

スネークボードの駆動原理を利用した

1 モータ移動ロボット

伊藤 聡*

1. はじめに

本稿は機械分野の中でも、ロボット特に自律移動の機構に関するものである。

ロボットにとって移動という機能は、作業空間内の位置の更新をもたらす、作業領域の拡大ばかりでなく、物品の配送や未知空間の探索・情報収集などの働きを担う。移動を安価な仕組みで実現できれば、これらの働きが効果的に得られることとなる。

車社会の現代では都市空間のあらゆる場所が舗装されているため、移動や運送には車輪を用いることが有効である。車輪そのものを駆動せずとも、台車やベビーカー、ローラスケートなどのようにキャスター(以降、受動車輪と呼ぶ)を取り付け、地面上を転がすだけでも移動が容易となる。荷物搬送の場合は持ち上げる必要がない分、労力が減少する。つまり、受動車輪を取り付け上手く駆動力を与えることが、移動を実現する簡素な方法の一つである。

受動車輪を持つ自律ロボットは、これまでもいくつか提案がなされている。スネークボードは非ホロノミック系の例題として多くの研究がなされている^{1~4)}。ヘビ型ロボットでは胴部を構成する多リンク間の能動関節を用い、リンク側部に取り付けた受動車輪を駆

動させる^{5,6)}。1能動関節のヘビ型ロボットに対応する Roller Racer^{7,8)}や、歩行ロボットに受動車輪を装着するもの⁹⁾も提案されている。

本稿では、受動車輪を持つ車輪移動ロボットを、生産性の観点から、使用するモータを1つのみで実現することを試みる。たとえば自動車は、アクセル/ブレーキによる前進後退とハンドルによる左右旋回の2自由度により2次元平面内を自由に移動する。2自由度場合、各自由度を独立に駆動する2つのモータが必要となる。このモータ数を1つに減少させるには、それとは違った推進原理が必要である。その推進原理として、Roller Racerのようにハンドル駆動という選択肢もあるが、本稿では動的作用を利用した移動の高速性という観点から、第2節に記すスネークボードを規範とする。スネークボードに関しては、車輪が車軸方向には移動しない(スリップしない)という速度拘束の下で目標地点にいかにかに到達するかという軌道計画に関する理論研究が主流であり、モータを1つにして動作をロボットで実現したものはこれまでに報告されていない。モータは車両のなかで重量を取るものの一つであり、磨耗を生じ故障も起こしやすい。つまりモータ数の減少は、軽量化や耐故障性向上に貢献する。

第2節では、本稿で製作するロボットの元となったスネークボードとその推進原理について説明する。この推進を規範とし、トル

* Satoshi Ito 岐阜大学工学部機械工学科知能機械コース教授
博士(工学)
One-motor Mobile Robot Utilizing Propulsion Principle of the Snakeboard

ク・リミッタとストッパを組み合わせた新しい機構¹⁰を第3節で紹介し、本機構の推進能力を実証した実験結果を示す。しかし、トルク・リミッタは安全装置などに使用される特殊な力伝達部品であり、このようなキーパーツなしで機構が実現できる方が汎用性・普及の観点から望ましい。そこで第4節では、モータの本体への固定方法を工夫し、トルク・リミッタなしで1つのモータで推進する機構¹¹を紹介する。最終の第5節は、本稿のまとめとする。

2. スネークボードの構造と推進原理

本稿で紹介するロボットは、遊具として知られているスネークボード(図1(a))の推進を規範とする。この推進原理は、現在市販されている図1(b)に示すような2輪型スケートボードのものとも同じと考えている。この推進モデルを解析するために標準的に用いら

れるのが、図1(c)である。ロータは、後述する搭乗者の腰回転による力生成を実現する。

スネークボードでは、前後輪の接続する板が本体に対して左右に旋回する構造となっている。その板上に足を載せ、その足をひねることで独立に前後輪操舵角が変化(以降、旋回)する。2輪型スケートボードでは、体重移動によりボード本体が軸周り(ロール軸)にねじれ、その影響で前後輪が左右旋回する構造となっている。いずれにせよ、前後輪の左右旋回が推進には必要となる。

推進の最初のみ足で地面を蹴り初速を得ることが多いが、原理的には「車輪旋回」と「腰回転によるヨーモーメント生成」の2つの動作の組み合わせを左右反転させながら繰り返すことで加速する。これを図示したのが図2である。

