2205 走行時における車両のコーナリングスティフネスと ヨー慣性モーメントの同定

Identification of cornering stiffness and yaw moment of inertia of a vehicle during travelling

○正 李 昇勇 (東京大生産研) 正 中野 公彦 (東京大生産研) 正 大堀 真敬 (東京大生産研)

Seungyong LEE, IIS, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
Kimihiro Nakano, IIS, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
Masanori Ohori, IIS, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan

Abstract

Accurate parameters are necessary to accomplish precise driving control of vehicle. Identification of vehicle parameters is important to get accurate parameters because vehicle control is affected by the vehicle parameters. An identification method is proposed using Dual Kalman filter algorithm and GPS sensor for the simultaneous estimation of vehicle parameters, i.e. yaw moment of inertia and cornering stiffness. Performance of the proposed identification method is evaluated through examination. Possibility of the proposed identification method is confirmed by examining the estimated results.

Key Words: Automobile, Vehicle Dynamics, Identification, Yaw Moment of Inertia, Cornering Stiffness, Experiment,

1. はじめに

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。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⁽¹⁻²⁾。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⁽³⁻⁶⁾。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。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⁽⁷⁻⁹⁾。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。自動隊列走行をするトラックの場合, より正確な自動隊列走行制御を行うためには, 事前に積載状態による車両制御用パラメータを推定し, 最適に走行制御を行うことが必要である。そのため, 走行制御に使われる車両パラメータの同定が重要である。車両重量と車両重心, ヨー慣性モーメント等を同定する研究には様々なものが存在する⁽¹⁰⁻¹²⁾。著者らはトラックにおいて積載量, 車体重心位置の車両パラメータを同定する方法を提案し, 大型トラックを用いて加重実験を行い, エアサスペンションのペローズ圧とリーフサスペンションの変位量から車体重量と車体重心位置の推定できることを示した⁽¹³⁾。また, GPS 計測システムを用いてヨー慣性モーメントを推定する手法を提案し, 実車実験を

通じて提案する手法の妥当性を示した⁽¹⁴⁾。操舵走行の安全性を高めるため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⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。

本報では操舵制御に重要な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に対し, 走行中にその車両パラメータを同時推定できる手法を提案する。提案した同定案を検討するため, 実車実験によって同定案の妥当性を示す。

2. 同定手法

2.1. 実験車両

実験車両は図 1 のように一般乗用車を用いて実験を行う。実験車両の詳細な仕様は表 1 に示す。コーナリングスティフネスは参考文献の値を用いた⁽¹⁸⁾。

Fig. 1 Test vehicle

Table 1 Specification of test vehicle

Vehicle mass		2270 kg
Wheelbase		2.95 m
Track		1.55 m
Distance of front axle to C.G.		1.368 m
Distance of rear axle to C.G.		1.582 m
Yaw moment of inertia		5000 kgm ²
Cornering Stiffness	Front	57930 N/rad
	Rear	42040 N/rad

2.2. GPS 計測システム

同定案の検討に使われる車両運動の計測値は GPS 計測システムで取られるものを利用する。この GPS 計測システムは Lacelogic 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 信号を利用し走行する車両の絶対速度及びスリップ角、ヨー角速度等を高い精度で計測ができる計測システムである。車両の絶対速度は GPS 搬送波のドップラー効果を利用し 0.1km/h の精度で計測できる。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 2 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 Heading 角と絶対速度の方向をもとに、0.1deg の精度で求められる。ヨー角速度は車両の Heading 角の変化から 0.75deg/s の精度で求められる。この GPS 計測システムは先行研究において有用性が示されている⁽¹⁹⁾。

Fig. 2 Principle of GPS measurement system

2.3. 車両モデル

ヨー慣性モーメント同定の検討を行うため、図 3 のように実験車両を基に等価二輪車モデルを用いた。図 3 の記号は表 2 に示す。

Fig. 3 Single-track model

Table 2 Parameters

	Name
M	Vehicle mass
V	Vehicle speed
l	Wheelbase
l_f, l_r	Distance of front/rear axle to C.G.
δ	Front wheel steering angle
γ	Yaw rate of center of gravity
β	Slip angle of center of gravity
F_f, F_r	Lateral force of front / rear tires
J	Yaw moment of inertia

等価二輪車モデルを用いた車両の運動方程式は、式(1)と式(2)で示す⁽²⁰⁾。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = 2K_f(\delta - \beta - \frac{l_f}{V}\gamma) + 2K_r(-\beta + \frac{l_r}{V}\gamma) \quad (1)$$

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

式(1)-(2)から、式(3)-(5)のようにヨー角速度 γ とスリップ角 β を状態ベクトルにする状態方程式を導くことができる。実舵角 δ は入力、 y は出力を示す。

