

ジョイスティック式自動車運転支援装置の感度設定と 操縦安定性に関する研究

Study on Sensitivity Setting and Steering Stability of Car Driving Support Device with Joystick

○ 木村耀平(農工大) 和田正義(農工大)

Yohei KIMURA, Tokyo University of Agriculture and Technology
Masayoshi WADA, Tokyo University of Agriculture and Technology

Abstract: In recent years, the number of body disabilities is increasing as a result of aging of population. Along with it, the car driving support devices with joystick for severe disabilities have been developed. In this study, we propose the method for changing the joystick sensitivity according to each vehicle speed in order to stabilize the behavior of the vehicle. By developing the program to adjust the weighting matrix in optimal regulator automatically, the joystick sensitivity can be calculated. We confirmed the driving stability of the vehicle by the joystick car driving simulation with its sensitivity.

Key Words: Joystick, Sensitivity, Simulation, Optimal Regulator

1. 緒言

1-1 背景

近年、日本における少子高齢化が問題となっている。内閣府の高齢社会白書⁽¹⁾によれば、人口に占める高齢者の割合は、2015年において26.8%とされている。2060年には39.9%にのぼり、働く人1人が子供1人と高齢者1人を支える社会になると予想されている。年齢階層別障害者数の推移⁽²⁾に注目すると、高齢になるにつれて身体障害者の割合が高いことから、高齢化により身体障害者数は今後も更に増加していくことが予想される。そのため、身体障害者の社会参加や自立を促すために、身体障害者のための移動手段が必要となる。身体障害者が生活を楽しめ、意欲的に社会に参加するために、自由度と快適性の高い移動手段として自動車が最適である。本研究では、重度の身体障害者が自動車を操縦できるジョイスティック式自動車運転支援装置に着目した。

1-2 目的

本研究は、重度障害者向けに開発されたジョイスティック式自動車運転支援装置の安定性向上を目指す。そのために、ジョイスティックの感度(ジョイスティック操舵角に対するハンドル操舵角)の観点から車両の走行安定性を検証する。本稿では、車両の走行安定性を確保するために、車両速度ごとにジョイスティック感度を決定する方法を提案する。初めに、ジョイスティックによる車両のステアリング操作を模擬した車両走行シミュレーションを構築する。次に、最適制御を行うための重み行列を自動的に決定する拘束条件式を、車両モデルとドライバの操舵モデルから導く。求めた重み行列から最適制御ゲインが算出され、そのゲインからジョイスティック感度が計算できる。最後に、計算されたジョイスティック感度を車両走行シミュレーションに入力することで、車両の走行安定性について検証する。

2. シミュレーションおよび最適制御の概要

2-1 車両走行シミュレーションの概要

ジョイスティック操舵による車両走行シミュレーションの概要を説明する。図1にシミュレーションのブロック線図を示す。本シミュレーションでは、目標コース y_r と車両予測位置 y との偏差 ε から、ドライバのジョイスティック操舵モデルを用いてジョイスティック操舵角 δ_j を決定する。

次に、設定されたジョイスティック感度を用いてジョイスティック操舵角をハンドル操舵角 δ_{sw} へ変換する。そして、ステアリングギア比 N を用いてハンドル操舵角から車両前輪舵角 δ_f を算出し、これを車両モデルへ入力することで車両の挙動をシミュレーションする。

図2(a)にシミュレーションに用いる車両の等価二輪モデルを示す。等価二輪モデルとは、4つのタイヤに働く横方向きの力を仮想の前後二輪にまとめて表現したものである。本稿では、車両速度 V が一定であること、操舵できる車輪は前輪のみであることを想定し、車両の運動方程式は式(1)で表される。

$$\begin{aligned} F_f &= -C_f \beta_f, & F_r &= -C_r \beta_r \\ \beta_f &= \beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta_f, & \beta_r &= \beta - \frac{l_r}{V} \gamma \\ mV(\dot{\beta} + \gamma) &= 2F_f + 2F_r, & I_z \dot{\gamma} &= 2F_f l_f - 2F_r l_r \end{aligned} \quad (1)$$

