

マニピュレータを搭載した倒立振り子型車輪移動ロボットによる 小さな物体のハンドリング

田村晶子 遠藤大輔 (東北大学) 高橋隆行 (福島大学) 小野幸彦 中野栄二 (東北大学)

Handling small objects by a wheeled inverted pendulum-type mobile robot with a manipulator

*A.Tamura, D. Endo (Tohoku University), T.Takahashi (Fukushima University),
Y.Ono and E.Nakano(Tohoku University)

Abstract— A wheeled inverted pendulum-type mobile robot is a two wheeled type of mobile robot. This kind of mobile robot is equipped with two wheels with a bigger radius than a wheeled robot that has more than 3 wheels, for a same mobile base surface. This allows pendulum-type mobile robot to climb on higher steps than a wheeled one that has more than 3 wheels. And as the robot can incline its body, it can keep the balance while carrying heavy objects. A wheeled inverted pendulum-type mobile robot is then suitable to help human in his daily life. But since a wheeled inverted pendulum-type mobile robot is not stable statically, it is difficult for its manipulator-hand system to perform precise tasks such as picking up a sheet of paper or small objects. This paper proposes mechanical structures and specification for a manipulator-hand system that needs to perform both work and to provide either safety for human and damages avoidance for the objects around the robot.

Key Words: inverted pendulum, mobile robot, manipulator

1 緒言

駅、遊園地等の公共施設や娯楽施設で、人間に代わって荷物の運搬や清掃といった作業を行うロボットが期待されている。

倒立振り子型車輪移動ロボットは、移動機構が車輪なので単純であり信頼性が高い、台車の投影面積が等しければ3つ以上の車輪をもつ移動台車と比較して大型の車輪を用いることができるので段差に強い、自らの重心位置を大きく変化させることができるので重い荷物の運搬が行えるなどのメリットがある。

一方、人の日常生活を支援するロボットには対人・対物への安全性が求められ、その実現には基本的にロボットを軽量・非力・低速にする必要がある。しかし、それは軽作業から重作業まで幅広い作業能力をロボットにもたせることとトレードオフの関係にある。よって、本研究では倒立振り子型車輪移動ロボットの上記のようなメリットを活用して、高い安全性と作業能力を同時に実現可能なロボットの開発を目指す。

しかし、倒立振り子型車輪移動ロボットは静的に安定ではないので搭載したマニピュレータで精度の高い作業を行うことは困難である。同様の問題は程度の差こそあれ、サスペンション付きの移動台車においても発生する。そこで本研究では、倒立振り子型車輪移動ロボットに搭載して細かな作業を行うことができるマニピュレータおよびハンドの開発を行う。本稿では、ハンドをパーム、フィンガー、フィンガーチップと3つの部位に分け、ハンドの各部位とマニピュレータに必要な機械的仕様を予備実験の結果を含めて示す。

2 ハンドの構造

2.1 パーム部

倒立振り子型車輪移動ロボットは静的に安定ではないため、搭載されたマニピュレータ・ハンドで精度の高い作業を行うことは困難である。そこで、物体のハン

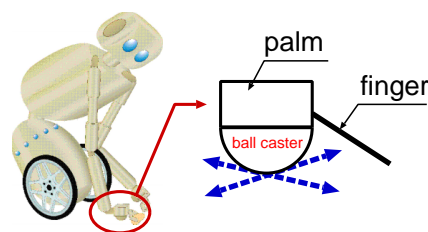


Fig. 1: Description of handling small objects

ドリングを行う際、倒立振り子型車輪移動ロボットを3点支持することで安定な状態をつくることを提案する。本研究では、車輪の2点に加えて、Fig.1に示すようにパーム部分を接地させることで3点接地の状態をつくる。パーム部分を接地させることには、より手先に近い部分を接地させることで手先の位置や手先にかかる荷重の調節に精度が出る、倒立振り子型車輪移動ロボットに限らず多くの不安定な台車に対しても有効な方法であるといったメリットがある。また、3点接地した後もパーム部分の位置決めが行えるようにパーム部分は全方向に移動できる必要がある。そこで、本研究ではパーム部分にボールキャスタを用いる。

