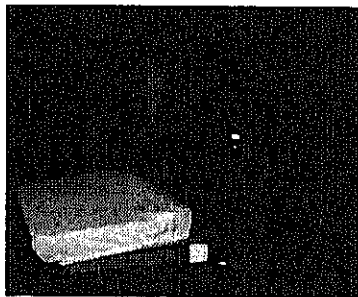


## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

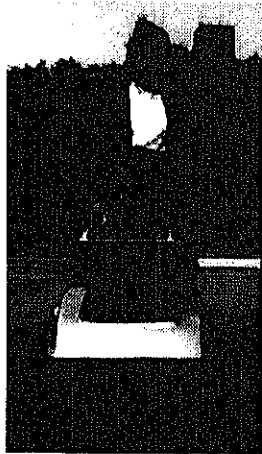
来る21世紀前半には多くの先進諸国において超高齢社会の到来が確実視されている。これに加えて、日本においては少子化が顕著であり、このような少子高齢社会において活力ある社会を維持発展させていくために、社会的及び技術的対策がとるべき緊急課題となっている。日本は他の先進諸国に比べて高齢化のスピードが特に速いために、社会インフラの整備の手遅れが顕著で、欧米先進諸国に比べて高齢社会に伴う問題をより深刻なものとしている。少子高齢化が進む中で、人間が人間を介護するという従来のやり方を福祉全分野にわたって維持するのは、早晚破綻を来すだろうと



油圧駆動抱き上げマニピュレータ



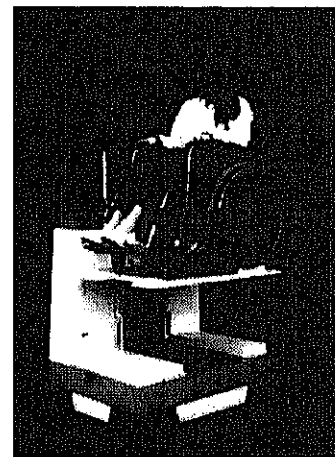
空気圧駆動抱き上げマニピュレータ



盲導犬ロボット



全腕油圧義手



3次元車イス

図 1.1 機械技術研究所で過去研究された福祉機器研究の成果

いわれており、その解決策として福祉分野の一部への機械の導入が真剣に検討されている。

機械技術研究所のロボット研究グループは、ロボット研究が始まった1970年代前半から、ロボットの適用分野として福祉領域を重要分野としてとらえ研究を進めてきた。その研究成果を図1.1に示す。油圧ロータリーサーボアクチュエータを用いた全腕動力義手(図1.1下中)、人間の命令を忠実に実行すると同時に危険が及びそうなときは賢く不服従する機能を備えた3輪移動式盲導犬ロボット(愛称:メルドッグ)(図1.1下左)、全方向移動機構を用いた作業用3次元電動車イス(図1.1下右)、重度心身障害児をベッドから抱き上げ、車イスへの移送を試みた抱き上げマニピュレータ(愛称:メルコング)(図1.1上左右)など、極めて先進的な研究が行われた。

このような研究は、当初、マスコミ、ロボット研究者などには注目されたが、適用分野である医療・福祉の現場においては、身障者・高齢者に対しては人間による直接接点以外には受け入れられないという頑迷な人間至上主義、根強い機械不信のために臨床実験すら困難であった。しかし、先輩諸氏の努力と高齢社会の顕在化によって、最近では、排泄、入浴など使用場面においては身障者・高齢者自身のプライバシー保護のために、機械を用いるほうが望ましいというコンセンサスが得られつつある。

作業する機械、特に産業用ロボットは、常に人間から隔離されたところで活躍していたが、福祉分野で機械が活躍するには人間の生活空間に入り込む必要があり、機械と人間の物理的な共存が新たな課題として取り上げられている。この問題はこの数年ロボット関連学会においても話題として取り上げられ始めたばかりであり、解決は今後の研究を待たなければならない。一方、使用する側から機械化でもっとも期待されるのは、スピード化と重量物のハンドリングであるが、現在の機械・人間共存技術ではこれらの期待に応えることはできない。現実に福祉機器として提供されるものは、スピードが遅く、力が弱く、その割には自重が重たく、価格が高いものが多い。要求される機能をブレークダウンし、適性技術を適用し、価格を積み上げていくと、ユーザが望むものとはほど遠いものになってしまうのが現状である。ユーザ側と開発側の間に存在するこのギャップを埋めるためには、福祉機器開発は最終ユーザである身障者・高齢者、中間ユーザである福祉分野従事者を含むグループにおいて行う必要がある。共に開発に携わる環境において、製作者側はユーザの真のニーズを把握し、ユーザ側は技術と価格の現状を認識することによって、ニーズとシーズのマッチングした福祉機器開発が可能となる。