ただし m は車両重量、 β は車両の重心横滑り角、 γ はヨーレート、 $F_{f,r}$ は前後のタイヤのコーナリングフォース、 I_z はヨー慣性モーメント、 $l_{f,r}$ は重心から前後のタイヤまでの距離、 $C_{f,r}$ は前後のタイヤのコーナリングパワ、 $\beta_{f,r}$ は前後のタイヤの横滑り角を表す。

図2(b)にシミュレーションで用いるドライバの一次予測モデルを示す⁽³⁾。目標コースと車両予測位置との偏差に応じたフィードバックから、一次予測モデルは式(2)で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= y_r(t+T_p) - y(t+T_p) \\ \delta_j(s) &= K_1(T_D \cdot s + 1) \cdot e^{-T_L \cdot s} \cdot \varepsilon(s) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 K_1 はドライバ操舵ゲイン、 T_D は微分定数、 T_L は無駄時間、 T_p は前方注視時間を表す。

ハンドル操舵角はジョイスティック感度、一次遅れを加え式(3)で表される。

$$\delta_{sw}(s) = \frac{K_2}{T_2 \cdot s + 1} \cdot \delta_j(s) \quad (3)$$

ただし、 K_2 はハンドル操舵ゲイン(ジョイスティック感度)、 T_2 は時定数である。

ハンドル操舵角から車両前輪舵角までの方程式はステアリングギア比を用いて、次項の式(4)で表される。

$$\delta_f(s) = \frac{1}{N} \cdot \delta_{sw}(s) \quad (4)$$

この車両前輪舵角を車両モデルへ入力することで、ジョイスティック操舵による車両の挙動をシミュレーションする。

2-2 最適制御プログラムの概要

最適制御の重みを自動で計算する方法を説明する。図3(a)に最適制御を用いる車両モデルを示す。車両の進行方向を x 軸方向とし、 θ は微小と考えると、 y 軸方向の運動および旋回方向運動は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= 2F_f + 2F_r \\ I_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= 2F_f l_f - 2F_r l_r \end{aligned} \quad (5)$$

車両の並進運動について、車両の速度ベクトルの方向を γ とすると x 軸方向、 y 軸方向成分は式(6)で表される。

$$\begin{aligned} V \cos \gamma &\approx V \\ V \sin \gamma &\approx V \gamma \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)について、 x 軸方向速度成分は V で一定とみなし、 y 軸方向速度成分は式(7)となる。

$$\frac{dy}{dt} = V \gamma \quad (7)$$

また、 γ は車両座標系では $\gamma = \beta + \theta$ であるから式(7)は式(8)となり、これより β は式(9)となる。

$$\frac{dy}{dt} = V(\beta + \theta) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \theta \quad (9)$$

車両本体の回転角速度は絶対座標系では $d\theta/dt$ である。車両座標系では γ であるので $\gamma = d\theta/dt$ となる。以上より式(10)の横滑り角は式(10)で表される。

$$\begin{aligned} \beta_f &= \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \theta + \frac{l_f}{V} \frac{d\theta}{dt} - \delta_f \\ \beta_r &= \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \theta - \frac{l_r}{V} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

これを式(1)のコーナリングフォースに代入すると式(11)となる。

$$\begin{aligned} F_f &= -C_f \left(\frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \theta + \frac{l_f}{V} \frac{d\theta}{dt} - \delta_f \right) \\ F_r &= -C_r \left(\frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \theta - \frac{l_r}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

したがって式(5)は式(12)となる。

$$\begin{aligned} m \ddot{y} &= -\frac{2}{V} (C_f + C_r) \dot{y} - \frac{2}{V} (C_f l_f - C_r l_r) \dot{\theta} + 2(C_f + C_r) \theta + 2C_f \delta_f \\ I_z \ddot{\theta} &= -\frac{2}{V} (C_f l_f - C_r l_r) \dot{y} - \frac{2}{V} (C_f l_f^2 + C_r l_r^2) \dot{\theta} + 2(C_f l_f - C_r l_r) \theta + 2C_f l_f \delta_f \end{aligned} \quad (12)$$

