人間の動きを考慮した倒立振り子型 パーソナルモビリティビークルの安定性解析*

中野 公彦^{*1}, 中森 大樹^{*2}, 鄭 仁成^{*1}, 大堀 真敬^{*1}, 須田 義大^{*3}

Stability Analysis on a Two-Wheeled Inverted Pendulum Type Personal Mobility Vehicle Considering Human Motion

Kimihiko NAKANO, Daiki NAKAMORI, Rencheng ZHENG^{*1},
Masanori OHORI and Yoshihiro SUDA

^{*1} The University of Tokyo, Institute of Industrial Science
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 157-8505 Japan

Stability of a two-wheeled inverted pendulum vehicle was evaluated by using rider-vehicle modeling, electromyography of leg's muscle of rider, and subjective evaluation. A rider and the vehicle are synthetically modeled as a series-type double inverted pendulum. Utilizing auto-regressive exogenous (ARX) model method, correlative relations were found between control gains and stability of the vehicle that achieves better ride comfort. The experimental result shows that the higher the control gains, the smaller the activities of leg's muscles. However, according to subjective evaluation of ride comfort, higher gains did not always achieve better ride comfort. Moreover, the rider-vehicle model has no unstable poles, even when the vehicle model has an unstable pole. The poles of the rider-vehicle model had tendency to have bigger negative real numbers, which suggests stability of the vehicle can be evaluated by the positions of the poles of the rider-vehicle model. Through identification of the rider-vehicle model, the control gains of the rider's posture were calculated. It was found that the control gain against the rider's posture is dominant, and the higher the control gains of vehicle, the smaller the gain against the rider's posture. The result shows stability of the vehicle can be evaluated by the control gains against the rider's posture.

Key Words : Human Motion, Personal Mobility Vehicle, Stability Analysis

1. 緒 言

歩行空間や都市内の移動は、我々の生活において重要な要素である。持続的発展の観点から、そのような移動は、人にも環境にも優しいものであることが求められる。歩行空間や都市内の移動の新しい切り口として、コンパクトで利便性の高いパーソナルモビリティ・ビークル (Personal Mobility Vehicle, PMV) が、着目されてきた。PMV とは、歩行の延長として利用されうる移動ツールで、人と環境に優しい動力で、快適かつ効率的な近距離移動を実現し、歩道や施設内での歩行者混在環境で安全に使用され、公共交通や自動車に持ち込める可搬性があることが期待される。

PMV の中でも特に Segway 社の Personal Transporter、トヨタ社の winglet⁽¹⁾、GM 社の EN-V⁽²⁾ のような倒立振り子型 PMV が注目されている。これは倒立振子の安定化制御を利用したモビリティである。倒立振り子型 PMV の特徴として、走行時の占有スペースが小さく、低速でも安定し、自転車よりも歩行者に対する親和性が高い⁽¹⁾。また

* 原稿受付 2012 年 10 月 26 日

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒160-0016 東京都目黒区駒場 4-6-1)

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科

^{*3} 正員, フェロー, 東京大学生産技術研究所

E-mail: topzrc@iis.u-tokyo.ac.jp

自動車による短距離移動の一部を倒立振り子型 PMV の利用に置き換えた場合、CO₂の排出量が減少することがわかっている⁽³⁾。このように倒立振り子型 PMV は人と環境の両方に優しいモビリティであることが示されてきた。

しかし、モビリティとして重要な操作のしやすさ、乗り心地についての研究は少ない。倒立振り子の安定性についての研究は多くなされてきたが、人が乗ることで生じる様々な要素についてあまり触れられてこなかった。人が乗った状態を考慮した倒立振り子型 PMV の研究としては、運転者の姿勢角度の挙動から乗りやすさの分析が行われているものがある⁽⁴⁾。しかし、これまでに乗りやすさと車両制御の関係が定量的に示されてこなかった。

また著者らが、数種類の倒立振り子型 PMV に乗り人が運転している場面を観察したところ、倒立振り子型 PMV の姿勢制御と人が無意識もしくは意識的に行うバランス保持のための運動がうまく協調していないと考えられる状態が見受けられた。例えば、静止状態において前後に振動的に傾く、もしくは走行時に車両の傾きを一定に保てないことにより、一定のスピードで走行できないという状態である。