福祉分野で早急に解決すべき課題は、排泄、入浴と移動である。排泄は、健康・

命に直接かかわる重大な課題であり、恥辱心を伴うプライバシーにもかかわるため早急な解決が求められている。入浴は毎日対処しなくとも命にかかわることはないが、やはり抱きかかえられる人間の重量、プライバシーなど排泄と同じ問題が存在している。このように排泄・入浴という場面においては、人間という重量物を優しく抱き上げ、搬送し、然るべき姿勢に保持するシステムの開発が必要であるが、そのようなシステムを小型軽量で実現するには今後とも試行錯誤を伴う長い研究開発期間を要するものと思われる。

社会設備に多く見られる階段・段差は、車イス利用者の移動の大きな障害となっており、彼らの社会参加を妨げる大きな要因となっている。一方、利用される側、すなわちエレベータなど昇降機械のない駅など公共施設における従業員にとっては、数人掛けでの車イスと利用者の持ち上げ、そのための人集め、重労働にともなう腰痛・怪我の危険性が常に存在する。このように階段・段差に伴う人間の移動においては、利用する側される側双方にとって早急な技術的解決が望まれている。

## 1.2 本研究の目的

上記述べたように、福祉分野において早急に解決が望まれている課題は、排泄、入浴、移動に関するものである。排泄、入浴問題において、トイレ、浴室までの移動は重要な課題であり、重力方向への移動に技術的解決手段を提供することは、排泄、入浴の共通基盤技術に寄与するものである。そのため、本研究では主に階段昇降機に利用するための人間を載せて動くことの出来る鉛直壁面移動機構の研究を目的とした。すなわち、ここで提案し提供する移動機構は、階段昇降機に特化したものではなく、鉛直面内の移動を含む3次元移動を可能とする一般解である。しかし、考察対象とする移動機構は高速移動を必要としないものに限定する。すなわち、高齢者・身障者を移送対象とできる移動機器でもっとも高速と思われる緊急避難用エレベータの降下速度(60m/分)を上限とし、それより低速な移動機構を研究の対象とした。

高齢社会における車椅子利用者の社会参加を促進するためには、彼らにとって障害物となっている段差・階段に対する対策をたてねばならない。駅などの公共建築物には、エレベータ、エスカレータなどが設置されているが、これらの設置には広いスペースを必要とするため、地価の高い東京など大都市では新たに設置することは困難である。また、経済面から見ると、建築物改変に伴う人件費が昇降装置そのものより大きく、手軽に設置できないのが現状である。それらに比べて階段昇降機は、既存の階段に少ない工事費で設置可能なため、比較的手軽な解決手段である。現在、JRで

は自治体の経済的支援を得ながら駅階段に順次設置するようになってきた。しかし、日本においては他の福祉機器同様階段昇降機の開発歴史が浅いために、駆動機構としてラック・ピニオン、チェーン・スプロケットなど従来産業用搬送機器に用いられていた方式が安易に使われている。そのため、振動・騒音に関する対策は一応とられているものの、振動・騒音低減のための移動機構まで踏み込んだ本質的な検討は見当たらない。駅など喧騒な公共施設での使用においては、振動・騒音はさほど問題にはならないが、美術館、コンサートホールなど静寂を必要とする空間においては使用できないのが現状である。また、将来利用の拡大が期待される一般家庭においては、格段の騒音・振動の低減化が求められている。特に木造家屋の多い日本の個人建築物では壁はいわゆる太鼓張りのため、小さな振動でも増幅されやすく、夜間での使用がためられることが多い。

このような現状を鑑み、筆者は従来機構のアッセンブリー上の工夫による振動・騒音低下を図るのではなく、もっと本質的な解決を得るために階段昇降機を具体的なターゲットとしつつも高速を必要としない一般移動機械への適用可能な新規移動機構の開発による問題解決を試みた。本研究は、現状技術ではさまざまな問題を有している重力方向への移動に新たな技術的解決を目指して、移動機構の理論的解析を行い、その解析に基づいて移動機構をハードウェアとして提案し、プロトタイプによってその優位性と実用性を立証したものである。

