

倒立振り子型乗用移動体の半自動操縦に向けた予備的研究

○宮腰 清一（産総研）

A Preliminary Study for Semi-autonomous Control of an Inverted Pendulum Mobile Platform

○ Seiichi MIYAKOSHI (AIST)

Abstract : Toward semi-autonomous control of an inverted pendulum type mobile platform, an experiment on the trajectory following control with / without human boarding is done, and compared to investigate the different characteristics between machine control and human assisting (semi-autonomous) control. The result suggests that the balancing ability of the human rider improves the trajectory following performance.

1. 緒言

近年、自動車における自動操縦が盛んに研究されている。また、工場や倉庫において、自動的に荷物運びを行う無人走行車も既に実用化されている。

バランス制御と搭乗者の姿勢（重心）の変位の組合せにより操縦・運動実現される Segway[1] をはじめとする倒立振り子型移動体は、各種実現され、市販もされている。一方、（無人の）倒立振り子型ロボットの自律的制御も各種実現されている。しかし、人の搭乗している倒立振り子移動体を自律的に制御する研究 [2] は少ない。

本研究では、人の搭乗している倒立振り子型移動体にて、半自動操縦（軌道追従制御）を行った。自律移動能力を持つ倒立振り子型移動体に人が搭乗し、軌道追従制御を行った場合の無人/有人の違いを実験により調べた。

2. 倒立振り子型乗用移動体

2.1 基本構造

全方向移動が可能な倒立振り子型全方向移動体の開発を行っている [3][4]。Fig. 1 右に全方向移動型、Fig. 1 左にベース機体となった低床型マイクロモビリティ（倒立振り子移動体）[5] を示す。両図とも左側を正面とし、両脇に長い柄のグリップの付いた乗車台がある。開発した全方向移動型の機体は、低床型において、両脇に平行に配置された二つの車輪を、後述するメカナム・オムニホイール・ユニットで置き換えた構造になっている。

全方向移動を可能とするメカナム・オムニホイール・ユニット (MOWU) は、メカナムホイールとオムニホイールを同軸に並べた構造になっている (Fig. 2 右, Fig. 3 左)。メカナムホイールで横方向の動作を行わせるためには、一対のメカナムホイールが必要で、二つ以上の MOWU を合わせて使用する (Fig. 3 右)。

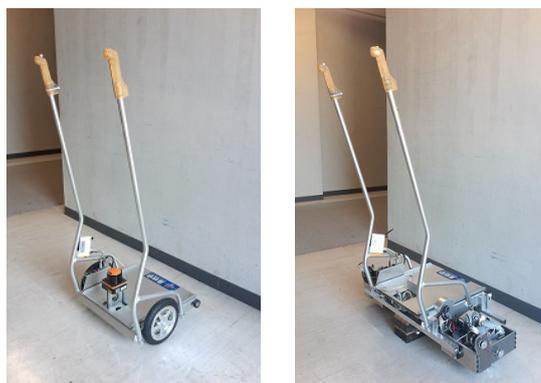


Fig. 1: 低床型 [5] (左) と全方向移動型 [3][4] (右) のマイクロモビリティ (倒立振り子型乗用移動体)

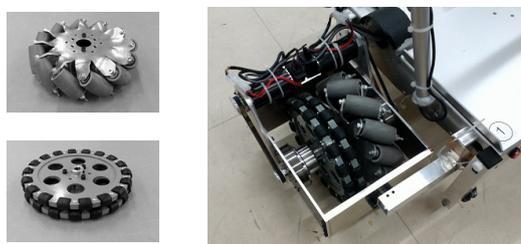


Fig. 2: メカナムホイールとオムニホイール (左), メカナム・オムニホイール・ユニットの拡大写真 (右)

ただし、本実験では、左右移動や旋回動作は行わない。

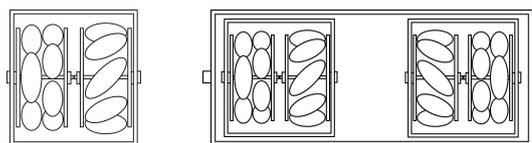


Fig. 3: メカナム・オムニホイール・ユニット (MOWU) の上面図 (左) と倒立振り子型全方向移動体とするための横方向配置の図 (右)