式(13)に示す行列 \mathbf{x} , \mathbf{u} , \mathbf{A} , \mathbf{B} を用いれば、式(12)は式(14)で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} y \\ \theta \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \delta_f \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2}{m}(C_f + C_r) & -\frac{2}{mV}(C_f + C_r) & -\frac{2}{mV}(C_f l_f - C_r l_r) \\ 0 & \frac{2}{I_z}(C_f l_f - C_r l_r) & -\frac{2}{I_z V}(C_f l_f - C_r l_r) & -\frac{2}{I_z V}(C_f l_f^2 + C_r l_r^2) \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2C_f}{m} \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (14)$$

ここで最適制御について考えると、式(15)の評価関数 $J^{(4)}$ を最小とするような重み行列 \mathbf{Q} , \mathbf{R} により最適制御ゲイン \mathbf{K} が求められ、式(16)が導かれる。

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \\ \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (16)$$

次にドライバモデルについて、式(2)の無駄時間の項 $e^{-T_L s}$ を近似、偏差 ε を図3(b)に示す図から考えるとジョイスティック操舵角は式(17)で表される。

$$\delta_f(s) = K_1 (T_D \cdot s + 1) (1 - T_L \cdot s) (y + L \cdot \theta) \quad (17)$$

ただし、 L は前方注視点距離である。式(17)を式(3)に代入して、その結果を式(4)に代入して整理すると、式(18)および式(19)が導かれる。

$$\delta_f(t) = K_0 \{ y + L \cdot \theta + (T_D - T_L) \cdot \dot{y} + (T_D - T_L) L \cdot \dot{\theta} \} \quad (18)$$

$$K_0 = \frac{1}{N} \cdot \frac{K_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{1}{T_2} t} \cdot K_1 \approx \frac{1}{N} \cdot \frac{K_2}{T_2} \cdot K_1 \quad (19)$$

ここで式(16)と式(18)を恒等式としてみなすと、式(20)の拘束条件式が導かれる。

$$\begin{cases} a = K_0 \\ b = K_0 \cdot L \\ c = K_0 \cdot (T_D - T_L) \\ d = K_0 \cdot (T_D - T_L) \cdot L \end{cases} \quad (20)$$

式(20)において、求めたい数値は K_0 および T_D なので、式(20)から式(21)のように変形する。

$$\begin{cases} b/a - L = D_1 \\ d/c - L = D_2 \end{cases} \quad (21)$$

式(21)の差 $D_{1,2}$ をゼロとするため、式(15)の q_2 , q_4 を次項の式(22)のように決定する最適制御プログラムを構築した。

$$\begin{cases} D_1 < 0 \text{かつ} D_2 < 0 \text{の時} \\ \quad q_2 = q_2 + 10 \cdot D_1, \quad q_4 = q_4 + D_2 \\ D_1 > 0 \text{かつ} D_2 < 0 \text{の時} \\ \quad q_2 = q_2 - 10 \cdot D_1, \quad q_4 = q_4 + D_2 \\ D_2 > 0 \text{の時} \\ \quad q_4 = q_4 - D_2 \end{cases} \quad (22)$$

以上により最適制御ゲインが算出され、式(19)および式(20)を用いてジョイスティック感度および微分定数を計算する。

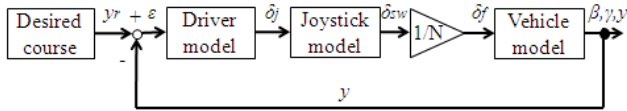
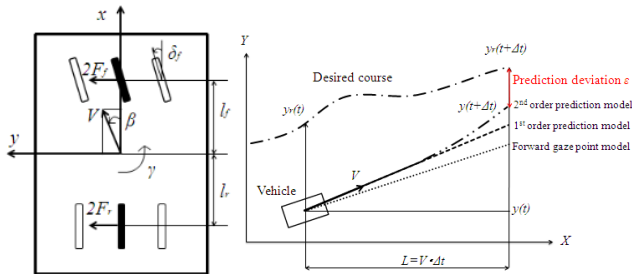
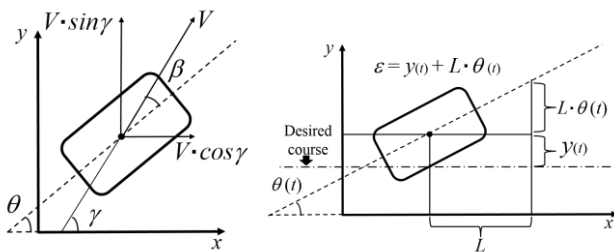