2.2 フィンガー部

本研究では、紙、小さな物体(爪楊枝等)、テニスボール程度の大きさの物体のハンドリングをタスクとし、これらは全て床面や机上にあるものとする。テニスボール程度の大きさの物体は比較的簡単にハンドリングが可能であると考え、まず紙と小さな物体のハンドリングに着目する。なお、フィンガーの機構はできるだけ簡素なものにし、ハンド部のアクチュエータなどの重さが大きくならないようにする。これは、なるべくマニピュレータ・ハンドの慣性モーメントを小さくして、対人・対物への安全性を確保するためである。そこで、

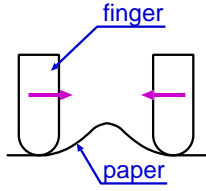


Fig. 2: Method of picking up a sheet of paper

紙のハンドリング方法は Fig.2 に示すような、対向 2 指を用いたなぞり運動で行う方法のみを扱う。

2.2.1 紙のハンドリング

平井ら [1] は、水平面にある薄板を対向 2 指のなぞり運動で変形操作する際の力学的解析を行い、指と薄板、薄板と水平面との摩擦係数の差が操作の成否に影響を及ぼすことを示した。これを参考に紙のハンドリングにおける作用力の解析を行った。対向 2 指を用いた紙のハンドリング動作を Fig.3 に示す。ここで、

- p : 指の押しつげ力
- f_1 : 指と紙の間に働く摩擦力
- $\mu_{1\max}$: 指と紙の間の最大静止摩擦係数
- f_2 : 紙と床面の間に働く摩擦力
- $\mu_{2\max}$: 紙と床面の間の最大静止摩擦係数
- f_B : 紙の座屈荷重

とする。

紙と指の間に滑りが生じない条件は、

$$f_1 \leq \mu_{1\max} p, \quad \therefore \frac{f_1}{p} \leq \mu_{1\max} \quad (1)$$

紙と床面の間で滑り出す条件は、

$$f_2 = \mu_{2\max} p, \quad \therefore \frac{f_2}{p} = \mu_{2\max} \quad (2)$$

紙が座屈する条件は、

$$f_1 - f_2 \geq f_B, \quad \therefore \frac{f_1}{p} - \frac{f_2}{p} \geq \frac{f_B}{p} \quad (3)$$

である。紙のハンドリングが成功するには、式 (1)~(3) を満たすことが必要であることは平井らの示した通りである。しかし、本研究で扱う一般事務用紙のように座屈荷重 f_B が指の押しつげ力 p に対して十分に小さい場合 ($f_B \ll p$)、式 (1)~(3) は式 (4) のようにまとめることができる。

$$\mu_{2\max} \leq \mu_1 \leq \mu_{1\max} \quad (4)$$

ここで、 $\mu_1 = f_1/p$ とおいた。

2.2.2 実験

指の押しつげ力 p と指駆動用モータの電圧 V を何通りかに変化させて紙のハンドリングを行い、その際の μ_1 を算出した。実験に使用した対向 2 指ハンドを Fig.4 に示す。押しつげ力 p は、定滑車を用いて吊した重りの荷重で調節し、一定荷重になるようにした。

実験結果を Table 1 に示す。表中で、○は”ハンドリングに成功”、- は”押しつげ力が大きすぎてモータが回

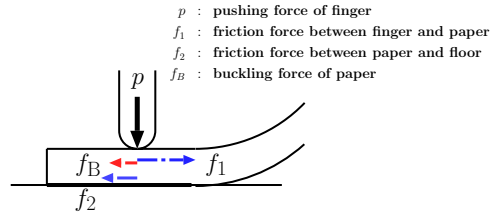


Fig. 3: Model of picking up a sheet of paper

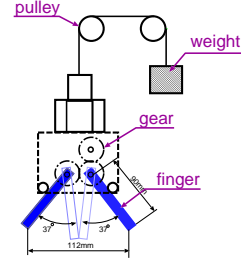


Fig. 4: The hand with two fingers

転せずに指が動かなかったため評価不能”、×は”指が紙面上を滑ってハンドリングに失敗”を表す。また、ハンドリングに成功した場合と失敗した場合の 2 指各々の μ_1 の値を、指と紙の摩擦係数 $\mu_{1\max}=0.58$ 、紙と床面の間の摩擦係数 $\mu_{2\max}=0.22$ 、指の閉じ角 $\theta[\text{deg}]$ とあわせて Fig.5 に示す。指の閉じ角 $\theta[\text{deg}]$ が変化している間が紙をハンドリングしている部分である。

