

# ダイレクトモーターカーの運動特性の解析

## Analysis of the Clarification for Motion characteristic of Direct Motor Car

○学 浅野 圭佑 (鈴鹿高専専攻科) 正 白井 達也 (鈴鹿高専)  
正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Keisuke ASANO, Suzuka National College of Technology  
Tatsuya SIRAI, Suzuka National College of Technology  
Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

Recently, service robots that help indoors and substituted the work of the human being are to be acknowledged as a useful commodity in a general society. Most service robots have something as a movement mechanism. There are three main kinds of migratory mechanisms. However, the Direct Motor Car (DMC) has the movement mechanism without using the tire that the motor shafts touch the ground directly. Neither the deceleration machine, the tire nor the crawler that is usual movement mechanism does not exist. The practical use of DMC which have a quite different movement mechanism from past movement mechanisms. Designing, and produced DMC that has changes in number of motors and the method of arranging the motor, we quantified straight advancement. We clarified the principle of operation of DMC by deeply researching the improvement of straight advancement.

**Key Words:** Mobile robot, Motor drive, Sliding contact

### 1. はじめに

近年、産業用途以外の分野にもロボットは活躍の場を得ている。今後、ロボット技術 (RT: Robot Technology) を活用した製品の市場規模は急拡大すると期待されている。特に、主に屋内においてヒトの作業を手伝うサービスロボットの分野は、単なる物めずらしさの域を脱し、有用な商品として一般社会に認知され始めた。家庭内ではコミュニケーション、留守番に加え、車椅子などの介護用機器への RT の応用が強く期待されている。大半のサービスロボットは何らかの移動機構を有する。移動機構は用途や使用環境に応じて、主にタイヤ、キャタピラ、脚の三種類から選ばれるが、屋内での作業が多いサービスロボットは主にタイヤを用いる。ステアリング機構は旋回半径が大きいので、主に車椅子のように左右のタイヤの速度差を利用する方法が用いられるが、車輪自体の方向を回転する機構を付加したり [1]、オムニホイールなどの特殊なタイヤを使用する方法 [2] もある。振動を利用した全く新しい移動機構も提案されている [3]、一方、その着想とは全く逆の発想に基づいて昭和 55 年に三井康亘氏によって発明されたのがダイレクトモーターカー [4] (以下、DMC) である。玩具として開発された DMC の移動方法はタイヤ式移動機構から減速器とタイヤを取り除くというユニークな機構であるが、いままでその動作原理は研究されていない。

本研究の最終目的は、未知の領域が多い DMC の動作原理を解明することである。DMC の推進方向を決定付ける要素は何か、微視的に接触点で発生している物理現象を観察する前に、DMC 上のモーター配置が DMC の運動能力に与える影響を調べることから始める。

### 2. Direct Motor Car

#### 2.1. DMCの構造と特徴

DMC の外観を図 1 に示す。三井氏が考察した DMC (以下、オリジナル DMC) は直進、旋回、その場旋回が可能な超小形の移動ロボットである。構造上の最大の特徴は、通常の移動機構には必ず存在する減速器とタイヤやクローラが存在しないことである。DMC は二つのモーターを「ハ」の字状に外開きにボディの両側面に取り付け、モーター軸の先端を直接、地

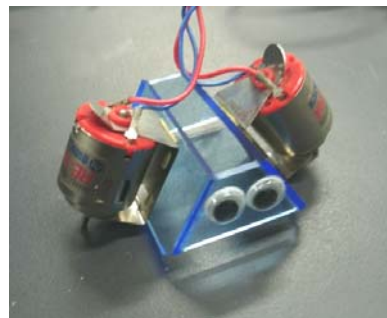


Fig. 1 Direct Motor Car

面に接する独創的な移動機構を採用している。試作したオリジナル DMC は  $t = 2$  のアクリル板で構成された本体と二個の小型 DC モーター (RE-140RA, マブチモーター製) からなる。使用した DC モーターの定格入力 は DC1.5[V], 無負荷時の回転速度は 7,700[rpm], 定格負荷は 0.49[mN・m] で、その時の回転速度、消費電力はそれぞれ 5,400[rpm], 550[ mA] である。モーター軸の外径は  $\phi 2.0$  である。

各モーター軸の回転方向と本体の動きを対応付けた図を図 2 に示す。これらの図は、本体を上方から見たものである。図 2(a) のように片方のモーターを時計回りに回転させ、もう片方のモーターを反時計回りに回転させると DMC は前進・後退する。図 2(b) のように片方のモーターだけを回転させると、もう片方のモーター軸先端を中心として旋回し、図 2(c) のように左右のモーターを同一方向に回転すると、その場旋回も可能である。

