

図 4.30 外接円弧軌道に対応する駆動ガイドの形状とそのヤコビアン y 成分と z 成分

図 4.31 内接円弧軌道に対応する駆動ガイドの形状とそのヤコビアン y 成分と z 成分

様に尖点に相当する定円との接点ではヤコビアン値は0となっている。

4.7.3 外接式・内接式円弧駆動ガイドの最大ヤコビアン

駆動ガイド始点のヤコビアン値は k_2 について変化する。外接式、内接式それぞれの駆動ガイド始点ヤコビアン値は、次式(19)～(22)で表現される。

$$tipepijy = -r(1 + \frac{1}{k_2})(\sin[\frac{\pi}{3}(2 + \frac{m}{k_2})] + \sin[\frac{\pi m}{3k_2}]) \dots (19)$$

$$tipepijz = r(1 + \frac{1}{k_2})(\cos[\frac{\pi}{3}(2 + \frac{m}{k_2})] + \cos[\frac{\pi m}{3k_2}]) \dots (20)$$

$$tiphypo jy = r(1 - \frac{1}{k_2})(\sin[\frac{\pi}{3}(\frac{m}{k_2} - 1)] - \sin[\frac{\pi m}{3k_2}]) \dots (21)$$

$$tiphypo jz = -r(1 - \frac{1}{k_2})(\cos[\frac{\pi}{3}(\frac{m}{k_2} - 1)] - \cos[\frac{\pi m}{3k_2}]) \dots (22)$$

ここで(19)、(20)式は外接式円弧駆動ガイド始点に対応するヤコビアンのy成分、z成分である。(21)、(22)式は内接式円弧駆動ガイド始点に対応するヤコビアンのy成分、z成分である。mは駆動ガイドの順番である。図4.30中段(y成分)の曲線1、3、4、6、または下段(z成分)の曲線2、3、5、6では途中に極値を有するがその絶対値は単調関数である他の曲線より小さい。すなわち、駆動ガイド始点で最大値を示すヤコビアンは単調関数であり、駆動ガイドすべての始点のヤコビア

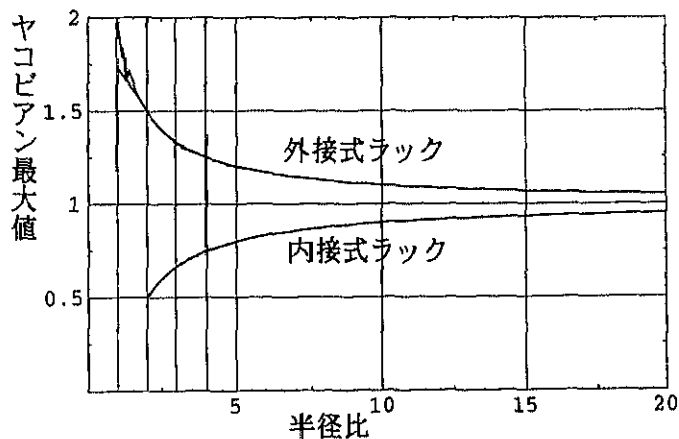


図4.32 固定円の比半径と内接円弧軌道、外接円弧軌道のヤコビアン最大値の関係

ン値の最大値は、その k_2 に対応する駆動ガイドのヤコビアン値の最大値でもある。

k_2 の変化に対するヤコビアン最大絶対値の変化を図 4.32 に示す。この図で上の曲線が外接式円弧駆動ガイドのヤコビアン最大絶対値の変化、下が内接式円弧駆動ガイドのヤコビアン最大絶対値の変化である。上下曲線がそれぞれ 2 重になっている（下の曲線では判別できない、上の曲線でも k_2 が 1 の時のみ判別できる程度である）のは、 k_2 が奇数の時ヤコビアン y 成分と z 成分の最大値がわずかに違うためである。 k_2 が大きくなるにしたがって、すなわち定円が直線に近づくにつれて、外接式、内接式のヤコビアン最大絶対値は 1 に近づき、内接外接の区別ができなくなることを示している。

4.7.4 円弧駆動ガイドの力学的特性

4.3.6 節で述べた直線駆動ガイドの力学特性と同じように、円弧駆動ガイドの力学的特性について述べる。ここでは煩雑さを避けるために外接式のみについて述べる。図 4.33 は、ローラが固定円右真横から延びる駆動ガイド上に沿いつつ、転円が固定円に接触して右回りに転動する様子を示す。ローラが駆動ガイドから得る反力が f 、摩擦力が $f\mu$ 、固定円との接触、実際は固定円と同心の走行ガイドから受ける反力を g 、摩擦力を $g\mu$ とする。 μ は摩擦係数で簡単化のため同じ数値と仮定する。力とトルクのつり合い式は 4.3.6 節で示した式と同じである。しかし、重力方向に置かれた円弧軌道においては、移動に伴って移動本体にかかる重力の方向が変化するために、ラック歯の位置によって静止トルクは変動する。

図 4.33 における重力の方向を変化させた状況において、転円を静止するために必要なモータトルクをシミュレートした。図 4.34 は固定円と転円の半径比をパラメータとして、重力が上向きに働いたときのモータの静止トルクである。横軸は転円の回転角度である。半径比が上がるにつれて、すなわち、固定円半径が大きくなるにつれて駆動ガイド一本あたりのトルク変動は小さくなって、直線駆動ガイドにおけるトルク変動の形状に近づいている。図 4.35 は半径比 1 における、摩擦係数の変化に対するトルク変動を示している。摩擦係数が大きくなるにつれてトルク変動が大きくなっている。半径比 2、摩擦係数 0.1 に固定し、重力方向を 30 度ごとに変化させたときの静止トルクを図 4.36 に示す。

4.8 本章のまとめ

回転円盤を壁面と平行に設置したクローラ型移動機構において、駆動ガイドを構

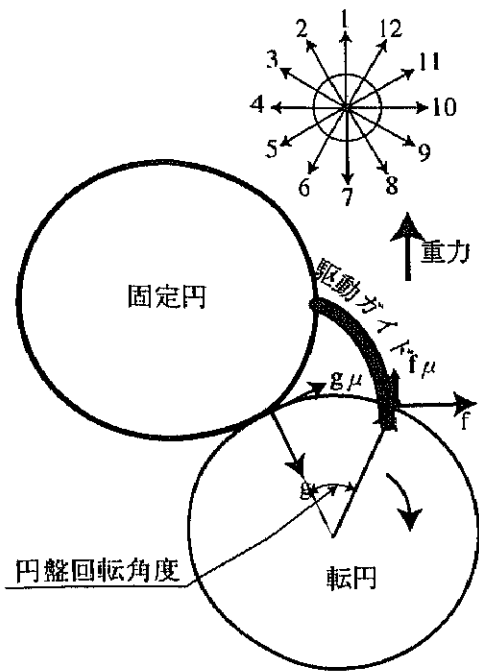


図4.33 円弧外接式クローラ型移動機構の運動モデル

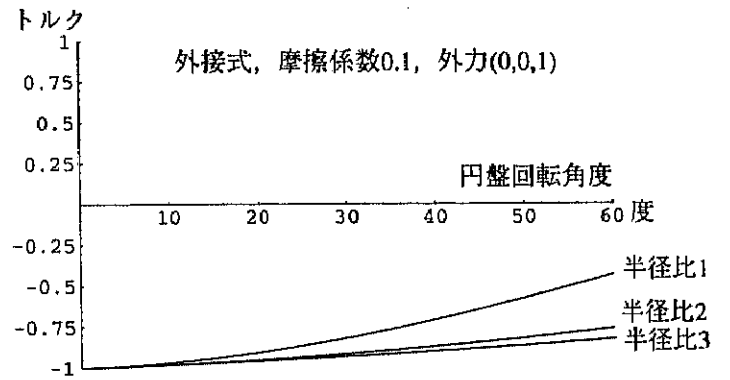


図4.34 半径比を変化させたときのモータトルクの変化 (重力方向1の時)

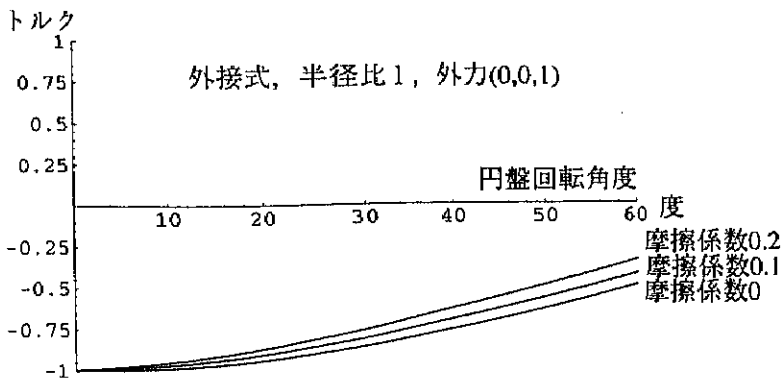


図4.35 摩擦係数を変化させたときのモータトルクの変化 (重力方向1の時)

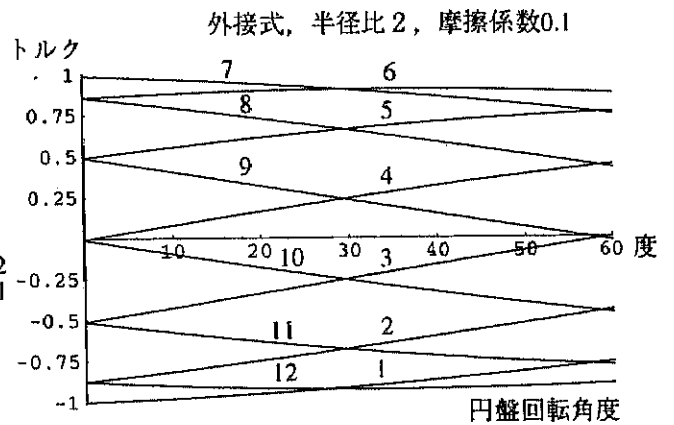


図4.36 重力方向を変化させたときのモータトルクの変化

成できることがわかった。これによって直線軌道に対しては、駆動ガイドは2次元平面で構成できるために、低騒音・低振動のほかに製造および設置コストの大幅な低減が期待できる。

クローラ型移動機構は、ラックの開発により広範囲な適用分野が期待されるようになった。加茂精工株式会社は、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を開発し、市販している。一方、位置精度を要求しない静寂な機構として筆者はクローラ型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のつかない製品となったことは興味深い。筆者が開発したクローラ型移動機構は、トロコイドラックに比較して、傾斜した円筒形状、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。したがって、今後は、階段昇降機、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が期待できる。

3次元空間への拡張については次章で議論することとし、この章ではまず2次元平面内に限った議論を行った。直線軌道に関しては、平面で構成できる駆動ガイド(ラック)の幾何学的諸特性について考察した。このラックは階段傾斜角に依存しないために極めて実用性が高い。さらに、2種類のプロトタイプを試作によってその実用性、拡張性を示した。ラック生成の基本曲線をサイクロイド曲線からトロコイド曲線へ拡張することによって、任意長さの軌道に適用できることを示した。また、トロコイド曲線への拡張は、滑り係数、歯先厚さによって制限されることを示した。円弧軌道に関しては、転円である円盤が固定円である円弧軌道の円内または円外に沿って移動するときの同じく幾何学的、力学的諸特性について考察した。

第5章 具体的設計手法の提案2（傾斜円盤方式）

5.1 緒言

第4章で軌道が2次元平面上に限定されたクローラ型移動機構に関して述べた。本章では3次元移動への拡張を試みる。ここでの3次元移動は、ジェットコースターのような姿勢変動を含む3次元移動ではなくて、移動本体は常に重力方向を向いているものとする。階段昇降機において3次元移動の必要性は、折返し階段における回転部において発生する。折返し階段の折返し部においては必ずある半径の円柱の側面を螺旋状に移動する軌道が必要になる。折返し階段の構成は、直線部－螺旋部－直線部とし、螺旋は解析が簡単になるように定螺旋（軸方向の移動距離は回転角度に比例する螺旋）とする。

平行円盤を用いたクローラ型移動機構が螺旋部を上昇するとき、ローラは円柱の接線の先端に位置するため駆動ガイドは円柱から離れて設置されなければならない。円柱から離れて設置された駆動ガイドは、健常者の歩行を妨げたり移動本体自体と干渉する可能性がある。移動本体自体と干渉する可能性に関する詳細な解析は6章で行う。本章では円盤を上昇進行方向に傾斜させることによって駆動ガイドを円柱に近づける傾斜円盤方式について述べる。

5.2節では螺旋部においては傾斜円盤が必要であることを示す。5.3節では傾斜円盤方式の直線階段対応に関して述べる。駆動ガイド設計手法と、その設計に基づいて試作されたプロトタイプを示す。5.4節では傾斜円盤方式の螺旋階段対応に関して述べる。前節と同じく駆動ガイド設計手法と、その設計に基づいて試作されたプロトタイプを示す。移動本体は前節で開発されたものを用い、走行ガイドへの取り付けを上下一対の摺動自在部材に変更した。5.5節では駆動ガイドの設計手法の詳細を微分幾何学に基づいて述べる。5.6節では駆動ガイドが設計値通りに加工されたか、その形状の計測手法の一つについて述べる。5.7節では実用化を考慮したとき工数を減らすために駆動ガイドの一体化と、駆動ガイド終端部で起こりやすいローラとの干渉の逃れ方について述べる。5.8節で本章のまとめを行う。

