

ダイレクトモーターカーの構造の違いによる運動特性の解析

Analysis of Motion Characteristics of Direct Motor Car Depending on Differences of the Structure

○学 小形 遼平 (鈴鹿高専専攻科) 正 白井 達也 (鈴鹿高専)
正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Ryohei OGATA, Suzuka National College of Technology
Tatuya SHIRAI, Suzuka National College of Technology
Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

Direct Motor Car is a motor-shaft direct drive robot that has two small motors attached to the both sides of body in shape of inverted V, and can run without any wheels. It can move forward, backward, turn and rotate by wired controller. But, because the motor-shafts have to contact the ground, it only can move on a complete flat surface. Even so, there are many Pros about DMC, that it should be practically used.

In this paper, we analyze the relationships of structural differences and the kinematical differences of the DMC, in order to discover the practical uses of it. In results of making and experimenting 12-motored linear DMC, there are relationship between the number and control of motors, and the maneuverability and movement performance of DMC. The multi-motored DMC which has a body with no D.O.F., can move without any difficulties to ditch and hole if its' center of gravity is above a flat surface and more than half of its' motor contact the ground.

Key Words: Mobile robot, Motor drive, Practical

1. 緒言

近年、ロボット技術を応用した製品が一般社会でも使用されるようになってきた。家庭用床掃除ロボット[1]や、レスキューロボット、ペットロボットなどのエンターテイメントロボットなどは実用域に達したと言える。これらのロボットの移動機構には主にタイヤ、キャタピラ、脚が用いられる。特に実用化の期待が高いサービスロボットに求められる性能は、旋回性や直進性などの運動性能だけではなく、故障に強くメンテナンス性が高いこと、衝突などのトラブル時に自身とヒトに対する安全性が高いことも要求される。三種の移動機構の中ではタイヤ式移動機構がバランス良く条件を満たしている。乗用車同様の操舵機構を用いたタイヤ式移動機構は狭い領域で方向転換を行うのが苦手であるため、多くのサービスロボットは車椅子のように左右のタイヤの回転速度と回転方向を制御してその場旋回を実現する。さらに全方向への移動を可能とするために、移動機構自体の向きを回転する機構を付加する[2]、オムニホイールなどの特殊な車輪を用いる[3]といった工夫を施している。振動を利用して移動する全く新しい移動機構も提案されている[4]。

本研究では、タイヤ式移動機構を複雑化して運動能力を向上させるのではなく、全く逆の発想に基づき昭和55年に三井康亘氏が発明したダイレクトドライブカー（以下、DDC）[5]に着目した。DDCは非常にコンパクトかつ高い移動能力を持つ一方、凹凸の無い平坦な面上しか走行できない欠点がある。本研究ではDDCをさらに発展させ、それを三井氏のDDCと区別するためにダイレクトモーターカー（以下、DMC）と総称し、実用化に向けた運動特性の解析を行う。

2. Direct Motor Car

2.1. 構造と特徴

DMCはタイヤや減速機を省略した究極の超小型移動ロボットである。二個の小型DCモータを「ハ」の字状に外開きにボディー両側面に取り付け、モータ軸を直接地面に接触させることにより走行する。図1はいずれもDDCの外観である。三井氏のDDCも含め、二個のモータのみのDMCを以下、二モ

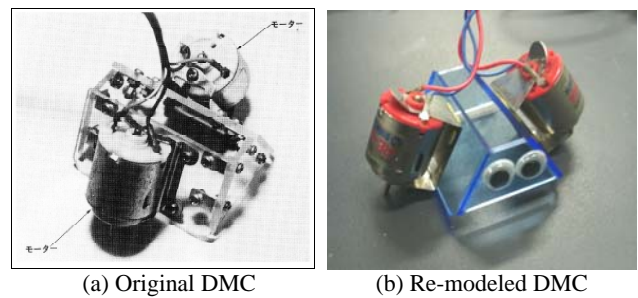


Fig. 1 Direct Motor Car

ータ DMC と呼ぶ。図2に DMC の製作に用いたモータ (RE-140RA, マブチモーター株式会社) の外形寸法示す[7]。φ21, モータ軸を除く全長が28.7[mm], モータ軸はφ2.0で長さ10[mm], 重量は19[gf]である。定格入力 DC1.5[V], 無負荷時の回転速度と消費電流はそれぞれ 8,100[rpm], 210[mA], 定格負荷と回転速度, 消費電力はそれぞれ 0.66[mN·m], 6,150[rpm], 0.66[A]の0.42[W]の汎用小型 DC モータである。静止時トルクは2.74[mN·m], 定格負荷時の約4倍のトルクを発生し, 約3.2倍の2.1[A]の電流を消費する。