2.2 制御システム

制御系は、主にバランス制御と位置や方向の制御の二つの部分から構成される。並行二輪型台車は、倒立振り子としてバランス制御を必要とする。矢状面内の平衡状態を維持するために前後方向の並進運動を行う必要がある。直立状態を維持できる範囲において、並進移動や方向転換のための、前後方向への並進運動、左右方向への並進運動、そして旋回運動を行わせる。

2.3 バランス制御

直立のためのバランス制御を PD 制御で行った。安定化のためのモータへの制御出力 V_Ψ (モータへの電流を決めるドライバへの指令電圧値) は、以下の式により計算する。

$$V_\Psi = k_\Psi \Psi \cdot \beta + k_\omega \omega \quad (1)$$

ただし、 Ψ は重力方向に対する推定傾き角度であり、 ω はジャイロによる角速度であり、 k_Ψ と k_ω はフィードバック・ゲインを決める係数である。 β は自立姿勢の保持を補強する非線形項で、以下の式により計算した。

$$\beta = \frac{2 + |k_\beta \Psi|}{2}$$

傾き角度 Ψ は、加速度計とジャイロとのセンサ値から、2段階のフィルタリングで求めた。

第1段階として、矢状面内の台車の傾き角度の推定値 $\tilde{\Psi}$ は、以下のデジタル相補型フィルタにより計算される。

$$\tilde{\Psi}_k = \alpha(\tilde{\Psi}_{k-1} + \omega \Delta t) + (1 - \alpha)\psi$$

ただし、 ψ は加速度計からの傾き角度値、 ω はジャイロからの角速度値であり、 α は $\tilde{\Psi}$ の更新率を決める係数であり、 Δt はサンプリング周期を表す。

第2段階では、ノッチフィルタを掛けた。本移動台車の車輪は、通常のタイヤと比べて凹凸があり、また、長い柄のハンドルを持つ構造であることから、走行時に、共振による寄生振動が発生してしまう。振動がバランス制御の発散に繋がらないようにゲインを下げると、制御性能全体が低下する。この寄生振動を除去するためにリングバッファを利用したノッチフィルタを実装した。

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{f1} &= \frac{N_{f1}}{D} = \frac{1.0\tilde{\Psi}_k + 1.0\tilde{\Psi}_{k-N1/2} + 0.3\tilde{\Psi}_{k-N1}}{1.0 + 1.0 + 0.3} \\ \bar{\Psi}_{f2} &= \frac{N_{f2}}{D} = \frac{1.0\tilde{\Psi}_k + 1.0\tilde{\Psi}_{k-N2/2} + 0.3\tilde{\Psi}_{k-N2}}{1.0 + 1.0 + 0.3} \\ \bar{\Psi} &= \frac{N_{f1} + N_{f2}}{D + D} \end{aligned}$$

$\bar{\Psi}$ は、リングバッファから半周期と一周期前の値を取り出して、平均化することにより平滑化を行う。低減し

たい寄生振動の周期 (中心周波数 15[Hz] と 4[Hz] の逆数) は、事前に測定しておいて求めた。平均化のための係数 (1.0, 1.0, 0.3) は手調整で求めた。2つの周波数を除去するノッチフィルタとしては変則的な合成法だが、2段階直列でフィルタを掛けた場合は、うまくいかなかった。ノッチフィルタ以外に、1次や2次の低域通過フィルタも試したが、位相遅れの影響により、かえってバランス制御が発散的になってしまった。

最終的に、式 (1) の Ψ は、以下の式で求められる。

$$\Psi = \bar{\Psi} - \Psi_0 \quad (2)$$

ただし、 Ψ_0 は手調整で設定した平衡点を表す定数である。

2.4 位置制御

倒立振り子型移動体はバランスを維持しながら動作を行わせる必要がある。前後方向の位置制御は、そのためののみ車輪の回転を直接制御できないため、本体の中立姿勢を操作する事により間接的に制御する。中立の傾き角度 $\bar{\Psi}$ は、式 (2) の直立姿勢を維持する制御のために、手調整で定められた定数である。この定数を以下の式で置き換える。

$$\bar{\Psi} = \Psi_0 - k_{\Psi_d} \Psi_d, \quad (3)$$

以前の定数 $\bar{\Psi}$ は、位置の誤差から目標傾き角度 Ψ_d を計算する PID 制御器を加える事により、置き換えられる。

Ψ_d は、以下のように計算される。

$$\Psi_d = \Psi - \Psi_0 + k_{P_x}(\phi_x - (\phi_{xd} + \phi_{xI})) + k_{D_x} \dot{\phi}_x, \quad (4)$$