図2のようにボードが右方向に移動する場合、搭乗者は前後輪の操舵が「ハ」の字にな

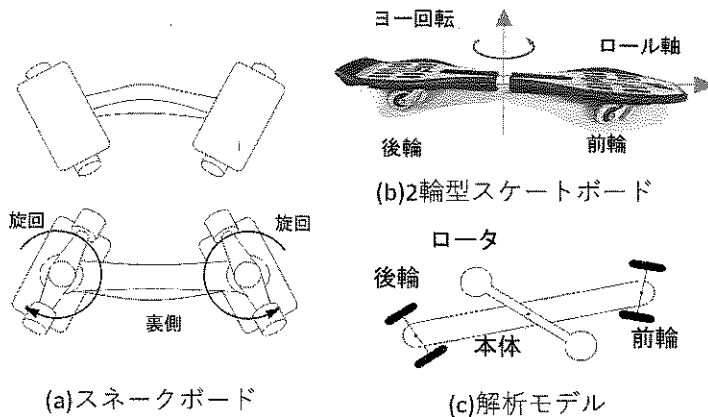


図1 各種スネークボードと解析モデル

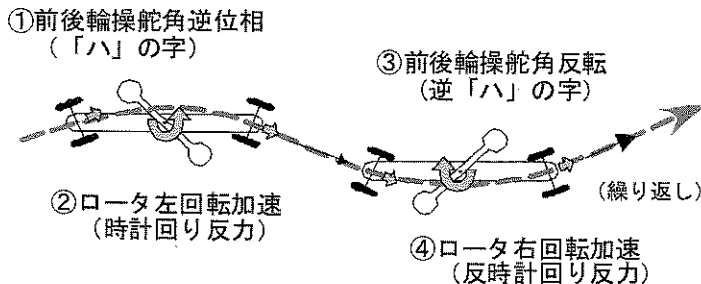


図2 スネークボードの推進原理

るよう左右対称に旋回させる。この状態で上体を腰回りでひねって水平回転させる。この反力により本体には水平面内の回転力(ヨーモーメント)が働く。この力で受動車輪が回転し本体は操舵角で決められた方向に旋回推進する。このままの状態ではボードは摩擦により停止してしまいが、搭乗者はひねった上体を逆方向に捻り返すことができる。その前に前後輪の操舵角を反転させておくと、捻り返しの反力によりボードは先ほどと同方向に加速推進し続ける。

この2つの動作を周期的に繰り返すことでボードは蛇行しながら右方向に推進することができる。

3. 1 モータ移動ロボット¹⁰⁾

3. 1 機構の考案

スネークボードの推進原理を1つのモータで実現する上で、まず車輪操舵角は前後輪で対称、すなわち逆方向に同角度で変位することとした。この条件下でも推進が可能なことはシミュレーションにより確認している¹²⁾。

車体に取り付けた前後輪を逆方向に旋回させた状態でヨーモーメントを与えることが推進の基本原理となる。ヨーモーメントは図1(c)のスネークボード・モデルのように、上部に空転するロータを取り付け回転させる。前後輪の操舵角固定とヨーモーメントの生成を左右反転しながら繰り返すには、通常、前輪操舵、後輪操舵およびロータ回転のための3つのモータが必要である。これを一つのモータで実現するには機構的な工夫が必要となる。

まず前後輪の旋回を連動させることでモータを1つ削減する。先に設定した操舵角の対称性、すなわち前輪操舵角が右30度のとき、後輪操舵角を左30度とするには、例えば同歯数の歯車を連結すれば実現できる。さらにその操舵角は反転はできるが、それ以外は一定な値が保たれるものとする。なお、固定操舵角でも左右旋回時の半径が調節できること

を後述の実験で示す。

次に、前後輪の旋回とロータ回転を結合し、1つのモータでの駆動を達成する。ここで車輪旋回は操舵角を一定に保つ定値制御である。一方、ロータ回転は前進のための駆動力を得ることが目的であるため、加減速が必要である。すなわち、1つのモータに対し回転角度の固定と加減速という相反する要求が課せれることとなる。

