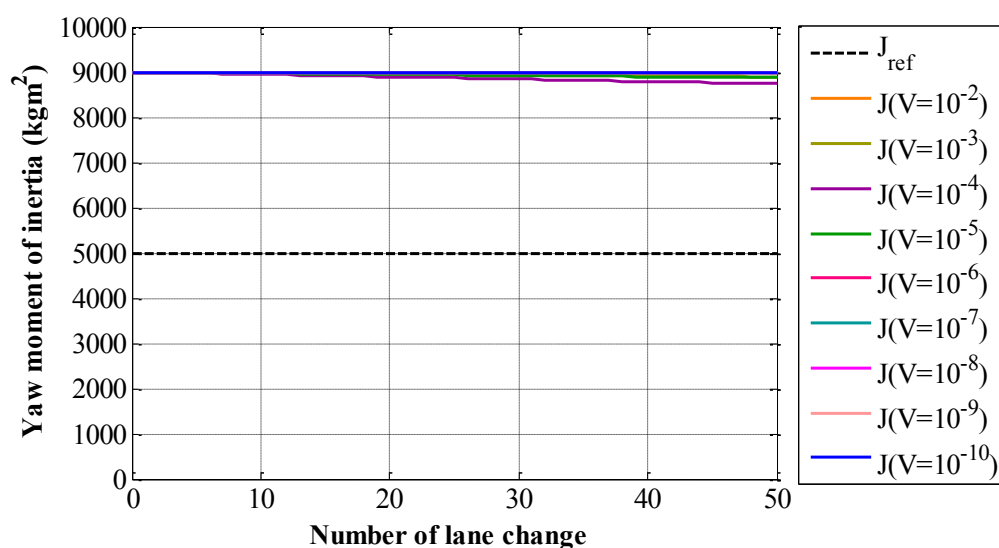


図 4.72 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

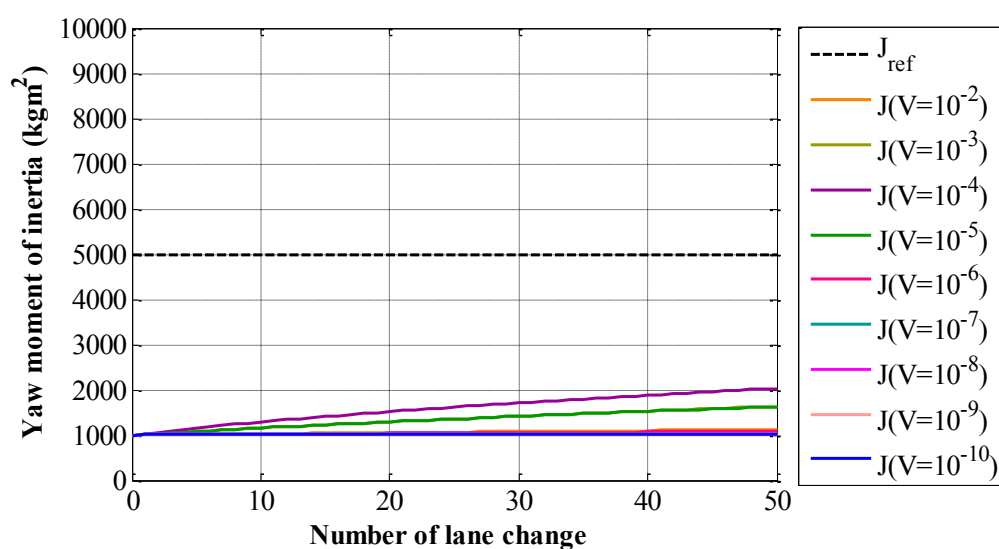


図 4.73 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.74 と図 4.75 は式(4.21)で  $X=10^4$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.74 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.75 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。この条件には前の  $X=10^3$  の場合より変化が見られる。

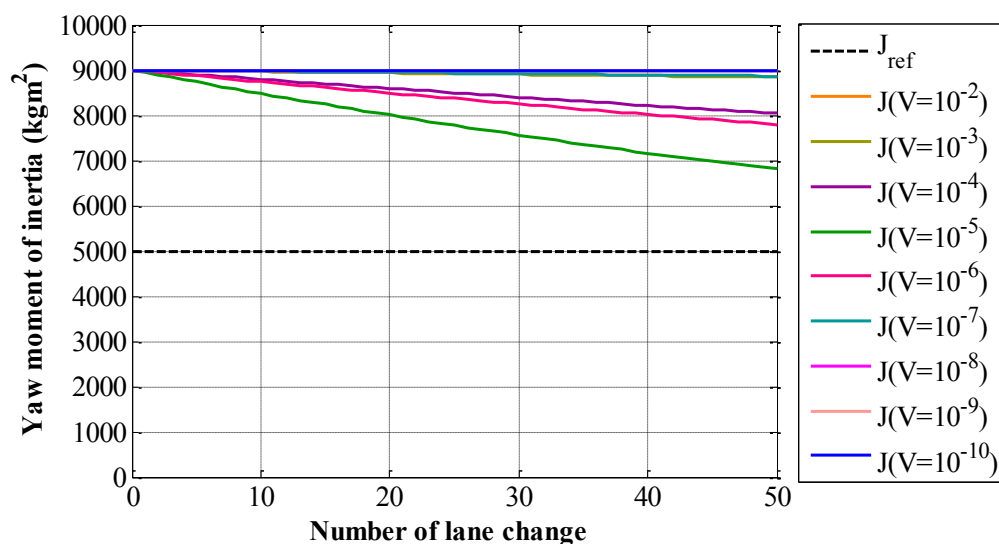


図 4.74 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

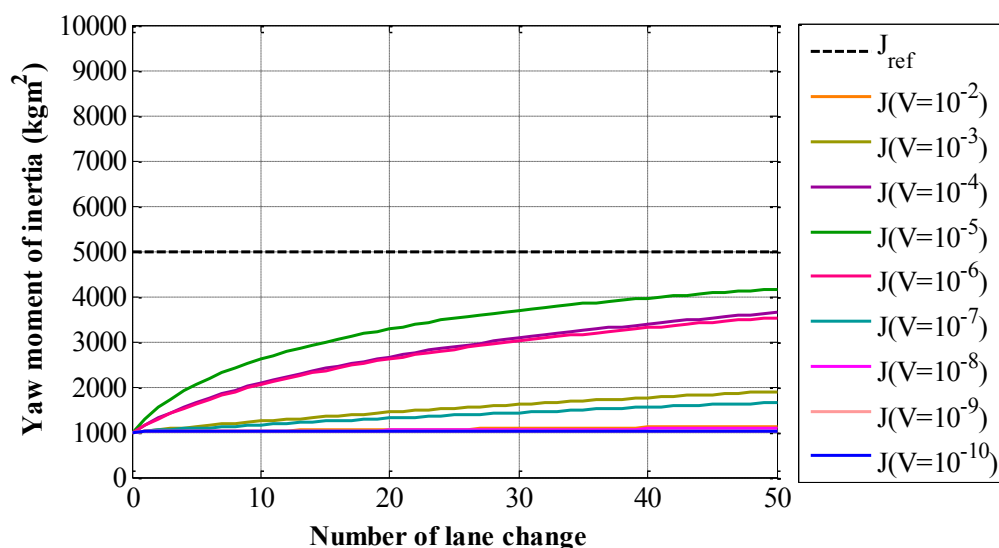


図 4.75 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.76 と図 4.77 は式(4.21)で  $X=10^5$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.76 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.77 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。この結果を見ると DKF パラメータ中で  $V$  の変化がパラメータ推定に大きく寄与することが分かる。

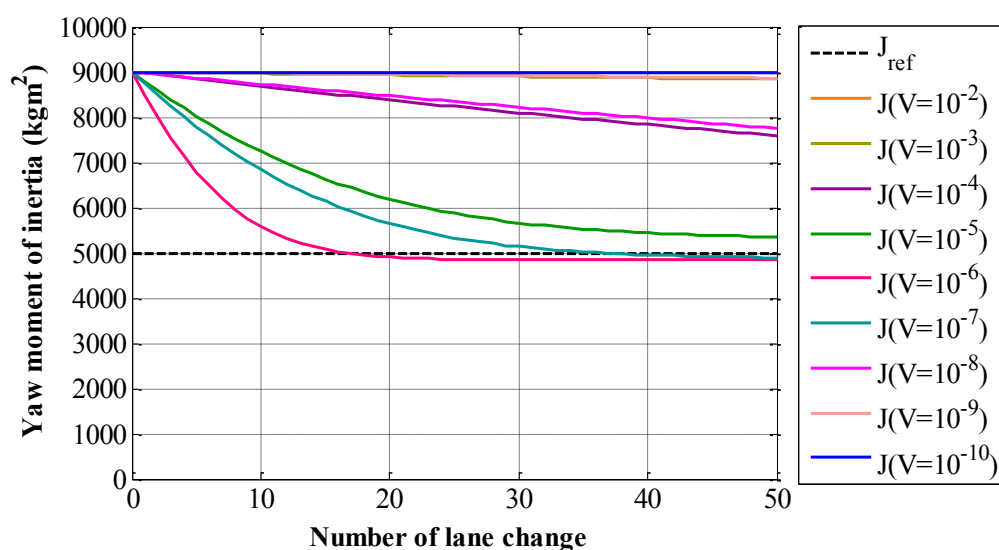


図 4.76 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

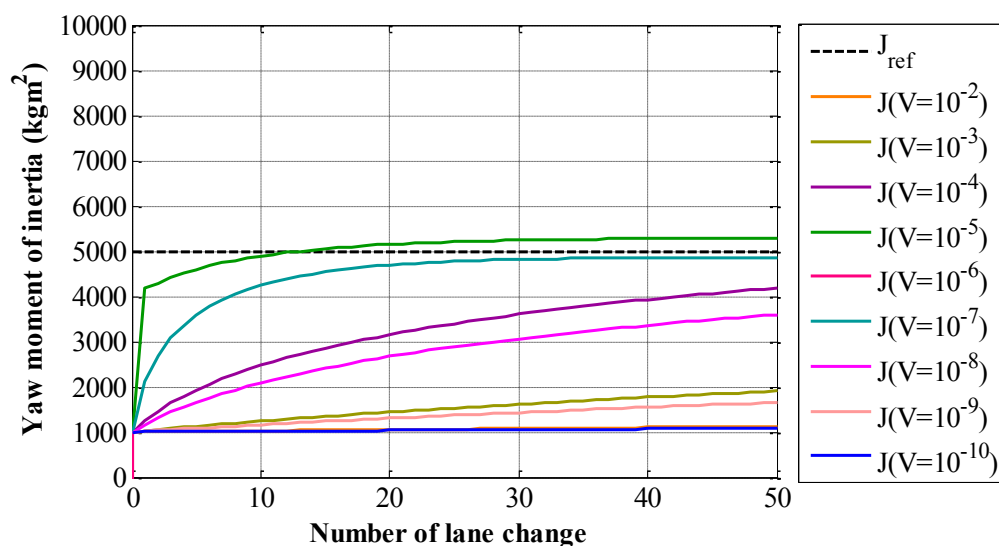


図 4.77 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.78 と図 4.79 は式(4.21)で  $X=10^6$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.78 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.79 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

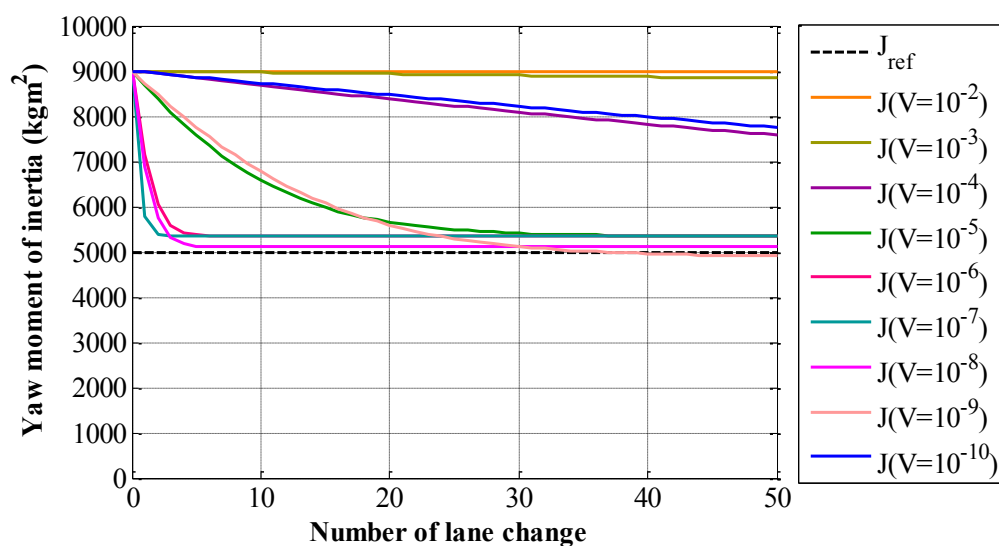


図 4.78 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

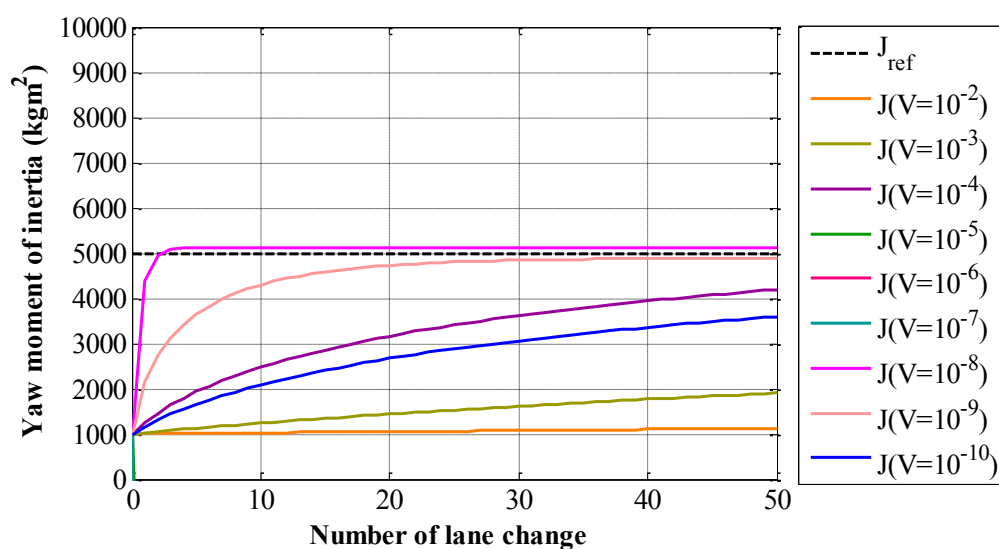


図 4.79 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )



図 4.80 と図 4.81 は式(4.21)で  $X=10^7$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.80 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.81 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

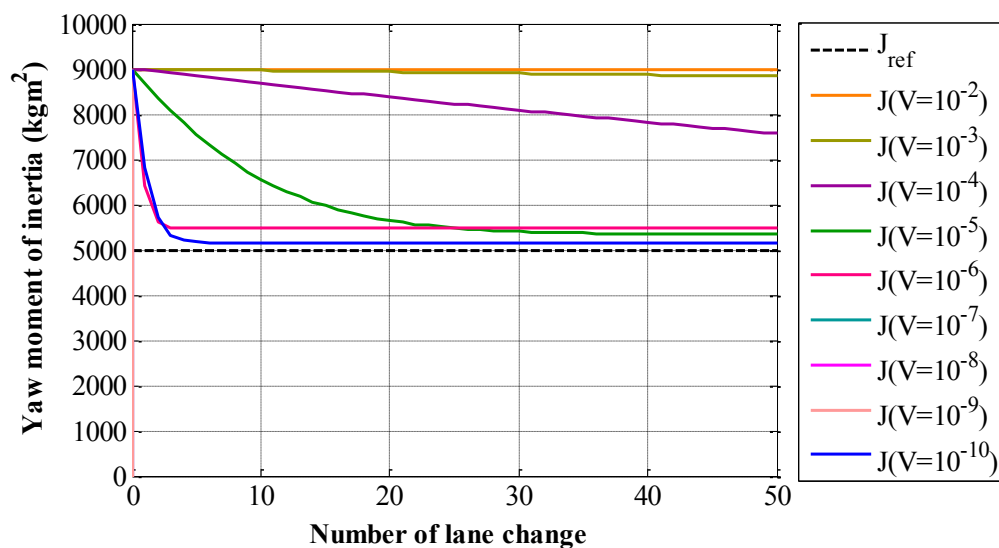


図 4.80 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

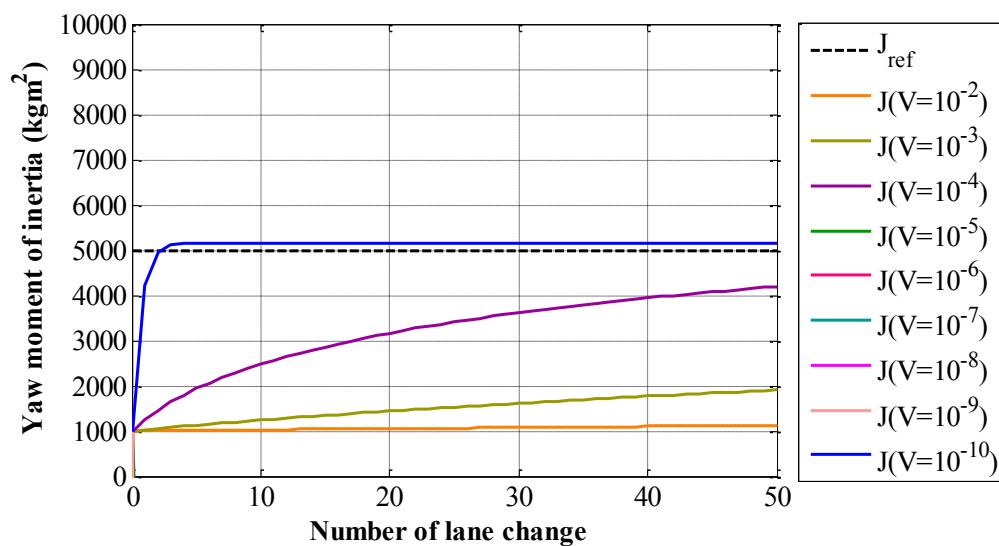


図 4.81 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.82 と図 4.83 は式(4.21)で  $X=10^8$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.82 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.83 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

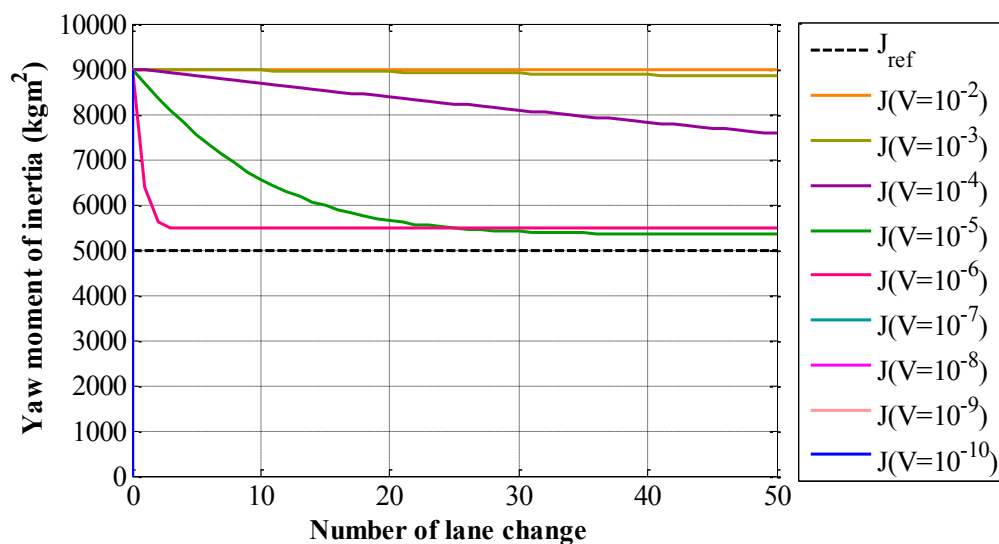


図 4.82 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

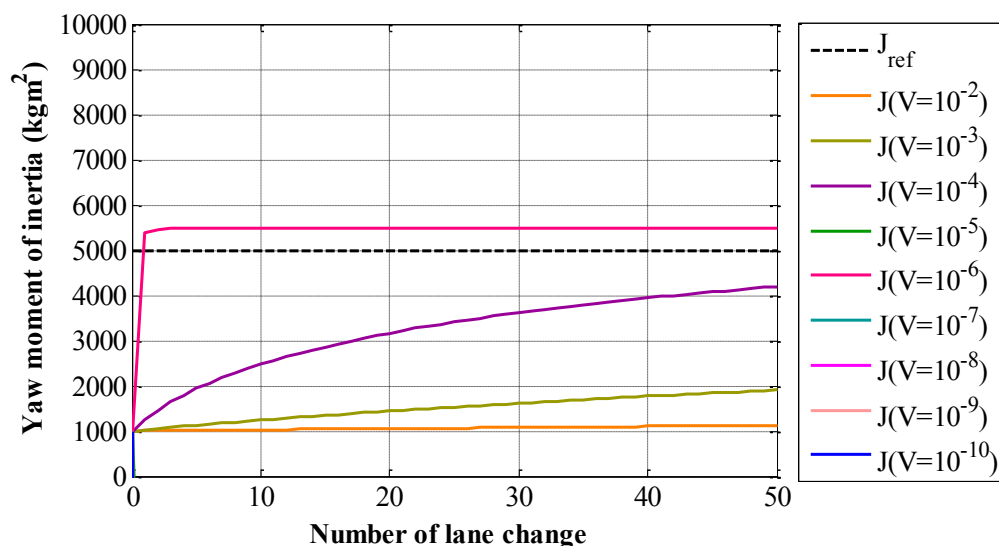


図 4.83 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.84 と図 4.85 は式(4.21)で  $X=10^9$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.84 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.85 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

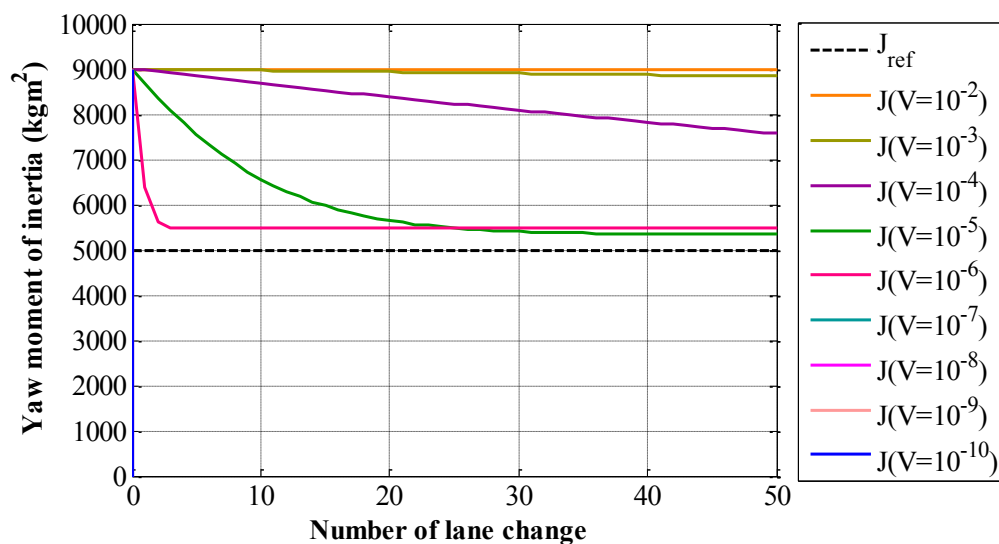


図 4.84 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

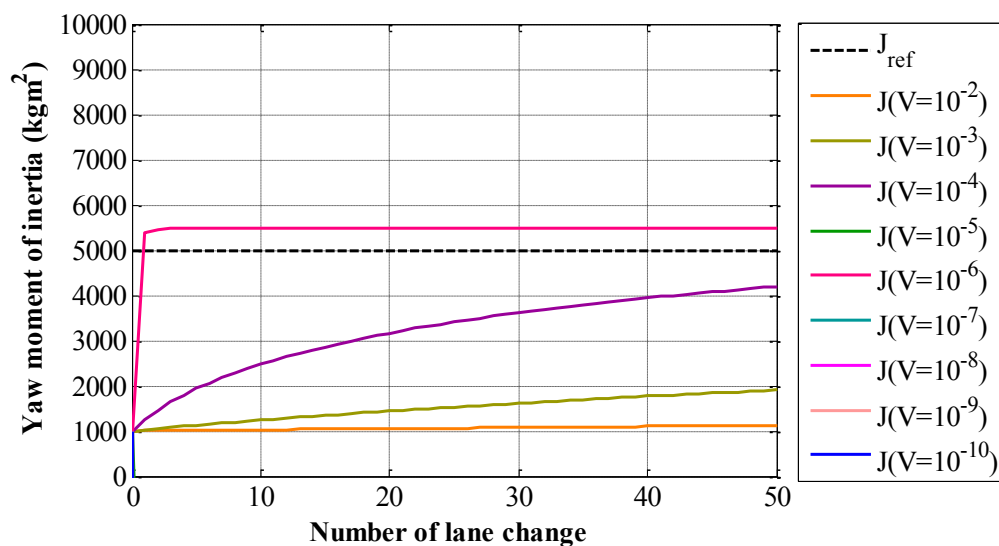


図 4.85 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

図 4.86 と図 4.87 は式(4.21)で  $X=10^{10}$  の場合、式(4.20)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントの推定結果を示す。図 4.86 は初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.87 は初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果を示す。

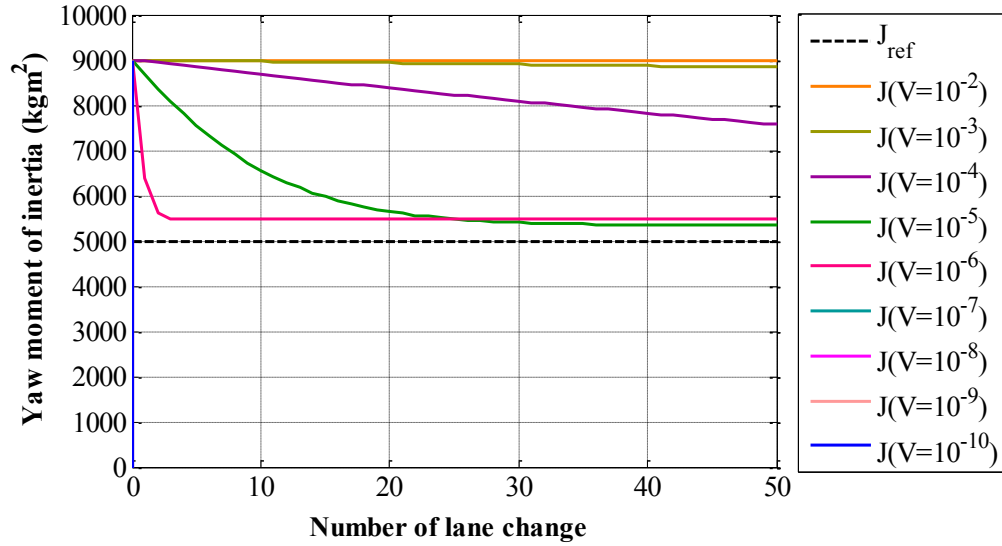


図 4.86 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

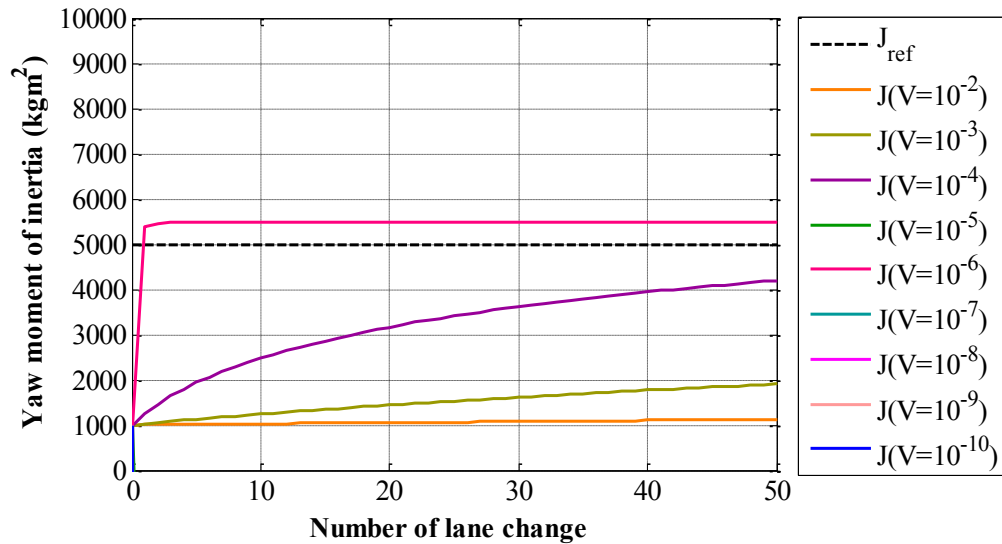


図 4.87 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

### 4.3.3 ヨー慣性モーメントの同定検討のまとめ

図 4.88 と図 4.89 は前節で求めたヨー慣性モーメント推定値と DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値との関係を整理した図である． $D_d$  の設定は式(4.22)の中で  $S$  値を-3 から-10 まで変化した場合を想定する．また， $Q_p$  の設定は式(4.23)の中で  $T$  値を 3 から 10 まで変化した場合を想定する．

$$D_d = 10^S \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$Q_p = 10^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

図 4.88 は初期値が  $J_0=9000\text{kgm}^2$  の場合，DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化に対し，ヨー慣性モーメントの推定値と真値の誤差を示した図である．灰色の部分には推定値が 30 回のレーンチェンジを行ってもある収束値が求められなかった部分を示す． $D_d$  の設定値が  $S=-5$  と  $S=-6$  時，また， $Q_p$  の設定値が  $T=5$  から  $T=10$  時にヨー慣性モーメントの推定値が真値より  $\pm 10\%$  内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる．

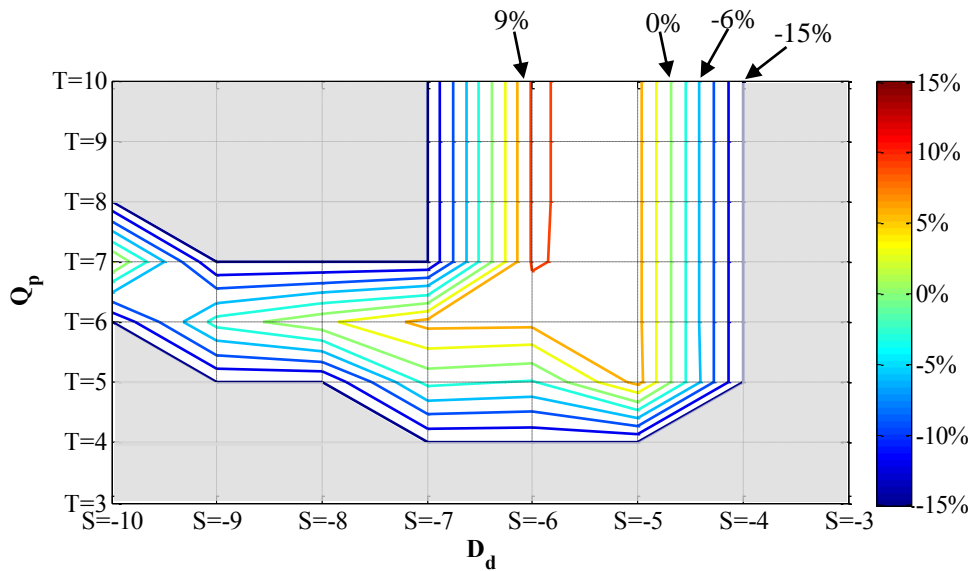


図 4.88 DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化時の  
ヨー慣性モーメント推定誤差(初期条件： $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

図 4.89 は初期値が  $J_0=1000\text{kgm}^2$  の場合、DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化に対し、ヨー慣性モーメントの推定値と真値の誤差を示した図である。 $D_d$  の設定値が  $S=-6$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=8$  から  $T=10$  時にヨー慣性モーメントの推定値が真値より  $\pm 10\%$  内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる。

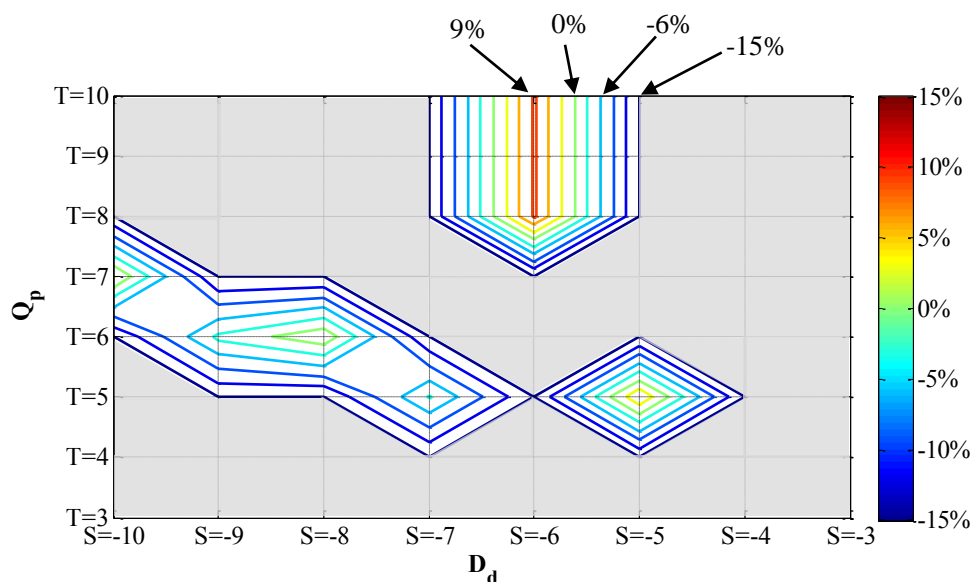


図 4.89 DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化時の  
ヨー慣性モーメント推定結果(初期条件 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

表 4.5 は初期値が  $J_0=9000\text{kgm}^2$  の場合、DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化に対し、図 4.88 であるヨー慣性モーメント推定値が求められるレーンチェンジ回数を示した表である。灰色の部分は推定値が求めなかった部分を示す。 $D_d$  の設定値が  $S=-6$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=6$  時にヨー慣性モーメントの推定値が最小のレーンチェンジで推定できることが分かる。

表 4.5 DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化時のレーンチェンジ回数  
(初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

	S=-10	S=-9	S=-8	S=-7	S=-6	S=-5	S=-4
T=10					4	20	
T=9					4	20	
T=8					4	20	
T=7	5				4	18	
T=6		40	5	3	5	20	
T=5				40	5	45	
T=4							

表 4.6 は初期値が  $J_0=1000\text{kgm}^2$  の場合、DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化に対し、図 4.89 であるヨー慣性モーメント推定値が求められるレーンチェンジ回数を示した表である。灰色の部分は推定値が求めなかった部分を示す。 $D_d$  の設定値が  $S=-6$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=8,9,10$  時にヨー慣性モーメントの推定値が最小のレーンチェンジで推定できることが分かる。

表 4.6 DKF の設定パラメータ ( $Q_p$  と  $D_d$ ) 設定値の変化時のレーンチェンジ回数  
(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

	S=-10	S=-9	S=-8	S=-7	S=-6	S=-5	S=-4
T=10					3		
T=9					3		
T=8					3		
T=7	4						
T=6		30	4				
T=5				30		30	
T=4							

以上の結果より、真値より高い初期値から推定値が求められる条件中で、真値より小さい初期値から推定値が求められない場合があるが、ヨー慣性モーメント推定ができる条件が存在することが確認できる。そのため、他の車両に対するヨー慣性モーメントを推定条件が存在することを示す。

図 4.88 と図 4.89 のヨー慣性モーメントの推定誤差の結果で、真値より高い初期値からの推定結果と真値より小さい初期値からの推定結果の両方の結果が  $\pm 10\%$  誤差内で合う推定条件は次のように整理した。

- ・推定条件 1 :  $V=10^{-5}$ ,  $X=10^5$
- ・推定条件 2 :  $V=10^{-6}$ ,  $X=10^8$
- ・推定条件 3 :  $V=10^{-7}$ ,  $X=10^5$
- ・推定条件 4 :  $V=10^{-8}$ ,  $X=10^6$
- ・推定条件 5 :  $V=10^{-9}$ ,  $X=10^6$
- ・推定条件 6 :  $V=10^{-10}$ ,  $X=10^7$

図 4.90 は求めた推定条件 1 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $5287\text{kgm}^2$  に合って, 真値( $J_0=5000\text{kgm}^2$ )と比べて 5.7%の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 45 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

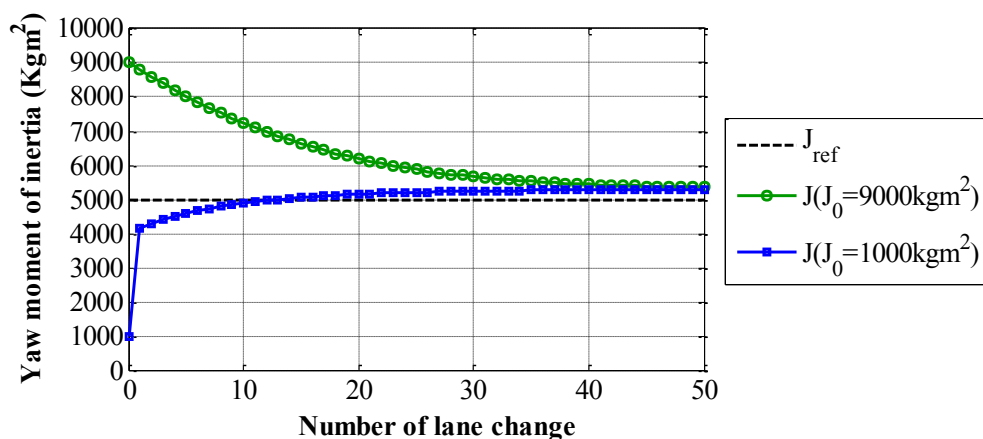


図 4.90 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 1 の場合)

図 4.91 は求めた推定条件 2 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $5472\text{kgm}^2$  に合って, 真値と比べて 9.4%の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 4 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

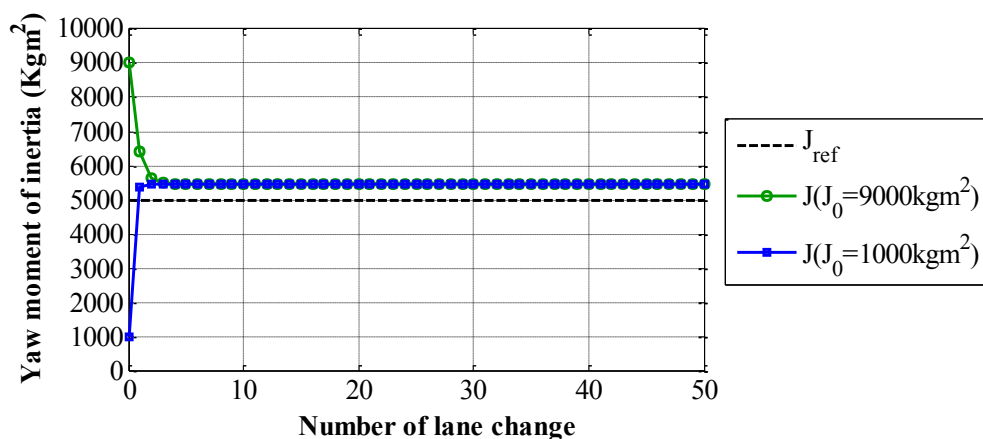


図 4.91 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 2 の場合)



図 4.92 は求めた推定条件 3 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $4894\text{kgm}^2$  に合って, 真値と比べて  $-2.1\%$  の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 40 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

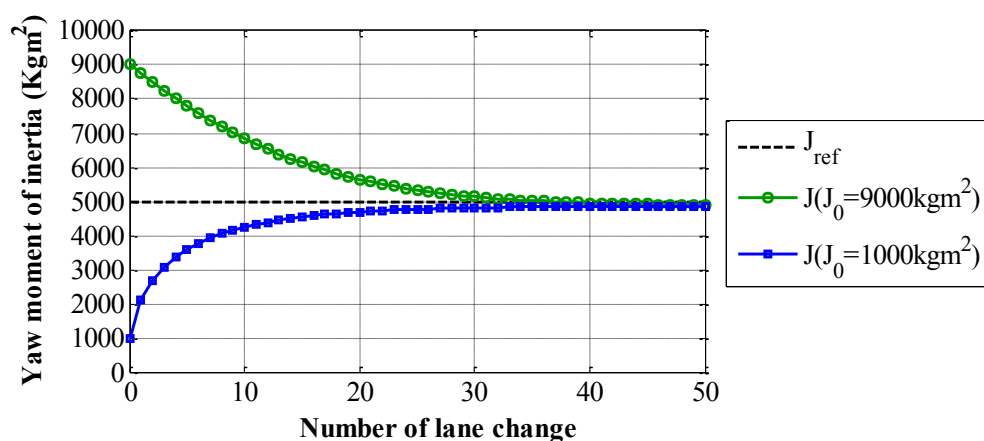


図 4.92 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 3 の場合)

図 4.93 は求めた推定条件 4 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $5114\text{kgm}^2$  に合って, 真値と比べて  $2.3\%$  の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 5 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

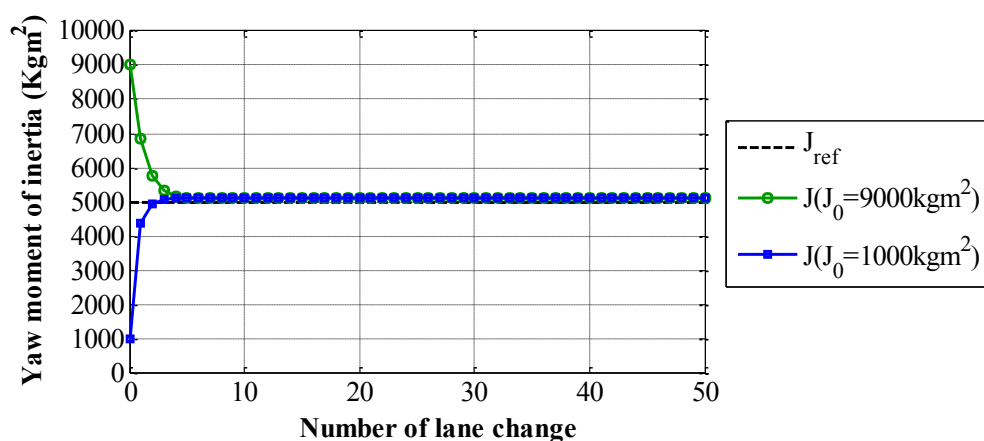


図 4.93 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 4 の場合)

図 4.94 は求めた推定条件 5 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $4909\text{kgm}^2$  に合って, 真値と比べて-1.6%の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 40 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

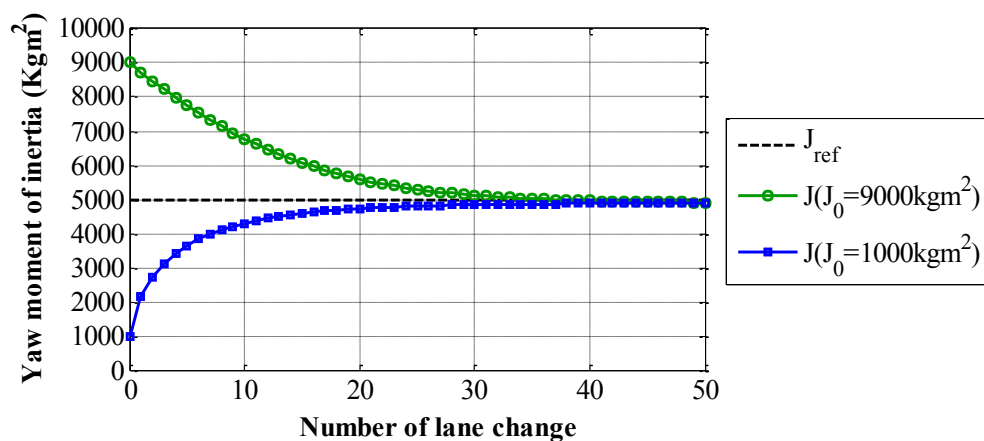


図 4.94 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 5 の場合)

図 4.95 は求めた推定条件 6 の場合, 異なる初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $5159\text{kgm}^2$  に合って, 真値と比べて 3.2%の誤差がある. また, このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 5 回のレーンチェンジが必要であることが分かる.

