

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

Omni-directional parallel two wheel type inverted pendulum mobile platform
using mecanum wheels and omni-wheels

準 ○宮腰 清一 (産総研)

Seiichi MIYAKOSHI, AIST s.miyakoshi@aist.go.jp

In this paper, an inverted pendulum vehicle extended to omni-directional motion is shown. Omni-directional motion is implemented by a drive unit which is constructed of mecanum wheels and omni-wheels. The mechanism of the omni-directional drive unit replaces the parallel two wheels of the inverted pendulum mobile platform, and extends it to omni-directional movement. The control system is also extended to integrate the additional lateral motion into the parallel two wheel inverted pendulum control with the intuitional maneuvering system. To show the ability of operation on uneven terrain, the test drivings in a barrier-free environment are experimented. The vehicle was able to move into an elevator, and over gentle slope; block pavement; braille blocks; threshold sill; and grating covers.

Key Words: Wheeled mobile robots, Mecanum wheel, Omni-wheel, Inverted pendulum

1 緒言

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、人の立っ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、通常の手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、立ち乗り型の倒立振り型全方向移動体を開発した。一般的に入手可能な部品のみで構成し、既存の並行二輪型移動体からの改造として製作した。屋内や構内の舗装路面など、いわゆるバリアフリー環境程度の不整地における実走試験を行い、実環境での走破能力を検証した。

2 機構

開発した全方向移動平行二輪型倒立振り移動体を図1右図に、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左図に示す。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。

開発した機体の寸法等を表1に示す。

Table 1 The machine specification

height	1270[mm]
platform height	220[mm]
width	900[mm]
length	400[mm]
weight	24.6[kg]

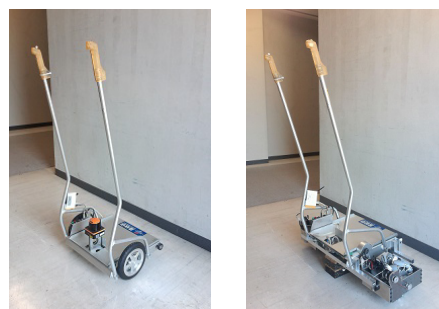


Fig.1 The original low-floor type micro mobile platform[2] (left) and the prototype of the proposed omni-directional inverted pendulum mobile platform (right)

2.1 メカナム・オムニホイール・ユニット (MOWU)

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、一対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)。

MOWUによる並行二輪型移動体は、文献[8]で提案した全てメカナムホイールで構成されるPMWUでの横方向並進移動の冗長性が無くなっている。図4下図に示すように、オムニホイールのみで構成された並行二輪型倒立振り移動体[5]とほぼ等価な駆動力の配置と言える。ただし、横方向並進移動の際にメカナムホイールを逆方向に回転させる動作に伴って旋回のモーメントが発生する。これを避けるためには、本来、メカナムホイールは、可能な限り中央部に配置することが望ましい。ただし、本研究においては、特にメカナムホイールを中央部に配置することはして

いない。随伴する旋回運動の発生を抑制する手法については、4.2節で述べる。



Fig.2 A mecanum wheel and omni-wheel (left), the zoomed photo of a mecanum omni-wheel unit (center) and its top and front view figure of the gimbal suspension (right)

2.2 懸架方式

MOWU は二輪から成り、トラックの後輪のように接地点の幅(間隔)が広く、移動体にリジッドに取り付けてしまうと、地面に凹凸がある場合、どれかの車輪が接地しない場合が発生してしまう。これに対処するため、図 2 右に示すように、ユニットの車軸に直行する回転軸を設けて本体と結びつけるジンバル構造とし、地面の凹凸に倣うようにした。

ジンバル構造は全車輪で同程度の接地圧が得られ易い反面、凹凸が大きい路面で、ジンバルの慣性モーメントによる追従遅れ、振動の伝わりによる本体のがたつきが生じやすい。その際は、弾性体を用いたサスペンションが有効と考えられる。

