

第3章 クロール型移動機構の提案

3.1 緒言

この章では本論文で提案するクロール型移動機構の原理について述べる。クロール型移動機構は回転運動を直接線形運動に変換する1方式で、1対の歯車の噛合いにおいて一方の歯をローラで置き換えたものに相当する筆者が考案した新しい機構である。駆動力の伝達が回転自在なローラを介して行われるために、ラック・ピニオン、チェーン・スプロケットを使った従来のトルク伝達で必ず起こる剛体同士の滑りが発生しづらく、騒音・振動を低減することが期待される。低騒音・低振動という特長以外にも、トルク伝達部で潤滑が必要でないため様々な特長があり、高速移動を必要としない階段昇降機などの分野への適用が期待される。以下、3.2節で回転運動を如何に線形運動に変換するかについて原理を述べる。この部分の解析の詳細については4、

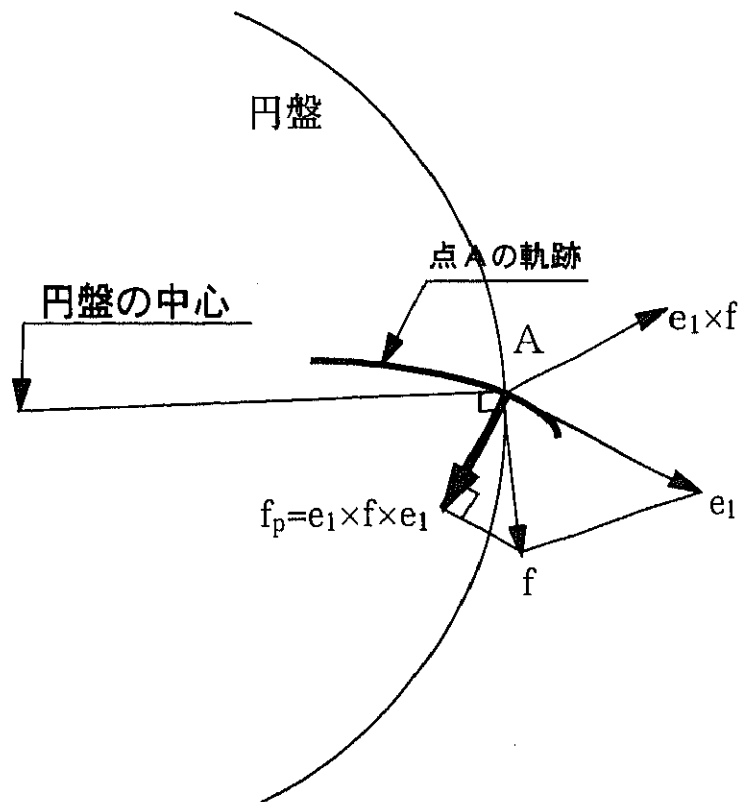


図 3.1 円盤が回転しているとき、円周上の点が障害物（点Aの軌跡）に及ぼす力

5章で述べる。また、3.3節および3.4節ではクローラ型移動機構を工学的に実現する手法に関して述べる。

3.2 クローラ型移動機構の原理

電動モータの多くは回転運動によってトルクを発生する。一方、人間または荷物が搭載されるような移動体は直線運動など線形運動を必要とするため、従来、電動モータと移動本体の間の運動変換はチェーン・スプロケット、ラック・ピニオン、ロープなどの変換機構が用いられてきた。これに対し、筆者は、回転運動をもっと大きな動きとして直接線形運動に変換することができないか、さらにその変換機構をシンプルに実現できないかを模索した。その回答が以下述べる機構である。

