

## 倒立二輪車運転難易度の乗員運動測定による評価と改善

## Motion Analysis and Control of Dual Wheel Vehicle as Human-Machine System

○ 石濱 正男 小宮 聖司 (神奈川工科大)

Masao ISHIHAMA and Seiji KOMIYA (Kanagawa Institute of Technology)

**Abstract:** A prototype of dual-wheel inverted-pendulum vehicle (DIPV) was developed. DIPV has become popular in crowded area because of their compact size and maneuverability. However, no technical report has been published on the control of such a vehicle with its rider on, in spite of the fact that rider's inertia and maneuver skill has strong effect on the vehicle performance. This study tried to simulate the DIPV-rider system movement using a simple dynamical model. The actual DIPV and rider movements were measured using LabView and motion capture system. From the time domain analyses, the effects of rider's maneuvering skill and experience, the control gains were observed.

**Key Words:** welfare engineering, human interface, motion control, dual wheel vehicle

## 1 はじめに

倒立二輪車は米国の空港や大都市での警備などに使われている。これを歩行にやや困難を伴う人々の日常生活に役立てるアイデアは以前から検討されているが、倒立二輪車の操作を、初心者が短時間に心理的負担が少なく習得しにくいという問題があった。乗員の質量は倒立二輪車の質量に比べてはるかに大きい。しかし、従来の倒立二輪車の制御理論には乗員の運動が含まれていない。これが初心者にとっての問題の原因ではないかと考えた。そこで、本研究では乗員車両の組み合わせ系として運動解析を行い、それを試作した倒立二輪車の制御に応用した。その結果を乗員の運動解析をビデオによって追跡するモーションキャプチャシステムによって確認することとした。

## 2. 試作車の設計

## 2-1 目標性能

使用目的は住居近辺での買い物などとして、性能目標は人間の歩行並みに設定した。下記の仕様は、乗員と同時に周囲の人々への安心感を想定して決定した。

乗員の最大質量: 120 kg.            最大速度: 1.5 m/s.  
最大加速度: 0.5 m/s<sup>2</sup>.            最大減速度: 1 m/s<sup>2</sup>.  
旋回半径: その場回転。

## 2-2 設計仕様

スペースの有効利用にはインホイールモータが有利であるが、大きなトルク変動が倒立制御を困難にする。そこで、小型高速のモーターを歯車とチェーンにより減速した。

乗員の意思を制御系に伝え、かつ倒立制御に使うフィードバック信号を得るため、車台からほぼ鉛直に起立するコントロールロッドの、ピッチとロール方向の傾角や傾斜速度を検出する。このロッドはピッチ方向には車台と固定され、ロール方向にだけヒンジを中心として揺動する。揺動に対する復元モーメントをばねで与えて、乗員に横方向の操作感覚を返す。このロッド傾角検出のほうが、センサー系統の較正作業が楽になる利点がある。また、旋回時にロ

ッドを旋回中心方向に倒す操作で体重心が内側に寄り、重力が求心力として有利に作用する。



Fig.1 The dual-wheel built for this study

仕様は図1、表1のとおりである。

Table 1 Design specifications

Tread	0.69 m
Wheel diameter	0.56m
Frame structure	Aluminum honeycum double deck
Control rod motion	Fixed in pitch direction Sway in roll direction
Grip height	0.7 m
Motor power	150W x 2
Electric voltage	12V
Speed reduction ratio	165:1 (55:1 by planetary gears, 3:1 by chain)
Vehicle mass	30 kg
Mass center height	0.2m above wheel center
Rod slant sensor	Hall sensor for pendulum angle
Rod slant rate sensor	Gyro
Controller	Compact RIO by National

