

1 アクチュエータ・ロボットによる台車搬送実験

Dolly Transport Experiment Using One Actuator Robot

岩木 晃要*1, 森田 亮介*1, 伊藤 聡*1

Kouyou IWAKI, Ryousuke MORITA, Satoshi ITO

Inspired by the motions of the snakeboard, this paper considers the application of the propulsion mechanism with the sole actuator to the transportation. This mechanism obtains the propulsion force from the rotor rotation. However, this rotor does not necessarily rotate if the counter force is obtained from the rotor. Based on this idea, we tackle the transportation where the one-actuator robot conveys a dolly by connecting the bottom of dolly to the rotor of the robot. Then, we propose a connecting method that can absorb the difference of the height between the robot and dolly. To verify the transportation with the commercial dolly, the one-actuator robot is manufactured. Using this robot, we demonstrate the actual transportations by some experiments.

Keywords: snakeboard, motor, dolly, yaw moment, wheel angle, one actuator.

(2020年5月20日受付, 2021年1月8日再受付, 2021年3月13日再々受付)

1 緒言

作業効率の改善や人件費削減を図るため、職場にロボットを導入する動きが増えてきている。ロボットの活躍の場は農業[1]や建設[2], 病院[3]など多岐にわたり、近年では宇宙環境や深海など幅広い環境で利用されている[4]。その中でも工場内での物品運搬といった単純作業では自律搬送[5]としてロボットの実用化が進んでいる。

搬送にはロボットの移動機能が必要である。移動機能の実現には動物のように脚を利用する方法もあるが、ロボットで主流となるのは車輪を用いる方法である。その車輪にも大きく分けて2種類存在する。一つがモータ等の動力で直接駆動させる能動車輪、もう一つが外部の力を受け回転する受動車輪である。現在の運搬車では、この二つの車輪を組み合わせ複数のモータを利用して直進・右左折を実現させたものが多い。

著者らはこれまで複数必要であったモータを削減し、一つのモータで2次元平面内を移動可能な機構について、受動車輪をベースに考察してきた。その推進には次節で説明するスネークボードの動作原理を応用している。受動車輪の周期的操舵運動とヨーモーメントの発生を目的としたロータ回転との位相差が移動距離に与える影響を調査[6]し、ロータの回転と受動車輪

操舵の回転をトルクリミッタと呼ばれる機械部品で結合することで、一つのモータのみでロボットを推進させられる方法を提案し、実機による平面内移動を実証した[7]。さらに、トルクリミッタという特殊な部品を用いずに一つのモータで推進できるよう新たな機構を考案し、位置情報のフィードバックにより目的地点へ到達させられることを示した[8]。

本稿では筆者らがこれまでに提案した1モータ移動ロボットを物品搬送に利用することを考える。ロボットは水平な床面の工場で台車等を引っ張って運搬することを想定している。本ロボットは受動車輪がベースであるため外力(手動)による駆動を試みたときにモータがその負荷とならず、したがって自律移動しないときには荷物を載せた台車のように振る舞うと期待できる。しかし、提案しているロボットはロータ回転による反力が唯一の推進力であるため、搬送物を運搬しながらどこかでロータを回転させる仕組みを取り入れる必要があり、そのスペースをどのように確保するかが問題となる。

この問題に対し、ロータに搬送物を載せるのではなく、搬送物が載せられた台車やカート、ドーリなどへロータを下から結合し、台車ごと搬送する手法を採用する。台車としては本稿では前輪2輪が自在キャスタのものに限定して考える。ロータを台車に結合してしまうため、ロータは自由回転しなくなる。しかし、ロータ回転はその回転反力を得ることが目的であるので、台車全体の質量が、結合によりロータの慣性モーメン

連絡先: 岩木 晃要, 〒501-1193, 岐阜市柳戸 1-1

岐阜大学大学院自然科学技術研究科,

e-mail: z4525015@gifu-u.ac.jp

*1 岐阜大学

ト増大に参与し、かえって効果的に反力を得ることができる。と考える。

このロータ-台車間の結合であるが、台車全体の重量がロータにかかると、搬送車が台車を含めた搬送物の重量を保持したまま運搬することとなるので効率が悪い。そこで本稿では、台車の質量は台車の車輪で受け、搬送車は台車を下から牽引する機能に特化できるような直接結合の方法を採用する。搬送車との結合方法の工夫により、実際に台車牽引が可能なことを実証することを本稿の目的とする。

