

倒立振り子型全方向移動体の作業性の評価

○宮腰清一 (産総研)

1. 始めに

屋内を含む近距離の移動手段として、Segway[1]に代表される倒立平行二輪型の移動体 [2][3] が提案され、一部は商品化されている。倒立平行二輪型の移動体は、3 輪や 4 輪の操舵型・静的安定型車両と比較して小型化しやすく、その場旋回を含めて小回りも利きやすい。ただし、平行二輪型であっても操舵型と同様にノンホロノミック拘束を受け、すなわち真横への移動は不可能で、切り返しを必要とする場面が発生する。

切り返しなどの難しい狭小な環境での移動に限らず、一般に、人の立つて行う作業などにおいては、作業台や壁に向かったままの横移動など、通常の車輪では実現が難しい移動様態が含まれる。これを解決するため、全方向移動車輪を導入した倒立振り子型全方向移動体 [4][5][6] が開発されている。

本研究においては、これまでに開発した LandCraft と名付けた立ち乗り型の倒立振り子型全方向移動体 [8][9] の作業性を評価する。ゴミ拾い形式のタスクを設定し、全方向移動機能の無い通常の平行二輪型倒立振り子移動体と作業性を比較した。全方向移動機能と直感的な操縦インタフェースにより、意識的な方向転換・切り返し抜きに作業が可能で、手の作業により集中できる、手作業をしながら無意識的に移動できるなどにより、作業時間を短縮し、優位性を示した。

2. システム構成

2.1 機構

開発した倒立振り子型全方向移動体 [8][9] を図 1 右に、ベース機体となった低床型マイクロモビリティ [2] を図 1 左に示す。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。

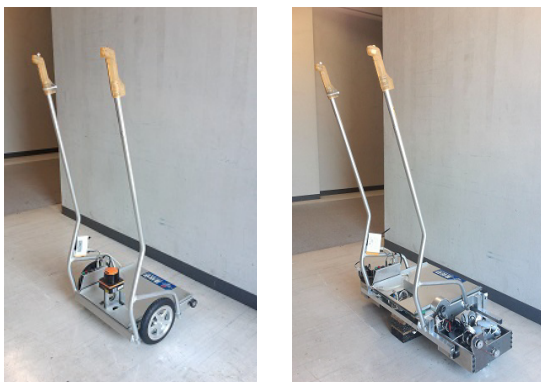


図 1 低床型マイクロモビリティ [2] (左図) と倒立振り子型全方向移動体 [8][9] (右図)

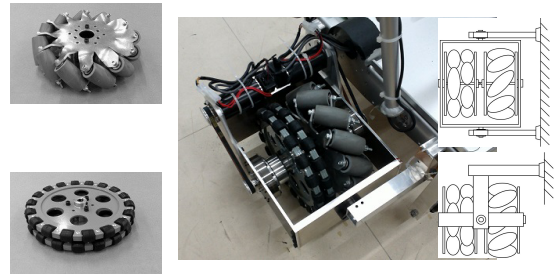


図 2 メカナムホイールとオムニホイール (左)、メカナム・オムニホイール・ユニットの拡大写真 (中央)、ジンバル型サスペンションの上面図と正面図 (右)

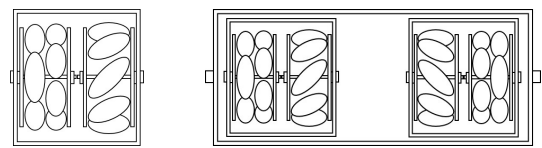


図 3 メカナム・オムニホイール・ユニット (MOWU) の上面図 (左) と倒立振り子型全方向移動体とするための横方向配置の図 (右)

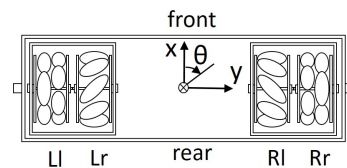


図 4 メカナム・オムニホイール・ユニットと座標系の上面図、それぞれのホイール (モータ) についての添え字

メカナムホイール (図 2 左上)、オムニホイール (図 2 左下) は、車輪の周囲に車軸と捻れ・直行する位置関係に自由回転する多数のローラを配置する構造で、車軸の回転方向に駆動力を発生させ、ローラ軸の回転方向には受動的運動を可能とさせるものである。

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 (図 2 中央、図 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、一对のメカナムホイールが必要で、二つ以上の MOWU を組合わせて使用する (図 3 右)。