操舵角を一定に保つには、例えばストッパで可動域を機械的に制限すれば、一方向に駆動力を与え続ける限り、可動域両端で拘束される形で実現可能である。しかし、前後輪操舵とロータを単純に結合すると、操舵角が保たれている間、常にロータの回転も固定され、ロータ加減速の反力による推進力を得ることができない。

この問題を解決するためには、操舵角が固定されているとき、前後輪の操舵とロータ回転の結合を一時的に切断できればよい。そこで、ある値以上のトルクが作用すると結合が切断され空転を起こす機械装置「トルク・リミッタ」を導入する。

ストッパで限定された範囲内では、モータの駆動により自由に前後輪の操舵が可能となる。そして、前後輪操舵が可動限界に達すると、ストッパの反力により、大きなトルクがトルク・リミッタに作用する。このとき、トルク・リミッタが作動して空転を起こし、ロータは前後輪の操舵角を保ったまま回転でき、本体の推進力を生成する。

3. 2 機構の実現とロボットの製作

前節のアイデアを実現する機構の一つを図3に示す。図3(b)はトルク・リミッタが作動していない状態での動作である。図の下方の直立した2つの円盤は前後の車輪を表し、その操舵軸が平面内におかれた同じ歯数の歯車Bと歯車Cにそれぞれ接続している。上部の円盤はロータを表し、搭載するモータの回転軸と直結している。また、モータの回転

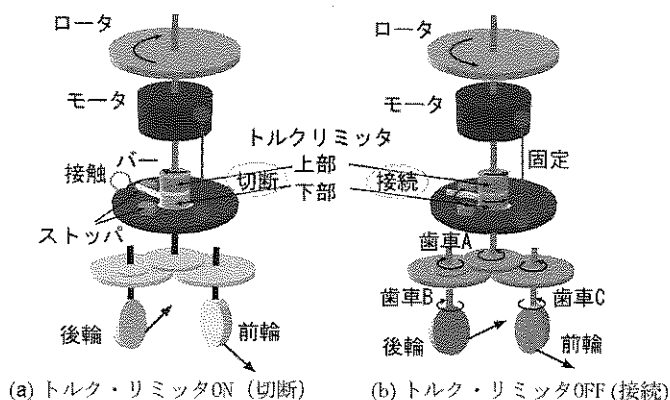


図3 トルク・リミッタを用いた機構とその動作

軸はトルク・リミッタを通して下部の歯車Aと結合し、歯車Aが歯車Bを駆動することで車輪操舵角が前後対称に変位する。すなわち、一つのモータでロータと車輪旋回の同時駆動が可能となっている。

トルク・リミッタはストップとともに車輪操舵角を一定とするために作用する。図3(a)のように車輪旋回と連動するバーがストップに接触し動きが制限されたとき、トルク・リミッタが作動して上部と下部が切断され、車輪旋回が停止する。これにより、車輪操舵角を保ったまま、ロータ回転が可能となる。

以上の構想で製作したロボットを図4に示す。全長600mm、全幅450mm、全高270mm、重量3.8kgである。モータにはロータリエンコーダ(Maxon Motor HEDL5540)付きDCモータ(Maxon Motor RE25, 20[W], 減速

比128:1)を使用した。車高を抑えるため、ロータ回転軸からギアを挟んで駆動軸を下方に折り返した後、トルク・リミッタ(ツバキE&MMK-08)を挿入し、その後ストップ機構を取り付けた。車輪操舵角は、35[deg]、40[deg]、45[deg]の中からバーの位置により機械的に選択可能となっている。車輪は、車軸方向の摩擦を大きくするためウレタン製とし、旋回時の回転摩擦が小さい点接触となるよう球状とした。側方向への転倒を防止するために、全方位移動可能なボールローラを用いた補助輪を導入している。

3.3 推進動作の確認

製作したロボットで実際に推進が可能であるか確認するため、以下の正弦波様のロータ回転角目標軌道 Q_d を与え、比例制御により10秒間ロボットの推進を試みた。

$$Q_d = A \sin(2\pi ft) + \rho \times t \quad (1)$$

ここで t [s]は時刻であり、実験では正弦波は振幅 $A = 50$ deg、周波数 $f = 0.8$ Hzとした。前後輪操舵角は45度とし、さまざまなオフセット増加率 ρ 対し駆動した。原点の初期位置からのロボットの移動軌跡を図5(a)に示す。 ρ により旋回角度の大きさが調節でき、1つのモータでも、また車輪操舵角が45度と一定でも、自由な曲率で移動できることが分かる。