4つのホイールのそれぞれにギヤ比 1:5.0 のハーモニック・ドライブが取り付けられており、それぞれ 1:1 の比のプーリとタイミングベルトを経由して、MAXON148877 モーターで駆動される。

3 運動学

全方向移動型の倒立振り子台車は、平面上の運動における 3 自由度 (x, y, θ) に対応する駆動力を独立に発生させることができるため、操縦に必要な目標値生成や制御の見通しが良い。原理的に独立した 3 自由度それぞれ個別に目標値を計算し、線形和の形で合成して個々のモーター(ホイール)への出力としている。

図 5 に、座標系、モーター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

大文字の'L' と'R' はユニットの左右の別を、小文字の'l' と'r' はユニットの中の左右のホイールの別を示す。

MOWU において、外側(Ll, Rr)の 2 輪が、メカナムホイールではなくオムニホイールであるため、その回転は左右方向への並進移動には寄与しない。

よって、逆運動学の式は、以下ようになる。

$$\phi_{Ll} = x/r_w + r_b\theta/r_w \quad (1)$$

$$\phi_{Lr} = x/r_w \ominus y/r_w + r_{bC}\theta/r_w \quad (2)$$

$$\phi_{Rl} = x/r_w \oplus y/r_w - r_{bC}\theta/r_w \quad (3)$$

$$\phi_{Rr} = x/r_w - r_b\theta/r_w \quad (4)$$

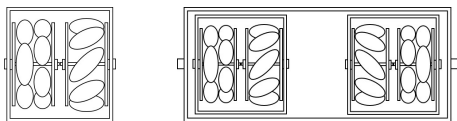


Fig.3 The top view of the unit of mecanum and omni-wheel (MOWU) and its lateral layout for an omnidirectional inverted pendulum type mobile platform

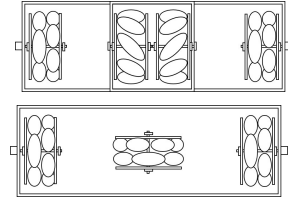


Fig.4 The top view of the quasi-equivalent structure with the mecanum and omni-wheel unit with centered mecanum wheels and the whole omni-wheel structure[5]

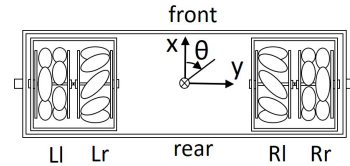


Fig.5 The top view of the mecanum omni-wheel unit and the coordinates and notation of the subscripts corresponding to each wheel (motor)

ただし、 r_{bC} は、図 4 下図への配置の変更も考慮した、中央側の二輪のメカナムホイールのトレッド半径の定数である。

また、丸印の符号は、上方から見た時にメカナムホイールの配置が図 3 右のような「A 型」か、図 4 上のような「V 型」かに対応して正負が決まり、「V 型」で、表示の符号のままとなり、その逆では、符号が逆転する。

他方、4つの車輪から決まる移動体の位置・姿勢の状態量は、並行二輪におけるオドメトリの拡張から、以下の関係(順運動学)となる。

$$x = r_w \phi_x \quad (5)$$

$$y = r_w (\ominus \phi_{yC}/2) \quad (6)$$

$$\theta = r_w (-\phi_{\theta}/2)/r_b, \quad (7)$$

ただし、 ϕ は車輪の回転角である。 $\phi_x, \phi_{yC}, \phi_{\theta}$ などの中間変数の定義は以降に示す。また、速度の次元の式は、角度・位置と同型の場合は省略する。