## 3. 乗員を含めた倒立二輪車の動力学モデル

## 3-1 乗員・車輪・モーター・フレームで構成するモデル

図2に示すモデルにおいて、フレームは車軸周りに揺動する倒立振り子になっている。車輪はモーターで駆動さ

れてフレームと乗員を前後に加減速し、倒立振り子に反動モーメントを与える。乗員はくるぶしだけでピッチ回転する棒状の剛体で表現し、フレームを腕力で押し引きする。

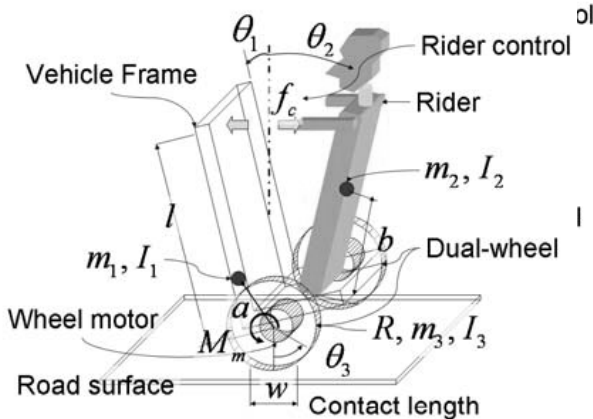


Fig.2 The dynamical model of the dual-wheel vehicle and the rider

ここで使用した記号は下記のとおりである。

$m_i, I_i, i=1,2,3$ : フレーム, 乗員, 車輪の質量と慣性モーメント。

$\theta_i, i=1,2,3$ : フレーム, 乗員, 車輪のピッチ角。

$l$ : コントロールロッドの支点とグリップの間隔。

$b$ : くるぶしと乗員の質量中心の距離

$R$ : 車輪の有効半径。

$f_c$ : 乗員がグリップに加える力でロッドと乗員に垂直

$M_m$ : 駆動系が車輪に与えるモーメント

下の(1)式がこの系の運動方程式となる。

$$\begin{bmatrix} m_1 a^2 + I_1 & 0 & m_1 a R \\ 0 & m_2 b^2 + I_2 & -m_2 b R \\ m_1 a R & -m_2 b R & (m_1 + m_2 + m_3) R^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 g a + I_1 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 g b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c l - M_m \\ f_c l \\ M_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 3-2 状態空間を使った力学系の安定性シミュレーション

式(1)を Matlab/Simulink ソフトウェアを使って数値的に解いた。このために式 (2)のように表現を変えている。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3)^T \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= [A]\mathbf{x}(t) + [B]\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{u}(t) = [K]\mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}(t) &= (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3)^T \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= [A]\mathbf{x}(t) + [B]\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{u}(t) = [K]\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに  $\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), [A], [B], [K]$  は状態ベクトル, 制御力, 状態マトリクス, 入力マトリクス, フィードバックゲインマトリクスである。ブロックダイアグラムは図3となる。

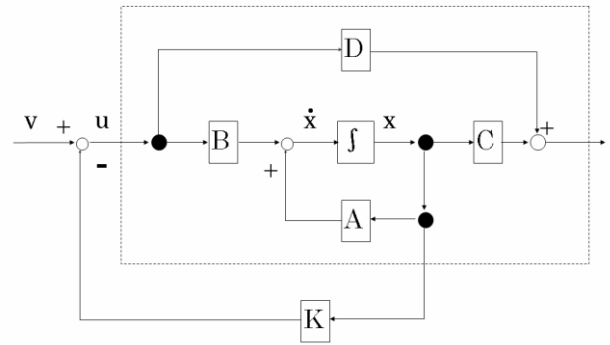


Fig.3 Block diagram of the control system

## 4. シミュレーションの結果

### 4-1 安定性

計算結果の中の典型的な例が図4である。初期条件としてゼロでないピッチ角を与え、その後の収束状況を見た。乗員操作力は一定とした。ピッチ角とピッチレートは数秒の後にゼロに収束した。倒立二輪車の実際の使用場面や、タイヤ接地面積がゼロでなく数十ミリ存在して安定側に作用することを考えると、この性能は実用上の設計目標に近いと判断した。