直線上で円盤を滑らずに回転させたとき、円周上の一点はサイクロイド曲線を描く。サイクロイド曲線上の一点と円の中心位置は1対1に対応しているので、円盤の中心を直線軌道に沿うように拘束し、円周上の一点をサイクロイド曲線に沿って動かせれば同じ運動が実現できる。前者は円盤中心でトルクを発生させれば実現でき、後者は円周上でトルクに相当する力を発生させれば実現できる。この方針で円盤を動かすとき、サイクロイド曲線に沿わせる力を如何に得るかが次の課題である。力を発生させる駆動源を円周上に設置する方式はシステムを複雑にするので、円盤中心で発生させたトルクをサイクロイド曲線を用いて反力として得る方法を採用する。具体的にはサイクロイド曲線形状に加工された壁面に円周上の一点を押し当てたとき発生する反力を用いる。

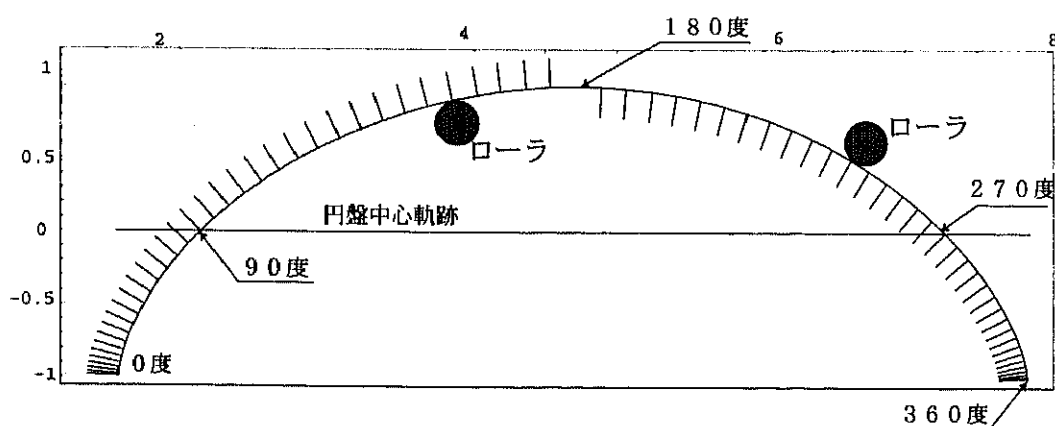


図 3.2 円盤 1 回転中に円周上の点 A (図 3.1 参照) が軌跡に及ぼす力の方向の変化

次にその原理を幾何学的に説明する。図 3.1 に示す円盤の周縁部の一点がサイクロイド曲線に沿っているとして、その点をAとする。点Aにおけるサイクロイド曲線の単位接線ベクトルを e_1 、回転円盤の駆動トルクの点Aにおける力ベクトルを f とする。この f は、点Aを通る半径に垂直で回転方向に一致する。点Aにおいてサイクロイド曲線に及ぼす力は、点Aを通り e_1 に垂直な面への f の射影であり、 $e_1 \times f \times e_1$ で表現される。射影ベクトルがベクトル3重積で表現できるという導出過程は付録1に示される。ここで、力ベクトルは方向のみに注目しており、このベクトル3重積は次に述べる駆動ガイドの法線を求めるために用いる。力の大きさは 4.3.6 で述べる仮想仕事の原理から計算することが出来る。

初期位置（0度）から1回転する間の、この軌跡に及ぼす力の方向の変化を示したものが図 3.2 である。ここでベクトルの大きさは見易くするために同じ長さとした。図 3.2 では円盤が左から右に進んだ場合を示しており、0度から180度までは外向きに力が働くこと、180度から360度までは反対に内向きの力が働くことを示している。すなわち、ベクトルの示された方向に壁があるとしたときに、円盤にローラを設置し、それを介して壁を押すことによってサイクロイド全周にわたって円盤の回転トルクを右手方向移動のための力に変換できることを示している。図示したようにローラ的位置は、0度から180度まではサイクロイド曲線の内側、180度から360度まではサイクロイド曲線の外側から接触することによってこの反力を得ることができる。円盤が左回転し右から左に進むときは、図 3.1 の e_1 と f がともに逆になるため、図 3.2 に示された力の方向は図 3.2 とは逆になる。