図 4 に、座標系、モータの接尾辞のそれぞれの割り付けを示す。

x : 前後方向への並進運動 (+ バランス制御)

y : 左右方向への並進運動

θ : 旋回運動

開発した機体の寸法等を表 1 に示す。

表1 諸元表

全高	1270[mm]
搭乗台高	220[mm]
全幅	900[mm]
前後長	400[mm]
重量	24.6[kg]

2.2 操縦インターフェース

前進/後退の1自由度は、矢状面の傾き角度に比例して移動の速度目標値を生成する。左右への並進と旋回の残り2自由度の操縦インターフェースは、ジョイスティックと搭乗面の踏み板の力センサの2系統を用意した。

ジョイスティックは、1本で左右への並進と旋回の目標値を生成するため、斜め前の左右に倒した場合は旋回運動、斜め後の左右に倒した場合は左右への並進運動、と切り替える。さらに、前後へ倒す大きさ α_x と左右へ倒す大きさ α_y との積に比例する形として、零点での円滑な切り替えを行う。

$$\dot{\phi}_{\theta_a} = k_{j_\theta} |\alpha_x| \cdot \alpha_y \quad (\alpha_x < 0) \quad (1)$$

$$\dot{\phi}_{\theta_a} = 0 \quad (\alpha_x > 0) \quad (2)$$

$$\dot{\phi}_{y_a} = k_{j_y} |\alpha_x| \cdot \alpha_y \quad (\alpha_x > 0) \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_{y_a} = 0 \quad (\alpha_x < 0) \quad (4)$$

図5は、ジョイスティックの倒し方と移動体の動作の関係を表す模式図である。

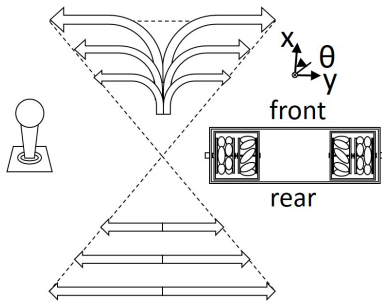


図5 ジョイスティックの倒し方に対する移動体の旋回運動、または横方向並進運動の割り付け。前方に倒しながら左/右に倒すことは左/右に旋回運動を行う事に割り付けられ、後方に倒しながら左/右に倒すことは左/右に横方向並進運動を行う事に割り付けられる。

搭乗面の踏み板は、中央部を固いゴムで支持する構造で、重心移動などにより、面全体がわずかに傾く。また、踏み板はアルミ板で、片方の足の爪先、もう片方の足の踵に力を掛けると、板を捻るようにわずかに変形する。図6上に示す4隅に配置されたロードセルで、重心移動や捻りの荷重を検出できる。

図6下に、典型的な、足裏荷重の掛け方と運動の指令の割り付け方を示す。図中、荷重が掛かって

いる部分を黒で示した。左右への並進運動は、荷重を掛けた方に移動するように割り付けた。また、一方が爪先荷重・他方が踵荷重の場合、爪先荷重側が前進・踵荷重側が後退する形で旋回運動を行うように割り付けた。いずれも、掛けた強さに比例して速度目標値を生成する。これらのパターンを混合した形で荷重を掛けることにより、在る点に向きながら円弧状に移動したり、凹凸のある壁面などに向いたまま横移動したりできる。

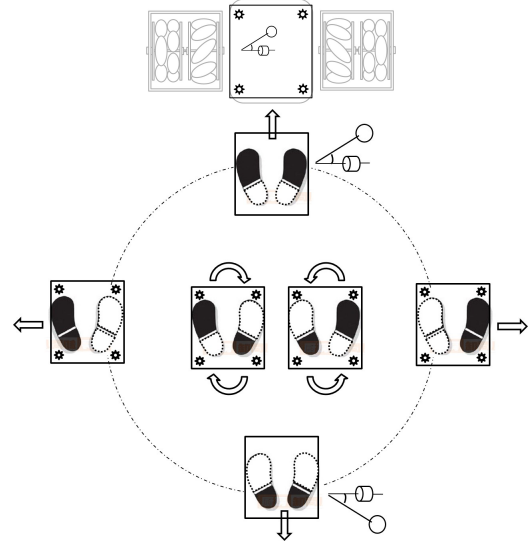


図6 フォースプレートと傾斜角を用いたジョイスティック類似の操縦インターフェース(上)と加重配分の仕方とそれに応じた運動指令の割り付け(下)