二モータ DMC は二つのモータの回転方向を切り替えることで図3に示す三種類の動作を実現できる。図3は二モータ DMC を真上から見下ろしたものである。図3(a)のように左のモータを時計回りに回転し, 右のモータを反時計回りに回転

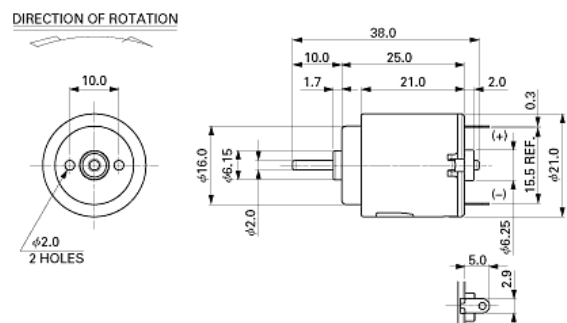


Fig. 2 Dimensions of RE-140RA

すると前進，各モータの回転方向を逆転すれば後進する．図 3(b)のように片方のモータだけを回転させた場合，もう一方のモータ軸先端の接地点を回転中心として旋回する．図 3 (c)のように左右のモータを同一方向に回転させると DMC の本体中央を回転中心としてその場旋回をする．各モータの回転方向に加えて回転速度も制御可能ならば，曲率半径を自由に選んだ自由度の高い旋回動作も可能である．

二モータ DMC は操縦時の安定性，特に直進性の低さは顕著である．この原因は複数の要因からなる．三次元物体である以上，地面に接触しているモータ軸先端の二点だけでは本体を支えられないため，必ず本体の前か後ろの一部が地面に接触する．モータの基本特性に多少のばらつきがある．高速回転するモータ軸先端の接触面はタイヤとは異なり地面との間で転がり接触ではなく一点による滑り接触であるため，特定方向ではなく全方向に対してほぼ等しく滑り易い．タイヤとは異なり小径の金属シャフトを駆動力源としているため，地面の微小な凹凸や表面状態の影響を受け易い．タイヤであれば容易に乗り越えることができるような微小な凹凸にモータ軸先端が引っ掛かり，前進も後進もできなくなる．

2.2. DMC の実用化

二モータ DMC は直進性や凹凸面での走破性能に劣る運動特性上の欠点がある反面，小型で，軽量であるという長所がある．駆動および操舵機構が極限まで省略されて構造がシンプルなため製作が容易かつコストが安く，壊れにくい上にメンテナンスが容易である．地面との接地点はタイヤのような転がり接触ではなく滑り接触であるため，外部から予想外の力が加わった場合でも，容易にその力を逃がすことができる．

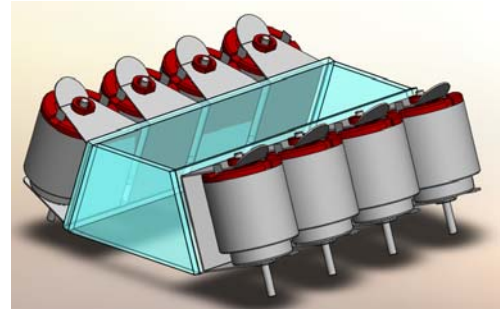
これらの特徴を生かしつつ操縦性や移動性能を改善して DMC を工業的に有用なアクチュエータとして実用化するために，本研究では DMC に搭載するモータの個数を極端に増やす方針を選んだ．モータ数を増やすことで，モータの基本特性のばらつきの影響を低減し，地面との接地点が増えることで地面の凹凸の影響も低減すると期待した．

様々なモータ配置の DMC が考えられるが，本稿では図 4 に示す二種類の構造を提案する．一軸方向への直進運動に特化したリニア DMC (以下，L-DMC) と中心点周りの回転運動に特化したロータリー DMC (以下，R-DMC) である．L-DMC, R-DMC は，それぞれ直進運動，回転運動用のアクチュエータとしての産業応用を強く意識して考案したが，図 3 に示した直進運動，旋回運動，その場旋回の能力も備えている．