5.2 傾斜円盤方式の必要性

本章の議論では、階段傾斜角は公共建築物に多く見られる30度とし、駆動ガ

イドは試作の容易なパイプを用いることを前提とする。駆動ガイドを設計する基準は、①移動が物理的に妨げられないこと、②ローラ軸圧力角が小さくなること、③駆動ガイドが容易に製作できること、である。①は円盤が駆動ガイドと衝突しないことで、移動機構として最重要条件である。②は安全のための条件で、ローラ軸への過大な力が加わらないと同時に、その変動が小さいことが望まれる。③は駆動ガイドがパイプで製作されるために曲げの限界から来る条件であり、他の方式で駆動ガイドが製作できればこの条件は必要ない。

5.2.1 円盤傾斜角と走行可能性

螺旋軌道に対応したクローラ型移動機構では、螺旋を上から見たとき円盤はその中心が描く円形に接しながら移動する。そのため駆動ガイドはこの円形の内側に存在しなければならない。螺旋を上から見た円柱の半径と回転円盤の半径の比を曲線部半径比と定義する。図 5.1 は、曲線部半径比が 2 の時の円盤の中心軌跡（円）と駆動ガイド中心軌跡 2 本を示したものである。左の図は円盤傾斜角が 0 度、真ん中の図は 15 度、右の図は 30 度の場合を示している。円盤傾斜角が 0 度では駆動ガイド中心軌跡が円と干渉している。実際の駆動ガイドは肉厚を有しているので、この場合の駆動ガイドは円盤の移動を妨げることになる。図 5.2 は螺旋部の半径をさらに小さくし、曲線部半径比を 1.5 にしたときの同じ条件での関係を示している。円盤傾斜角が 0 度では駆動ガイドが円の外側にはみ出しており、駆動ガイドは円盤の走行を完全に邪魔することになる。円盤を 15 度傾斜させると、曲線部半径比 1.5, 2 どちらの場合も駆動

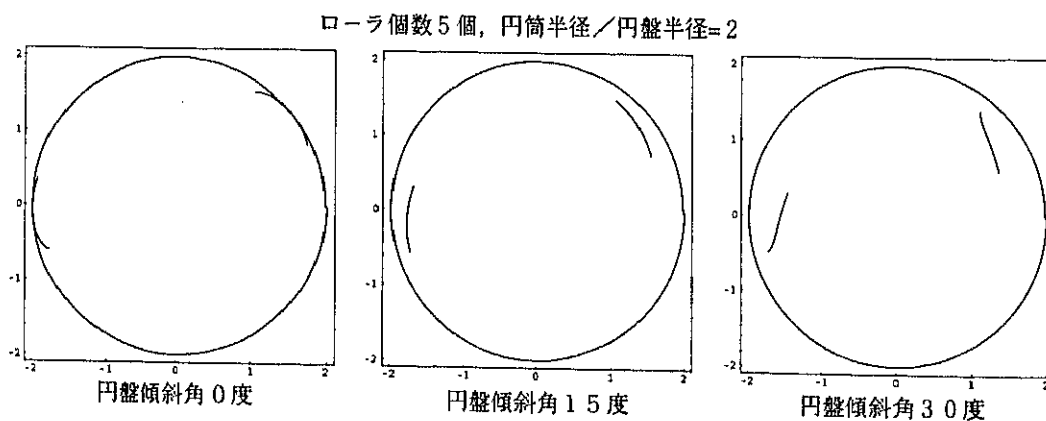


図 5.1 円盤傾斜角を変化させた場合のローラ中心軌道と円盤中心軌道

ローラ個数5個，円筒半径/円盤半径=1.5

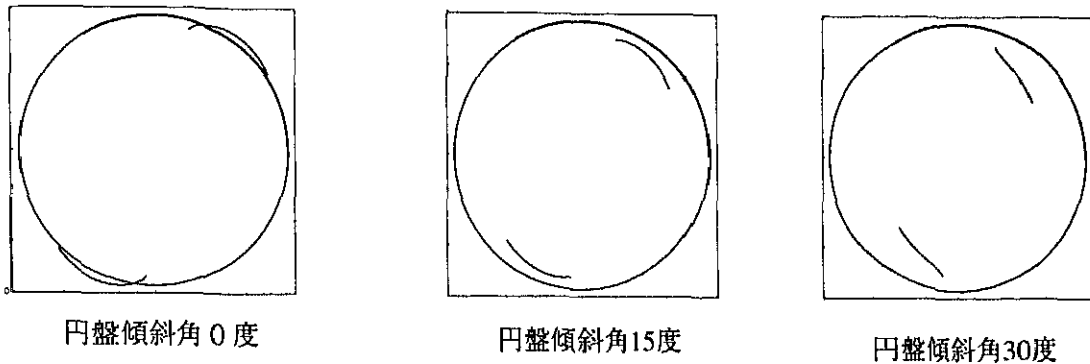


図 5.2 半径比を小さくして円盤傾斜角を変化させた場合のローラ中心軌道と円盤中心軌道

ガイドは円盤の走行を妨げない。

5.2.2 円盤傾斜角とローラ軸圧力

次に，円盤傾斜角とローラ軸にかかる力について調べる。図 5.3 は階段傾斜角 30 度の時の円盤傾斜角と円盤回転角の変化に対するローラ軸圧力角余弦を示している。円盤傾斜角 15 度，円盤回転角 90 度近辺で特異的に小さくなっているが，それ以外では円盤回転角が 90 度に近づくとローラ軸圧力角余弦は上昇しており，階段傾斜角が大きくなるにつれて円盤回転角 90 度近辺では下降している。図 5.3 において円盤傾斜角軸正面から見るとローラ軸圧力角余弦は上に凸になっている。図 5.3 の下の図はローラ軸圧力角 45 度の等高線で切った図で，黒の部分がローラ軸圧力角余弦が小さいことを示している。円盤傾斜角 15 度近辺を縦にたどると，円盤回転角 80 度以上で急激に落ちるが，それ以外の場所では大きな数値を示している。図 5.3 において円盤傾斜角 0 度，15 度，30 度で縦に切って，円盤回転角側から見た図が図 5.4 である。円盤傾斜角 15 度の場合，回転角度 40 度までは円盤傾斜角 0 度よりローラ軸圧力角余弦が大きいことを示している。円盤回転角度 60 度まではどちらも似たローラ軸圧力角余弦値である。

図 5.5 は，円盤傾斜角 15 度，曲線部半径比 2 に固定したときの階段傾斜角，円盤回転角を変数としたヤコビアンの変化を示している。円盤回転角 90 度近辺も含めて滑らかな変化を示している。図 5.6 は円盤傾斜角 15 度，曲線部半径比 2，階段傾斜角

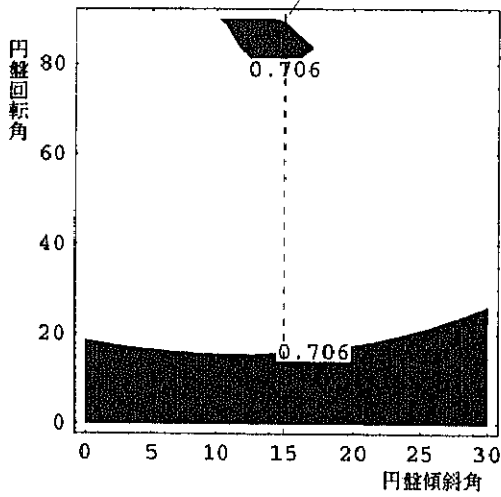
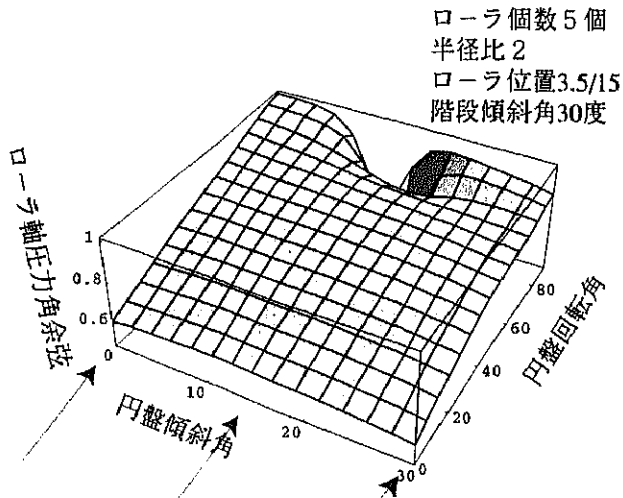


図5.3 半径比2の曲線部を円盤傾斜角の変化に対するローラ軸圧力角余弦の変化

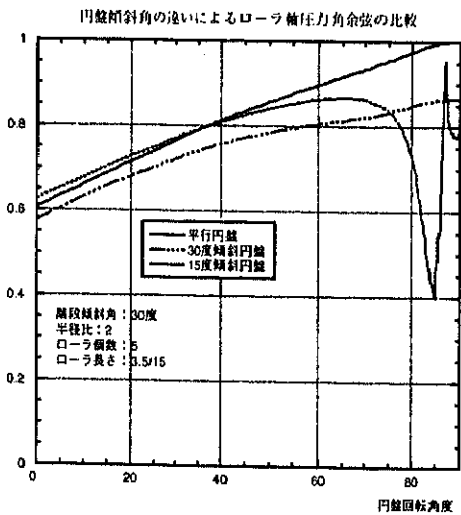


図5.4 前図において矢印で切った断面図

ローラ中心ヤコビアン
円盤傾斜角15度, ローラ個数5個,
半径比2, ローラ位置3.5/15

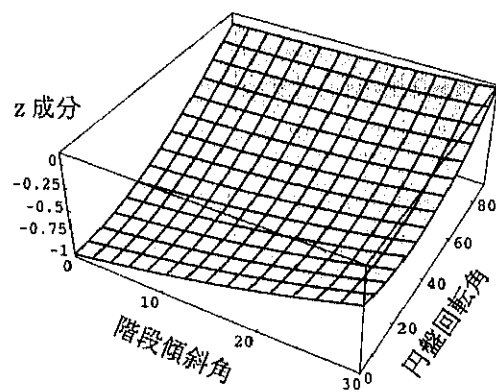
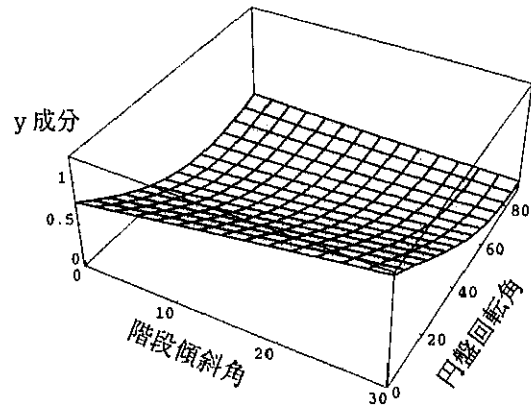
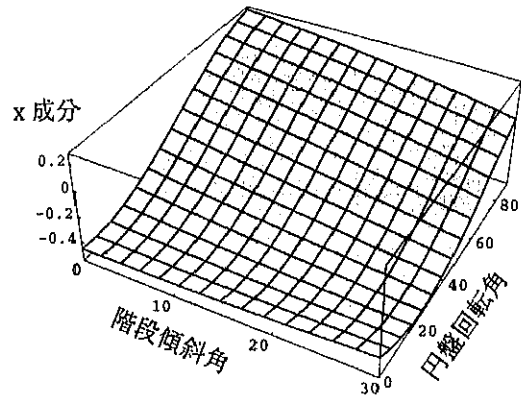