回転円盤を搭載した移動本体が移動方向に受ける推進力は、上記力ベクトルの反対方向である。移動本体の移動方向は図 3.2 に示す円盤中心軌跡であるので、円盤回転角 180度では反力ベクトルは真下を向いているため円盤中心軌跡方向成分は0となり、推進力は得られないことを示している。そのため1個のローラで全回転角に対応して推進力を得ることは不可能である。右方向の推進力を得たいとき、円盤中心軌跡がサイクロイド曲線と交差するのは円盤回転角が270度のときであり、このとき力ベクトルは左下45度を向いている。さらに回転角が増加するにつれて円盤中心軌跡との角度は小さくなり、円盤回転角が360度のときその角度は0度になる。右手方向に進む場合、270度～360度が有効な力を得る範囲ということになる。そこでローラを複数個使用し、各ローラがこの部分を利用するようにすれば移動本体は連続して右方向の推進力を得ることができる。1個のローラは270度から360度の90度をカバーすればよい。円盤回転角度90度にわたって反力を及ぼすようにサイクロイド曲線状

に加工されたものを駆動ガイドと呼ぶ。この駆動ガイドの設計が本方式の中心的な課題である。

この駆動ガイドを円盤中心軌跡に沿って90度ずつシフトして設置すれば、ローラを4個等間隔に設置した円盤を用いてローラと駆動ガイドを1対1に対応させることができる。すなわち、1個のローラが対応する駆動ガイド上を転がりながら推進力を得るプロセスを90度毎繰り返せば、円盤の一定方向の回転運動は移動本体の線形運動に変換できることが分かる。このように回転円盤上のローラを駆動ガイドに沿わせてモータのトルクを移動本体の推進力に変換する方式をクロール型移動機構と名付けた。

クロール型移動機構の移動シーケンス（左上から右回りに左下までが1シーケンス）を図3.3に示す。図では壁面内部から見た、円盤、ローラ、駆動ガイドのみが示されており、円盤は反時計方向に回転している。図中左上はローラ1が対応する駆動ガイド上に乗ったところである。円盤の回転トルクは円盤中心に取り付けられたモータで供給されるため、回転につれてローラ1は対応するガイド上に沿って移動する（図