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (3)$$

$$y = Cx \quad (4)$$

$$x = [\gamma \quad \beta]^T \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = -\frac{2}{JV}(K_f l_f^2 + K_r l_r^2)$$

$$A_{12} = -\frac{2}{J}(K_f l_f - K_r l_r)$$

$$A_{21} = -\frac{2}{MV^2}(K_f l_f - K_r l_r) - 1$$

$$A_{22} = -\frac{2}{MV}(K_f + K_r)$$

$$B_{11} = \frac{2}{J}K_f l_f \quad B_{21} = \frac{2K_f}{MV}$$

2.4. 同定手法

操舵制御に重要な車両パラメータであるヨー慣性モーメントに対し、Dual kalman filter(以下、DKF)アルゴリズムと GPS 計測システムを利用し実時間でパラメータ同定ができる手法を提案する。DKF は状態量を推定しながらパラメータ推定を行う再帰アルゴリズムである⁽²¹⁻²⁵⁾。DKF は図 4 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。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、次の時間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、毎時間ステップことの状態量とパラメータの推定値が求められる。

Fig. 4 Outline of Dual kalman filter

DKF は式(6)-(9)を用いて状態推定とパラメータ推定を行う。式(6)-(7)は式(3)-(4)の連続時間状態方程式から変換した離散時間状態方程式で、状態推定に使われる。式(6)-(7)のシステムモデル行列 A_d , B_d , C_d は、式(3)-(4)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ある。添字 k は時間ステップの番号を示す。 x_k は状態ベクトル、 δ_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。式(8)-(9)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、 z_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。

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d \delta_k + w_k \quad (6)$$

$$y_k = C_d x_k + v_k \quad (7)$$

$$p_{k+1} = p_k + m_k \quad (8)$$

$$z_k = D_d p_k + n_k \quad (9)$$

状態推定用 KF は式(10)-(14)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(10)の $\hat{x}_k^-$ は状態推定の予測値で、前時間ステップで求めた状態推定値とシステムモデルから求められ、前時間ステップの推定値が現在時間ステップになった時の値を予測する。式(11)の P_k^- は状態推定の誤差共分散の予測値で、前時間ステップの誤差共分散が現在時間ステップになった時の誤差共分散を予測する。式(12)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(13)の $\hat{x}_k$ は状態推定値で、式(10)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(12)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。 s_k は計測値を示す。式(14)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(18)に代入され、パラメータ推定値を求める時に使われる。

$$\hat{x}_k^- = A_d \hat{x}_{k-1} + B_d u_k \quad (10)$$

$$P_k^- = A_d P_{k-1} A_d^T + Q_s \quad (11)$$

$$K_k = P_k^- C^T (C_d P_k^- C_d^T + R_s)^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (s_k - C_d \hat{x}_k^-) \quad (13)$$

$$P_k = (I - K_k C_d) P_k^- \quad (14)$$

パラメータ推定用 Kalman filter は式(15)-(19)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(15)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代入される。式(16)の U_k^- はパラメータ推定の誤差共分散の予測値で、前時間ステップの誤差共分散とシステムノイズ共分散 Q_p を加えて現在時間ステップの誤差共分散を予測する。式(17)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(18)の $\hat{p}_k$ はパラメータ推定値で、式(15)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(17)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(19)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フィードバックされ、次の時間ステップ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、毎時間ステップごとの状態推定値とパラメータ推定値を求める。

$$\hat{p}_k^- = \hat{p}_{k-1} \quad (15)$$

$$U_k^- = U_{k-1} + Q_p \quad (16)$$

$$G_k = U_k^- D_k^T (D_k U_k^- D_k^T + R_p)^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{p}_k = \hat{p}_k^- + G_k (s_k - C_d \hat{x}_k) \quad (18)$$

$$U_k = (I - G_k D_k) U_k^- \quad (19)$$

3. 実験

実車実験はつくば市にある産業技術総合研究所の試験コースで行った。GPS 測定システムの測定用アンテナは実験車両の屋根に前後方向に装着した。実験シナリオは実験車両が図5のような直進区間でレーンチェンジを繰り返して行った。

Fig.5 Scenario of experiment

4. 同時推定

4.1. 初期値設定

同定案による推定値の収束性を検討するため、ヨー慣性モーメントの場合、真値($J_R=5000\text{kgm}^2$)に対し、ヨー慣性モーメントの初期値は真値より低い値($J_L=1 \times 10^3\text{kgm}^2$)と真値より高い値($J_H=9 \times 10^3\text{kgm}^2$)の二つの初期値を設定した。また、コーナリングスティフネスの場合、真値($K_R=57930\text{N/rad}$)に対し、初期値は真値より低い値($K_L=2 \times 10^4\text{N/rad}$)と真値より高い値($K_H=1 \times 10^5\text{N/rad}$)の二つの初期値を設定した。