### 1.3 研究成果の概要

現在市販されている階段昇降機の多くはラック・ピニオン、チェーン・スプロケットを用いて移動本体の駆動力を発生している。これらの駆動方式は、金属同士のトルク伝達部で必ず「滑り」が発生するため騒音・振動が避けられない。ラックの歯とピニオンの歯はピッチ円以外では必ず小さいながらも滑りが発生している。また、経年変化に伴ってその滑りは大きくこそなれ、小さくなることはない。また、チェーン・スプロケット方式においてはチェーンの丸いピンにスプロケットの歯がかみ合うが、ラック・ピニオン以上に滑りが発生しやすい。この滑りは摩擦の原因であり、摩擦は熱、振動、騒音の原因である。

階段昇降機の駆動機構は、運動片の片方が建築物側に固定され、もう一方の運動片が移動体側に固定されるために、最初は適正に調整されていても、長く使用しているうちに固定側と移動体側のガタが大きくなる。このガタは、一般機械に比較して十分ラフな精度が許容される建築構造物に由来するものであるから、先に問題とした「滑

り」以上の振動・騒音の原因となる。建築構造物に伴うこれらガタを吸収し、これらのガタが振動・騒音の原因とならないような機構の開発が必要である。

本研究で開発し提案した方式は、トルク伝達部の一方の運動片が回転中心周りに自由に回転できる円筒形状ローラを採用する方式である。これは、ラック・ピニオン、チェーン・スプロケット方式の相対する2つの運動片のトルク伝達のための接触点が小さなローラで置き換えられたものと見なされる。ラック・ピニオン、チェーン・スプロケット方式において、2つの運動片の回転中心（ラックの場合無限点）は固定されており、この接触点は幾何学的に決まっている。ミクロに見た場合、この接触点の移動においてはピッチ円以外では必ず一方の運動片の滑りが発生する。筆者の提案する上記方式においては円筒形状ローラの中心と他の運動片の位置関係は固定されるが、円筒形状ローラはその位置関係を崩さずに回転できるように運動摩擦以上の摩擦は発生しない。そのため、ガタが発生した場合、ラック・ピニオン、チェーン・スプロケット方式では致命的であっても、筆者の方式では運動が確保されるかぎりガタに伴う振動・騒音の発生は極端に小さいと期待される。本原理の詳細は第3章で述べる。筆者の提案した上記方式をクロール型と命名し、この方式を用いた移動機構をクロール型移動機構と呼ぶことにする。また、階段昇降機など高速移動を本質的に必要としない移動機械におけるローラは高分子材で構成できるために騒音・振動をさらに低減させることが期待される。

クロール型移動機構は、回転円盤の周縁部に等間隔に、かつ円盤面に垂直軸周りに回転自在なローラを設置し、円盤の回転につれてそのローラを駆動ガイドの上を転がるようにして、円盤を回転させる電動モータの回転トルクを移動本体の推進力に利用するものである。したがって、本研究における核は、駆動ガイドの形状設計であった。通常この種の設計は微分幾何学を用いて行われている。すなわち、ローラと駆動ガイドの接点近くの微視的形狀に注目して解析が行われる。しかし、そのようにして設計された駆動ガイドとローラの大域的な位置関係、すなわち接点以外では接触・衝突が起こるかどうかは微分幾何学ではわからない。これら大域的な位置関係は固定された駆動ガイドと、移動するローラのすべての軌跡に関して個別に調べられなければならない。駆動機構として実現するには、駆動ガイドと、円盤ないしローラが駆動力を発生する以外の場所において接触及び衝突を起こしてはならない。これが駆動ガイド設計の第一基準である。

クロール型移動機構では回転円盤のトルクをローラを介して駆動ガイドと接触してその反作用として推進力を得るものであるから、ロール軸にかかる力が大きくなら

ないようにしなければならない。これは安全の上からも重要な条件で、駆動ガイド設計の第2基準である。さらに、駆動ガイドは経済的に製作できなければならない。そのための検討は本研究が実用化さらに普及を目指したものであるためである。研究試作段階では駆動ガイドとしてパイプを使用した。3次元空間上の2次元曲線である駆動ガイド中心線を実現するにはパイプ加工が最も簡単確実にできるためである。パイプの曲げ加工における限界は、小さな曲率半径のパイプ曲げにおいて割れ、表面の皺（しわ）の発生として現れる。しかし、普及を考慮した実用品レベルではパイプ以外の方式が適しており、第5章でパイプ以外の方法に関して言及する。ただし、生産コストを考慮した詳細な検討は今後の課題として残っている。