紙のハンドリングに成功した全ての場合において、 μ_1 は式 (4) を満たしていることが確認できた。また、失敗した場合は片方の指の μ_1 は式 (4) を満たさない。これは、片方の指を支点にしてもう片方の指が紙面上を滑っているためと考えられる。以上より、対向 2 指で紙のハンドリングを行う場合、 μ_1 を式 (4) を満たすような値にすることはハンドリングを成功させるのに必要であるといえる。本研究では、指の押しつげ力 p を調節することで、 μ_1 が式 (4) を満たすようにする。

以上の結果から、パームとフィンガーの結合機構案として、フィンガーにかかる鉛直方向の荷重が調節できるようにする。そこで、Fig.6 に示すようにパームにアクチュエータを設けバネ、ダンパを介してフィンガーの角度を変えるような構造にする。アクチュエータがパームにあることによって倒立振子の姿勢などとフィンガーへの荷重のかかり方を切り離して考えることができる。さらに、紙のハンドリングを行うために 2 指の指先を直線平行移動させることにする。実際に試作したフィンガー部もあわせて Fig.6 に示す。

Table 1: Experimental results of picking up a sheet of paper

	$V=3[\text{v}]$	$=4[\text{v}]$	$=5[\text{v}]$
$p = 1.69[\text{N}]$	-	-	○
$= 1.20[\text{N}]$	○	○	○
$= 0.78[\text{N}]$	○	○	○
$= 0.27[\text{N}]$	×	×	×

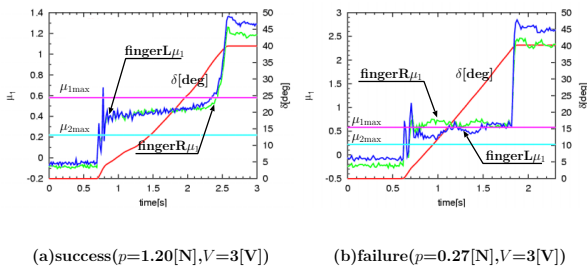


Fig. 5: Observed μ_1 in the picking up experiments

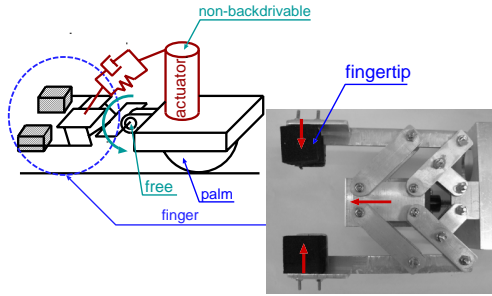


Fig. 6: Structure of the palm and the finger

2.3 フィンガーチップ部

Fig.6 に示す試作したフィンガーの先端部にあるフィンガーチップについて述べる．本研究では，Fig.7 に示すような弾性体（スポンジ）の底面の端に薄いプラスチック板（厚さ 0.5mm）の爪をつけたフィンガーチップを提案する．この爪は，小さい物体を把持するためのものである．しかし，小さい物体をハンドリングする際に爪を物体の下に滑りこませるには，床面とフィンガーチップの底面との摩擦係数は小さい方がよく，反対に紙のハンドリングをする場合は，フィンガーチップの底面と紙の間の摩擦係数を大きくして滑らないようにしなければならない．そこで提案したフィンガーチップは，弾性体を用いて押しつけ力が小さい場合は床面には爪しか接しておらず床面と爪の間の摩擦係数を小さくし，押しつけ力を大きくすると弾性体部分が床面と接触して床面とフィンガーチップ間の摩擦係数を大きくできるようにした．なお，指の腹部分が弾性体であることは，ハンドリングした物体との接触面積を大きくして安定した把持を行うためでもある．