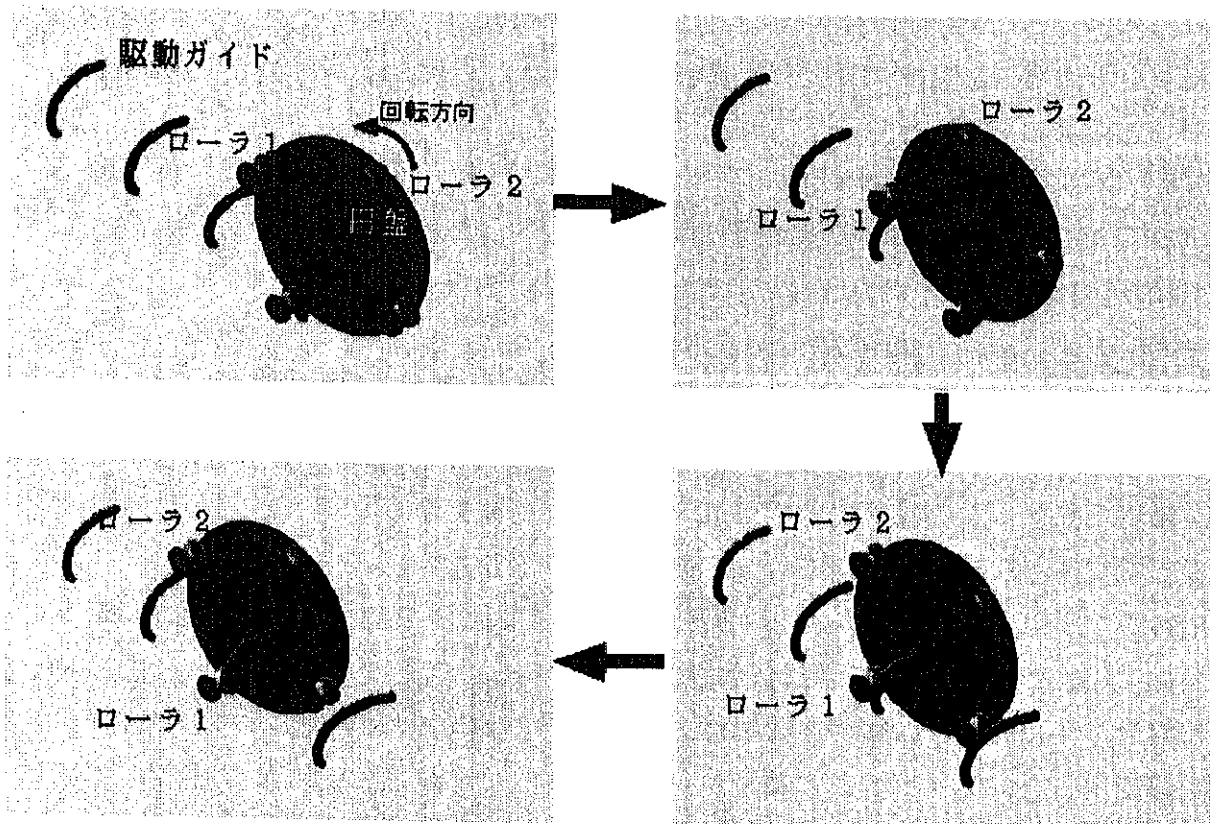


図 3.3 クロール型移動機構の昇降動作シーケンス

右上) . ローラ1が駆動ガイドの終端部に達すれば(図右下) , 隣接するローラ2が隣接する駆動ガイドに接近し, さらに回転するとローラ2が駆動ガイドの上に乗る. このシーケンスを繰り返すことによって, すなわち円盤を一定方向に回転することによってローラと駆動ガイドを対応させ, 移動本体の線形運動に変換できる.

円盤回転角に伴う反力の変動を周期的にし, かつ解析と製作を容易にするために, ローラは円盤の周りに等間隔に取り付けた方が良い. また, この機構を実現するには, 駆動力を発生していないローラと駆動ガイドが干渉しないように配慮する必要がある.

