回転円盤が壁に対して平行なクロール形移動機構の開発* (直線移動方式の場合)

橋 野 賢*¹

Development of Crawl-type Transfer Mechanism using Driving Disk Attached to Parallel with Wall (Application to Straight Track Transfer System)

Satoshi HASHINO*²

*² Mechanical Engineering Laboratory, Robotics Department,
1-2 Namiki, Tsukuba-shi Ibaraki, 305-8564 Japan

The aim of this work is to supply a new, cost effective transfer system for wheelchair users. In this context, a new mechanism, known as "crawl-type", has been developed. This system is composed of three parts, traction guides, drive guides, and a hoist carrier. The former two kind of guides were attached with wall, the latter one was engaged with a pair of traction guides and was moved by propulsion force using crawl-type mechanism. By attaching a driven disk on the hoist carrier to be parallel with wall, drive guides become to fabricate easily using two-dimensional plate. The drive guide resembles to a rack tooth, which is drawn as a part of parallel curve to cycloid one. A width of tooth was analyzed by varying the number of rollers and sliding ratio of disk against virtual line. The analysis show that maximum width of tooth was obtained when the number of rollers is six and at non-sliding condition. By using this kind of rack, reversible transfer by crawl-type mechanism has been become to be available.

Key Words: Crawl-Type Transfer Mechanism, Cycloid Tooth Profile, Rack, Stair Lift, Sliding Ratio

1. 緒 言

来る世紀の前半には、日本社会は人類がかつて経験したことの無い超高齢社会を迎えようとしている。社会の活性化を維持しつつ、身障者・高齢者が生活しやすい社会を構築するには、絶対的に不足する介護力を機械によって補うことが必要であり、そのための準備が今からなされなければならない。階段・段差は高齢者・身障者にとって大きな障害となっており、彼らの社会進出を妨げている大きな要因ともいわれている。しかし、日本の建築物は、古くは書院造りに代表されるように、段違い構造を美しいと見る伝統があった。従来の家屋では、廊下と部屋の段差、玄関のかまち、門から玄関までの段差は、下肢不自由者にとっては大きな障害である。近年段差をなくすバリアフリーの取り組みがなされてきてはいるが、駅、図書館などの公共建築物には依然として階段が多く存在している。身障者・高齢者の上下昇降に伴う問題を解決するために、地方自治体、旅客輸送会社はエレベータ、エスカレー

タの設置を積極的に進めているが、駅の数、私鉄、地下鉄を含めると全国に1万あるといわれており、すべてに設置するのは経済的に困難である。また、国道、地方道には同じく1万箇所以上の歩道橋と横断トンネルがあり、段差解消は今後とも大きな課題として存在し続けるものと思われる。そのため、エレベータ、エスカレータにかわる安価な階段昇降機の開発が期待されている。

一般家庭においても、階段昇降機、家庭用エレベータが普及してきた。家庭用エレベータはメーカー間の競争が激しく、価格低下が進んでいるが、おもに新築時にしか対応できない、家の補強が必要など課題も多い。また、階段昇降機についても直線階段対応のものは、価格破壊が進んでいるが、騒音・振動のため深夜使用できないという本質的な問題は解決されていない。

従来の階段昇降機の駆動方式として、ラックとピニオン方式、チェーンとスプロケット方式、ロープ駆動方式、摩擦車駆動方式などが開発・実用化されてきたが、前二者は金属同士の部品が噛みあうために、振動、騒音の発生が避けられない。また、ロープ駆動方式は、構造上固定部に可動部が混在するため安全上問題がある。また、ロープをパイプ内に通す方式では、パイプ