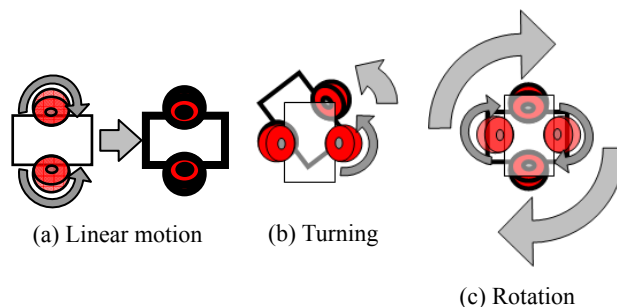


Fig. 2 Movement of the double-motor DMC

## 2.2. DMCの動作原理の検証

DMCのモータ単体の推進する原理は、滑り接触するモータ軸先端と地面との間の摩擦力によることは明らかだが、DMC全体としての推進原理には未知の現象が関わっていると期待できる。DMCの移動原理の特徴は高速回転するモータ軸と地面との間の滑り接触を利用する点にあるので、地面との間の摩擦力を増やすために軸先端にゴムを巻いたりタイヤを取り付けて転がり接触に変えることはナンセンスである。モータの消費する電流はモータ軸に発生するトルクと比例する。もしトルク不足でDMCが推進しなくても、バッテリーは電流を供給し続けてエネルギーをロスする。地面に対して滑り接触するDMCが発生可能な推進力の最大値は、基本的に自重に比例すると予想される。一定の自重の場合、DMCが障害物に衝突して移動できない状態になっても、モータ軸の先端と地面の間には一定値以上のトルクを発生しないので、モータ出力の大小に関わらず、過大にエネルギーをロスすることがない。

物体間に働く摩擦力を多くの場合ではクーロン摩擦のモデルで簡略化するが、果たしてクーロン摩擦のモデルでDMCのアクチュエータによる推進力の発生メカニズムを説明できるのか。クーロン摩擦のモデルでは、物体間の関係は転がり接触と滑り接触の二つに大雑把に分けてしまう。摩擦係数は静摩擦係数と動摩擦係数の二つしかなく、発生可能な摩擦力は各摩擦係数に、接触面に垂直な接触力成分の大きさを掛けた値としており、接触面積の大小や、同じ滑り状態にあったとしても各面間の相対速度の大小に無関係である。それに対して、実際のDMCは巨視的にはモータ軸先端と地面の間は常に滑り接触状態にあるが、モータの回転速度が変化すれば、DMCの移動速度も変化する。

モータの推進力に関わると考えられるパラメータを図3に示す。動作特性を左右するのはモータの地面に対する角度 $\theta$ 、軸の回転速度 $\omega$ 、地面への押し付け力 $f$ であると考えられる。新品のバッテリーを用いたDMCは、残量が減少したバッテリーを用いたDMCよりも高速に移動する。モータ軸先端はいずれの場合も地面に対して滑り接触状態にあることから、発生する摩擦力はモータ軸の回転速度に依存しており、等価的に、もし摩擦係数という概念を利用するのであれば摩擦係数 $\mu$ は回転速度によって変化する動的なパラメータとなる。なお、前述の現象から短絡的にモータ軸先端の周速度が高速であるほど、大きな摩擦力を得てDMCが高速に移動すると結論付けることはできない。逆に一定の回転速度を越えると、滑り過ぎて移動速度が遅くなる、あるいは特定の周波数領域でのみ速度の低下が発生するかも知れない。

## 3. モータ配置と運動特性（直進性）の関係

### 3.1. 四モータ DMC

2.1節ではDMCの概要を示すためにモータ数が二個のDMCを例として説明したが、本研究ではモータ数が四個のDMC(以下、四モータ DMC)を用いて実験を行なう。モータ数が二個の場合、高速回転するモータ軸先端以外の本体の一部が地面

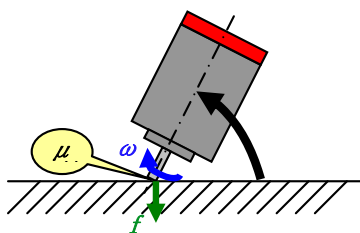


Fig. 3 Various parameters

に接するため、地面の凹凸の影響を受け易い。一個一個のモータの特性の違いがDMCの運動特性に与える影響も大きい。様々なモータ配置が考えられるが、本研究では図4に示す二つのタイプの四モータ DMCを製作し、実験により運動特性の違いを調べた。

図4(a)はモータ二個のDMCを縦方向に二個繋げたもので、以下、平行型 DMCと呼ぶ。図4(b)は正方形の各角にモータを一個ずつ外向きに配置したもので、以下、円周型 DMCと呼ぶ。どちらも地面と各モータの軸の先が接地する点を作る四角形の大きさとモータの角度はほぼ同じである。平行型 DMCは図4(c)に示すように前後方向には移動できるが、左右には移動できない。一方、円周型 DMCは前後方向だけでなく図4(d)に示すように左右方向にも移動できる。このような性質の違いがあることから、この二種類のDMCには互いに何らかの機能が失われている可能性が高い。たとえば平行型 DMCは全てのモータが前後方向に動こうとするが、円周型 DMCは斜めに動こうとする力の左右方向が打ち消し合い結果的に前後に動く。そのため移動速度が落ちるのではないかと予想される。