系全体の x 軸方向の動き(前後方向の並進)を求めるための中間変数は、ユニットを仮想的な車輪と見立てた場合における

$$\phi_x = (\phi_{xL} + \phi_{xR})/2 \quad (8)$$

ユニット内の二つの車輪の運動の平均値として計算できる。

$$\phi_{xL} = (\phi_{Ll} + \phi_{Lr})/2 \quad (9)$$

$$\phi_{xR} = (\phi_{Rl} + \phi_{Rr})/2 \quad (10)$$

系全体の y 軸方向の動き(左右方向の並進)を求めるための中間変数 ϕ_{yC} は以下である。また、 ϕ_{yO} は外側の二輪に対応し、 y 軸方向への寄与はないが、4.2 節での補正に用いる。

$$\phi_{yC} = \phi_{Rl} - \phi_{Lr} \quad (11)$$

$$(\phi_{yO} = \phi_{Rr} - \phi_{Ll}) \quad (12)$$

系全体の θ 方向の旋回の動きを求めるための中間変数は、仮想的な並行二輪の移動体における両輪の回転数の差として、以下の式により求められる。

$$\phi_{\theta} = \phi_{xR} - \phi_{xL} \quad (13)$$

4 制御

制御系は、主にバランス制御と位置・姿勢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。直立状態を維持できる範囲において、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。

4.1 バランス制御

直立のためのバランス制御を簡単なPD制御で行った。系の重心高さが相応にあり、高速・厳密な制御でなくても安定化可能であった。安定化のためのモータへの出力目標値 (V_Ψ) は、以下の式により計算する。

$$V_\Psi = k_\Psi \Psi \cdot \beta + k_\omega \omega, \quad (14)$$

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。

$$\beta = \frac{2 + |k_\beta \Psi|}{2}. \quad (15)$$

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。

$$\tilde{\Psi}_k = \alpha(\tilde{\Psi}_{k-1} + \omega \Delta t) + (1 - \alpha)\psi, \quad (16)$$

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。本移動体の車輪は、通常のタイヤと比べて凹凸があり、また、長い柄のグリップ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。

$$\bar{\Psi} = \frac{1.0\tilde{\Psi}_k + 1.0\tilde{\Psi}_{k-N/2} + 0.3\tilde{\Psi}_{k-N}}{1.0 + 1.0 + 0.3}, \quad (17)$$

$\bar{\Psi}$ 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] 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。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 (14) の Ψ は、以下の式で求められる。

$$\Psi = \bar{\Psi} - \Psi_0 \quad (18)$$

ただし、 Ψ_0 は手調整で設定した中立的な傾き (平衡点) を表す定数である。

4.2 MOWU の並進・旋回速度制御

運動学では、式 ((1)-(4)) において、y 軸方向の運動に関する外側の二輪に対応する項の消去で済んだ。しかし、制御では、y 軸方向の運動時のメカナムホイールの捻り運動から生じる旋回モーメントの発生を抑制できなくなる。外側二輪に対応する項は、削除ではなく、姿勢保持のための目標値を与える必要がある。

また、図 4 下図のメカナムホイールの配置の変更も考慮して、位置・姿勢の制御系を導出する。中央側のメカナムホイール二輪と外側のオムニホイール二輪をそれぞれ一組として考える。

MOWU の制御出力は以下の式になる。

$$V_{Ll} = V_x + V_{yO} + V_{\theta O} - k_v \dot{\phi}_{Ll} \quad (19)$$

$$V_{Lr} = V_x + V_{yC} + V_{\theta C} - k_v \dot{\phi}_{Lr} \quad (20)$$

$$V_{Rl} = V_x - V_{yC} - V_{\theta C} - k_v \dot{\phi}_{Rl} \quad (21)$$

$$V_{Rr} = V_x - V_{yO} - V_{\theta O} - k_v \dot{\phi}_{Rr} \quad (22)$$

ただし、 $V_{\theta C}$ は中央側のメカナムホイールへの、 $V_{\theta O}$ は外側のオムニホイールへの出力目標値である。

y 軸方向への制御出力 (V_{y*}) は、ユニット内の二つのホイールの回転の差に対する目標値から、以下のように導かれる。

$$V_{yO} = k_{P_y} \epsilon_{yO} + k_{D_y} \dot{\epsilon}_{yO} \quad (23)$$

$$V_{yC} = k_{P_y} \epsilon_{yC} - k_{D_y} \dot{\epsilon}_{yC} \quad (24)$$

k_{P_y} と k_{D_y} は、それぞれ PD 制御のゲインを表す。現在の状態量と目標値の誤差 ϵ と $\dot{\epsilon}$ は、以下である。