ただし、 k_{Ψ_d} は、中立傾き角度制御のゲイン、 Ψ_0 は、初期傾き角度の定数 (以前の $\bar{\Psi}$)、 ϕ_x と $\dot{\phi}_x$ は、それぞれ、車輪の回転角度と角速度の状態変数、 ϕ_{xd} は、車輪の目標回転角度、 k_{P_x} と k_{D_x} は、それぞれ、P 制御と D 制御のゲインを表す係数、そして、 ϕ_{xI} は、位置誤差の積分である。 ϕ_{xI_k} は、PID 制御器の位置誤差の積分値を表し、以下のように計算される。

$$\phi_{xI_k} = \phi_{xI_{k-1}} - k_{I_x}(x - x_d)\Delta t, \quad (5)$$

ただし、 k_{I_x} は、積分のゲインである。

目標軌道 ($\phi_{xd} = x_d/r_w$ (r_w : 車輪半径)) は、以下に示す 5 次関数で生成した。

$$\begin{aligned} \tau(t) &= t/T \\ x_d &= x_0 + (x_T - x_0)\tau^3(10 - 15\tau + 6\tau^2) \end{aligned}$$

ただし、運動の開始点と終了点での速度と加速度は 0 の条件である。

3. 実験手順

3.1 実験条件設定

Fig. 1 右に示す全方向移動型倒立振り型移動体で、人の乗っていない状態(無人)での自動操縦モードと人の乗っている状態(有人)での自動操縦モードとで、前後への移動を行い、比較した。それぞれ5回ずつ試行を行った。

試行は、実験室において行った。床の表面は、フリーアクセスの上に、滑りにくい樹脂塗装がされたものである。床は水平で、平坦である。床に線などの目標物は描かれていない。ただし、良く見れば、フリーアクセスのブロック(0.5[m] 四方)の境目は見ることが出来る。

計測は、デッドレコニングにより行った(変位は車輪のエンコーダ、傾きは加速度計とジャイロ)。

3.2 実験課題設定

1 試行分の移動の手順を Fig. 4 に示す。start 位置から3段階に分けて前進を行い、その後、後退して goal 位置に到達する(start 位置に戻る)ようプログラムしてある。

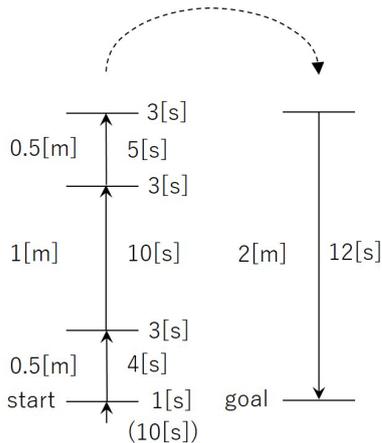


Fig. 4: 移動の経路と移動時間(ただし、図では往路と復路を分けて並べて描いたが、往復の経路は同一線上)

倒立振り型移動体は、その場で止まっている場合には本体の傾きは0で直立しており、移動する場合には移動する方向に本体が傾く。人が乗っていない完全自律移動と人が乗っている場合とで、制御の仕方を変えたりはしていない。搭乗している人は、本体(搭乗面とハンドル)の傾き(水平を含む)から、倒立振り移動体の目標軌道(その時点での移動の方向性)を推測して、それに合わせて適度にハンドル(本体)を前後に倒し、軌道追従を行う。

目標軌道の変位との誤差が大きくなると、そちらに移動するための本体の傾きが大きくなるが、傾きにはリミッタが付けてあるため、一定以上には大きくならない。また、

搭乗している人が意図的に傾けた場合には、目標軌道とは違って、そちらに移動する。

被験者の課題は、全て本論文の著者本人(身長172[cm] 体重68[kg])が行った。著者は、倒立振り型全方向移動体や通常の倒立振り型移動体の操縦には習熟している。