3.3 クロール型移動機構の工学的実現

円盤の回転角度と, 移動本体の位置(姿勢は固定)を軌道に沿って1対1に対応させるために, 移動本体の自由度は1でなければならない. 移動本体が直線運動のみ

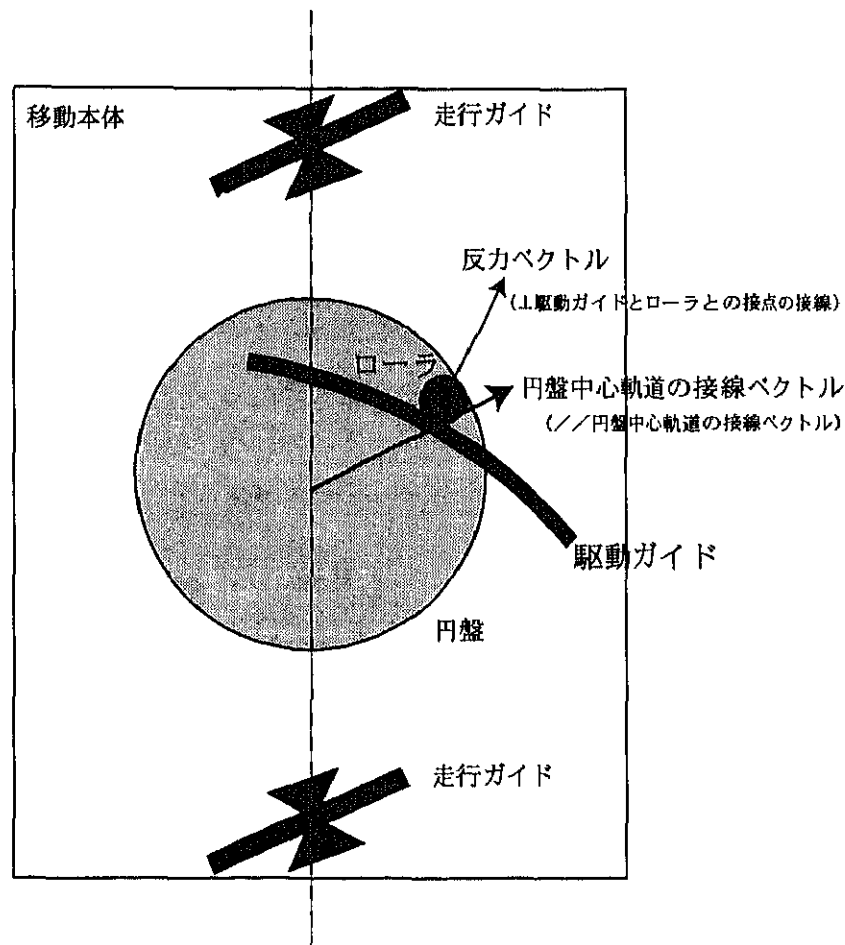


図 3.4 走行ガイド, 駆動ガイド, 反力ベクトルの関係

行う場合この自由度は並進対偶であり，螺旋運動を行う場合ねじ対偶である。

移動本体が上下2本の走行ガイド上を走行する方式で並進対偶を実現するには，摺動自在な部材を3ないし4個配置する必要がある。3個の場合，上下2本の走行ガイドに1-2または2-1の割合で配置する。4個の場合，上下2本の走行ガイドに2-2と等分配する。ねじ対偶を実現するには上下2本の走行ガイドそれぞれに1-1の摺動自在な部材を配置する。図3.4はその例で，移動本体は上下2本の走行ガイドにそれぞれ1個の摺動自在な走行ローラで取り付けられている。ねじ対偶に対応した方式で，直線と螺線部分から構成される混成軌道に対応するには，1対の摺動自在なローラを結ぶ直線周りの回転自由度をある程度堅くする必要がある。これは，特に直線部分で垂直軸周りの回転を防ぐためである。このための手段として，2組のローラで構成された部材で1本の走行ガイドを上下から挟み込む形式とするのが良い。また，駆動ガイド上を転動する円盤周囲のローラは中央部を凹ませた形状とすることによっても，軸周りの回転を防ぐことができる。