2 アクチュエータ移動ロボットの動作原理

1 つのアクチュエータのみで移動するために、スネークボードの動作原理を応用する。スネークボードは前後 2 つずつの受動車輪をもつスケートボードの一種で、ヒトがその上に乗って移動する。推進には地面を蹴ることなく、ボードに乗ったまま搭乗者が上体をひねることで加速が可能である。このとき前後輪の旋回角をタイミングよく変化させる必要がある。このスネークボードの運動は、非ホロノミック系の制御として、長年研究がなされてきた[9-12]。本稿はスネークボードの推進原理を利用した牽引のみを扱い、運動の制御までは行わないことにする。

スネークボードは Fig. 1 のようにモデル化される。ロータは搭乗者の上体のひねりをその機能に着目して単純化したものである。スネークボードはこのロータの回転の反力により機体を加速させる。すなわち、Fig. 2 左のように前輪を左方向、後輪を右方向に旋回させた状態でロータを右回転方向に加速させる。するとその加速のための反力として左回転のヨーモーメントが機体に働く。このヨーモーメントと前後輪の回転方向

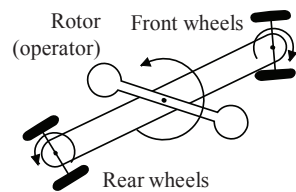


Fig. 1 Snakeboard model.

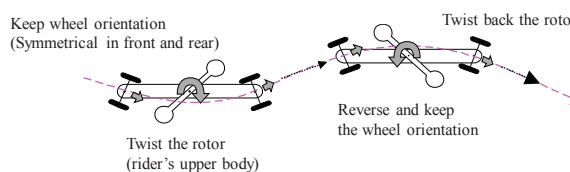


Fig. 2 Moving image of snakeboard robot.

にしたがい、受動車輪しか持たないボードも左旋回で加速する。しかし、ヨーモーメントによる加速は一時的なものであるため、やがてボードは摩擦により停止してしまう。そこで、一度右回転方向に回転させたロータを逆方向に振り返す。このとき車輪方向がそのままであると元の位置に戻ってしまうが、Fig. 2 中央のように前輪を右方向、後輪を左方向に反転しておけばロータ反転前と同方向に同じ理由で右旋回で推進する。このようにロータ回転と前後輪旋回をタイミングよく繰り返すとボードは推進し続けることとなる。

Fig. 1 の一般的なスネークボード・モデルでは、前後輪の旋回とロータ回転の 3 つのアクチュエータを仮定している。本稿のロボットの特徴は、アクチュエータを 1 つしか用いないことである。

アクチュエータ 1 つで Fig. 2 の動作を実現するための構想を Fig. 3 に示す。前輪と後輪の旋回角は反対方向で大きさは等しくてよく、それらを Fig. 3 左下ののように同半径の伝達機構で結合する。この車輪旋回とロータを結合すればよいのであるが、ロータは移動中常に加減速させておきたいのに対し、車輪旋回角度は一方方向を保っておきたい。

この相対する要求を達成させるために、以下の方法を考案した。まずロータを駆動させるため、Fig. 3 の(1)のようにモータをロータに直結させる。回転力をロータに十分に伝えるため、通常はこのモータを機体にしっかりと固定する。しかし、ここではモータをいわゆる「遊び(allowance)」を持たせて機体に取り付ける。この場合、ロータが回転するとき、その反動でモータ本体がロータと反対方向に回転してしまう。この遊びの回転を利用して車輪を旋回させる (Fig. 3 の(2))。そして、遊び回転を制限するための仕組みが Fig. 3 の(3)のストップである。こうすると車輪旋回が終わった後ロータが自由回転できることとなり、旋回角度が固定されたまま、ロータからのヨー回転反力モーメントを得ることができる。

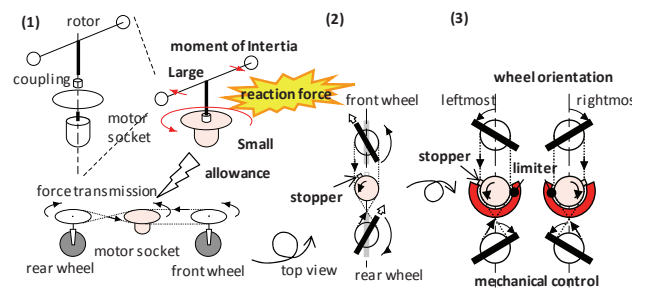


Fig. 3 Moving mechanism of one actuator robot.