図5.5 半径比2, 円盤傾斜角15度に固定したときの階段傾斜角, 円盤回転角の変化に対するヤコビアンの変化

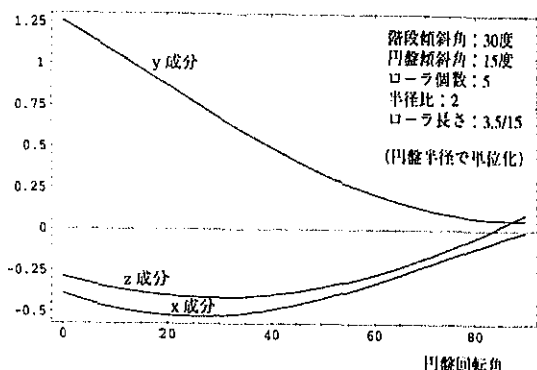


図 5.6 曲線部におけるヤコビアン

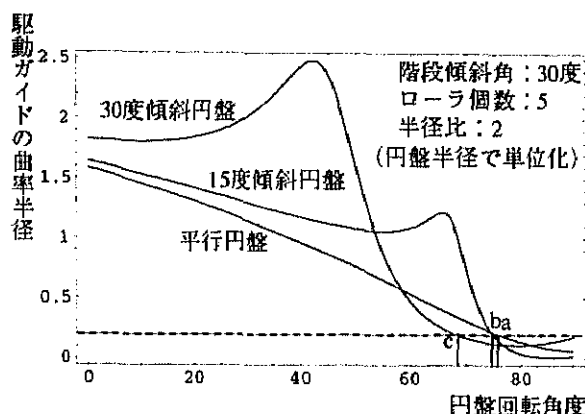


図 5.7 曲線部における曲率半径の変化

30度時のヤコビアンの変化であり、円盤回転角 90 度で x 、 y 、 z の 3 成分とも 0 に収束している。

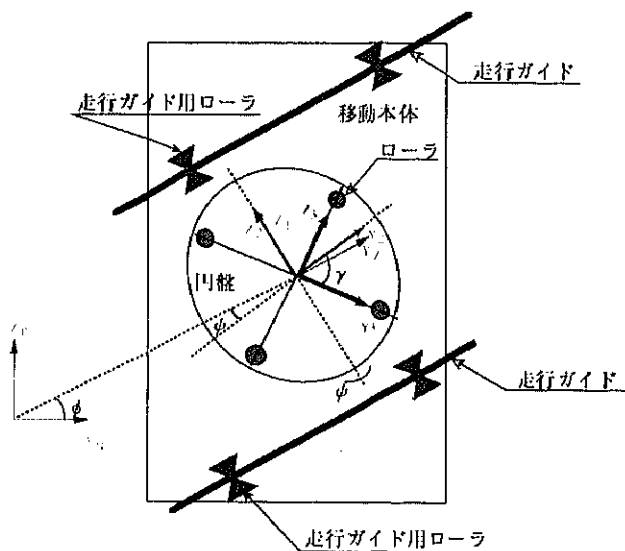
5.2.3 円盤傾斜角と駆動ガイド曲率半径

駆動ガイドをパイプで製作するとき、パイプに割れが発生しない、パイプ表面にしわが寄らないなど製造技術の制約から曲率半径に下限がある。図 5.7 は横軸を円盤回転角度としたときの円盤傾斜角に対する曲率半径の変化を示したものである。縦軸値 0.2 は、プロトタイプ試作に使用したパイプの曲率半径の下限である。円盤傾斜角度 0 度、15 度、30 度それぞれ 76 度（点 a）、75 度（点 b）、68 度（点 c）で下限値を切っており、円盤傾斜角 15 度が円盤傾斜角 0 度とほぼ同じ広い円盤回転角度をカバーしている。

以上 3 つの条件を総合的に判断すると、曲線部半径比 2 近辺の螺旋階段では円盤を 15 度傾斜しなければならないことがわかる。回転円盤半径が 15cm の場合、螺旋階段部の円柱半径は 30cm となる。曲線部半径比 1.5 では 22.5cm となり、個人住宅の折返し階段内側走行が可能な大きさである。

5.3 直線階段対応階段昇降機

移動の安定を確保するため、円盤傾斜角は固定された方がよい。直線階段と螺旋階段が混合された折返し階段に対応するためには、直線部分においても円盤傾斜角を 15 度に固定した状態で走行できなければならない。本節では傾斜円盤に対応した直



- 座標系 (0): 基準座標系
- 座標系 (1): X_0 軸回りに ϕ 回転し, 階段の傾きに沿って移動する回転円盤座標系
- 座標系 (2): Z_1 軸回りに壁側へ ψ 回転した座標系
- 座標系 (3): x_2 軸回りに γ 回転した回転円盤座標系

図 5.8 直線階段対応クローラ型階段昇降機座標系

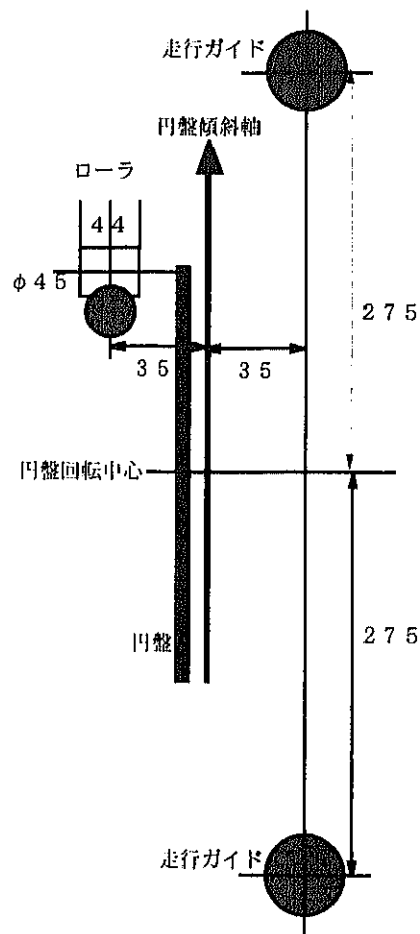


図 5.9 試作機マーク 1 の主要部寸法図

線階段対応クローラ型移動機構の設計を行う。

階段は壁面に向かって右上がりとする。壁面から外に向かう法線を x 軸, 右手系を構成するように壁面に向かって右に y 軸, 上方に z 軸をとる。すなわち, y 軸の正方向に進むと z 軸も正方向に進む。右下がり階段は右上がり階段の鏡面对称であるので, 右下がり階段は左手系になる。上り階段を前に見て, 昇降機を右壁につけるときの左手系, 左壁につけるときの右手系になる。そのため, 実際の製作においては若干の注意が必要である。これからの議論では右手系を使用するために階段は右上がりとする。

直線階段対応昇降機の回転円盤の座標系を図 5.8 に示す。 (x_0, y_0, z_0) 座標

系は基準座標系, (x_1, y_1, z_1) 座標系は, x_0 軸回りに階段の傾斜角だけ正方向 (左回り) に回転し, 座標系原点が走行ガイドに沿って移動した座標系である. (x_2, y_2, z_2) 座標系は, z_1 軸回りに正方向に ψ だけ壁面へ傾斜している座標系である. (x_3, y_3, z_3) 座標系は, x_2 軸回りに負方向に γ だけ回転した円盤に固定された座標系である. 各座標系間の同次変換行列は

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & v\cos\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & v\sin\phi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

で表される. ここで, ϕ は階段傾斜角, ψ は円盤傾斜角, γ は円盤の基準位置からの回転角度, v は走行ガイド上の移動距離である. l (エル) を円盤の半径とすると, y_3 軸上のローラ $(0, l, 0)$ の基準座標系上での位置は, 次式で計算される.

$$\begin{aligned} {}^0P_h &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 T(0, l, 0, 1)^T \\ &= \begin{pmatrix} -l\cos\gamma\sin\phi \\ l(\cos\gamma\cos\phi\cos\phi - \sin\gamma\sin\phi) + v\cos\phi \\ l(\sin\gamma\cos\phi + \cos\gamma\cos\phi\sin\phi) + v\sin\phi \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで, 駆動ガイドの形状を見るために, $\phi = 0$ とすると, 上のベクトルは次式のようになる.

$$\begin{pmatrix} -l\cos\gamma\sin\phi \\ l(\cos\gamma\cos\phi) + v \\ l\sin\gamma \end{pmatrix}$$

ここでさらに, 円盤の回転角速度を ω とし, 滑りがない ($v = l\omega t$: 円盤中心の移動距離が円周接地移動距離に等しい) という条件を加えると,

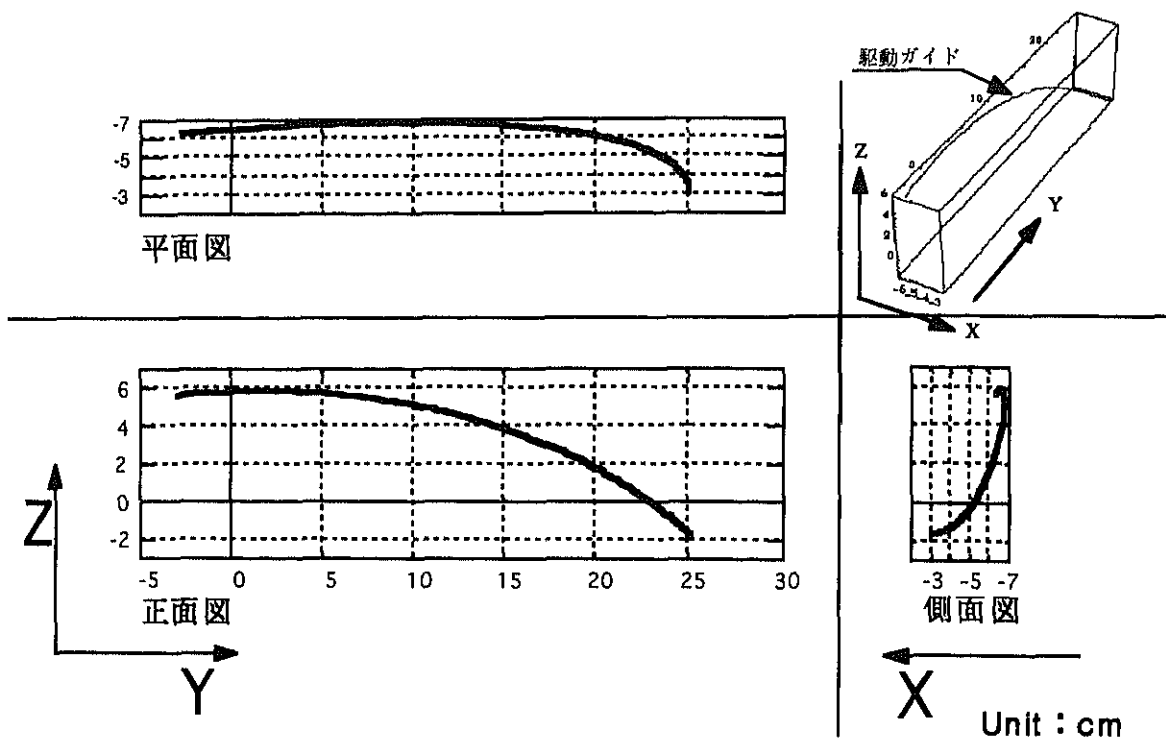


図5.10 直線階段用駆動ガイド3面図と鳥瞰図 (円盤半径15センチ)

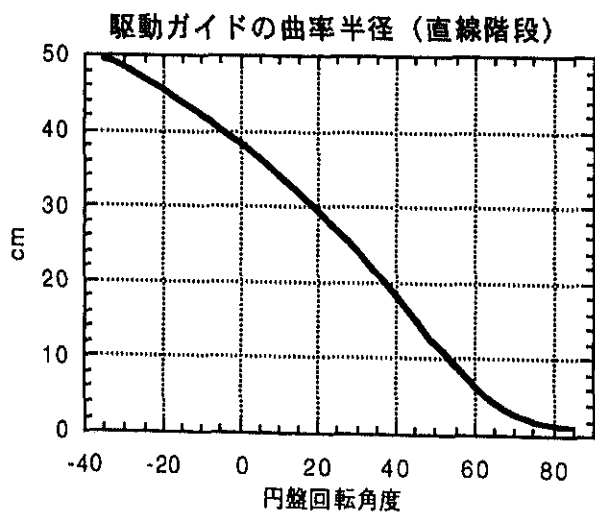


図5.11 駆動ガイドの曲率半径

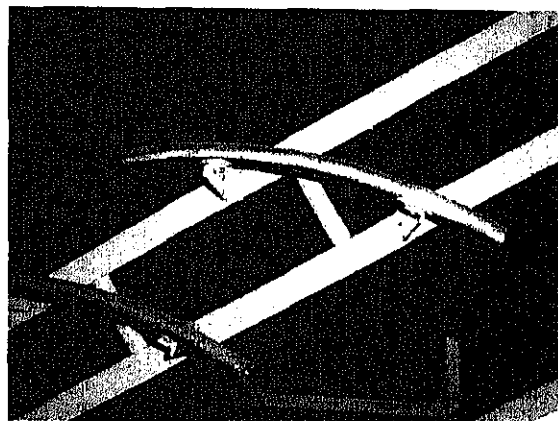


図5.12 直線階段用駆動ガイド

$$\begin{pmatrix} -\cos \omega t \sin \varphi \\ \cos \omega t \cos \varphi + \omega t \\ -\sin \omega t \end{pmatrix}$$

となる。これは、円盤の回転に対応したローラの中心が描く曲線を示しており、x軸方向から見るとサイクロイド曲線、y軸方向から見ると楕円となる3次元曲線である。図5.9は、試作した階段昇降機の主要部分、すなわち、走行ガイド、円盤、ローラの寸法を示している。

この軌道を実現させる駆動ガイドを設計するには、ローラの半径（肉厚）を考慮しなければならない。その設計については5.5節で述べる。このように設計された駆動ガイド形状の3面図と鳥瞰図を図5.10に示す。これは円盤半径15cm、ローラ個数4個の場合を示している。図5.11は、円盤の回転の各位置における曲率半径の変化を示したものである。駆動ガイド始点（円盤回転角度0度近辺）付近では曲率半径は大きいですが、駆動ガイド終点（90度近辺）に近づくにつれて曲率半径が0に近づいている。パイプを皺や割れがない状態で所定の形に曲げるにはパイプ半径の3倍の曲率