2本の走行ガイドで構成される平面において，走行ガイドに垂直な軸を図3.2の縦軸とみなすと，その駆動ガイド形状は図3.2と同じようにサイクロイド曲線の一部

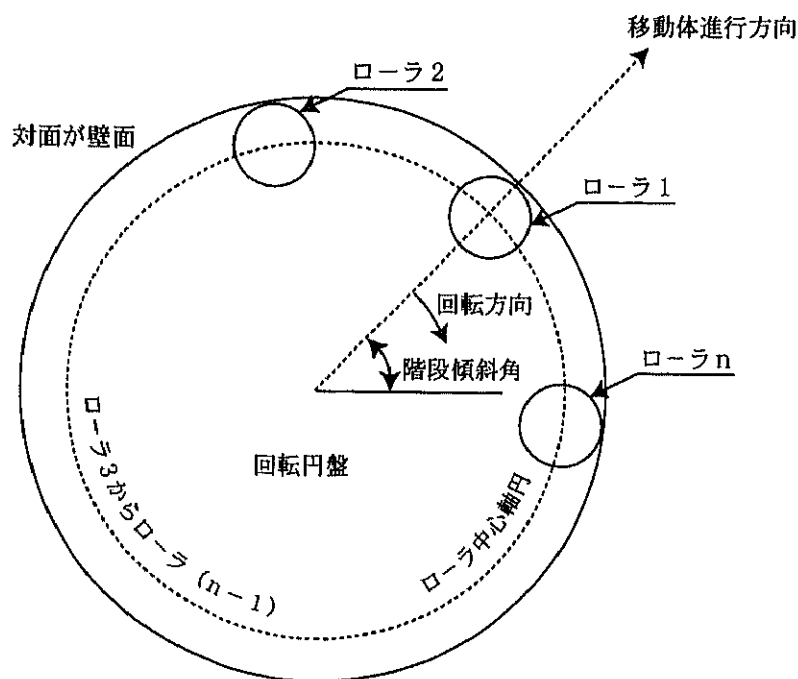


図 3.5 ローラの番号の定義

で構成される駆動ガイド形状と一致する。すなわち、直線走行ガイドにおいては駆動ガイド形状は走行ガイドの傾きに依存しなくなり、駆動ガイドの形状は1通りということになる。

円盤中心軌跡の接線ベクトルは走行ガイドの向きと一致するので、走行ガイド方向の推進力は、先に述べた反力ベクトルと円盤中心軌跡接線ベクトルの内積である。この推進力の重力方向成分が移動本体を持ち上げるに必要な力であるから、必要なモータ回転トルクは階段の傾斜角に依存することになる。

混乱を防ぐために円盤上のローラに番号をつける。円盤が時計回りに回転するとして、初期位置におけるローラ1の中心は、図3.5に示すように移動本体進行方向直線上にあるとする。ローラの順番は反時計方向に2, 3・・・と番号を振り、最後のローラnはローラ1の隣である。