### 3.2. 直進性の定義と評価方法

本実験のために定義した直進性の評価法を図5に示す。DMCの移動開始点から停止点までの距離 $\ell$ をあらかじめ定める。停止点は、図5(a)に示すように開始点を中心とする半径 $\ell$ の円弧上とする。目標とする直線は $x$ 軸方向だが、DMCを移動開始点にセットする際の初期姿勢のズレを許容するためである。ただし図5(b)のように極端に曲がりながら移動する場合も考慮に入れて $y$ 方向のズレ量を制限するパラメータ $h$ を設ける。図5(b)のように $y$ 方向に大きくズレた場合は $\pm h$ の線に到達した位置を停止点とし、その時の原点からの距離 $\ell_0$ を移動距離とする。

移動開始点と停止点を結んだ線を基準線とする。軌跡の中で基準線からの水平距離が最も遠い点を求め、基準線からその点までの距離の絶対値を $c$ とする。直進性を表す評価値を(1)式に示す $E_n$ とする。本来の停止点まで到達しなかった実験結果については、同じく停止点に到達しなかった結果同士を比較するために、参考値として(2)式に示す $E_{ne}$ で評価する。

$$E_n = c/\ell \quad (1)$$

$$E_{ne} = c/\ell_0 \quad (2)$$

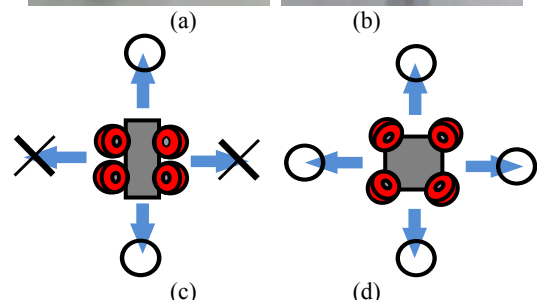
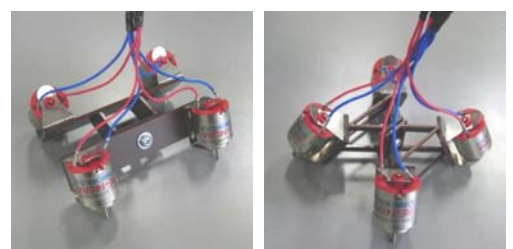
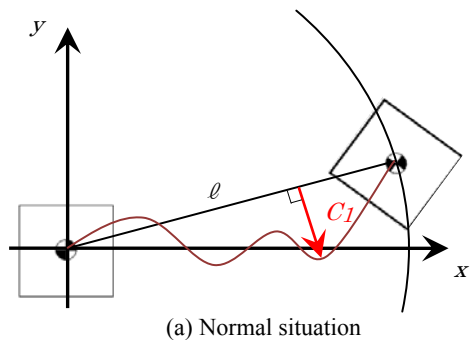
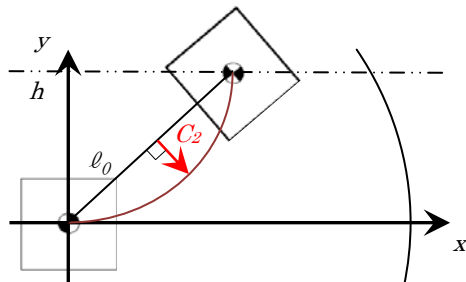


Fig. 4 Direct Motor Car with four-motors



(a) Normal situation



(b) Abnormal situation

Fig. 5 Evaluation method

### 3.3. 実験結果

あらかじめ DMC の各モータには基準となるマーカを計四個、貼付する。動画撮影が可能なデジタルカメラ (EX-F1, カシオ計算機 株式会社) を走行コース上方に三脚を用いて設置する。動画の撮影開始と停止は本体の録画ボタンの手動操作によって行なう。動画フォーマットは MOV 形式 (1,920×1,080 [pixel], 60 [fps]) である。DMC の電源は安定化電源 (PR18-5A, 株式会社ケンウッド) で 3V (電流制限値 2A max) 掛け、操作はトグルスイッチを用いて手動で行なう。次に画像変換ソフト QT Converter (Ver. 1.3.0, Hopysoft 製) を用い、必要な間隔の動画を AVI 形式に変換。Aviutl (KENくん 作) 上で「連番 BMP 出力」プラグインを使って BMP 形式の画像に分割・変換出力する。このとき画像サイズを 1,280×720 [pixel] に変更する。BMP\_measure (鈴鹿工業高等専門学校 白井達也) で DMC の動き出しから停止するまでの画像を読み込み、あらかじめマーキングしておいた四点の座標を画像計測する。得られた一連の四対の  $x, y$  座標から DMC 本体の中心座標を計算により求め、軌道を解析する。