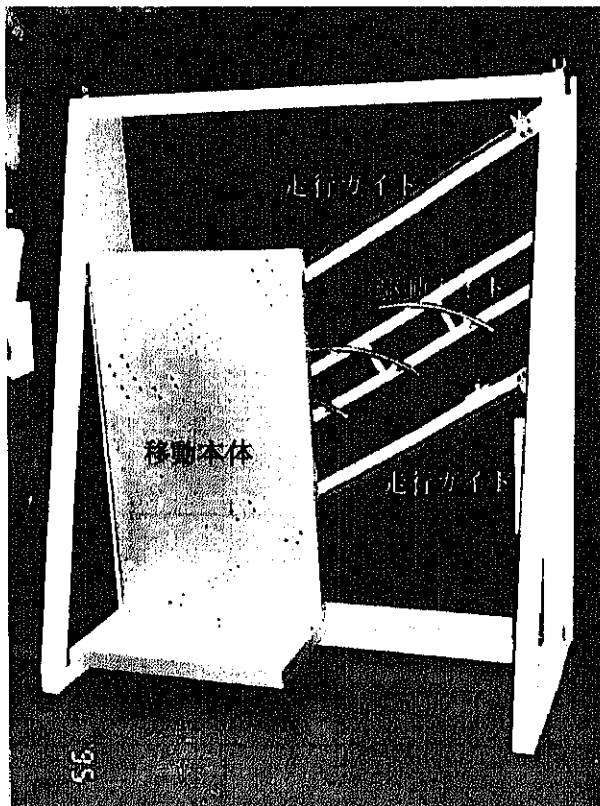


図 5.13 直線階段対応クローラ型階段昇降機プロトタイプ

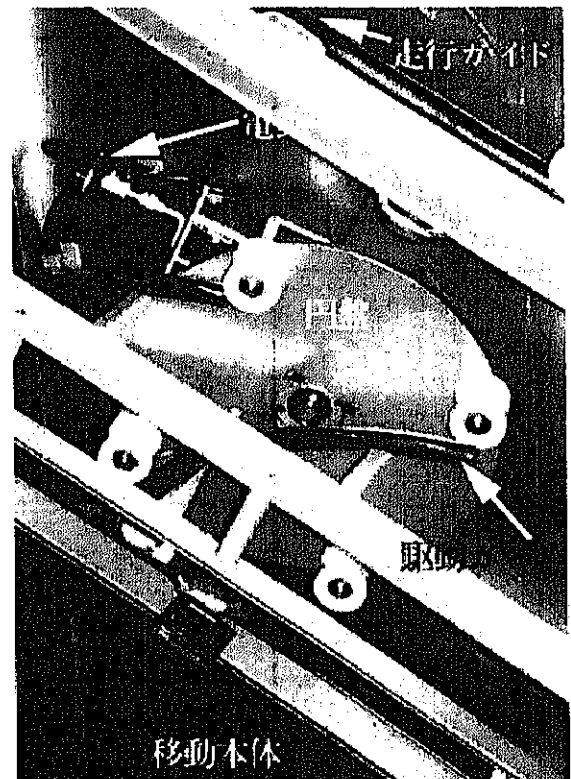


図 5.14 円盤、ローラと駆動ガイドの関係（図5.13の裏側）

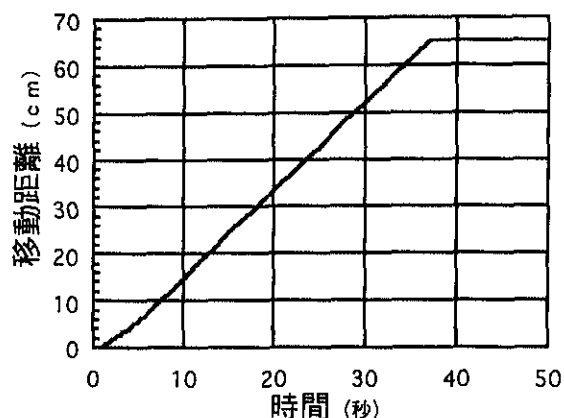


図 5.15 プロトタイプの等速直線性を示す計測値

半径（これは図 5.7 で示した縦軸値 0.2 に相当する）が必要といわれている。すなわち、半径 1cm のパイプを用いた場合、最小 3cm の曲率半径が必要であるから、図 5.11 から円盤回転角度 70 度以上に対応したところは曲げられないことになる。そこで本試作では駆動ガイドは、円盤回転角度-20 度～70 度に対応した形状を用いた。

図 5.12 はパイプで試作された駆動ガイドを壁に向かって正面から見たものである。図 5.13 は直線階段用に試作されたローラ個数 4 個のプロトタイプを正面から見たところである。図 5.14 は、図 5.13 を背面から見たもので、電動モータ、円盤、駆動ガイド、走行ガイド、移動本体の位置関係を示している。電動モータは 50W で、積載最大荷重は 30Kg である。この図が左上に上昇しているときとすると、円盤左のローラが駆動ガイドの終端部に来ており、次のローラである円盤上部のローラが次の左上の駆動ガイドに乗り移ろうとしている。このとき、円盤右のローラが駆動ガイドの移動本体側をクリアしているのがわかる。円盤が壁面に対して 15 度傾斜しているために駆動ガイド始点との衝突を免れている。

図 5.15 は移動本体の移動性能を計測したものである。移動本体の右端に糸を取り付け、錘を取り付けたもう一方を走行ガイド延長上に取り付けたプーリ付きロータリエンコーダにまきつけ、円盤を等速回転させて移動本体の移動距離を計測したものである。円盤の等速回転運動が移動本体の等速直線運動に変換されているのがわかる。

本試作では駆動ガイドは厳密に取り付けられていないが、滑らかな移動が実現されている。これがクローラ型移動機構の特長で、駆動ガイドの製作精度、取り付け

精度が少々悪くても、ローラが駆動ガイドから脱線しない精度があれば、駆動できる。さらに、ローラが駆動ガイドから反力を受けてそれを推進力としているために、次のローラと駆動ガイドの接触が始まるまでは、前の組み合わせが推進力を発生しており、位置精度が悪くても乗り移りは円滑である。

5.4 螺旋階段対応階段昇降機

クローラ型移動機構を直線軌道において実現できることを実証機を試作すること

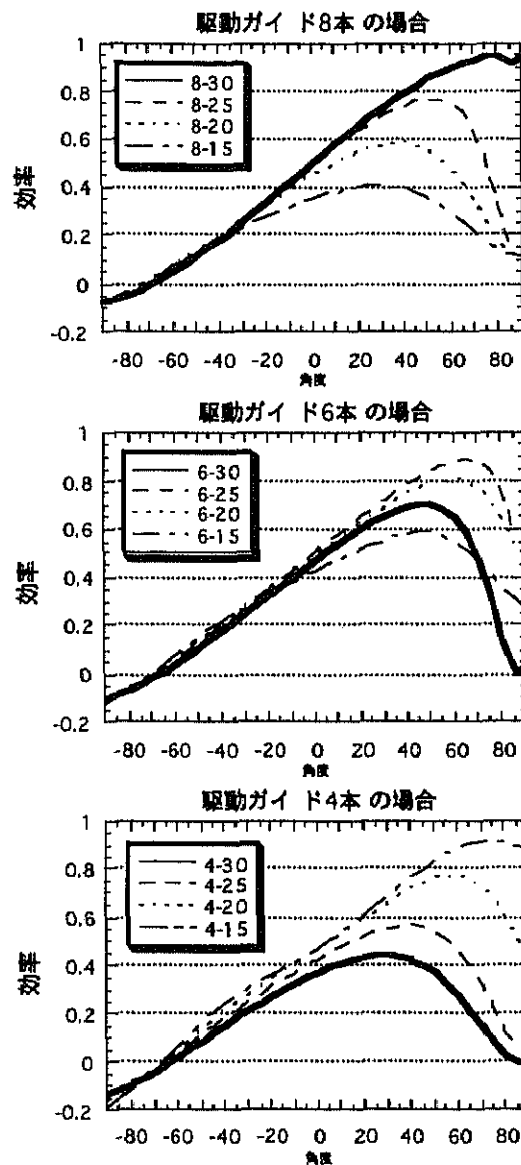


図 5.16 円柱半径，駆動ガイド数とローラ軸圧力角余弦

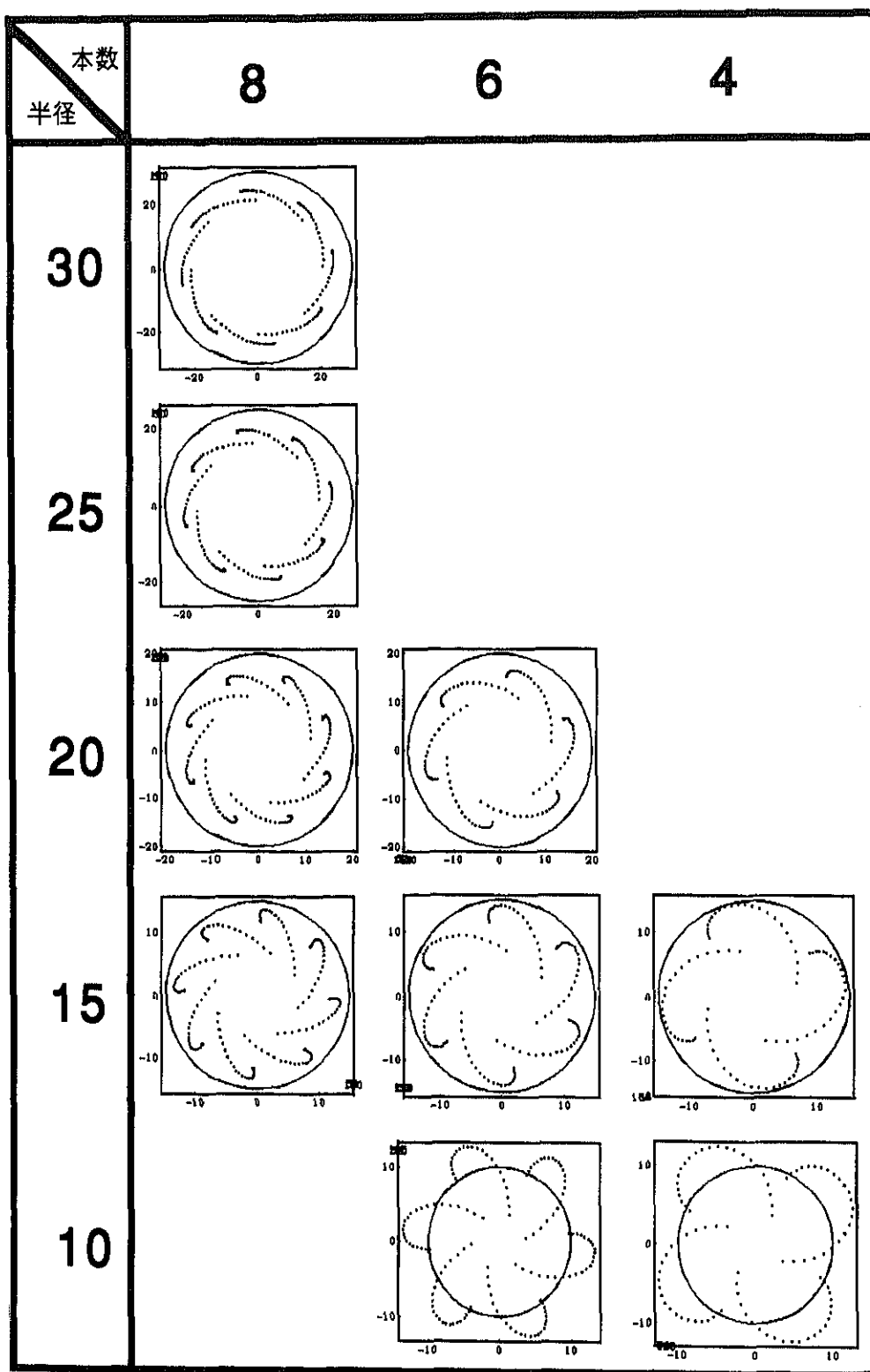


図 5.17 円柱一周上の駆動ガイドの数と形状

によって示した。日本においてもっとも多く見られる階段の形状は折返し階段である。そのため、実用的な階段昇降機は折返し階段内回りに対応しなければならない。そのための準備として、先に試作したクローラ型移動機構を螺旋階段に対応させる。

内回りに対応するためになるべく折返し部の回転半径を小さくしなければならない。公共建築物の階段部壁の厚さを 30cm、走行ガイドの壁からの距離 15cm とすると回転半径は 30cm 程度である。試作機の円盤半径は 15cm であるから、曲線部半径比は 2 以下が要求される。

曲線部半径比 2，階段傾斜角 30 度の螺旋階段対応の駆動ガイドが生成できるかどうかローラ軸圧力角余弦と形状の観点から検討する。円柱一周上の駆動ガイドの数と円柱半径をパラメータとしてローラ軸圧力角余弦をグラフ化したものが図 5.16 である。凡例の始めの数字は円柱一周上の駆動ガイド数、ハイフンの次の数字は円筒半径（単位 cm）である。どれも円盤回転角 0 度では 0.4 であるが、駆動ガイド 6 本の場合は 50 度近辺から急速に下がる。駆動ガイド 4 本ではさらに低下している。一方、駆動ガイド 8 本では 80 度近辺まで順調に増加している。