3 ハンドリングのためのセンサ

フィンガーチップにかかる鉛直荷重の値を調節することが紙のハンドリングを成功させるのに必要である

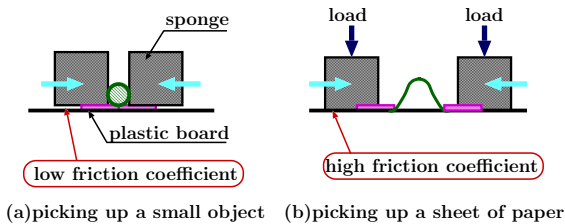


Fig. 7: Transformation of the fingertip

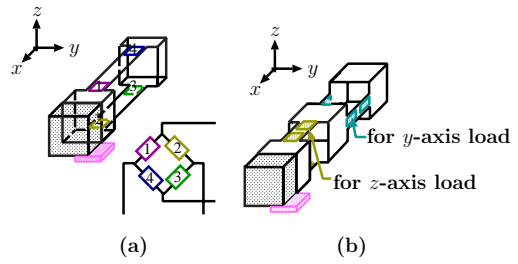


Fig. 8: Force sensor of fingers with strain gauges

ことは 2.2 節で示した通りであり，このためフィンガーチップにかかる鉛直荷重の値を検出する必要がある．さらに，鉛直荷重の値が検出できることはフィンガーチップが接地しているか否かを検出することにも役立つ．また，物体の安定したハンドリングを行うためには把持力の大きさを検出しなければならない．よって，フィンガーチップに対して水平荷重の値も検出する必要がある．

物体のハンドリングの際フィンガーチップには，Fig.8(a) にで定義する x, y, z 軸において， x, y, z 軸方向の荷重と x 軸回りのモーメントがかかると考えられる．そこで，フィンガーチップにかかる荷重の z 軸方向（鉛直方向）と y 軸方向（水平方向）の大きさを独立に測るために，フィンガーチップを四角管の先に取り付け，四角管を Fig.8(a) に示すように加工し，ひずみゲージ 8 枚を四角管の外側に貼り，ブリッジ回路を組む．この回路の出力電圧変化が z 軸方向の力に対して線形であり， x, y 軸方向の力と x 軸回りのモーメントに対しては変化しなければ，Fig.8(b) に示すように四角管に二カ所ひずみゲージでブリッジを組む部分をつくり，一つはフィンガーチップに対して z 軸方向，もう一つは y 軸方向の力を独立に検出するのに用いることが可能である．

実際に，Fig.8(a) に示すような部材で z 軸方向に力のかけた際の出力電圧変化を Fig.9(a) に，その他 x, y 軸方向に荷重を加えた場合と x 軸回りにモーメントを加えた場合の電圧出力を Fig.9(b) ~ (d) に示す．電圧変化は， z 軸方向の力に対して線形で， x, y 軸方向の荷重と x 軸回りのモーメントに対しては変化しないことが確認できた．

なお，2 指の間の物体の有無を確認するために，2 指のフィンガーチップの互いに面している部分にフォトインタラプタを設けることを想定している．

4 マニピュレータの構造

本研究において，倒立振り子型車輪移動ロボットには既に述べてきた床面や机上の物体のハンドリングの他に，将来的には重い物体の運搬 (Fig.10)，および着座・起立動作 (Fig.11) のタスクを課す予定である．搭載するマニピュレータは，これらのタスク実現に機能的に十分な構造であること，さらには対人・対物への安全性のために軽量かつ，そのアクチュエータは極力非力化する必要がある．

軽量かつ関節トルクが制限されたマニピュレータを用いて重い物体を持ち上げるには，マニピュレータの回転関節を曲げることなくフリーな状態にして手先

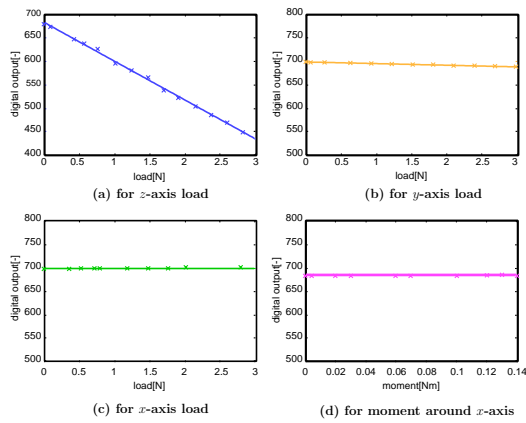


Fig. 9: Experimental results of the strain gauge output for x, y, z -axis load and moment around x -axis