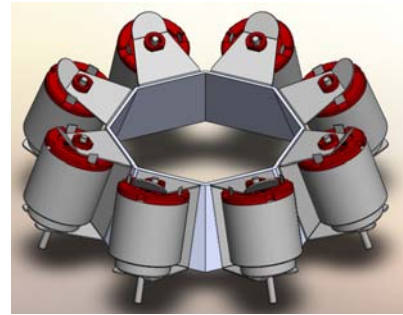
L-DMC は図 4(a)のようにモータを左右対称に複数配置すると共に本体全長を長くする．それに伴い旋回性は落ちるが直進性は向上すると期待できる．直進時に外界から DMC 本体に微小な変位が加えられたとき，本体が短い DMC は変位による進行方向の角度変化が大きい，全長が長い場合は角度変化が小さい．複数のモータが直線的に並んで搭載されているため，直進方向への推進力が支配的になると考えられる．

R-DMC は図 4(b)のように本体を中心にモータを円形に配置した DMC であり，旋回性が向上すると期待できる．全モータを同一方向に回転させると本体中心を回転中心として回転する．一方，各モータの回転方向を適切に選択すれば，斜め移動を含む全方向移動が可能だが，本研究ではロータリーアクチュエータとしての特性を期待するため，全方向の移動能力については割愛する．

L-DMC も R-DMC もモータに供給する電流を制御することで移動速度を調整できるが，より簡便に，電源を供給するモータ数を切り替えることでも推進力を調整できる．



(a) Multi-motored Linear



(b) Multi-motored Rotary DMC

Fig. 4 Models of DMC for a Specific-Movement

3. L-DMC の運動特性の解析

3.1. 直進性の評価

直進性は L-DMC の最も重要な評価パラメータである．図 5 は本研究で定義した L-DMC の直進性の評価方法を表す図である．目標軌道 (以下，理想直線) を x 軸，一定距離 l だけ DMC が移動した際の実際の軌道から求めた回帰直線を基準線とする．移動開始点を座標原点，停止点の座標を (x_l, y_l) とする．基準線に対する移動中の軌道の最大誤差を進行方向に対して左右それぞれ d_l, d_r ，理想直線に対する基準線の角度を $\tan^{-1} \phi$ とする．直線性の評価指標を E とし，(1)式のように定義する． E の値が小さいほど直進性は高く， $E \geq 0$ である．

$$E = (\alpha D + \beta \phi) \quad (1)$$

ここで D と ϕ は，それぞれ軌道のフラツキの度合いを表すパラメータと最終的な進行方向のズレを現すパラメータで，以下の(2)式と(3)式のように定義する．パラメータ α と β はフラツキとズレのどちらを重視するのかを選択するための任意の定数である．

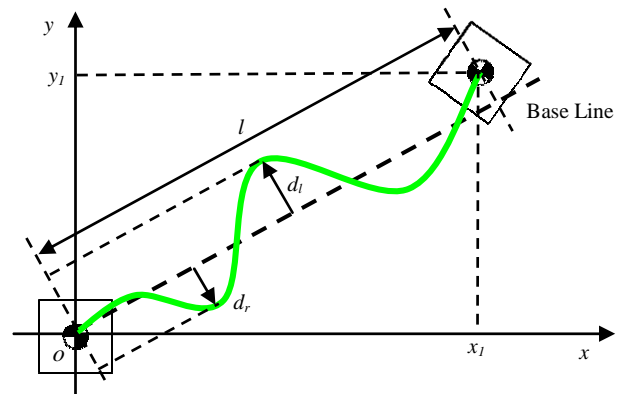


Fig. 5 Evaluation method

$$D = \frac{d_l + d_r}{l} \quad (2)$$

$$\phi = \left| \frac{y_l}{x_l} \right| \quad (3)$$

大きく蛇行するほど D の値は大きくなる。一方向に曲がりながら進む場合は D にも影響するが、 ϕ の値に顕著に現れる。進行方向の誤差が蛇行による誤差に比べて遥かに大きなズレとなることから、今回の実験では $\alpha = 0.2$ 、 $\beta = 0.8$ とした。