このような倒立振り子型 PMV の現状を踏まえると、その乗り心地を向上させるには人と車両の両方を含めた系を考慮する必要があると考えられる。すなわち、人と車両のモデルを構築し、それに基づき制御システムを設計することである。

そこで本研究は、先ず倒立振り子型 PMV のプロトタイプを製作し、実験を行う。実験においては車両の制御ゲインを変化させ、車両の安定性を極配置で表し、乗り心地を下肢の筋肉の活動量で評価する。次に、人-車両系のモデルを構築し、どのような制御を行えば乗り心地を向上させられるのかを、被験者を用いた実験から検証する。

2. 手 法

2・1 PMV モデリング

倒立振り子型 PMV は倒立振り子の安定化制御の原理を利用した 2 輪のモビリティである。倒立振り子型 PMV を図 1 のようにモデル化した。倒立振り子型 PMV は不安定な倒立振り子を、ピッチ角度 θ_1 をフィードバックし安定化制御トルクを出力することで安定化させる仕組みを用いている。PMV の車軸周りの回転および車体の並進の運動方程式は次のように表せる。

$$(J_1 + m_1 l_1^2) \ddot{\theta}_1 + m_1 l_1 \ddot{x} - m_1 g l_1 \theta_1 = 0 \quad (1)$$

$$m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 + (m_0 + m_1) \ddot{x} = \frac{1}{r} \tau_u - \mu_0 (m_0 + m_1) g \quad (2)$$

Fig.1 Vehicle model.

ここでの記号の意味は以下のとおりである.

- m_1 : 人間の体重
- m_0 : 車体の質量
- l_1 : 車軸から車体重心までの距離
- J_1 : 車体の慣性モーメント
- g : 重力加速度
- r : 車輪半径
- μ_0 : 転がり抵抗係数
- θ_1 : 車体の傾き
- x : 進行方向位置
- τ_u : 安定化制御トルク

倒立振子型 PMV の制御はジャイロセンサより得られた角度 θ 及び角速度 $\dot{\theta}$ をフィードバックする比例・微分制御を行った. 指令トルク u は下のとおりに算出した. ここで k_p 及び k_d はそれぞれ角度, 角速度に対するフィードバックゲインである.

$$\tau_u = k_p \theta_1 + k_d \dot{\theta}_1 \quad (3)$$

実際に用いる制御はハンドルの操舵角をフィードバックし, 左右モータのトルク差を利用して旋回するようにし, 次のように与えた.

$$\begin{cases} \tau_{uR} = \left(\frac{k_p}{2} \theta_1 + \frac{k_d}{2} \dot{\theta}_1 \right) + k_h \theta_h \\ \tau_{uL} = \left(\frac{k_p}{2} \theta_1 + \frac{k_d}{2} \dot{\theta}_1 \right) - k_h \theta_h \end{cases} \quad (4)$$

ここで, τ_{uR} , τ_{uL} はそれぞれ左右モータの出力トルク, k_h はハンドルの操舵ゲイン, θ_h はハンドルの操舵角である. 式(1), (2)の運動方程式より PMV の状態方程式は次のように表される.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\tau_u + \mathbf{C}\mu_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{m_1 g l_1 (m_0 + m_1)}{(J + m_1 l_1^2)(m_0 + m_1) - m_1^2 l_1^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{m_1 l_1}{(J + m_1 l_1^2)(m_0 + m_1) - m_1^2 l_1^2} \cdot \frac{m_1 l_1}{r} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{m_1 g l_1 (m_0 + m_1)}{(J + m_1 l_1^2)(m_0 + m_1) - m_1^2 l_1^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tau_u = Kx = \begin{bmatrix} k_p & k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで転がり抵抗係数 μ_0 を無視し、状態方程式を次のように書き換えた。

$$\dot{x} = (A + BK)x \quad (11)$$

2・2 PMV の設計

倒立振り子型 PMV の制御システムを図 2 に示す。更に、製作した倒立振り子型 PMV のプロトタイプの様式図を図 3 に示す。ジャイロセンサが車体のピッチ角とピッチ角速度を取得し、コントローラがモータに出力させるトルクを算出、そしてモータを駆動させ、車輪を回転させる。コントローラにはノート PC を利用した。ジャイロセンサは、Crossbow AHRS400、モータは、maxonmotor 250W 42V brushless motor EC45、モータアンプは、maxonmotor EC motor amp を用いた。バッテリーは、nichido lithium ion battery LB-24V-11AH、をそれぞれ使用した。