$$\epsilon_{yC} = \phi_{yC}/2 \oplus \phi_{yd} + \phi_{\theta dC} \quad (25)$$

$$\epsilon_{yO} = \phi_{yO}/2 \ominus \mu \phi_{yd} + \phi_{\theta dO} \quad (26)$$

$$\dot{\epsilon}_{yC} = \dot{\phi}_{yC}/2 \ominus \dot{\phi}_{yd} + \dot{\phi}_{\theta dC} \quad (27)$$

$$\dot{\epsilon}_{yO} = \dot{\phi}_{yO}/2 \oplus \mu \dot{\phi}_{yd} + \dot{\phi}_{\theta dO} \quad (28)$$

ただし、 ϕ_{yd} と $\dot{\phi}_{yd}$ は、メカナムホイールの差動の角度と角速度の目標値を表す。 $\phi_{\theta d*}$ や $\dot{\phi}_{\theta d*}$ は、以降に示す。

また、 μ は、メカナムホイールの捻りに随伴する旋回のモーメントを、それと逆方向にオムニホイールをわずかに回して抑制するための補正項で、実験的に、 $\mu = 0.7r_{bC}$ と設定した。

θ 方向の旋回の制御出力 (V_θ) は、以下のように PD 制御の式により求められる。

$$V_{\theta C} = k_{P_\theta} (\phi_{\theta C} + 2\phi_{\theta dC}) + k_{D_\theta} (\dot{\phi}_\theta + 2\dot{\phi}_{\theta dC}) \quad (29)$$

$$V_{\theta O} = k_{P_\theta} (\phi_{\theta O} + 2\phi_{\theta dO}) + k_{D_\theta} (\dot{\phi}_\theta + 2\dot{\phi}_{\theta dO}) \quad (30)$$

ただし、

$$\phi_{\theta C} = \phi_{xRl} - \phi_{xLr} \quad (31)$$

$$\phi_{\theta O} = \phi_{xRr} - \phi_{xLl} \quad (32)$$

であり、 $\phi_{\theta dC}$ と $\dot{\phi}_{\theta dC}$ は、中央側のメカナムホイールの差動の角度と角速度の目標値を表し、 $\phi_{\theta dO} = \phi_{\theta d}$ 、 $\dot{\phi}_{\theta dO} = \dot{\phi}_{\theta d}$ とすると、以下のように求められる。

$$\phi_{\theta dC} = (r_{bC}/r_b) \cdot \phi_{\theta dO} \quad (33)$$

$$\dot{\phi}_{\theta dC} = (r_{bC}/r_b) \cdot \dot{\phi}_{\theta dO} \quad (34)$$

5 操縦インタフェース

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、前後へ倒す大きさと左右へ倒す大きさ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。

$$\dot{\phi}_{\theta d} = k_{j_\theta} |\alpha_x| \cdot \alpha_y \quad (\alpha_x < 0) \quad (35)$$

$$\dot{\phi}_{\theta d} = 0 \quad (\alpha_x > 0) \quad (36)$$

$$\dot{\phi}_{yd} = k_{j_y} |\alpha_x| \cdot \alpha_y \quad (\alpha_x > 0) \quad (37)$$

$$\dot{\phi}_{yd} = 0 \quad (\alpha_x < 0) \quad (38)$$

図 6 は、ジョイスティックとそれにより指令される旋回/並進横移動の関係を示す模式図である。

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 7 上図に示す 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。

$$\phi_{yd} = k_{fy} \frac{(f_{Rf} + f_{Rr}) - (f_{Lf} + f_{Lr})}{f_{Lf} + f_{Lr} + f_{Rf} + f_{Rr}} \quad (39)$$

$$\phi_{\theta d} = k_{fy} \frac{(f_{Lf} - f_{Lr}) - (f_{Rf} - f_{Rr})}{f_{Lf} + f_{Lr} + f_{Rf} + f_{Rr}} \quad (40)$$