Fig. 1 Joystick simulation block diagram



(a) Vehicle model (b) Driver model
Fig. 2 Simulation model



(a) Vehicle model (b) Driver model
Fig. 3 Model for optimal regulator

3. シミュレーション解析

本章では、最適制御から算出されたジョイスティック感度および微分定数を用いた車両走行シミュレーションを行う。車両横変位およびジョイスティック操舵変位の挙動により、最適制御から算出されたジョイスティック感度で車両が安定に走行するかを検証する。ドライバのパラメータである前方注視時間と無駄時間は、経験的に得られた値とする⁽⁵⁾。車両速度 V は 15, 30, 50, 70, 90, 110 km/h とし、目標コースを 0.3 m と一定、車両重心横位置の初期位置を 0 m とし、車両走行シミュレーションを行う。

初めに、表 1 に示すドライバおよび車両パラメータで最適制御を行い、ジョイスティック感度および微分定数を決定すると図 4 に示す結果となる。図 4 のジョイスティック感度を用いて、車両走行シミュレーションを行った結果が次項の図 5 から図 10 である。図 5 から図 10 より、車両速度の低速度域から高速度域において、車両の挙動およびジ

ョイスティックの操舵挙動が安定していることが確認できる。これより、式(22)によって重みを自動的に計算した最適制御により得られたジョイスティック感度が、車両の安定走行に寄与していると考えられる。

一般に、車両速度が速くなるほど車両の操舵量を減らすことで、車両の挙動は安定することが知られている⁽³⁾。そのため、ジョイスティック感度も車両速度ごとに低下させた方が、車両の挙動が安定すると思われる。今回の結果では図 4 のようにジョイスティック感度が一定においても、低速度域から高速度域まで車両の挙動が安定した。これは、正定行列となる最適制御の重み行列 Q の成分が負になることが原因であると考えられる。重みを決定する条件は、今後さらに検討を行っていく。

4. 結言

車両モデルとドライバモデルから最適制御の重み行列設定のための条件式を導き、最適制御によって算出されたジョイスティック感度および微分定数での車両走行シミュレーションを行った。その結果、車両の挙動が安定することが確認できた。

今後は、実験車両から得られたジョイスティック感度と最適制御によって算出されたジョイスティック感度を比較、検討する。また、正定行列となる重み行列 Q の成分が負になる原因を解明し、車両走行シミュレーションを行う予定である。

Table 1 Simulation parameters

Definition	Symbol	Value	Unit
Desired lateral displacement	y_r	0.3	m
Initial lateral displacement of vehicle	y_0	0	m
Vehicle mass	m	1750	kg
Length from center of gravity to front wheel	l_f	1.4014	m
Length from center of gravity to rear wheel	l_r	1.3236	m
Yaw moment of inertia	I_z	3240	kg·m ²
Driver steering gain	K_1	1.0	rad/m
Joystick sensitivity	K_2	variable	-
Driver dead time	T_L	0.2	s
Differential constant	T_D	$c/a+T_L$	s
Joystick time constant	T_2	0.2	s
Velocity	V	15~110	km/h
Preview time	T_p	L/V	s
Cornering power of front wheel	C_f	47760	N/rad
Cornering power of rear wheel	C_r	60683	N/rad
Stability factor	k	0.00054	rad·s ² /m ²