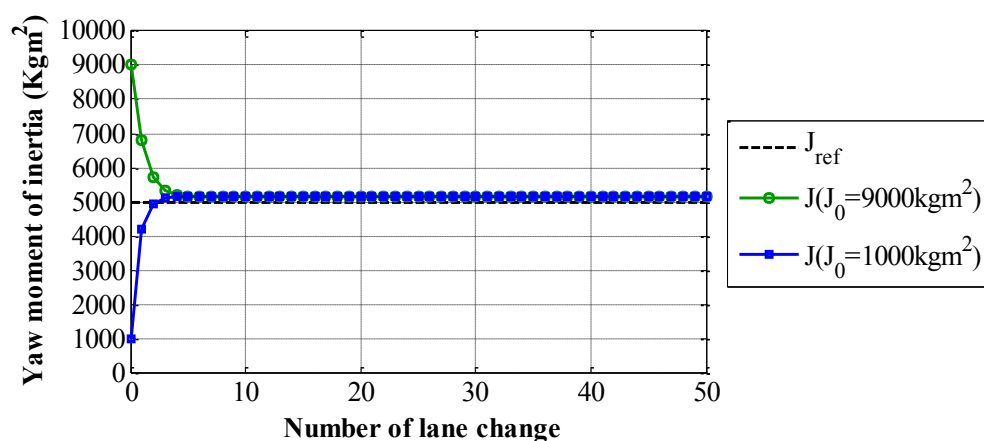


図 4.95 ヨー慣性モーメント推定結果(推定条件 6 の場合)

検討結果、推定条件 2 と推定条件 4、推定条件 6 の場合が最小のレーンチェンジで推定値が求められることが分かる。この推定条件中で、推定条件 6 の方が推定値の誤差が最小になることが分かる。そのため、コーナリングスティフネスの値が既知でヨー慣性モーメントの推定の場合、最良条件は推定条件 6であることを求めた。

図 4.96 はヨー角速度に対し、推定条件 1 から推定条件 6 まで条件を適用した場合のヨー角速度の状態推定結果で、ヨー角速度の推定結果は真値の場合の推定結果とほぼ一致する結果が得られた。図 4.97 はスリップ角に対し、推定条件 1 から推定条件 6 まで条件を適用した場合のスリップ角の状態推定結果で、スリップ角の推定結果は真値の場合の推定結果とほぼ一致する結果が得られた。

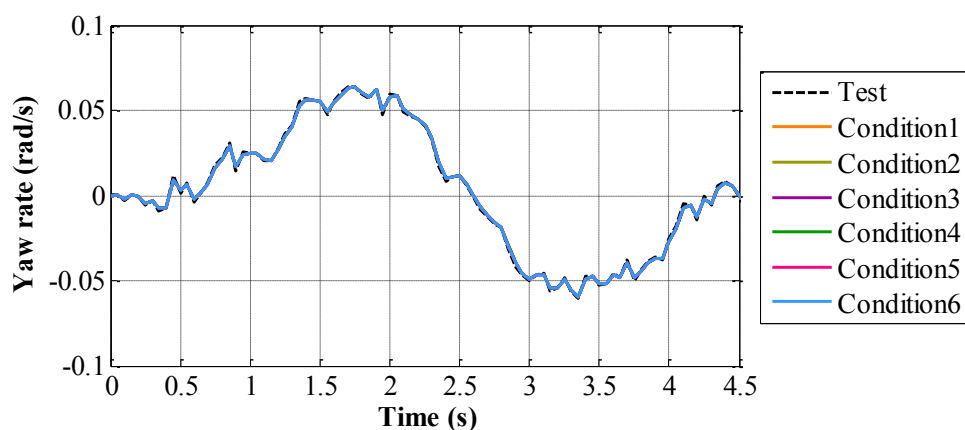


図 4.96 ヨー角速度の推定結果

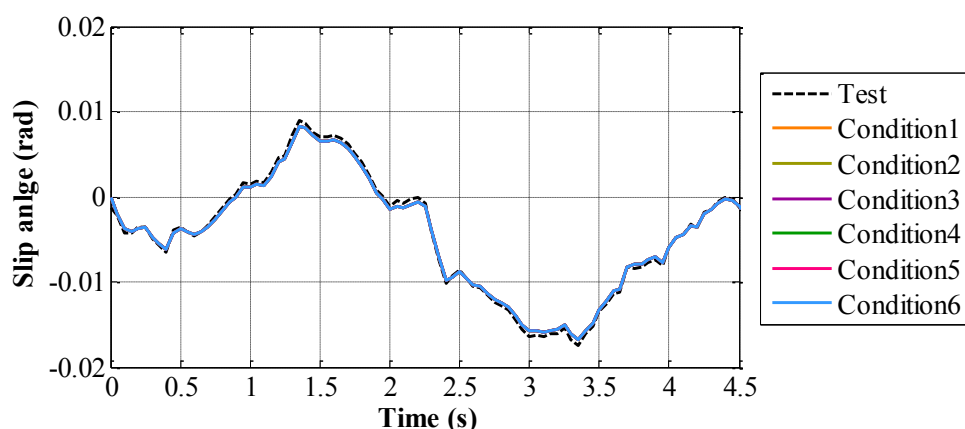


図 4.97 スリップ角の推定結果

#### 4.3.4 カントがある区間でのヨー慣性モーメントの同定

一般道路は平地区間だけではなくカントがある区間もある。カントがあるところでもパラメータ同定の検討が必要であり，カント区間を走行時のヨー慣性モーメントの推定を検討する。4.2 節で示したカントがある区間を走行時のヨー慣性モーメントの推定結果を求める。図 4.98 は推定条件 1 を適用した場合のヨー慣性モーメントの推定結果の例で，初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $1000\text{kgm}^2$ )からのヨー慣性モーメントの推定値が  $4322\text{kgm}^2$  に合って，真値 ( $J_0=5000\text{kgm}^2$ )と比べて-13%の誤差がある。また，このヨー慣性モーメントの推定値を求められるまで 15 回のカントがある区間を走行する必要があることが分かる。前節の平地区間で同じ推定条件 1 を適用し求めた推定結果である図 4.90 と比較すると，推定誤差が大きくなることが分かる。この理由はカントがある区間は車両のコーナリング走行が平地よりしやすくなることでヨー慣性モーメント推定値が低く求められると考えられるが，DKF によるヨー慣性モーメント同定ができることを確認した。

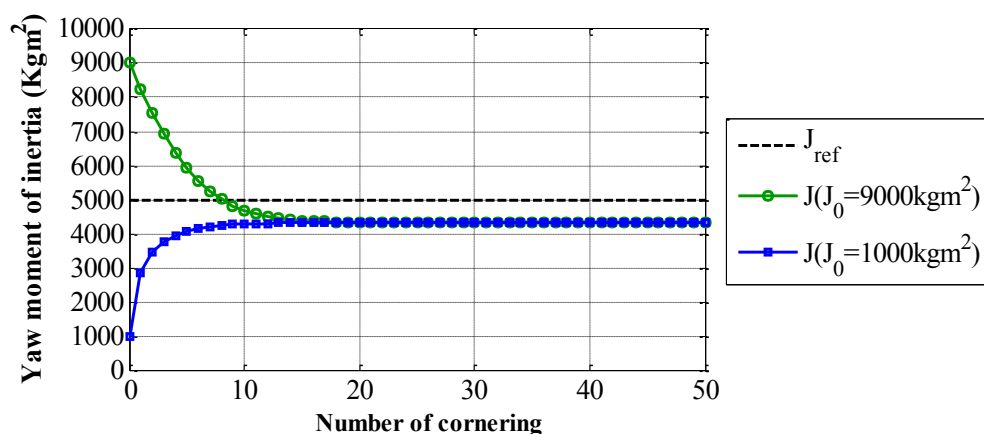


図 4.98 カントがある区間でのヨー慣性モーメント推定結果

#### 4.3.5 ヨー慣性モーメント推定値の予測

図 4.99-図 4.104 は、図 4.90-図 4.95 のようにヨー慣性モーメント推定結果に、3.6 節のパラメータ予測手法(式(4.24))を用いて、ヨー慣性モーメントの推定値の予測結果を求めた。

$$P_{Pre(n)} = \frac{-\left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)P_{L(n-1)} + P_{H(n-1)}}{1 - \left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)} \quad (4.24)$$

図 4.99 は前節である図 4.90 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、10 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 45 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

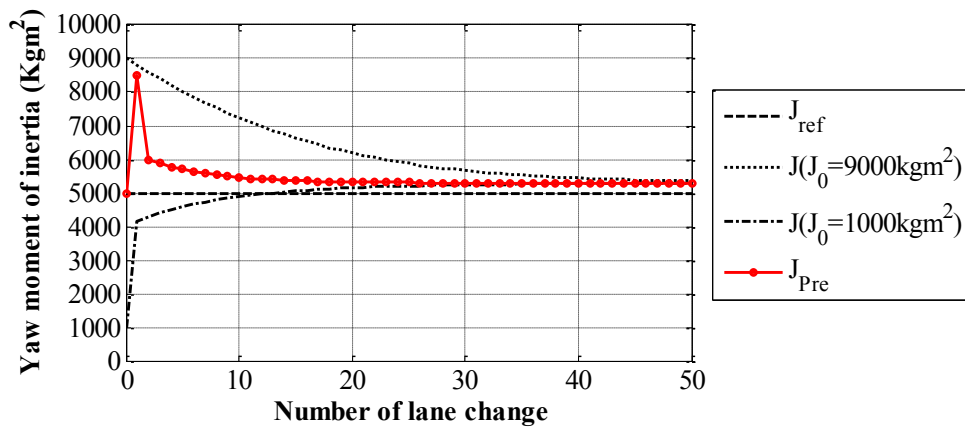


図 4.99 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 1 の場合)

図 4.100 は前節である図 4.91 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、2 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 4 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

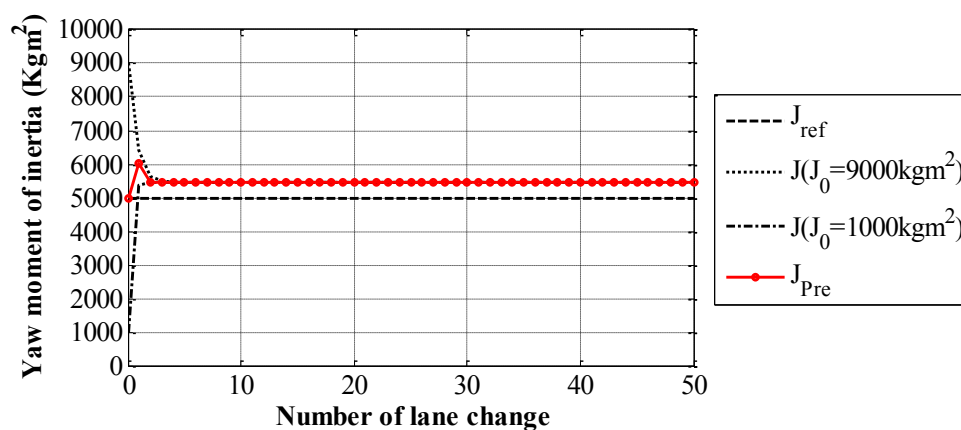


図 4.100 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 2 の場合)

図 4.101 は前節である図 4.92 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、13 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 40 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

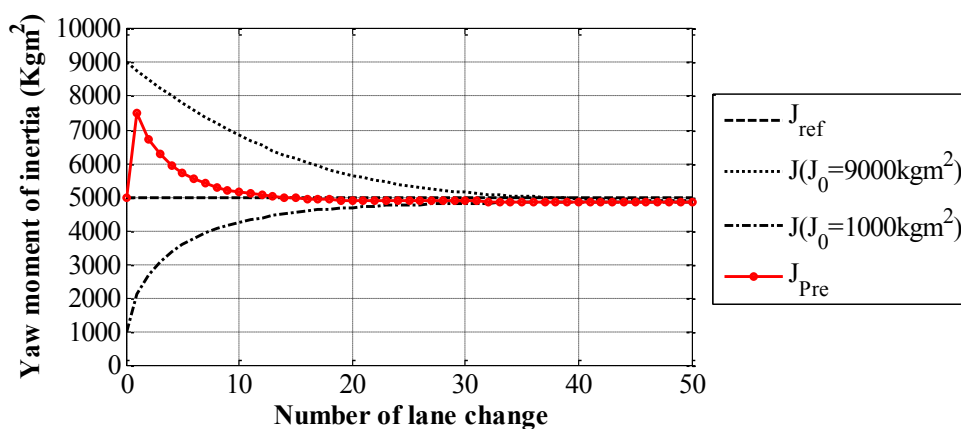


図 4.101 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 3 の場合)

図 4.102 は前節である図 4.93 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、2 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 4 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

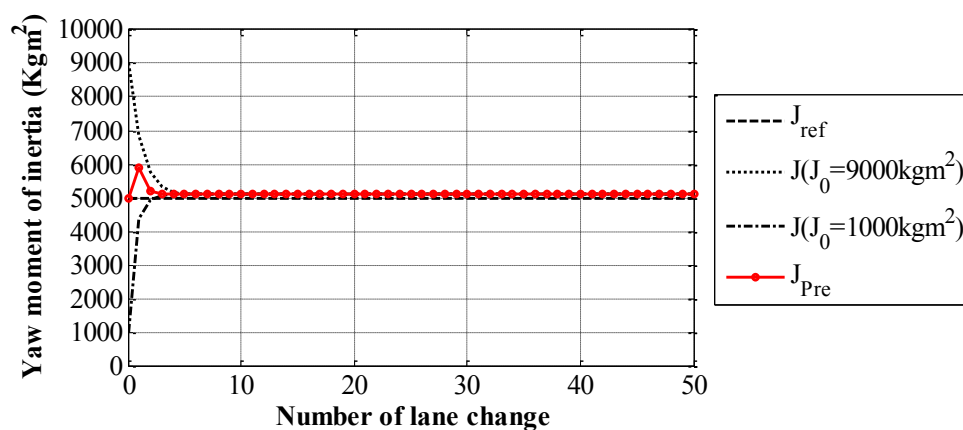


図 4.102 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 4 の場合)

図 4.103 は前節である図 4.94 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、12 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 40 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

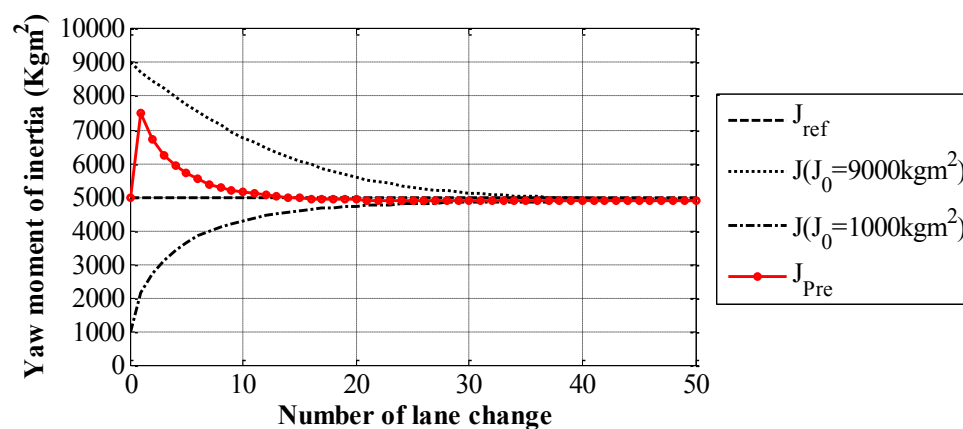


図 4.103 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 5 の場合)

図 4.104 は前節である図 4.95 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、2 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 4 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

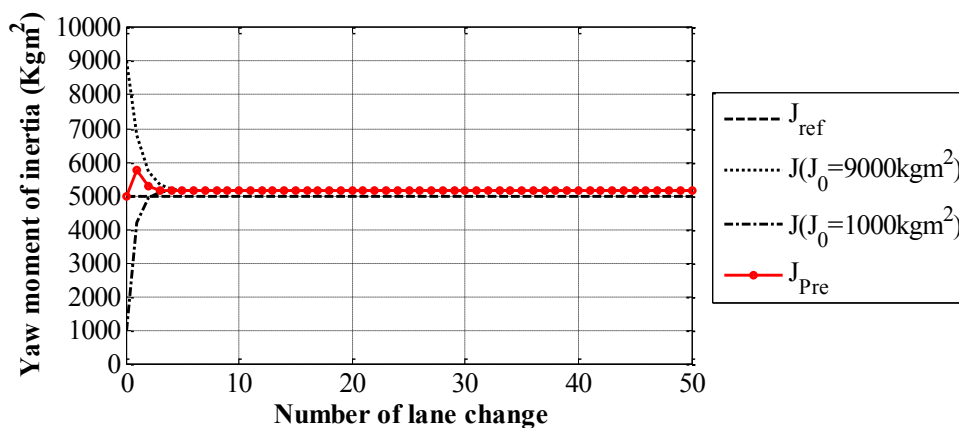


図 4.104 ヨー慣性モーメント推定の予測結果 (推定条件 6 の場合)

図 4.105 は図 4.98 で示したカントがある区間でのヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、7 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 15 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

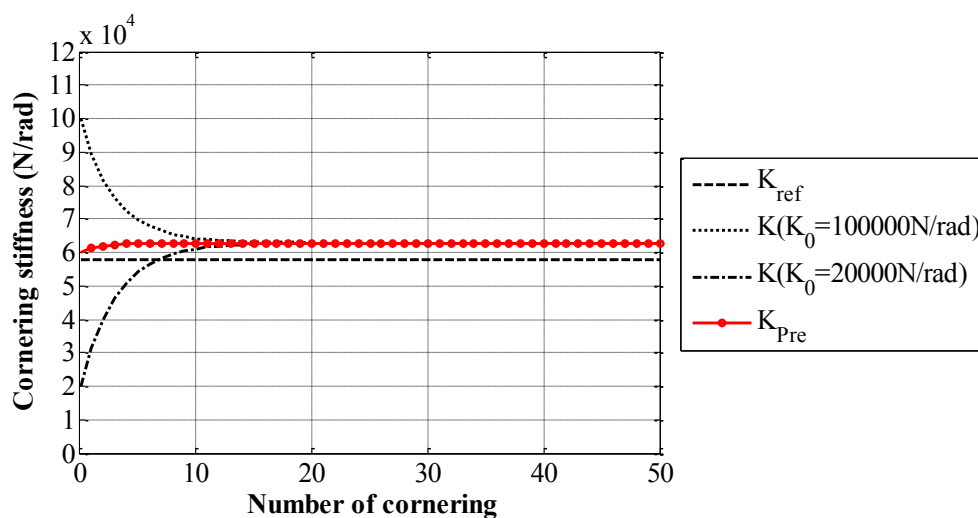


図 4.105 ヨー慣性モーメント推定の予測結果



#### 4.4 コーナリングスティフネス同定

本節ではコーナリングスティフネスの同定する検討を行う．ヨー慣性モーメントの値は既知として一定であると想定する．コーナリングスティフネスの同定には，式(4.25)-(4.29)の DKF アルゴリズムのパラメータ中で， $R_p$  は式(4.30)のように固定し，式(4.31)の  $D_p$  の  $V$  と式(4.32)の  $Q_p$  の  $X$  を調整し最良な推定条件を求めて，コーナリングスティフネスの推定値を求める．

$$\hat{p}_k^- = \hat{p}_{k-1} \quad (4.25)$$

$$U_k^- = U_{k-1} + Q_p \quad (4.26)$$

$$G_k = U_k^- D_k^T (D_k U_k^- D_k^T + R_p)^{-1} \quad (4.27)$$

$$\hat{p}_k = \hat{p}_k^- + G_k (y_k - C_d \hat{x}_k) \quad (4.28)$$

$$U_k = (I - G_k D_k) U_k^- \quad (4.29)$$

$$R_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

コーナリングスティフネスの同定検討を行うため、式(4.31)-式(4.32)の  $D_d$  と  $Q_P$  の値を調整し様々な条件でコーナリングスティフネス推定条件を調べた結果、(4.31)のように  $D_d$  の行列内の  $Z$  値を変化させるとパラメータ推定ができることを分かった。 $D_d$  は 2.2 節の Dual Kalman filter アルゴリズムで、パラメータの出力モデル行列を示す。 $D_d$  の行列は前節のヨー慣性モーメント推定用  $D_d$  と異なる構成である。DKF アルゴリズムで式(4.31)のように  $D_d$  を設定すると、式(4.33)コーナリングスティフネス推定値  $\hat{K}_k$  を求めるためには、ヨー角速度の測定値と推定値の誤差 ( $\tilde{\gamma}_k = \gamma_k - \hat{\gamma}_k$ ) とスリップ角の測定値と推定値の誤差 ( $\tilde{\beta}_k = \beta_k - \hat{\beta}_k$ ) が  $Z$  値分の関係を持って、コーナリングスティフネス推定値  $\hat{K}_k$  を求めることを示す。これからは  $D_d$  と  $Q_P$  の値が変化すると推定結果の影響について調査する。

$$\begin{bmatrix} \hat{J}_k \\ \hat{K}_k \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\gamma}_k \\ \tilde{\beta}_k \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

#### 4.4.1 $Q_p$ の $Z$ 値が変化時の変化時のコーナリングスティフネスの同定

式(4.34) $D_d$ の $V$ と式(4.35)の $Q_p$ の $X$ を固定し, 式(4.34)の $D_d$ の $Z$ を変化させた場合のパラメータ推定を行う. 推定の初期条件は, コーナリングスティフネスの真値( $K_{\text{ref}}=57932\text{N/rad}$ )に対し, 初期値が真値より高い場合の推定と, 初期値が真値より小さい場合の推定を行う. 真値より高い場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=100000\text{N/rad}$  に設定する. また, 真値より小さい場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=20000\text{N/rad}$  に設定する. この初期条件を用いて様々な条件を調査し, 以下の推定結果を求めた.

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

図 4.106 と図 4.107 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^5$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.106 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.107 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

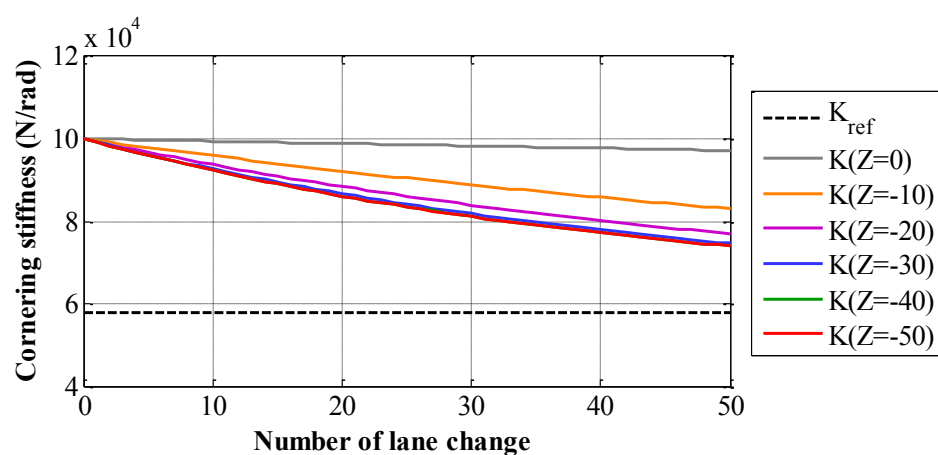


図 4.106 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

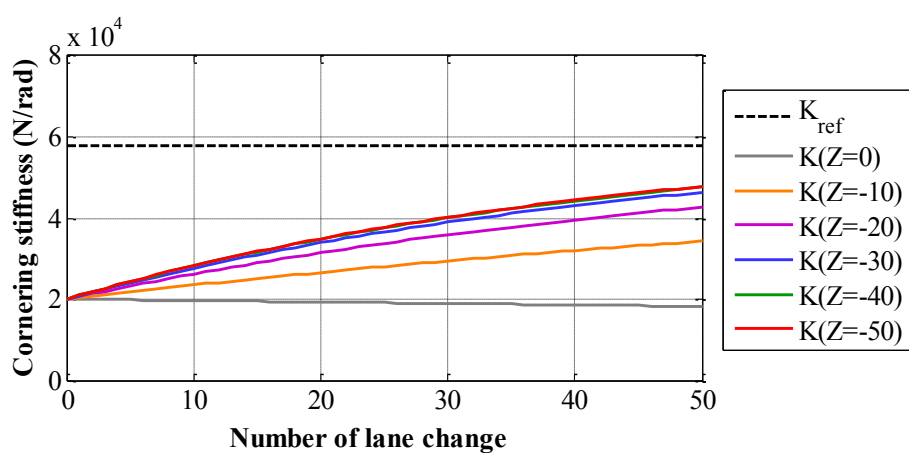


図 4.107 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.108 と図 4.109 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^6$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.108 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.109 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件には  $Z=0$  以外の  $Z$  値に対し、 $Z=-10$  から  $Z=-50$  になるとある値に接近することが分かる。

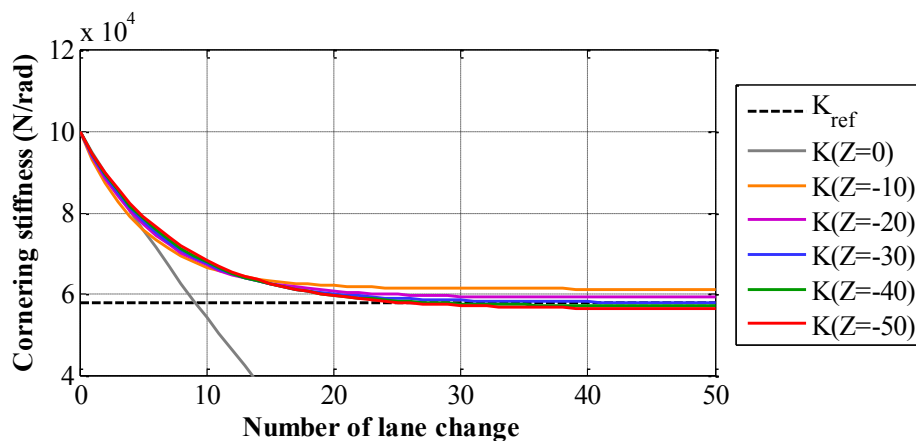


図 4.108 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

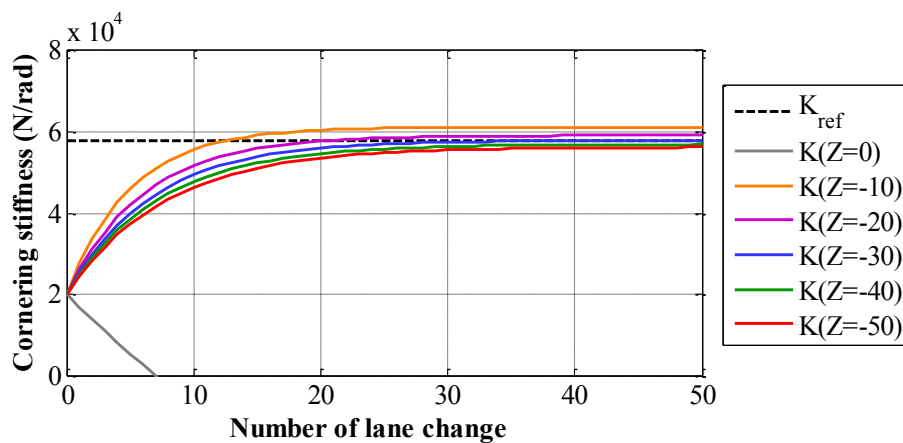


図 4.109 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.110 と図 4.111 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^7$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.110 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.111 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。前の  $X=10^6$  より  $X=10^7$  のほうが速くある値に接近することが分かる。

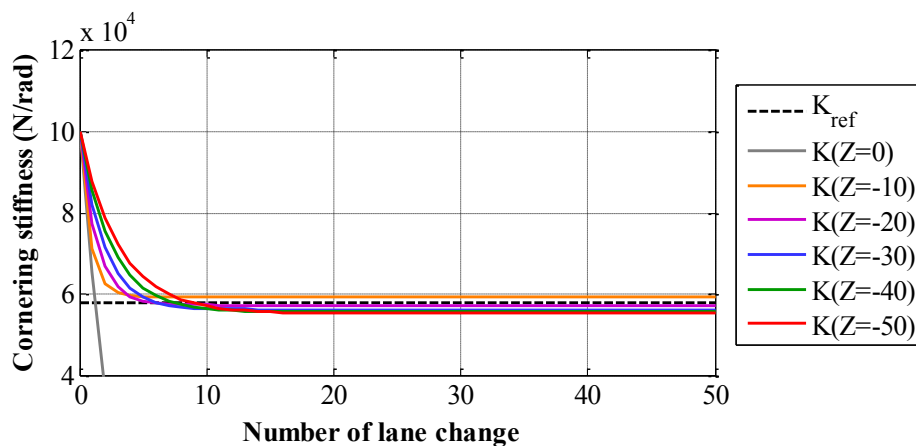


図 4.110 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

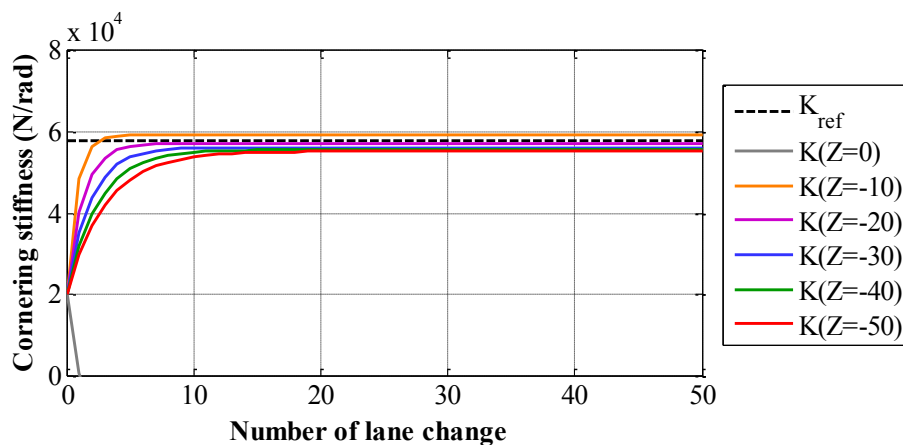


図 4.111 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.112 と図 4.113 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^8$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.112 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.113 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。前の  $X=10^7$  の場合と同様で  $Z=-10$  の場合が異なる。

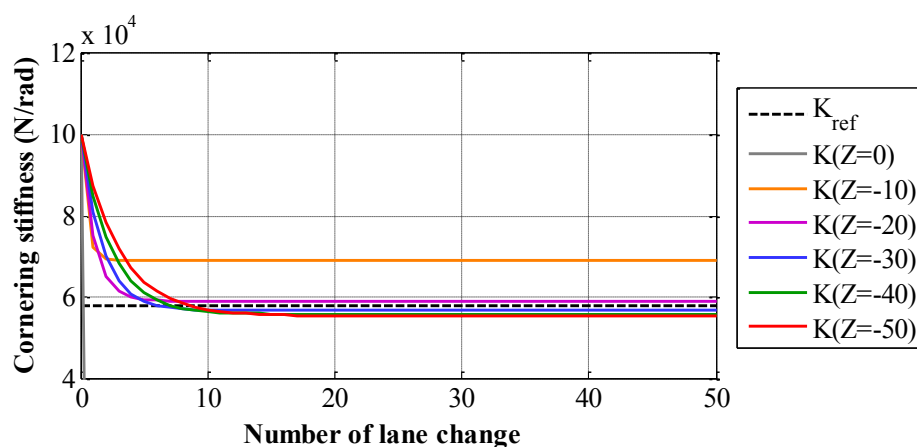


図 4.112 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

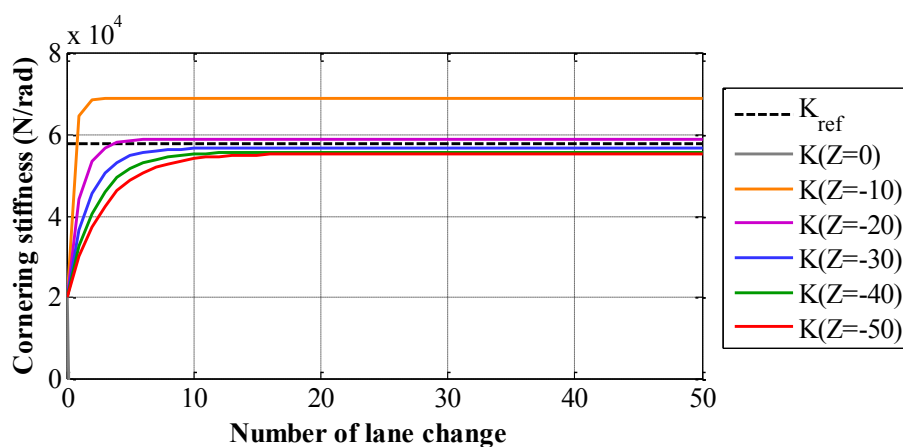


図 4.113 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.114 と図 4.115 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^9$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.114 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.115 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。前の  $X=10^8$  の場合と同様である。

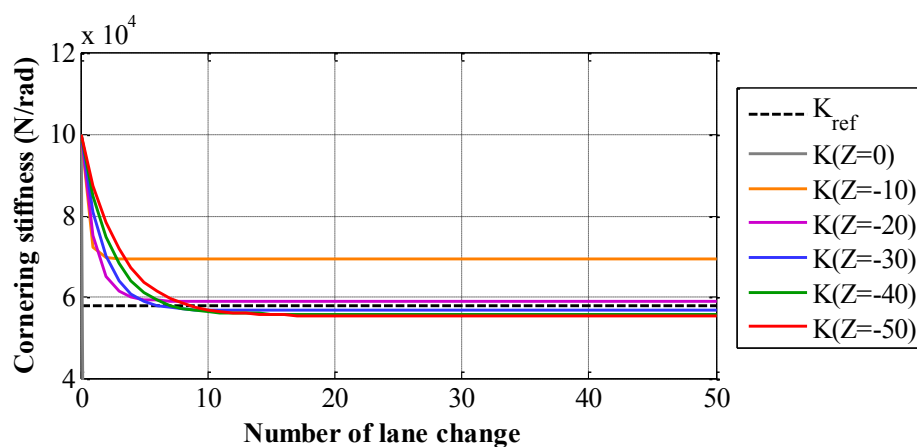


図 4.114 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

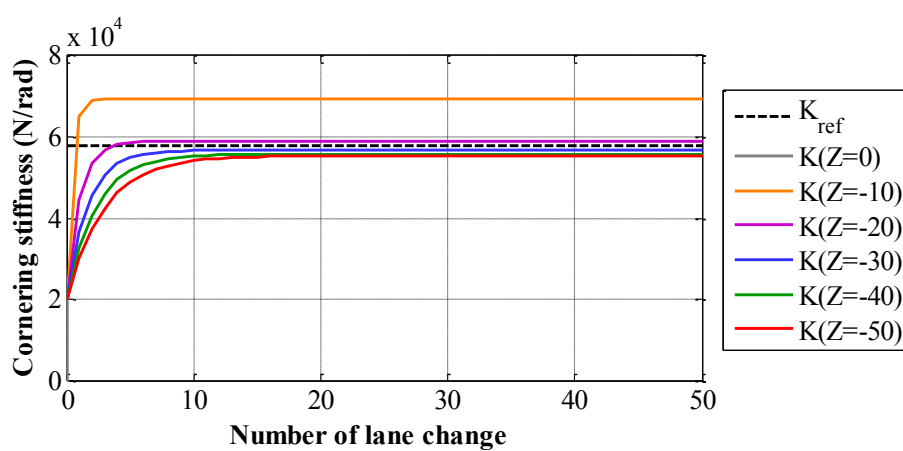


図 4.115 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )



図 4.116 と図 4.117 は式(4.34)で  $V=10^{-8}$  及び式(4.35)で  $X=10^{10}$  の場合、式(4.34)の  $Z$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.116 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.117 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。前の  $X=10^9$  の場合と同様である。

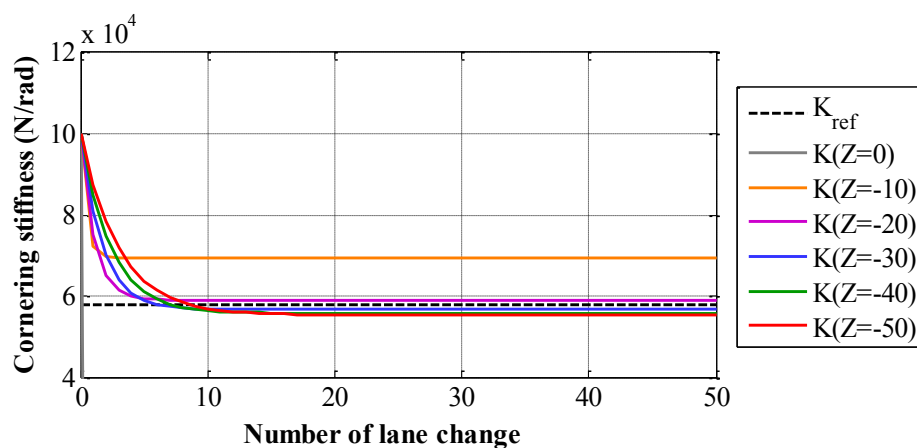


図 4.116 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

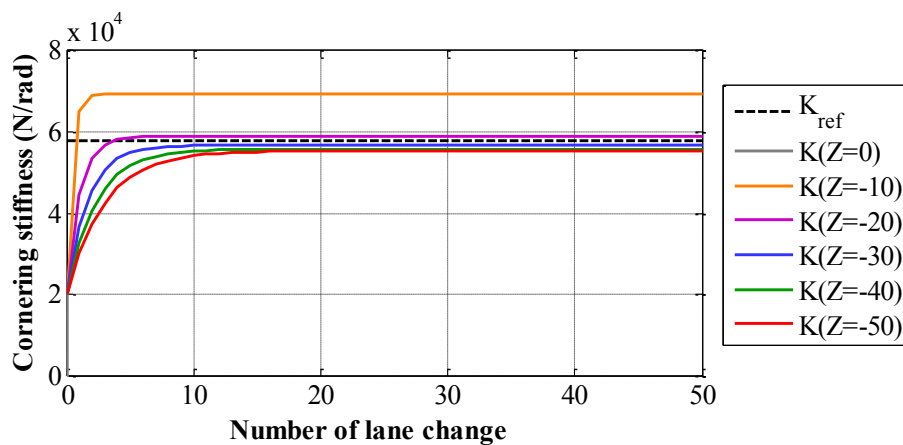


図 4.117 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

#### 4.4.2 $Q_p$ の $X$ 値が変化時のコーナリングスティフネスの同定

式(4.36)の  $D_d$  の  $V$  と  $Z$  を固定し，式(4.37)の  $X$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う．推定の初期条件はコーナリングスティフネスの真値( $K_{\text{ref}}=57932\text{N/rad}$ )に対し，初期値が真値より高い場合の推定と，初期値が真値より小さい場合の推定を行う．真値より高い場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=100000\text{N/rad}$  に設定する．また，真値より小さい場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=20000\text{N/rad}$  に設定する．この初期条件を用いて様々な条件を調査し，以下の推定結果を求めた．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

図 4.118 と図 4.119 は式(4.36)で  $V=10^{-6}$  及び  $Z=-50$  の場合，式(4.37)の  $X$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す．図 4.118 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で，図 4.119 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

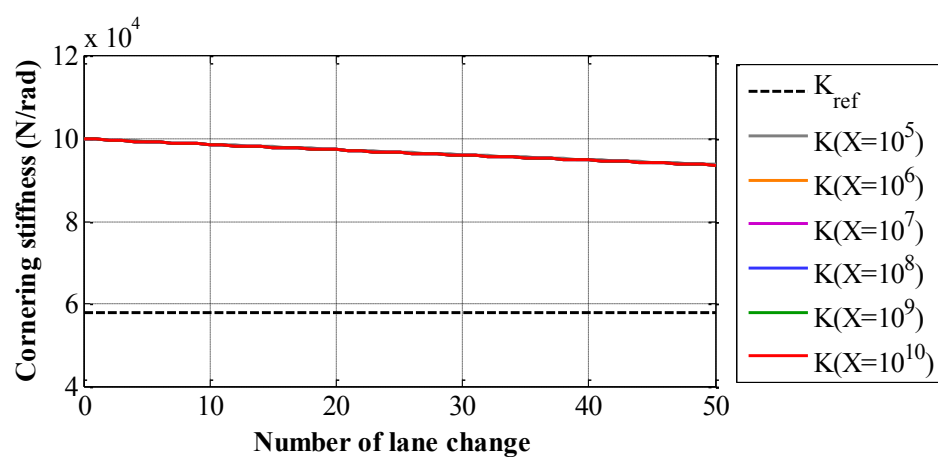


図 4.118 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

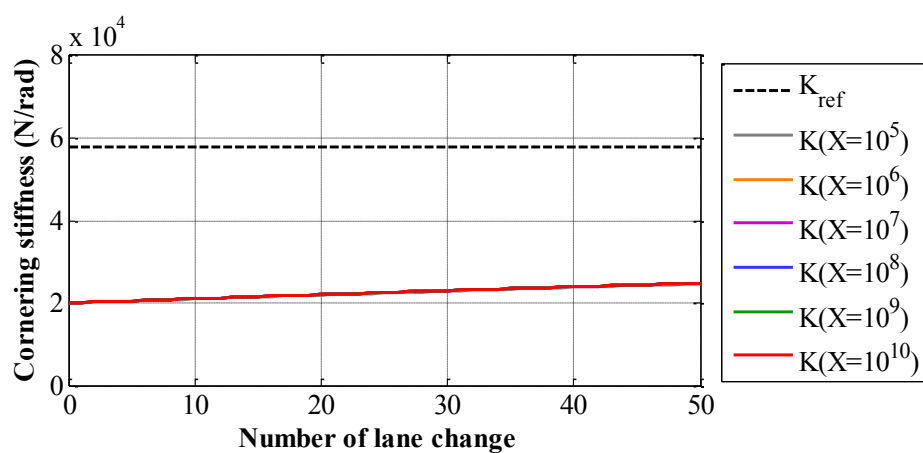


図 4.119 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.120 と図 4.121 は式(4.36)で  $V=10^{-7}$  及び  $Z=-50$  の場合、式(4.37)の  $X$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.120 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.121 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件には前の  $V=10^{-7}$  より変化が大きく見られる。

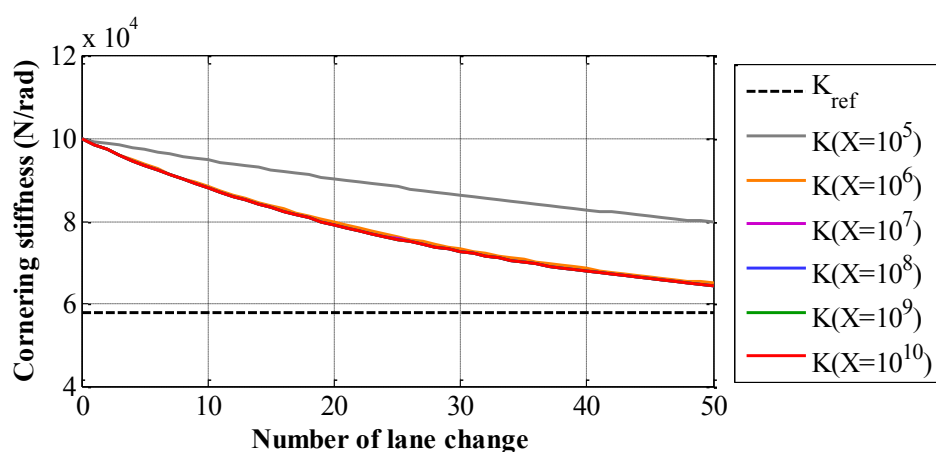


図 4.120 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

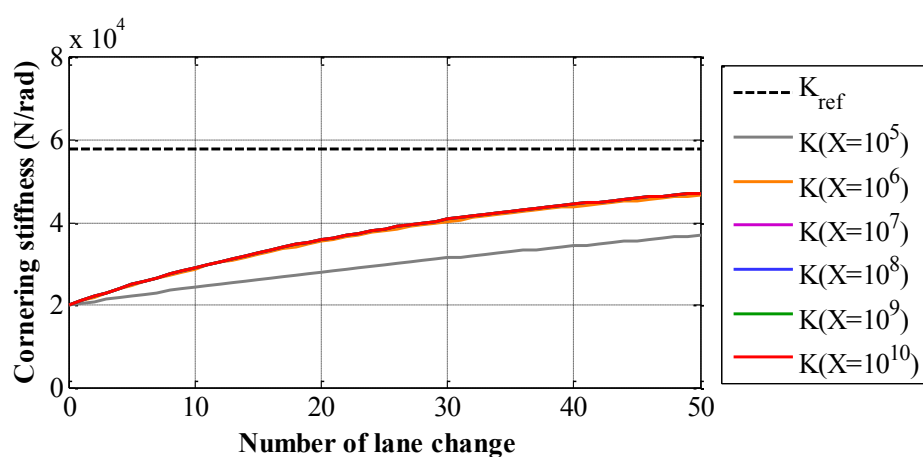


図 4.121 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.122 と図 4.123 は式(4.36)で  $V=10^{-8}$  及び  $Z=-50$  の場合、式(4.37)の  $X$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.122 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.123 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この結果で  $X=10^5, 10^6, 10^{10}$  の場合のみの推定結果が 0 から  $120000\text{N/rad}$  の範囲内の結果である。

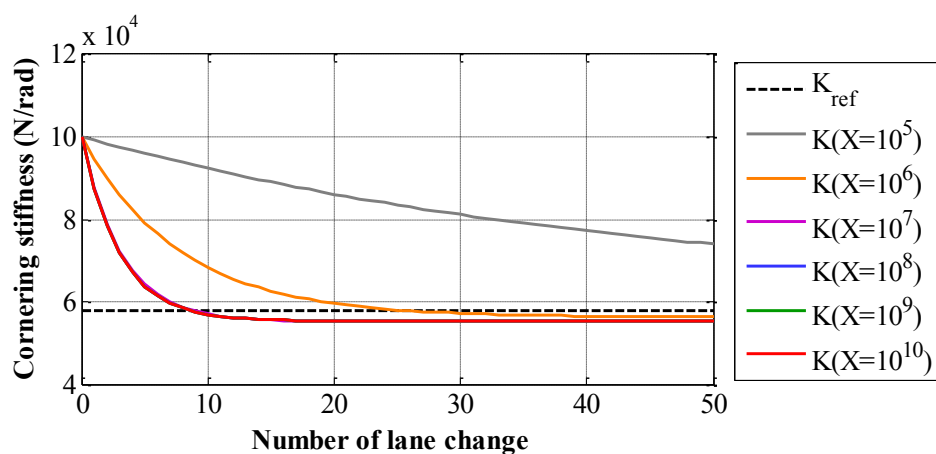


図 4.122 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

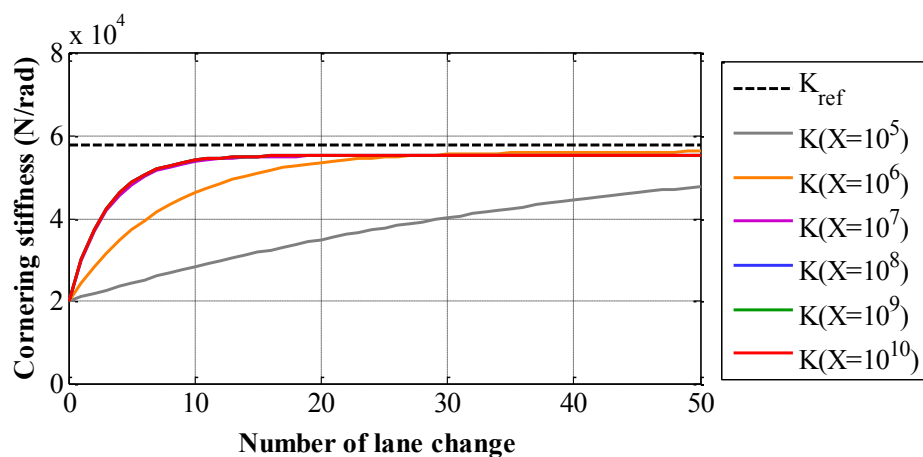


図 4.123 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.124 と図 4.125 は式(4.36)で  $V=10^{-9}$  及び  $Z=-50$  の場合、式(4.37)の  $X$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.124 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.125 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この推定結果で  $X=10^5$  から  $X=10^{10}$  の場合はある値に接近することが分かる。

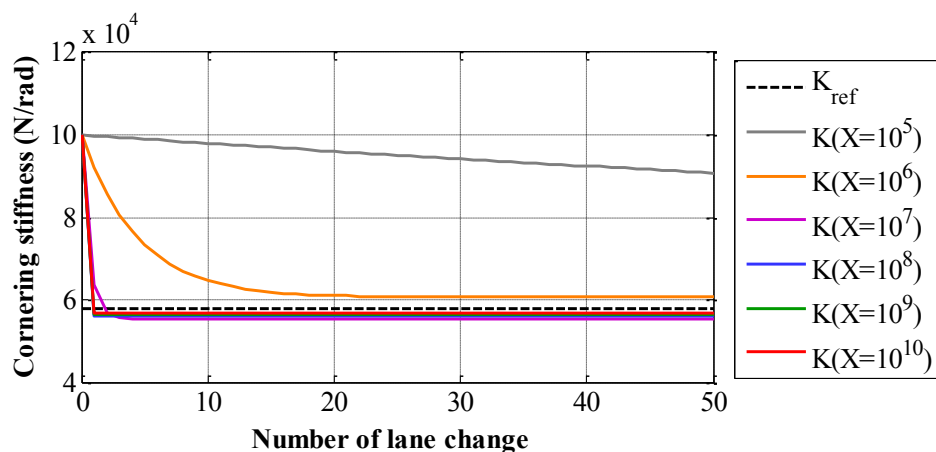


図 4.124 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

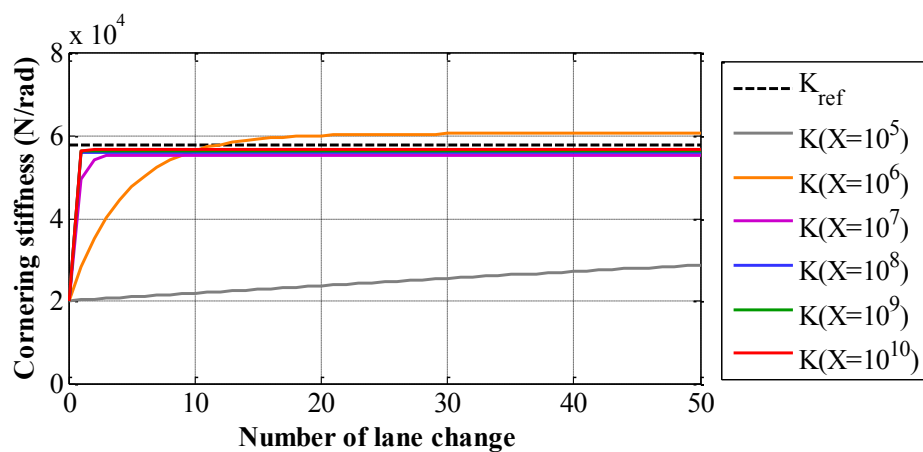


図 4.125 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.126 と図 4.127 は式(4.36)で  $V=10^{-10}$  及び  $Z=-50$  の場合、式(4.37)の  $X$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.126 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.127 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $X=10^7$  の場合がある値に接近することが分かる。