* 原稿受付 1999年6月18日。

*¹ 正員、通産省機械技術研究所ロボット工学部(〒305-8564 つくば市並木1-2)。

E-mail: hashino@mel.go.jp

内面にロープが接触するのを避けるためロープに駒を間隔短く設置しなければならないが、振動、摩擦ロスが無視できない。摩擦車駆動方式はほとんど実施例はないが、不安定な物理現象を使用するため安全上問題が大きい。このように、従来駆動方式には騒音・振動・安全面から問題が多く、これらを克服した新しい技術の開発が待ち望まれていた。

これらの問題を解決する手段として、転がりを積極的に利用した駆動方式を用いたクロール型階段昇降機を提案、開発してきた⁽¹⁾。この方式は上記問題点を解決したばかりでなく、原理的にシンプルな構造のため高い実用性が期待されている。本稿では従来三次元形状であった駆動ガイドを、鉛直平面移動に限れば二次元形状に簡略化できることを示す。特に直線軌道対応クロール形移動機構の原理、設計論を述べ、試作した装置の動作について報告する。

2. クロール形移動機構の原理

平面におかれた円盤が、滑ることなく直線上を移動すると、円周上の一点はサイクロイド曲線を描く。逆に円周上の一点を何らかの方法で上記サイクロイド曲線に沿わせることができれば、円盤の中心は直線運動を行う。ここで提案するクロール形移動機構は、モータで駆動される円盤の周囲にローラを設置し、そのローラをサイクロイド曲線状に加工された駆動ガイドに沿わせることにより、この駆動ガイドからの反力を本体の推進力とすることにより移動するものである。

図1において、円周上の一点Aが外部の駆動ガイドを構成するある無限小の点で接触しているとすると、円盤トルクによる力 f が発生する反力は、力 f とそれまでの駆動ガイド接線ベクトル e_1 の張る平面上で、 e_1 に垂直なベクトル f_p である。これは次のベク

Fig. 1 Direction of force by contacting the roller with drive guide

トル三重積で表現される⁽²⁾⁽³⁾。

$$f_p = e_1 \times f \times e_1$$

図2は、円盤が右に移動したときの上記ベクトル f_p の向きをサイクロイド一周にわたって示したものである。図示された角度は左端を起点とした円盤中心の回転角である。サイクロイド右半分においてベクトルが内側を向いており、円盤の回転トルクが推進力として利用できることを示している。図2中真ん中の水平線は円盤中心の軌跡である。中心線より下の部分(円盤回転角270°~360°に相当)がベクトル f_p と進行方向の向きが近いために駆動力を得るには適した領域といえる。クロール形移動機構ではこの部分を駆動力を得るガイドとして採用し、駆動ガイドと呼んでいる。また、点Aにはローラが設置されているため、実際の駆動ガイドはサイクロイド曲線からローラの半径分を差し引いたサイクロイド曲線の平行曲線となっているが、これからの解析においては複雑さを避けるため、ローラ中心のみの軌跡に注目しローラの肉厚は無視して議論を進める。

3. 直線軌道対応クロール形移動機構

まず直線移動を行う直線軌道対応クロール形移動機構の設計に関して述べる。初期状態で基準座標系 $\{0\}$ の原点上に円盤中心があったとする。横軸を y 、縦軸を z とし、円板上の点 p は最初正の y 軸上にあったとする。滑ることなく円盤中心が γ だけ回転した状態を図3に示す。これからの回転中心角はこの γ を採用する。すなわち、図2の270°の位置が0°となる。回転円盤に固定した座標系を $\{1\}$ とし、その原点を円盤中心とする。同次変換行列は次式で表現される⁽⁴⁾。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 2 Direction of force exerted by a roller of disk when following on the cycloid shaped drive guide (Abscissa and ordinate are unified by radius of disk)

Fig. 3 Coordinate system for straight movement

Fig. 4 Locus of four rollers for disk moving to right without slip (in case of radius of disk is 15 cm)

$${}^{\frac{1}{2}}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & r \cos \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & r \sin \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 l は中心移動距離、 r は円盤半径である。2 番目の同次変換行列は、点 P を原点とする座標系と座標系 $\{1\}$ の関係を表している。この二つの行列の積から基準座標系における点 P の位置は

$$y = r(\gamma + \cos \gamma) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$z = r \sin \gamma \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表現される。これはサイクロイド曲線を表している。