以上まとめると、以下の3点が設計ないし評価の基準となる。

- 円盤自身が駆動ガイドと衝突しないこと。さらに、推進力を発生しないフェーズにあるローラは同じく駆動ガイドと衝突しないこと。
- ローラ軸に過大な力がかからないこと。
- 駆動ガイドは経済的に製作できること。

駆動ガイドの設計には6つのパラメータが関与する。この6つのパラメータを用いて目的とする駆動ガイドの設計の最適化を図った。6つのパラメータとは、1. 階段傾斜角、2. 円盤傾斜角、3. ローラ数、4. 半径比、5. ローラ長さ、6. ローラ半径、である。2～6番目の条件は階段昇降機設計側で決定できるものであるが、1番目の階段傾斜角は他の5つの条件と異なり、設置側から要求される条件である。一般家屋の階段傾斜角は45度前後のものが多い。駅やデパートなど公共の建築物では30度前後である。階段昇降機の走行レールは、階段の角度に正確に合わせる必要はないが、天井の高さの影響、審美性の観点から数度の範囲で一致させることが望ましい。曲線部の駆動ガイド設計においては上記6つのパラメータが複雑に関係しているため、階段傾斜角が30度と45度では設計は方針が大きく異なる。

階段昇降機に最終的に求められる性能は、折返し階段の内側軌道に対応できることである。既存の階段昇降機の多くは直線階段のみに対応しており、曲線軌道に対応するものは極めて少ない。また、曲線軌道に対応したものでも、階段の外側に軌道を有するものが多い。階段の外側を軌道が通る方式では、各階において軌道が廊下、室内へのドアの前を通るため軌道は1階分しか設置できない。複数階に設置するには不連続な軌道となり、不連続部分においては車イス自身の移動が必要になり不便である。これに対して階段の内側を軌道が通る方式では廊下、ドアの前を通ることがないため設置階数に制限がなく好都合である。クローラ型移動機構は折返し階段内側軌道に対

応できるため、実用機の開発と普及が期待できる。

駆動ガイドの形状は移動体上の円盤の進行方向との傾斜角に依存する。そのため、最初に円盤の傾きを移動体の進行方向（通常壁面と一致する）と平行に設置した方式について検討した。直線階段においては駆動ガイドの形状はサイクロイドの平行曲線になった。また、幾何学的滑りを許容するとこの形状はトロコイドの平行曲線になった。螺旋階段については、駆動ガイドの中心線は3次元曲線となり、2次元平板の単純な曲げ加工では対応できず、またそのような曲線に沿うために円盤に取り付けられるローラの長さ、ローラの半径を大きくする必要があった。螺旋階段におけるこのような欠点を取り除くには、円盤を上昇方向への進行方向に対して若干傾斜させる必要がある。これによって、ローラの長さ、ローラの半径を小さくすることができた。なお、円盤の傾斜に関してはそれぞれ、長所短所があるために設置場所に対応した適切な選択が必要である。

具体的な設計として、まず最初に、駅などの公共施設での普及を目指して、階段傾斜角が30度のクローラ型階段昇降機に関して設計を行った。ここでは回転円盤を進行方向に対して15度傾斜させることにより円盤のローラが駆動ガイドから推進力を得た後の駆動ガイドとの干渉を避ける方法を検討した。とくに直線軌道に対応するクローラ型階段昇降機について考察した。円盤の壁への傾斜を移動本体の進行方向に対して垂直な軸周りに行うことによって、駆動ガイドの形状は階段の傾斜角に依存しないという特長がうまれる。このため、螺旋階段用駆動ガイドを設計することによって、直線階段対応に用いたものと同じ移動体を螺旋階段に対応させることができた。この駆動ガイドは、螺旋接線角と円筒部半径によってその形状は異なるが、同一の螺旋接線角と円筒部半径に対応する駆動ガイドの形状は一定である。直線階段と螺旋階段単独に対応する円盤のローラ個数は4個であった。直線階段と螺旋階段を組み合わせ折返し階段を構成することができる。直線階段から螺旋階段、および螺旋階段から直線階段の遷移部分で移動を円滑にし、また駆動ガイドの種類を直線用と曲線用の2種類にするためにローラ個数を5個とした。折返し階段対応の階段昇降機では実際に大人一人が搭乗できるように移動本体と駆動ガイドを強化した。