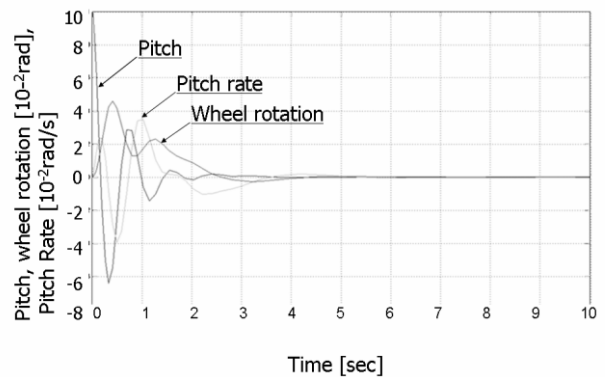


Fig. 4 Stability simulation of the vehicle loaded with a rider

### 4-2 制御性

乗員がインパルス的な操作をする場合のシミュレーションを行った。倒立二輪車の制御系は、乗員や車輪のピッチ角にはお構いなく、フレームのピッチ角とピッチレートを安定するようにモーターを駆動する。その結果を図5に示す。乗員を含めない力学モデルでの倒立二輪車制御と異なり、フレームと乗員両方に働く重力によるモーメントバランスが力学を支配する一方で、制御はフレームの状態量のみをフィードバック信号として使うことにより、車輪は回転を続ける。ただし、実際の使用条件においては、このような長周期の運動に対しても乗員がなんらかの操作を行って収束をさせると考えられる。今回の制御ロジックにおいては、倒立二輪車の位置や車輪速度を制御せず、もっぱらピッチ角とピッチレートの制御としていることが、図5のような結果につながっていると考えられる。

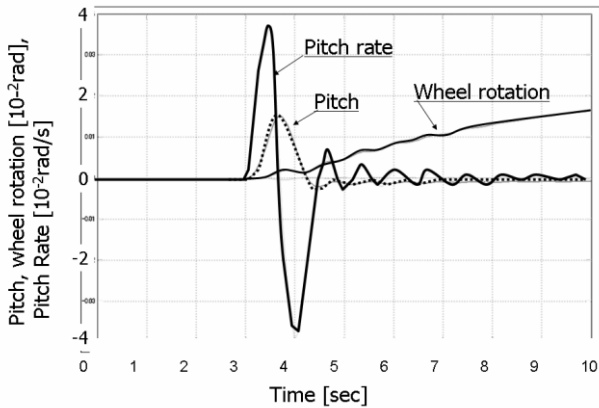


Fig.5 Simulation of maneuvering the vehicle.

5 試作倒立二輪車を使った乗員挙動計測

5-1 モーションキャプチャシステム

大きな暗室の天井周辺に多数のビデオカメラを配置し、工学的に対象物の運動軌跡を追跡するモーションキャプチャシステムを使った。倒立二輪車と乗員の代表的な部位に、光を反射するマーカーを貼り付け、その3次元的位置を複数のビデオ映像から三角測量方式により、時々刻々計算する。(図6) その結果、図7のようなスケルトンの乗員の姿勢を時間の関数として得ることができた。この図では、ある特定の時間とその前後での姿勢を重ねて描いているので、どの部分の動きが大きいかがわかる。倒立二輪車の床面へつたえられる荷重も計測可能であるが、今回の報告では割愛する。

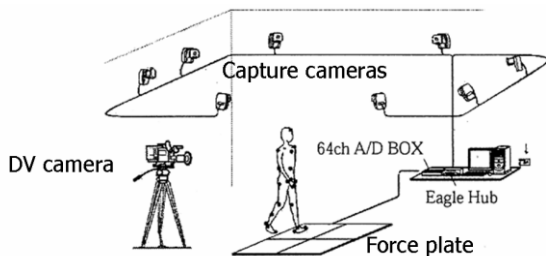


Fig.6 Optical motion capture system used in this study.

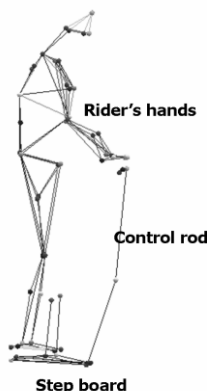


Fig.7 Markers detected by the motion capture system

5-2 倒立制御ゲインに対する乗員挙動変化の実測

乗員の傾角実測波形の典型的な例を図8に示す。ここで傾角とは、くるぶしと腰を結ぶ線分の鉛直面内での傾斜

角度である。図のように、倒立二輪車の操作に慣れたエキスパートは、スタート時点から進行方向に体を傾斜させて倒立二輪車を滑らかに進行することができるが、初心者はそれができない。さらに、初心者の傾角は高周波で振動する。そして、初心者は腰が引けてフレームばかりが前方に傾き、倒立二輪車はバランスを取り戻すために大きく車輪を動かす。このために、初心者の体は慣性力により後方に残って後ろに倒れるような恐怖心を持つ。そこで今度はコントロールロッドを引いてフレームを起こすので、車輪には急にブレーキがかかる。このように、乗員とフレームの倒立制御の位相がずれて発振を起こしている。