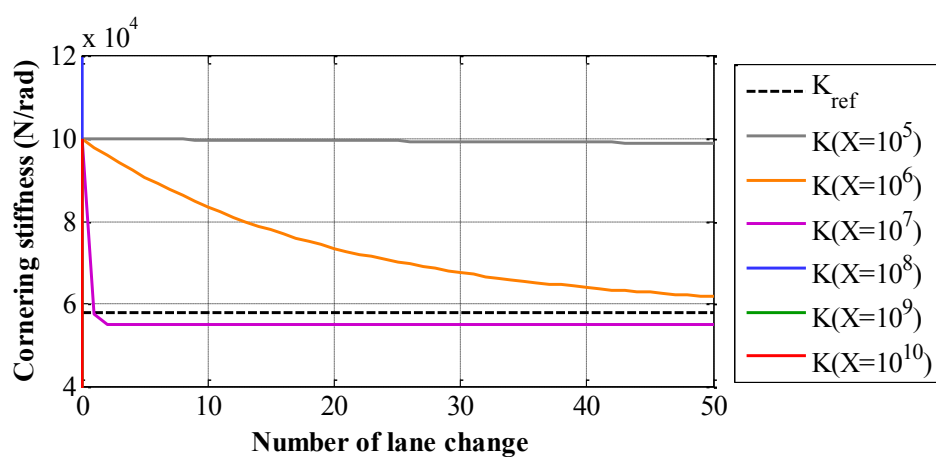


図 4.126 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

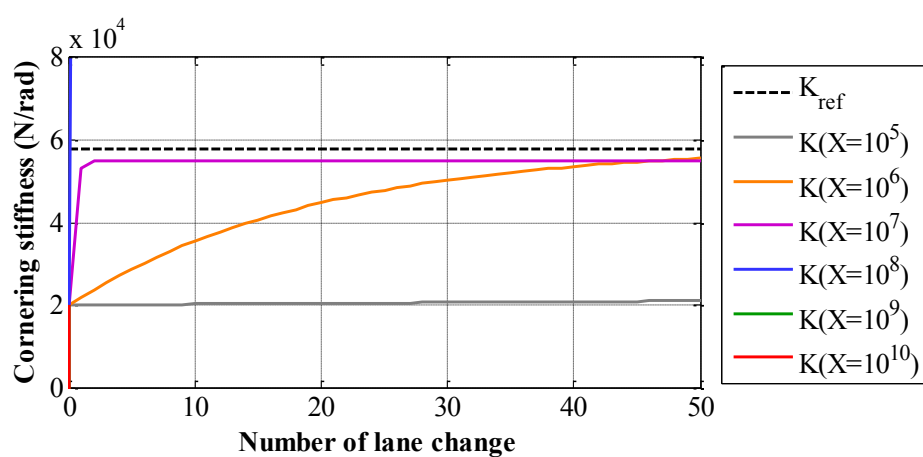


図 4.127 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

#### 4.4.3 $Q_p$ が固定で $R_p$ が変わる時のコーナリングスティフネスの変化

式(4.38)の  $Z$  と式(4.39)の  $X$  を固定し，式(4.38)の  $V$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う．推定の初期条件はコーナリングスティフネスの真値( $K_{\text{ref}}=57932\text{N/rad}$ )に対し，初期値が真値より高い場合の推定と，初期値が真値より小さい場合の推定を行う．真値より高い場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=100000\text{N/rad}$  に設定する．また，真値より小さい場合のコーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=20000\text{N/rad}$  に設定する．この初期条件を用いて様々な条件を調査し，以下の推定結果を求めた．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$



図 4.128 と図 4.129 は式(4.39)で  $X=10^2$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.128 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.129 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

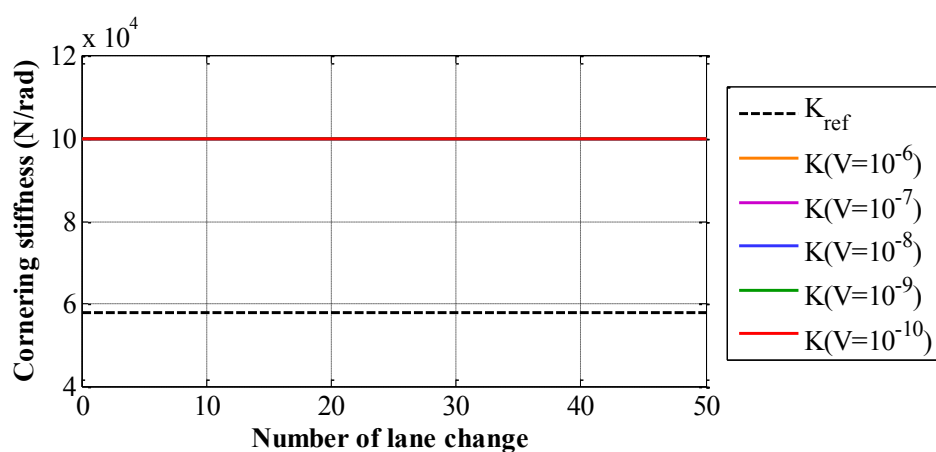


図 4.128 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

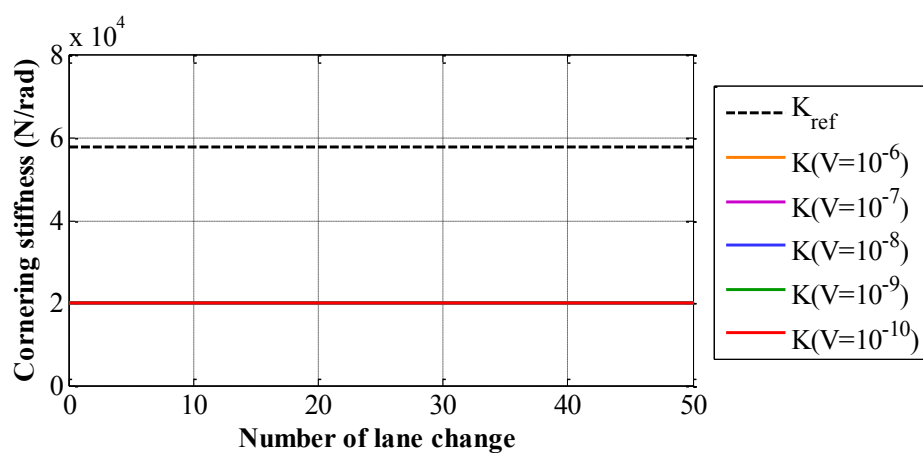


図 4.129 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.130 と図 4.131 は式(4.39)で  $X=10^3$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.130 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.131 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

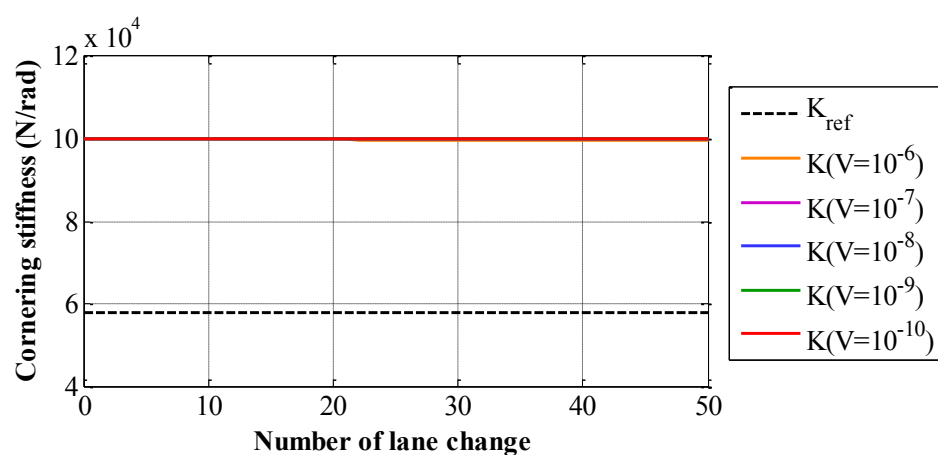


図 4.130 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

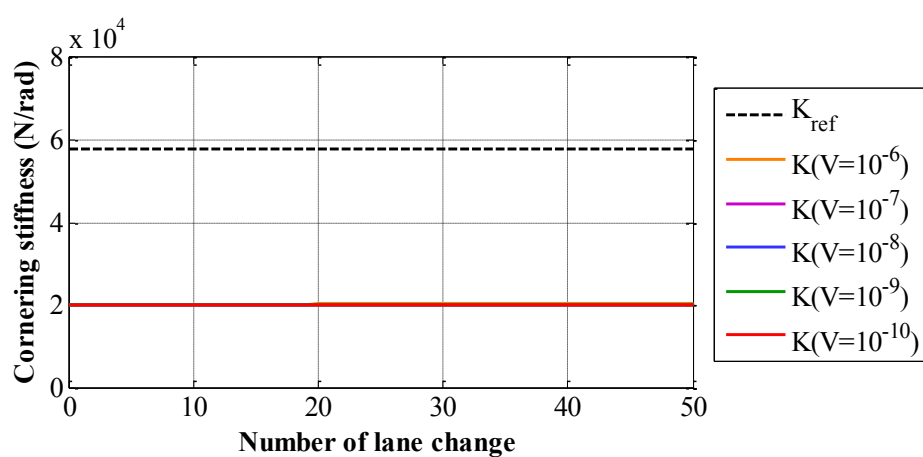


図 4.131 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.132 と図 4.133 は式(4.39)で  $X=10^4$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.132 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.133 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

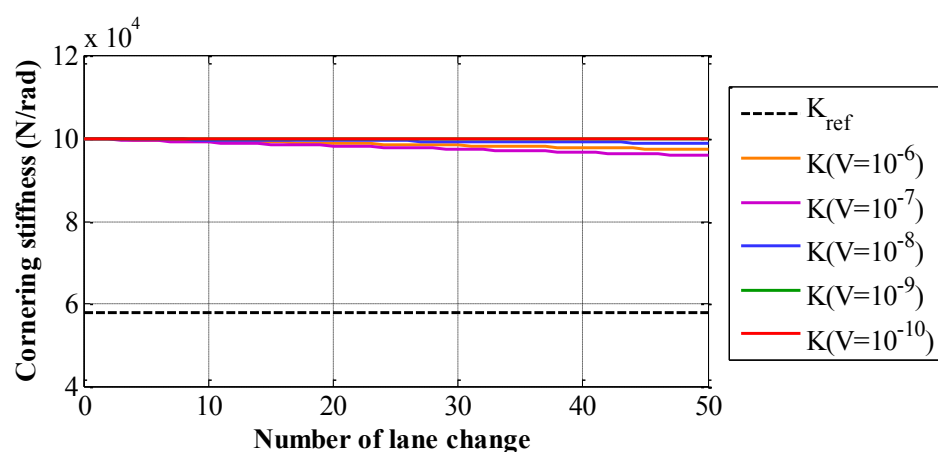


図 4.132 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

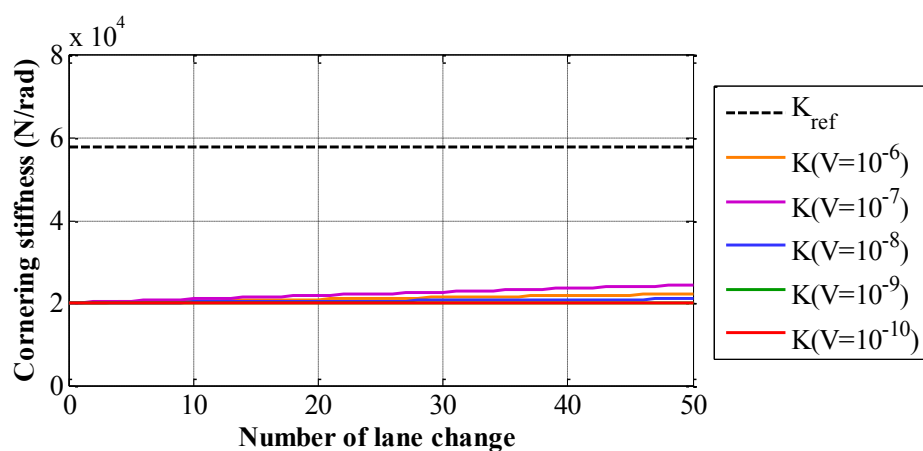


図 4.133 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.134 と図 4.135 は式(4.39)で  $X=10^5$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.134 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.135 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

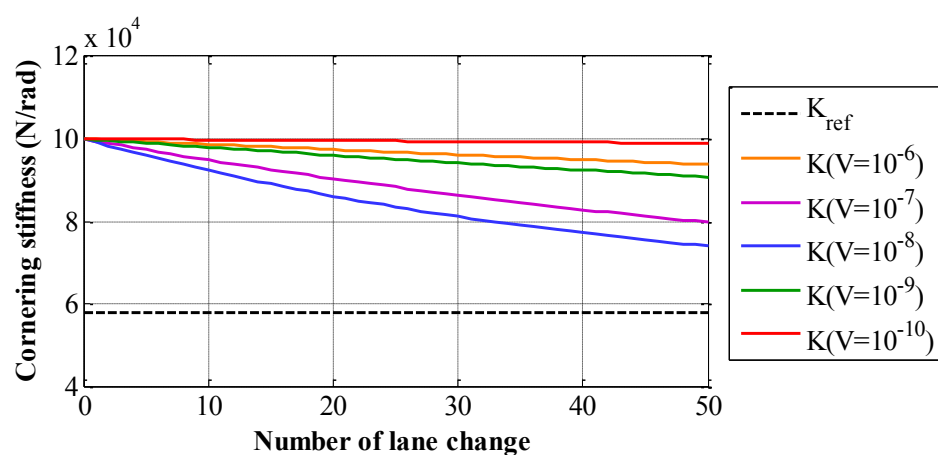


図 4.134 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

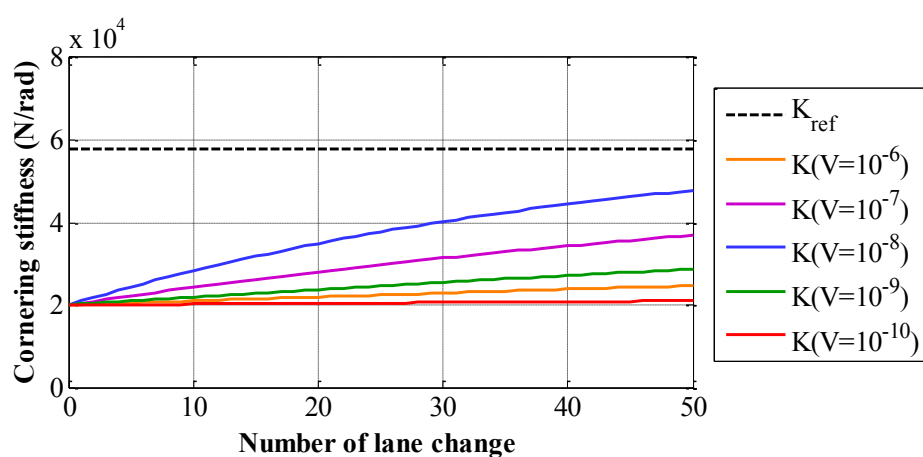


図 4.135 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.136 と図 4.137 は式(4.39)で  $X=10^6$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.136 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.137 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-8}$  と  $V=10^{-9}$  時にある値に接近することが分かる。

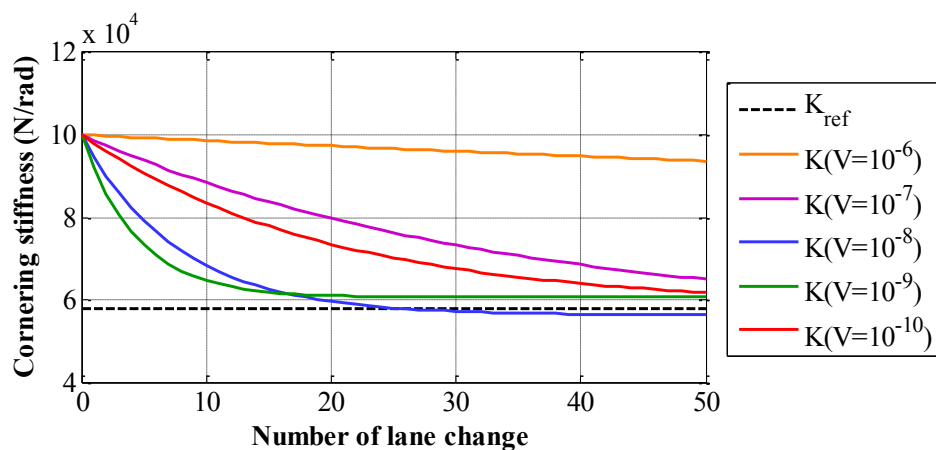


図 4.136 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

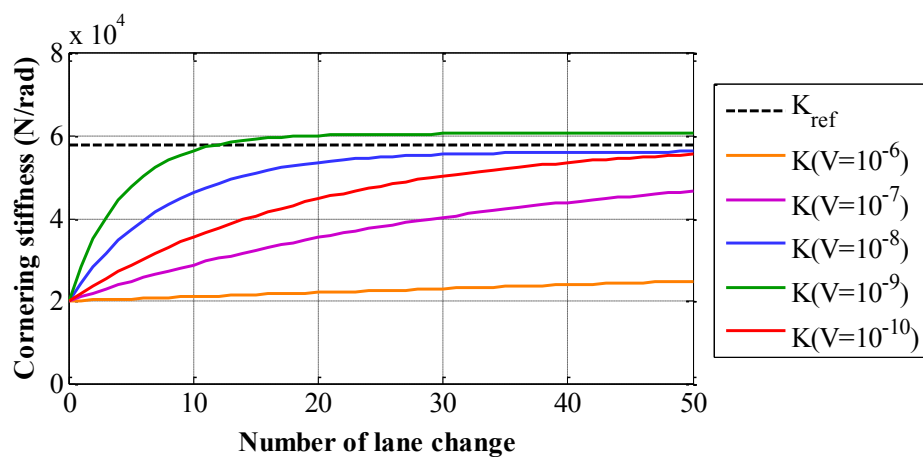


図 4.137 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.138 と図 4.139 は式(4.39)で  $X=10^7$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.138 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.139 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-8}$ ,  $V=10^{-9}$ ,  $V=10^{-10}$  時にある値に接近することが分かる。この結果を見ると DKF パラメータなかで  $V$  の変化がパラメータ推定に大きく寄与することが分かる。

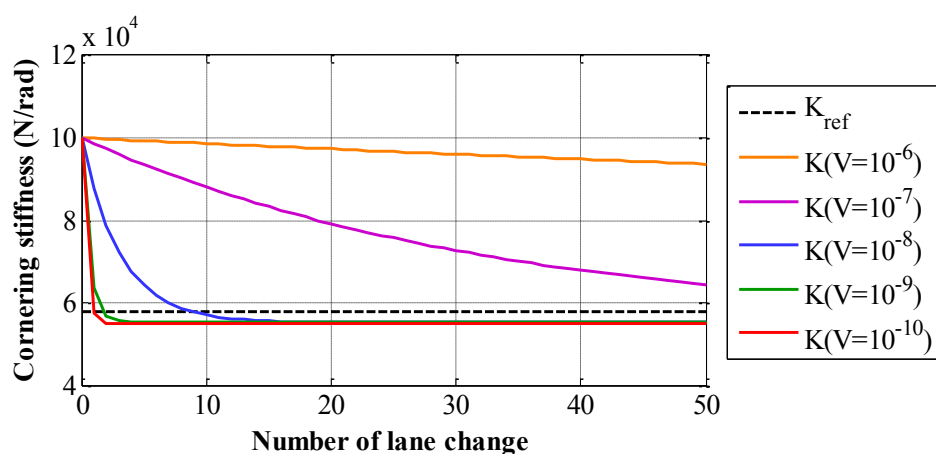


図 4.138 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

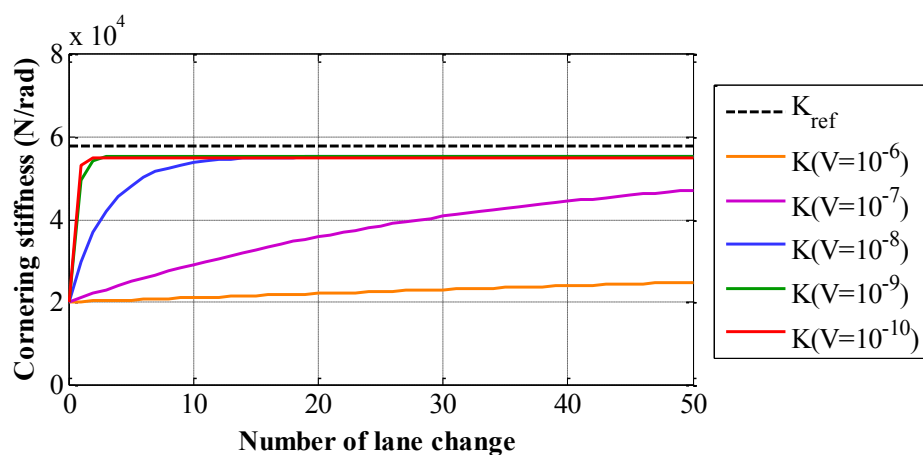


図 4.139 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.140 と図 4.141 は式(4.39)で  $X=10^8$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.140 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.141 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-8}$ ,  $V=10^{-9}$  時にある値に接近することが分かる。

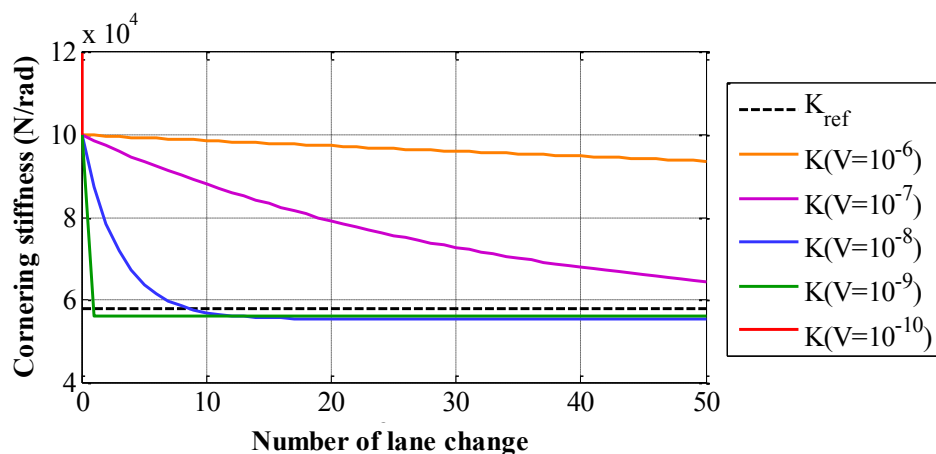


図 4.140 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

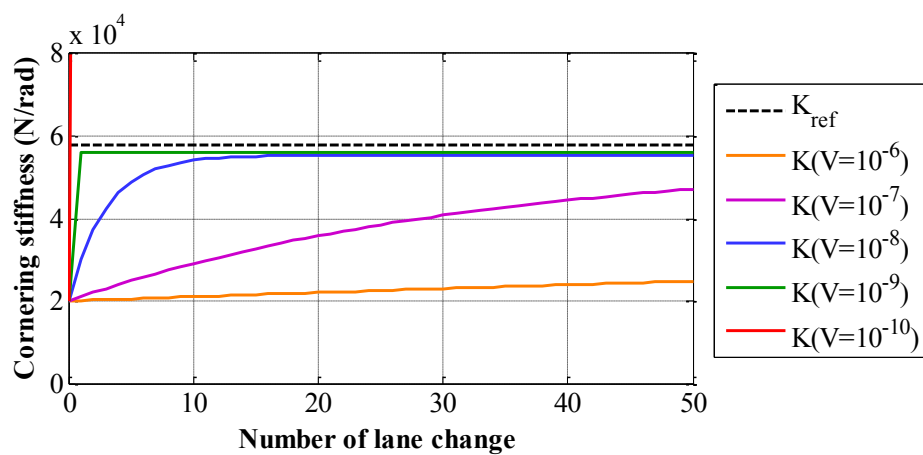


図 4.141 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.142 と図 4.143 は式(4.39)で  $X=10^9$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する場合のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.142 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.143 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-8}$ ,  $V=10^{-9}$  時にある値に接近することが分かる。

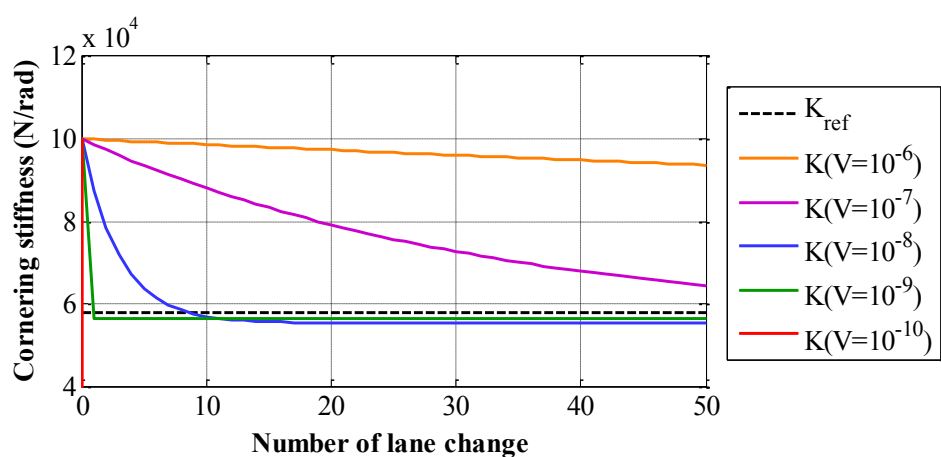


図 4.142 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

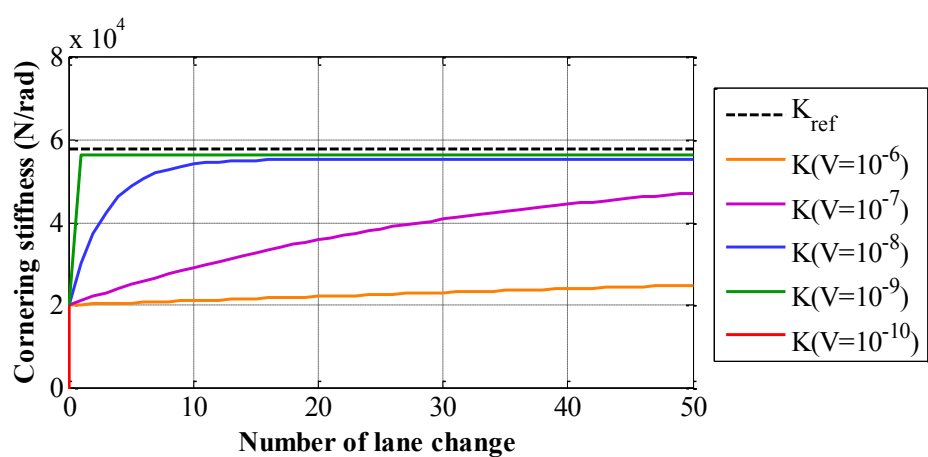


図 4.143 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )



図 4.144 と図 4.145 は式(4.39)で  $X=10^{10}$  及び式(4.38)の  $Z=-50$  の場合、式(4.38)の  $V$  を変化する際のコーナリングスティフネスの推定結果を示す。図 4.144 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果で、図 4.145 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-8}$ ,  $V=10^{-9}$  時にある値に接近することが分かる。

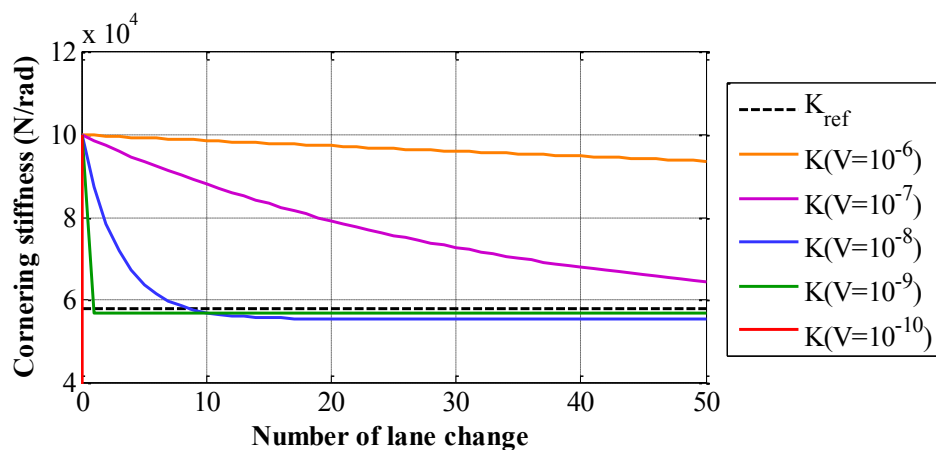


図 4.144 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

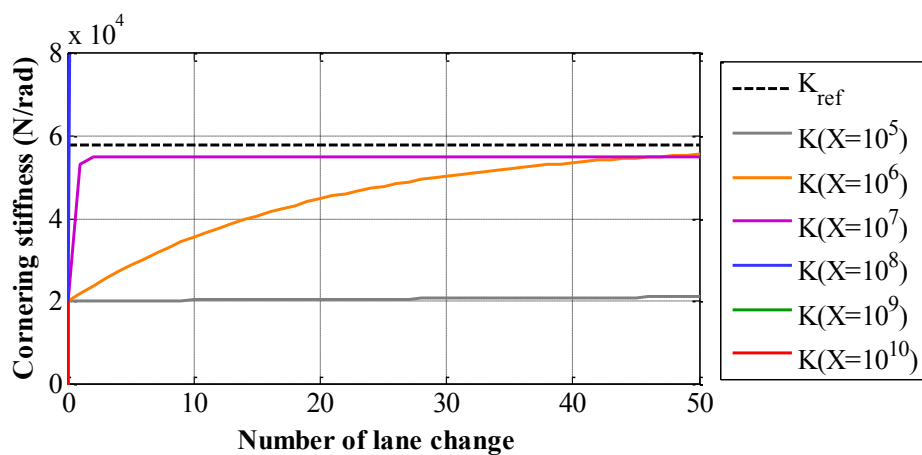


図 4.145 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

#### 4.4.4 コーナリングスティフネスの同定検討のまとめ

図 4.146 と図 4.147 は DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値とコーナリングスティフネス推定値の関係を整理した図である． $D_d$ の設定は式(4.40)の中で  $S$  値を-6 から-10 まで変化した場合を想定する．また， $Q_p$ の設定は式(4.41)の中で  $T$  値を 4 から 10 まで変化した場合を想定する．

$$D_d = 10^S \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$Q_p = 10^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

図 4.146 は初期値が  $K_0=100000\text{N/rad}$  の場合，DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化とコーナリングスティフネス推定結果の関係を示す． $D_d$ の設定値が  $S=-9$  時，また， $Q_p$ の設定値が  $T=6$  時にコーナリングスティフネスの推定値が真値より 5%内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる．他の部分では-5%内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる．

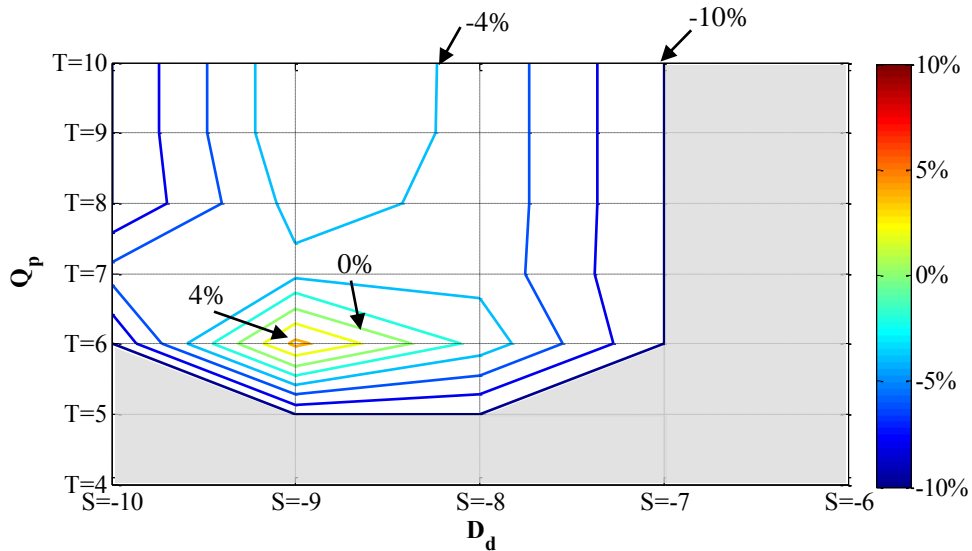


図 4.146 DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化時のコーナリングスティフネス推定結果(初期条件： $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.147 は初期値が  $K_0=20000\text{N/rad}$  の場合、DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化とコーナリングステイフネス推定結果の関係を示す。 $D_d$  の設定値が  $S=-9$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=6$  時にコーナリングステイフネスの推定値が真値より 5% 内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる。他の部分では真値より -5% 内の誤差を持つ推定値が求められることが分かる。図 4.146 と図 4.147 の結果で、初期値に関わらず同定結果はほぼ一致することを確認した。以上の結果より、コーナリングステイフネス推定の条件が存在することが確認できる。そのため、他の車両に対するコーナリングステイフネスを推定する場合、推定条件が存在することを示す。

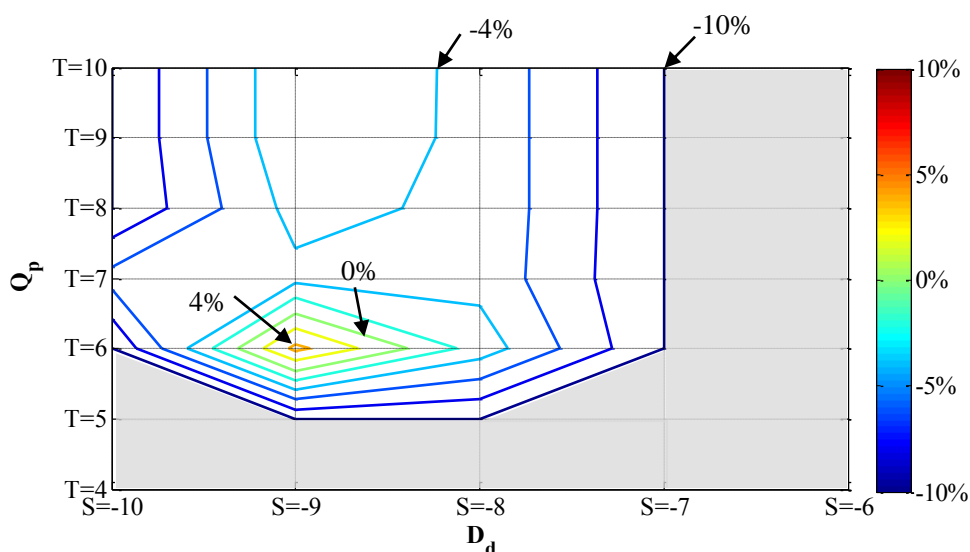


図 4.147 DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化時のコーナリングステイフネス推定結果(初期条件： $K_0=20000\text{N/rad}$ )

表 4.7 は初期値が  $K_0=100000\text{N/rad}$  の場合、DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化に対し、図 4.146 であるコーナリングステイフネス推定値が求められるレーンチェンジ回数を示した表である。灰色の部分は推定値が求めなかった部分を示す。 $D_d$  の設定値が  $S=-9, -10$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=6, 7, 8, 9, 10$  時にコーナリングステイフネスの推定値が最小のレーンチェンジで推定できることが分かる。表 4.8 は初期値が  $K_0=20000\text{N/rad}$  の場合、DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化に対し、図 4.147 であるコーナリングステイフネス推定値が求められるレーンチェンジ回数を示した表である。表 4.7 の同様に  $D_d$  の設定値が  $S=-9, -10$  時、また、 $Q_p$  の設定値が  $T=6, 7, 8, 9, 10$  時にコーナリングステイフネスの推定値が最小のレーンチェンジで推定できることが分かる。表 4.7 と表 4.8 で 1 回のレーンチェンジである値に接近した推定結果があるが、この場合の推定結果は特別な条件であると考えられ、1 回のレーンチェンジでの推定結果は本研究で例外と想定する。

表 4.7 DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化時のレーンチェンジ回数  
(初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

	S=-10	S=-9	S=-8	S=-7
T=10	1	1	11	
T=9	1	1	11	
T=8	1	1	11	
T=7	1	4	15	
T=6	23	20	35	
T=5				

表 4.8 DKF の設定パラメータ( $Q_p$  と  $D_d$ )設定値の変化時のレーンチェンジ回数  
(初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

	S=-10	S=-9	S=-8	S=-7
T=10	1	1	10	
T=9	1	1	10	
T=8	1	1	10	
T=7	1	4	15	
T=6	29	20	18	
T=5				

前節で求めたコーナリングステイフネス同定の推定条件は次のように整理した．この推定条件の場合のコーナリングステイフネスの推定結果を求める．

- ・ 推定条件 1 :  $V=10^{-8}$ ,  $X=10^6$
- ・ 推定条件 2 :  $V=10^{-8}$ ,  $X=10^7$
- ・ 推定条件 3 :  $V=10^{-9}$ ,  $X=10^6$
- ・ 推定条件 4 :  $V=10^{-9}$ ,  $X=10^7$

図 4.148 は求めた推定条件 1 の場合，異なる初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $K_0=20000\text{N/rad}$ )からのコーナリングスティフネス推定結果で，コーナリングスティフネスの推定値が  $56285\text{N/rad}$  に合って，真値と比べて-3%の誤差がある．また，このコーナリングスティフネスの推定値を求められるまで 35 回のレーンチェンジが必要であることが分かる．

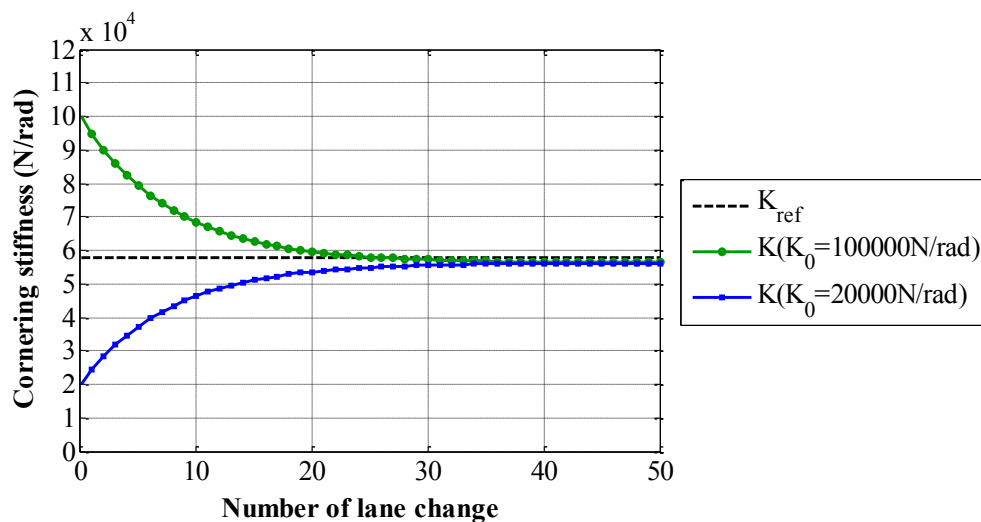


図 4.148 コーナリングスティフネス推定結果 (推定条件 1 の場合)

図 4.149 は求めた推定条件 2 の場合，異なる初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $K_0=20000\text{N/rad}$ )からのコーナリングスティフネス推定結果で，コーナリングスティフネスの推定値が  $55226\text{N/rad}$  に合って，真値と比べて-4.7%の誤差がある．また，このコーナリングスティフネスの推定値を求められるまで 15 回のレーンチェンジが必要であることが分かる．

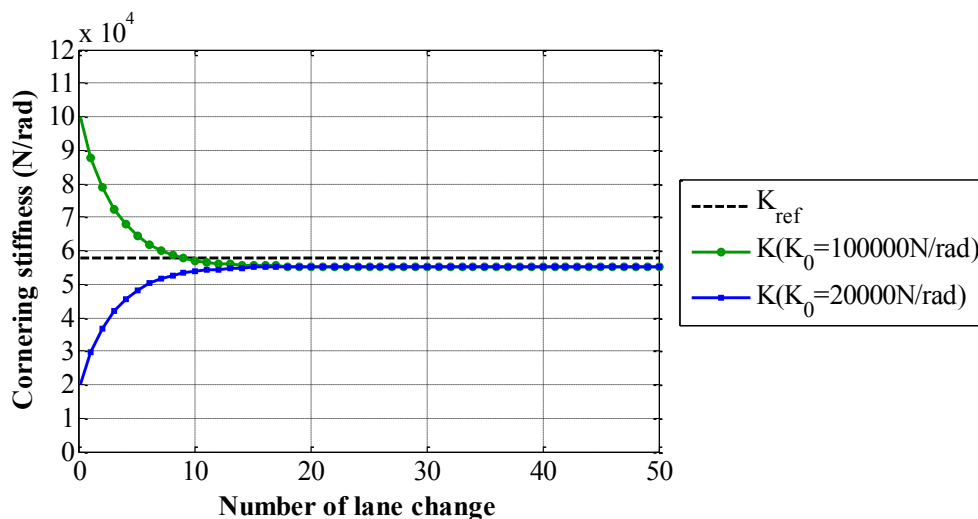


図 4.149 コーナリングスティフネス推定結果 (推定条件 2 の場合)

図 4.150 は求めた推定条件 3 の場合，異なる初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $K_0=20000\text{N/rad}$ )からのコーナリングスティフネス推定結果で，コーナリングスティフネスの推定値が  $60585\text{N/rad}$  に合って，真値と比べて 4.6%の誤差がある．また，このコーナリングスティフネスの推定値を求められるまで 20 回のレーンチェンジが必要であることが分かる．

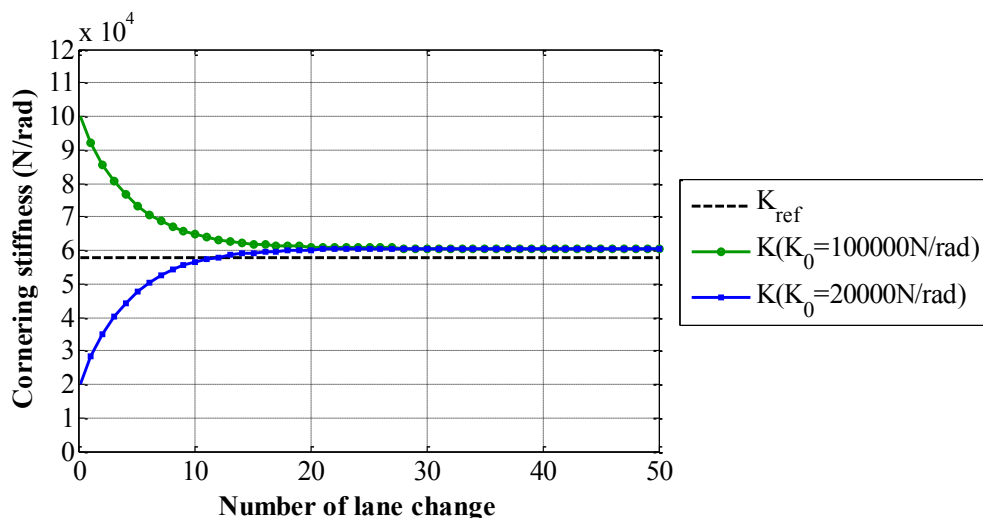


図 4.150 コーナリングスティフネス推定結果 (推定条件 3 の場合)

図 4.151 は求めた推定条件 4 の場合，異なる初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $K_0=20000\text{N/rad}$ )からのコーナリングスティフネス推定結果で，コーナリングスティフネスの推定値が  $55304\text{N/rad}$  に合って，真値と比べて -4.5%の誤差がある．また，このコーナリングスティフネスの推定値を求められるまで 4 回のレーンチェンジが必要であることが分かる．

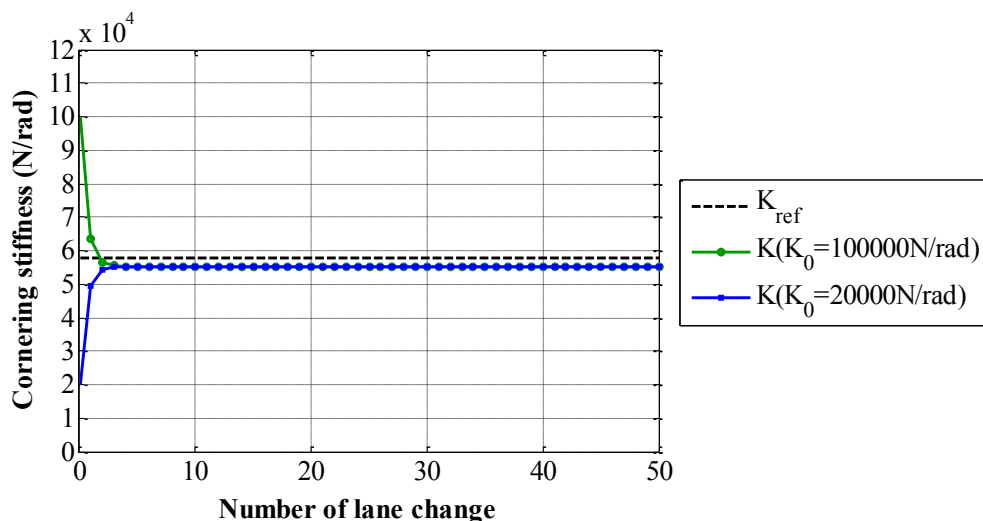


図 4.151 コーナリングスティフネス推定結果 (推定条件 4 の場合)

検討結果、推定条件 4 の場合が最小のレーンチェンジで推定値が求められることが分かる。この推定条件中で、推定条件 1 のほうが推定値の誤差が最小になることが分かる。

図 4.152 はヨー角速度に対し、推定条件 1 から推定条件 4 まで条件を適用した場合のヨー角速度の状態推定結果で、ヨー角速度の推定結果は真値の場合の推定結果とほぼ一致する結果が得られた。図 4.153 はスリップ角に対し、推定条件 1 から推定条件 4 まで条件を適用した場合のスリップ角の状態推定結果で、スリップ角の推定結果は真値の場合の推定結果とほぼ一致する結果が得られた。

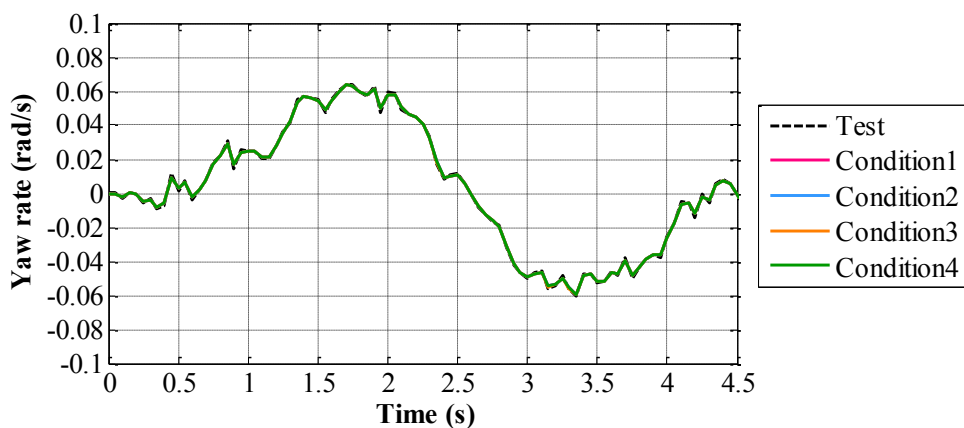


図 4.152 ヨー角速度の推定結果

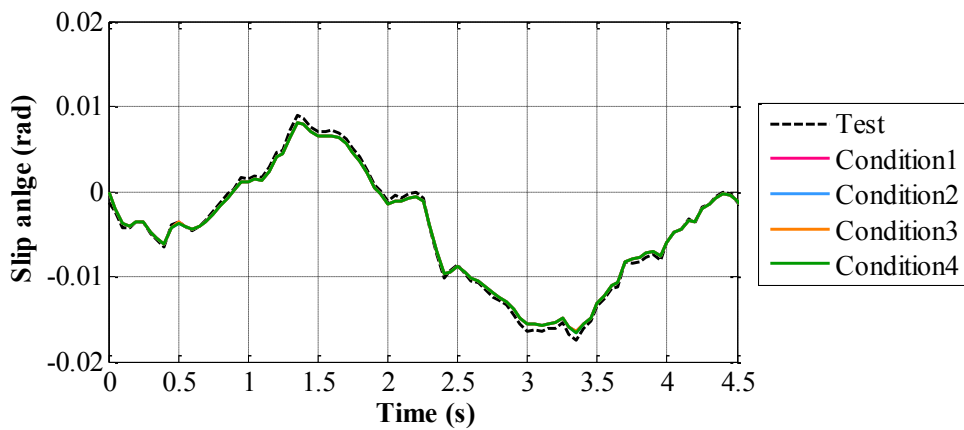


図 4.153 スリップ角の推定結果

#### 4.4.5 カントがある区間でのコーナリングスティフネスの同定検討

一般道路は平地区間だけではなくカントがある区間もある．そのため，カントがあるところでもパラメータ同定ができることを検討が必要で，カント区間を走行時のコーナリングスティフネスの推定を検討する．4.2 節で示したカントがある区間を走行時のコーナリングスティフネスの推定結果を求める．図 4.154 はカント区間を走行時のコーナリングスティフネス推定結果で，推定条件 1 の場合，初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $20000\text{N/rad}$ )の場合のコーナリングスティフネス推定値が  $62803\text{N/rad}$  に合って，真値と比べて 8.4%の誤差がある．また，このコーナリングスティフネスの推定値を求められるまで 15 回のカントがある区間を走行する必要があることが分かる．同じ推定条件 1 の平地直進区間の場合の推定結果では誤差が 3%と比べて誤差が大きくなることが分かる．この理由はカントがある区間を走行時に平地より横力の発生が大きくなり，コーナリングスティフネスの推定値が大きく求められると考えられるが，DKF によるヨー慣性モーメント同定ができることを確認した．