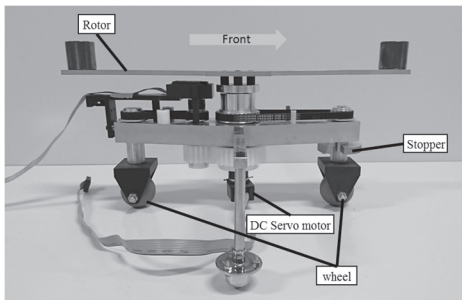


Fig. 4 One actuator robot.

この構想に基づき文献[8]で製作したロボットを Fig. 4 に示す。車長 38.0 cm, 車幅 37.0 cm, 車高 18.3 cm で重さ 3.3 kg である。車輪の回転は床面との回転摩擦が少なくなるように床面と点接触する球状の車輪を用いた。この場合、左右のバランスが保てず転倒を起こすので、両側に補助輪を設けてある。実験により、ロータを正弦駆動させることで直進が可能なること、その正弦駆動に時間と共に増減するオフセットを加えるとオフセットの増加率に応じて曲率が増加する旋回運動をすること、さらに目標地点の方向に応じてオフセット増加率をフィードバック制御すれば目標地点への到達が可能なることが実験的に示されている[8]。

3 搬送用ロボットの設計

3.1 結合の視点

第 1 章でも述べたように、本稿での主目的の一つは、1 アクチュエータ・ロボットでの台車牽引の実現である。このとき問題となるのは台車とロボットとの結合方法である。単純に考えれば鉄道での貨物輸送のように、貨物車を動力源のある車両の一部に連結してしまえばよい。しかし、本稿で用いる 1 アクチュエータ・ロボットの活用を考えた場合、ロータのいわゆる「空回り」を防ぐように台車とロボットを結合すると効果的に駆動力が得られると考えられる。

このロボットはロータを回転させる反力で機体を推進させる。しかし、反力が得られれば必ずしもロータを空転させる必要はない。極端に言えばロータは質量がゼロで慣性モーメントは無限大が理想であり、回転せずとも反力が得られるのが望ましい。そのためロータを台車に固定すれば、モータの回転に対し十分な反力を得ることができる。そこで台車の下からロボットをロータ部分で結合し、牽引する手法を試みる。

3.2 結合方法の検討

本稿では前輪 2 輪のみが自在キャスタとなっているような台車に対象を限定する。台車本体をロータ慣性モーメントとして利用する場合、原理的には台車そのものが反力で回転する。そこで、台車が車輪の拘束を受けることなく自由に回転するように、搬送車は後輪固定キャスタの中間点に取り付け、後輪方向に向かって引っ張って蛇行搬送させる。

結合自体はねじ止めで簡単にできる。このときロータ高が低いと台車の下に接続したときロボットの車輪が浮いた状態になり、ロボットのモータを駆動してもロボットが空転するだけである。逆にロータ高が高いと台車が浮いた状態となる。この状態では推進は可能と考えられるが、台車に乗せた積載物ごとの重量がロボットにかかり、それを支えながらの運搬となるため効率が悪い。理想的には、積載物を含めた台車の質量は台車自身で受け、ロボットは推進のみに寄与することが望ましい。すなわち完全固定する場合には、台車およびロボットの車輪すべてが接地した状態で固定しなければならない。しかし、その状態を実現するには高精度な製作が必要であり、例えそれが実現できたとしても、床面の凹凸に対して適応が困難なことが予想される。

その解決方法としてモータ接合部を上下に自由に動く状態で結合する方法を考えた。具体的にはロータを金属棒とカップリングパーツで作成する。ロータの一部となる金属棒は台車に固定してしまう。一方、カップリングパーツは貫通したキー溝つきの穴を掘り、モータ軸を上からはめ込むように接続させる。これにより、回転方向および水平移動方向はカップリングから拘束をうけるのに対し、鉛直方向はフリーとなる (Fig. 7 右)。つまり、高さ方向の自由度を確保したうえで回転力と水平方向推進力の伝達が可能となる。なお、実際に製作したものの写真を Fig. 7 で示す。

3.3 結合の実現方法

具体的に設計した結合部分を Fig. 7 に示す。カップリングパーツは上下方向に自由に動き、モータの回転はロータが上下しても伝達される。結合にはカップリングパーツに穴を開けるだけで余計な機構は不要であり、機構の増加により高さが増し、ロボットが台車の下に入らないという問題は発生しない。