円周一周上に配置する駆動ガイド数と円柱半径をパラメータとしたとき駆動ガイド形状をまとめたものが図 5.17 である。縦軸に半径を 30cm から 10cm まで、横軸は円柱一周上の駆動ガイド数がとられている。図では駆動ガイド形状は点線で示されているが、各点は回転円盤の一定回転ごとの位置を示している。点が密なところが駆動ガイド終端を示している。曲線部半径が 10cm では駆動ガイドが大きく外側にはみだしており、健常者の走行を妨げる。ガイド終端部の形状が曲がっていない素直な曲線は半径 30cm（曲線部半径比 2）からである。

この 2 点から、階段傾斜角 30 度の場合は、曲線部半径比 2，円柱 1 周上の駆動ガイド数は 8 本と決定した。

螺旋階段の場合の座標系を図 5.18 に示す。 (x_0, y_0, z_0) 座標系は基準座標系、 (x_1, y_1, z_1) 座標系は z_0 軸回りに θ 回転し、その原点は階段の高さ方向に回転角 θ に比例して垂直移動した座標系である。 (x_2, y_2, z_2) 座標系は、 x_1 軸回りに階段の傾斜角だけ回転したもの、 (x_3, y_3, z_3) 座標系は z_2 軸回りに ψ だけ壁面へ傾斜した座標系を表している。 (x_4, y_4, z_4) 座標系は x_3 軸回りに γ だけ回転した円盤に固定された座標系である。各座標系間の同次変換行列は各々次のように表される。

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & a\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & a\sin\theta \\ 0 & 0 & 1 & c\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 θ は螺旋が形成する円筒において基準出発点からの回転角、 ϕ は階段傾斜角、 ψ は円盤傾斜角、 γ は円盤の基準位置からの回転角度、 a は螺旋が形成する円筒の半径である。

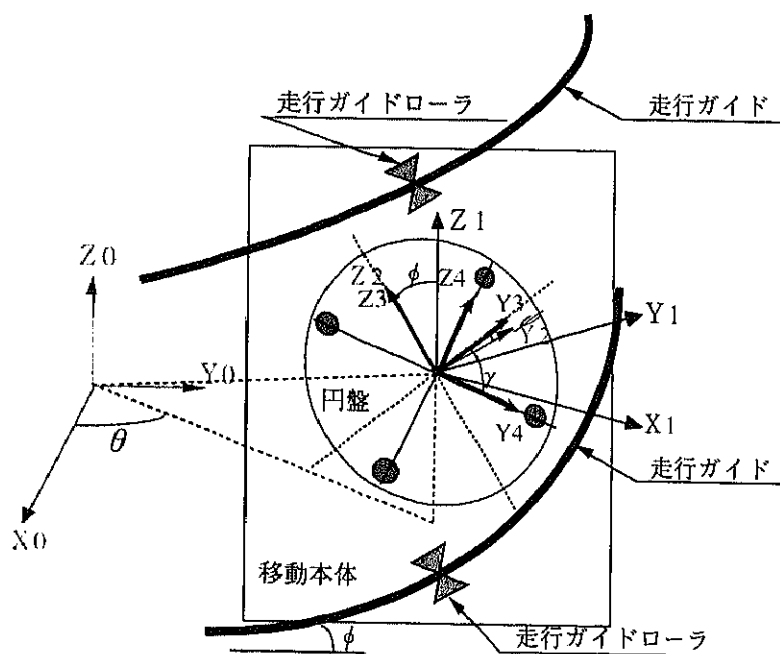


図 5.18 螺旋階段対応クローラ型階段昇降機座標系

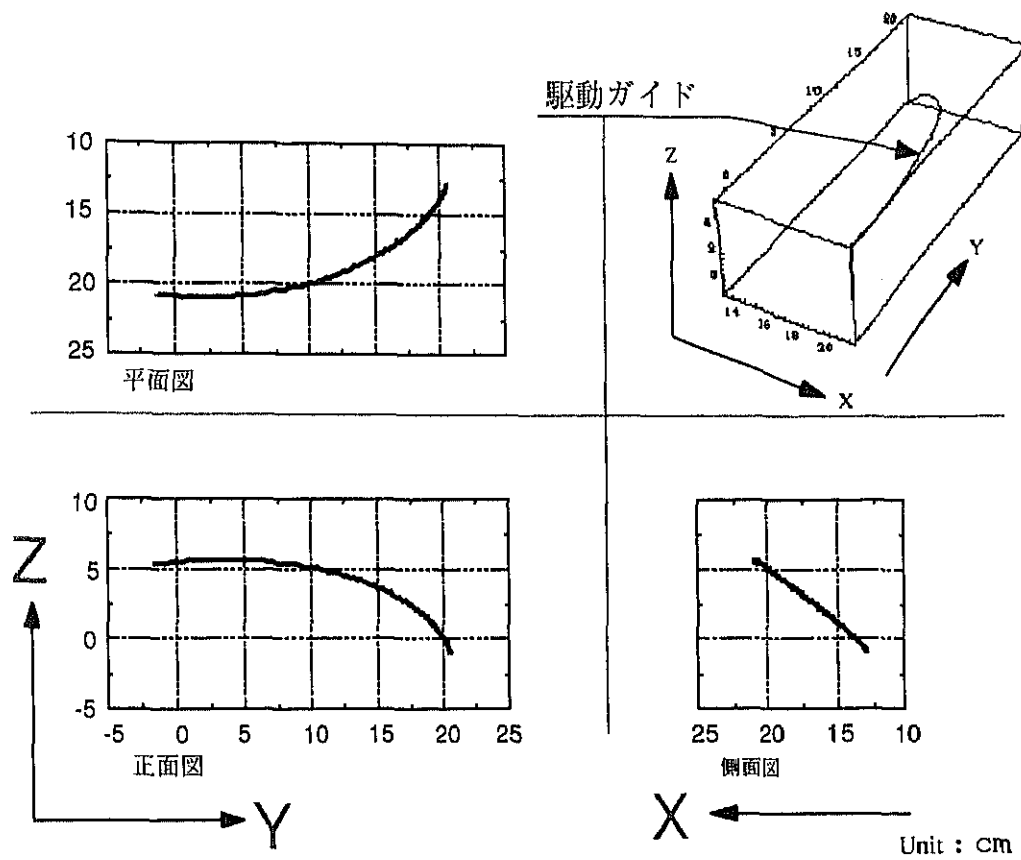


図 5.19 螺旋階段用駆動ガイド 3 面図と鳥瞰図 (円盤半径 15 センチ)

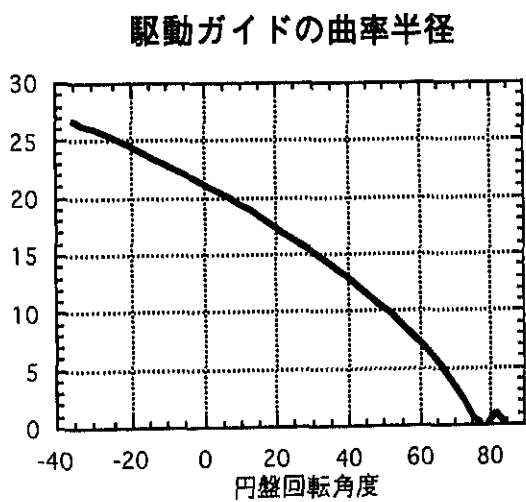


図 5.20 駆動ガイドの曲率半径



図 5.21 螺旋階段用駆動ガイド

1 (エル) を円盤の半径とすると, y_4 軸上のローラ位置 (0, 1, 0) の基準座標系上での位置は, 次式で計算される.

$${}^0P_4 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 (0, 1, 0, 1)^T$$

設計された駆動ガイド形状の3面図と鳥瞰図を図 5.19 に示す. これは直線階段対応の場合と同じく, 円盤半径 15cm, ローラ個数 4 個の場合である. 図 5.20 は, 円盤の回転の各位置における曲率半径の変化を示したものである. 直線階段対応の場合と同じく, 駆動ガイド始点 (円盤回転角度 0 度近辺) 付近は曲率半径が大きい, 駆動ガイド終点 (90 度近辺) に近づくにつれて曲率半径が 0 になっている. 直線階段対応の場合と同じく, 半径 1cm のパイプを用いる今回の試作では円盤回転角度 70 度以上に対応したところは曲げられないことになる. そこで本試作では駆動ガイドは, 円盤回転角度 -20 度 ~ 70 度に対応した形状を用いた.

図 5.21 は円柱に取り付けられたパイプで試作された駆動ガイドである. 図 5.22 は

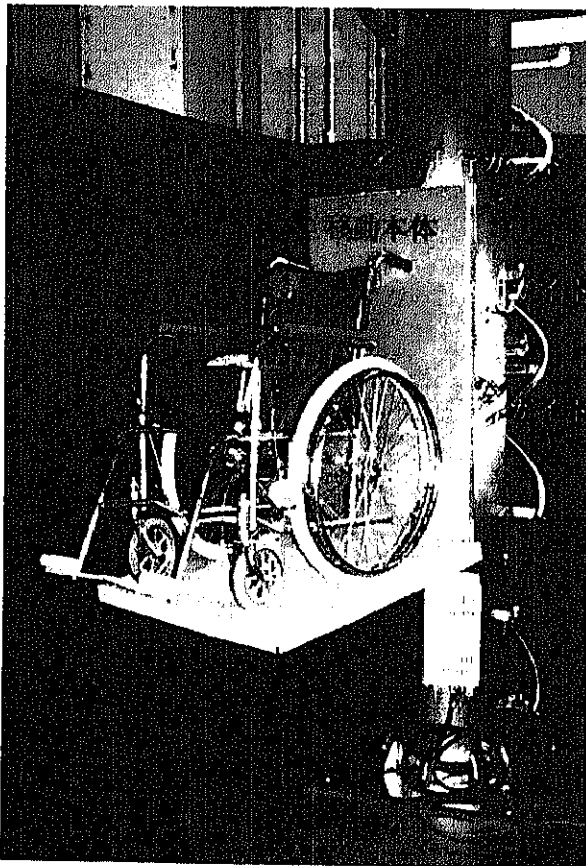


図 5.22 螺旋階段対応クローラ型階段昇降機プロトタイプ (移動本体は直線用と同じ)

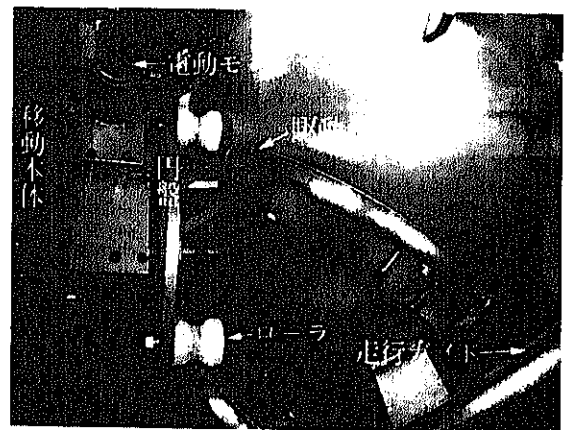


図 5.23 円盤, ローラと駆動ガイドの関係 (図 5.22 を後ろから見た図)

直線階段用に試作された移動本体を螺旋階段に取り付けたところを示している。直線階段の時は走行ローラを上下それぞれに2組用いたが、螺旋の場合は垂直軸周りに姿勢が常に変化する必要があるため、走行ローラは上下一組とした。図 5.23 は、図 5.22 を背面から見たもので、電動モータ、円盤、駆動ガイド、走行ガイド、移動本体の位置関係を示している。

5.5 駆動ガイドの設計方針

直線階段、曲線階段ともに駆動ガイドからの反力をローラに効率的に伝達するために、駆動ガイドの中心軸はローラと直交しなければならない。そのために、円盤面から見た直交条件（図 5.24(1)）と、円盤側面から見た直交条件（図 5.24(2)）が必要

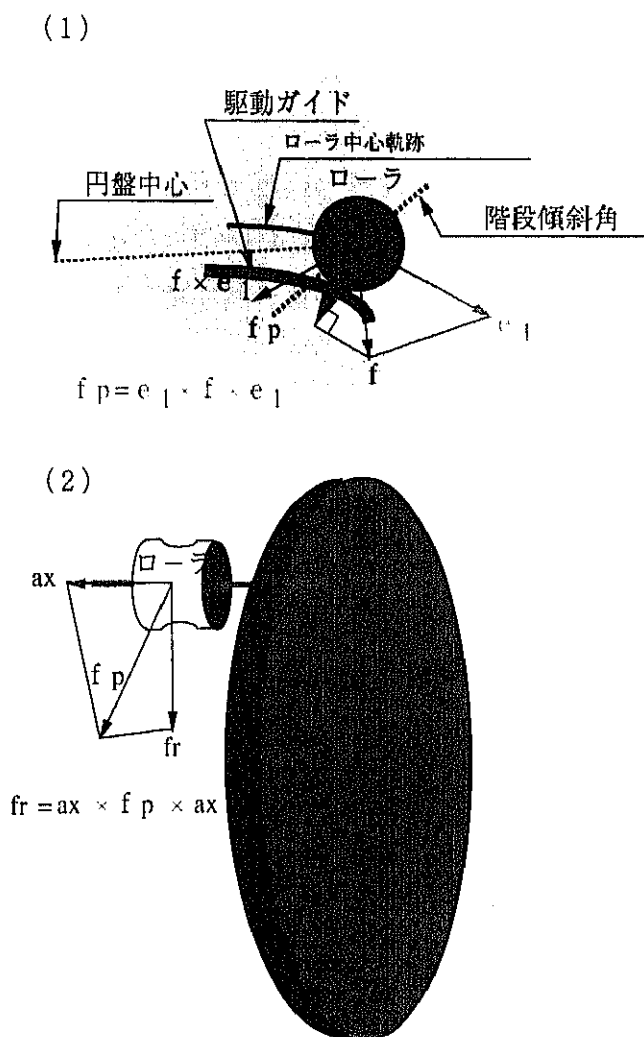


図 5.24 ローラ中心軌跡から駆動ガイドの中心軌跡を計算するための直交条件

である。ローラ中心の描く軌跡の接線ベクトル e_1 と、ローラが駆動ガイドに与える力ベクトル f から計算する。そのベクトルは、 e_1 に垂直で、かつ e_1 と f の張る平面上になければならないから、ベクトル3重積 $e_1 \times f \times e_1$ で表される。ここでこれをベクトル f_p と表す。