Fig.2 Schematic flow of vehicle control.

Fig.3 Schematic diagram of the vehicle.

3. PMV の安定性と乗り心地

3・1 PMV 安定性の評価実験

倒立振子型 PMV は前項の図 1 のようにモデル化することができるが、人がそこに乗ることで系が大きく変わる。したがって、PMV 単体のモデルの安定性を高めることが必ずしもより良い乗り心地を達成することにはつながらないと考えられる。実際に被験者を用いて乗車実験を行い、乗り心地の良さを下肢の筋活動、車両の運動、主観的な官能の 3 つで評価する。それによって一連のフィードバックゲインに対して乗り心地を評価することを目的とする。PMV の安定性は極配置によって表される。PMV の固有値 s は次の行列式から求められる。

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} + \mathbf{BK})| = 0 \quad (12)$$

$$s = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{1}{D} \cdot \frac{m_1 l_1}{r} k_d \right\} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left\{ \frac{1}{D} \cdot \frac{m_1 l_1}{r} k_d \right\}^2 - \frac{4(m_0 + m_1)}{D} \left\{ \frac{m_1 l_1}{r(m_0 + m_1)} k_p - m_1 g l_1 \right\}} \quad (13)$$

$$D = (J + m_1 l_1^2)(m_0 + m_1) - m_1^2 l_1^2 \quad (14)$$

この固有値の実部と虚部をプロットすることで極配置が求められる。すべての極の実部が負であれば安定で、負の方向へ絶対値が大きいほど安定への収束が速くなる。また極が虚数の値を持つ場合、系は持続的な振動を続ける。

ここに k_d は $17 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$ で固定し、 k_p のみを i から iv まで順に $47, 64, 81$ と 98 Nm/rad と変えた。フィードバックゲインにおける PMV の極配置を図 4 に示す。ここでも同様にフィードバックゲインの値は PMV のモデルが実軸上正の値である不安定極を持つものから、不安定極を持たないものまでを含むように設定してある。なお不安定極を持つフィードバックゲインにおいて PMV 単体は安定でなく、倒立状態を保つことはできない。

Fig.4 Pole assignment of vehicle model.

倒立振子型 PMV に乗車中のドライバーの下肢の筋活動と車両運動を計測した。被験者は 20 代の男性 9 名である。被験者は一定の指示のもと PMV 乗車の練習を行い、その後に「60 秒間定位置に留まる」という課題を行った。一定速度で走行している際には、安定性に関しては、一定箇所に留まると同じ力学系になり、また加減速時でも、平衡点がオフセットされるだけで、本質的には大きな違いがないと考え、定位置に留まることを実験の条件にした。これを図 4 に示す 4 種類のフィードバックゲインのセット (i ~ iv) に対して行った。図 4 はそれぞれフィードバックゲインの制御を行った際の極の位置を示す。i ~ iii は不安定極を含んでいる。

下肢の筋活動を計測するため、被験者の体表面に電極を貼り付け、双極導出で筋電位を測定した。計測する筋肉は、図 5 の左右前脛骨筋および左右大腿四頭筋とした。筋電位はサンプリング周波数 1 kHz で記録した。また、車両の運動は、PMV 車体のピッチ角、ピッチ角速度、および進行方向への加速度を計測した。図 6 に実験の様子を示す。

課題のこなしやすさについて、5 段階のアンケートによって被験者が評価を行った。定位置への留まりやすさを尋ね、留まりやすいを 5、留まりにくいを 1 として評価した。

Fig.5 Quadriceps femoris and tibialis anterior muscles.