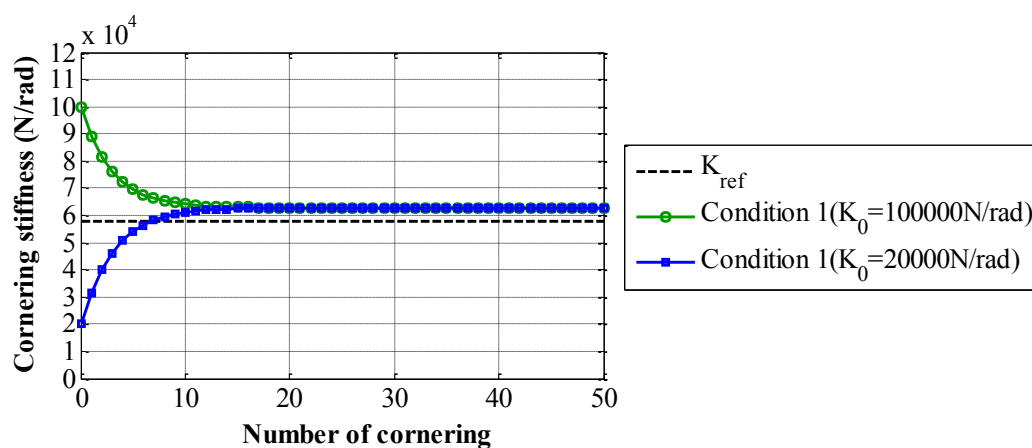


図 4.154 カント区間を走行時のコーナリングスティフネス推定結果



#### 4.4.6 コーナリングスティフネス推定値の予測

図 4.155-図 4.158 は求めた推定条件を適用した場合のコーナリングスティフネス推定結果に、3.6 節のパラメータ予測手法である式(4.42)を用いて、コーナリングスティフネスの推定値の予測結果を求めた。

$$P_{Pre(n)} = \frac{-\left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)P_{L(n-1)} + P_{H(n-1)}}{1 - \left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)} \quad (4.42)$$

図 4.155 は前節である図 4.148 のコーナリングスティフネス推定結果に予測手法を適用した予測結果で、2 回のレーンチェンジでコーナリングスティフネス推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 35 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

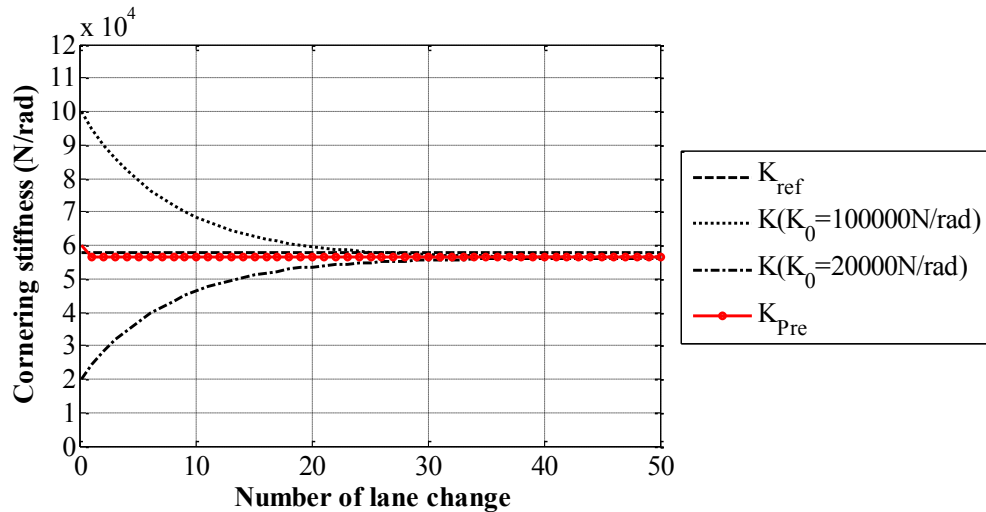


図 4.155 コーナリングスティフネス推定の予測結果 (推定条件 1 の場合)

図 4.156 は前節である図 4.149 のコーナリングスティフネス推定結果に予測手法を適用した予測結果で、3 回のレーンチェンジでコーナリングスティフネス推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 15 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

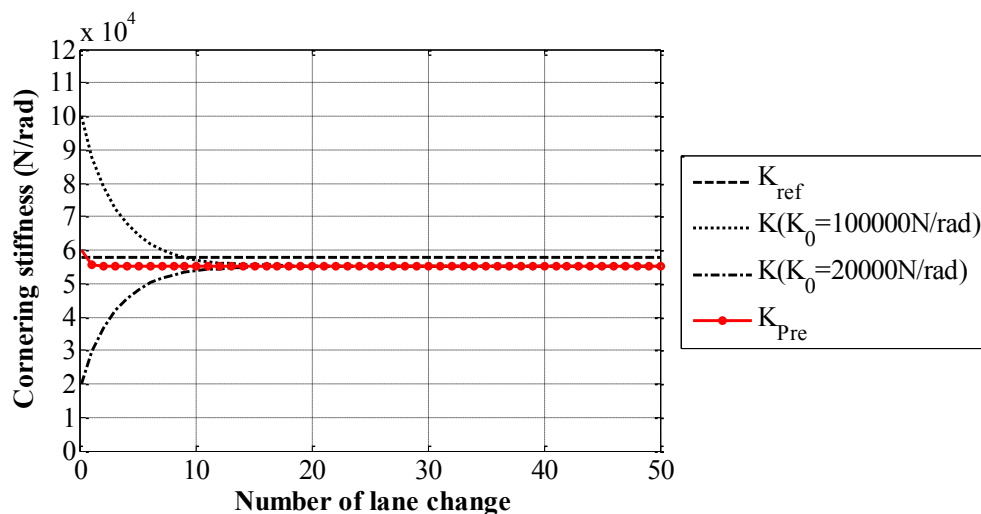


図 4.156 コーナリングスティフネス推定の予測結果 (推定条件 2 の場合)

図 4.157 は前節である図 4.150 のコーナリングスティフネス推定結果に予測手法を適用した予測結果で、2 回のレーンチェンジでコーナリングスティフネス推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 20 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

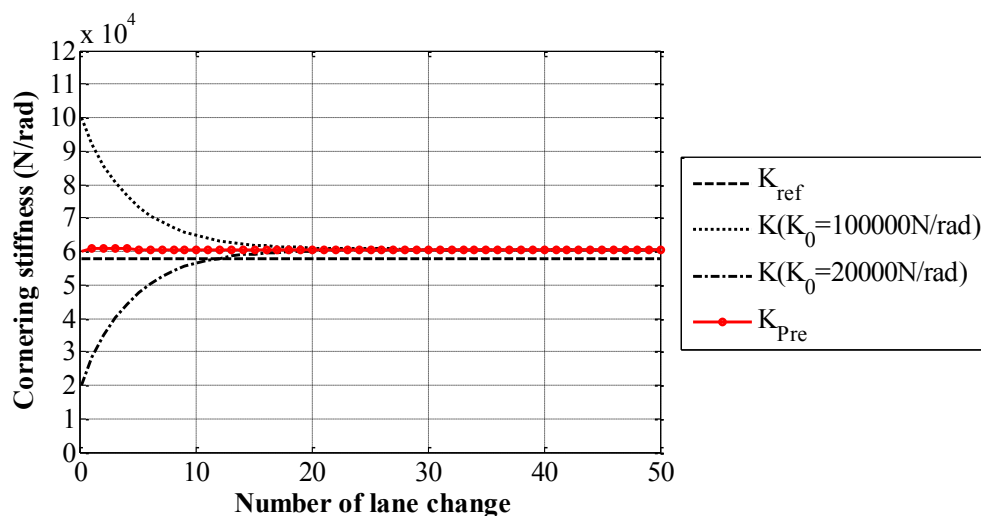


図 4.157 コーナリングスティフネス推定の予測結果 (推定条件 3 の場合)

図 4.158 は前節である図 4.151 のコーナリングスティフネス推定結果に予測手法を適用した予測結果で、3 回のレーンチェンジでコーナリングスティフネス推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 4 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

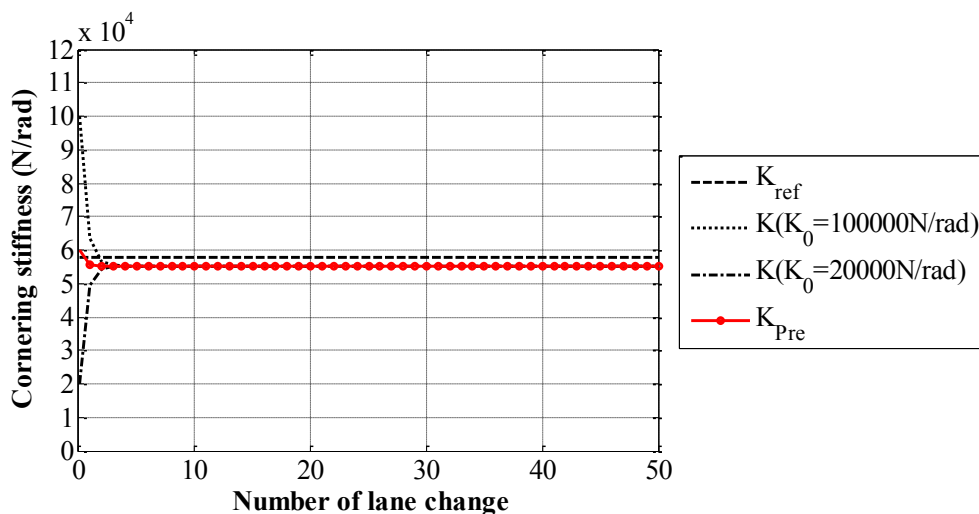


図 4.158 コーナリングスティフネス推定の予測結果 (推定条件 4 の場合)

図 4.159 はカント区間を走行時のコーナリングスティフネス推定結果である図 4.154 のヨー慣性モーメント推定結果に予測手法を適用した予測結果で、5 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメント推定の予測値が求められることができた。予測手法を適用しない場合の 15 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる。

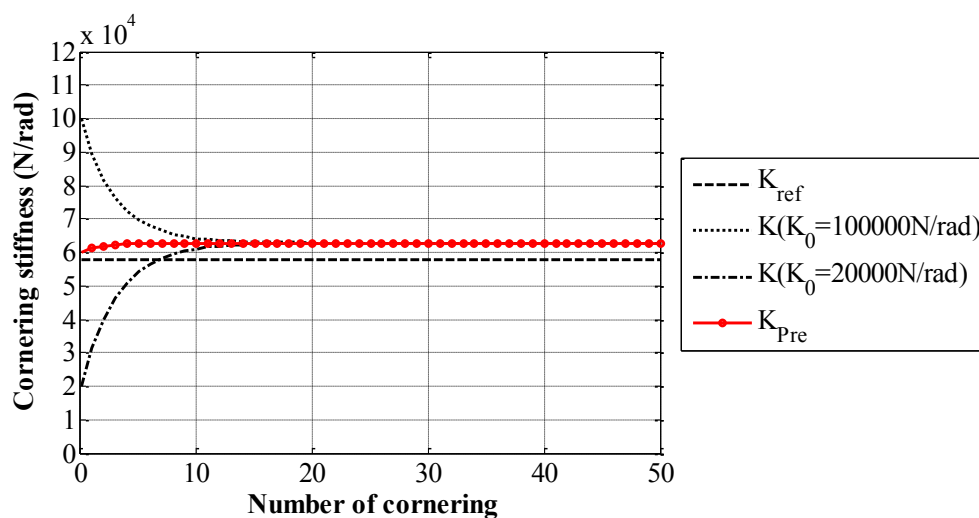


図 4.159 カント区間を走行時のコーナリングスティフネス推定の予測結果

#### 4.5 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

本節ではヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの二つのパラメータを同時に同定する検討を行う．ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定には，式(4.43)-(4.47)の DKF アルゴリズムのパラメータ中で， $R_p$  は式(4.48)のように固定し，式(4.49)の  $D_p$  の  $V$  と式(4.50)の  $Q_p$  の  $X$  を調整し最良な推定条件を求めて，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時に推定値を求める．

$$\hat{p}_k^- = \hat{p}_{k-1} \quad (4.43)$$

$$U_k^- = U_{k-1} + Q_p \quad (4.44)$$

$$G_k = U_k^- D_k^T (D_k U_k^- D_k^T + R_p)^{-1} \quad (4.45)$$

$$\hat{p}_k = \hat{p}_k^- + G_k (y_k - C_d \hat{x}_k) \quad (4.46)$$

$$U_k = (I - G_k D_k) U_k^- \quad (4.47)$$

$$R_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

#### 4.5.1 $Q_p$ の変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

式(4.51)の  $D_d$  を固定し，式(4.52)の  $Q_p$  の  $X$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う．同時推定の初期条件は，ヨー慣性モーメントの真値( $J_{\text{ref}}=5000\text{kgm}^2$ )とコーナリングスティフネスの真値( $K_{\text{ref}}=57932\text{N/rad}$ )に対し，初期値が真値より高い場合の同時推定と，初期値が真値より小さい場合の同時推定を行う．真値より高い場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=9000\text{kgm}^2$  に設定し，コーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=100000\text{N/rad}$  に設定する．また，真値より小さい場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=1000\text{kgm}^2$  に設定し，コーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=20000\text{N/rad}$  に設定する．この初期条件を用いて様々な条件を調査し，以下の同時推定結果を求めた．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

図 4.160 と図 4.161 は式(4.51)で  $V=10^{-3}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化によるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.160 はヨー慣性モーメント初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.161 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) の場合のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

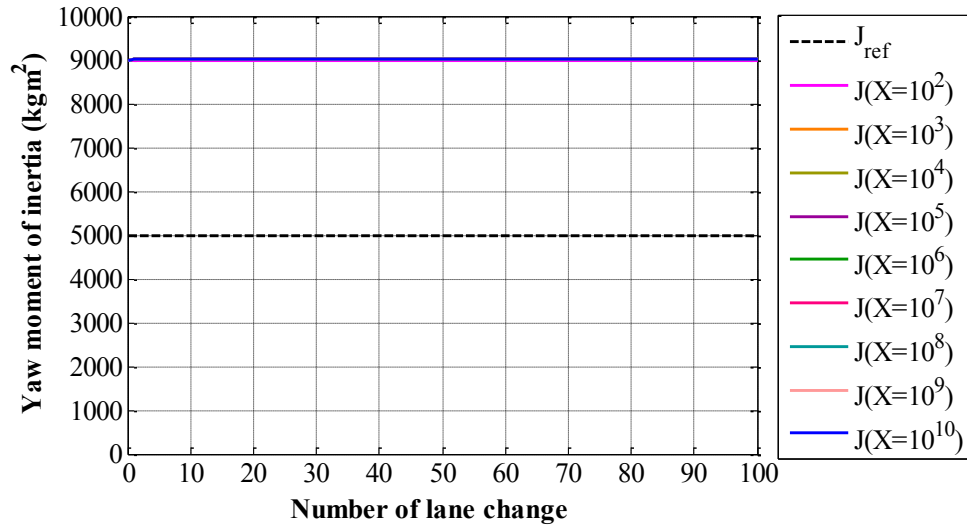


図 4.160 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

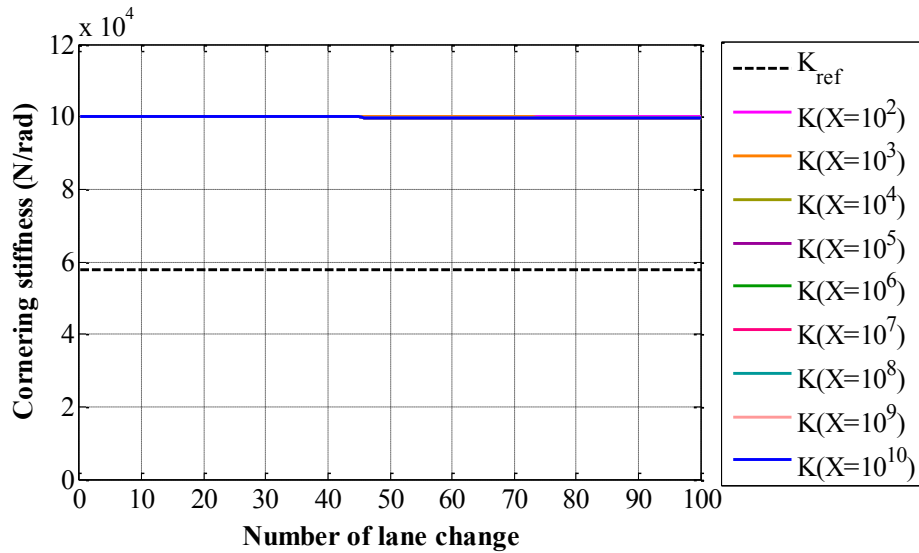


図 4.161 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.162 と図 4.163 は式(4.51)で  $V=10^{-3}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.162 はヨー慣性モーメント初期値( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.163 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )の場合のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

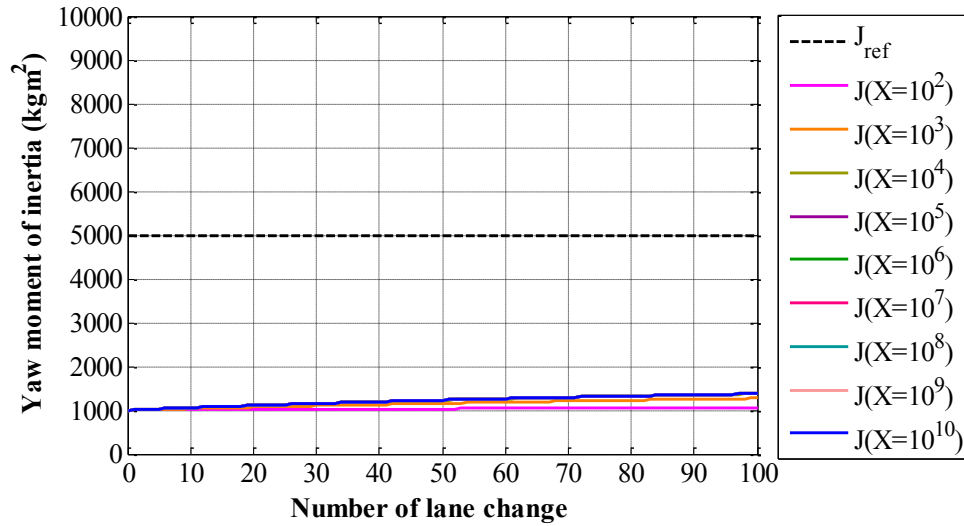


図 4.162 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

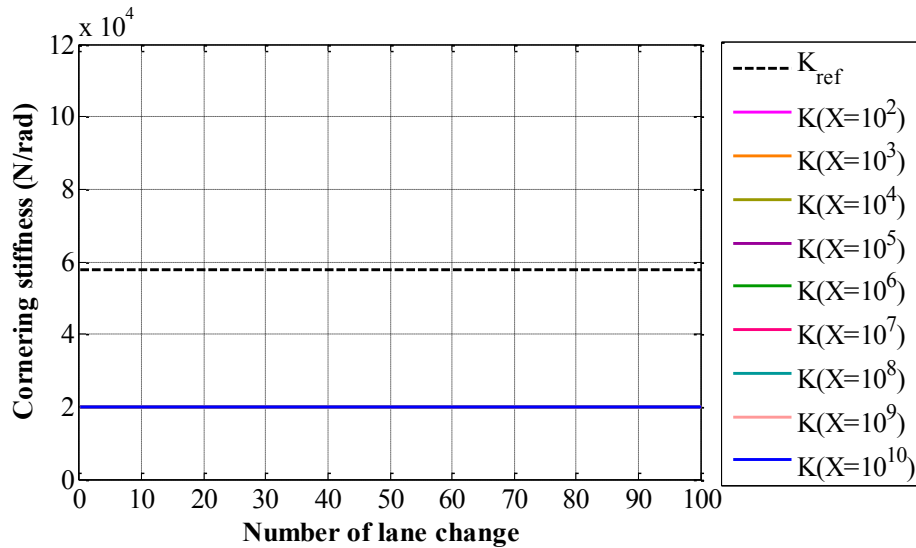


図 4.163 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.164 と図 4.165 は式(4.51)で  $V=10^{-4}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.164 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.165 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

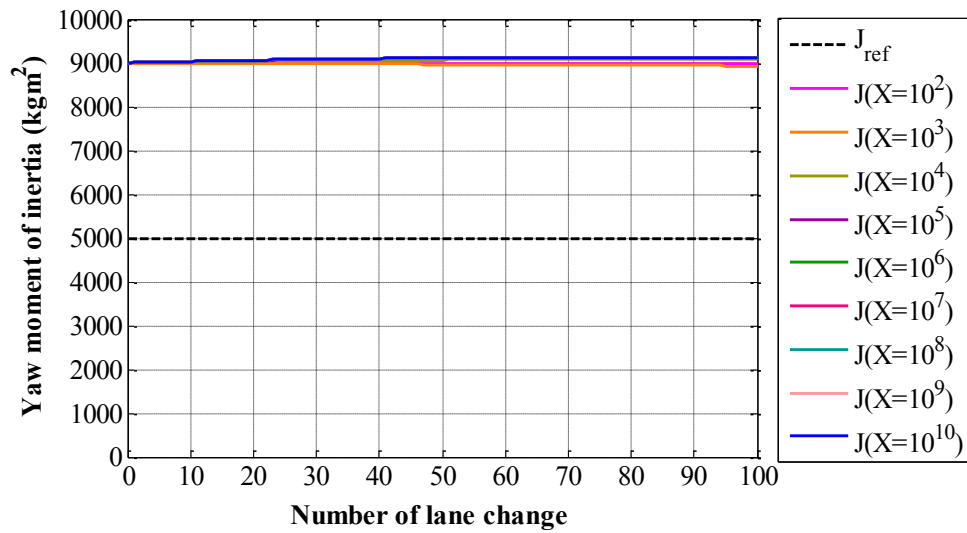


図 4.164 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

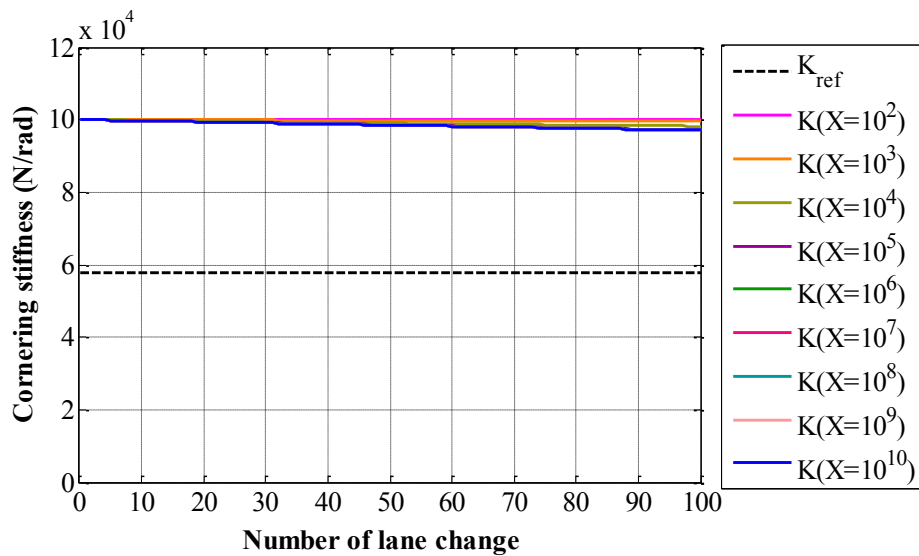


図 4.165 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )



図 4.166 と図 4.167 は式(4.51)で  $V=10^{-4}$  の場合，式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.166 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.167 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

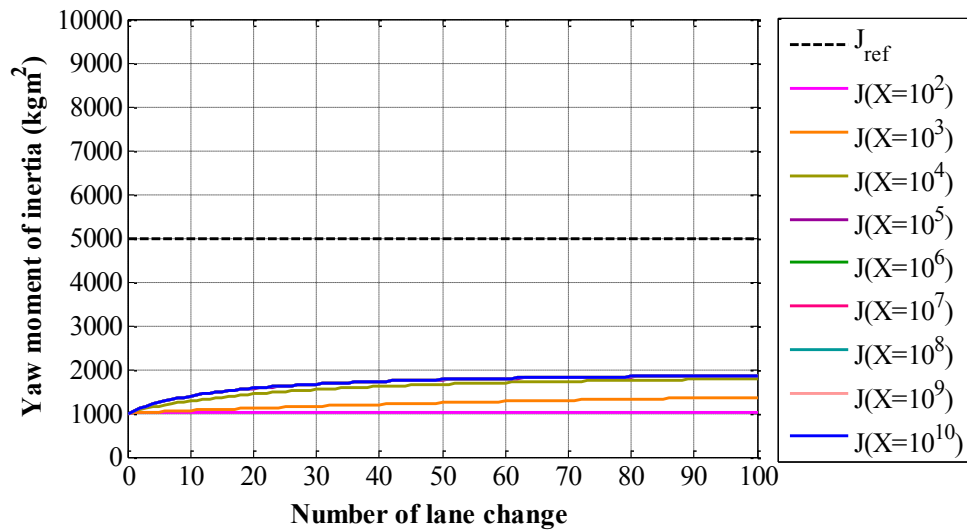


図 4.166 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

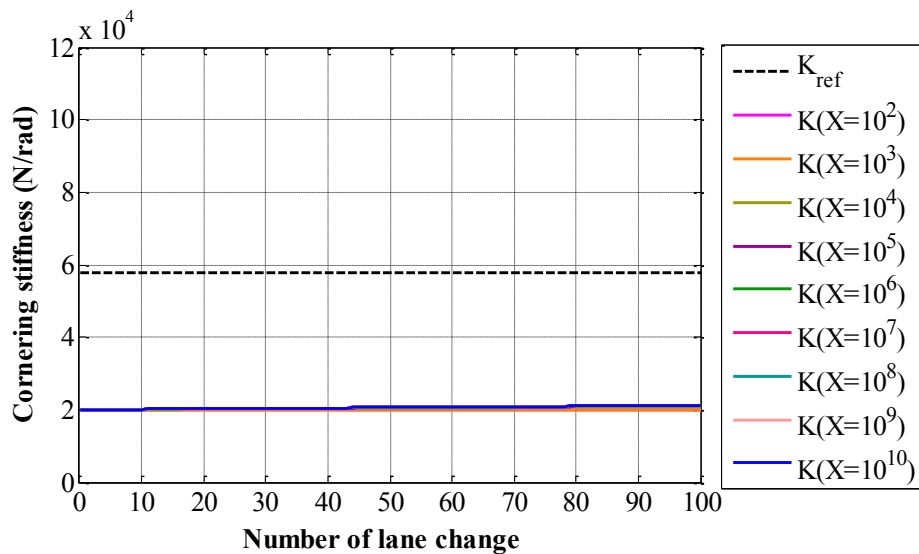


図 4.167 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.168 と図 4.169 は式(4.51)で  $V=10^{-5}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.168 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.169 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

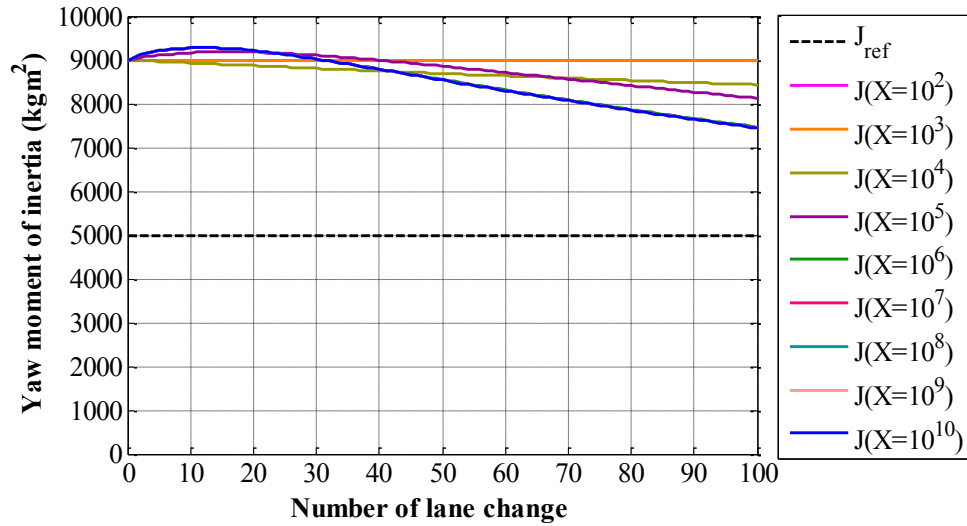


図 4.168 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

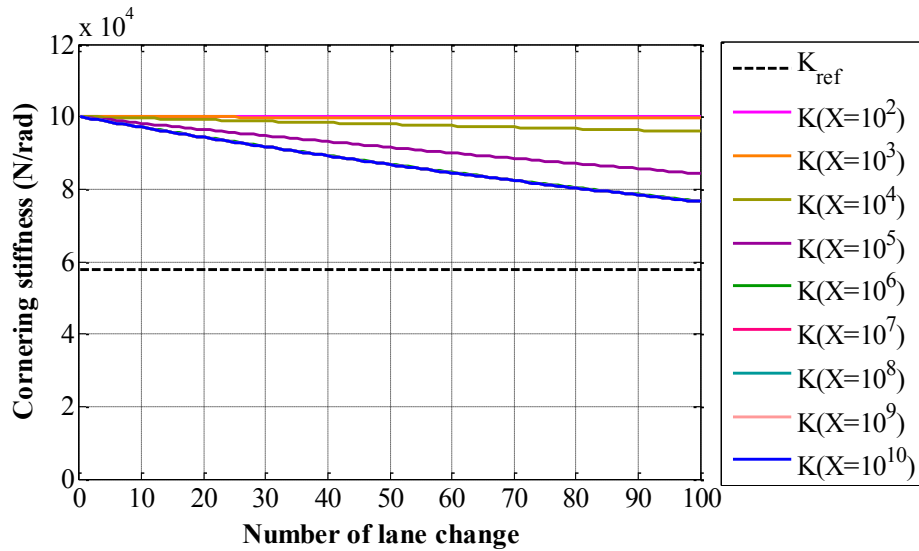


図 4.169 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.170 と図 4.171 は式(4.51)で  $V=10^{-5}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.170 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ )のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.171 は初期値( $K_0=20000\text{N/rad}$ )のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

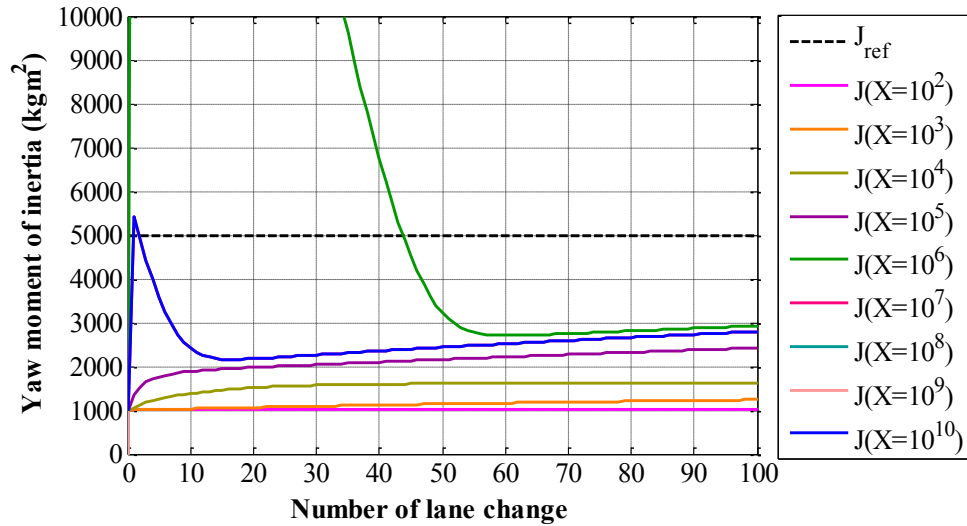


図 4.170 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

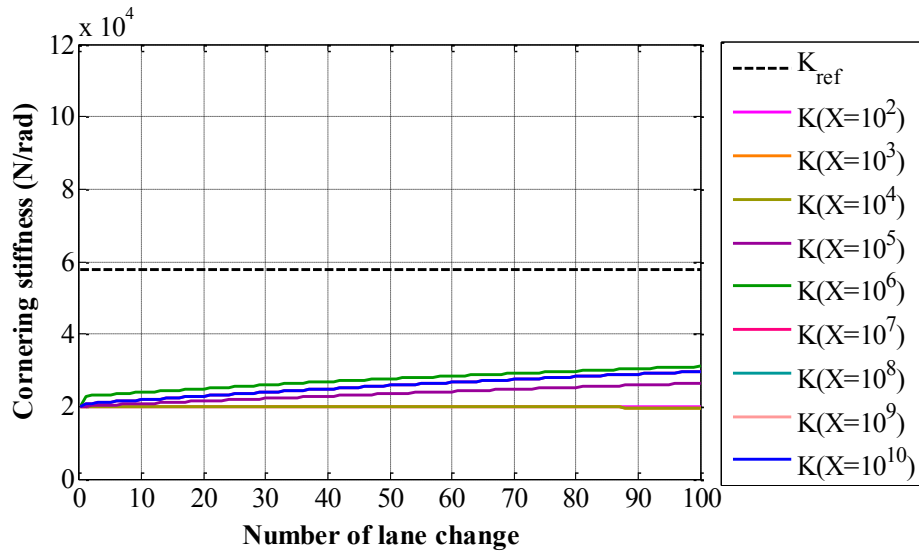


図 4.171 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.172 と図 4.173 は式(4.51)で  $V=10^{-6}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.172 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.173 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $X=10^6, 10^7, 10^8, 10^9, 10^{10}$  の場合にある値に接近することが分かる。

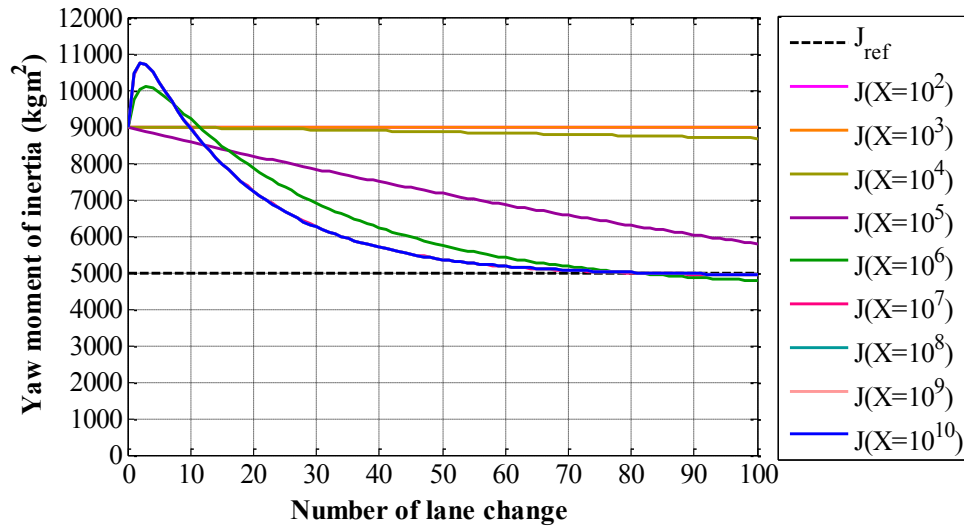


図 4.172 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

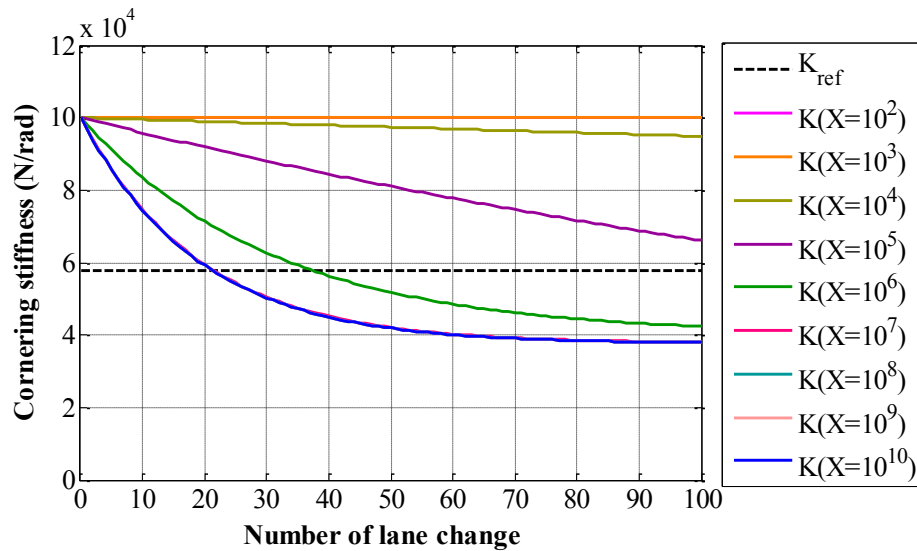


図 4.173 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値:  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.174 と図 4.175 は式(4.51)で  $V=10^{-6}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.174 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.175 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。図 4.172 と図 4.173 の推定結果のように初期値が真値より高い場合の推定結果と共に検討すると、この条件にはヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果が  $X=10^6$  の場合に推定結果が求められることが分かる。

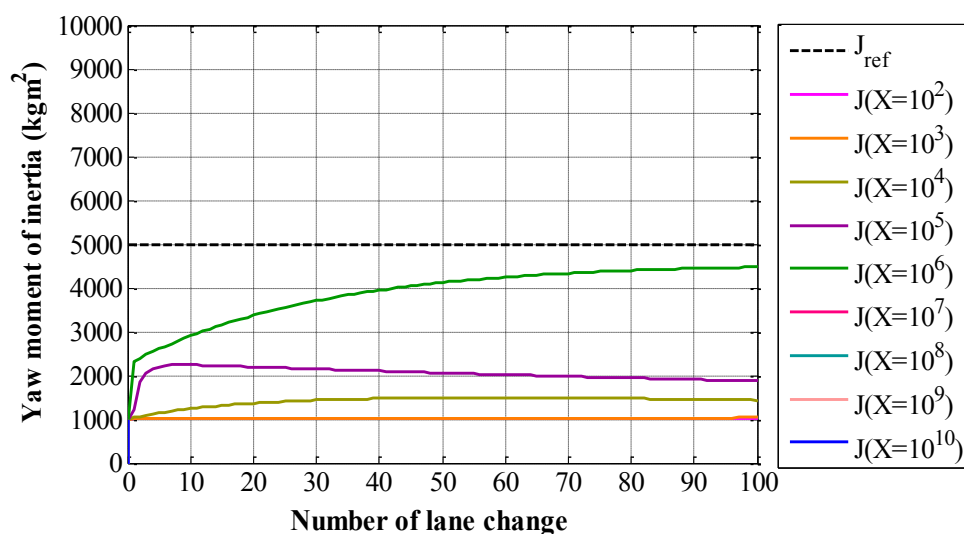


図 4.174 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

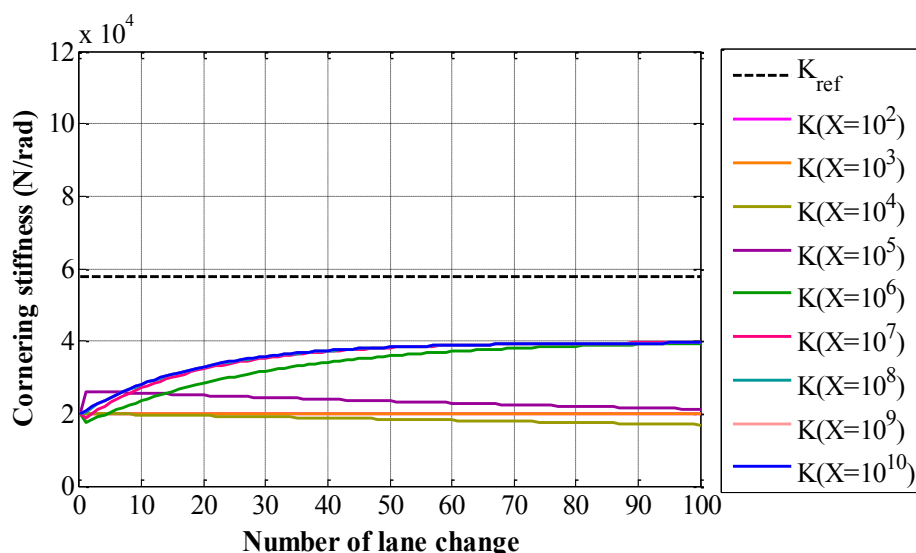


図 4.175 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.176 と図 4.177 は式(4.51)で  $V=10^{-7}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.176 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.177 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

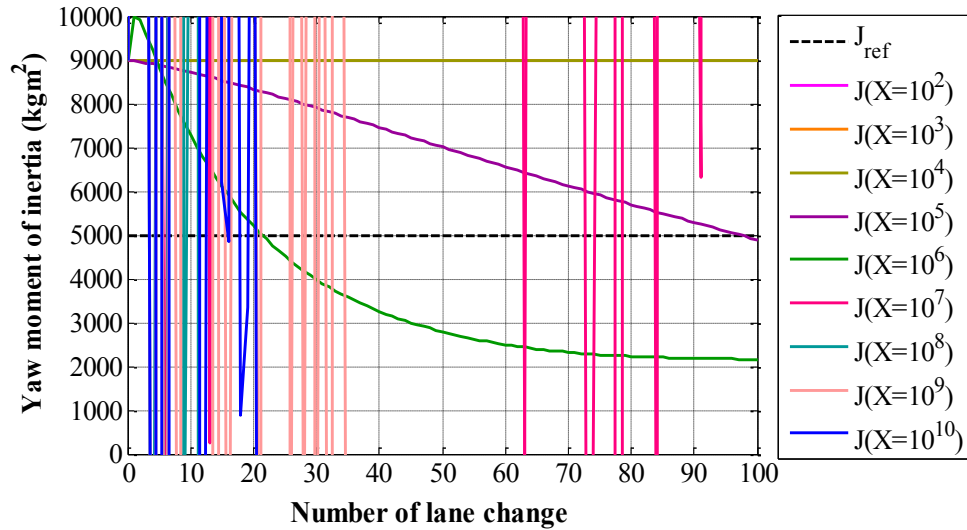


図 4.176 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

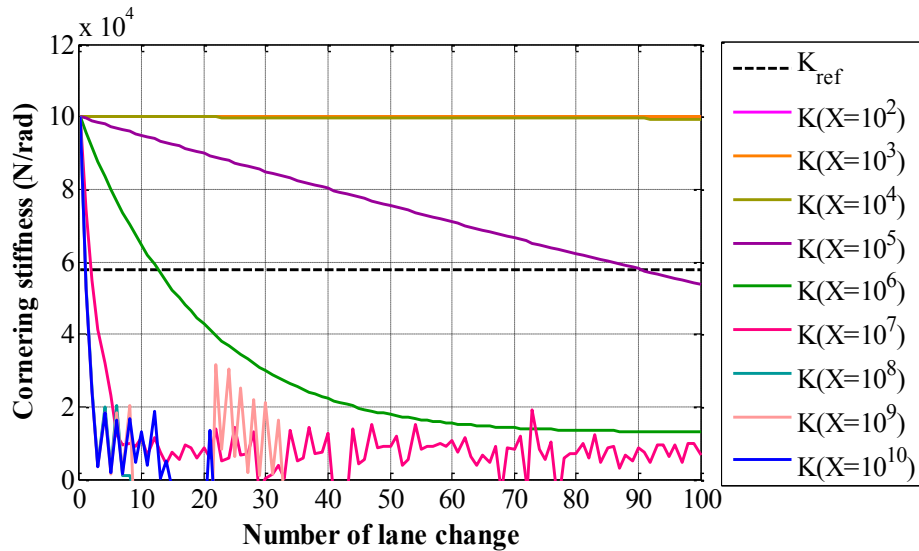


図 4.177 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.178 と図 4.179 は式(4.51)で  $V=10^{-7}$  の場合、式(4.52)の  $X$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.178 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.179 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

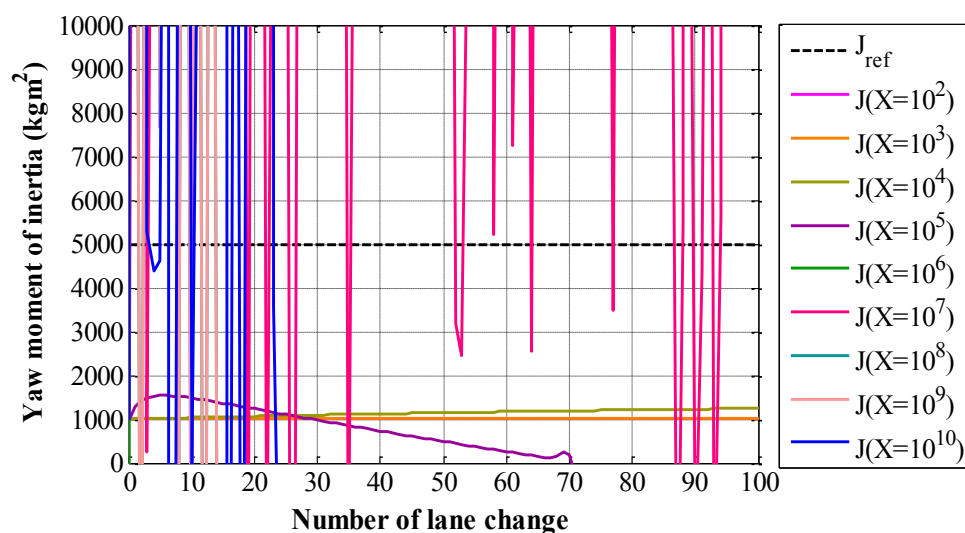


図 4.178 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

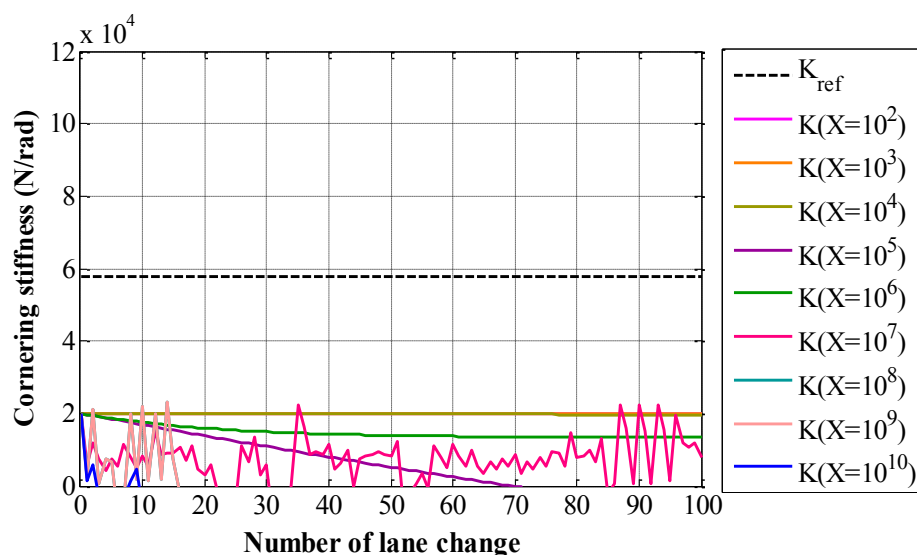


図 4.179 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

#### 4.5.2 $D_d$ の変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

式(4.54)の  $Q_p$  を固定し、式(4.53)の  $D_d$  の  $V$  を変化させた場合のパラメータ推定を行う。同時推定の初期条件は、ヨー慣性モーメントの真値( $J_{\text{ref}}=5000\text{kgm}^2$ )とコーナリングスティフネスの真値( $K_{\text{ref}}=57932\text{N/rad}$ )に対し、初期値が真値より高い場合の同時推定と、初期値が真値より小さい場合の同時推定を行う。真値より高い場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=9000\text{kgm}^2$  に設定し、コーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=100000\text{N/rad}$  に設定する。また、真値より小さい場合のヨー慣性モーメントの初期値は  $J_0=1000\text{kgm}^2$  に設定し、コーナリングスティフネスの初期値は  $K_0=20000\text{N/rad}$  に設定する。この初期条件を用いて様々な条件を調査し、以下の同時推定結果を求めた。

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$



図 4.180 と図 4.181 は式(4.54)で  $X=10^2$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.180 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.181 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