被験者(著者)は、移動の仕方(目標軌道)の事前知識を持つ。ただし、視線は、できる限り前方の遠方(壁)を見るようにし、床は見ないようにして行った。

4. 実験結果

Fig. 5 に、実験結果として、前後移動の変位と傾きとの時間変化を示す。グラフにおける緑の線は目標軌道を示し、紫の線は各試行での実際の変位や傾きの軌道を表す。ただし、変位の目標軌道は一意に定まるが、傾きのグラフにおける緑の線は、傾きがバランス維持との関係で単一の目標軌道とならないため、前後の変位の誤差とバランス維持から求まる傾きの目標値を全試行で平均化したものを示す。

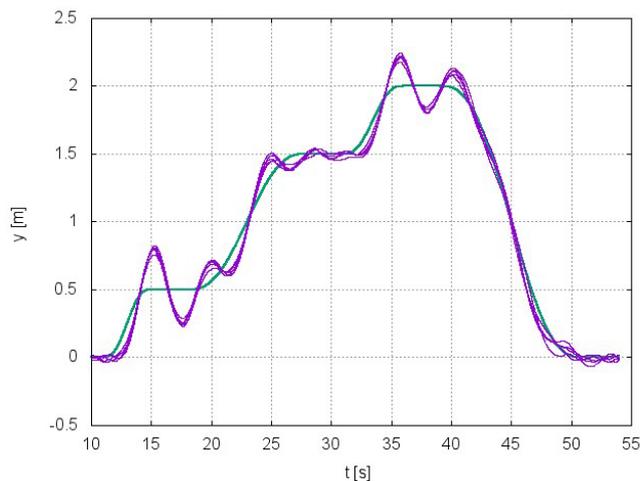
変位において、無人の場合(Fig. 5a, Fig. 5b)においては、各試行間のばらつきは少ないものの目標軌道からのオーバー(アンダー)シュートが大きく発生している事が分る。逆に、有人の場合(Fig. 5c, Fig. 5d)は、特に前進におけるオーバーシュートの発生が少ない。ただし、試行間のばらつきは、一定せず、ある程度大きくなっている。

同様に、傾きにおいても、無人の場合(Fig. 5a, Fig. 5b)と比較して、有人の場合(Fig. 5c, Fig. 5d)は、振幅自体は小さくなっているが、ばらつき方は一定していない。

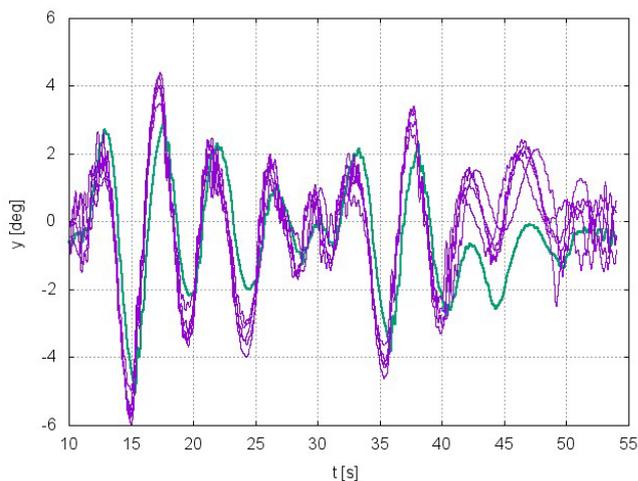
Table. 1: 誤差の標準偏差

	変位 [m]		傾き [deg]	
	目標誤差	ばらつき	目標誤差	ばらつき
無	0.077	0.016	1.0	0.32
人	(Fig. 5a)		(Fig. 5b)	
有	0.059	0.023	0.73	0.43
人	(Fig. 5c)		(Fig. 5d)	