Fig.6 Scene of the experiment.

3・2 筋電位による乗り心地の評価

倒立振子型 PMV のプロトタイプを製作し、それを用いて実験を行い、フィードバックゲインの調節による車両自体の安定性の変化に対して、乗り心地がどのように変化するかを検証した。そのために下肢の筋活動、車両運動、主観的官能の3つによる評価をそれぞれ、筋電位の計測、進行方向加速度の計測、アンケートによって行った。筋電位の信号は体動の影響とノイズを除くため 10Hz 以下の信号と 500Hz 以上の信号をフィルタにより除いた。ここで例として1人の被験者のゲイン番号2における、左の前脛骨筋と大腿四頭筋の筋電位データを図7、図8に示す。

筋電位は個人差があるため、評価に絶対値を用いることはできない。ここでは、各被験者の各筋肉の筋電位を、基準の運動(屈伸運動)を行う際の各被験者の各筋肉の筋電位の最大値で除することによって、正規化を行う⁽⁵⁾。ある時刻 t における正規化された筋電位 (%) を $X(t)$ とすると、基準運動時の最大筋電位が $EMG_{\max}$ の時、次式のような関係になる。

$$X(t) = \frac{EMG(t)}{EMG_{\max}} \times 100 \quad (15)$$

正規化された筋電位の RMS 値を図 9, 10 に示す. 下肢の筋活動量はフィードバックゲインが大きいほど小さくなる傾向にあり, スコアも高く乗り心地が良いとえることがわかった. また, ゲインが小さい時 (i, ii など) は, PMV 自体の不安定性が高く, 搭乗者の動きが安定化に寄与する割合が高くなっていると思われる. そのため, ゲインが小さい時の方が, 標準偏差が大きくなる傾向がある. アンケート結果を図 11 に示す. 5 段階評価の平均値を示している. フィードバックゲインが大きいほど, アンケート結果が良いことがわかる.

Fig.7 EMG signal of left quadriceps femoris muscle

Fig.8 EMG signal of left tibialis anterior muscle

Fig.9 Mean RMS value of left quadriceps femoris muscle.

Fig.10 Mean RMS value of right quadriceps femoris muscle.

Fig.11 Mean scores of ride comfort by questionnaire.

4. PMV－運転者系の安定性解析

4・1 PMV－運転者系のモデリング

運転者を含めた倒立振り型 PMV モデル（以下 PMV－運転者モデル）として図 12 のモデルを提案する．これは図 1 の倒立振り型 PMV モデルの上に倒立振子で表された運転者が乗ったものとする．搭乗者は剛体と考え、PMV との接点（足首を想定）にて、能動的にトルクを発生していると考ええる．

Fig.12 Rider-vehicle model.

ここで、 m_0 , m_1 , m_2 はそれぞれ両車輪, 両車輪を除いた車体, 運転者の質量, l_1 は車輪軸から車体重心まで, l_2 は車体上面から運転者の重心までの距離, J_0 , J_1 , J_2 はそれぞれ両車輪, 両車輪を除いた車体, 運転者の重心周りの慣性モーメント, τ_1 は運転者がPMVに加えるトルク, θ_2 は運転者の姿勢角である.

ラグランジアンを用いて運動方程式を導出する. ここでは転がり抵抗係数を無視する. 車輪, 車体, 運転者についての運動エネルギー, 位置エネルギーをそれぞれ T_0 , U_0 , T_1 , U_1 , T_2 , U_2 とすると次のように表せる.

$$T_0 = \frac{1}{2} m_0 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_0 \left(\frac{\dot{x}}{r} \right)^2 \quad (16)$$

$$U_0 = 0 \quad (17)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{d}{dt} (x + l_1 \sin \theta_1) \right)^2 + \frac{1}{2} m_1 \left\{ \frac{d}{dt} (l_1 \cos \theta_1) \right\}^2 \quad (18)$$

$$U_1 = m_1 g l_1 \cos \theta_1 \quad (19)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{d}{dt} (x + 2l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2) \right)^2 + \frac{1}{2} m_2 \left\{ \frac{d}{dt} (2l_1 \cos \theta_1 + l_2 \sin \theta_2) \right\}^2 \quad (20)$$

$T=T_0+T_1+T_2$, $U=U_0+U_1+U_2$ とすると, ラグランジュの運動方程式は次のように表せる.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{r} \tau_0 \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} + \frac{\partial U}{\partial \theta_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} = \tau_1 \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} + \frac{\partial U}{\partial \theta_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_2} = -\tau_1 \quad (23)$$

これらより, x , θ_1 , θ_2 についての運動方程式が表される.