3. 2. 実験結果

今回実験を行った DMC は、図 6 に示す 12 個型 L-DMC である。モータを本体両側面に六個ずつ搭載した DMC で、外形寸法は全長 132[mm]、モータを除いた幅、高さはそれぞれ 50[mm]、25[mm]、全幅 91[mm]、全高 38.4[mm]、重量 356.8[gf] である。移動中の位置および姿勢を求めるために、図 6 のようにあらかじめ DMC の四隅にマーカーを取り付ける。実験を行う前に一度すべてのモータ軸が接地しているかどうかをデジタル・マルチメータ（Fluke 111, 株式会社フルーク）を用いて確認した。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）を走行試験範囲の上方に三脚を用いて設置する。今回の実験では長さ 1,800[mm]、幅 400[mm]、厚さ 15[mm]の黒色の化粧板を床面とした。DMC の電源は安定化電源（PR18-5A, 株式会社ケンウッド）を用いて 3[V]、2.2[A] を供給し、モータのオン/オフには 1 チャンネルのリモコンを用いて手動で行なう。

撮影した動画を Avitu1 (KEN くん) を使用し、BMP 形式の画像に分解する。分解した静止画像中の L-DMC 四隅のマーカーの x, y 座標を BMP_measure (鈴鹿工業高等専門学校, 白井達也) で画像計測する。走行開始時から停止、または試験範囲からの脱落までの画像に対して画像計測を行い、得られたデータから L-DMC 本体の中心座標を求める。

走行試験は 5 回行った結果を図 7 示す。比較対象として二モータ DMC の実験結果も示す。二モータ DMC の $E = 0.35$ に対して、L-DMC の $E = 0.05$ から 0.08 である。評価指標からも L-DMC の方が直進性が向上したことが分かる。

4. まとめと今後の課題

DMC の移動機構と動作原理はタイヤなどの従来の移動機構とは大きく異なる。従来の移動機構との根本的な差異を熟考し、得られた知見を元に DMC の実用化についての研究を行った。直進動作の向上に特化したリニア DMC、回転動作に特化したロータリー DMC の二種を考案した。今回の研究では特に直進性能の向上を考慮したリニア DMC の製作および実験を行った。

今回の実験により、DMC はモータの個数、そして制御法によって操縦性、移動性能が飛躍的に向上することが明らかになった。12 個型リニア DMC は期待通り直進性が従来の DMC に比べ向上したが、最高の直進性能と定義するにはまだまだ程遠い。しかし、犠牲になると思われた旋回性は予想していたほど悪化せず、その場旋回にいたってはオリジナル DMC と大差無い性能を示した。駆動機構がモータ軸と床材の滑り接触であることが要因だと思われる。また複数個のモータを搭載した DMC は、過半数のモータが接地していれば走行可能であるため、モータを二個しか搭載しない DMC では走破できない凹面や多少の溝は関係なく走行できることが判明した。

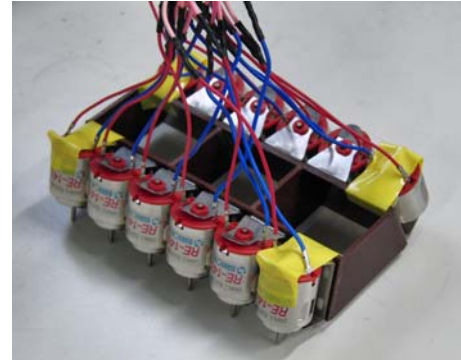


Fig. 6 12-Motored Linear DMC

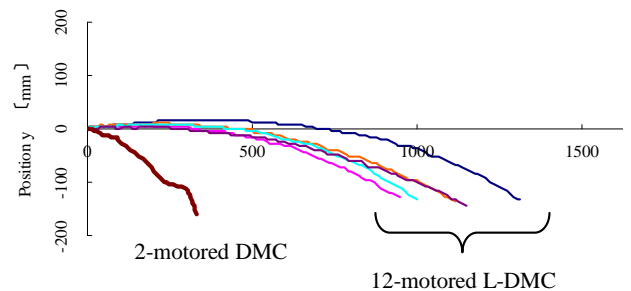


Fig. 7 Experimental results

文献

- [1] iRobot 社公式サイト, <http://www.irobot-jp.com/>
- [2] 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”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp.150 - 157, 2000.
- [3] 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 - 354, 1996.
- [4] 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.
- [5] 三井康亘, “アクリルモーターカーの工作”, 日本放送出版協会, 1980.
- [6] RE-140RA 製品情報, マブチモーター株式会社ホームページ, http://www.mabuchi-motor.co.jp/cgi-bin/catalog/catalog.cgi?CAT_ID=re_140ra