クローラ型移動機構の概略図を図3.6に示す。同図において左図は移動本体正面

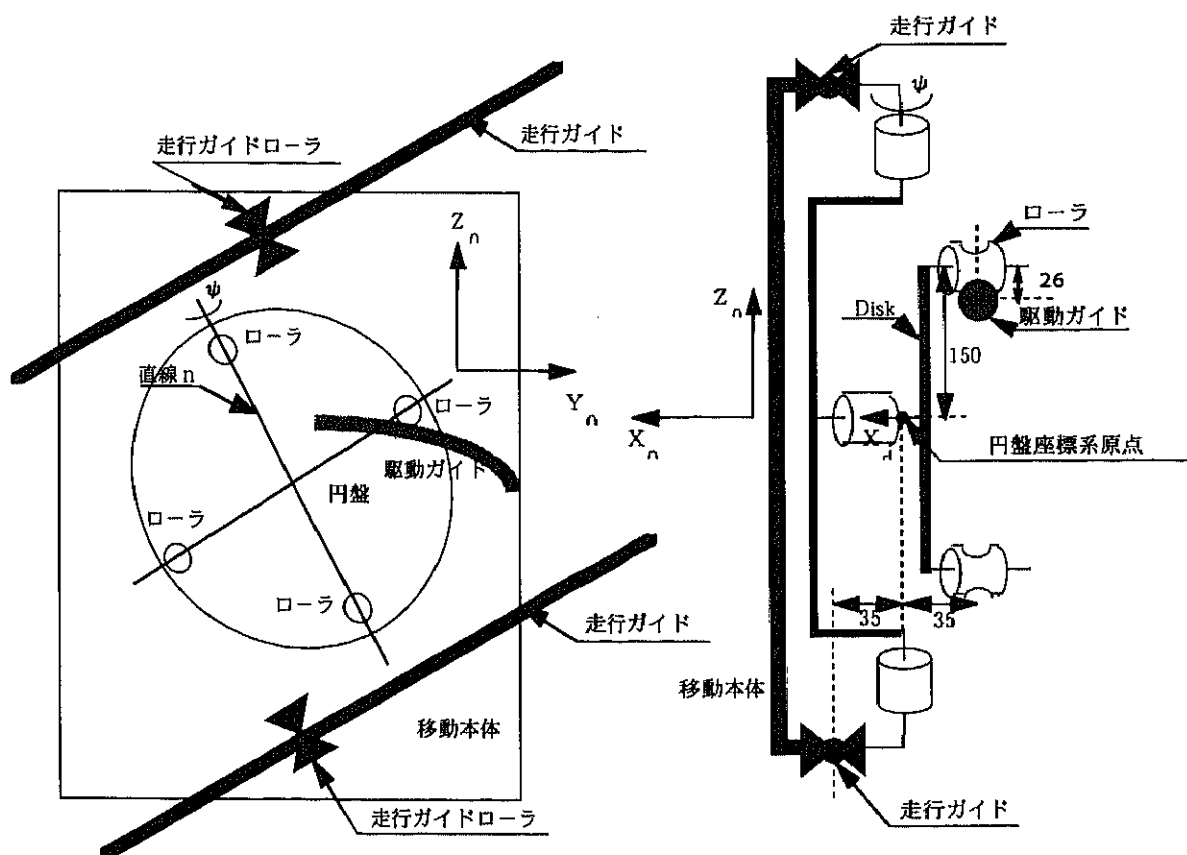


図 3.6 クローラ型移動機構の構造図

から見たところ、右図は進行方向から見た図である。移動本体のほぼ中心にモータによって駆動される回転円盤が取り付けられている。この円盤は図 3.4 に示されたものと同じである。ローラ（本図の場合 4 個）は、円盤の周縁部に等間隔に、円盤面に垂直かつ回転自在に設置されている。ローラのうち一個は壁面に設置される駆動ガイドに乗っており、他のローラが駆動ガイドと干渉しないようにこの円盤は直線 n 周りに ψ だけ傾斜して取り付けられている。直線 n は壁面に平行な面上にあって、走行ガイドと垂直である。図 3.6 の右の図において、文字 ψ の下の一直線上に並ぶ 2 個の円筒は角度 ψ を固定するためのカップリング部材である。この角度は固定されている。

図 3.7 は、クローラ型移動機構を階段壁面設置式階段昇降機に適用した概念図である。走行ガイドは通常金属パイプで構成され、階段壁面上に階段の傾斜に合わせて一対設置される。一対の走行ガイドの中間に駆動ガイドが同じく壁面に設置される。移動本体にはモータで駆動される円盤が設置されている。この移動本体は上下に設置された摺動自在なローラで走行ガイドに取り付けられる。