に荷物をひっかる。この時、マニピュレータは、鉛直方向にぶら下がった単なる棒の先に重い物体がついている状態と同じであり、マニピュレータの軽量なリンクにかかる曲げモーメントは回転関節を曲げて持ち上げる場合よりも大幅に小さくなり、引張力だけがかかるようになる。そして、倒立振り型車輪移動ロボットの本体を後方に傾けて、荷物とロボット本体を合わせた全体の重心位置をバランスがとれるように制御することで、重い荷物を持ち上げることができる。すなわち、マニピュレータの関節トルクが小さくても、重い荷物はロボットの自重を活用して持ち上げるので問題にはならないのである。この方法で、双腕を用いてロボット本体の前方にある重い物体を持ち上げるためには、Fig.10 に示すように体前面にマニピュレータが位置していなければならない。

また、着座・起立動作における立位から座位への遷移過程では、Fig.11 に示したように、まず体側面にマニピュレータが位置してパームを接地させる。この時、肘ならびに手首関節は関節角度制限機能により機械的に固定する。その後、肩関節を回転させて座位状態へ移行する。座位から立位への遷移過程は、立位から座位への遷移過程を逆にたどって行く。この、パームを接地させる際に、肘関節が低トルクのため肩からパームまでの長さの調節機能が低下しているため、逆駆動不可な直動関節を上腕部に設けて長さ調節を行う。

マニピュレータは上記のように実行タスクに合わせて体前または体側面に位置させる必要がある。また、着座・起立動作ではパーム部を接地させた状態で Fig.11 のように肩関節を回転させるので、肩関節には自由度が2つ必要になる。手首に関しては、パーム部を傾けるためのピッチ角の自由度とハンドリングした後の物体操作を考慮してロール角に自由度を与える。以上をまとめると、マニピュレータには肩関節に2自由度、上腕に直動関節で1自由度、肘関節に1自由度、手首関節に2自由度の計6自由度を付加する。

なお、肘関節と手首関節のアクチュエータは肩部分にとりつけ、関節はワイヤを用いて駆動させる。これは、マニピュレータ・ハンドの慣性モーメントを可能な限り小さくするためであり、安全性保持のために有効な手段である。さらに、直動関節によって上腕の長



Fig. 10: Carrying heavy baggage

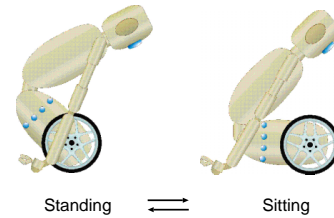


Fig. 11: Standing up and sitting down strategy

さが変化してもワイヤの通っている経路長は変化しないように、Fig.12 に示すようなワイヤ経路のためのリンクを上腕部に設ける。

5 結言

静的に不安定である倒立振り型車輪移動ロボットに搭載されることを想定したマニピュレータ・ハンドで、床面や机上にある紙や小さな物体のハンドリングが行えるように、ハンド（パーム部、フィンガー部、フィンガーチップ部）の構造と必要なセンサ、およびマニピュレータの構造を示した。これらの構造は、タスク実行に適しているだけでなく対人・対物への安全性も配慮したものである。現在、提案した各部の構造を用いて具体的なマニピュレータ・ハンドの設計を行っている。

参考文献

- [1] 平井慎一, 岩田一明: 曲げ変形を伴う柔らかい薄板状物体のマニピュレーション, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1229-1230, 1993.
- [2] 加藤一郎 編著: 図解 メカニカルハンドーロボットの手図集一, 工業調査会, pp.83, 昭和57.

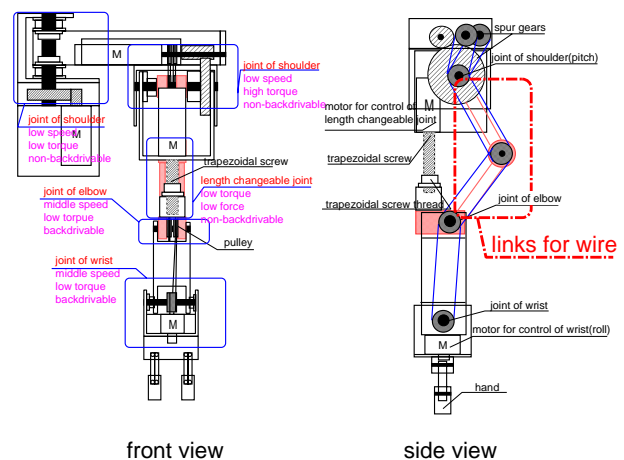


Fig. 12: Outlined structure of the manipulator