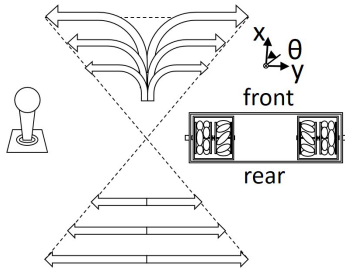


Fig.6 The allocation of the joystick leaning to the rotational or sideways motion of the mobile platform. The left/right leaning with forward leaning of the joystick is allocated to the left/right rotational motion, and the left/right leaning with backward leaning is allocated to the sideways motion.

図7下図に、典型的な、足裏荷重の掛け方と運動の指令の関係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。これらのボタ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。同様の操縦インタフェースが、水上の全方向移動体において開発されている [7]。

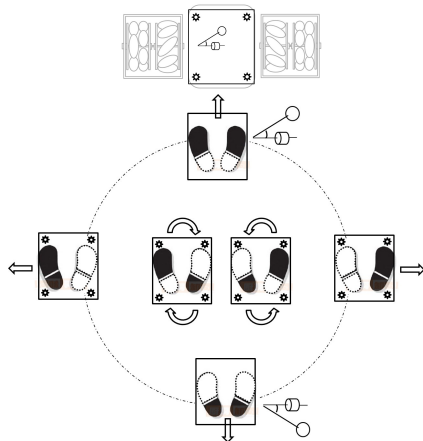


Fig.7 The joystick-like maneuver interface using a force plate and an inclination angle (upper), and the assignment of the motion by the load distribution (lower)

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、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)。

6 実走行試験

建物内と構内にて、実際に搭乗しての走行試験を行った。MOWU と PMWU [8] にて、600[m] 弱のコースを走破した。**Fig. 8-17** に示す路面状況は、リノリウム、全天候舗装、コンクリート、アスファルト、ウッドデッキ、ブロック敷き、マンホール、グレーチングなどであり、2[cm] 程度の縁石や敷居の段差、3[cm] 程度の溝、7度程度の斜面の上り下りが含まれている。他に、ゴムや金属の点字ブロック上の走行、10度程度の斜面の上り下り、3[cm] 程度の縁石乗り上げなども実行した。



Fig.8 Linoleum floor



Fig.9 All-weather road



Fig.10 Concrete pavement



Fig.11 Asphalt road



Fig.12 Wood deck



Fig.13 Block pavement



Fig.14 Grating cover

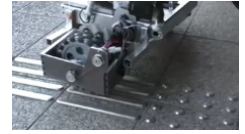


Fig.15 Metal Braille block



Fig.16 Metal ramp (10°) **Fig.17** Curbstone (3[cm])



MOWU、PMWU とも、前後方向並進や旋回の運動性能は、ほぼ同等だったが、凹凸・斜面・脆弱・高抵抗などのやや厳しい路面状況での左右方向並進で MOWU の運動性能が低かった。MOWU のオムニホイールのローラが小径で引っ掛かりや抵抗となったこと、メカナムホイール 1 組では、四輪駆動と二輪駆動の違いと同様、駆動力が不十分だったことが理由と考えられる。

7 終わりに

タイヤに換えて全方向移動ホイールを用いる平行二輪型倒立振り子移動体の構成方法を提案し、成人一人が搭乗し、直立バランス維持をしながら全方向移動が可能な試作機を製作した。

実際に搭乗して、実環境での走行性能を検証し、バリアフリー環境程度の不整地の走行能力を持つことを実証した。

参考文献

- [1] <http://www.segway-japan.net/>
- [2] 松本 治, 竹園 年延, 堀内 英一, 小谷内 範穂, 小森谷清, 橋本隆志, 安藤敏之, 巖柱二郎, “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] Kobayashi D., Takesue N., “MINAMO: Multidirectional INtuitive Aquatic MObility – Improvement of Stability and Maneuverability –”, Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 741-746, 2014.
- [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予稿集, 1P2-G07, 2015.