式(5)と式(6)に、4隅の力センサと運動の目標値の関係を示す。

$$\phi_{y_a} = k_{f_y} \frac{(f_{Rf} + f_{Rr}) - (f_{Lf} + f_{Lr})}{f_{Lf} + f_{Lr} + f_{Rf} + f_{Rr}} \quad (5)$$

$$\phi_{\theta_a} = k_{f_\theta} \frac{(f_{Lf} - f_{Lr}) - (f_{Rf} - f_{Rr})}{f_{Lf} + f_{Lr} + f_{Rf} + f_{Rr}} \quad (6)$$

ϕ_{y_a} と ϕ_{θ_a} は、それぞれ横方向並進運動と旋回運動との目標値を表す。 f は力センサの値を表し、添え字は大文字の $_{RL}$ が左右を表し、小文字の $_{fr}$ が前後を表す。 k_{f_y} と k_{f_θ} とは、それぞれ手調整されたゲインを表す。

同様の操縦インターフェースが、水上の全方向移動体において開発されている[10]。

ジョイスティックは踏み板より優先順位を高くした。これは、意識的操作を無意識的操作に優先させるためで、特に、乗降時、片足荷重での側方への不意の動きの発生を防止するためである(ジョイスティックを真っ直ぐ前/後に倒しながら乗降する)。

以降の「ゴミ」拾いタスクにおいては、両手でゴミを扱うため、ジョイスティックでの操作は行っていない。

通常の並行二輪型の移動体においては、横方向並進移動はできないが、それ以外をフォースプレート型操縦インターフェースと傾斜角で行っている。

3. 操作性の実験的評価

3.1 実験機

2種類の倒立振り子型移動体で作業を行い、比較した。全方向移動型(MOWUのA型)は図1右に示すものであり、通常の並行二輪型は図1左に示すものである。

3.2 実験環境設定

実験環境の設定を模式図として、図7に示す。10個の「ゴミ」としての対象物は、床の上に、およそ3×4[m]の範囲で、適当にばらまかれる。移動体に乗った収集者は、自ら、図の左上方のテーブル上にあるストップウォッチ(ノートPC上のソフトウェア)を、作業前に作動させ、作業後に停止させる。

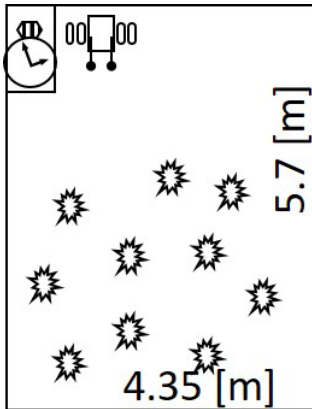


図7 「ゴミ」集めタスクの実験場所の設定を示す上面からの模式図

「ゴミ」を床の上にばらまいた実際の様子を図8に示す。床はリノリウム貼りである。

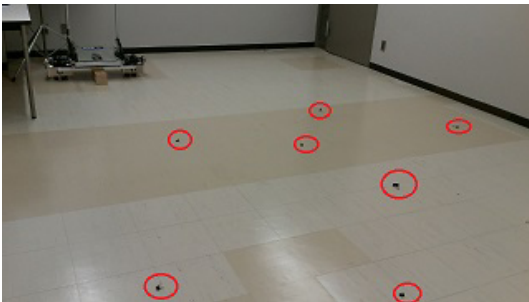


図8 「ゴミ」集めタスクを行った場所の写真。赤丸の印は、ばらまかれた「ゴミ」を表す。ただし、「ゴミ」は適当にばらまかれるので毎回位置が違う。左上に移動体が停車しており、その左側がストップウォッチの載っているテーブルである。

「ゴミ」を拾い集めるための作業用の棒を図9に示す。長さは0.77[m]である。棒は伸縮可能だが、最も伸ばした状態にして使用している。



図9 「ゴミ」を拾い集めるための先端に磁石の付いた棒。

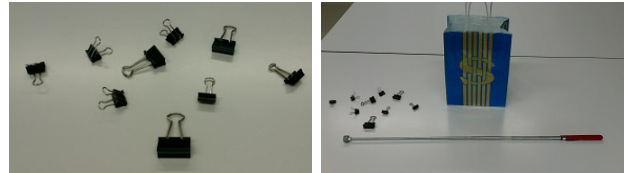


図10 実験用に、「ゴミ」として用いた対象物(左)。「ゴミ」としての対象物を拾った後に入れておく紙袋(右)。

10個のペーパークリップを、大きさや磁石に付く性質が実験に適当であるため、収集対象物とした(図10)。紙袋は移動体のハンドルグリップの近くにテープで留められた(図11)。収集者は右利きだったので、右手で磁石の付いた棒を持ち、左側に紙袋を配置して作業を行った。