運転者がPMVに与えるトルク τ_1 はPMVの速度とピッチ角, 運転者の姿勢の影響を受けるとし, 以下のようにモデル化した.

$$\tau_1 = c_{h0}(\dot{x} - v) + k_{h1}\theta_1 + c_{h1}\dot{\theta}_1 + k_{h2}\theta_2 + c_{h2}\dot{\theta}_2, \quad (24)$$

ここで c_{h0} , k_{h1} , c_{h1} , k_{h2} , c_{h2} はそれぞれ制御ゲインで, v は目標速度である.

4・2 PMV—運転者系の同定

PMV—運転者モデル構築のためのシステム同定において ARX(Auto-Regressive eXogenous)モデルを用いる. あるシステムの入出力関係は次のように差分方程式によって記述される⁽⁶⁾.

$$\begin{aligned}
 & y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_{n_a} y(k-n_a) \\
 & = b_1 u(k-1) + \cdots + b_{n_b} u(k-n_b) + w(k)
 \end{aligned} \tag{25}$$

ここで $y(k)$ は時間ステップ k における出力信号, $u(k)$ は時間ステップ k における入力信号, $a_1 \sim a_{n_a}$, $b_1 \sim b_{n_b}$ は定数パラメータ, $w(k)$ は白色雑音である. ここでパラメータベクトル θ およびデータベクトル $\varphi(k)$ を次のように設定する.

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \tag{26}$$

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T \tag{27}$$

モデルの運動方程式をラプラス変換することにより目標速度 v から PMV ピッチ角 θ_1 への伝達関数 $G(s)$ を求めた. 伝達関数 $G(s)$ を次のように表す.

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \tag{28}$$

計算により $A(s)$ と $B(s)$ の次数は 5 と 3 となり, それぞれ ARX モデルの分母と分子の次数とした. 最小 2 乗法によって求められた ARX モデルの伝達関数を $G_{arx}(q)$ とし, 次のように表す.

$$G_{arx}(q) = \frac{B_{arx}(q)}{A_{arx}(q)} \tag{29}$$

離散系で表された $G_{arx}(q)$ をゼロ次ホールド法により連続系で表す.

$$G_{arx}(s) = \frac{B'_{arx}(s)}{A'_{arx}(s)} \tag{30}$$

次式より伝達関数 $G(s)$ と $G_{arx}(s)$ の極配置が等しくなるよう係数を比較することで式(23)に示される τ_i の各フィードバックゲインを求める⁽⁷⁾.

$$A(s) = A'_{arx}(s) \tag{31}$$

出力データ (PMV のピッチ角) と入力データ (定速走行指令) から ARX モデルによる同定を行った. 実験協力者には, 静止状態から一定速度 (1m/s) で走行し, 一定時間後の教示によって静止するように指示を出し, このステップ状の指令値を入力として扱った. 図 13 に実測値と同定結果の例を示す. 人が介在している系であるため, 一般的な同定結果と比較すると一致しているとは言い難いところもあるが, 波長には一致が見られており, 本稿の焦点である極の位置は同定できていると思われる.

Fig.13 Pitch angles of the experiment and the calculation of the identified rider vehicle model.