一般住宅に多く見られる折返し階段に対応し、実用化を図るには曲線部における半径をさらに小さくしなければならない。回転円盤直径を20センチにし、さらに曲線部円筒との半径比を1.5まで縮められることを微分幾何学を用いたシミュレーションによって確認した。さらにパイプを用いて駆動ガイドを構成する従来方法では壁への取付けが複雑で代替手段が必要である。直線部は回転円盤傾斜角を0度にするこ

によって、ローラの戻りの軌跡を駆動ガイドの対称形にできることがわかった。すなわち、駆動ガイドが2次元平面で構成でき、極めて低コストで提供できる見通しがたった。さらに、仮想的滑りを許容することによって階段の長さに正確に適応したラックを構成できる。2次元ラックの構成によりクロー型機構の適用分野は階段昇降機にとどまらず緊急避難装置、2次元平面閉軌道対応など広がることが期待される。

#### 1.4 本論文の構成

本章に続く第2章では、階段昇降機の現状と課題について述べた。階段昇降機の開発を急ぐ背景には急速な高齢社会の進展とそれに伴う歩行介助を必要とする半健康な高齢者の増加がある。階段昇降機に限らず福祉機器開発の必要性を日本の人口動態から述べた。日本の福祉機器開発の現状と問題点、さらに新たに階段昇降機を研究開発すべき必要性について階段昇降機の現状技術と問題点から述べた。

第3章では、本研究で開発し提案したクロー型移動機構の原理について解説した。動力を有する円盤が回転するとき円盤周縁部の一点が仮想的に描く曲線から発想を発展させ、この仮想的に描く曲線に円盤周縁部を倣わせることによって、円盤を取り付けた本体の推進力を得ようとするものである。ここではクロー型移動機構を用いた階段昇降機の構造と動きを概略的に述べた。

第4章では、クロー型移動機構の2次元平面への適用に関して述べた。このような2次元平面内移動では回転円盤傾斜角が0度である平行円盤にできることを微分幾何学を用いて示した。2次元平面に限られたクロー型移動機構では、駆動ガイドが2次元平面ラックになることを示した。前半では直線軌道に対応したクロー型移動機構の設計について述べた。ラックの歯先厚さはローラ個数6個の時最大であることを示した。滑り係数の概念を導入すると、移動部分の距離にぴったり合ったラックを構成できること、および滑り係数はローラ軸にかかる力と関係していることを解析的に示した。後半ではクロー型移動機構をさらに円弧軌道の外接式および内接式に適用できるように拡張した。直線軌道対応クロー型移動機構のモデルを試作して有効性を確認した。

第5章では、クロー型移動機構の3次元空間への拡張に関して述べた。折り返しのある階段の内側走行が階段昇降機の最終目標である。クロー型移動機構において、折り返し階段の曲線部を滑らかに昇降するためには回転円盤を上昇方向に傾斜させる傾斜円盤が適していることを示した。傾斜した円盤によって直線階段、螺旋階段に対応できることをプロトタイプ試作を通して示した。直線階段、螺旋階段について



は、動作を確認するために試作したペイロード荷重 30Kg のプロトタイプによる実験結果を示す。クローラ型移動機構の移動本体はシンプルな構造で製造は容易であるが、駆動ガイドを本章で述べたパイプで構成すると施工上工夫が必要である。そのいくつかのアイデアについても述べた。

第 6 章では 2 種類の回転円盤傾斜角についてその長所と短所を検討した。評価の基準は、移動が物理的に妨げられないこと、ロール軸にかかる力が大きくなること、駆動ガイドが容易に製作できること、である。評価パラメータとして、階段傾斜角、円盤傾斜角、ローラ数、半径比、ローラ長さ、ローラ半径、を用いた。この用語の意味については付録 2 で述べた。

第 7 章では、5 章で述べた傾斜円盤方式の直線階段、螺旋階段を組み合わせた折返し階段対応クローラ型階段昇降機の実証機の試作について述べた。実証機は大人一人が搭乗でき、折返し階段の内側走行が可能である。また、折返し階段対応クローラ型階段昇降機と代表的な市販階段昇降機の 2 機種（ラック・ピニオン駆動方式、およびチェーン・スプロケット駆動方式）について騒音・振動の観点から評価比較を行った結果を示す。ここでは、騒音・振動ともクローラ型階段昇降機がもっとも小さいことを確認した。

第 8 章では本研究の成果をまとめるとともに、将来への展望と課題を記述した。

付録では、本機構で推力を得るための計算がベクトル 3 重積を用いて表現できることを示した。また、クローラ型移動機構は従来にない新しい機構であるため、本論文で用いる用語の解説を行った。