円盤の周縁部に等間隔にローラを n 個設置し、滑りなく回転させたとき、それぞれのローラは $2\pi/n$ ずつシフトしたサイクロイド曲線を描く。ローラ 4 個の例を図 4 に示す。横軸を y 、縦軸を z とし、 y 軸と交差しているローラを $ph1$ とし、反時計回りに、 $ph2 \sim 4$ とする。図 4 では $ph1$ については 2π 、 $ph2 \sim 4$ については y 軸に達してから $\pi/2$ 分のみが示されている。ローラ $ph1$ は円盤の回転につれて、下に進み、回転角 90° で最下点に達し、さらに回転すると z 軸に対して線対称に上に向かって進み、 270° で最高点に達し、 360° で初めの高さに戻る。 $ph2, ph3, ph4$ もそれぞれ $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ から $ph1$ と同じ曲線を描く。ここで、 $ph1$ の $90 \sim 180^\circ$ の軌跡と $ph2$ の $90 \sim 180^\circ$ の軌跡は、 $ph1$ 初期位置から右に $y = \pi r/2$ シフトした軸に対して線対称である。すなわち、 $ph2(90 \sim 180^\circ)$

Fig. 5 Locus of roller center with various number of rollers (Abscissa and ordinate are unified by radius of disk)

Fig. 6 Tooth profile in case of 4 rollers and 15 cm radius of disk

は右方向の駆動力を得るためのガイド、 $ph1(90 \sim 180^\circ)$ は左方向の駆動力を得るためのガイドとして利用できることを示している。両方向移動可能なガイドまたはラックを構成するためには、 $ph2(90^\circ) \sim ph1(180^\circ)$ で示される歯先幅が正でなければならない。

ローラ個数を 4 個から 10 個まで変化させたときのラック歯形状の変化を図 5 に示す。ここでは、回転角が $90 \sim 360/n \sim 90^\circ$ と変化したときの、 $ph1$ と phn (n はローラ個数) が示されており、ローラ個数が増加するにしたがって、ラックの歯の高さが低くなっているのがわかる。また、ローラ個数 4 個から 10 個に対応する $ph1$ の軌跡はすべて重なっている。ここで左側の曲線において、下端点は回転角 $(90 \sim 360/n)^\circ$ 、上端点は回転角 90° に対応する。

図 6 は、半径 15 cm の円盤にローラ 4 個を取付けた場合のラック歯 1 枚の形状である。実際の歯形は、先に述べたようにローラ半径だけ内側に削り込み、歯底の処理についての考慮も必要である⁽⁵⁾。図 7 は、歯先幅と歯先間隔(二つの隣合う歯先のピッチから歯先幅を差し引いたものをここではこう呼ぶ)のローラ個数

Fig. 7 Width of tip and root with various number of rollers (ordinate is unified by radius of disk)

を変数としたときの変化を示している。ローラ個数が3個のとき、歯先幅は負になるため、このグラフでは省略した。歯先幅は■印で、歯先間隔は×印で示され、それらを足したピッチが□印で表示されている。歯先幅は次式で表される。

$$\sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \frac{2\pi}{n}$$

ここで、 n はローラ個数である。この関数は $n=6$ で最大値を示し、ローラ個数の増加とともに零に向かって減少する。

サイクロイド曲線を利用したラックでは1歯の長さが $2\pi r/n$ に固定されるために、全体の長さは $2\pi r/n$ を単位とする長さに量子化される。逆に一定長の直線部に対応したり、任意のらせん角(円柱上のらせんの接線とその円柱の母線のなす角)を有する常らせん軌道に対応するには回転円盤の滑りを許容しなければならない。すなわち滑り係数の限度を見極める必要がある。回転角 γ に滑り係数 k_1 をかけて回転円盤が滑るという条件を付け加えると、先ほどの式(1)、(2)は次式となる。