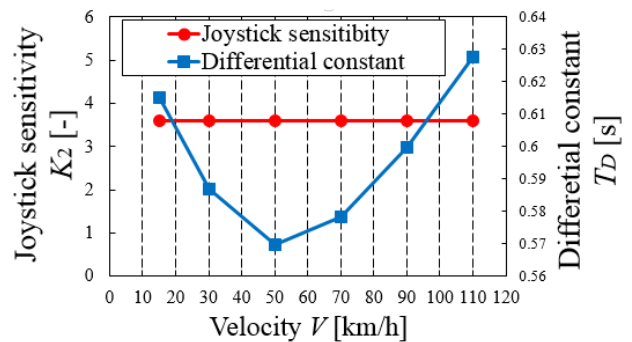
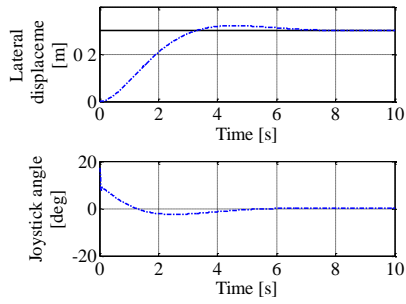
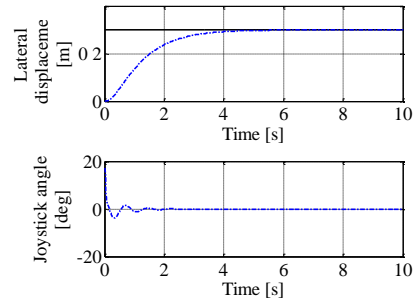
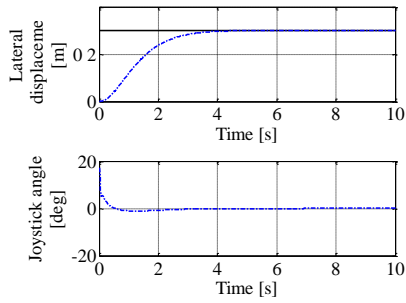
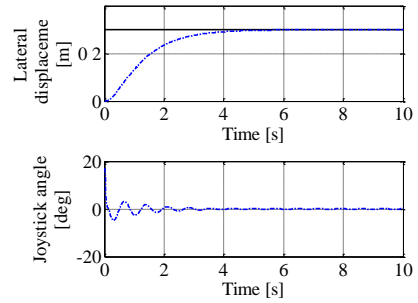
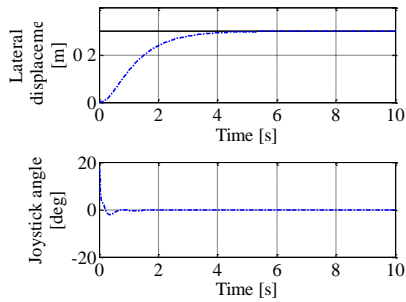
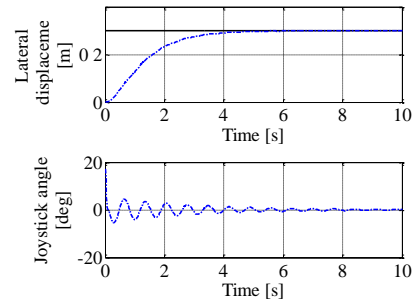


Fig. 4 Joystick sensitivity and differential constant varying with velocity

Fig. 5 Simulation result ($V=15, K_2=3.6, T_D=0.615$)Fig. 8 Simulation result ($V=70, K_2=3.6, T_D=0.578$)Fig. 6 Simulation result ($V=30, K_2=3.6, T_D=0.587$)Fig. 9 Simulation result ($V=90, K_2=3.6, T_D=0.600$)Fig. 7 Simulation result ($V=50, K_2=3.6, T_D=0.570$)Fig. 10 Simulation result ($V=110, K_2=3.6, T_D=0.628$)

参考文献

- (1) 内閣府, 平成25年度版, 高齢社会白書(全体版).
- (2) 内閣府, 平成25年度版, 障害者白書(全体版).
- (3) 安部正人, 人-自動車系のモデル,
<https://www.jsae.or.jp/~dat1/mr/motor20/mr20042012.pdf>,
 (2015/06/30閲覧).
- (4) 尾形克彦, 石川潤, 制御のためのMATLAB, 東京電機大学出版局, pp. 413-420, 2010.
- (5) 社団法人日本機械学会編, 車両システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, pp. 98-100, 1999.