しかし、時間の経過とともに初心者も徐々に慣れて、発振の振幅が減少していく様子が読み取れる。

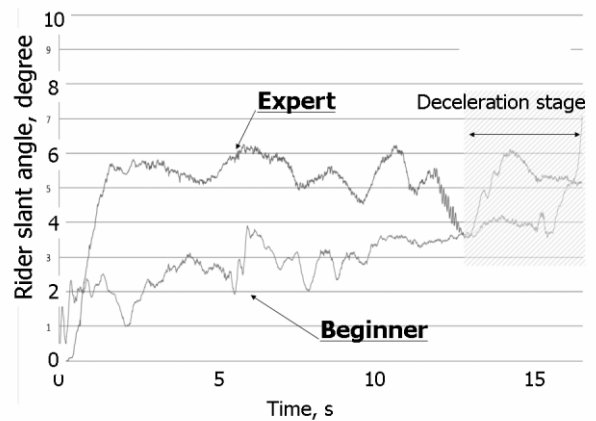


Fig.8 Rider's motion measured by the motion capture system

乗員の挙動、ここでは傾角、に対する倒立制御フィードバックゲインの影響を図9、10の比較で示す。フィードバックゲインが大きいと初心者に表示される傾角の振動が顕著である。

乗員の進行指令、つまりコントロールロッドを前方に倒そうとする力、に対する応答を良くするには、倒立制御フィードバックゲインを大きくすべきである。ここに、応答性と初心者の乗りやすさのトレードオフが生じている。これを根本的に解決することは、今回の制御方式では困難であるので、今後の研究で取り組む課題として残した。

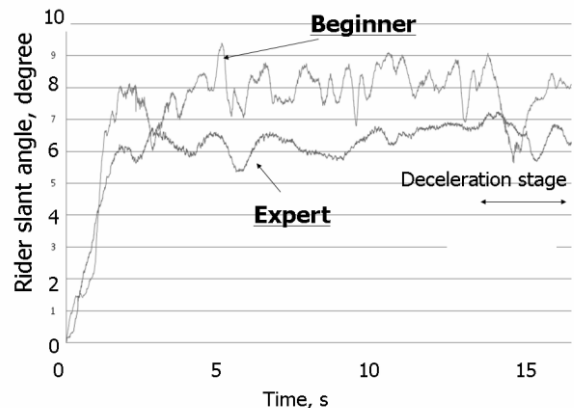


Fig.9 Rider motion with low feedback gain



Fig.10 Rider motion with high feedback gain

### 5-3 試作倒立二輪車の操作性の主観評価

乗りこなし上手なエキスパートの意見： フィードバックゲインが大きい方が、体を前方に預けたときに、すぐに反応してくれるので、早く走りたいという欲求に応えるだけでなく、安定感という面でも好ましい。

初心者の意見： フィードバックゲインは低い方が楽である。頭では体の重心を前に倒すべきであることはわかっているのだが、それが実際にはできない。前に体を倒すと、そのまま倒立二輪車が倒れてしまうのではないかという恐怖心が原因だと思う。

## 6. 結論

この研究では倒立二輪車に乗員を含めた動力学モデルを作ってシミュレーションを行い、試作車を製作して実験を行った。その結果得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 乗員の操作に対する慣れは倒立二輪車の性能にとって重要な要素であり、これを含めての運動シミュレーションを行って制御系の開発を行うとよい。
- 2) 倒立二輪車のフレーム傾斜角度と角速度信号を使って倒立制御を行う場合、フィードバックゲインの調整によって、初心者とエキスパートの両方をまあまあ満足させる制御を行うことができる。
- 3) モーションキャプチャシステムは倒立二輪車のように人と機械の複合した制御対象の挙動解析に有効である。

## 謝辞

著者の研究室の神奈川工科大学学生は試作に協力した。制御系の設計に使用したシステム LabView の販売元である日本ナショナルインスツルメンツ(株)の塩脇美和氏と塩原愛氏にご指導をいただいた。モーションキャプチャ解析は同僚の小島准教授にお世話になった。感謝いたします。

## 参考文献

- (1) Ishihama M., Aritake, T., Dynamic Design of a Walking Aid, Transaction of FISITA 2006, F2006D112T, 2007
- (2) Kojima, K., Hachimura, K., A Tool for Reproducing 3D body motion from Recorded Image Sequence of Traditional Dance, Proc. 2002 IEEE International Conference on Information Technology and Application, 2002