円盤側面から見た直交条件は、いま求めたベクトル f_p とローラの軸ベクトル a_x から計算する。そのベクトルは、 a_x に垂直で、かつ a_x と f_p の張る平面上になければならないから、同じくベクトル3重積で表され、 $a_x \times f_p \times a_x$ となる。このベクトルを f_r と表す。この2つの直交条件から求めたベクトル f_r の方向に中心軸がくるようにローラとパイプの肉厚を考慮して駆動ガイドを設計すれば、ローラは駆動ガイドから効率良く反力を得ることができる。

5.6 駆動ガイドの加工の確認

プロトタイプに用いた駆動ガイドは、直径 21.4mm 肉厚 1.4mm のステンレスパイプを、計算で求めたパイプ中心の座標を参考としてマルチベンダーで曲げ加工された。パイプが設計値通りに加工されたか確認する必要がある。確認手法として、3次元計測器で計測する手法と、駆動ガイド形状に削られたゲージによる手法がある。後半の方法は第7章で述べる折返し階段昇降機の実証機製作時に用いた方法なのでそこで詳

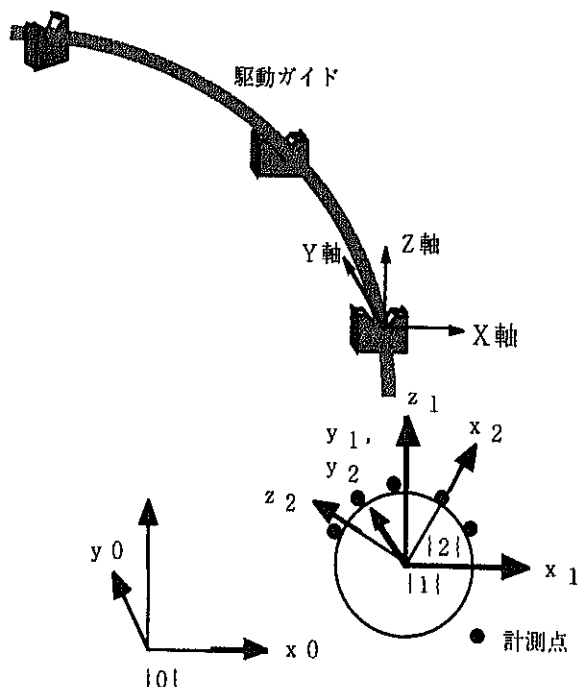


図 5.25 駆動ガイドの3次元計測手法

述する。

ここでは前半の方法について述べる。加工前の真直ぐなパイプの軸方向 1 cm 毎に軸に垂直な面とパイプ外周との交線を罫書いた計測用パイプを駆動ガイドと同じ条件で曲げ加工し、それを 3次元計測器で計測した。パイプは中心軸に垂直な円を中心軸に沿って連続して描いたものであると仮定する。また、駆動ガイドでは曲率半径の小さいところは使用しないために、加工前に罫書いた円はマルチベンダで曲げた後も円の中心軸に垂直と仮定する。

駆動ガイドと同じ条件で曲げられた計測用パイプは定盤上に図 5.25 のように置かれ、軸に沿って罫書かれた 1つの円周ごとに 5 点の位置が計測された。3次元計測器の構造上、その 5 点は図に示されるようにパイプ上半面にとられた。パイプ中心座標位置を計算で求めるために、3つの座標系を定義する。座標系 {0} は基準座標系である。座標系 {1} は、円 (パイプ) の中心に原点を有し、軸方向に y₁ 軸を有する座標系である。座標系 {2} は、座標系 {1} と同じ原点と y 軸を有し、円周上の計測点方向に x 軸をとった座標系である。座標系 {0} を基準とし、座標系 {1} への同次変換行列を 0T_1 とすると、次式で表現される。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & x \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & y \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

座標系 {1} を基準とし、座標系 {2} への同次変換行列を 1T_2 とすると、次式で表現される。

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 θ は y 軸周りの回転角である。座標系 {2} における計測点は全て定ベクトル {11.3, 0, 0} で表される。ここで、11.3 は mm 単位で表したパイプの半径である。基準座標系 {0} におけるこの位置は次式で表される。

$${}^0T_1 \cdot {}^1T_2[\theta].pos$$

ここで、pos は先の定ベクトルである。この計算値と計測点実測値の誤差は、 $f[n] = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2[\theta].pos - surfacem[n]$ で表される。Surfacem[n] は計測された座標値である。同様の手法で、1つの円周につき、f [1] ~ f [5] の 5 つの式が得られる。拘

束条件は、 0T の左上 3×3 行列が回転行列という条件であり、次式で表される。

$$\text{cond1} = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1$$

$$\text{cond2} = \beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1$$

$$\text{cond3} = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1$$

$$\text{cond4} = \alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2 + \alpha_3\beta_3 = 0$$

$$\text{cond5} = \beta_1\gamma_1 + \beta_2\gamma_2 + \beta_3\gamma_3 = 0$$

$$\text{cond6} = \gamma_1\alpha_1 + \gamma_2\alpha_2 + \gamma_3\alpha_3 = 0$$

変数 cond1~cond6 の二乗和の最小値を計算することにより、 0T 、 1T が求められる。全ての計算において初期値は次の組み合わせを用いた。

$$\{x, y, z\} \rightarrow \{0, 0, 0\}$$

$$\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} \rightarrow \{1, 0, 0\}$$

$$\{\beta_1, \beta_2, \beta_3\} \rightarrow \{0, 1, 0\}$$

$$\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} \rightarrow \{0, 0, 1\}$$

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\} \rightarrow \{0, 0.5\text{rad}, 1.0\text{rad}, 1.5\text{rad}\}$$

上記方法で計算された 0T 、 1T を用いて、基準座標系上で再生された駆動ガイド中心（座標系 {2} の原点を連ねたもの）、軸方向ベクトル（ y_2 軸）とそれと垂直なベクトル（ x_2 軸）の鳥瞰図を図 5.26 に示す。その平面図を図 5.27 に示す。図 5.25 に示す座標系を用いたので、再生された駆動ガイドは z 軸方向には変化の少ない略 x - y 平面上の曲線として得られた。

3次元計測器で計測する際、計測用パイプは無造作にもっとも安定な状態で定盤

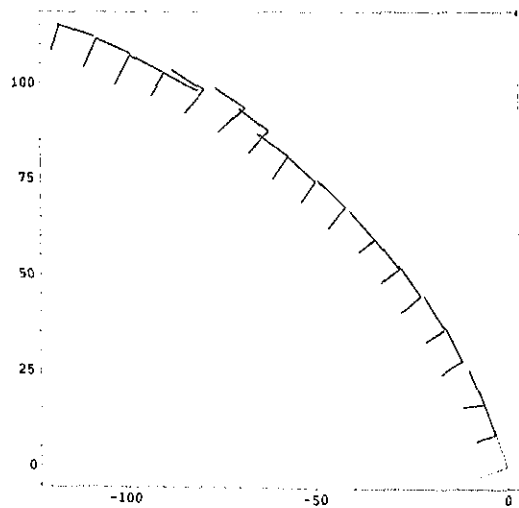
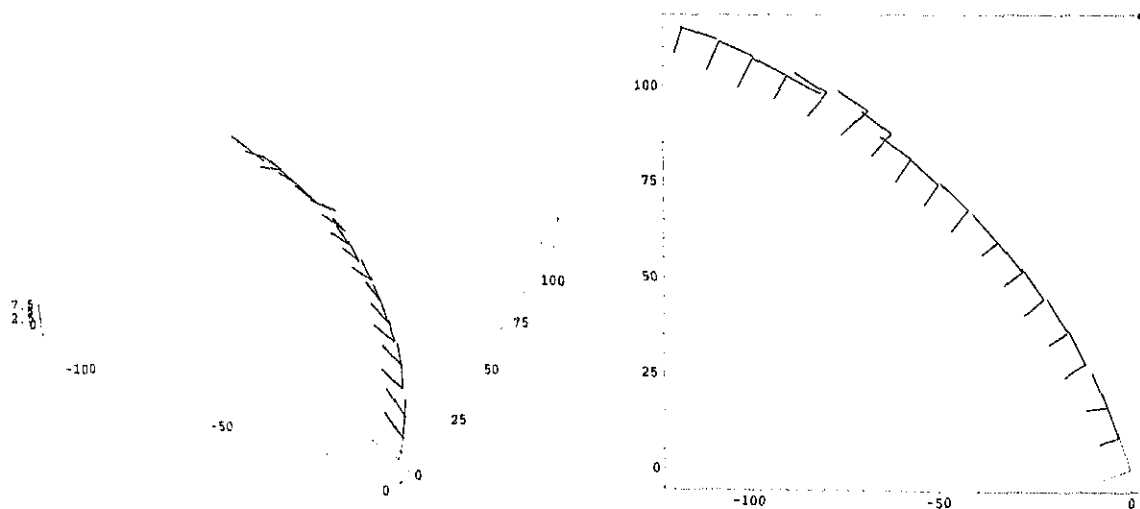


図 5.26 再生された駆動ガイド（鳥瞰図） 図 5.27 再生された駆動ガイド（平面図）

の上に置かれた。また両端には機械が把持した直線部があり、駆動ガイドとして使うべき正味の部分は目分量で決定するため（7章で述べるゲージを使う方法ではこの部分が正確に決定できる）、曲線の形が設計と余り外れていないことで満足する。クローラ型移動機構は、設計通りの厳密な曲線でなくても動作が保証されるのが特徴である。再生された曲線と設計値による曲線の比較を次に示す。

計測された駆動ガイド中心の x 座標に対する y, z 座標グラフを図 5.25 の計測座標系で表示したものが図 5.30 である。曲線の始点と終点を結んだ直線は横軸 (x 軸) から約 45 度傾斜している。設計駆動ガイド曲線を図 5.30 と同じ座標系で表現するために次の一連の座標変換を行う。

図 5.25 の計測に用いた座標系を計測座標系 {0} とし、駆動ガイドの設計を行う座標系を {1} とする。パイプを図 5.28 に示すように、一端 (始点) を座標系 1 の原点におき、他の端点 (終点) の位置ベクトルを 1p_e とする。始点から終点に向かうベクトルから次式で座標系 {2} の y 軸単位ベクトルを生成する。

$$\frac{{}^1p_e - {}^1p_0}{|{}^1p_e - {}^1p_0|} = y_2$$

始点とパイプ中点 (1p_m) を結ぶベクトルと y_2 ベクトルの外積から z_2 ベクトルを定義する。

$$\frac{{}^1p_m - {}^1p_0}{|{}^1p_m - {}^1p_0|} \times y_2 = z_2$$

y_2, z_2 ベクトルから右手系を用いて次式で x_2 ベクトルを定義する。

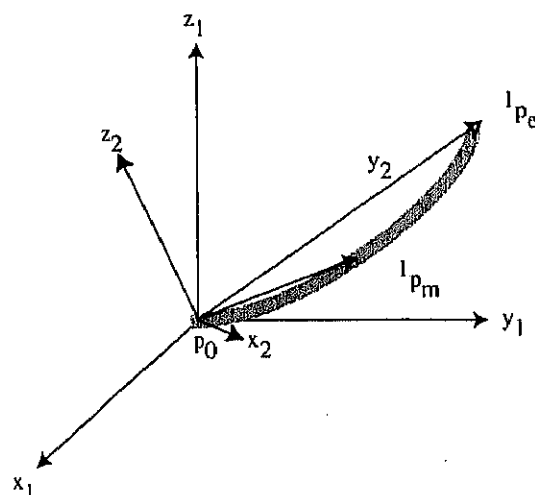


図 5.28 駆動ガイドの設計値を実測値と比較するための変換座標系

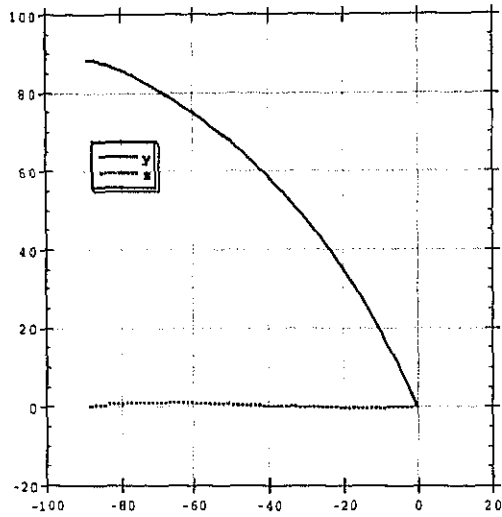


図 5.29 計測座標系で表現された駆動ガイド設計値

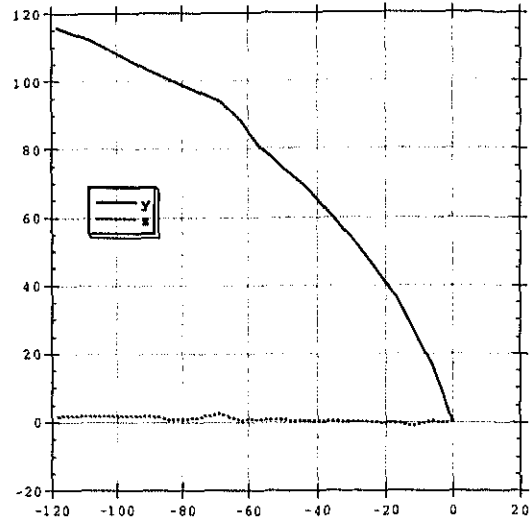


図 5.30 計測座標系で表現された試作駆動ガイド

$$y_2 \times z_2 = x_2$$

座標系 {1} , {2} の間の同次変換行列は次式で表される.