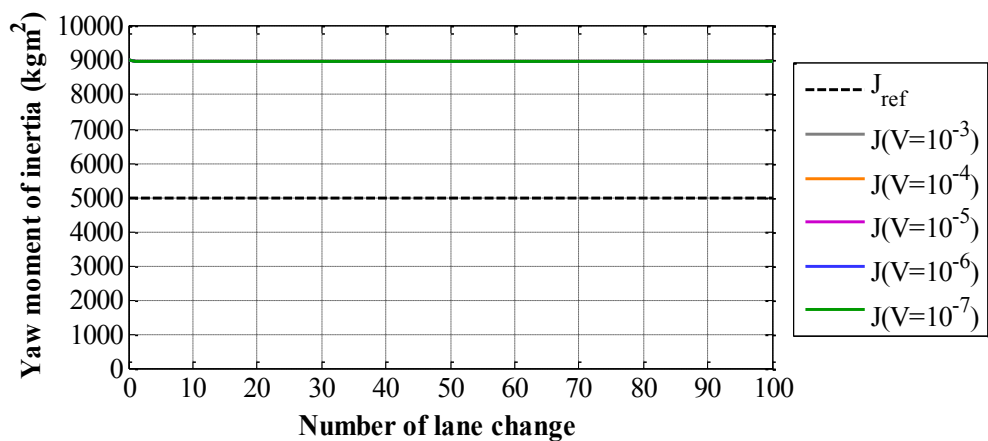


図 4.180 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

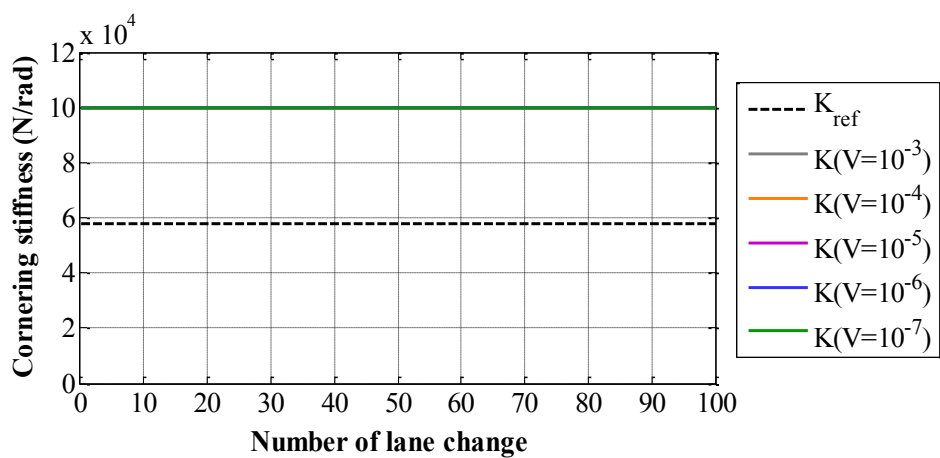


図 4.181 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.182 と図 4.183 は式(4.54)で  $X=10^2$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.182 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.183 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

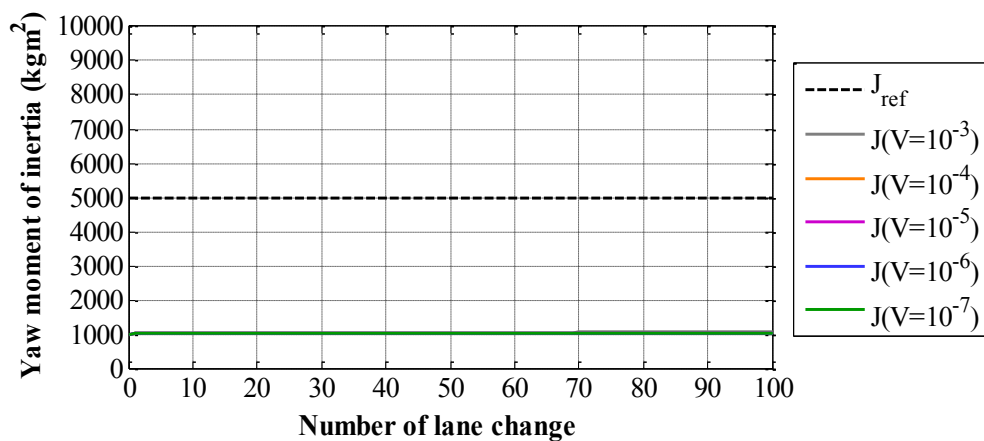


図 4.182 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

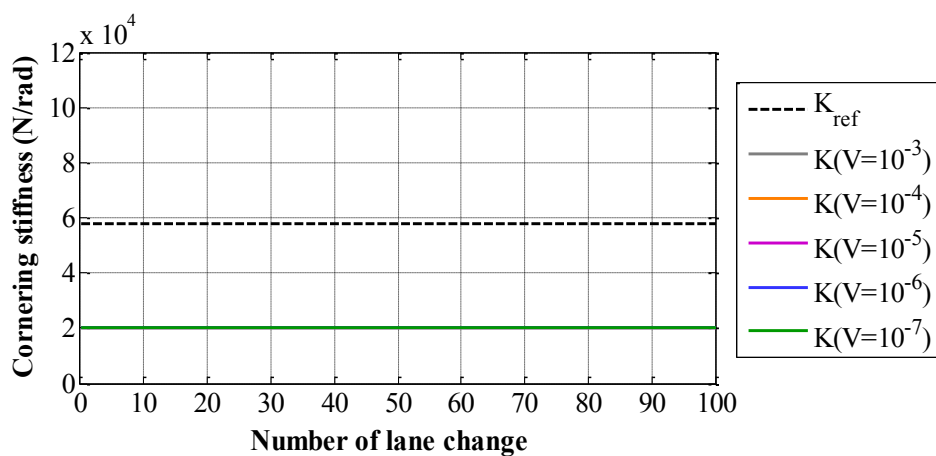


図 4.183 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.184 と図 4.185 は式(4.54)で  $X=10^3$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.184 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.185 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

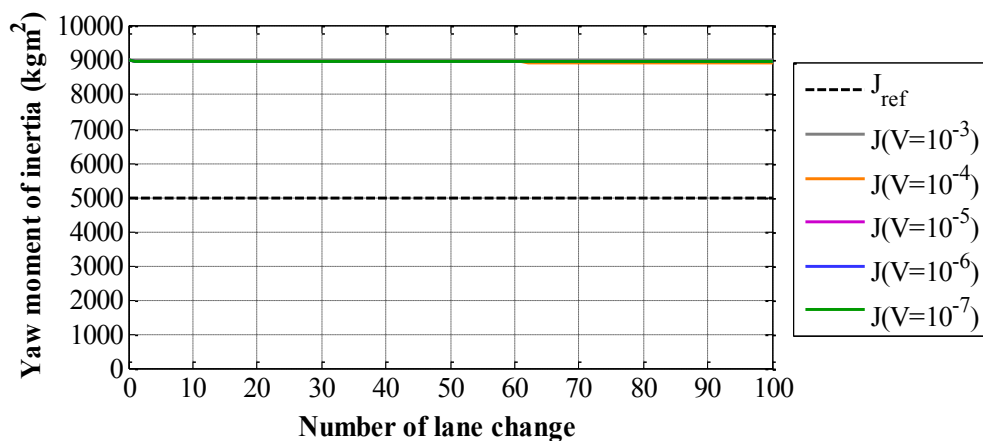


図 4.184 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

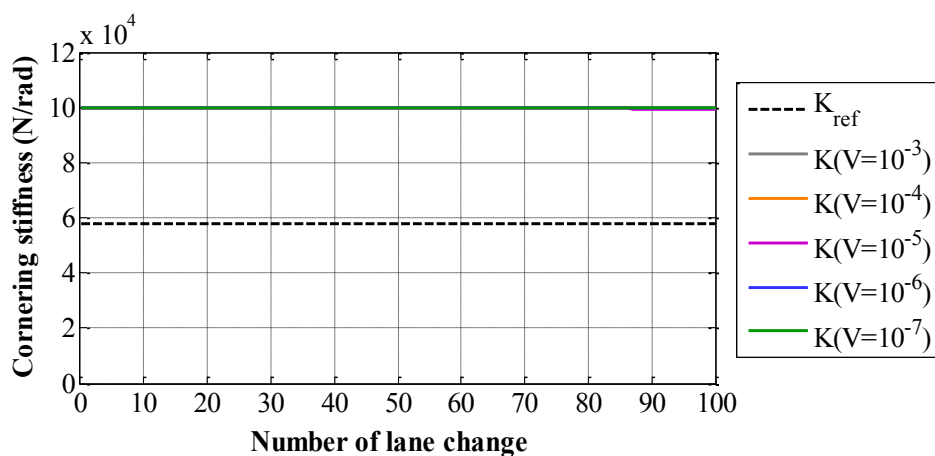


図 4.185 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.186 と図 4.187 は式(4.54)で  $X=10^3$  の場合、式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.186 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.187 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

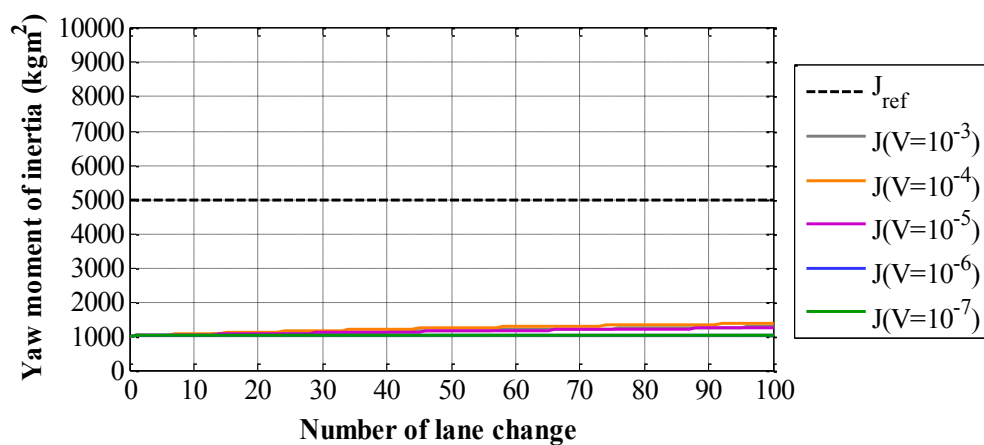


図 4.186 ヨー慣性モーメント推定結果(初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

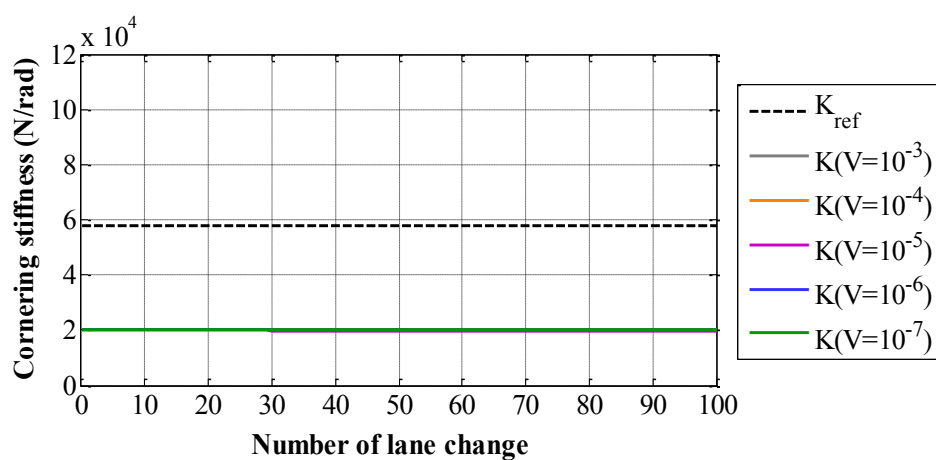


図 4.187 コーナリングスティフネス推定結果(初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.188 と図 4.189 は式(4.54)で  $X=10^4$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.188 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.189 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

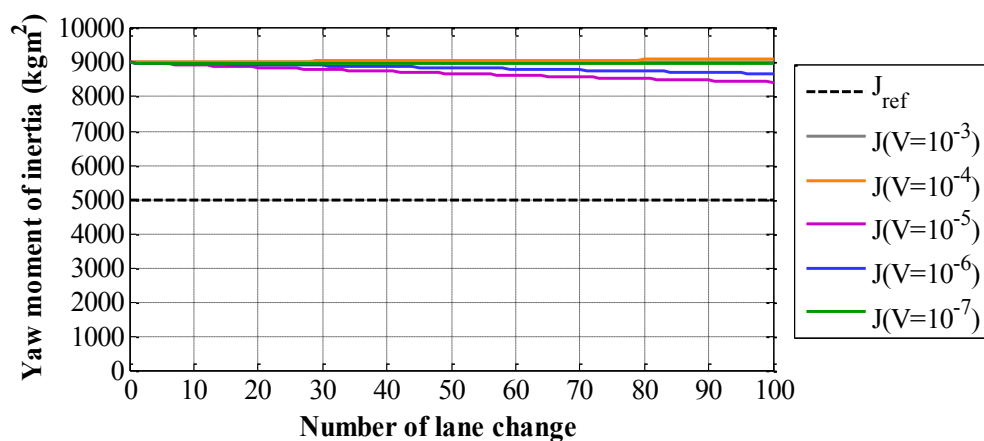


図 4.188 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

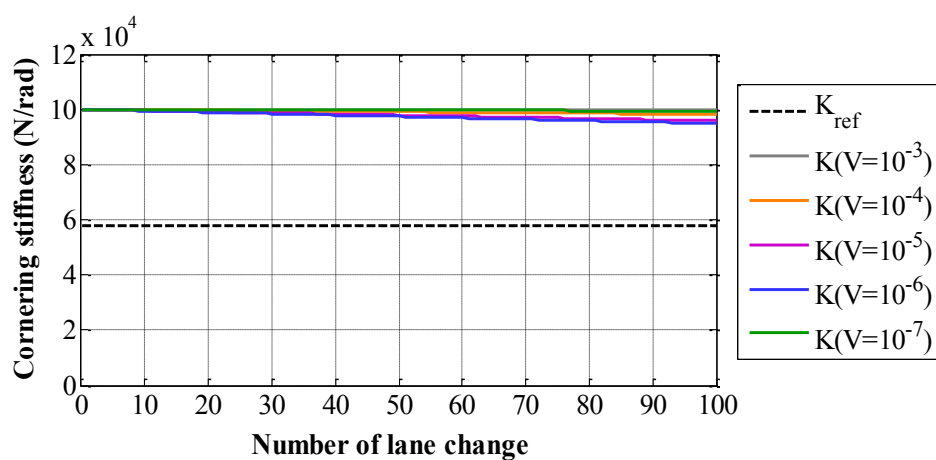


図 4.189 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.190 と図 4.191 は式(4.54)で  $X=10^4$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.190 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.191 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

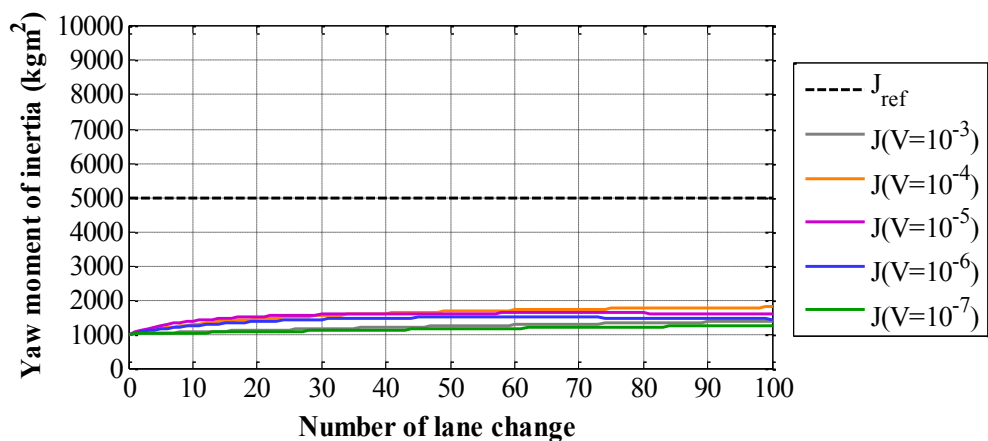


図 4.190 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

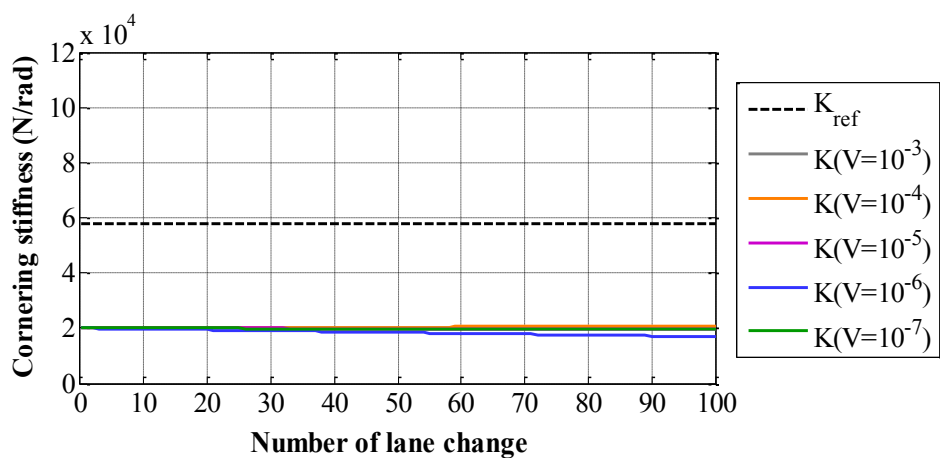


図 4.191 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.192 と図 4.193 は式(4.54)で  $X=10^5$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.192 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.193 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

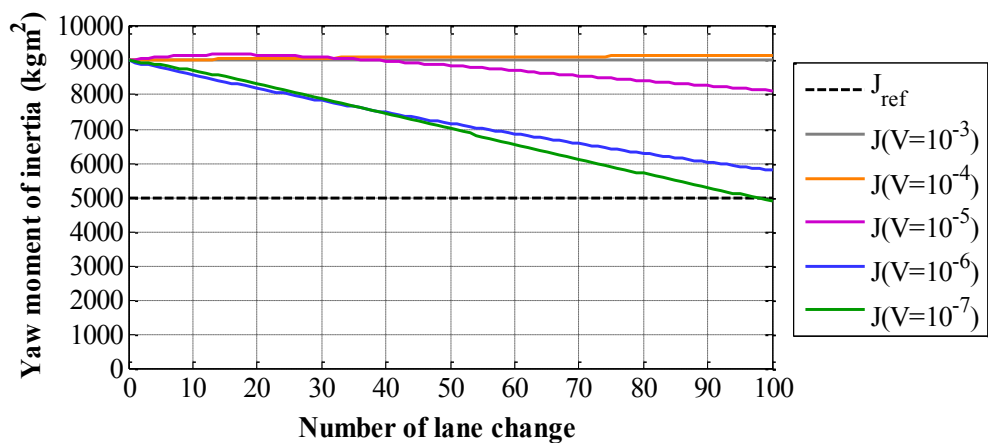


図 4.192 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

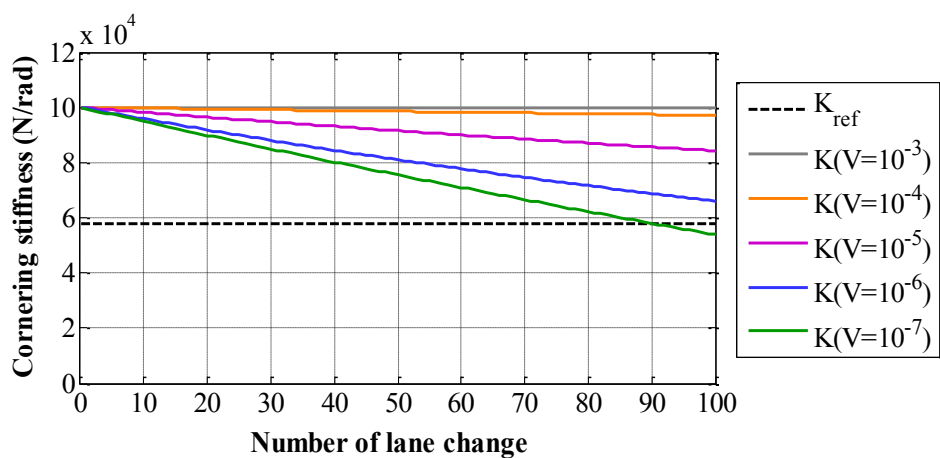


図 4.193 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.194 と図 4.195 は式(4.54)で  $X=10^5$  の場合、式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.194 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.195 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

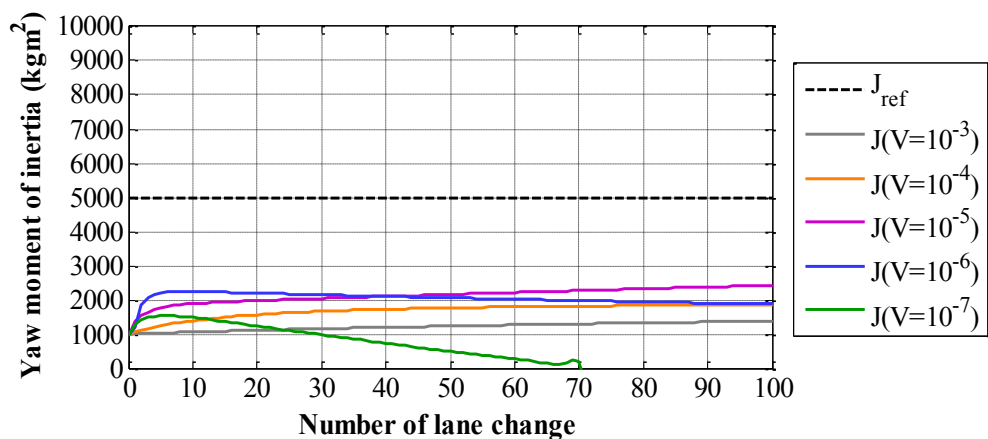


図 4.194 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

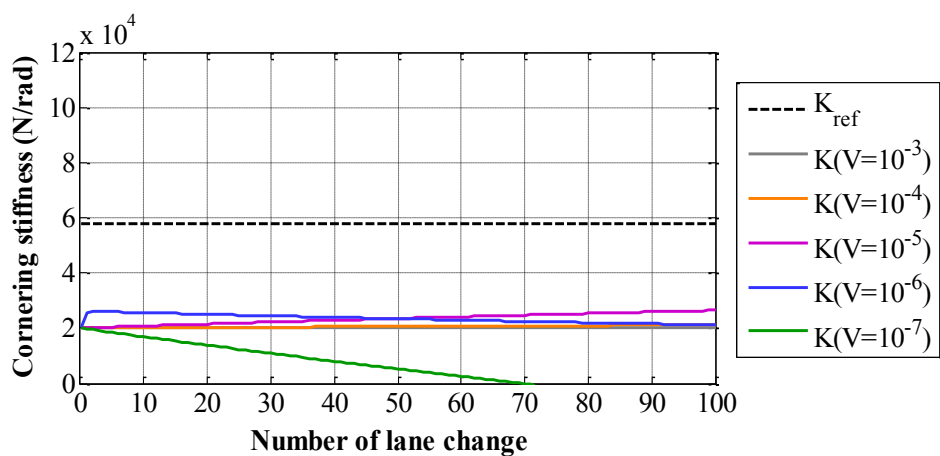


図 4.195 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値:  $K_0=20000\text{N/rad}$ )



図 4.196 と図 4.197 は式(4.54)で  $X=10^6$  の場合、式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.196 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.197 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件で  $V=10^{-6}$ ,  $10^{-7}$  の場合、ある値に接近することが分かる。

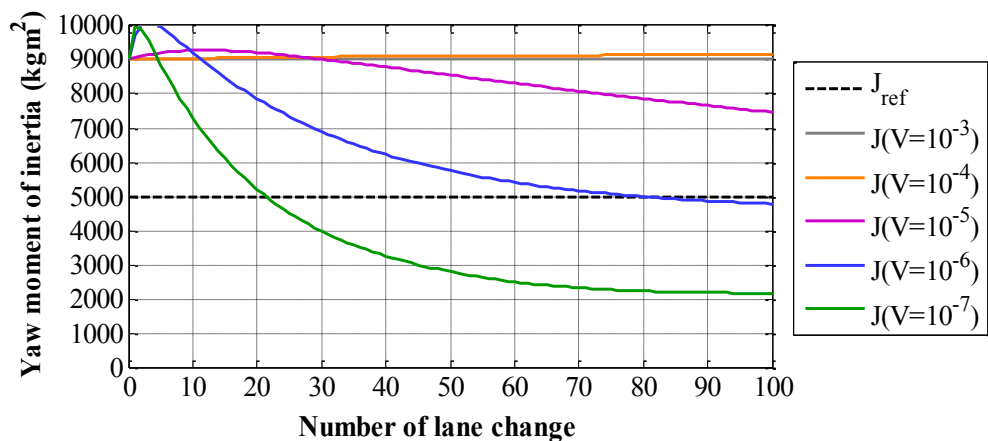


図 4.196 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

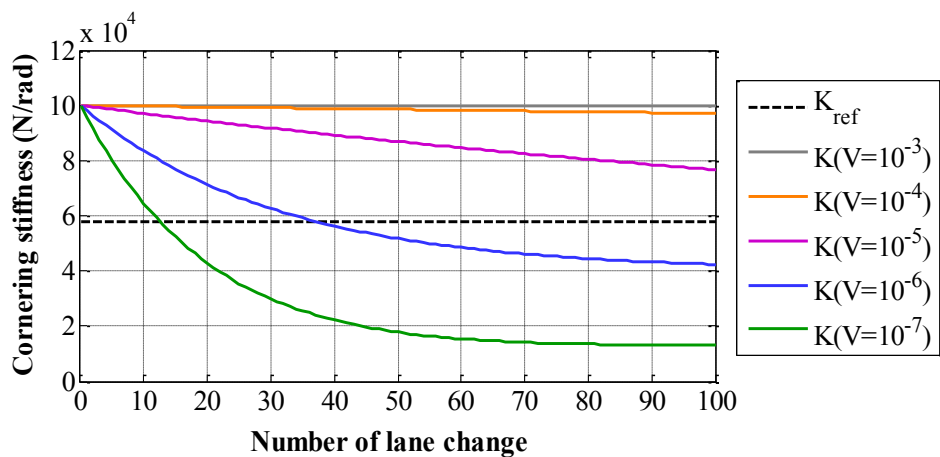


図 4.197 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値:  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.198 と図 4.199 は式(4.54)で  $X=10^6$  の場合、式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.198 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.199 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この条件にはヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果が  $V=10^{-6}$  の場合に推定結果が求められることが分かる。

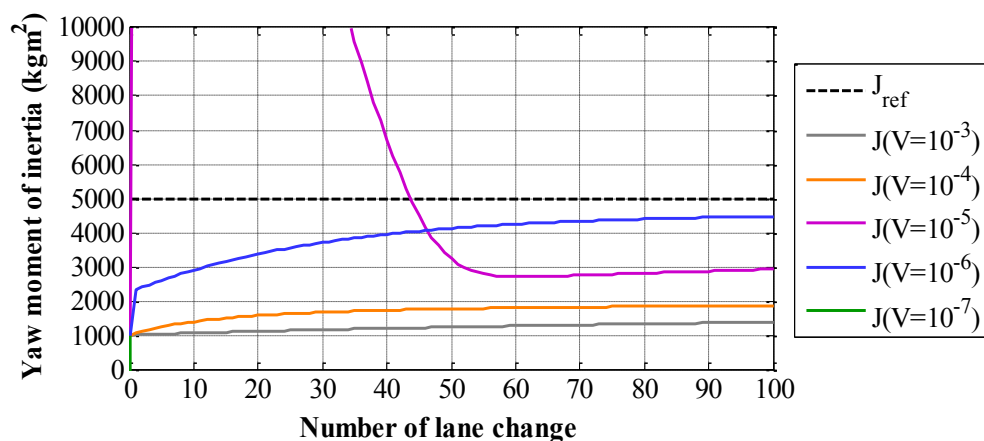


図 4.198 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=1000\text{kgm}^2$ )

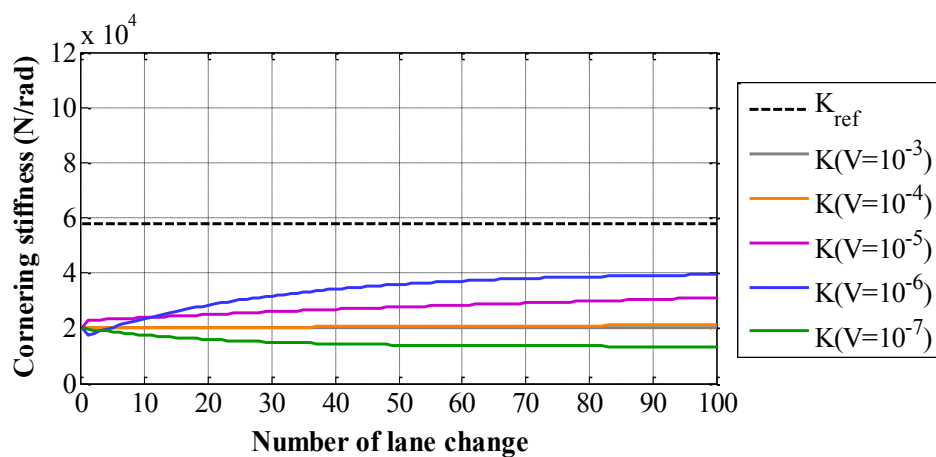


図 4.199 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値:  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.200 と図 4.201 は式(4.54)で  $X=10^7$  の場合，式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 4.200 は初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で，図 4.201 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す．

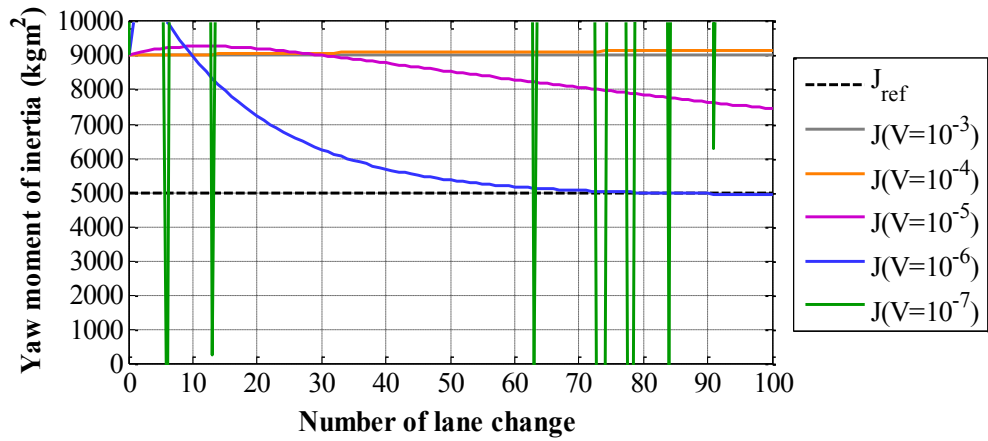


図 4.200 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値： $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

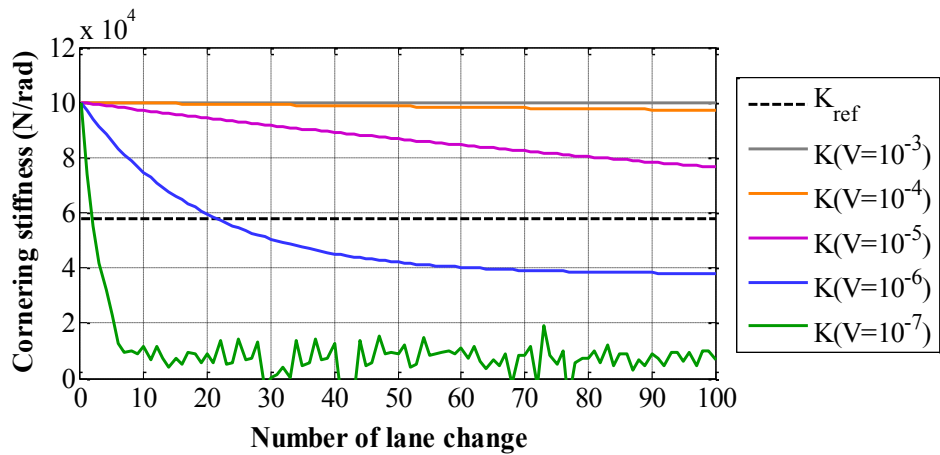


図 4.201 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値： $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.202 と図 4.203 は式(4.54)で  $X=10^7$  の場合、式(4.53)の  $V$  を変化する場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 4.202 は初期値 ( $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.203 は初期値 ( $K_0=20000\text{N/rad}$ ) のコーナリングスティフネス推定結果を示す。

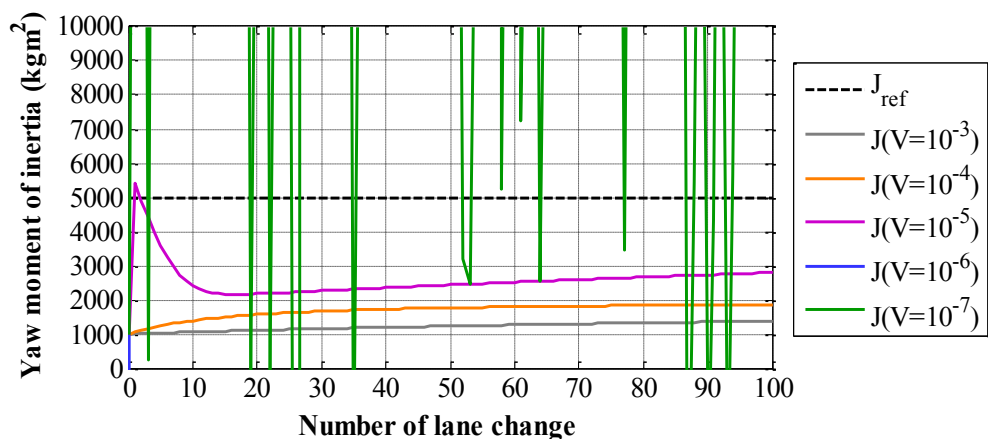


図 4.202 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=1000\text{kgm}^2$ ,  $X=10^7$ )

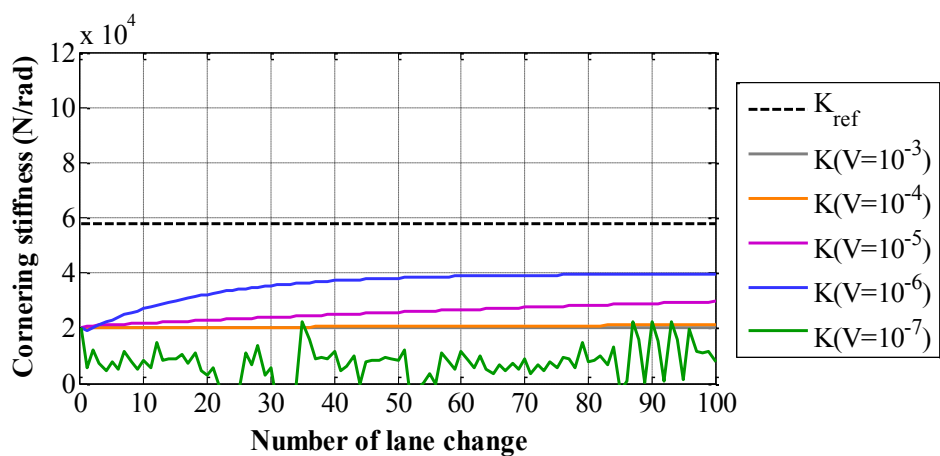


図 4.203 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

#### 4.5.3 $Q_p$ の $Z$ 値が変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定に対し、 $Q_p$ の $Z$ 値の影響を調べるため、 $Z$ 値を0から-100まで適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定を行った。同定の条件は前節で求めた推定条件( $V=10^{-6}$ ,  $X=10^6$ )を適用した。

$$Q_p = X \begin{bmatrix} 1 & Z \\ Z & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

図 4.204 と図 4.205 は  $Z$  値を-100 から 0 まで 10 の刻みで適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.204 はヨー慣性モーメント初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.205 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )の場合のコーナリングスティフネス推定結果を示す。推定結果を確認すると、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの両方の推定結果が  $Z$  の値が 0 のみある値に接近することが分かる。

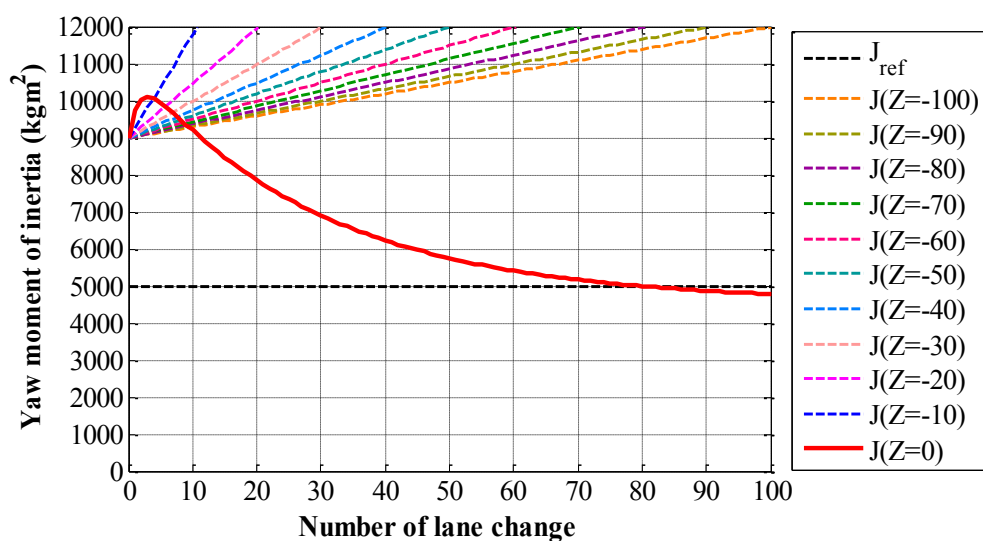


図 4.204 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

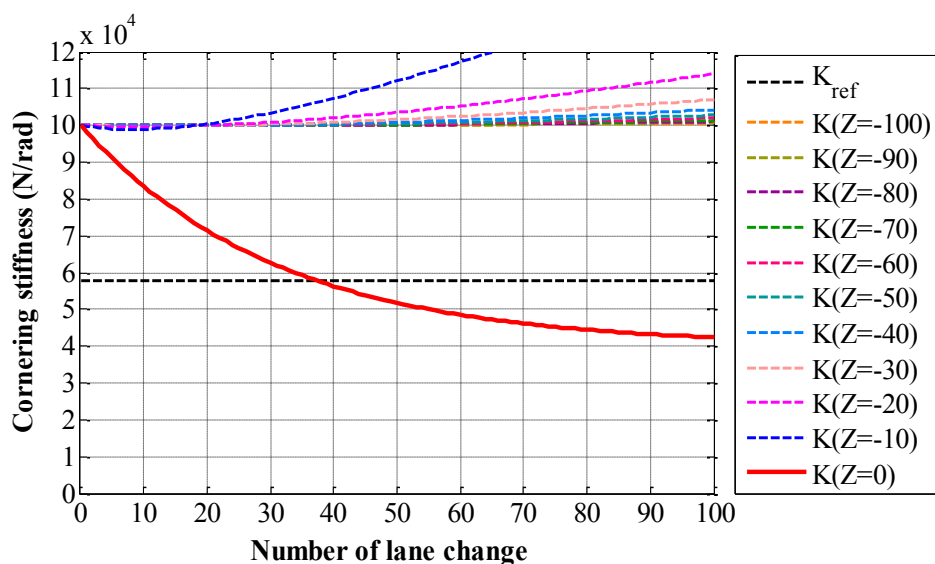


図 4.205 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.206 と図 4.207 は  $Z$  値を 0 から 100 まで 10 の刻みで適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.206 はヨー慣性モーメント初期値( $J_0=9000\text{kgm}^2$ )の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.207 は初期値( $K_0=100000\text{N/rad}$ )の場合のコーナリングスティフネス推定結果を示す。この推定結果も  $Z$  値を 0 から 100 まで適用した場合の推定結果と同様に  $Z=0$  のみある値に接近することが分かる。検討結果、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定には、式(4.50)の  $Q_p$  の  $Z$  値が 0 に設定して同定することが分かる。

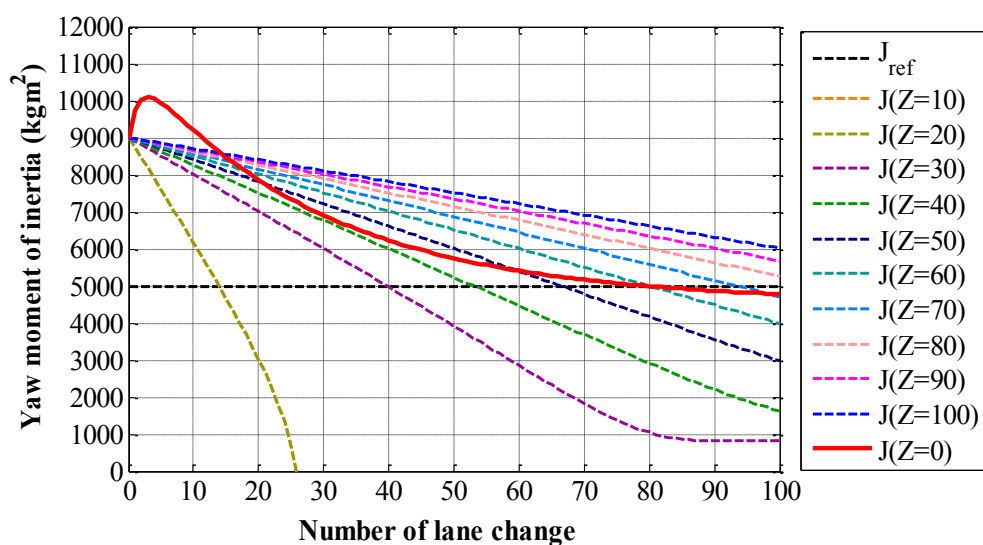


図 4.206 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

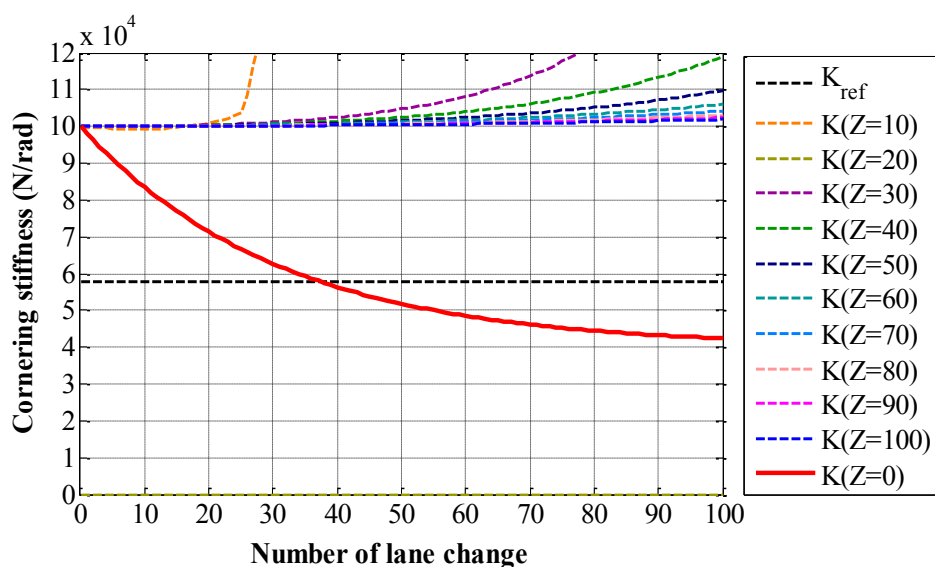


図 4.207 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=20000\text{N/rad}$ )

図 4.208 から図 4.211 までの結果で有意な条件が  $Z=0$  のみで、他の条件の有無を確認するため  $Z$  の値を 1 の刻みで調べた。

図 4.208 と図 4.209 は  $Z$  値を -10 から 0 まで 1 の刻みで適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.208 は図 4.204 と同じ初期条件でのヨー慣性モーメント推定結果である。また、図 4.209 は図 4.205 と同じ初期条件でのコーナリングスティフネス推定結果を示す。推定結果を確認すると、検討結果、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの両方の推定結果が  $Z=0$  のみ推定値がある値に接近することが分かる。

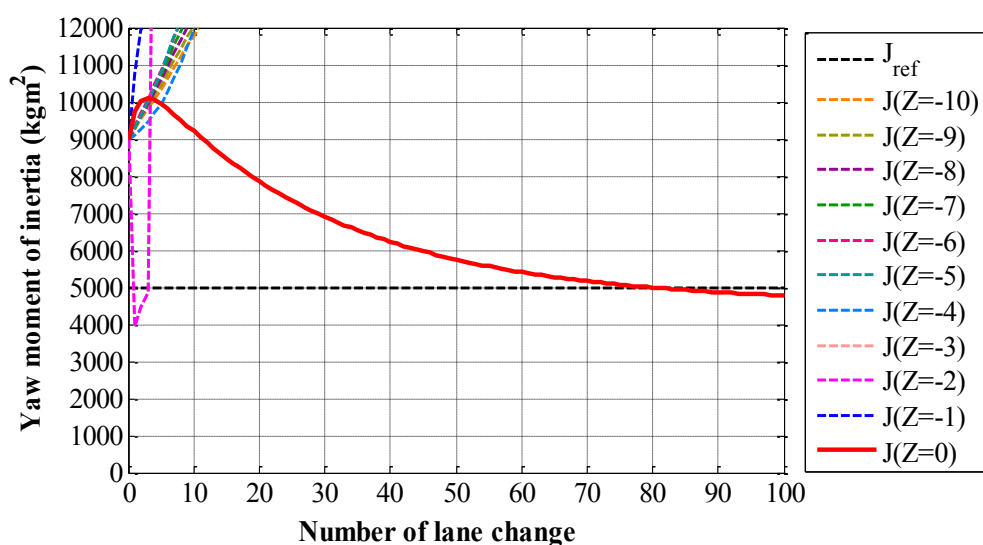


図 4.208 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

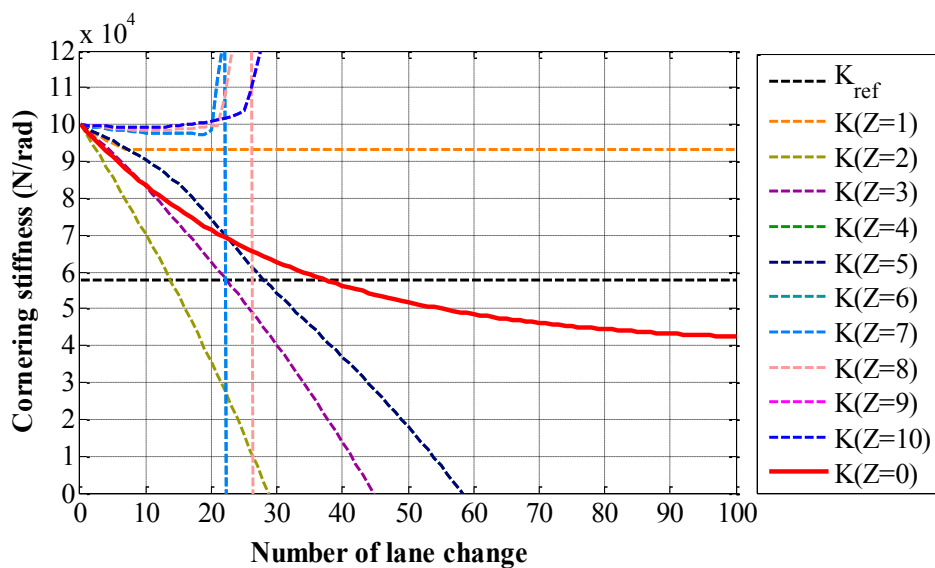


図 4.209 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値:  $K_0=100000\text{N/rad}$ )



図 4.210 と図 4.211 は  $Z$  値を 0 から 10 まで 1 の刻みで適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.210 は図 4.206 と同じ初期条件でのヨー慣性モーメント推定結果である。また、図 4.211 は図 4.207 と同じ初期条件でのコーナリングスティフネス推定結果を示す。推定結果を確認すると、検討結果、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの両方の推定結果が  $Z=0$  のみ推定値がある値に接近することが分かる。