4.2. 推定結果

提案した同定手法による同時推定検討を行い、図6と図7のように同時推定結果を求めた。図6は同時推定で求められたヨー慣性モーメントの推定結果で、各初期値 J_L と J_H から 4556kgm^2 に収束された推定値が求められた。この推定値の誤差は-8%で、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。図7は同時推定で求められたコーナリングスティフネスの推定結果で、各初期値 K_L と K_H から 40214N/rad に収束された推定値が求められた。この推定値の誤差は-30%で、こ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。

求めた推定結果で、収束された推定値が得られるまで多数の操舵走行が必要であることが分かった。DKF アルゴリズムでは状態推定とパラメータ推定を同時に行われるものであり、未知のパラメータが複数の場合には、推定値が収束するまで操舵走行がより多く必要であると考えられる。また、この誤差は実車モデルと等価二輪モデルのモデル差が原因であると考えられる。

Fig.6 Estimated yaw moment of inertia

Fig.7 Estimated cornering stiffness

5. 結語

操舵制御に重要な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の実時間に対し、Dual kalman Filter アルゴリズムと GPS 計測システムを利用し、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時同定できる手法を提案した。実車実験による推定検討を行い、走行中に複数の車両パラメータの同時推定が可能であることを示した。今後、推定精度向上及び収束性能改善の検討する予定である。

謝 辞

本研究では新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のエネルギーITS 推進事業「自動運転・隊列走行に向けた研究開発」の一部として実施された。関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 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, p.1-4 (2009)
- (2) 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.94-09, p.1-4 (2009)
- (3) B. Harker: PROMOTE-CHAUFFEUR II & 5.8GHz vehicle to vehicle communications system, In Advanced Driver Assistance Systems, p.81-85 (2001)
- (4) R. Ramakers, H. Henning, S. Gies, D. Abel, M. Haberstroh: Electronically Coupled Truck Platoons on German Highways, Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2009/2010, Springer, p.441-451 (2011)
- (5) C. Bergenhem, Q. Huang, A. Benmimoun, T. Robinson: Challenges of Platooning On Public Motorways, 17th World Congress on Intelligent Transport Systems, p.1-12 (2010)
- (6) S. Shladover: PATH at 20—History and Major Milestones,

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.8, No.4, p.584-592 (2007)

(7) S. Sheikholeslam, A. Charles: Combined longitudinal and lateral control of a platoon of vehicles, American Control Conference, p.1763-1767 (1992)

(8) P. Ioannou, C. Chien: Autonomous intelligent cruise control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.42, No.4, p.657-672 (1993)

(9) 李昇勇, 中野公彦, 山邊茂之, 鄭仁成, 安藝雅彦, 須田義大: ドライビングシュミュレータによるトラック自動隊列走行の模擬, 日本機械学会 2011 年度年次大会, No.11-1, (2011), DVD-ROM

(10) S. Solmaz, M. Akar, R. Shorten, J. Kalkkuhl: Real-time multiple-model estimation of centre of gravity position in automotive vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol.46, No.9, p.763-788, (2008)

(11) M. Best, T. Gordon: Combined state and parameter estimation of vehicle handling dynamics, Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, p.429-436, (2000)

(12) H. Bae, J. Ryu, J. Gerdes: Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS, IEEE Conference on Intelligent transportation system, (2001)

(13) 李昇勇, 安藝雅彦, 大堀真敬, 中野公彦, 山邊茂之, 須田義大, 石坂宏幸, 鈴木儀匡: 自動隊列走行制御に向けたトラックの重量および重心位置推定, 自動車技術会春季大会学術講演会前刷集, No.19-12, (2012), p.21-24

(14) 李昇勇, 大堀真敬, 中野公彦, 安藝雅彦, 須田義大: 走行車両のヨー慣性モーメントの同定と車両状態量の推定, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.140-12, (2012), p.13-18

(15) 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, p. 501-520, (2008)

(16) C. Lundquist, T. Schön: Recursive identification of cornering stiffness parameters for an enhanced single track model. In Proceedings of the IFAC Symposium on System Identification, (2009), p. 1726-1731

(17) C. Sierra, E. Tseng, A. Jain, H. Peng: Cornering stiffness estimation based on vehicle lateral dynamics, Vehicle System Dynamics, Vol. 44, No.1, p.24-38, (2006)

(18) 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—, 東京大学修士論文, (2012)

(19) 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, p.462-474 (2012)

(20) 阿部正人: 自動車の運動と制御, 東京電機大学出版局, (2008)

(21) 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)

(22) R. Kalman: A new approach to linear filtering and prediction problems, Journal of basic Engineering, Vol.82, No.1, p.35-45 (1960)

(23) C. Cheng, D. Cebon: Parameter and state estimation for articulated heavy vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol.49, No.1-2, p.399-418 (2011)

(24) T. Wenzel, K. Burnham, M. Blundell, R. William: Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation, Vehicle System Dynamics, Vol. 44, No.2, p.153-171 (2006)

(25) P. Venhovens, K. Naab: Vehicle dynamics estimation using Kalman filters, Vehicle System Dynamics, Vol.32, No.2-3, p.171-184 (1999)