目標地点の位置をフィードバックして ρ を

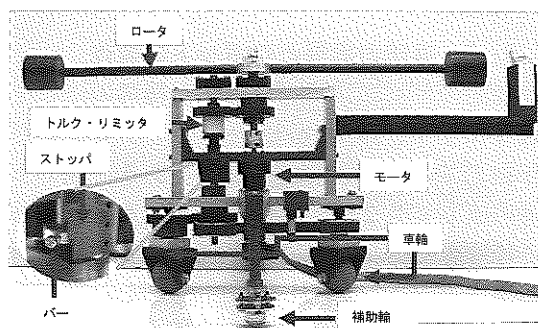
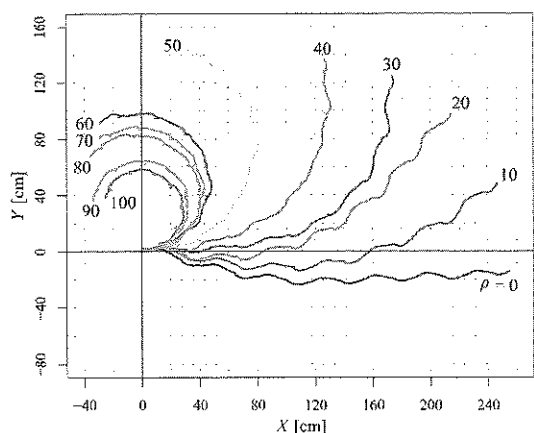
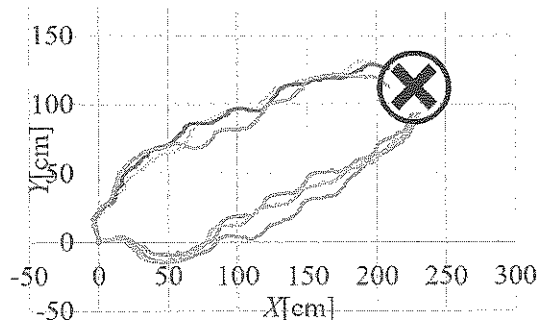


図4 製作したロボット



(a) 正弦目標軌道のオフセット調節による旋回



(b) フィードバックによる目標地点への制御

図5 ロボットの推進実験

リアルタイムで調節すると図5(b)のように目標地点への到達が可能である。90度向きの異なる原点初期値から、ばらつきがみられるものの各3回の実験すべてで円中心の目標地点まで到達している。

4. トルク・リミッタを利用しない機構¹¹⁾

4.1 改善点

前節では、1つのモータで推進するロボットを実現できた。その機構でキーとなるのはトルク・リミッタである。逆にいえば、このトルク・リミッタが手に入らなければ、この機構は成立しない。

今回のロボットで用いたトルク・リミッタは機械的な摩擦を利用したもので、静止摩擦より大きな力がかかると滑りが作用するとい

う仕組みである。機械的な摩擦は、温度や湿度などの条件により大きさが変化し、計測も難しくエネルギーロスを招くという機械の制御という観点からは取り扱いにくい性質をもつ。また、摩耗による劣化は避けられない。