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} x_{2x} & y_{2x} & z_{2x} & 0 \\ x_{2y} & y_{2y} & z_{2y} & 0 \\ x_{2z} & y_{2z} & z_{2z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

座標系 {1} で表現された駆動ガイドの座標値は、次式で座標系 {2} における座標値に変換される.

$${}^2p = ({}^1_2T)^{-1} p$$

座標系 {2} では、駆動ガイドは x_2, y_2 平面上に置かれ、さらに始点終点を y_2 軸に一致させたものとして表現された。図 5.30 と同じ座標系とするために、さらに z 軸周りに -45 度回転させた計測座標系 {0} で見たものが図 5.29 である。図 5.29 と図 5.30 は極めて近い形であることがわかる。これから曲げ加工は正確に行われていることが確認された。

5.7 取付け精度高度化のための手法の検討

これまで、駆動ガイドはパイプを所定の形状に曲げて両端を切断し、支持具だけで壁面に取り付けてきた。支持具の基準となる位置の計測が面倒なため、駆動ガイド

の壁面への取り付けは容易ではなかった。そこで、施工の簡易化および審美的観点から駆動ガイドの一体化が望まれた。これには3つのアイデアがある。1つは、既製の円弧管を利用する方法、2つ目は両端を滑らかに壁面まで導く方法、最後はパイプの替りに一枚の板をプレスする方法である。最初の方法は、駆動ガイドの両端で4個の円弧管を正確な角度で保持して溶接する必要がある。2つ目の方法は終端でもパイプ形成は可能であるが、円盤との接触問題があり今後詰めなければならない。最後の方法は、一枚の板を丸くすることによってデザイン的にも受け入れられるもっとも現実的方法と思われる。理論式で検討するような要素は含んでいないのでここでは割愛するが、第6章で述べる一般家庭の急峻な階段に適用する方向で現在企業において設計を進めている。

以上の議論では、鼓型ローラを用いてきた。しかし、駆動ガイド終端ではローラは軸方向に移動するため、軸先の鼓型がガイドに乗り上げて所定の軌跡から外れる恐れがあり、慎重な調整が必要であった。そこで、ローラ軸を若干傾けることによってこの問題が解決できることをシミュレーションで示す。この方法も工数を増加させるため解析のみに留め、実際は鼓型の一端を切除することによって上記現象の発生を縮小している。

5.7.1 駆動ガイド両端の処理—一端に2本の円弧管を利用する方法—

駆動ガイドを一体化し、壁との接続を容易にする円弧管利用方法について述べる。一体化された駆動ガイドの一端が壁面に直交する必要がある。その直交を実現するために駆動ガイドと壁面に間に2本の同じ円弧角の円弧管を接続する。円弧管は姿勢合わせのために用い、壁面からの距離調整は直管で行う。下記に述べる方法で決定した円弧角を有するものを接続管と名付ける。円弧角、接続管同士の接続角度、駆動ガイドとの接続角の計算について次に述べる。

座標系を図5.31に示す。接続管1の一端に座標系1を固定し、基準座標系0の z 軸周りに θ_1 回転することができる。座標系1を円弧の中心周りに θ_3 回転した座標系を座標系2とし、接続管2の一端に固定する。接続管1の終端は接続管2の一端に接続される。座標系2を円弧の中心周りに θ_3 回転した座標系を座標系3とし、接続管2の終端に接続する。変数は θ_1 、 θ_2 、 θ_3 の3変数である。円弧角は θ_3 、接続管同士の接続角度は θ_2 、駆動ガイドとの接続角は θ_1 である。 θ_1 に伴う座標変換は次式で表される。

$$T_z[\theta_1] = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

接続管 2 と接する接続管 1 の位置を求める座標変換は次式で表される。

$$T_x[\theta_3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & -a(1-\cos\theta_3) \\ 0 & \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & a\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 a は接続管の曲率半径である。接続管 2 の回転による座標変換は次式で表される。

$$T_z[\theta_2] = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

最終的に座標系 3 の基準座標系に対する同次変換行列は次式で表される。

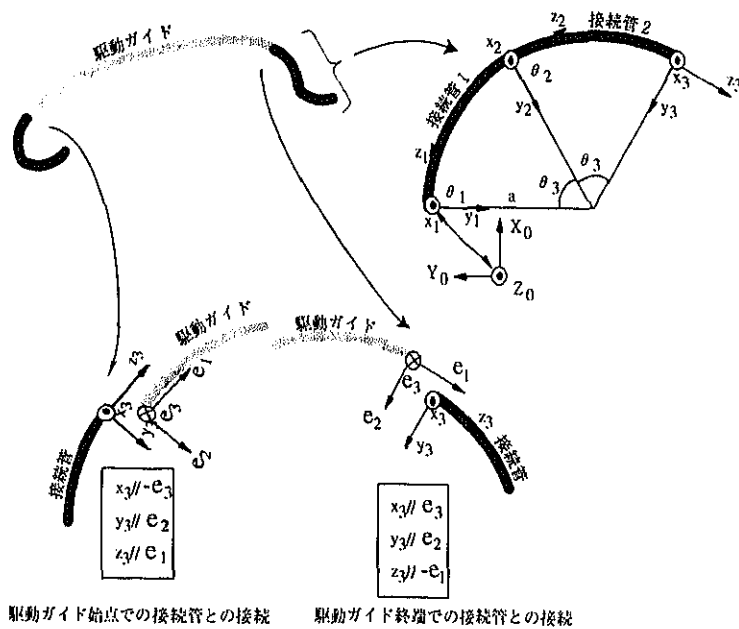


図 5.31 駆動ガイドと取付治具の一体化の 1 つの方法

$${}^0T_3 = T_z[\theta_1]T_x[\theta_3]T_z[\theta_2]T_x[\theta_3]$$

$$= \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

一方、階段の基準座標系上における駆動ガイド始点の接線、主法線、従法線各単位ベクトル（これらをフレネルの標構という）は既知である。例えば以下のように与えられる。

$$\text{接線ベクトル} = \{0.0125867, 0.965849, -0.258799\};$$

$$\text{主法線ベクトル} = \{0.375763, -0.244417, -0.893903\};$$

$$\text{従法線ベクトル} = \{-0.92663, -0.0859957, -0.366007\};$$

接続管の先端の座標系と駆動ガイド始点におけるフレネルの標構との関係は、図 5.31 より $\{x_3, y_3, z_3\} = \{-e_3, e_2, e_1\}$ である。先に求めた同次変換行列のうち、3つの回転角を全て含み、式が簡単な3成分として次の3成分を選び、対応するフレネルの標構の成分を等しいとおいて、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を計算する。

$$t_{21} = \cos[\theta_2] \sin[\theta_1] + \cos[\theta_1] \cos[\theta_3] \sin[\theta_2] = -e_3 \quad [2]$$

$$t_{31} = -\sin[\theta_2] \sin[\theta_3] = -e_3 \quad [3]$$

$$t_{32} = -\cos[\theta_3] \sin[\theta_3] - \cos[\theta_2] \cos[\theta_3] \sin[\theta_3] = e_2 \quad [3]$$

この計算によって、接続管の各回転角の候補が次のように求まる。次の行列はこの回転角から求まる同次変換行列で、4列目を接続管の壁への取付け点の計算に用いる。

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} = \{-82.9266, 82.5066, -69.1655\}$$

$$\begin{bmatrix} 0.92663 & 0.375763 & 0.0125864 & -1.18849 a \\ 0.0859957 & -0.244417 & 0.96585 & -0.824552 a \\ 0.366007 & -0.893903 & -0.258798 & 1.45727 a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} = \{-82.9266, -82.5066, 110.8345\}$$

$$\begin{bmatrix} 0.92663 & 0.375763 & 0.0125864 & 0.436965 a \\ 0.0859957 & -0.244417 & 0.96585 & 1.0671 a \\ 0.366007 & -0.893903 & -0.258798 & 2.31531 a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

接続管として適当かどうかは、接続管の壁への取付け位置が接続管端点より壁側にあったほうがよい。すなわち、座標系 1 の原点の x 座標が正であればそのまま用いられるが、負の場合は直管によって壁面から絶対値分外側に出さなければならず都合が悪い。上の場合では 2 番目が適正な値である。

駆動ガイド終点におけるフレネルの標構と接続管の先端の座標系との関係は $\{x_3, y_3, z_3\} = \{e_3, e_2, -e_1\}$ である。フレネルの標構として下記の値を用いて、再び同様の計算をする。

$$\text{接線ベクトル} = \{0.814518, 0.43109, -0.388229\}$$

$$\text{主法線ベクトル} = \{0.57577, -0.518734, 0.631984\}$$

$$\text{従法線ベクトル} = \{0.0710548, -0.738293, -0.670727\}$$

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} = \{130.9594, 4.27513, -72.3951\}$$

$$\begin{bmatrix} 0.0710545 & 0.57577 & -0.814518 & -0.578422 a \\ -0.738293 & -0.518734 & -0.43109 & 1.23 a \\ -0.670727 & 0.631984 & 0.388229 & -1.33766 a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} = \{130.9594, -4.27513, 107.6049\}$$

$$\begin{bmatrix} 0.0710545 & 0.57577 & -0.814518 & -0.573118 a \\ -0.738293 & -0.518734 & -0.43109 & 1.11851 a \\ -0.670727 & 0.631984 & 0.388229 & -1.43666 a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第 4 列目の x 座標が共に僅かに負なので、駆動ガイド全体を x 軸正方向に移動すればよい。この解析により、駆動ガイド両端点において円弧管を 2 個用いた接続管を適当に組み合わせれば、壁面に直接接続可能な駆動ガイドを構成することができる。

5.7.2 駆動ガイド両端の処理ーベジエー曲線による方法ー

ここでは駆動ガイドの両端を延長して 1 本のパイプによって壁面に取り付ける方法を考察する。そのパイプの構成を図 5.32 のように考える。すなわち、パイプの両端は直角エルボで構成され、駆動ガイドと直角エルボを滑らかな接続部で連結するものとする。直角エルボは壁面に垂直に取り付けられ、鉛直方向に直角に曲げられるものとする。駆動ガイドを滑らかに接続するように接続部の形状と直角エルボの長さをも

設計するのがここでの課題である。接続部の全ての点において曲率半径がパイプの曲げ加工の限界であるパイプ半径の3倍以上になるようにしなければならない。ここでは曲線として2次元平面内のベジエー曲線を使用する。

2点間 (P_i, P_{i+1}) をベジエー曲線で結ぶ場合、制御点を2つ $(P_{i,1}, P_{i,2})$ 設けるとその曲線は以下の式で表現される。

$$R_t = (1-t^3)P_i + 3t(1-t)^2P_{i,1} + 3t^2(1-t)P_{i,2} + t^3P_{i+1} \quad (0 \leq t \leq 1)$$

ここで P_0 、 P_1 を駆動ガイドの両端点、 P_{00} 、 P_{11} をエルボの両端点とし、 P_0 、 P_{00} 間および P_1 、 P_{11} 間のそれぞれの2点間に適切な2つの制御点を設定する。制御点については先に述べたように駆動ガイドに用いられているパイプの曲げ加工限界値である曲率半径約 35mm 以上になるように設定しなければならない。また、全体をコンパクトにし、2点間をつないだ後の曲線が複雑にならないよう曲率が全体に渡ってほぼ等しくなるよう考慮する。

以上の点を考慮し、各制御点の位置を決める。図 5.33 にその様子を示す。まず、1つめの制御点 $P_{i,1}$ は駆動ガイド端点 P_i での接線ベクトル e_i の延長線上に設定する。2つめの制御点はエルボ端点 P_{ii} の Z 軸方向に $P_{i,2}$ を設ける。ここで、エルボ端点は、 P_i 、 $P_{i,1}$ 、 P_{ii} 、 $P_{i,2}$ が同一平面を構成し、駆動ガイドとエルボとのつながりが滑らかな2次元平面内の曲線となるように選ばれる。