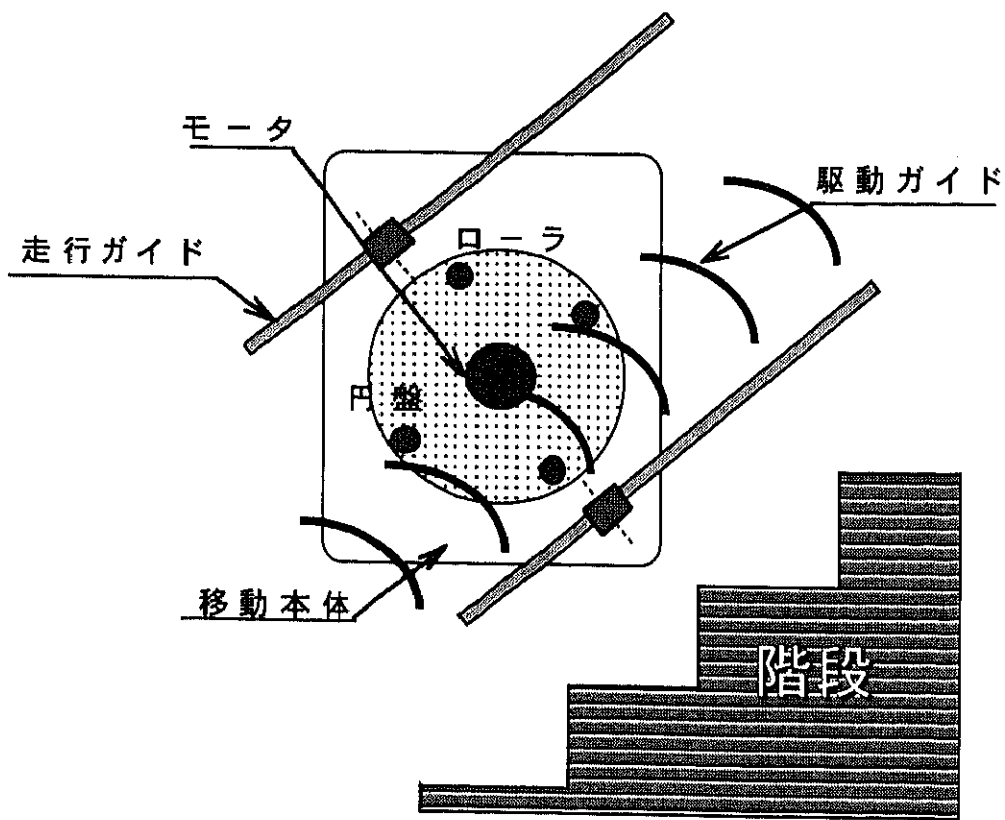


図 3.7 階段壁面に設置されたクローラ型階段昇降機概念図

3.4 駆動ガイド設計の進め方

駅など多くの人を利用する公共建築物と一般家屋では階段の傾斜角は異なる。公共建築物では身障者・高齢者の安全を配慮して 30 度前後、一般家屋では高価な土地価格を反映して狭い空間で上下階の移動が可能となるように急峻に作られており通常 45 度前後である。階段昇降機は、この 2 種類に対応できればよい。

クローラ型移動機構の設計において、駆動ガイドの設計がもっとも重要な作業である。駆動ガイドの設計は、ローラ中心がサイクロイド曲線を描くこと、反力がもっとも有効にローラに伝わることを条件として逆問題として解かれる。その解析は微分幾何学を用いて行われるため、広域にわたる構造物（駆動ガイド、ローラ）の干渉はどこで起こるかは一概には決定できない。いわば積分結果として与えられる駆動ガイドとローラの干渉は、考慮していないところで起こる可能性があり、微分幾何学の条件が再現される保証はない。その保証を設計の段階で得るには、ローラと駆動ガイドの接触（力学）関係を考慮した 3 次元 CAD が必要であるが、それら 3 次元 CAD は極めて高価であること、操作習熟に長い時間が必要であること、などから筆者は選択せず、全体の見通しには欠けるものの理論的見通しが得やすい数式処理プログラム Mathematica を用いて解析を行った。

最終設計物としての駆動ガイド上でローラ付き円盤を動かしたとき、クローラ型移動機構の実現を妨げるローラ位置を推定し、そこでの接触関係を幾何学的に検証した。推進力を得る役目を終わったローラの戻り行程では、円盤の回転角度に比較してローラの動く距離が極めて小さい。そのため駆動ガイド終端の形状とローラの接触関係を精査する必要がある。また、次のローラが次の駆動ガイド上を転がって終端に近づいた時、戻り行程のローラは駆動ガイドの先端部分に接近するためその位置関係が重要である。この 2 点以外はローラは駆動ガイドから離れて運動するために、駆動ガイドとの関係は考慮する必要はないが、壁面・走行ガイドなど他の構造物との関係には注意しなければならない。したがって、最終的にはプロトタイプモデルを製作してその接触関係を確認するのがもっとも現実的な進め方である。本研究でもその方法をとった。

3.5 本章のまとめ

クローラ型移動機構を提案しその原理を述べた。3.2 節で円盤の回転運動を直接移動本体の線形運動に変換するクローラ型移動機構の原理を述べた。3.3 節ではクローラ型移動機構を工学的に実現する方法に関して述べた。3.4 節ではクローラ型移動機

構でもっとも重要な駆動ガイドの設計に関して概念を述べた。

実際の設計では、ここでの議論に立脚して、ローラの厚み、駆動ガイドの厚みなどを考慮しなければならない。これらを考慮した具体的な設計に関しては4、5章で詳細に述べる。