このような観点から、トルク・リミッタを用いずに推進ができる1モータ・ロボットの方が望ましいと考え、その構造を考案した。

4.2 推進原理の実現と機構の考案

ヨーモーメントを得るにはモータとロータの結合は必須である。今回はトルク・リミッタを介さずに両者を直結する(図6(a))。

ロータ回転の反力により生成されるヨーモーメントをロボット本体に効果的に働かせるには、モータを本体にしっかり固定する必要がある。しかし、ここでは、いわゆる「遊

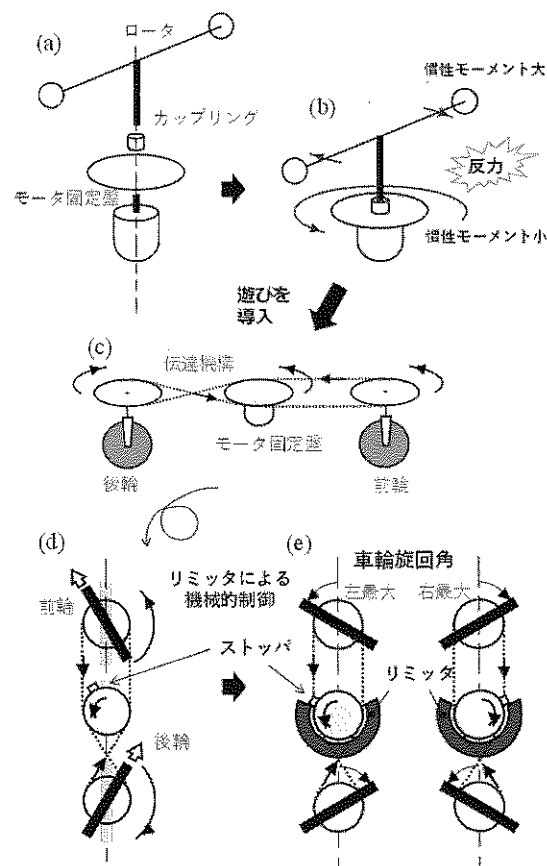


図6 モータ本体の自由回転を利用した機構

び」を設けて固定する。この遊びによるモータ本体の自由回転(図6(b))を利用して、前後輪の操舵角を変更する。このとき、前後輪は逆位相となるよう機構的に結合する(図6(c))。

この状態ではロータ反力でモータ本体が際限なく回転してしまうため、前後輪も旋回し続ける(図6(d))。そこで、操舵角を一定に保持するため、機械的なリミッタを取り付けて前後輪の旋回を制限する。図6(e)に示すように、モータ側に取り付けたストップがリミッタに接触している限り、旋回角度は一定に固定される。同時に、モータ本体の自由回転が停止し、ロータ回転の反力が本体に伝達されることとなる。

4.3 ロボットの製作

製作したロボットを図7に示す。全長380mm、全幅370mm、全高183mm、重量3.3kgとなった。駆動用のモータは第3節と同じである。ロータは、下部にあるカップリング部品によりモータ出力軸と接続している。

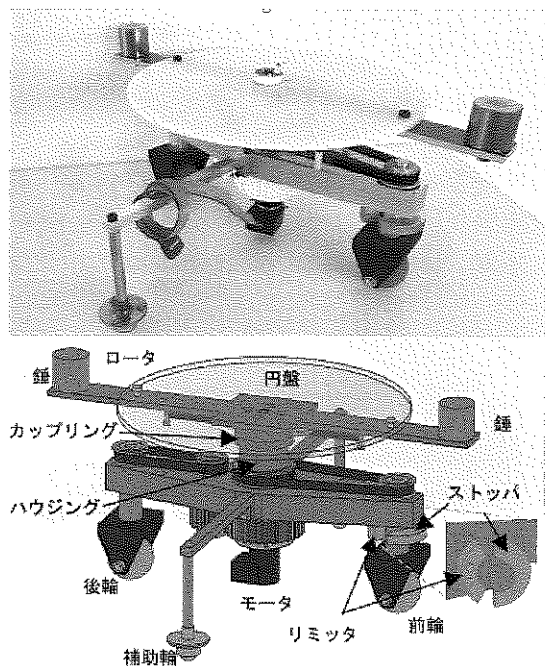


図7 トルク・リミッタなしロボット

慣性モーメントを増大させるため、回転中心から離れた位置に錘を配置する。また、荷物を積載するよう円盤を設けてある。

中心部のモータは、円筒形をしたハウジングに格納され、ベアリングによって本体に対し自由回転できる。ハウジングにはプーリとギアが取り付けられている。ハウジングの回転で、タイミングベルトを通して前輪が同方向に、ギアとタイミングベルトを介して後輪が逆方向に旋回する。対称逆位相の操舵角がギア比2:1で実現される。

車輪旋回の操舵角は ± 30 度で固定されるよう180度で切り取った円盤をストップとして前輪回転軸に取り付ける。一方、本体には回転軸周りに120度角のリミッタを取り付け、60度分の間隙により ± 30 度の旋回を実現する。

第3節と同様、ポリウレタン製球形車輪および補助輪を採用している。

4.4 推進動作の確認

製作したロボットにより、図8に示すように左右旋回を達成した。制御方法は第3.4節と同様である。正確に所望の旋回半径を実現するには、オフセットの調整が必要であるが、(1)式の ρ の符号により左右両方向の旋回運動