今回の実験では、 $400 \times 1,810 \times 15$  [mm] の黒色の化粧板を床面に使用した。少しもズレずに直進すれば、 $E_n = 0$  となる。 $0 < E_n < 1$  の場合は移動距離よりもズレが小さく、 $E_n = 1$  で移動距離とズレが等しくなり、 $1 < E_n$  で移動距離よりもズレが大きくなる。例えば移動距離に対して 10% のズレが生じた場合、 $E_n = 0.1$  となる。今回は幅 400 [mm] の板を使用するので、 $h = 200$  [mm]、 $l = 1,500$  [mm] とした。

図 4 の二タイプの DMC を用いて、それぞれ五回ずつ走行実験を行った。図 6 (a) は図 4(a) の平行型 DMC の解析結果、図 6 (b) は図 4(b) の円周型 DMC の解析結果を示す。 $x$  軸と  $y$  軸はそれぞれ図 8 の  $x$  軸と  $y$  軸を表す。 $x$  軸と  $y$  軸の比が異なっているため、大きくズレてしまっているように見えてしまう。しかし、 $x$  軸と  $y$  軸の比を等しくすると、図 6(a) がほぼ直線になってしまう。平行型 DMC は五回中五回、幅  $h$  から外に出ることなく 1,500 [mm] 走りきった。停止点での  $y$  方向のズレの五

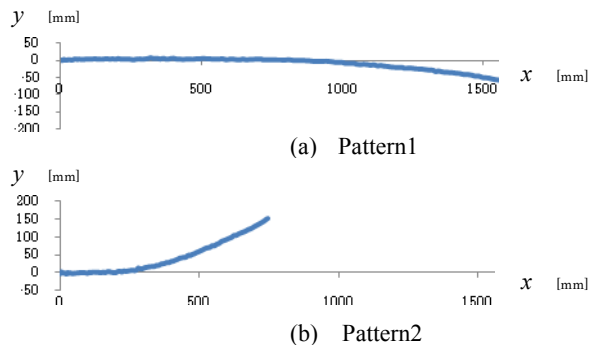


Fig. 6 Track

回の最小値は 51.4 [mm] で開始点と停止点を結んだ線を基準線との最長点  $c = 30.0$  [mm] であった。したがって  $E_n = 0.020$  である。円周型 DMC は約 200 [mm] の地点までは直進に近い軌跡を描いているが旋回してしまい、約 750 [mm] の地点で幅  $h$  の範囲外に出てしまった。図 6(b) の例だけでなく円周型 DMC は五回中全ての試行において幅  $h$  の範囲外に出てしまった。最も直進性の高い結果でも距離  $c = 51.5$  [mm]、 $l_0 = 762.3$  [mm]、したがって  $E_{ne} = 0.069$  である。以上の結果より、平行型 DMC の方が円周型 DMC よりも直進性が高いことが評価値からも明らかになった。

## 4. まとめと今後の課題

通常の移動機構には必ず存在する減速器とタイヤやクローラが存在しない、独特な原理に基づく移動機構 Direct Motor Car の動作原理を明らかにするために、運動特性について研究を行なった。本研究では特に、モータ配置と DMC の運動特性の関係を明らかにすることを試みた。実際に製作した二種類のモータ配置の DMC を用いて直進性の比較を行なった。二つの DMC の直進性の評価実験を行い、直進性がモータの配置方法に依存することを明らかにした。

今後は、移動速度を計測し、モータの配置方法と推進力の関係についても解析する。他にもモータの角度  $\theta$ 、軸の回転速度  $\omega$ 、地面への押し付け力  $f$ 、摩擦係数  $\mu$  によって動作特性が左右されると考えられる。今後はこれらのパラメータを変化させて推進力や移動方向とどのような関係があるかのを調べ、より深い動作原理の解明を目指す。

## 文献

- [1] 森 善一, 中野栄二, 高橋隆行, “全方向移動ロボット ODV9 の基本原理と小段差乗り越えについて”, 日本ロボット学会, Vol. 18, No. 1, pp.150 - 157, 2000.
- [2] 浅間 一, 佐藤雅俊, 嘉悦早人, 尾崎功一, 松元明弘, 遠藤勲, “3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp.249 - 254, 1996.
- [3] 五百井 清, “遠心力を利用した走行マイクロロボットの研究”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp.396 - 401, 1999.
- [4] 三井 康亘, “アクリルモーターカーの工作”, 日本放送出版, 昭和 55 年.
- [5] iRobot 社 公式サイト, <http://www.irobot-jp.com/>