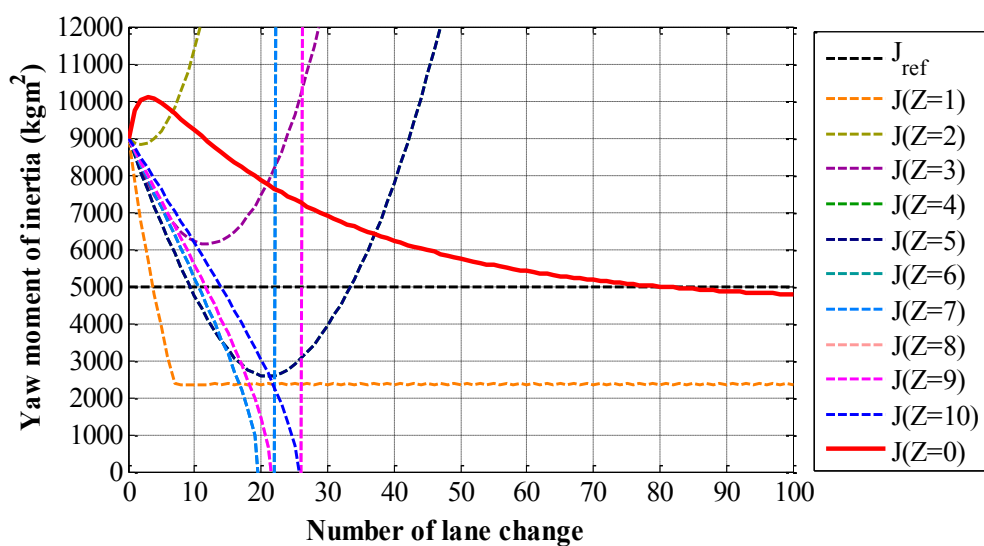


図 4.210 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

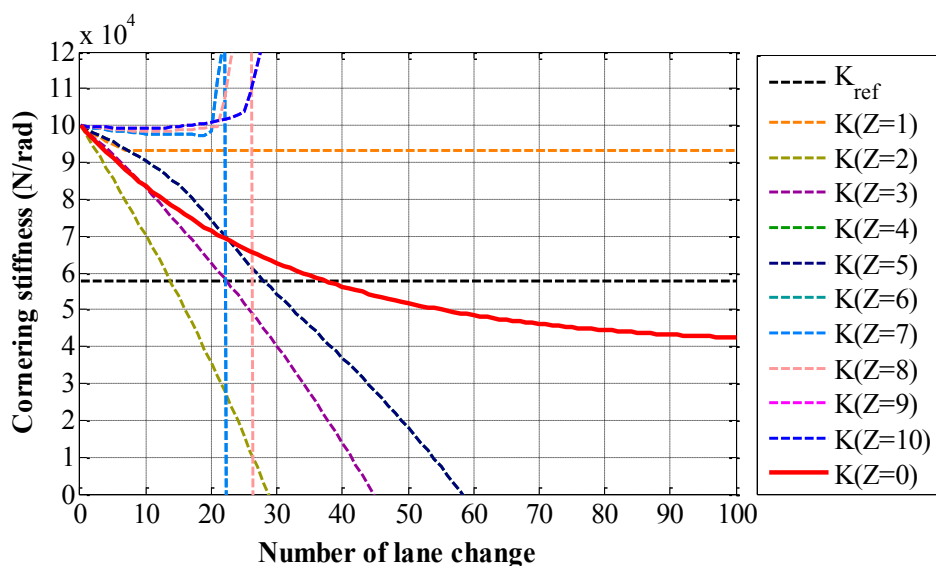


図 4.211 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

#### 4.5.4 $D_d$ の $W$ 値が変化時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定に対し，式(4.56)の  $D_d$  の  $W$  値の変化によるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定を行った．同定の条件は前節で求めた推定条件 ( $V=10^{-6}$ ,  $X=10^6$ ) を適用した． $W$  の値は  $W=10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ ,  $1$ ,  $10$ ,  $10^2$  を適用した場合の推定検討を行った．

$$D_d = V \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

図 4.212 と図 4.213 は  $W=10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10, 10^2$  を適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.212 はヨー慣性モーメント初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.213 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) の場合のコーナリングステイフネス推定結果を示す。図 4.212 と図 4.213 の推定結果を見ると、 $W$  値が大きくなるとパラメータ推定値がある値に速く接近することが分かる。

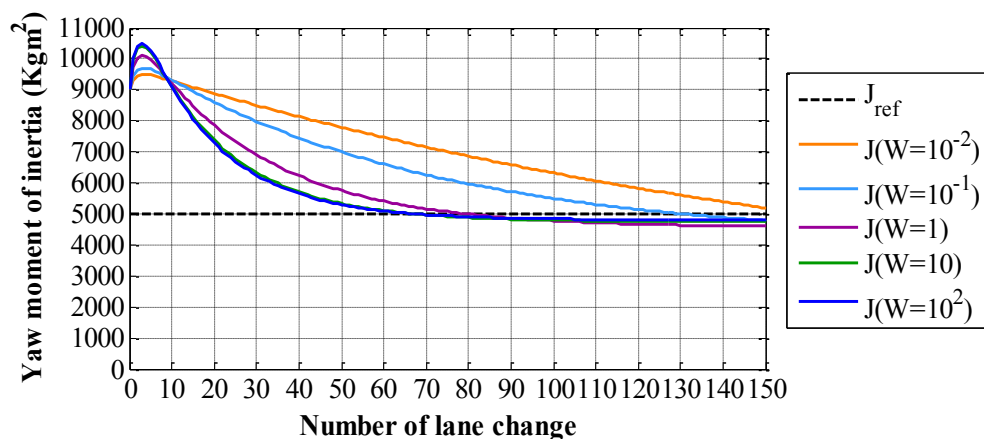


図 4.212 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値:  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

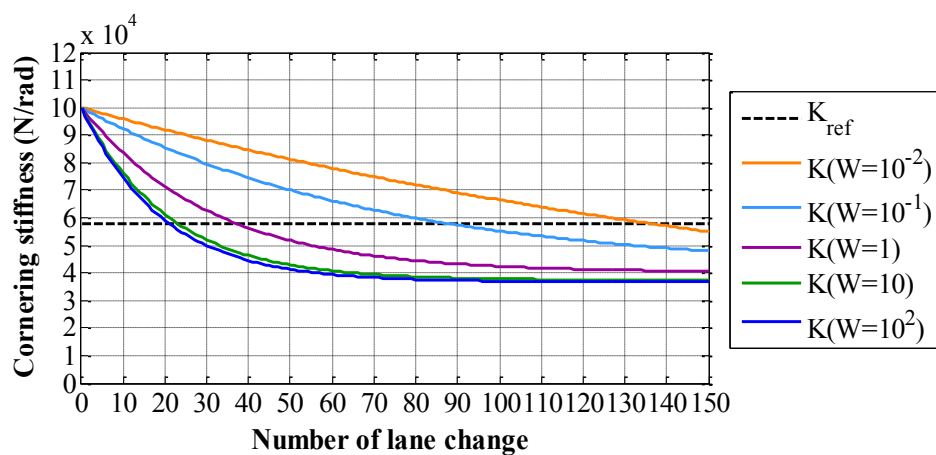


図 4.213 コーナリングステイフネス推定結果 (初期値:  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

図 4.214 と図 4.215 は  $W=10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ , 1, 10,  $10^2$  を適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定推定結果を求めた。図 4.214 はヨー慣性モーメント初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$ ) の場合のヨー慣性モーメント推定結果で、図 4.215 は初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$ ) の場合のコーナリングスティフネス推定結果を示す。図 4.214 の推定結果ではある特定条件にパラメータ推定値が求められることが分かる。図 4.215 の推定結果では  $W$  値が大きくなるとパラメータ推定値がある値に速く接近することが分かる。

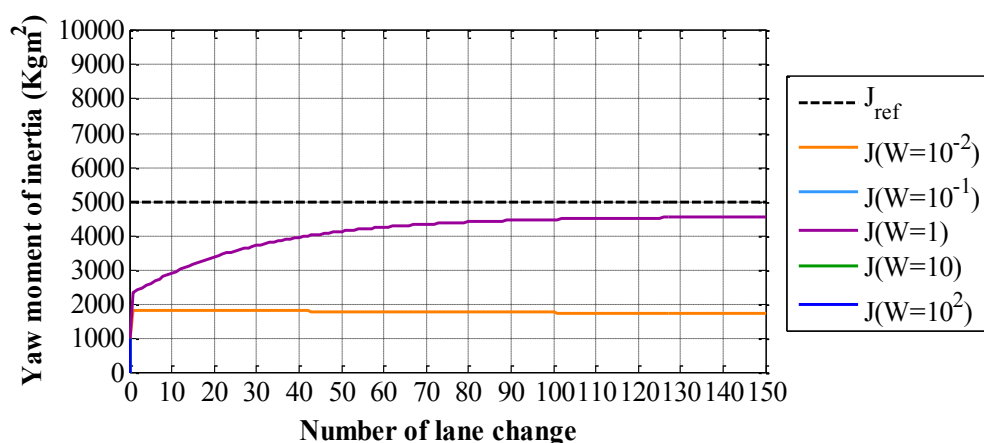


図 4.214 ヨー慣性モーメント推定結果 (初期値 :  $J_0=9000\text{kgm}^2$ )

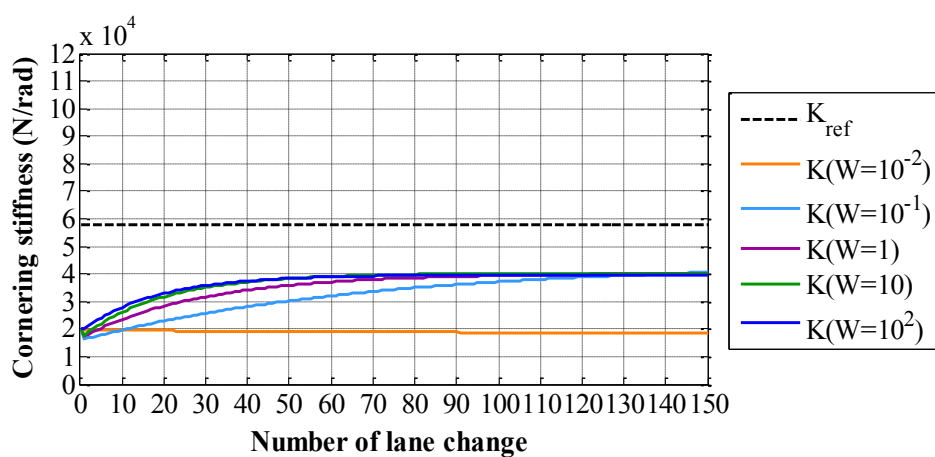


図 4.215 コーナリングスティフネス推定結果 (初期値 :  $K_0=100000\text{N/rad}$ )

#### 4.5.5 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定検討のまとめ

図 4.216 と図 4.217 はヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の検討で求めた推定条件 ( $V=10^{-6}$ ,  $X=10^6$ ) を適用した場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の結果を示す。

図 4.216 は異なるヨー慣性モーメント初期値 ( $J_0=9000\text{kgm}^2$  と  $J_0=1000\text{kgm}^2$ ) の場合のヨー慣性モーメント推定結果をまとめた図で、ヨー慣性モーメントの推定値が  $4556\text{kgm}^2$  に合って、真値と比べて -8% の誤差がある。また、このヨー慣性モーメントの推定値が求められるまで 140 回のレーンチェンジが必要であることが分かる。

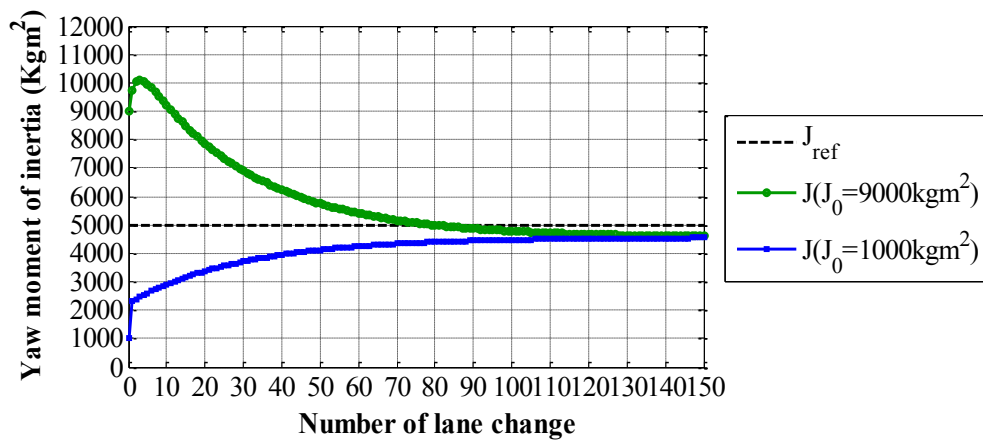


図 4.216 ヨー慣性モーメント推定結果

図 4.217 は異なるコーナリングスティフネス初期値 ( $K_0=100000\text{N/rad}$  と  $20000\text{N/rad}$ ) の場合のコーナリングスティフネス推定結果で、コーナリングスティフネスの推定値が  $40214\text{N/rad}$  に合って、真値と比べて -30% の誤差がある。この条件にはヨー慣性モーメントの推定値が求められるまで 140 回のレーンチェンジが必要であることが分かる。

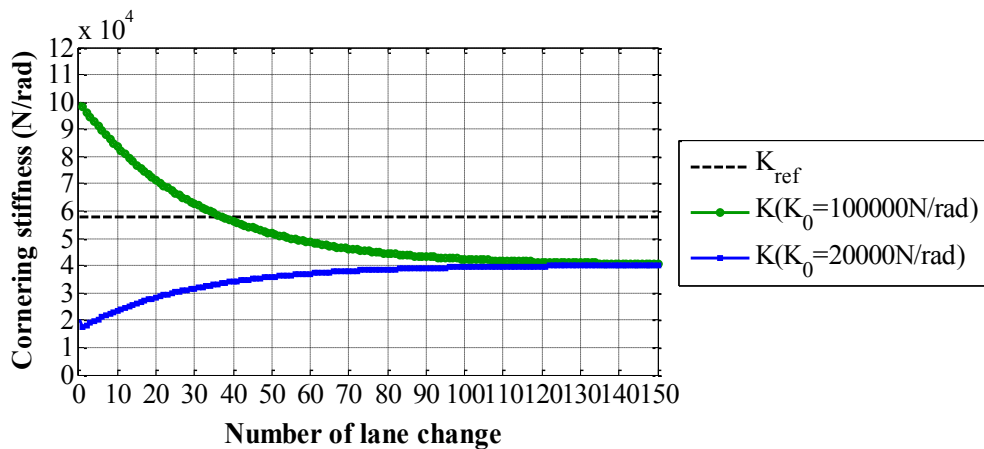


図 4.217 コーナリングスティフネス推定結果

検討結果、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定で、推定誤差が大きくなる原因は、検討に使われる車両モデルの運動方程式が実車のダイナミクスとの差異のためであると考えられる。また、測定されたデータの誤差のため、パラメータ推定誤差が発生したと考えられる。カントのある区間のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の推定結果が求められる推定条件を調査したが、推定値がある値に収束する条件が見付からなかった。カントのある区間のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定には適用するのは今後の課題として検討が必要であるとする。

#### 4.5.6 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の推定値の予測

図 4.216 と図 4.217 でヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の推定結果を求めるためには 140 回のレーンチェンジが必要である．より速く未知のパラメータの推定値を求めるためには，式(4.57)の提案した 3.6 節のパラメータ予測手法を用いて，パラメータ推定値を先に予測する．

$$P_{Pre(n)} = \frac{-\left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)P_{L(n-1)} + P_{H(n-1)}}{1 - \left(\frac{P_{H(n)} - P_{H(n-1)}}{P_{L(n)} - P_{L(n-1)}}\right)} \quad (4.57)$$

図 4.218 と図 4.219 はヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定の推定結果に式(4.57)を用いて求めたパラメータ推定値の予測結果を示す．図 4.218 は図 4.216 のヨー慣性モーメントの推定値の予測結果で，10 回のレーンチェンジでヨー慣性モーメントの推定の予測値が求めることができた．予測手法を適用しない場合の 140 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる．図 4.219 は図 4.217 のコーナリングスティフネスの推定値の予測結果で，3 回のレーンチェンジでコーナリングスティフネスの推定の予測値が求めることができた．予測手法を適用しない場合の 140 回のレーンチェンジより速く推定値を求められることが分かる．

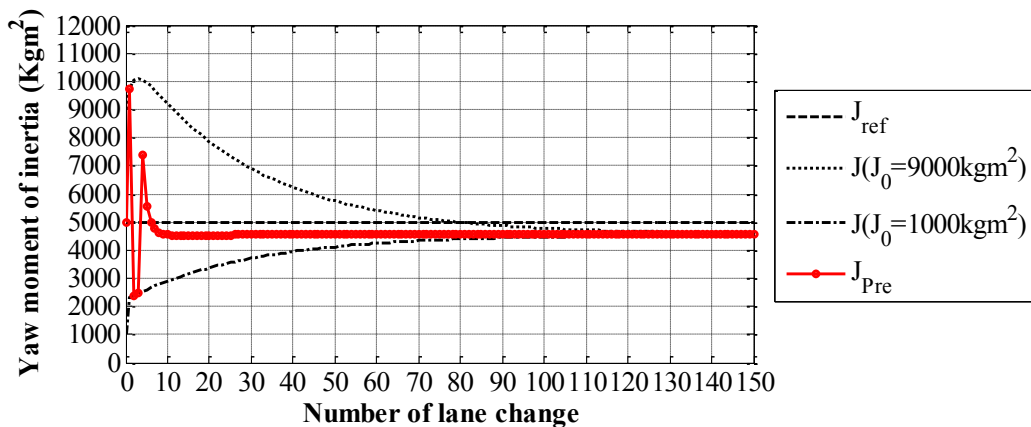


図 4.218 ヨー慣性モーメント推定の予測結果

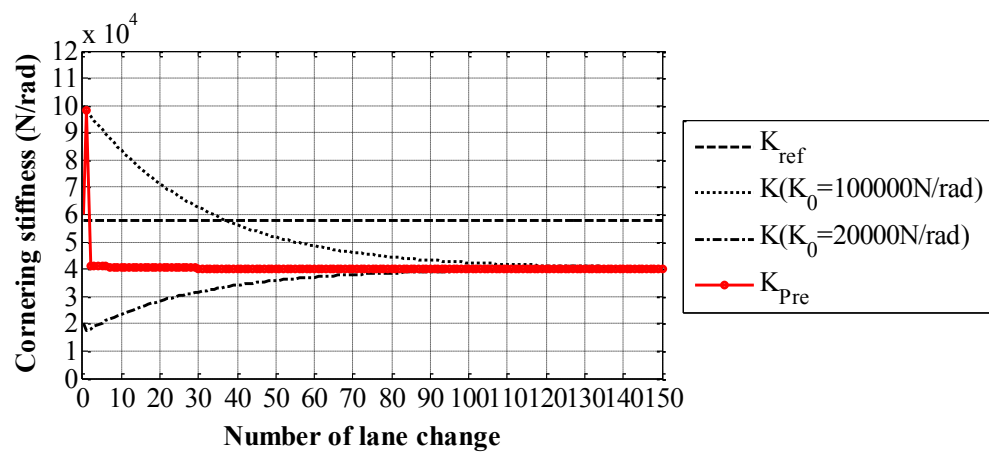


図 4.219 コーナリングステイフネス推定の予測結果



## 第 5 章

### パラメータ推定の数値解析

## 5 パラメータ推定の数値解析

### 5.1 数値解析の設定

#### 5.1.1 数値解析用ソフト

実際に積載状態による実車のヨー慣性モーメントの真値は分からない場合が多い。ヨー慣性モーメントの同定手法の妥当性を検討するためには、ヨー慣性モーメントの真値が基準として必要であり、数値解析を用いて妥当性を検討する。実験はトラックを利用しなかったため、トラックの車両運動に対する数値解析に商用ソフトである **Trucksim** を用いる。**Trucksim** はさまざまな運転条件と車両条件に対し、車両の動的挙動をシミュレーションで解析及び評価ができるソフトである。

#### 5.1.2 数値解析のシナリオ

車両が操舵走行する場合、レーンチェンジとコーナリングを主に行う。一般走行中にコーナリングよりレーンチェンジ多く行うのが現状である。本研究では一般走行中に多く行われるレーンチェンジに対し、同定案によるパラメータ推定検討することにする。DKF による数値解析のシナリオは図 5.1 のレーンチェンジする場合の数値解析を行った。

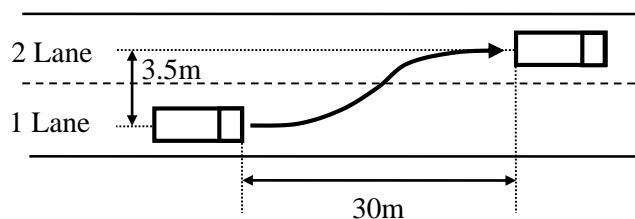


図 5.1 レーンチェンジのシナリオ

#### 5.1.3 車両パラメータ

数値解析に使われる車両制御用パラメータ中で、車体質量、車重位置から各車輪軸までの距離、車両のヨー慣性モーメントは参考文献の値を参考した[85]。荷重変化によるヨー慣性モーメントの同定を検討するため、空車状態の車体質量は 12400kg、満車状態の車体質量は空車状態に 10000kg の貨物を載せた場合の 22400kg の 2 条件の車体質量を設定した。ヨー

慣性モーメントの設定値は、車体質量が空車状態の場合は  $136000\text{kgm}^2$ 、満車状態の場合は  $268100\text{kgm}^2$  に設定した。タイヤのコーナリングスティフネスは図 5.2 の Trucksim から提供されるタイヤの特性データを用いて、車両の各輪に掛かる接地荷重に合うコーナリングスティフネスを計算し求めた。以上の車両パラメータの値を表 5.1 に示す。

数値解析によるパラメータ推定に使われる前輪と後輪のコーナリングスティフネスの値に対し、後輪のコーナリングスティフネスの値は前輪のコーナリングスティフネスの値に比率をかけて用いることにする。

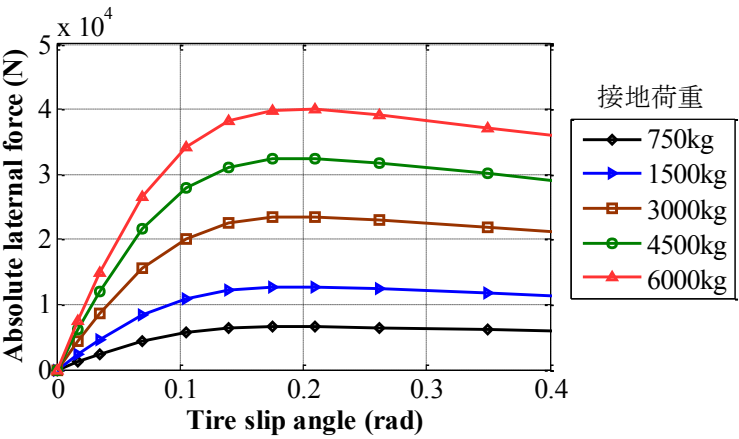


図 5.2 タイヤ特性

表 5.1 パラメータ設定

車両質量	空車時		12400 kg
	満車時		22400 kg
ヨー慣性モーメント	空車時		136000 kgm <sup>2</sup>
	満車時		268100 kgm <sup>2</sup>
1 軸から重心位置まで距離			3.59 m
2 軸から重心位置まで距離			1.95 m
3 軸から重心位置まで距離			3.26 m
コーナリング スティフネス	空車時	1 軸タイヤ	209000 N/rad
		2 軸タイヤ	165200 N/rad
		3 軸タイヤ	188800 N/rad
	満車時	1 軸タイヤ	269200 N/rad
		2 軸タイヤ	213800 N/rad
		3 軸タイヤ	244350 N/rad

## 5.2 ヨー慣性モーメントの同定

### 5.2.1 初期値の設定

本節のヨー慣性モーメント推定の検討は車両質量の同定と重心位置の同定が行われ、車両質量と重心位置が分かると想定し、ヨー慣性モーメントの推定値について検討する。ヨー慣性モーメントの推定の場合、コーナリングスティフネスは既値で一定であるとする。ヨー慣性モーメントの推定値が真値に収束することを検討する。推定値が真値に収束することを検討するため、ヨー慣性モーメントの初期値を真値付近の真値より高い値と真値より低い値を設定する。参考文献の値を流用し車体重心位置を 3.59m に設定する[85]。空車時のヨー慣性モーメントの最小設定値と最大設定値は車体質量 13000kg を基準で、最小慣性半径は図 5.3 のように重心位置から 1m になると仮定する。また、最大慣性半径は図 5.4 のように重心位置から後輪の 2 軸までの 3.62m になると仮定する。そのためヨー慣性モーメントの最小設定値は 13000kgm<sup>2</sup> に求められる。ヨー慣性モーメントの最大設定値は 170000kgm<sup>2</sup> に求められる。

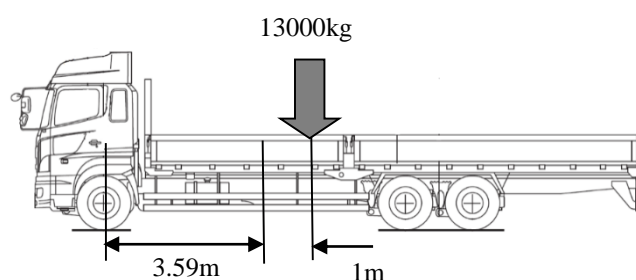


図 5.3 空車時のヨー慣性モーメントの最小初期値の設定

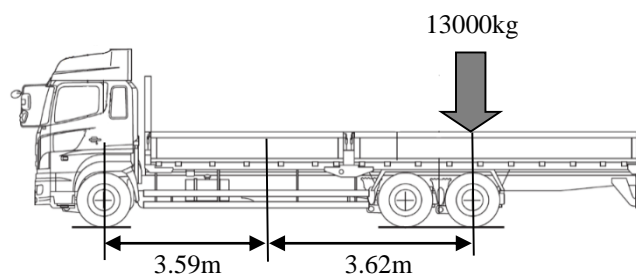


図 5.4 空車時のヨー慣性モーメントの最大初期値の設定

満車時も空車時と同様に設定する。空車時のヨー慣性モーメントの最小設定値と最大設定値は車体質量  $25000\text{kg}$  を基準で、最小慣性半径は図 5.5 のように重心位置から  $1\text{m}$  になると仮定する。また、最大慣性半径は図 5.6 のように重心位置から後輪の 2 軸までの  $3.62\text{m}$  になると仮定する。そのためヨー慣性モーメントの最小設定値は  $25000\text{kgm}^2$  に求められる。ヨー慣性モーメントの最大設定値は  $330000\text{kgm}^2$  に求められる。以上のヨー慣性モーメントの初期設定値を整理すると、車両が空車状態の場合、真値 ( $J_R=136000\text{kgm}^2$ ) より低い値 ( $J_L=13000\text{kgm}^2$ ) と真値より高い値 ( $J_H=170000\text{kgm}^2$ ) の初期値を設定した。また、車両が満車状態の場合、真値 ( $J_R=268100\text{kgm}^2$ ) より低い値 ( $J_L=25000\text{kgm}^2$ ) と真値より高い値 ( $J_H=330000\text{kgm}^2$ ) の初期値を設定した。

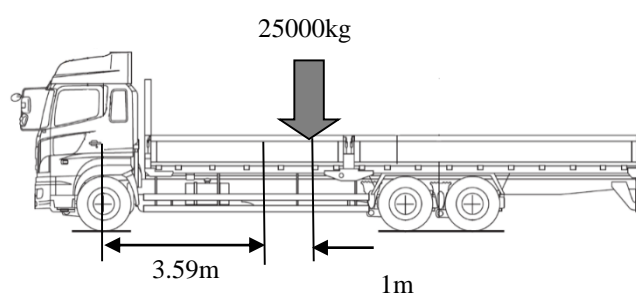


図 5.5 満車時のヨー慣性モーメントの最小初期値の設定

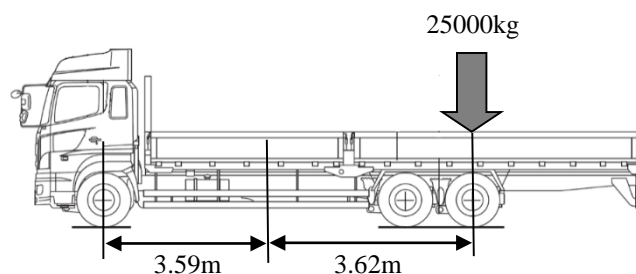


図 5.6 満車時のヨー慣性モーメントの最大初期値の設定

## 5.2.2 ヨー慣性モーメントの推定結果

図 5.7 は空車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果で，真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と，真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が  $130100\text{kgm}^2$  に収束され，収束された推定値と真値  $J_R$  の間に-4.3%の誤差があることを確認した．図 5.8 は空車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果で，真値より低い初期値  $J_{Le}$  からの推定値と，真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が  $140400\text{kgm}^2$  に収束され，収束された推定値と真値  $J_R$  の間に 3.2%の誤差があることを確認した．ヨー慣性モーメントの推定結果を見ると，同提案による推定結果が求められることが分かる．

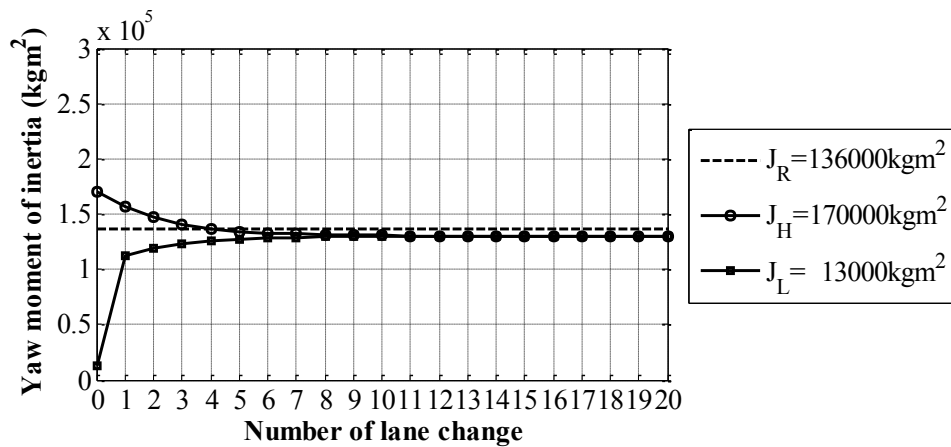


図 5.7 空車状態で 60km/h 時，ヨー慣性モーメント推定結果

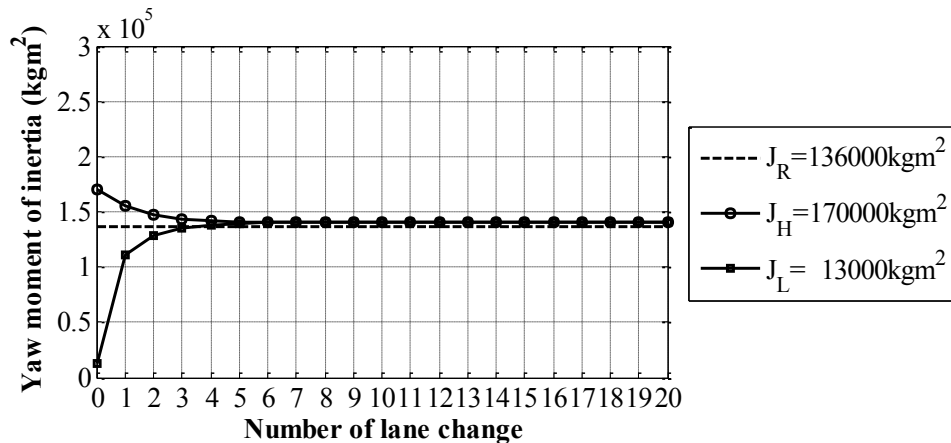


図 5.8 空車状態で 80km/h 時，ヨー慣性モーメント推定結果

図 5.9 は満車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果で，真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と，真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が  $257000\text{kgm}^2$  に収束され，収束された推定値と真値  $J_R$  の間に-4.1%の誤差があることを確認した．図 5.10 は満車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果で，真値より低い初期値からの推定値と，真値より高い初期値からの推定値が  $272300\text{kgm}^2$  に収束され，収束された推定値と真値  $J_R$  の間に 1.6%の誤差があることを確認した．

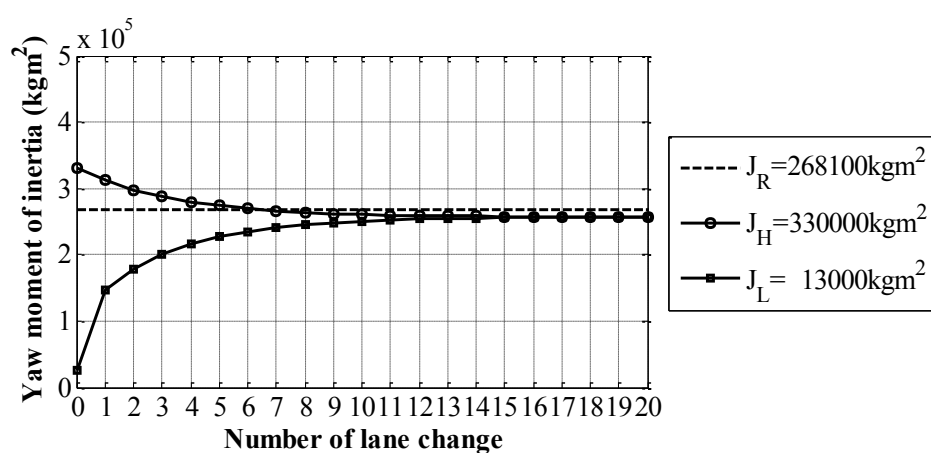


図 5.9 満車状態で 60km/h 時，ヨー慣性モーメント推定結果

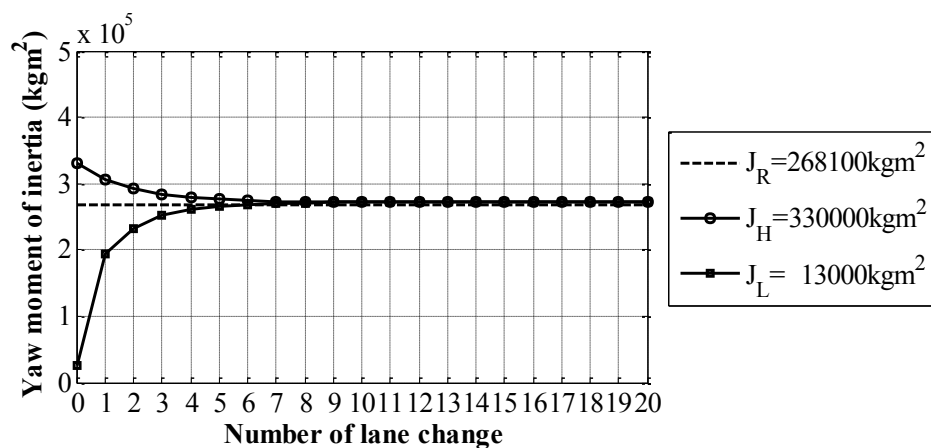


図 5.10 満車状態で 80km/h 時，ヨー慣性モーメント推定結果

### 5.2.3 ヨー慣性モーメント推定値の予測

図 5.11 は前節の空車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果である図 5.7 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.7 のように収束の予測案を適用しなかった場合には 8 回目のレーンチェンジで収束されることにに対し、予測値は 3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。図 5.12 は空車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果である図 5.8 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.8 のように収束の予測案を適用しなかった場合には 5 回目のレーンチェンジで収束されることにに対し、予測手法を適用すると 3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。

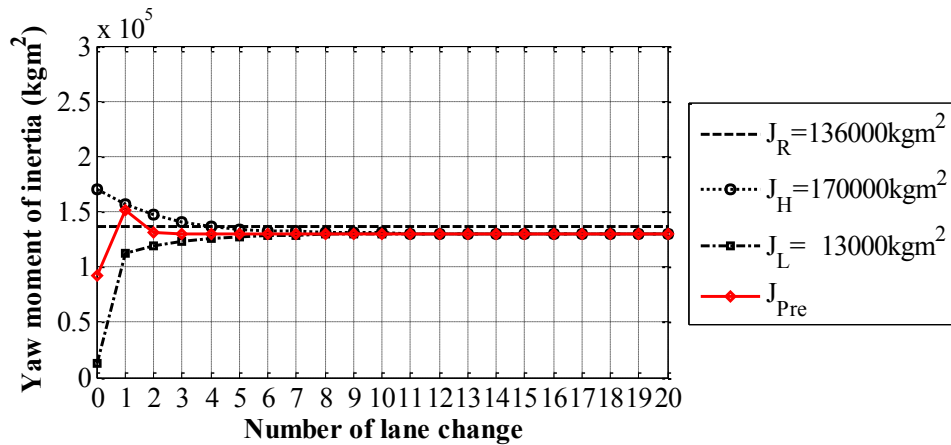


図 5.11 空車状態で 60km/h 時，ヨー慣性モーメント推定の予測結果

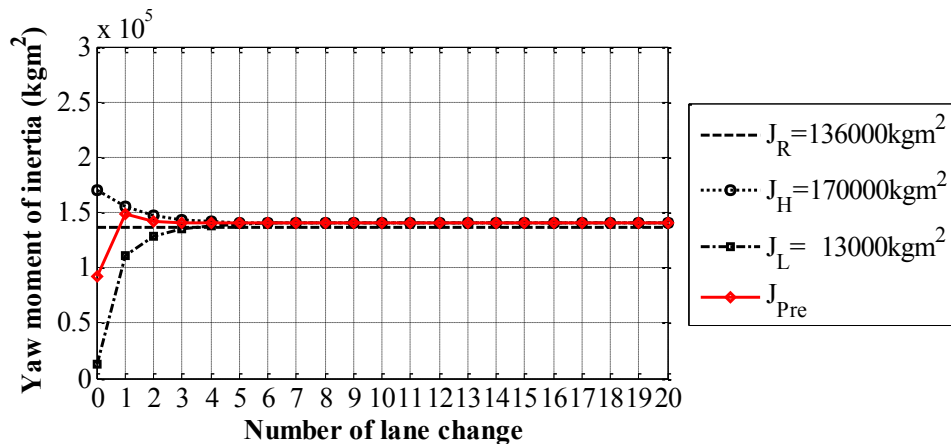


図 5.12 空車状態で 80km/h 時，ヨー慣性モーメント推定の予測結果



図 5.13 は前節の満車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果である図 5.9 で、3.6 節の予測手法を適用して収束性を改善した結果を赤線で示した結果である。図 5.9 の推定結果では 14 回目のレーンチェンジで収束されることに対し、3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。図 5.14 は満車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果である図 5.10 で、3.6 節の予測手法を適用して収束性を改善した結果を赤線で示した結果である。図 5.10 の推定結果では 8 回目のレーンチェンジで収束されることに対し、3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。

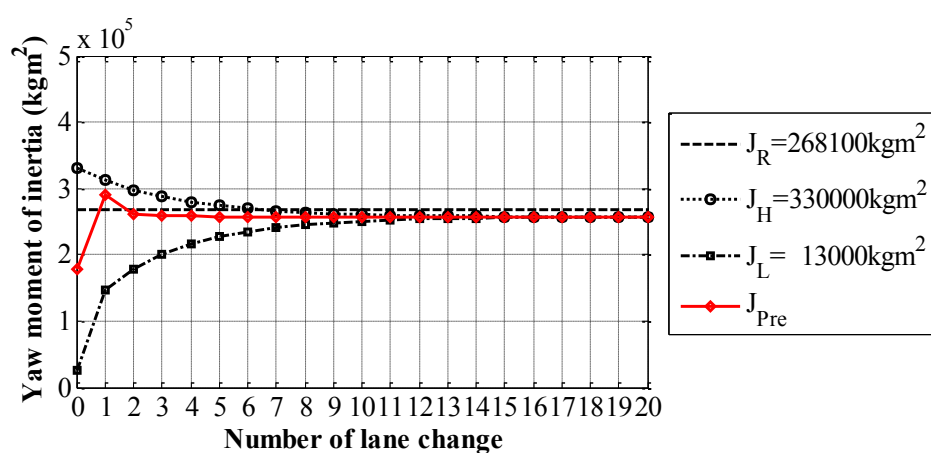


図 5.13 満車状態で 60km/h 時，ヨー慣性モーメント推定の予測結果

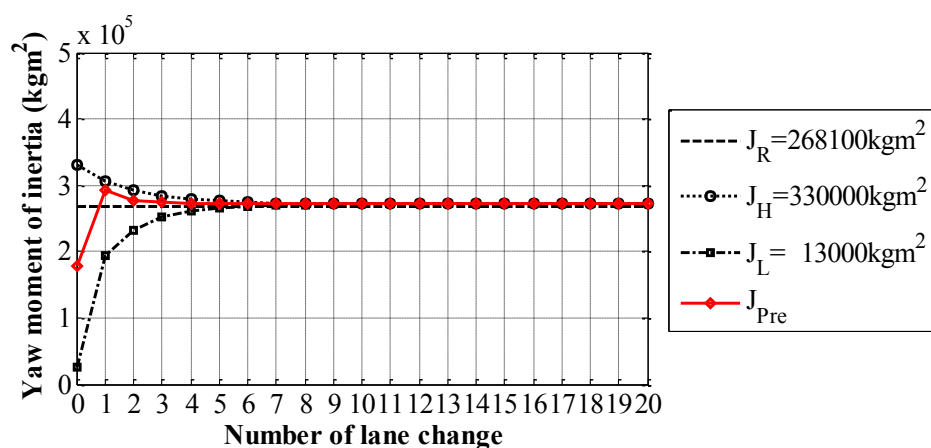


図 5.14 満車状態で 80km/h 時，ヨー慣性モーメント推定の予測結果

## 5.3 コーナリングスティフネスの同定

### 5.3.1 初期設定値

同定案によるコーナリングスティフネスの推定値について検討する。ヨー慣性モーメントの推定の場合、ヨー慣性モーメントは既値で一定であるとする。コーナリングスティフネスの推定値が真値に収束することを検討するため、初期値は対象車両のコーナリングスティフネスの最大値と最小値を設定する。車体質量と重心位置の推定ができる場合のコーナリングスティフネスの最小・最大の設定値は図 5.15 のように Trucksim から提供されたタイヤ特性表を基に設定する。車両が空車状態のコーナリングスティフネスの最小設定値は、空車状態時の各輪の接地荷重より -30% 低い場合に想定時のコーナリングスティフネスを決めることで 147000N/rad にする。コーナリングスティフネスの最大の設定値は、空車状態時の各輪の接地荷重より 30% 高い場合に想定時のコーナリングスティフネスを決めることで 263000N/rad にする。車両が満車状態のコーナリングスティフネスの最小設定値は、満車状態時の各輪の接地荷重より -30% 低い場合に想定時のコーナリングスティフネスを決めることで 265000N/rad にする。コーナリングスティフネスの最大の設定値は、満車状態時の各輪の接地荷重より 30% 高い場合に想定時のコーナリングスティフネスを決めることで 426000N/rad にする。

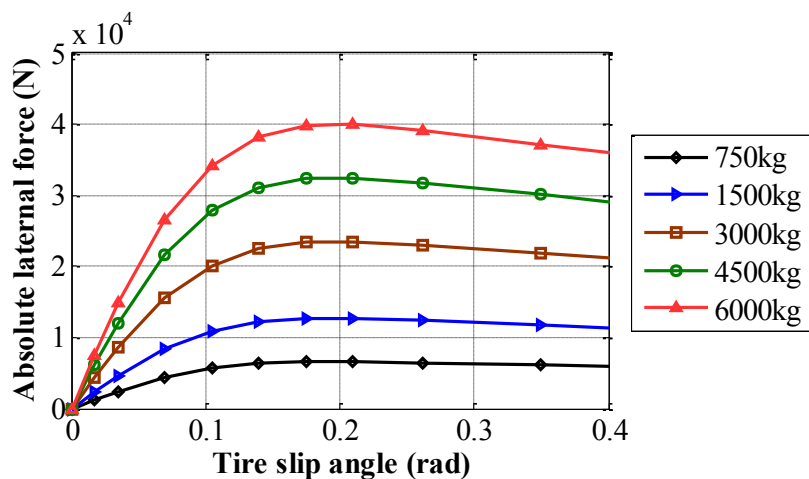


図 5.15 タイヤ特性

### 5.3.2 コーナリングスティフネスの推定結果

図 5.16 は空車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果で、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 207450N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に-0.7%の誤差があることを確認した。図 5.17 は空車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果で、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 189940N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に-9.1%の誤差があることを確認した。

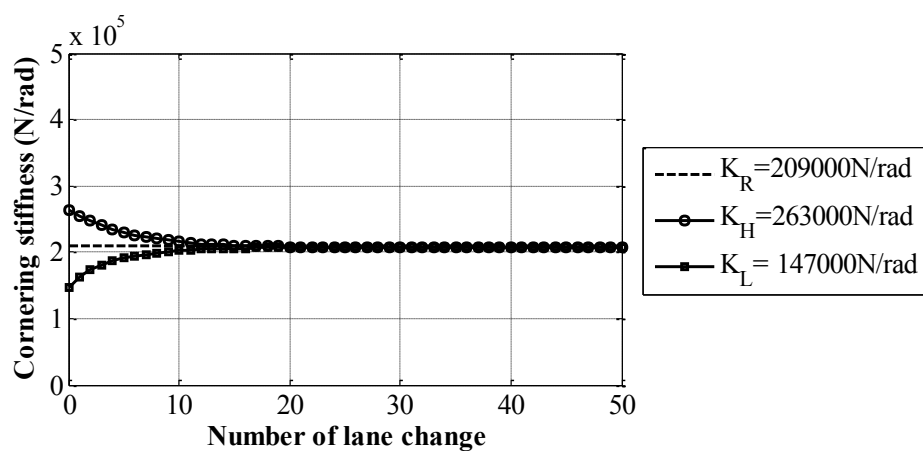


図 5.16 空車状態で 60km/h 時，コーナリングスティフネス推定結果

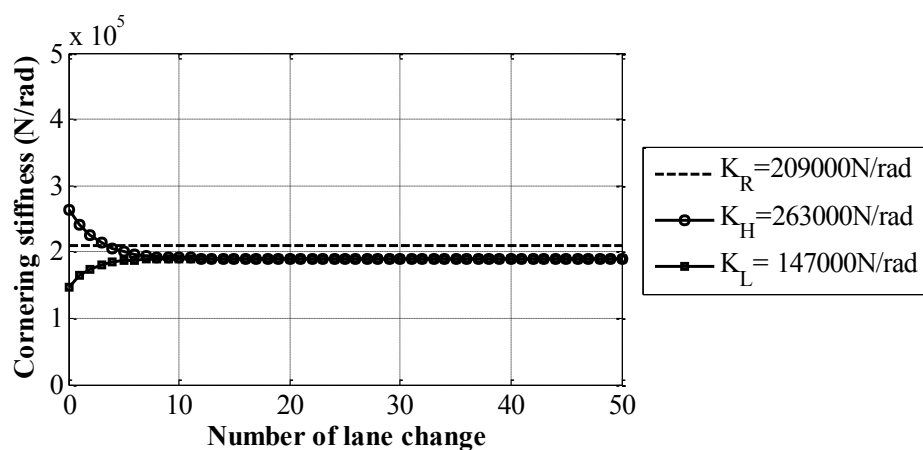


図 5.17 空車状態で 80km/h 時，コーナリングスティフネス推定結果

図 5.18 は満車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果で、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 381360N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に 8.3%の誤差があることを確認した。図 5.19 は満車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果で、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 349910N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に-0.6%の誤差があることを確認した。

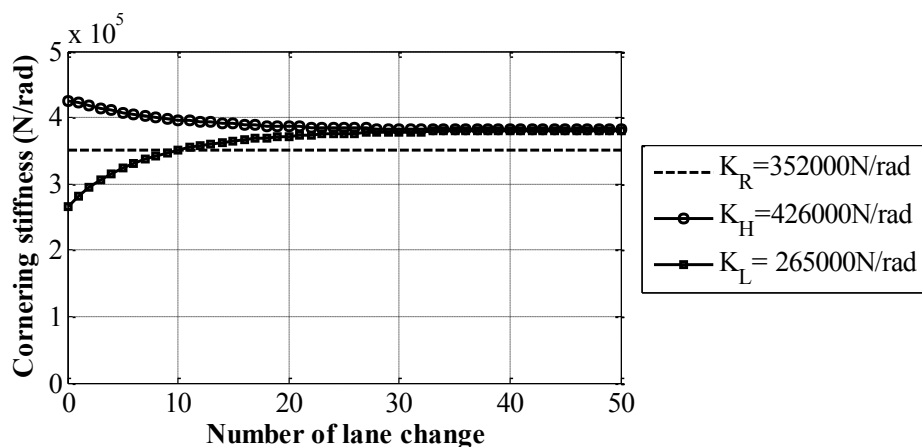


図 5.18 満車状態で 60km/h 時，コーナリングスティフネス推定結果

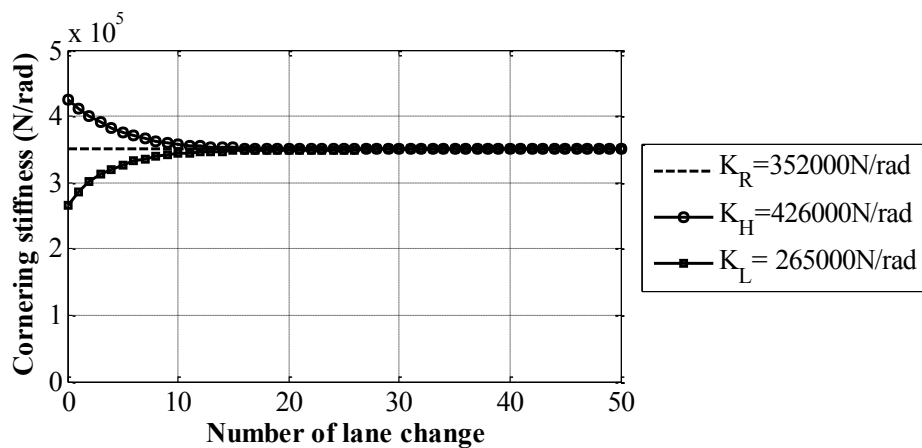


図 5.19 満車状態で 80km/h 時，コーナリングスティフネス推定結果

### 5.3.3 コーナリングスティフネス推定値の予測

図 5.20 は前節の空車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果である図 5.16 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.16 のように収束の予測案を適用しなかった場合には 8 回目のレーンチェンジで収束されることに對し、予測値は 3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。図 5.21 は空車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果である図 5.17 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.17 のように収束の予測案を適用しなかった場合には 5 回目のレーンチェンジで収束されることに對し、3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる。