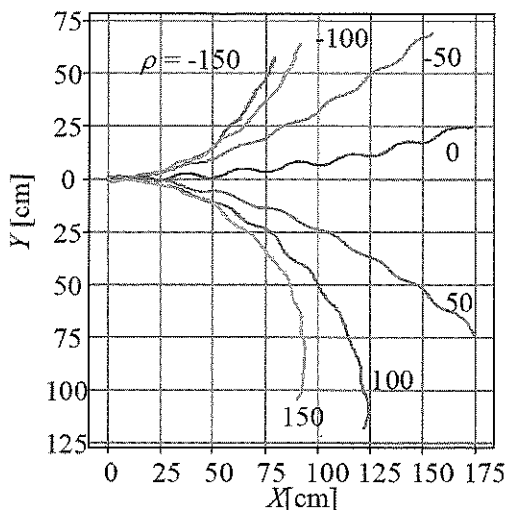


図8 トルク・リミッタなしロボットによる左右旋回

が達成できることがわかる。

5. おわりに

本稿では、モータ1つで平面内を動く移動ロボットを、スネークボードをヒントに構成した。ロータを正弦波様に回転させることでロボットは推進し、そのオフセットを増減させることで旋回が可能となる。ロボットの実験動画は研究室ホームページ¹³⁾に掲載されている。

モータから駆動力を直接受ける能動車輪をもつ車両は、外力で押そうとするとモータが負荷となる。自動車などはギアをニュートラルにしてエンジンと切り離してから手押しをする。しかし、本稿で提案するロボットは受動車輪しか持たないため、カートのように外からの力で容易に駆動することができる。にもかかわらず自律移動も可能であるため、自動・他動が自在に切り替えられることが利点となりうる。また、現在はいかに加速するかという観点で研究しているが、必要な位置で静止するには減速方法についても明らかにする必要がある。バッテリーや制御装置も搭載できるようなパッケージングも必要であり、さらなる研究を要する。

参考文献

- 1) F. Bullo and A.D. Lewis. Kinematic controllability and motion planning for the snakeboard. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.19, No.3, pp.494-498, 2003.
- 2) S. Iannitti and K.M. Lynch. Minimum control-switch motions for

the snakeboard: A case study in kinematically controllable underactuated systems. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.20, No.6, pp.994-1006, 2004.

- 3) Tatsuo 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.
- 4) Elie Shammass and Mauricio De Oliveira. Motion planning for the snakeboard. *The International Journal of Robotics Research*, Vol.31, No.7, pp.872-885, 2012.
- 5) 松野文俊, 茂木一貴. 冗長蛇型ロボットの運動学モデルに基づいた制御とユニット設計. 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.12, pp.1108-1116, 2000.
- 6) 広瀬茂男. ヘビ型ロボットの移動機構. 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.151-155, 2010.
- 7) P.S. Krishnaprasad and Dimitris P. Tsakiris. Oscillations, SE(2)-snakes and motion control: A study of the roller racer. *Dynamical Systems: An International Journal*, Vol.16, No.4, pp.347-397, 2001.
- 8) 森 博輝, 長嶺拓夫, 一俣 司, 佐藤勇一. 揺動を利用した推進機構における摩擦の影響. 日本機械学会論文集, Vol.81, No.832, pp.15-00330, 2015.
- 9) 広瀬茂男, 竹内裕喜. ローラウォーカー: 新しい脚-車輪ハイブリッド 移動体の提案. 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.599, pp. 2758-2764, 1996.
- 10) Satoshi Ito, Shoya Sugiura, Yuya Masuda, Shumpei Nohara, Ryosuke Morita: Mechanism and Control of a One-Actuator Mobile Robot Incorporating a Torque Limiter, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(2), 431-448, 2020
- 11) Satoshi Ito, Kosuke Niwa, Shoya Sugiura, Ryosuke Morita: An autonomous mobile robot with passive wheels propelled by a single motor, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.122, 103310, December 2019
- 12) Satoshi Ito, Shouta Takeuchi, and Minoru Sasaki. Motion measurement of a two-wheeled skateboard and its dynamical simulation. *Applied Mathematical Modelling*, Vol.36, No.5, pp.2178-2191, 2012.
- 13) <http://www.mcs.mech.gifu-u.ac.jp/~satoshi/themes/Skateboard.html>