$$y = r(k_1\gamma + \cos \gamma) \dots \dots \dots (3)$$

$$z = r \sin \gamma \dots \dots \dots (4)$$

ここで、この式に対して次の座標変換を行うと、

$$\gamma \rightarrow \frac{\pi}{2} + \gamma', \quad \frac{1}{k_1}x - \frac{\pi}{2} \rightarrow X, \quad -\frac{1}{k_1}y + 1 \rightarrow Y$$

式(3)、(4)は、次式のようにトロコイド曲線の標準形に変換することができる⁽⁶⁾。

$$X = r\left(\gamma' - \frac{1}{k_1} \sin \gamma'\right)$$

$$Y = r\left(1 - \frac{1}{k_1} \cos \gamma'\right)$$

ローラ6個の場合、滑り係数を変化させたときの、サイクロイド曲線からトロコイド曲線への形状変化を調べたものが図8である。滑り係数 k_1 が1のときは

Fig. 8 Profile variation of 6 rollers case with changing sliding ratio from 1 to 2 (Abscissa and ordinate are unified by radius of disk)

Fig. 9 Width of tip variation with sliding ratio and the number of rollers (width of tip is unified by radius of disk)

滑りなし、すなわちサイクロイド曲線である。 k_1 が1以下であると、サイクロイド曲線において尖点を示した前後でループを描くようになり、尖点に対応する回転角度を越えた戻りローラがラック歯を押すことになり、ラック歯を構成できなくなる。滑りは k_1 が1以上で発生する。図8では、 $k_1=1.5$ と2.0の間で歯のとりがりが発生しており、1.5以上ではラックを構成できないことを示している。

滑り係数とローラ個数を変数としたときの歯先幅の変化を図9に示す。同図の等高線を図10に示す。両図とも歯先幅は円盤半径を1としたときの比として示されている。ローラ数4個の場合、滑り係数1.3で歯

Fig. 10 Contour line profile of Fig. 9

Fig. 11 Three posture of prototype of transfer system using straight crawl-type rack

先のとがりが発生している。ローラ数6個の場合、滑り係数1.6以上で歯先のとがりが発生するのがわかる。

4. 直線軌道対応クロール形移動機構装置の試作

これまで述べた解析に基づいて、直線軌道対応でかつローラ4個を設置した円盤に対応したサイクロイド平行曲線をガイドとするクロール形ラックを試作し、移動がスムーズに行えることを確認した。試作機を図11に示した。本機構に用いるラックは傾斜角度に依存しないため、同じ機構で、水平、斜行、垂直移動に対応することができる。垂直設置時、円盤が90°回転したときのローラ位置の連続変動(ラックの片側全移動)のようすを図12に示す。本装置では、視認性をよくするためにラックをアクリル板で構成した。写真ではローラと歯のかみあいがわかりづらいために、ラック上のローラを矢印で示した。

また、本方式では、回転円盤の中心が描く移動線と

Fig. 12 A sequence of moving disk and position of one roller following on the rack

Fig. 13 Application to evacuation system for handicapped and elderly of straight crawl-type rack

線対称にラックを付け替えることによって移動可能である。これは例えば、ラックの歯底にゴミがたまるというクレームに対応できる。このとき、同一移動方向に動くためには円盤は逆回転する必要がある。

5. 直線軌道対応クロール形移動機構の

適用例

直線軌道対応クロール形移動機構の適用例を以下3件述べる。

(1) 緊急避難装置(垂直の例)