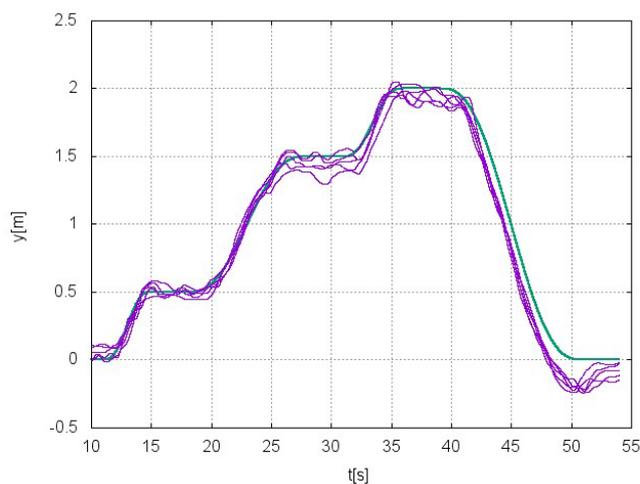
搭乗を行った主観報告を述べる。倒立振り型移動体においては進行方向に向けて傾くのだが、特に、前進する場合、爪先側が急に沈み込むと僅かだが恐怖を感じて腰が引ける。一方、移動の指令が適切な早さである場合(後退)は自然にその方向に滑っていくように感じた。ただし、その場合は目標軌道との変位が傾きとしては感じづらく、追従誤差は大きかった。また、被験者は目標軌道について予備知識があるため、先行して動いている。



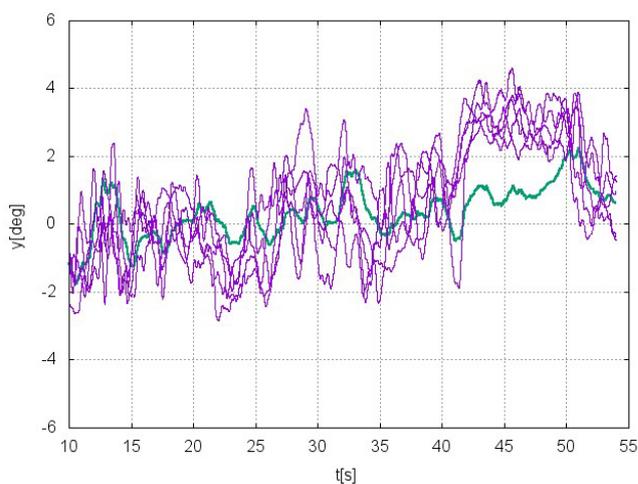
(a) 前後移動変位 (無人)



(b) 前後傾き角度 (無人)



(c) 前後移動変位 (有人)



(d) 前後傾き角度 (有人)

Fig. 5: 人が搭乗した場合と搭乗していない場合の軌道追従のばらつき

5. 結言

本研究では、自律移動能力を持つ倒立振子型乗用移動体にて、軌道追従制御を行った場合の無人/有人の違いを実験により調べた。

無人での自動操縦では、各試行で同様の軌道で動作が行われ、ばらつきが小さい反面、本体の傾きを適切に制御できずに、軌道追従性等の性能が落ちる傾向が見られた。一方、有人での自動操縦では、バランス維持を行う部分で、人がシステムをアシストする形で、システムの性能を向上させる場合があり得る。ただし、ばらつきが大きい。

主観報告から、制御システムは運動開始を促す動作より、制動を掛ける形で操縦を促す事が望ましい可能性がある。今後、より詳細に分析を行い、人の特性を生かした形での

システム構成の方法の研究を行う予定である。

参考文献

- [1] <http://www.segway-japan.net/>
- [2] 松本 治, 堀内 英一, 竹田 年延, 小谷内 範穂, 小森谷 清, “倒立振子型マイクロモビリティの障害物検知・停止制御”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2Q1-06, 2009.
- [3] 宮腰 清一, “メカナムホイールを用いた全方向移動可能な平行二輪型倒立振子台車”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集, 1P2-G07, 2015.
- [4] 宮腰 清一, “メカナムホイールとオムニホイールを用いた全方向移動可能な倒立平行二輪型移動体”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集, 2A1-07a4, 2016.
- [5] 松本 治, 竹田 年延, 堀内 英一, 小谷内 範穂, 小森谷 清, 橋本隆志, 安藤敏之, 巖桂二郎, “平行二輪倒立振子型マイクロモビリティ群の特徴と仕様”, 日本ロボット学会学術講演会 予稿集, AC3Q1-06, 2009.