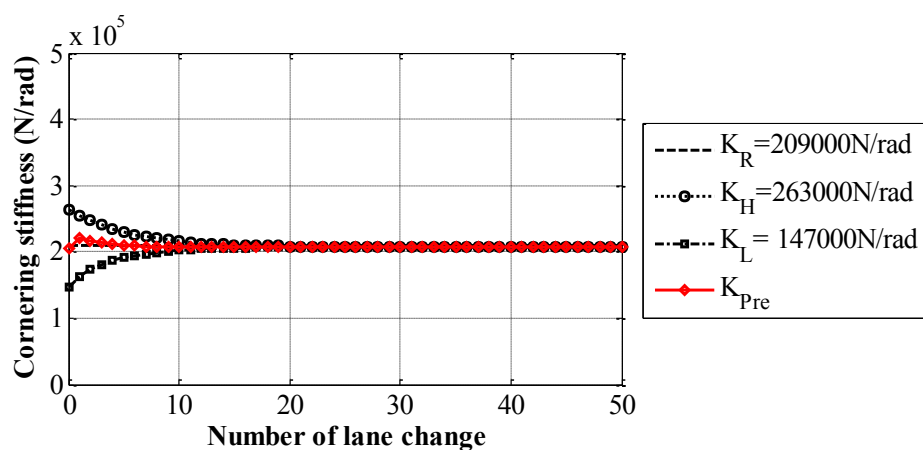


図 5.20 空車状態で 60km/h 時，コーナリングスティフネス推定の予測結果

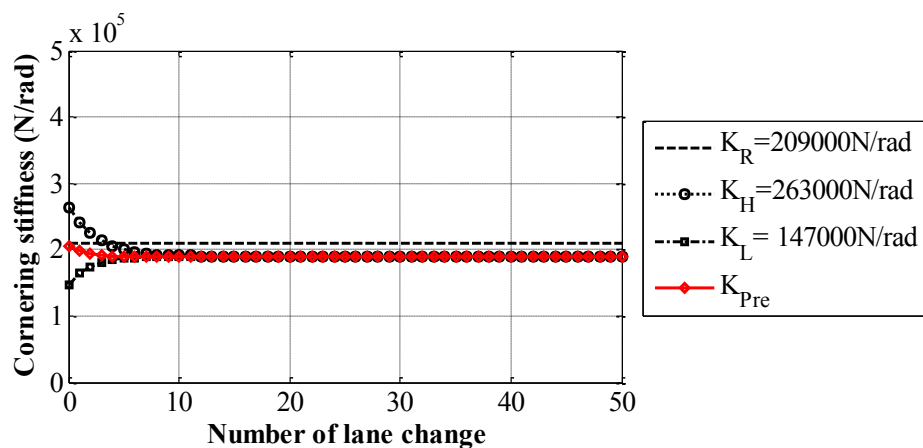


図 5.21 空車状態で 80km/h 時，コーナリングスティフネス推定の予測結果

図 5.22 は満車状態で車速が 60km/h 場合の推定結果である図 5.18 で，3.6 節の予測手法を適用して収束性を改善した結果を赤線で示した結果である．図 5.18 の推定結果では 14 回目のレーンチェンジで収束されることに対し，3.6 節の予測手法を適用すると 3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる．図 5.23 は満車状態で車速が 80km/h 場合の推定結果である図 5.19 で，3.6 節の予測手法を適用して収束性を改善した結果を赤線で示した結果である．図 5.19 の推定結果では 8 回目のレーンチェンジで収束されることに対し，3 回目のレーンチェンジで収束値が得られる．

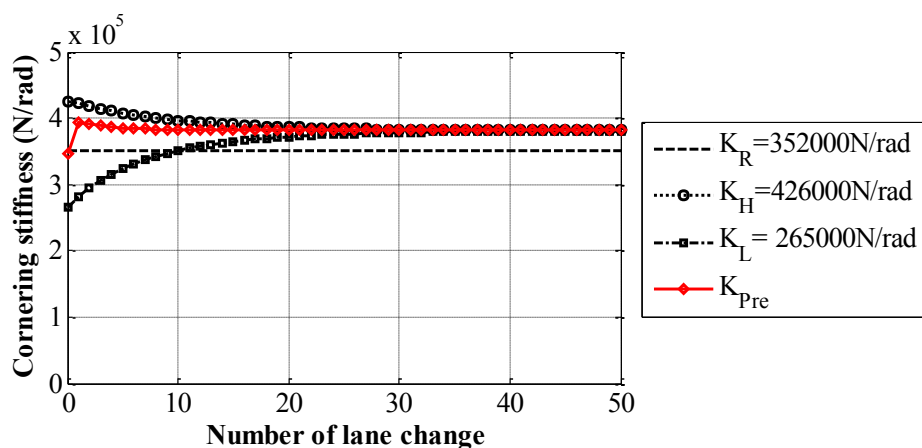


図 5.22 満車状態で 60km/h 時，コーナリングスティフネス推定の予測結果

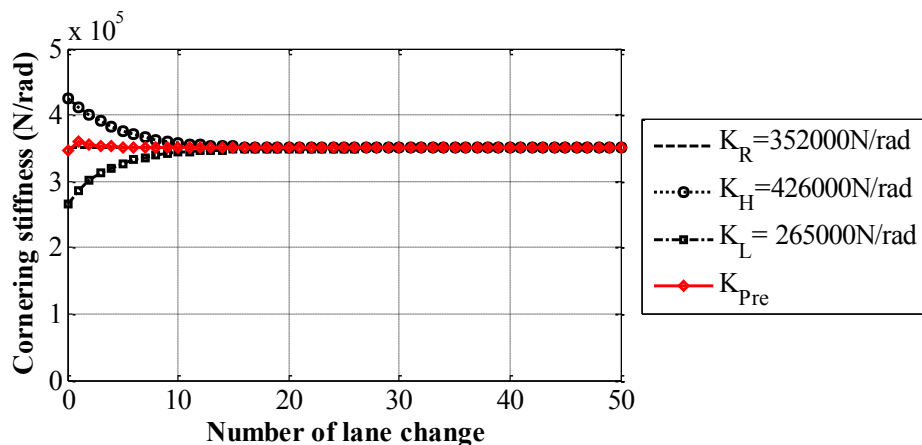


図 5.23 満車状態で 80km/h 時，コーナリングスティフネス推定の予測結果

## 5.4 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時同定

### 5.4.1 初期値の設定

同定案によるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定について検討する。このヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の場合、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスは未知であるとする。ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの推定値が真値に収束することを検討するため、ヨー慣性モーメントの初期値とコーナリングスティフネスの設定値は次のように設定する。車両が空車状態の場合、ヨー慣性モーメント真値( $J_R=136000\text{kgm}^2$ )に対し、ヨー慣性モーメントの最小設定値( $J_L=90000\text{kgm}^2$ )と最大設定値( $J_H=170000\text{kgm}^2$ )の初期値を設定する。コーナリングスティフネス真値( $K_R=209000\text{N/rad}$ )に対し、コーナリングスティフネスの最小設定値( $K_L=76000\text{N/rad}$ )と最大設定値( $K_H=263000\text{N/rad}$ )の初期値を設定した。車両が満車状態の場合、ヨー慣性モーメント真値( $J_R=268100\text{kgm}^2$ )に対し、ヨー慣性モーメントの最小設定値( $J_L=110000\text{kgm}^2$ )と最大設定値( $J_H=330000\text{kgm}^2$ )の初期値を設定する。コーナリングスティフネス真値( $K_R=209000\text{N/rad}$ )に対し、コーナリングスティフネスの最小設定値( $K_L=76000\text{N/rad}$ )と最大設定値( $K_H=436000\text{N/rad}$ )の初期値を設定した。

#### 5.4.2 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果

図 5.24 と図 5.25 は空車状態で車速が 60km/h 場合，ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す．図 5.24 のヨー慣性モーメント推定値は，真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と，真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が  $128170\text{kgm}^2$  に収束され，収束された推定値と真値  $J_R$  の間に-6.5%の誤差があることを確認した．図 5.25 のコーナリングスティフネス推定値は，真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と，真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が  $139820\text{N/rad}$  に収束され，収束された推定値と真値  $K_R$  の間に 2%の誤差があることを確認し，同提案による同時推定結果が求められることが分かる．

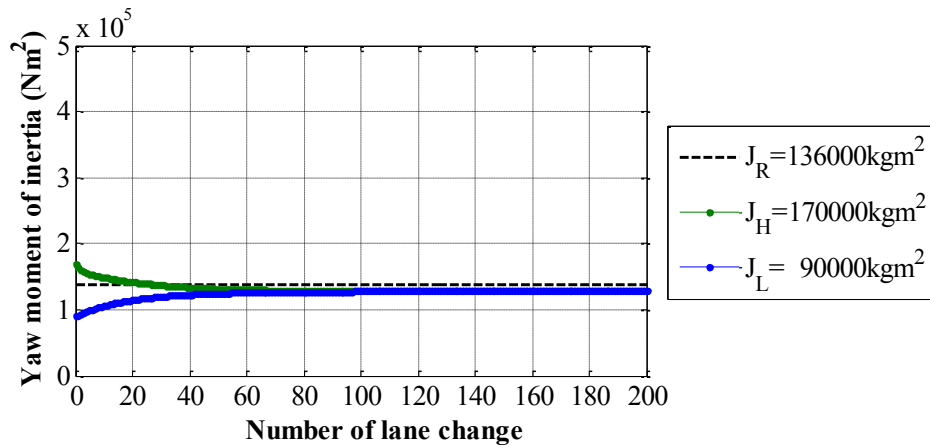


図 5.24 空車状態で 60km/h 時，同時推定によるヨー慣性モーメント推定結果

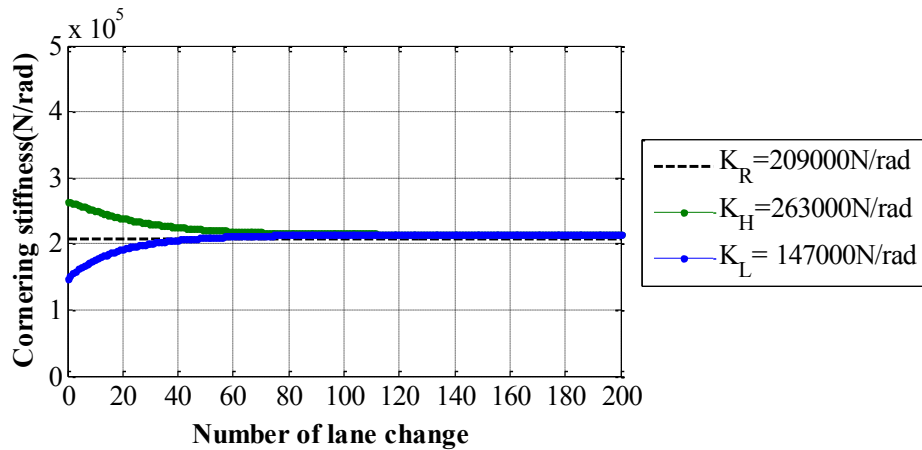


図 5.25 空車状態で 60km/h 時，同時推定によるコーナリングスティフネス推定結果



図 5.26 と図 5.27 は空車状態で車速が 80km/h 場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果である。図 5.26 のヨー慣性モーメント推定値は、真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が 139820kgm<sup>2</sup> に収束され、収束された推定値と真値  $J_R$  の間に 2%の誤差があることを確認した。図 5.27 のコーナリングスティフネス推定値は、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 208670N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に 0.3%の誤差があることを確認し、同提案による同時推定結果が求められることが分かる。

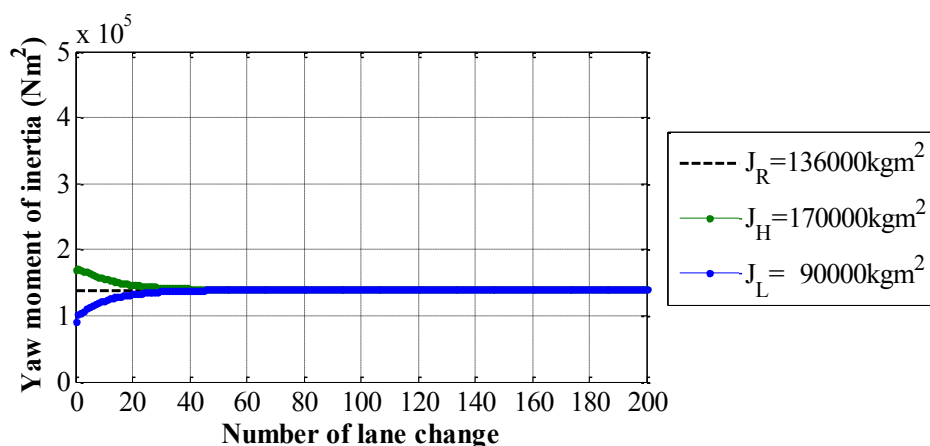


図 5.26 空車状態で 80km/h 時、同時推定によるヨー慣性モーメント推定結果

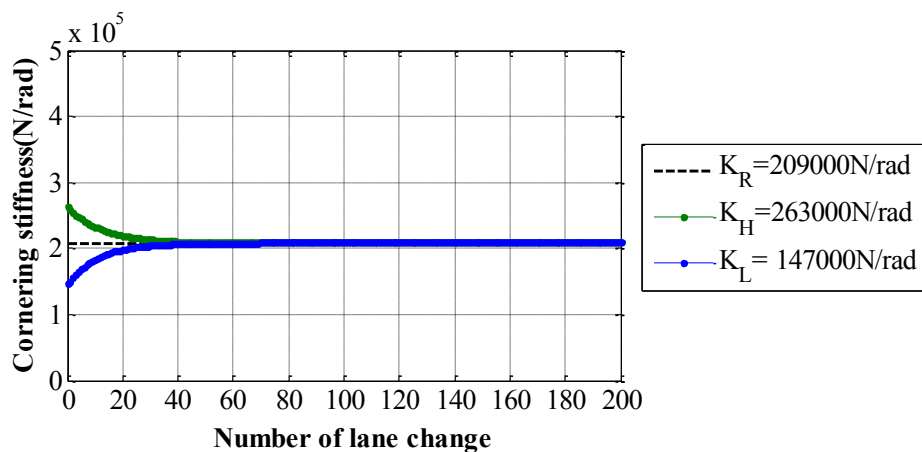


図 5.27 空車状態で 80km/h 時、同時推定によるコーナリングスティフネス推定結果

図 5.28 と図 5.29 は満車状態で車速が 60km/h 場合のヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスの同時推定結果である。図 5.28 のヨー慣性モーメント推定値は、真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が  $273560\text{kgm}^2$  に収束され、収束された推定値と真値  $J_R$  の間に 1.6% の誤差があることを確認した。図 5.29 のコーナリングステイフネス推定値は、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が  $373060\text{N/rad}$  に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に 6% の誤差があることを確認した。前の空車時の推定結果より大きい誤差が出る理由は同定手法に使用される運動方程式はロール運動を考慮しないことで満車時が空車時より大きい横力が必要であり、コーナリングステイフネス推定値が大きくなると考えられる。

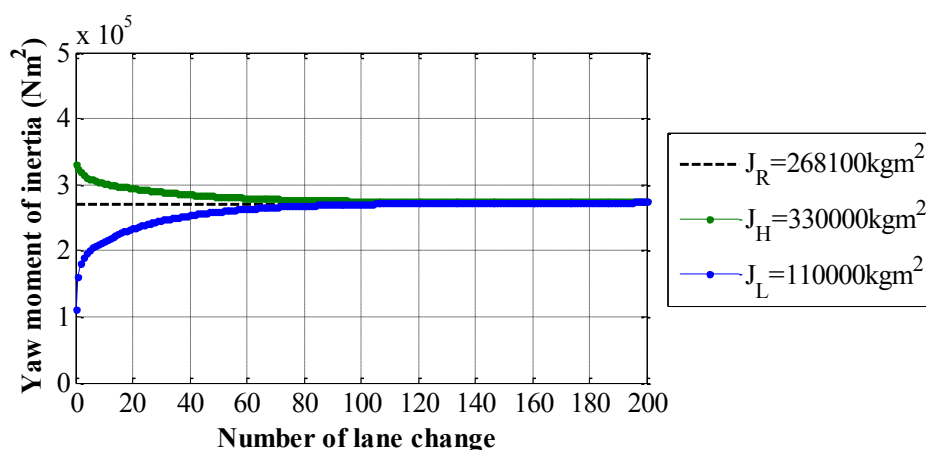


図 5.28 満車状態で 60km/h 時、同時推定によるヨー慣性モーメント推定結果

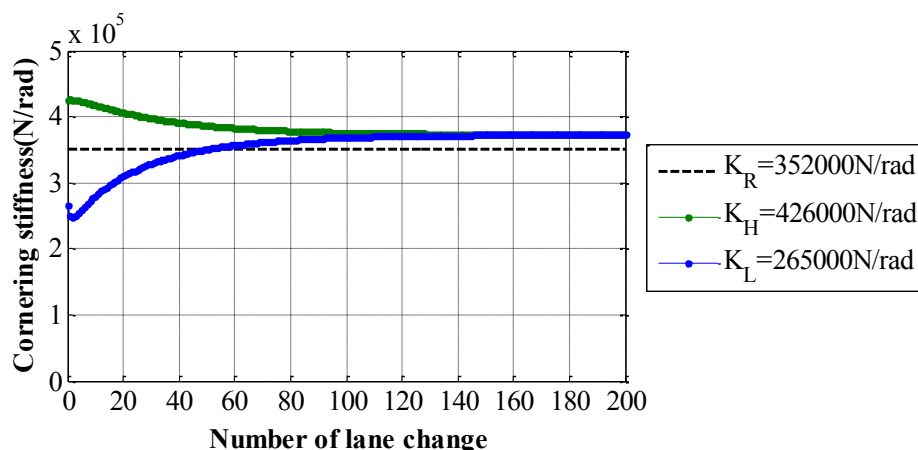


図 5.29 満車状態で 60km/h 時、同時推定によるコーナリングステイフネス推定結果

図 5.30 と図 5.31 は満車状態で車速が 80km/h 場合のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定結果を示す。図 5.30 のヨー慣性モーメント推定値は、真値より低い初期値  $J_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $J_H$  からの推定値が 290830kgm<sup>2</sup> に収束され、収束された推定値と真値  $J_R$  の間に 8%の誤差があることを確認した。前の 60km/h 時の推定結果より大きい誤差が出る理由は、実際は非線形のコーナリングスティフネスであることに對し、同定手法に使われるコーナリングスティフネスは線形であるので、同一実舵角でも線形の方が大きい横力を発生すると考えられる。高速でレーンチェンジを行うと 60km/h 時より大きい実舵角になるので、大きい横力に對し車両運動を行うためにはヨー慣性モーメントが大きくなると考えられる。図 5.31 のコーナリングスティフネス推定値は、真値より低い初期値  $K_L$  からの推定値と、真値より高い初期値  $K_H$  からの推定値が 360160N/rad に収束され、収束された推定値と真値  $K_R$  の間に 2.3%の誤差があることを確認した。

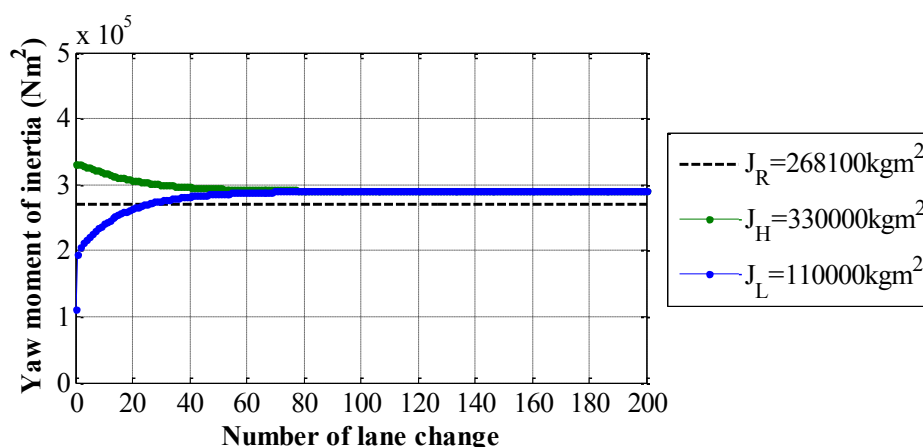


図 5.30 満車状態で 80km/h 時、同時推定によるヨー慣性モーメント推定結果

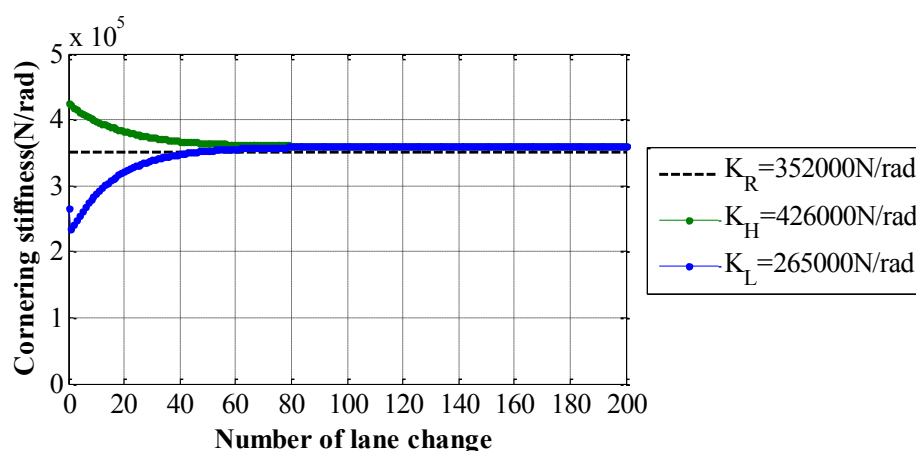


図 5.31 満車状態で 80km/h 時、同時推定によるコーナリングスティフネス推定結果

### 5.4.3 ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の予測

図 5.32 と図 5.33 は空車状態で 60km/h 時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の予測値を求めた結果を示す。図 5.32 は前節の空車状態で車速が 60km/h 時のヨー慣性モーメント推定結果である図 5.24 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.33 は空車状態で車速が 60km/h 時のコーナリングスティフネス推定結果である図 5.25 で、予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。ある時刻の予測値が推定値の最大値・最小値を超える場合は、推定値の最大値・最小値になるように設定した。この予測手法を利用すると、少ない回数で推定値が求められることが分かる。

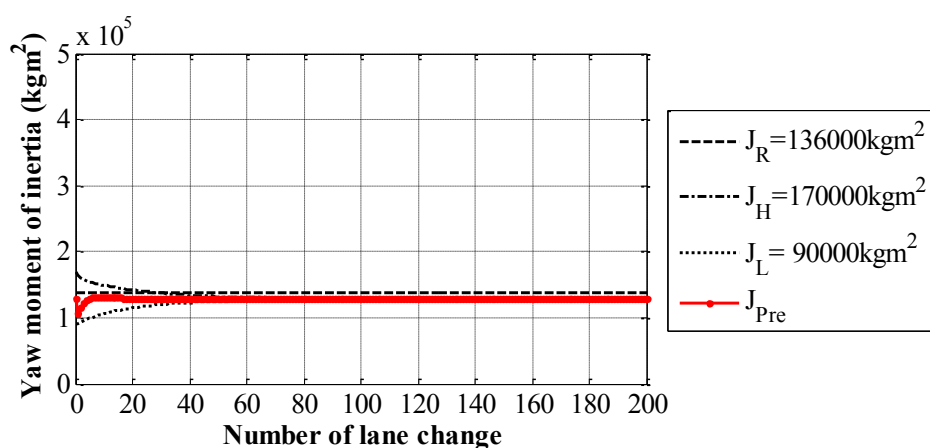


図 5.32 空車状態で 60km/h 時、同時推定によるヨー慣性モーメント推定の予測結果

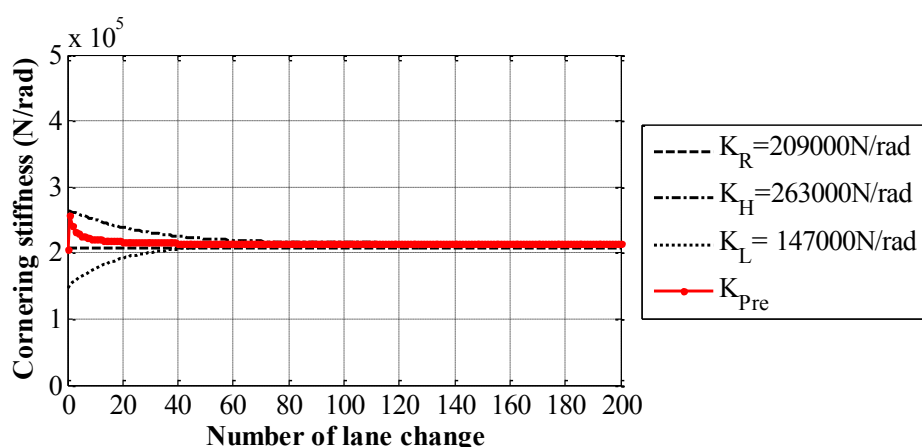


図 5.33 空車状態で 60km/h 時、同時推定によるコーナリングスティフネス推定の予測結果

図 5.34 と図 5.35 は空車状態で 80km/h 時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の予測値を求めた結果を示す。図 5.34 は空車状態で車速が 80km/h 時のヨー慣性モーメント推定結果である図 5.26 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.35 は空車状態で車速が 80km/h 時のコーナリングスティフネス推定結果である図 5.27 で、予測手法を利用すると少ない回数で推定値が求められることが分かる。

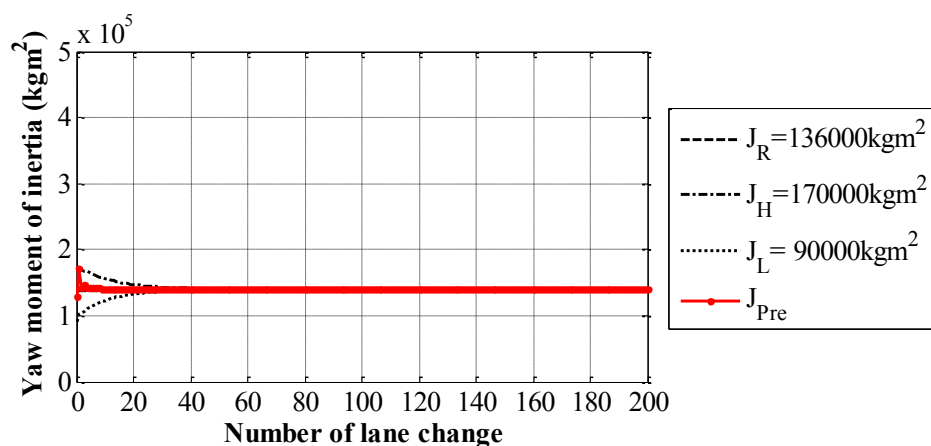


図 5.34 空車状態で 80km/h 時，同時推定によるヨー慣性モーメント推定の予測結果

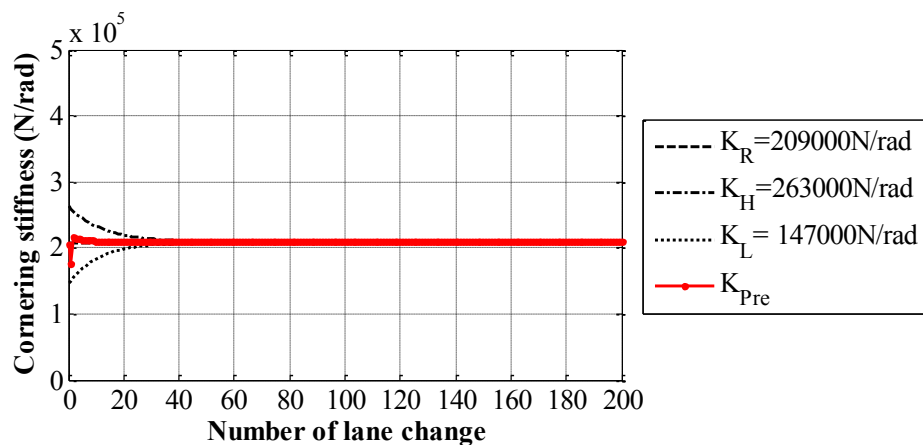


図 5.35 空車状態で 80km/h 時，同時推定によるコーナリングスティフネス推定の予測結果

図 5.36 と図 5.37 は満車状態で 60km/h 時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の予測値を求めた結果を示す。図 5.36 は満車状態で車速が 60km/h 時のヨー慣性モーメント推定結果である図 5.28 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.37 は満車状態で車速が 60km/h 時のコーナリングスティフネス推定結果である図 5.29 で、予測手法を利用すると少ない回数で推定値が求められることが分かる。

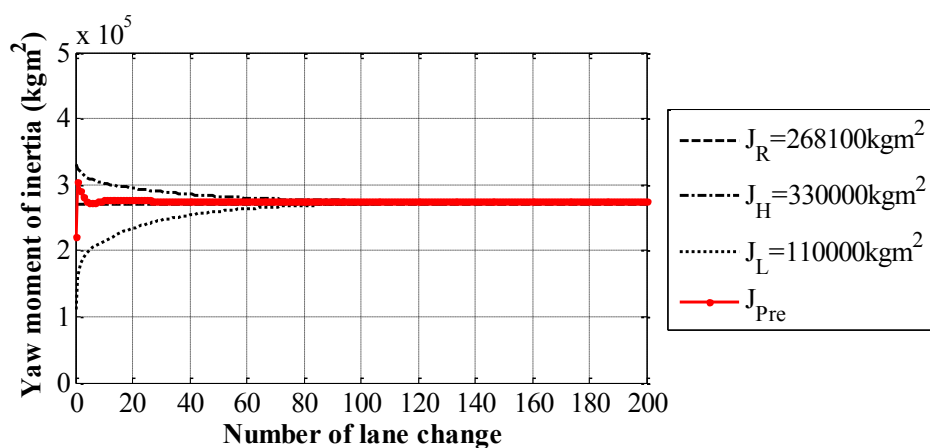


図 5.36 満車状態で 60km/h 時，同時推定によるヨー慣性モーメント推定の予測結果

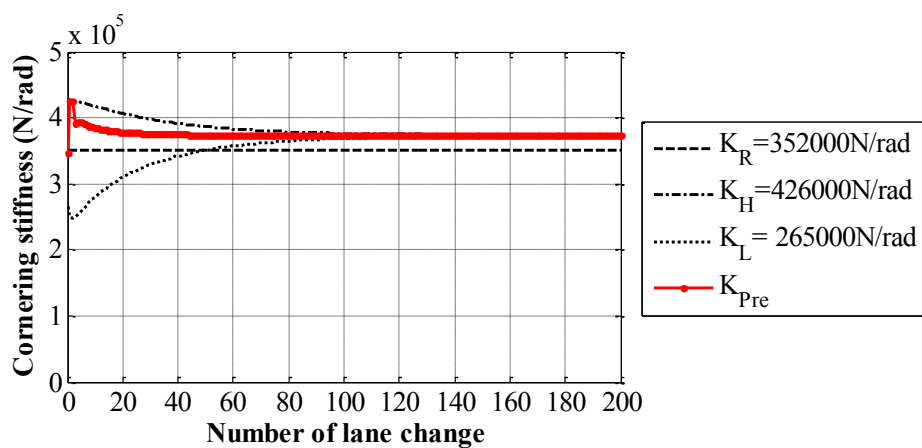


図 5.37 満車状態で 60km/h 時，同時推定によるコーナリングスティフネス推定の予測結果

図 5.38 と図 5.39 は満車状態で 80km/h 時のヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の予測値を求めた結果を示す。図 5.38 は満車状態で車速が 80km/h 時のヨー慣性モーメント推定結果である図 5.30 で、3.6 節の予測手法を適用し求めた予測値の結果を赤線で示した結果である。図 5.39 は満車状態で車速が 80km/h 時のコーナリングスティフネス推定結果である図 5.31 で、予測手法を利用すると少ない回数で推定値が求められることが分かる。

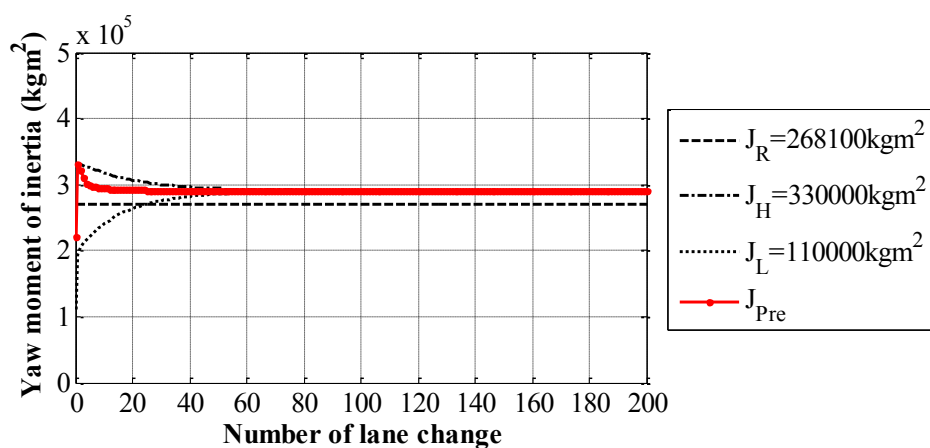


図 5.38 満車状態で 80km/h 時，同時推定によるヨー慣性モーメント推定の予測結果

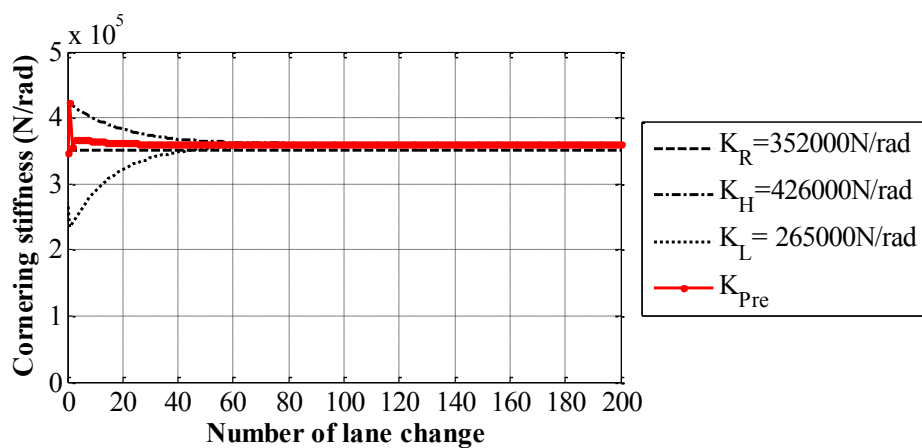


図 5.39 満車状態で 80km/h 時，同時推定によるコーナリングスティフネス推定の予測結果

## 第 6 章

### 自動隊列走行における本手法の有効性検討



## 6 自動隊列走行における本手法の有効性検討

### 6.1 自動隊列走行において有効性を検討する必要性

短い車間距離で自動追従走行を実現する隊列走行制御は ITS 分野で運輸用トラックの物流効率向上や燃費向上等の効果が期待される車両制御である。制御器はモデルをベースにして設計されているため、積み荷の状態によって、質量、慣性モーメント等が大きく変化する輸送用トラックの場合は、制御開始前に、許容される誤差範囲内の精度でモデルのパラメータ値を知っておく必要がある。その推定手法について、前章まで議論を行い、 $\pm 10\%$ 以内の誤差で推定できることを示した。本章では、その誤差の存在が自動運転走行に与える影響を、隊列走行制御の制御器を使ったトラックの隊列走行制御の数値シミュレーションを通じて調べ、本提案手法の実システムにおける有効性を検討する。

### 6.2 シナリオ

推定値の誤差の妥当性を検討するため、自動隊列走行中の車両が図 6.1 のように平地のオーバルコースで走行中の車両ダイナミクスの変化を調べた。シナリオは自動隊列走行中の 2 台のトラックが直進区間で車間距離 10m を維持しながら加速し時速 60km/h になると等速走行ものとする。直進区間からコーナリング区間に進入する前に時速 50km/h に減速後、等速でコーナリング走行し、コーナリング区間から直進区間に進入後は 50km/h に等速走行することである。

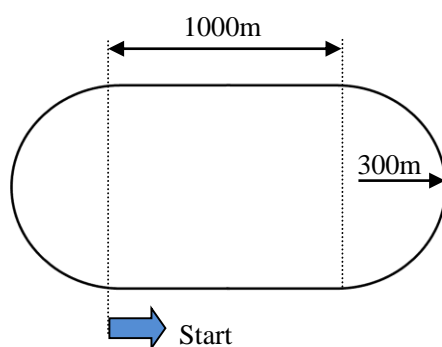


図 6.1 オーバルコース走行のシナリオ

図 6.2 は自動隊列走行中の 2 台のトラックの車速の数値解析結果を示す. 走行シナリオの通り 2 台のトラックがほぼ同じ車速で走行することが分かる.

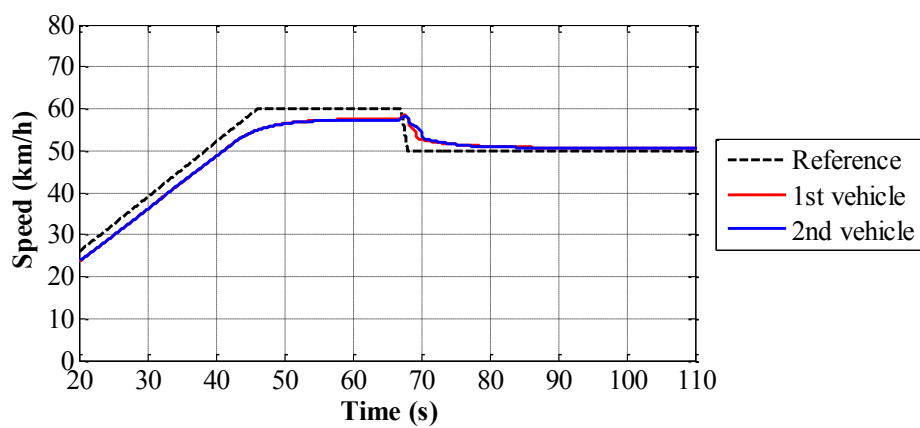


図 6.2 自動隊列走行車両の車速

### 6.3 パラメータ推定値の誤差による車間距離の検討

図 6.3 はヨー慣性モーメントの真値より $\pm 10\%$ 誤差が有る場合、車間距離変化の数値解析結果を示す。この結果では 2 台のトラックが出発から 10m の車間距離を維持しながら走行中に、60 秒から 80 秒の間のコーナリング区間に進入する前に減速による車間距離が変化するが、その後車間距離 10m を維持し走行することが分かる。ヨー慣性モーメントの $\pm 10\%$ 誤差に対し、ヨー慣性モーメントの真値の場合とほぼ一致することが分かる。図 6.4 はコーナリングスティフネスの真値より $\pm 10\%$ 誤差が有る場合、車間距離の変化の数値解析結果を示す。コーナリングスティフネスの $\pm 10\%$ 誤差に対し、コーナリングスティフネスの真値の場合とほぼ一致することが分かる。

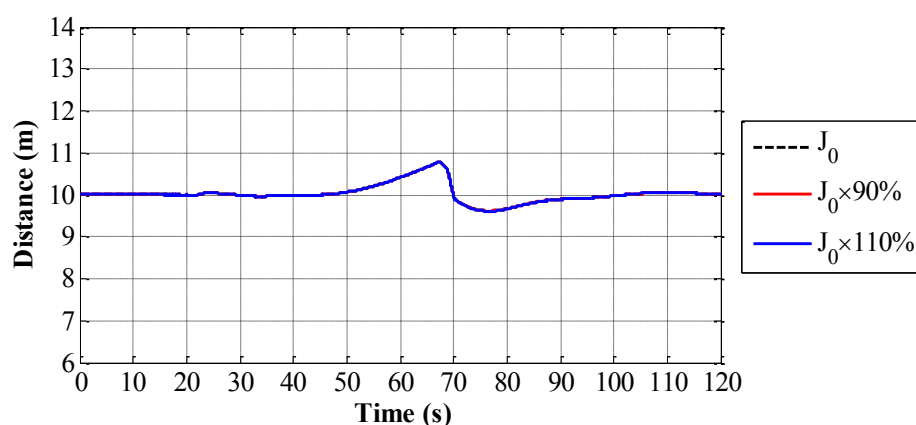


図 6.3 ヨー慣性モーメントの誤差が $\pm 10\%$ の場合の車間距離の比較

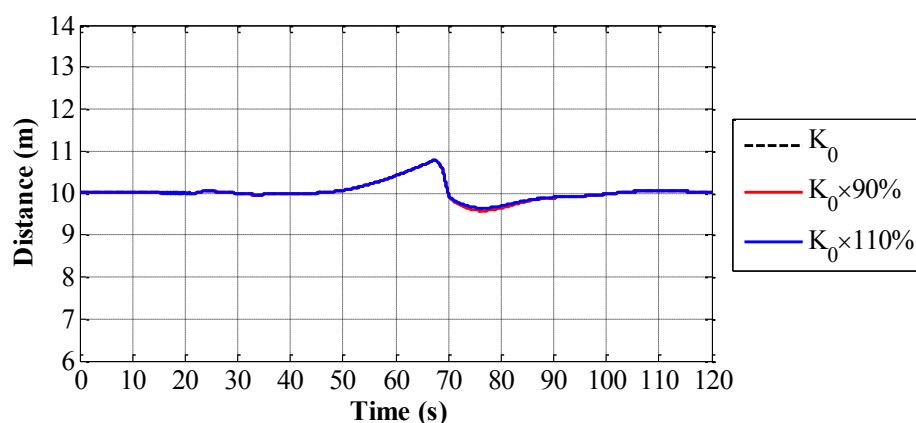


図 6.4 コーナリングスティフネスの誤差が $\pm 10\%$ の場合の車間距離の比較

図 6.5 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より小さい場合、車間距離変化の数値解析結果を示す。ヨー慣性モーメントの真値より徐々に小さくなっていても自動隊列走行中の車間距離はほぼ一致することが分かる。図 6.6 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より大きい場合、車間距離変化の数値解析結果を示す。ヨー慣性モーメントの真値より徐々に大きくなると自動隊列走行中の車間距離の変化が大きくなることが分かる。真値より 800%以上大きくなると自動隊列走行中の車間距離が維持できなくなることが分かる。ヨー慣性モーメント推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し、許容誤差範囲内であることが分かる。

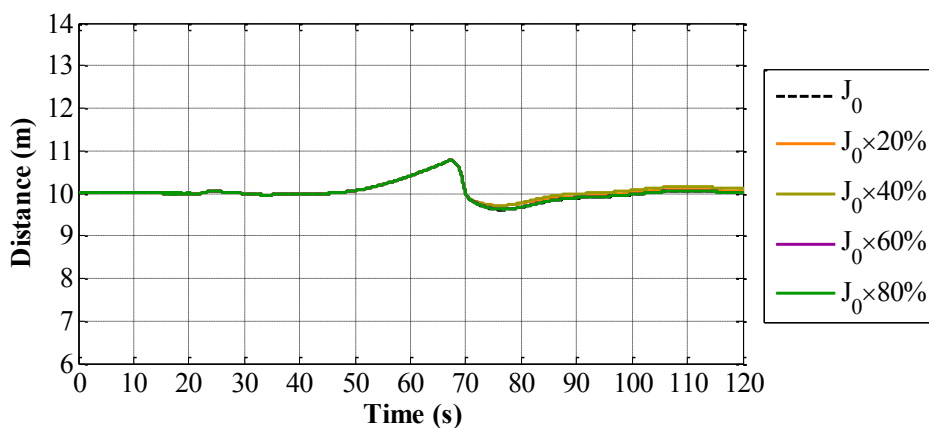


図 6.5 ヨー慣性モーメント真値より小さい場合の車間距離の比較

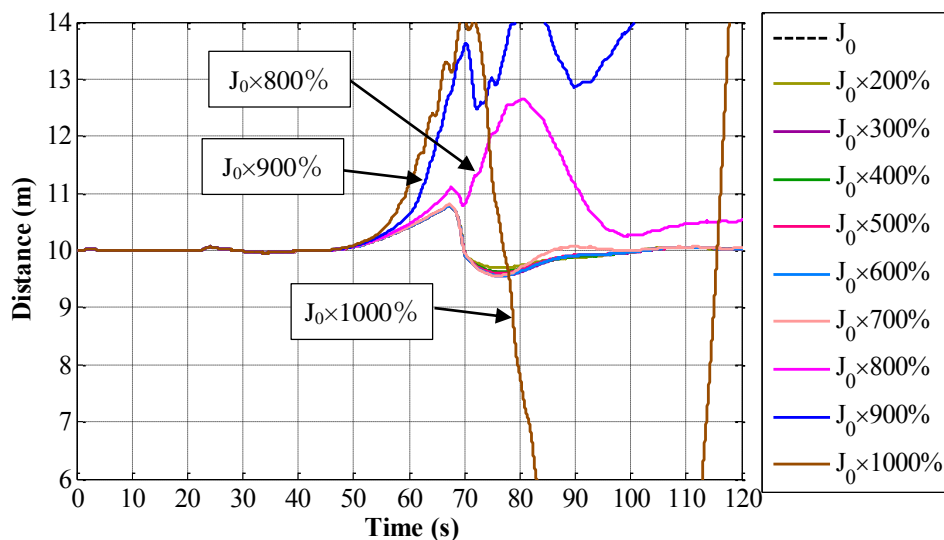


図 6.6 ヨー慣性モーメント真値より大きい場合の車間距離の比較

図 6.7 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より小さい場合、車間距離変化の数値解析結果を示す。コーナリングスティフネスの真値より徐々に小さくなると自動隊列走行中の車間距離の変化が大きくなることが分かる。真値より 10%以下になると自動隊列走行中の車間距離が維持できなくなることが分かる。図 6.8 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より大きい場合、車間距離変化の数値解析結果を示す。コーナリングスティフネスの真値より徐々に大きくなっても自動隊列走行中の車間距離はほぼ一致することが分かる。この検討より、コーナリングスティフネス推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し、許容誤差範囲内であることが分かる。

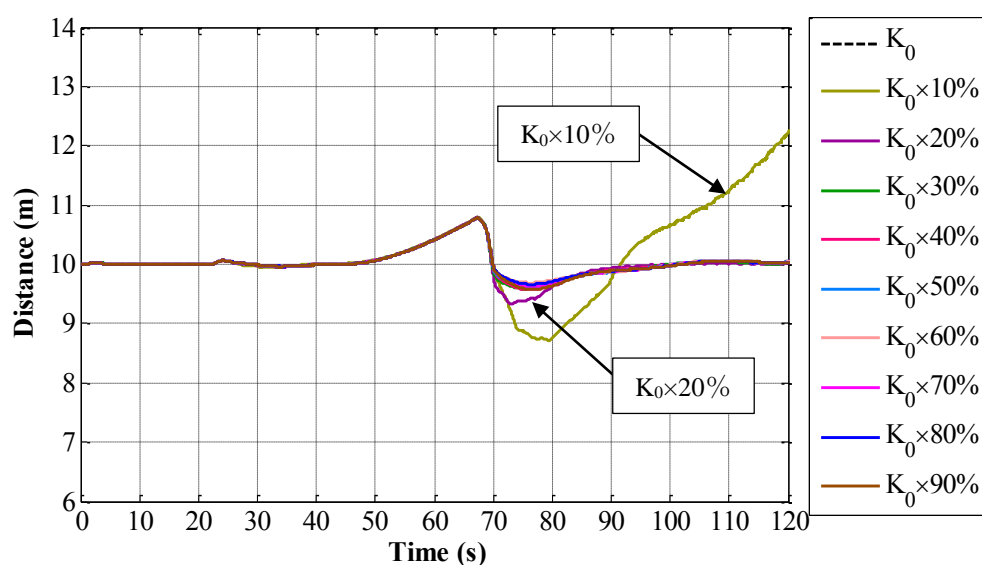


図 6.7 コーナリングスティフネス真値より小さい場合の車間距離の比較

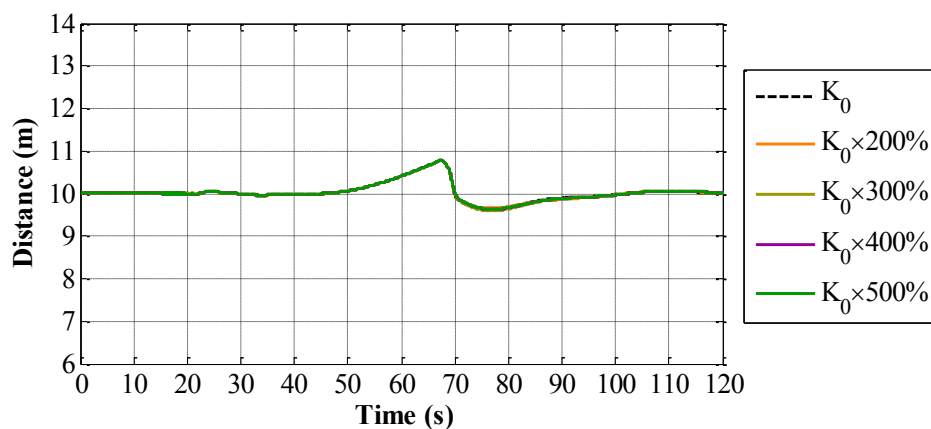


図 6.8 コーナリングスティフネス真値より大きい場合の車間距離の比較

#### 6.4 パラメータ推定値の誤差による横方向の偏差の検討

図 6.9 は自動隊列走行中の 1 台目のトラックがコーナリング区間の操舵走行時、ヨー慣性モーメントの $\pm 10\%$ 誤差による目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差に対する数値解析結果を示す。この結果ではヨー慣性モーメントの $\pm 10\%$ 誤差による車両状態量の差はあまりなく、ヨー慣性モーメントの真値の場合とほぼ一致することが分かる。図 6.10 は自動隊列走行制御中の 2 台目のヨー慣性モーメントの $\pm 10\%$ 誤差による目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差に対する数値解析結果を示す。図 6.9 の 1 台目のトラックの数値解析結果と同様に目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差はヨー慣性モーメントの真値の場合とほぼ一致することが分かる。