図13にクロール形ラックを2本垂直に設置し、それぞれに回転円盤を有するゴンドラを釣瓶式に設置し、屋上から順次避難する緊急避難装置模型とその一連の動きを示す。ローラを有する回転円盤が常にラックとかみあい、落下に伴う重力エネルギーを、回転円盤に接続された粘性流体素子によって吸収することによって、減速するものである。写真で示したものは動きの確認のために試作したものである。粘性流体素子は設置されていない。(a)は通常時の格納状態を示している。ゴンドラが2台とも屋上の然るべき格納庫に収納されているものとする。(b)は緊急時、ゴンドラ的一方(この図では右側)が地上に移動した状態である。この状態で左側の屋上のゴンドラに人が乗り込めば(c)、人の自重で、(d)、(e)と地上に降りることができる。このとき、右側のゴンドラは屋上に位置するため、2番めの避難者が乗り込み(f)、(g)、(h)と地上に降り立つことができる。このシーケンスを避難者がいなくなるまで継続する。

本システムは重力のみを利用している。火事や地震など電力の供給を期待できない緊急時の使用に適している。これはゴンドラに乗り込む方式であるため、身障者・高齢者でも恐怖感なく安全に使用できる。また、万が一釣瓶式のロープが切断しても、ゴンドラは安全に地上に達することができる。

(2) 歩道橋(水平と傾斜の例)

歩道橋は全国に約一万箇所あり、また歩道トンネル、跨線橋など階段を伴う設備は多い。特に歩道橋は形状の見苦しさもあり評判は芳しくなく、新設のものはさほど増加していないが、身障者・高齢者にとっては大きな障害であり続けている。階段部および水平部は鉄骨であるため、クロール形階段昇降機を設置するには適している。また、階段部と水平部の接続は円弧軌道によって可能である。

(3) 垂直平面移動

垂直移動に特化すれば、いわゆる段差解消機に適用することができる。また、水平移動部と垂直移動部を組合せれば、垂直平面内の移動機構を構成することができ、立体車庫、立体倉庫などへの適用が可能である。

6. 結 言

クロール形移動機構は、当初駆動ガイドとローラの干渉を避けるために、直感によって回転円盤を壁面に対して15°傾けていた。しかし、これまで述べてきたように回転円盤が壁面に平行でもローラと駆動ガイドとの干渉を避けることができることがわかった。これによって直線軌道においては、駆動ガイドは二次元平面で構成できるために、コストが大幅に低減できる。

クロール形移動機構は、最初階段昇降機の移動機構として開発されたが、本論に述べたラックの開発により広範囲の適用分野が期待されるようになった。関西に本社をおくK精工は、バックラッシュおよび騒音のない精密位置決め可能なラックの開発を目指して本装置とよく似たトロコイドラックに行き着いた⁽⁷⁾。位置精度を要求しない静寂な機構として我々はクロール形移動機構を開発してきた。全く逆の要求仕様を満たす機構が外見では見分けがつかない製品を開発したことは興味深い。我々の開発したクロール形は、トロコイドラックに比較して、らせん形状、円弧形状にも適用できるという広い応用範囲を有している。

今後は、階段昇降機のみならず、本文で述べた緊急避難装置、歩道橋用移動機構、段差解消装置、高層建築物メンテナンスのための高所作業場への安全な移動装置などへの適用を積極的に進める。

文 献

- (1) 橋野賢, クロール型階段昇降機の開発, バイオメカニズム, 14 (1998), 237-247.
- (2) 小林昭七, 曲線と曲面の微分幾何, (1991), 22-39, 裳華房.
- (3) グレイ, A., 曲線と曲面の微分幾何, (1996), 111-136, トッパン.
- (4) Craig, J. J., ロボティクス—機構・力学・制御—, (1991), 17-57, 共立出版.
- (5) 成瀬長太郎, 歯車の基礎と設計, (1997), 21-27, 養賢堂.
- (6) 船山良三, 運動の幾何学, (1977), 61-69, 理工図書.
- (7) 今瀬憲司, バックラッシュのないラックピニオン, 日経メカニカル, No. 535 (1999), 58-62.