ロータおよびモータの動力伝達については、上下の

自由度により動力の伝達が弱くなることも考えられたが、モータの出力軸とロータのカップリングパーツにはキー溝およびキーが取り付けられているため、モータの回転力は、ロータさらに台車まで空転することなく伝達される。

4 実験

4.1 実験の目的と内容

実験の目的は、3章で設計した結合機構により、1アクチュエータ・ロボットで台車を牽引できるかを確認することである。またロボットにコントローラと動力源を搭載して自律化して動かすことも2つ目の目的である。

実験では、ロボットを台車の下に取り付けて台車を牽引する。一般的な台車が牽引できるよう Fig. 5 に示す市販台車 (Nanshin 社製: 台助) を使用した。この台車は後輪二輪が固定され、前輪二輪のみが自由回転できるタイプである。台車の寸法は縦 90 cm, 横 60 cm, 前後車軸間隔 54 cm, 左右車輪間隔 30 cm で荷台裏面までの高さは 16 cm である。

4.2 実機製作

4.2.1 モータの選定

モータ選定のため予備実験を行った。少なくとも 50 kg 程度の物を運べる必要があると考え、台車の上に人間 (72 kg) を乗せ、デジタルバネはかりを用いて手動牽引し、その時の牽引力の最大値を測定した。床はフローリングシートが敷かれた水平な環境である。10 回の測定結果を Table 1 に示す。

表値の平均より 70 kg のものを運ぶためには 20 N 程度、多くて 25 N もあれば十分であることが分かった。



Fig. 5 Dolly cart.

Table 1 Tensile force.

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Force[N]	20.36	19.86	18.46	18.17	20.42	22.20	21.16	20.76	20.33	21.02

ロボットと合体させた台車を大きなロータとして考え、ロータのモーメントアームを台車対角線距離の 94.2 cm とする。このとき 25 N の力でロータ、台車を振るのに必要なモータのトルクは 23.55 Nm となる。この出力を満たし、かつ台車高さである 16 cm 以内に収まる大きさのモータを選定した。

選定したモータは MAXSON 社製ブラシレスモータ (642221) (Fig. 6) である。モータの諸元を Table 2 に示す。停動トルクでの出力はギア比を考慮し、 $4300 \text{ mNm} \times 16 = 68.8 \text{ Nm}$ で上記の値を十分超えている。

4.2.2 ロータの製作

Fig. 7 が作成したロータとカップリングパーツである。このロータは台車に固定され (Fig. 10 右)、慣性モーメントを増大させるばかりでなく、ロボットの推進力を駆動力として台車に伝達させる働きを担う。台車の下に固定し回転させる関係上薄く、耐久力のある軟鋼製フラットバー (3 cm × 60 cm) を使用した。そして 3D プリンタで作成したカップリングパーツをねじ止めてモータと結合させる。カップリングパーツの穴は貫通しており、フラットバーがモータ軸が貫通しないようストッパの役割を果たす。



Fig. 6 Motor.

Table 2 Motor data.

Max continuous torque	536 mNm
Stalling torque	4300 mNm
Weight	0.9 kg
Gear ratio	16:1
Output	200 W
Voltage	24 V

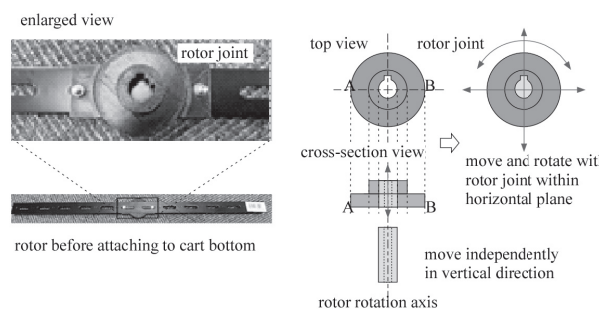


Fig. 7 Rotor and coupling parts.

4.2.3 機体の設計

機体は先行研究[8]を参考にして設計を行った。サイズを台車下部に収まるように小さく設計すること、制御装置や動力源を搭載することが先行研究に新たに加わった制約である。

まず機体を低くするために全長が短いモータを選択し、さらにモータのソケットパーツの変更を行い無駄なスペースを減らした。車輪旋回の動力伝達に用いるプーリをモータ側はモータのサイズより大きくする必要があり基準円直径 11.46 cm のものを選択した。車輪側のプーリは基準円直径 3.82 cm の小型のものを選定し、結果的にプーリ比は 3:1 となった。前号機に倣いストッパによる旋回角度の範囲は $\pm 30 \text{ deg}$ とし、車輪間の間隔は 16 cm とした。