4・3 PMV－運転者系の極配置

図 14 にゲイン i ~iv において同定された PMV－運転者モデルの極配置を示す．なおこれらのデータは，被験者が十分走行に慣れた，それぞれのゲインでの最終走行のものを使用した．PMV－運転者モデルは 4 つの極を持っている．ここではすべての極の実数値が負になっており，PMV は運転者の操作により安定になっていることがわかる．また，ゲイン iii，iv においては 1 人の被験者の複数の極が -0.5 よりも小さい実数を持ち，他のゲインでは見られない極配置の特徴が見られる．特にゲイン iii，iv の極はゲイン i，ii の極と比べてより大きな負の実数を持つ傾向にある．アンケート結果よりゲイン i ~iv においてゲインが大きくなるほど乗り心地が良いことが分かっている．これより PMV－運転者モデルの極が負の大きい実数を持つほど乗り心地が良いと考えることができる．

(a) gain i

(b) gain ii

Fig.14 Poles of rider-vehicle models.

4・4 運転者がPMVに与えるトルク

次に同定結果より計算した各被験者の c_{h0} , k_{h1} , c_{h1} , k_{h2} , c_{h2} の値を示す. 図 15 にそれぞれゲイン i ~iv の値を示す. これらの値より, 運転者が PMV に与えるトルクにおいて, 運転者の姿勢角のフィードバックゲインである k_{h2} の値が大きく支配的であることが分かる. k_{h2} 以外のゲイン, 特に c_{h1} および c_{h2} の絶対値は小さく, 被験者によって符号が反転している. これはシステム同定の誤差があることと, ゲインは実際一定ではなく時間によって変化し続けるものであることが原因であると考えられる. 次に k_{h2} の値の妥当性について考える. k_{h2} を $5.0 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ とすると, 単位変換をすることで $87 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{deg}$ となる. PMV は高々 $1\sim 2$ 度しか傾かないため, k_{h2} はハンドルを握った運転者が体重移動によって加えることのできる値であると考えられる.

Fig.15 Calculated gains

図 16 に各ゲインに対する全被験者が行った 4 回の実験から算出された k_{h2} の平均値を示す。ここで k_{h2} は各被験者が行ったデータ中の最大値で割ることによって正規化されている。ゲイン v での値を除けば PMV のゲインが大きくなるほど k_{h2} は減少幅を減らしながら小さくなっていることが分かる。

Fig.16 Means of gain k_{h2}

5. 結 言

本研究では、PMV—運転者モデルを提案し、実験によって以下の結論を得た。

- (1) PMV—運転者モデルの極配置は、すべての車両ゲインにおいて、不安定極を持たず、PMV 自体が不安定であっても運転者が安定化させていることが示された。
- (2) 倒立振り型 PMV の極は運転者が行う操作によって大きく遷移し、その運動を扱う場合は運転者を含めた系でダイナミクスを考える必要があることを示した。
- (3) PMV—運転者モデルの系全体が安定であるほど乗り心地が良いと判断できる可能性を示した。運転者が PMV に加えるトルクの運転者の姿勢角に対するフィードバックゲインの値が小さいほど PMV の乗り心地は良くなる。

文 献

- (1) Nakagawa, C., Nakano, K., Suda, Y., Kawarazaki, Y. and Kosaka, Y., “Influence of Personal Mobility Vehicles on Pedestrian Flows”, 交通・物流部門大会講演論文集 (2008), pp.365-368.
 - (2) Priyantha M., Connected Autonomous Driving: Electric Networked Vehicle (EN-V) Technology.
 - (3) Suda, Y., Nakano, K., Tanaka, S., Hirasawa, T., Makino, H. and Nakagawa, C., Hirayama, Y., “Prototype Development of Personal Mobility Vehicle and Feasibility Study for Ecological and Aging Society”, 生産研究, Vol. 63, No. 2 (2011), pp. 287-292.
 - (4) Koimya, S., Ishihama, M., Takahashi, T. and Kojima, K., “Motion Analysis and Control of Dual Wheel Vehicle as Human-Machine System”, *The International Conference of Motion and Vibration Control* (2010).
 - (5) 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵, 表面筋電図, 東京電機大学出版局(2006).
 - (6) 足立修一, システム同定の基礎, 東京電機大学出版局 (2009).
 - (7) Johansson R., Magnusson M. and Akesson M, “Identification of Human Postural Dynamics”, *Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 35, No.10 (1988), pp. 858-869.
-