図11 「ゴミ」拾い装備をした移動体

3.3 実験課題設定

ゴミ拾いタスクの手順は、以下の通りである。

1. 収集者は、右手に磁石が先端に付いた棒(図9)を持ち、移動体に乗って待機する。
2. 収集者は、ストップウォッチの計時を開始し、「ゴミ」拾いタスクを開始する。
3. 収集者は、磁石の付いた棒で「ゴミ」を拾い上げ、移動体のハンドルを保持している反対の手で磁石から取り外して、紙袋の中に入れる。
4. 収集者は、「ゴミ」のある領域を動き回り、10個の「ゴミ」を全部集める。
5. 収集者は、ストップウォッチの位置に戻り、計時を停止する。

収集者の課題は、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、倒立振り子型全方向移動体や通常の倒立振り子型移動体の操縦には習熟している。

3.4 実験結果と知見

10 個の「ゴミ」を集めるのに必要な時間を表 2 に示す。

表 2 試行に要した時間

(通常) 全方向移動型		並行二輪型	
	31.96[s]		35.07[s]
	31.02[s]		36.79[s]
	31.41[s]		35.83[s]
	32.72[s]		36.09[s]
	31.61[s]		33.94[s]
	34.12[s]		34.82[s]
	29.78[s]		32.61[s]
	31.44[s]		35.04[s]
	32.67[s]		37.62[s]
	31.52[s]		35.78[s]
平均	31.83[s]	平均	35.36[s]
標準偏差	1.16[s]	標準偏差	1.42[s]

それぞれの試行は、全体として、練習を含めて 2、30 回程度を行った。それらの試行の内、タスクに慣れたと考えられる最後の連続する 10 回の試行の時間を表に示した。

全方向移動型の方が、作業に要する平均時間が、3 秒程度、短い事が分る。

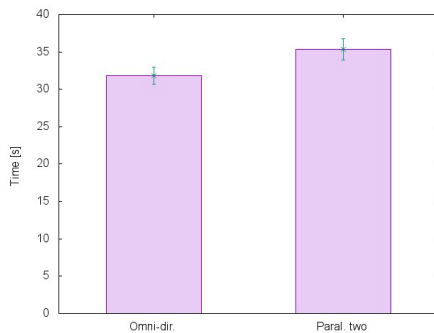


図 12 全方向型と並行二輪型の作業時間

有意水準 1% の T 検定で有意差あり、となった。全方向移動型の方が、有意に作業時間が短いと言える。

また、収集者の主観的には、両移動体での作業とも、足側の操作による移動体の操縦には注意を取られず、手側の操作における「ゴミ」の拾い上げと磁石からの取り外しに集中する事が出来た。特に、全方向移動体での作業においては、並行二輪型でのように目標に向きを変えて移動するのではなく、磁石から外して袋に入れる動作を行いながら、無意識的に次のゴミに向けて移動(接近)を行う事ができ、時間短縮に効果があったとみられる。

4. 終わりに

倒立振り子型の移動体を改良し、全方向移動の能力を持たせた移動体を開発した。

成人男性(著者)により、「ゴミ」収集タスクを行い、全方向移動型と通常の並行二輪型の倒立振り子台車により、作業性を実験的に比較した。

全方向移動型の方が収集に掛かる時間が、わずかながら短くて済んだ(有意差あり)。また、無意識的に移動する事が可能で、そのため、手作業に集中する事ができることが分った。

全方向移動能力を組み合わせる事で、移動体による作業の効率化が図れる事が分った。

今後、より全方向移動型に適した作業課題の探索などを行う予定である。

参考文献

- [1] <http://www.segway-japan.net/>
- [2] 松本 治, 竹岡 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 2 輪倒立振り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.
- [3] http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/personal_mobility/winglet.html
- [4] <http://www.honda.co.jp/UNI-CUB/>
- [5] 鄭聖熹, 松川文厚, 西山達也, 井代直也: “倒立振り子型全方向移動体及び基本走行制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 8, pp. 710-715, 2011.
- [6] 取田 秀樹: “倒立振り子型四輪走行装置”, 特許 第 5066746 号, 2009.
- [7] H. Gomi, and K. Hamaya: Frictional drive device and inverted-pendulum-type movable body, patent WO2011033587 A1, 2009. (in Japanese)
- [8] 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り子台車”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-G07, 2015.
- [9] 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, 2A1-07a4, 2016.
- [10] D. Kobayashi, and N. Takesue, MINAMO: Multidirectional INtuitive Aquatic MObility Improvement of Stability and Maneuverability, Proc. of Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2014 IEEE International Conference on 741 - 746, Dec. 2014.