自律化のため Arduino 互換機の Studino (Artec 社) と Maxon 社製モータドライバ(642221)を機体に搭載する。補助輪と機体をつなぐ翼部分にスペースを確保し、車高が高くない位置にそれらを搭載可能となった。

Fig. 8 に設計した機体を示す。機体の材料には軽さと強度が両立できるジュラルミン A2017 を使用した。

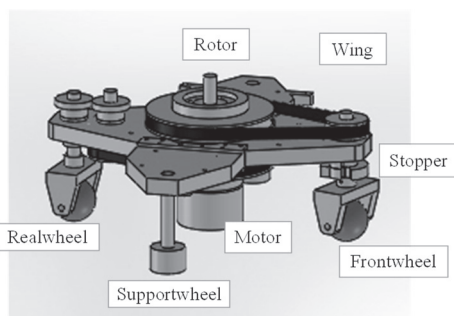


Fig. 8 General view of the one actuator robot.

Table 3 Parameter of the robot.

Length	30 cm
Width	30 cm
Height	16 cm
Weight	4 kg

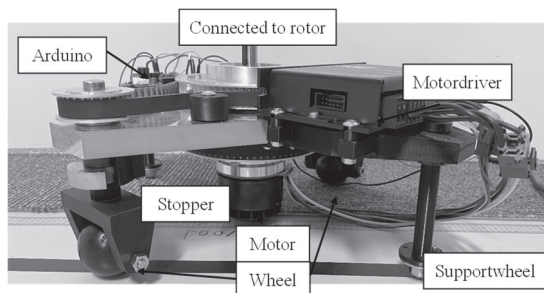


Fig. 9 One actuator robot.

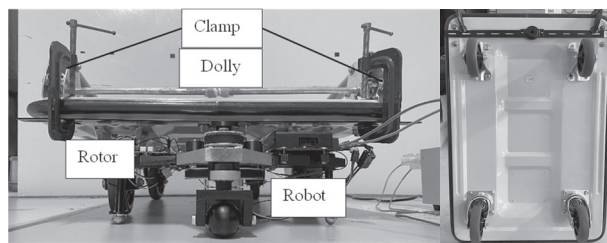


Fig. 10 Connection between dolly and robot.

ロボットのパラメータを Table 3 に示す。また、製作した実機を Fig. 9 に示す。

4.3 実験条件

台車との結合後、推進実験を行い従来機のように推進できるかについて検証を行う。ロータと台車は、最終的にはねじ止めなどが望ましいが、台車への加工は避け、実験では Fig. 10 に示すようにクランプにより簡易固定した。

ロボットは、ロータ角度の目標軌道として正弦入力をあたえ、その位置制御で駆動する。正弦波の振幅は 150 deg 、周波数は 0.6 Hz とし、20 秒間の移動を 10 回測定する。ロータ角度はホールセンサからの角速度情報を数値積分することで検出できる。

床面の凹凸は車輪の空転の他、進行方向にも影響を与える。そこで、実験は平坦な床面で実施した。

4.4 実験結果

実験時のロボット動作の開始後 10 秒間のスナップショットを Fig. 11 に示す。ロボットが台車を引きながら前進していくことが分かる。

また 10 回実施した実験でのロボットの軌道を、初期値を原点として cm 単位で描いたグラフを Fig. 12 に示す。到達点の平均を×印で示した。到達地点の平均座標は(-0.71, 82)、標準偏差は(15.4, 18.6)であった。

4.5 考察

10 回の実験のうち右から 3 番目を除き、台車・ロボットとも接地状態が維持できなくなるような現象は発生せず、推進力の低下といった現象は確認できなかった。よってカップリングパーツを用いた本稿提案の結合方法は有効であったといえる。Fig. 12 よりこの運搬ロボットは 20 秒間に約 80 cm 程度移動していることが確認できる。ただし、最終地点座標の平均はほぼ中央だったが、かなりばらつきのある結果となった。その原因として、ロータ端を固定後輪キャスタ間に固定

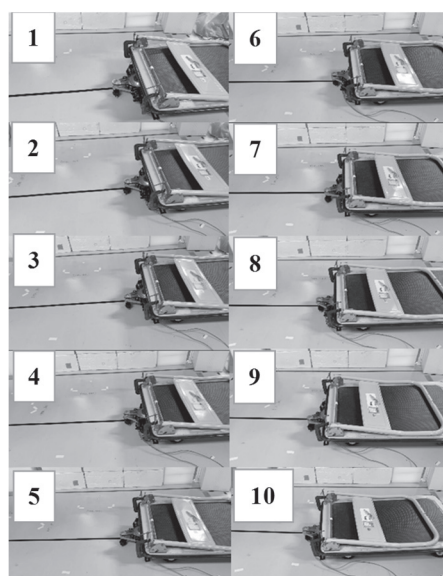


Fig. 11 Snapshot of robot motion.