駆動ガイドの端点 P_0 側でエルボ端点と制御点は A~D を変数として次式で表現される。

$$P_{00} = P_0 + A \times e_0 + B \times (0, 0, 1)$$

$$P_{0,1} = P_0 + C \times e_0$$

$$P_{0,2} = P_{00} + D \times (0, 0, 1)$$

同じく駆動ガイドの端点 P_1 側では E~H を変数として次式で表現される。

$$P_{11} = P_1 + E \times e_1 + F \times (0, 0, 1)$$

$$P_{1,1} = P_1 + G \times e_1$$

$$P_{1,2} = P_{11} + H \times (0, 0, 1)$$

ローラ4個を用いた階段傾斜角 30° の直線階段用駆動ガイドを例にとると、円盤回転角 -30° 及び 70° に対応する駆動ガイドの両端点での接線ベクトルは $e_0 = (-0.0664, 0.9978, -0.0061)$ 、 $e_1 = (0.6799, 0.5349, -0.5015)$ となる。

まず、ローラ回転角 -30° に対応する駆動ガイド端点 P_0 においては駆動ガイドの接線ベクトルが水平方向になっているため、接続部のベジエー曲線が加工限界の曲率半径

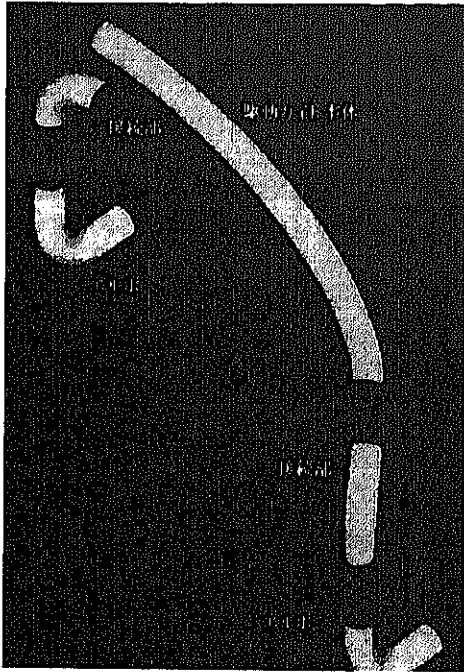


図 5.32 駆動ガイドのユニット化

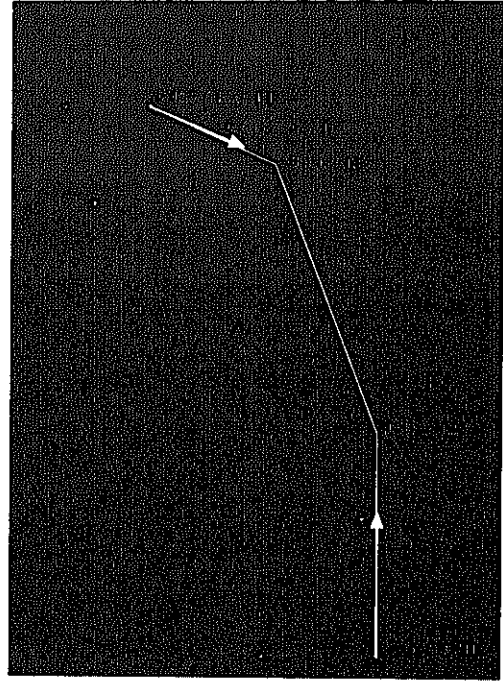


図 5.33 駆動ガイド端点とエルボ端点間の制御点とベジェー曲線

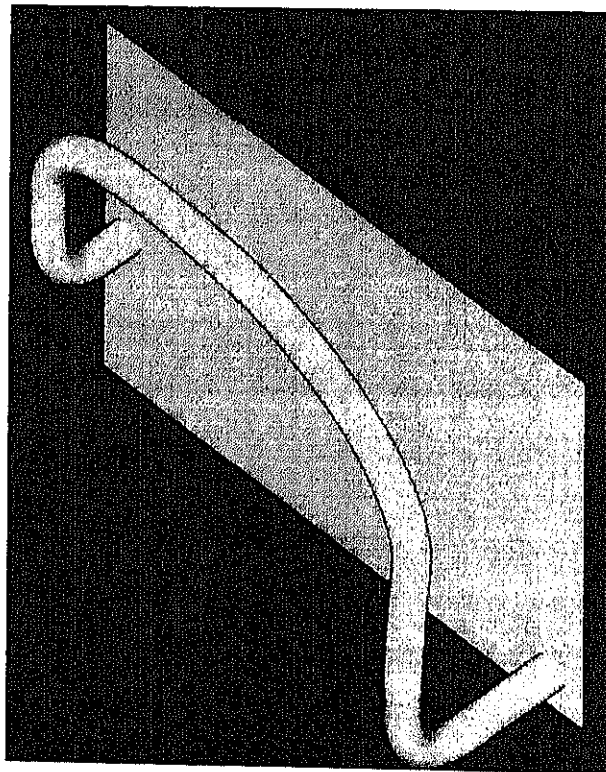


図 5.34 ローラ個数 4 個，階段傾斜角 30 度の場合の駆動ガイドを曲げ加工だけで製作した場合の例

以上で 1/4 の円弧に近い曲線となるようにするには変数値がかなり限定される。例えば次の値を用いると上記の条件は満たされている。

$$A=-4 : B=-4 : C=-2.2 : D=2.2$$

よって P_0 端点での各点は以下の式で表される。

$$P_{0,0} = P_0 - 4 \times e_0 - 4 \times (0,0,1)$$

$$P_{0,1} = P_0 - 2.2 \times e_0$$

$$P_{0,2} = P_{0,0} + 2.2 \times (0,0,1)$$

ローラ回転角 70° の端点 P_1 では、Z 軸下向き方向の接線ベクトルとなるため、比較的容易に大きな曲率のベジェ曲線を描くことができる。各点を表す変数は以下の値とした。

$$A=4 : B=-3 : C=2 : D=2$$

この位置 P_1 での各点は以下の式で表される。

$$P_{1,1} = P_1 + 4 \times e_1 - 3 \times (0,0,1)$$

$$P_{1,2} = P_1 + 2 \times e_1$$

$$P_{1,3} = P_{1,1} + 2 \times (0,0,1)$$

以上の制御点を用いて算出したベジェ曲線の曲率半径は、 -30° 側接続部においては 39~41mm の範囲に収まり、 70° 側接続部においては 51~76mm の範囲となりともに曲げ加工条件をクリアしている。この方法でユニット化された駆動ガイドの 3 次元図を図 5.34 に示す。

5.7.3 ローラ軸の傾斜による改善

駆動ガイド終端部においては、ローラは駆動ガイド進行方向よりは壁から離れる方向へ予想以上に大きく動き、ローラの側面が駆動ガイドに及ぼす力が移動本体の左右動を引き起こしている。これはローラの一方向の端面を削り落とせば解決できるが、鼓型を維持するにはローラ軸を傾斜させればよい。

図 5.35 はローラ軸を傾斜させる方法の有効性をシミュレーションで示している。図 5.35 上はローラ軸が円盤面に垂直なローラ両側面（円）、ローラ中心軌跡、駆動ガイド上面を円盤の 20 度回転ごとに示したものである。左が鳥瞰図、右が正面図である。ローラ軸は駆動ガイドに対してかなり傾斜している。正面図を見ると駆動ガイド終端部においてローラの下面が駆動ガイドの上面と干渉しているのが分かる。図 5.35 下はローラ軸を円周方向外側に 19.4 度傾斜させたときのものである。ローラ軸と駆動ガイドがほぼ直交しているのが分かる。また、正面図を見ると駆動ガイド終端部

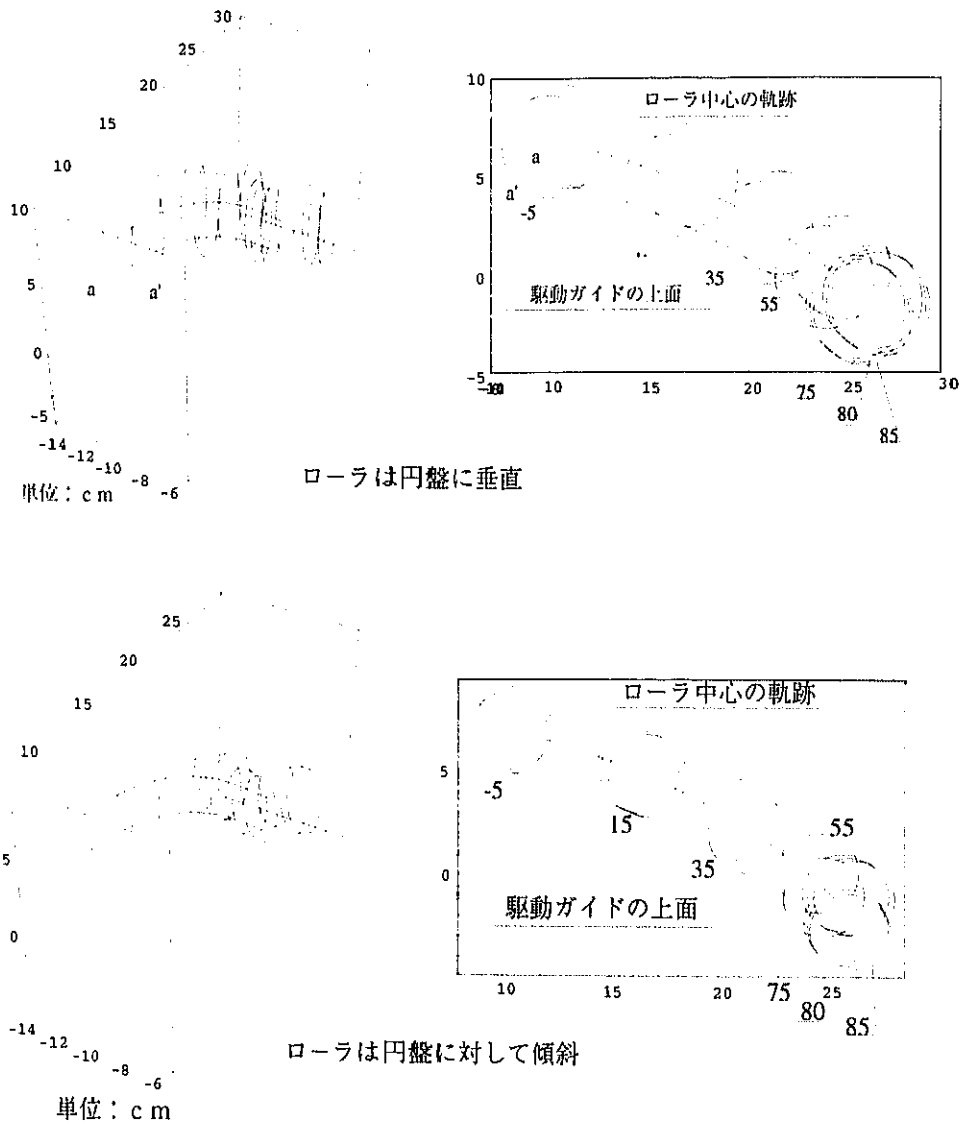


図 5.35 ローラ軸を円盤に対して傾斜させたときの効果

においてローラの下面と駆動ガイド上面の干渉は極めて小さくなっている。

5.8 本章のまとめ

駆動ガイドを円柱に近づけるため、円盤を上昇進行方向に傾斜させる傾斜円盤を用いたクローラ型移動機構について述べた。駆動ガイドの解析を中心として述べ、それに基づいて階段昇降機プロトタイプを2台試作し、静寂性など様々な特長を確認した。

5.3 節では傾斜円盤を用いた直線階段対応に関して述べた。駆動ガイド設計のための微分幾何学と、その設計に基づいて試作されたプロトタイプを示した。5.4 節では傾斜円盤を用いた螺旋階段対応に関して述べた。前節と同じく駆動ガイド設計のための微分幾何学と、その設計に基づいて試作されたプロトタイプを示した。走行ガイドへの取り付けを上下一対の摺動自在部材に変更しただけで、前節と全く同じ移動本体を用いて螺旋階段を昇降できることを示した。5.5 節では駆動ガイドの設計手法の詳細を述べた。2回の射影ベクトルを用いて駆動ガイドを設計できることを示した。最初は軌道接線ベクトルに関する反力ベクトルの射影、2回目はローラ軸ベクトルに関する先に求めた射影ベクトルの射影である。5.6 節では駆動ガイドが設計値通りに加工されたか、その形状の計測手法について述べた。加工されたパイプ表面を3次元的に計測することによってパイプ中心の座標値を求め、設計値通りに加工されていることを確認した。5.7 節では実用化を考慮したとき工数を減らすために駆動ガイドの一体化について述べた。その手法として駆動ガイドの両端に円弧管を用いる方式と、同じく両端をベジエー曲線で延長し一体化する手法を述べた。駆動ガイド終端部で起こりやすいローラとの干渉の逃れ方についてはローラ軸を円盤垂直方向から円周方向外側に約20度傾斜させれば、干渉はかなり改善できることを示した。