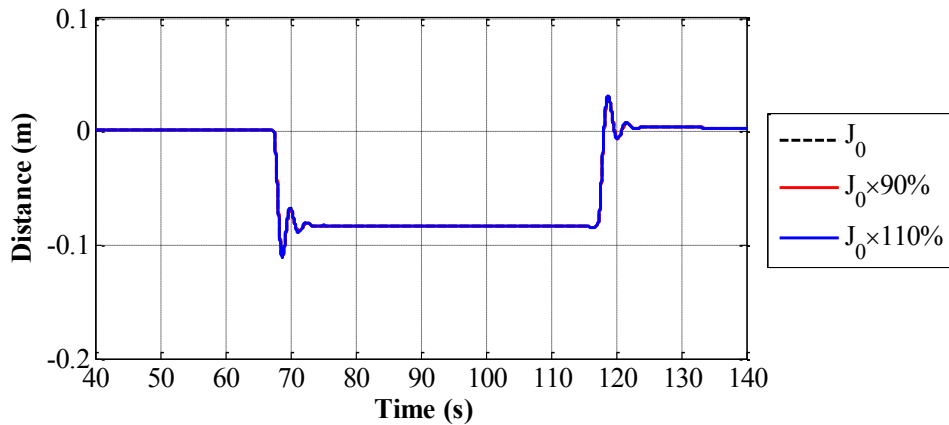


図 6.9 ヨー慣性モーメントの誤差による 1 台目の自動隊列走行車両の目標軌跡と車両重心位置の間の横方向偏差の比較

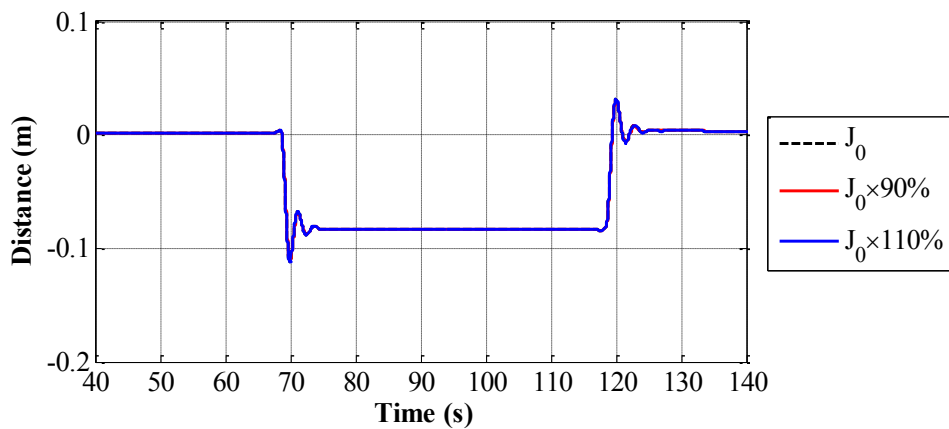


図 6.10 ヨー慣性モーメントの誤差による 2 台目の自動隊列走行車両の目標軌跡と車両重心位置の間の横方向偏差の比較

図 6.11 は自動隊列走行中の 1 台目のトラックがコーナリング区間の操舵走行時、コーナリングスティフネスの $\pm 10\%$ 誤差による目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差に対する数値解析結果を示す。この結果ではコーナリングスティフネスの $\pm 10\%$ 誤差によって横方向の偏差が発生するが、コーナリング区間の目標軌跡を従って安定に走行することがわかる。コーナリングスティフネスの誤差による横方向の偏差が異なることは、同じ実操舵角で発生する横力が異なるため、コーナリングスティフネス値が高くなると、コーナリングの真値の場合よりコーナリング区間の内側を走行することを示す。図 6.12 は自動隊列走行制御中の 2 台目のトラックのコーナリングスティフネスの $\pm 10\%$ 誤差による目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差に対する数値解析結果を示す。図 6.11 の 1 台目のトラックの数値解析結果と同様に目標軌跡と車両の車両重心位置の間の横方向の偏差はコーナリングスティフネスの真値の場合とほぼ一致することが分かる。

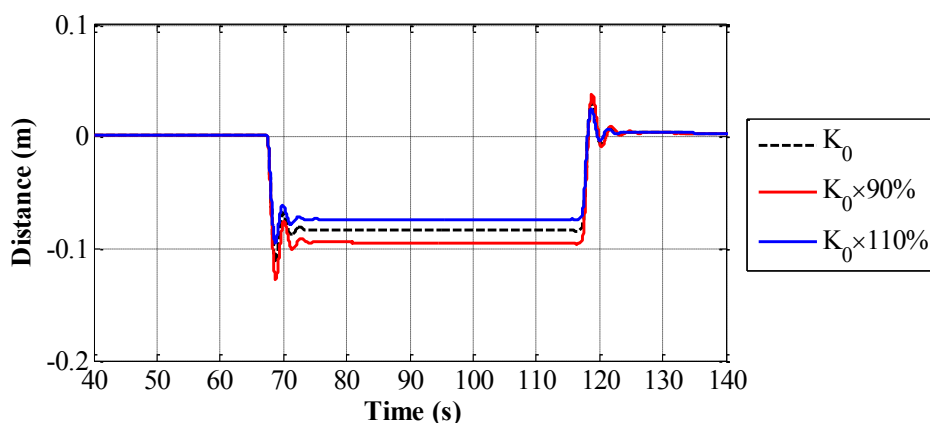


図 6.11 コーナリングスティフネスの誤差による 1 台目の自動隊列走行車両の目標軌跡と車両重心位置の間の横方向偏差の比較

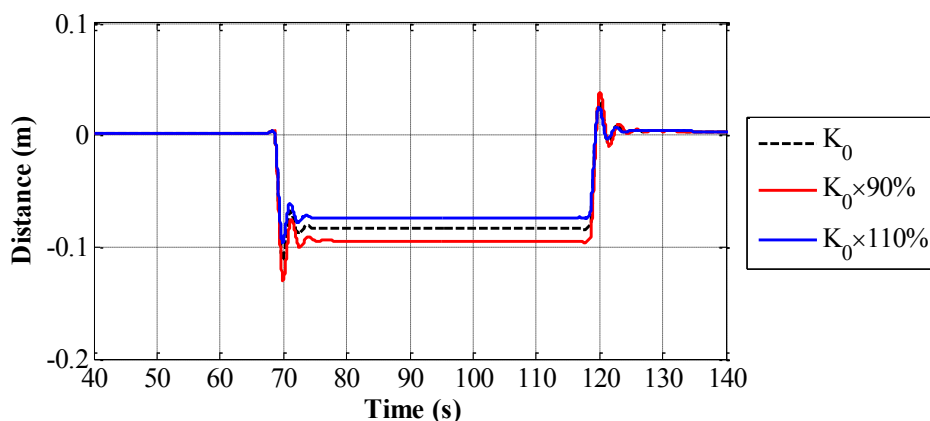


図 6.12 コーナリングスティフネスの誤差による 2 台目の自動隊列走行車両の目標軌跡と車両重心位置の間の横方向偏差の比較

図 6.13 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より小さい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差の数値解析結果を示す。コーナリングスティフネスの真値より徐々に小さくなると自動隊列走行中の横偏差の変化が大きくなることが分かる。真値より 20%以下になると自動隊列走行中の横偏差が不安定になることが分かる。図 6.14 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より大きい場合、横偏差の数値解析結果を示す。コーナリングスティフネスの真値より徐々に大きくなっても自動隊列走行中の横偏差は 0 に近づくことが分かる。コーナリングスティフネス推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し、許容誤差範囲内であることが分かる。

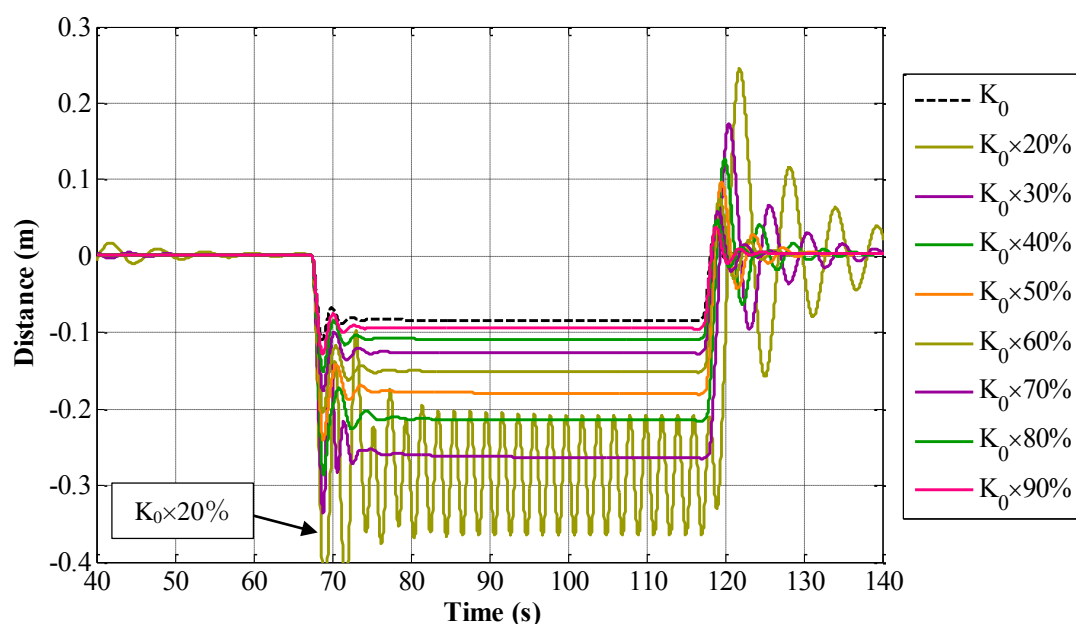


図 6.13 コーナリングスティフネス真値より小さい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

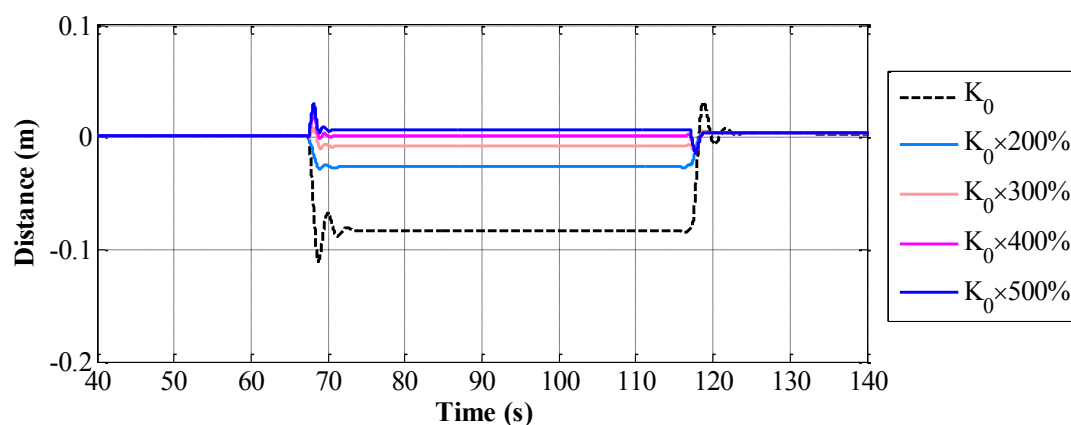


図 6.14 コーナリングスティフネス真値より大きい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較



図 6.15 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より小さい場合，2 台目の自動隊列走行車両の横偏差の数値解析結果を示す．コーナリングスティフネスの真値より徐々に小さくなると自動隊列走行中の横偏差の変化が大きくなることが分かる．真値より 20%以下になると自動隊列走行中の横偏差が不安定になることが分かる．図 6.16 はコーナリングスティフネスの推定値が真値より大きい場合，横偏差の数値解析結果を示す．コーナリングスティフネスの真値より徐々に大きくなっても自動隊列走行中の横偏差は 0 に近づくことが分かる．この検討より，コーナリングスティフネス推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し，許容誤差範囲内であることが分かる．

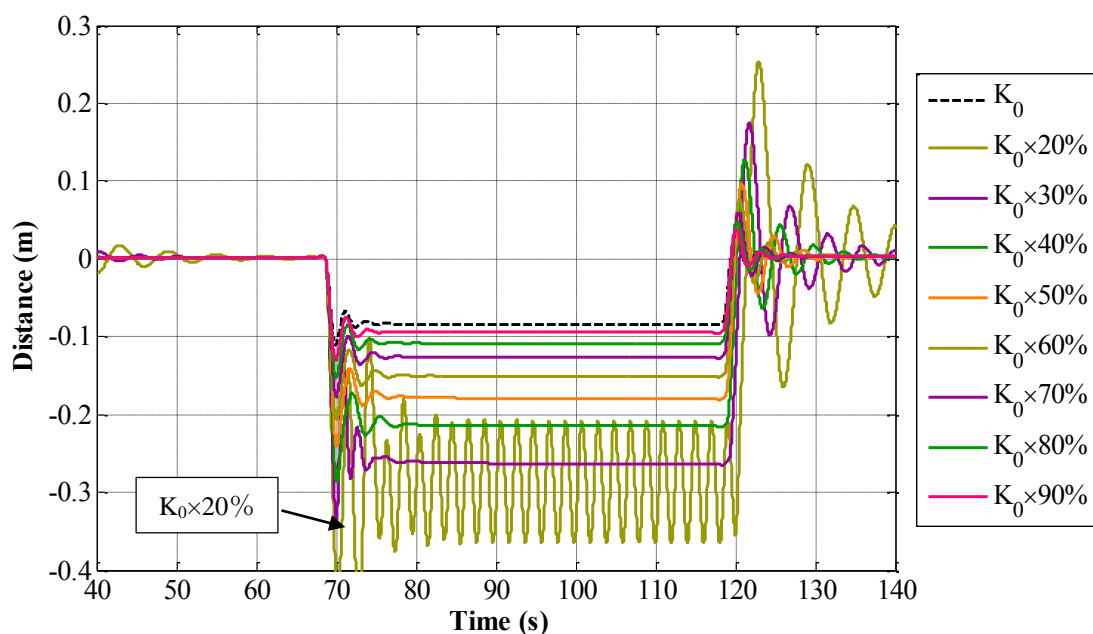


図 6.15 コーナリングスティフネス真値より小さい場合，2 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

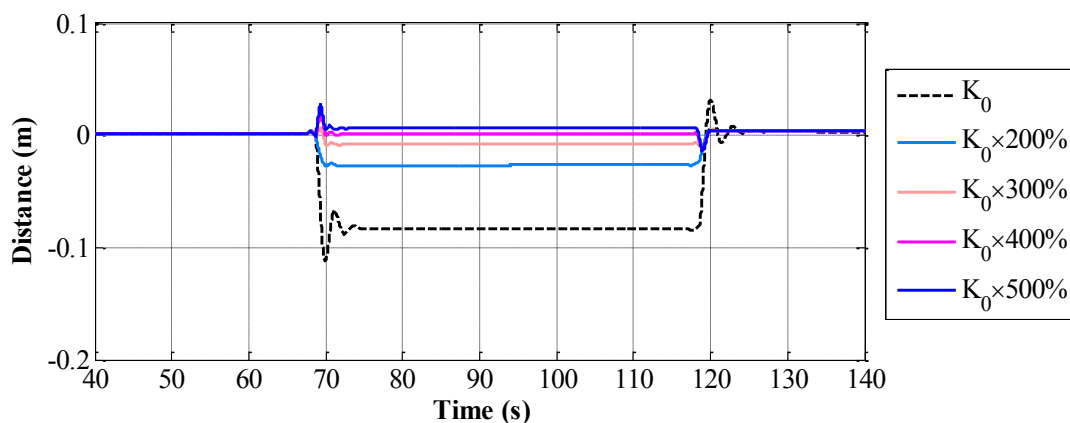


図 6.16 コーナリングスティフネス真値より大きい場合，2 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

図 6.17 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より小さい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差の数値解析結果を示す。ヨー慣性モーメントの真値より徐々に小さくなって自動隊列走行中の横偏差はほぼ一致することが分かる。図 6.18 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より大きい場合、横偏差の数値解析結果を示す。ヨー慣性モーメントの真値より徐々に大きくなると自動隊列走行中の横偏差の変化が大きくなることが分かる。真値より 500%以上大きくなると自動隊列走行中の横偏差の制御ができなくなることが分かる。この検討より、ヨー慣性モーメント推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し、許容誤差範囲内であることが分かる。

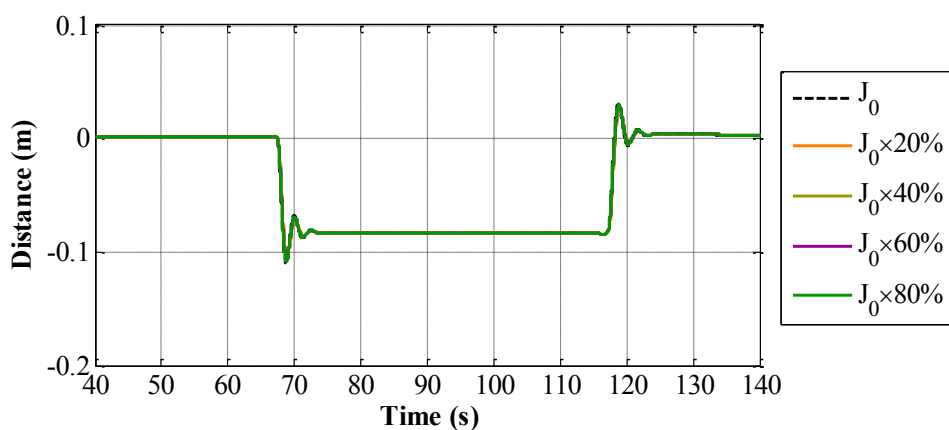


図 6.17 ヨー慣性モーメント真値より小さい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

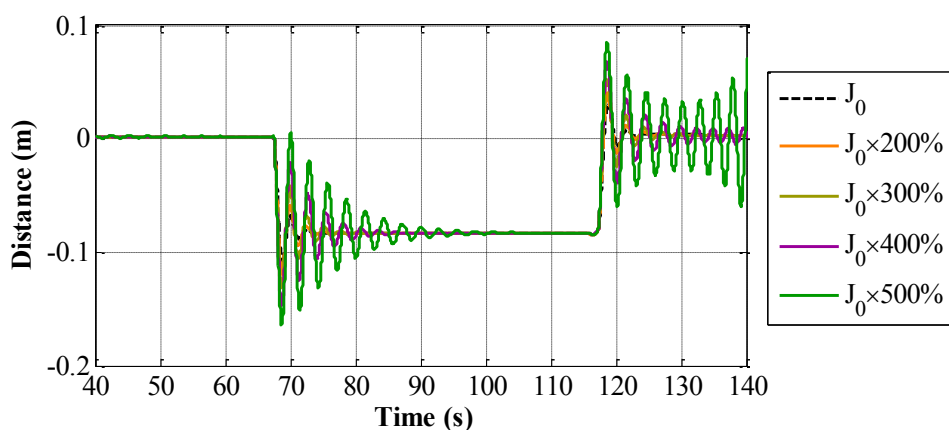


図 6.18 ヨー慣性モーメント真値より大きい場合、1 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

図 6.19 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より小さい場合、2 台目の自動隊列走行車両の横偏差の数値解析結果を示す。1 台目の数値解析結果と同様にヨー慣性モーメントの真値より徐々に小さくても自動隊列走行中の横偏差はほぼ一致することが分かる。図 6.20 はヨー慣性モーメントの推定値が真値より大きい場合、横偏差の数値解析結果を示す。1 台目の数値解析結果と同様にヨー慣性モーメントの真値より徐々に大きくなると自動隊列走行中の横偏差の変化が大きくなることが分かる。この検討より、ヨー慣性モーメント推定値の $\pm 10\%$ 誤差に対し、許容誤差範囲内であることが分かる。

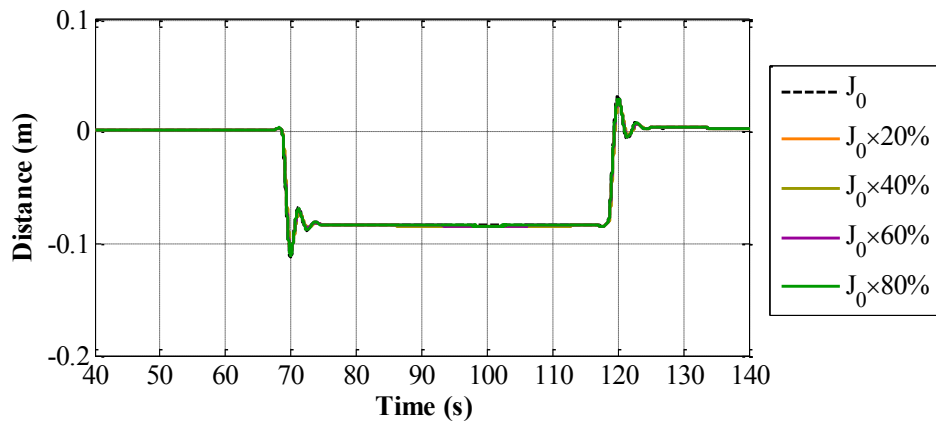


図 6.19 ヨー慣性モーメント真値より小さい場合、2 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

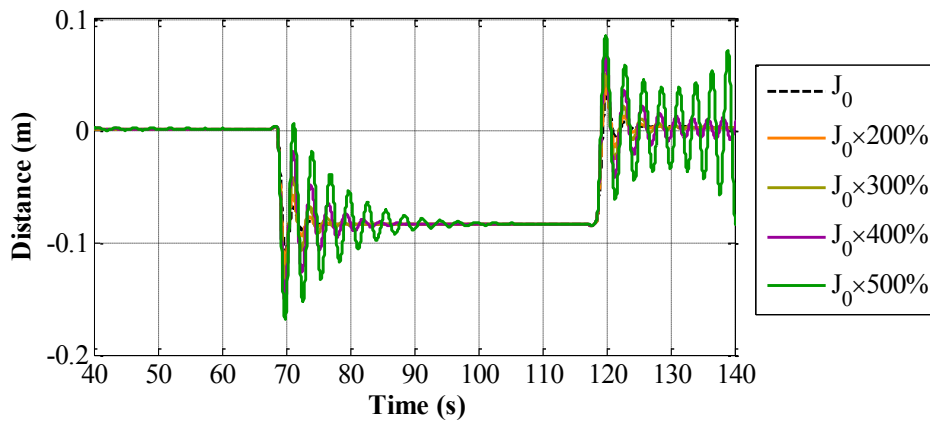


図 6.20 ヨー慣性モーメント真値より大きい場合、2 台目の自動隊列走行車両の横偏差比較

同定手法によるパラメータ推定結果の $\pm 10\%$ 内の誤差に対し、大型トラックが隊列走行時の数値解析結果、その誤差は許容範囲内の誤差であることを確認し、本研究の同定手法は性能高い同定ができることを確認した。

## 6.5 本研究の成果と今後の課題

大型トラックへの実用化を向かって、本研究で達成した成果は次のようになる。

- ・大型トラックが出発する前に、どの籍載条件でもサスペンションの変化量を利用する同定手法によって、十分な精度の車両質量と車体重心位置の推定ができることを示した。
- ・数値解析によって、ヨー慣性モーメントのみの同定、コーナリングスティフネスのみの同定、もしくはその両方の同時同定ができることを示した。
- ・同定結果の精度は、トラックの自動運転隊列走行の数値解析の検討より、十分な精度であることを示した。

今後の課題として次のようになると考える。

- ・本研究で推定結果を求めるために、提案した推定予測手法を適用しても最小3回のレーンチェンジが必要であるが、実際道路上に展開するためには、1回のレーンチェンジ、もしくは1度の曲線区間の通過だけで十分な精度を持つパラメータ同定ができることが望ましく、その改善案の検討が必要である。
- ・大型トラックに対し実車実験による同定案の妥当性検討が必要である。
- ・様々な走行条件(例：雨天時の路面上の走行、カントのある道路上の走行等)による同定手法の有効性検討が必要である。
- ・本研究に使われたGPS計測システムは絶対速度を基準にしてヨー角速度とスリップ角などを計測するセンサであるが、GPSセンサから絶対速度が上手く計測できなかった場合(例えば、トンネル中を走行、GPS受信の干渉等)、GPS計測を補足する代案の検討が必要である。

## 第 7 章

### 結論

## 7. 結論

本論文では高度な車両制御を行うためには車両の正確なパラメータの同定が必要で、車両パラメータの中で車体質量と車体重心位置、ヨー慣性モーメント、コーナリングステイフネスの推定について同定手法を提案した。同定手法の妥当性を検討するため、運輸用トラックと一般乗用車を対象にする実車実験と、商用ソフトを用いた数値解析を行い、その有効性を示した。以下、各章における総括を述べ、最後に本論文の結論を記述する。

第1章の序論では、研究背景、研究目的を記述した。自動車の高性能化の要求が高まることに従い、車両制御が高度化されていることを説明した。また、最近発展している運転支援システム分野や **Intelligent Transportation Systems** 分野で、より安全な運転ができる車両制御・交通制御システムの研究が行われていることを説明した。車両制御の安全性と信頼性を高めるためには精密な制御が要求されるため、正確なプラントのパラメータと状態量の同定が重要であることを述べた。

第2章の **Dual Kalman filter** アルゴリズムでは、本論文のパラメータ同定に使われる **Dual Kalman filter** アルゴリズムについて記述した。**Dual Kalman filter** アルゴリズムは実際モデルと異なるパラメータ値から得られた状態推定値が実際の状態量に収束しながら、モデルのパラメータ推定値がその真値に収束することができる再帰アルゴリズムであることを記述した。**Dual Kalman filter** アルゴリズムは状態推定用 **Kalman filter** とパラメータ推定用 **Kalman filter** で構成され、推定誤差が最小になるように毎時刻更新しながらパラメータ推定値を求めるアルゴリズムで、ロバスト安定性を持つ最適の推定値を求めることができるものであることを示した。

第3章の同定手法では、車両パラメータ中で車体質量と車体重心位置、ヨー慣性モーメントのパラメータ、コーナリングステイフネスの同定手法を述べた。車体質量と車体重心位置に関する同定手法においては、車両が走行する前に車体の荷重に対し車両のサスペンションの変化量から車体質量と車体重心位置が推定できることを述べた。ヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスに関する同定手法においては、車両が走行中に **Dual Kalman filter** アルゴリズムを用いて、ヨー慣性モーメント、もしくはコーナリングステイフネスの推定、またヨー慣性モーメントとコーナリングステイフネスの同時推定ができることを記述した。

第4章の実験では、実車実験による提案した同定案の有効性を示した。車体質量と車体重心位置の同定に関する実験は大型トラックを用いて実車実験を行った。実験結果を基に分析を行い車体質量と車体重心位置のパラメータ推定結果を求めた。停車中に荷重による各

サスペンションの変化量と各輪の反力を計測し、荷重とサスペンション変化量の関係式を求めて、任意の積載状態によるトラックの車体質量と車体重心位置の推定ができることを確認した。ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同定に関する実験では、一般乗用車を用いて実車実験を行った。GPS 計測システムで取った実験結果を基に **Dual Kalman filter** アルゴリズムによる同定手法を用いてヨー慣性モーメントの推定とコーナリングスティフネスの推定、および、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定の結果を求め、それらの有効性を示した。

第 5 章のパラメータ推定の数値解析では、大型トラックを対象車両として数値解析を用いて、**Dual Kalman filter** アルゴリズムによるヨー慣性モーメント推定とコーナリングスティフネス推定、ヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの同時推定に対する同定手法の有効性を検討した。数値解析は車両質量別と車速別の条件で行った。推定結果の収束安定性を確認するため、初期値は真値より高い値と真値より低い値に設定し同定手法によるパラメータ推定を行い、推定値が安定に収束する結果が得られた。**Dual Kalman filter** アルゴリズムによる同定結果は収束するまで多数の操舵走行が必要であることが分かった。より速く推定値を求めるため、パラメータ推定の予測手法を提案し、求めたパラメータ推定結果に適用し推定値の予測値を求めた。この予測手法により速く推定値が求められることを示した。

第 6 章の自動隊列走行における本手法の有効性検討では、第 5 章で求めたヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスの推定結果で、真値との誤差が $\pm 10\%$ 以内であることに對し、この誤差が許容される誤差の範囲内であるかを議論した。数値解析を通じて誤差が自動隊列走行制御に与える影響について調べ、推定の誤差は許容範囲内であることを示した。

本研究で得られた知見を以下のようにまとめる。

- ・サスペンションの変位もしくはエアサスペンションの時にはベローズ圧を計測し、トラックの車体重量と車体重心位置の推定する同定手法の妥当性について実車実験を通じて示し、ヨー慣性モーメント推定の際の初期値として活用した。
- ・**Dual Kalman Filter** アルゴリズムを用いて走行中にヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスを同定する手法を提案し、一般車両を利用した実車実験と大型トラックの挙動をシミュレーションした数値解析を行い、推定値が求められることを示した。
- ・独自の予測手法を取り入れることによって、少ない回数のレーンチェンジで、パラメータ値を推定できることを示した。
- ・自動運転隊列走行を例にして、提案する手法によって求められる推定値の精度が、実用上十分であることを示した。

車両・交通の制御システムや運転支援システムのように高度な車両制御を行うためには車両パラメータと状態量を推定することが重要であり、操舵走行に大きな影響を与えるヨー慣性モーメントとコーナリングスティフネスに対し、走行中に車両パラメータ同定ができる手法を提案し、実車実験および数値解析の結果を用いた解析により、提案する手法案の妥当性を示した。



## 参考文献

## 参考文献

- [1] Daisuke Yamaguchi, Yoshihiro Suda, Masaaki Onuki, Toshihiko Oda, Hiroki Ishikawa, Ilgi Hong, “Improvement of realistic sensation on universal driving simulator”, in Proceedings of 17th ITS World Congress 2010, Busan Korea, CD-ROM.
- [2] Maider Larburu, Javier Sanchez, Domingo Jose Rodriguez, “Safe road trans for environment: human factors’ aspects in dual mode transport systems”, in Proceedings of 17th ITS World Congress 2010, Busan Korea, CD-ROM.
- [3] Steven E. Shladover, “PATH at 20—History and major milestones”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.8, No.4, 2007, pp.584-592.
- [4] T. Robinson, E. Chan, E. Coelingh, “Operating platoons on public motorways: an introduction to the SARTRE platooning programme”, 17th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2010
- [5] Carl Bergenhem, Qihui Huang, Ahmed Benmimoun, and Tom Robinson, “Challenges of platooning on public motorways”, in Proceedings of 17th ITS World Congress 2010, Busan Korea, CD-ROM.
- [6] J. A. Misener, Steven E. Shladover, “PATH Investigations in vehicle-roadside cooperation and safety: a foundation for safety and vehicle-infrastructure integration research”, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto Canada, September 2006, pp.9-16.
- [7] S. Shladover, C. Desoer, “Automatic vehicle control development in the PATH program”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol.40, No. 1, 1991, pp. 114-130
- [8] S. Sheikholeslam, A. Charles, “Combined longitudinal and lateral control of a platoon of vehicles”, American Control Conference, 1992, pp. 1763- 1767
- [9] P. Ioannou, C. Chien, “Autonomous intelligent cruise control”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.42, No.4, 1993, pp.657-672
- [10] D. Yanakiv, I. Kanellakopoulos, “Speed tracking and vehicle follower control design for heavy-duty vehicles”, Vehicle System Dynamics, Vol.25, No.4, 1996, pp. 251-276
- [11] J. Piao, M. Mcdonald, “Advanced driver assistance systems from autonomous to cooperative approach”, Transport Reviews, Vol.28, No.5, 2008, pp.689-684.
- [12] Maider Larburu, Javier Sanchez, and Domingo José Rodriguez. “SAFE ROAD TRAINS FOR ENVIRONMENT: Human factors’ aspects in dual mode transport systems.” ITS World Congress, Busan, Korea. 2010.
- [13] B.J. Harker, “PROMOTE-CHAUFFEUR II & 5.8GHz vehicle to vehicle communications system”, in International Conference on Advanced Driver Assistance Systems, Birmingham UK, September 2001

- [14] H. Fritz, “Longitudinal and lateral control of heavy duty trucks for automated vehicle following in mixed traffic: experimental results from the CHAUFFEUR project”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Vol.2, 1999, pp. 1348-1352
- [15] Richard Ramakers, Klaus Henning, Stefan Gies, Dirk Abel, Max Haberstroh, “Electronically coupled truck platoons on german highways”, Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010, Springer, 2011, pp.441-451.
- [16] Ralph Kunze, Richard Ramakers, Klaus Henning, Sabina Jeschke, “Organization and operation of electronically coupled truck platoons on german motorways”, Intelligent Robotics and Applications, Vol. 5928, 2009, pp.135-146.
- [17] Henning, K., Petry, L., Ramakers, R., Meinhold, J. “Sustainable transport-knowledge and innovations at RWTH Aachen university for europe’s systems of tomorrow.” Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp.393-405.
- [18] Yanakiev, Diana, Jennifer Eyre, Ioannis Kanellakopoulos. “Longitudinal control of heavy duty vehicles: Experimental evaluation”, California PATH research report, 1998
- [19] Diana Yanakiev, Ioannis Kanellakopoulos. “Speed tracking and vehicle follower control design for heavy-duty vehicles.” Vehicle System Dynamics, Vol.25, No.4, 1996, pp. 251-276.
- [20] Diana Yanakiev, Ioannis Kanellakopoulos. “Longitudinal control of heavy-duty vehicles for automated highway systems” American Control Conference, 1995, Proceedings of the Vol. 5
- [21] K. Oda, H. Takeuchi, M. Tsujii, M. Ohba, “Practical estimator for self-tuning automotive cruise control” In American Control Conference, 1991, pp. 2066-2071
- [22] M. K. Liubakka, D. S. Rhode, J. R. Winkelman. “Adaptive automotive speed control” Proceedings of Workshop on Advances in Control and its Applications, Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [23] P. Ioannou, Z. Xu. “Throttle and brake control systems for automatic vehicle following.” Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol.1, No.4, 1994, pp. 345-377.
- [24] 山崎穂高, 岡本邦明, 青木啓二, 伊藤裕, “隊列走行による高速 路線トラックの走行抵抗・燃費低減効果について”, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.95-09, 2009, pp. 1-4
- [25] 青木啓二, 森田康裕, “自動運転・隊列走行システムの開発(第1報)-エネルギー-ITS推進事業-”, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.20095509, 2009, pp.1-4
- [26] H. S. Bae, J. Christian Gerdes. “Parameter estimation and command modification for longitudinal control of heavy vehicles”, 2003
- [27] Jihan Ryu, J. Christian Gerdes. “Estimation of vehicle roll and road bank angle.” American Control Conference, 2004, Vol. 3

- [28] R. Anderson, David M. Bevly. "Using GPS with a model-based estimator to estimate critical vehicle states." *Vehicle System Dynamics*, 2010, Vol. 48, No.12, pp.1413-1438.
- [29] D. M. Bevly, R. Daily. "Estimation of critical tire parameters using GPS based sideslip measurements.", 2006
- [30] Christopher R. Carlson, J. Christian Gerdes, J. David Powell. "Practical position and yaw rate estimation with GPS and differential wheelspeeds." *Proceedings of AVEC 6th International Symposium* 2002.
- [31] Jihan Ryu, Eric J. Rossetter, J. Christian Gerdes. "Vehicle side slip and roll parameter estimation using GPS" *AVEC 2002, 6th Symposium on advanced vehicle control*, Hiroshima, Japan
- [32] Bevly, David M., Robert Sheridan, and J. Christian Gerdes. "Integrating INS sensors with GPS velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness." *American Control Conference*, 2001. *Proceedings of the 2001. Vol. 1. IEEE*
- [33] Jihan Ryu, J. Christian Gerdes. "Integrating inertial sensors with GPS for vehicle dynamics control." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 126, No.2, 2004, pp. 243-254.
- [34] K. Tin Leung, J. F. Whidborne, D. Purdy, A. Dunoyer, "A review of ground vehicle dynamic state estimations utilising GPS/INS." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 49, No.1-2, 2011, pp.29-58.
- [35] Paul J. TH Venhovens, Karl Naab. "Vehicle dynamics estimation using Kalman filters." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32, No.2-3, 1999, pp. 171-184.
- [36] X. Huang, J. Wang. "Longitudinal motion based lightweight vehicle payload parameter real-time estimations." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.135, 2013
- [37] Hosam K. Fathy, Dongsoo Kang, Jeffrey L. Stein. "Online vehicle mass estimation using recursive least squares and supervisory data extraction." *American Control Conference*, 2008. *IEEE*
- [38] A. Vahidi, A. Stefanopourou, H. Peng, "Recursive least squares with forgetting for online estimation of vehicle mass and road grade theory and experiments", *Vehicle System Dynamics*, 2005, Vol.43, No.1, pp.31-55
- [39] V. Winstead, I. Kolmanovsky, "Estimation of road grade and vehicle mass via model predictive control", *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications*, 2005
- [40] A. Vahidi, M. Druzhinina, A. Stefanopoulou, H. Peng "Simultaneous mass and time-varying grade estimation for heavy-duty vehicles." In *American Control Conference, Proceedings of the 2003*, Vol. 6, pp. 4951-4956
- [41] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, H. Peng. "Experiments for online estimation of heavy vehicle's mass and time-varying road grade." *Proceedings IMECE DSCD*, 2003

- [42] H. S. Bae, J. Ryu, J. C. Gerdes. "Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS." IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings ITSC, 2001.
- [43] S. Solmaz, M. Akar, R. Shorten. "Online center of gravity estimation in automotive vehicles using multiple models and switching" Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference on.
- [44] Selim Solmaz, Mehmet Akar, Robert Shorten, Jens Kalkkuhl "Real-time multiple-model estimation of centre of gravity position in automotive vehicles", Vehicle System Dynamics, Vol.46, No.9, pp.763-788, 2008
- [45] Solmaz, Selim, Mehmet Akar, and Robert Shorten. "Center of gravity estimation and rollover prevention using multiple models & controllers." 2008
- [46] Previati, G., M. Gobbi, and G. Mastinu. "Improved measurement method for the identification of the centre of gravity location and of the inertia tensor of rigid bodies." ASME, 2008.
- [47] 北沢啓一 "商業車安定性制御のための車両状態推定方法 : ARX 法を用いた車両重心の位置と高さの推定", 電子情報通信学会技術研究報告, 安全性, 101, pp.17-22, 2001
- [48] D. Wesemeier, R. Isermann. "Identification of vehicle parameters using stationary driving maneuvers", Control Engineering Practice, 2009, Vol.17, No.12, pp. 1426-1431
- [49] T. Massel, E. L. Ding, M. Arndt. "Estimation of vehicle loading state." Control Applications, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on. Vol. 2.
- [50] Eric A. Wan, Alex T. Nelson. "Dual extended Kalman filter methods." Kalman filtering and neural networks, 2001, pp.123-173.
- [51] T. A. Wenzel, K. J. Burnham, M. V. Blundell, R. A. Williams "Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation". Vehicle System Dynamics, Vol. 44, No.2, 2006, pp. 153-171.
- [52] Caizhen Cheng, David Cebon. "Parameter and state estimation for articulated heavy vehicles." Vehicle System Dynamics, Vol. 49, No.1-2, 2011, pp. 399-418.
- [53] Chang-fu Zong, Pan Song, Dan Hu. "Estimation of vehicle states and tire-road friction using parallel extended Kalman filtering." Journal of Zhejiang University Science A Vol.12, No.6, 2011, pp. 446-452.
- [54] G. J. Heydinger, R. A. Bixel, W. R. Garrott, M. Pyne, J. G. Howe, D. A. Guenther, "Measured vehicle inertial parameters-NHTSA's data through November 1998." SAE transactions, Vol. 108, No.6, PART 2, 2000, pp. 2462-2485.
- [55] R. Allen, D. Klyde, T. Rosenthal, D. Smith, "Estimation of passenger vehicle inertial properties and their effect on stability and handling", Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, Vol.112, 2003

- [56] Gobbi, M., G. Mastinu, and G. Prevati. "A method for measuring the inertia properties of rigid bodies." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.1, 2011, pp.305-318.
- [57] S. Bruyne, H. Auweraer, P. Diglio, "Online Estimation of Vehicle Inertial Parameters for Improving Chassis Control Systems", 18th IFAC World Congress, Vol.18, No.1, 2011, pp. 1814-1819
- [58] P. Bolzern, F. Cheli, G. Falciola, F. Resta, "Estimation of the non-linear suspension tyre cornering forces from experimental road test data", *Vehicle system dynamics*, Vol.31, No.1, 1999, pp.23-34.
- [59] G. Baffet, A. Charara, D. Lechner, "Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness." *Control Engineering Practice*, Vol.17, No.11, 2009, pp.1255-1264.
- [60] G. Baffet, A. Charara, D. Lechner, D. Thomas, "Experimental evaluation of observers for tire-road forces, sideslip angle and wheel cornering stiffness." *Vehicle System Dynamics*, Vol.46, No.6, 2008, pp. 501-520.
- [61] Christian Lundquist, Thomas Schön. "Recursive identification of cornering stiffness parameters for an enhanced single track model." 2009
- [62] W. Sienel, "Estimation of the tire cornering stiffness and its application to active car steering." *Decision and Control, Proceedings of the 36th IEEE Conference on*, Vol. 5, 1997
- [63] R. Anderson, D. Bevly, "Estimation of tire cornering stiffness using GPS to improve model based estimation of vehicle states." *Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. IEEE.* 2005.
- [64] C. Sierra, E. Tseng, A. Jain, H. Peng, "Cornering stiffness estimation based on vehicle lateral dynamics." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, No.1, 2006, pp.24-38.
- [65] M. Arndt, E. Ding, T. Massel, "Identification of cornering stiffness during lane change maneuvers." *Control Applications, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference.* Vol. 1.
- [66] J. Hahn, R. Rajamani, L. Alexander, "GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient." *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, Vol. 103, 2002, pp.331-343.
- [67] 裙坂昭生, 藤本博志, 野口季彦, "ヨーモーメントオブザーバを用いた電気自動車のコーナーリングスティフネスの推定", 平成 15 年度電気学会産業応用部分学会, pp. 2-51, 2003
- [68] 高橋直樹, 藤本博志, 裙坂昭生, 野口季彦, "電気自動車における車両横すべり角推定法の一提案", 平成 17 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-73, pp. 89-94, 2005
- [69] 高橋直樹, 藤本博志, "コーナーリングスティフネスと車両横すべり角の推定に基づく電気自動車のヨーレート制御法に関する一考察", 平成 18 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-06-04, pp.17-22, 2006
- [70] H. Fujimoto, No. Takahashi, A. Tsumasaka, T. Noguchi, "Motion control of electric vehicle based on cornering stiffness estimation with yaw-moment observer." *Advanced Motion Control, 9th IEEE International Workshop*, 2006
- [71] B. M. Nguyen, K. Nam, H. Fujimoto, Y. Hori, "Proposal of cornering stiffness estimation without vehicle side slip angle using lateral force sensor." *IIC 11*, Vol.140, 2011

- [72] 足立修一, “カルマンフィルタの基礎”, 東京電機大学出版局, 2012
- [73] Simon Haykin, “Kalman filters” Kalman filtering and neural networks, 2001
- [74] Rudolph Emil Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems.” Journal of basic Engineering, Vol.82, No.1, 1960, pp.35-45
- [75] M. Salgado, R. Middleton, G. C. Goodwin. “Connection between continuous and discrete Riccati equations with applications to Kalman filtering.” Control Theory and Applications, IEE Proceedings D. Vol. 135. No. 1. IET, 1988.
- [76] Fredrik. Orderud, “Comparison of Kalman filter estimation approaches for state space models with nonlinear measurements.” Proceedings of Scandinavian conference on simulation and modeling. 2005.
- [77] Eric A. Wan, Alex T. Nelson. “Neural dual extended Kalman filtering: applications in speech enhancement and monaural blind signal separation.” Neural Networks for Signal Processing VII. Proceedings of the 1997 IEEE Workshop.
- [78] M. Doumiati, A. Charara, A. Victorino, D. Lechner, “Vehicle dynamics estimation using Kalman filtering”, Wiley, 2013
- [79] G. Welch, G. Bishop, “An introduction to the Kalman filter. Technical report”, UNC-CH Computer Science Technical Report 95041, 1995
- [80] 阿部正人, “自動車の運動と制御”, 東京電機大学出版局, 2008
- [81] Toshiyuki Sugimachi, Takanori Fukao, Jun Yoshida, Yuya Hirata, Yoshitada Suzuki, Keiji Aoki, “Autonomous driving based on LQ path following control and platooning with front and rear information” in Proceedings of 17th ITS World Congress 2010, Busan Korea, CD-ROM.
- [82] 深尾隆則, 吉田順, 森田康裕, “隊列走行における車間距離制御アルゴリズムの研究 (第1報)”, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.94-09, 2009, pp.5-8
- [83] D. Katzourakis, D. Abbink, R. Happee, E. Holweg, “Race-Car Instrumentation for Driving Behavior Studies”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 61, No. 2, 2012, pp. 462-474.
- [84] 亀井潤也, “駐車場 ITS に関する研究—インフラ設備を活用した自動走行—”, 平成 23 年度 東京大学大学院修士論文, 2012
- [85] 金子哲也, 栗谷川幸代, 初山富士男, 景山一郎 “自律走行車両のためのドライヤモデルおよび車両モデルを考慮した制御目標のリアルタイム生成-エネルギーITS 推進事業の開発-”, 自動車技術会春大会学術講演会前刷集, No.72-11, 2011, pp. 7-12

## 謝辞

本研究は、東京大学大学院情報学環(兼担)生産技術研究所 中野公彦准教授  
のご指導の下、行われたものです。博士時代を通じて、ご指導頂きました。深い感謝の意を  
表します。

東京大学大学院新領域創成科学研究科鎌田実教授、東京大学生産技術研究所須田義大教授、  
東北大学未来科学技術共同研究センター鈴木高宏教授、東京大学大学院新領域創成科学研究  
科藤本博志准教授には、本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました。感謝申  
し上げます。

大堀真敬助手と鄭仁成特任助教には、様々なアドバイス頂き感謝いたします。そして中野研  
究室の長谷川厚子秘書にも感謝申し上げます。

中野研究室の方々にも研究活動から研究室における生活全般までお世話になりました。

高麗大学校機械工学科崔又天教授には、修士課程の指導および博士課程に進学する際にも  
お世話になりました。心より感謝申し上げます。

日野自動車株式会社の石坂宏幸氏、財団法人日本自動車研究所の鈴木儀匡氏には、研究の協  
力を頂きました。感謝申し上げます。

三菱重工業株式会社の御子神隆部長、萩田敦司次長、朴景夏主席、安秉一主席には、博士課  
程の進学に応援して下さい感謝致します。

韓国の友達の皆様から応援頂き有難うございます。

その他にも本研究は様々な方々のご協力の下、行われました。ここに感謝の意を表します。

最後に、長年間勤務した会社を退社し博士課程に進学すると決心をする時、また博士課程の  
間一人で二人の子供を面倒しながら応援してくれた私の妻に感謝の話をしたいと思います。

2014 年 7 月

李 昇勇