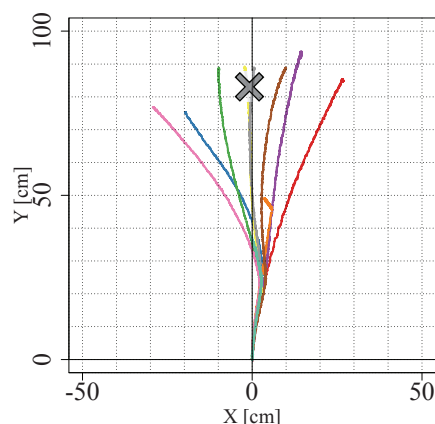


Fig. 12 Trajectory of robot.

すべきところを、荷台底面形状の凹凸の関係で台車端で固定せざるをえなかったことがあげられる。そのためロボットと台車のヨー方向回転軸がずれてしまい、台車車輪の横滑りが発生する。この横滑りは床面の位置ばかりでなく車輪角度（接地場所）にも依存するため再現性が低く、結果的に進行方向がばらついたと考えられる。ばらつき原因については今後検証を行う。

5 結言

本稿では1アクチュエータ・ロボットによる物品搬送について、ロータを台車と結合し、台車ごと物体を搬送することが可能なことを実証した。

ロボットの台車の結合には、ロータを空転させるのではなく、あえて台車と結合し、台車の慣性モーメントを駆動に利用することを考えた。しかし、実際の結合にはロボット・台車の全車輪が同時接地する必要が

る。そこで、ロータとモータの結合部において鉛直方向に自由度を持たせる機構を、キー溝を利用して考案し、実装した。これによりロボットが台車を搬送できることを実機により確認した。

またロボットの動きは20秒間に約80cmと運搬ロボットとするには遅いものとなってしまった。これは回転数に制限を設けたため、モータの性能を十分に引き出していないためである。今後はその制限をとり除いた条件で実験を行い、台車の積載物とその重量変化をも加味した搬送能力について評価していき、最終的には工場での導入を目指す予定である。

参考文献

- [1] 嘉数侑昇, 自律農業ロボットの課題と現状, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 951-954, 2000.
- [2] 吉灘裕, 建設ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 5, pp. 824-828, 2019.
- [3] 本田幸夫, 介護ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 9, pp. 159-161, 2020.
- [4] 田所諭, 大須賀公一, 天野久徳, 極限環境作業ロボットレスキューロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp. 685-688, 2001.
- [5] F. Rubio, F. Valero and C. L.-Albert A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, pp. 1-22, 2019.
- [6] S. Ito, S. Takeuchi, M. Sasaki, Motion measurement of a two-wheeled skateboard and its dynamical simulation, *Applied Mathematical Modelling*, 36, pp. 2178-2191, 2012.
- [7] S. Ito, S. Sugiura, Y. Masuda, S. Nohara, R. Morita, Mechanism and Control of a One-Actuator Mobile Robot In incorporating a Torque Limiter, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(2), pp. 431-448, 2020.
- [8] S. Ito, K. Niwa, S. Sugiura, R. Morita, An autonomous mobile robot with passive wheels propelled by a single motor, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 122, 103 310, 2019.
- [9] 衣笠一樹, 石川将人, 大須賀公一, キャスターボードロボットのモデリングと制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 8, pp.755-762, 2013.
- [10] S. Iannitti, K. Lynch, Minimum control-switch motions for the snakeboard: A case study in kinematically controllable underactuated systems, *IEEE Transactions of Robotics*, Vol. 20, pp. 994-1006, 2004.
- [11] T. Narikiyo, Control of underactuated mechanical systems via passive velocity field control: Application to snakeboard and 3D rigid body, *Nonlinear Analysis*, Vol. 71, pp. e2358-e2365, 2009.
- [12] S. Derammelaere, C. Copot, M. Haemers, F. Verbelen, B.Vervisch, C.Ionescu, K. Stockman, Realtime locomotion control of a snakeboard robot based on a novel model, enabling better physical insights, *European J. of Control*, Vol. 45, pp. 57-64, 2019.