

2022（令和4）年度 修士学位論文

ベルトを用いた全方向搬送装置における
張力調整機構の開発

Development of Tension Adjustment Structure
for omnidirectional Conveyor with Belt

2023年3月3日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1255013 高井 友輝

指導教員 川原村 敏幸

目次

第一章	序論	2
1.1	移動手段の歴史	2
1.2	研究背景	2
1.3	ユークリーター	3
1.4	本論文の構成	5
第2章	研究概要	6
2.2	目的と先行研究	6
2.2.1	類似研究	6
2.2.2	先行研究（球体型ユークリーター）	7
2.2.3	先行研究（ベルト型ユークリーター）	14
2.3	研究目的	18
第3章	製作	19
3.1	問題点	19
3.2	設計	20
3.3	製作	24
3.4	余談	26
第4章	実験	27
4.1	重量	27
4.1.2	実験結果	29
4.1.3	考察	31
4.2	実験2 搬送重量・速度の測定	32
4.2.1	実験方法	32
4.2.2	実験結果	33
4.2.3	考察	34
第5章	他の搬送装置との比較	38
第6章	結言	40
6.1	まとめ	40
6.2	展望	41
6.2.1	機構改良についての展望	41
6.2.2	制御についての展望	41
参考文献		42
謝辞		43

第一章 序論

1.1 移動手段の歴史

人類は文明が誕生してから現代にいたるまで様々な移動手段を考案してきた。徒歩や舟、動物から始まり、紀元前 3000 年頃に車輪が発明されてからは車輪を動物にひかせる荷車が用いられるようになった。また 18 世紀頃には蒸気機関車や蒸気自動車が発明され、人々は長距離の移動を容易にしてきた。1903 年にはライト兄弟が飛行機を発明し、世界初の有人動力飛行に成功した。そして 1969 年にはアポロ 11 号が初の有人月面着陸を成し遂げ、人類の移動は地球外にまで到達した。これらの移動手段はこれまで多くの技術革新を経て、現在まで使われ続けている。

1.2 研究背景

現代では、自動車、電車、エスカレーター、エレベーターなど、様々な移動技術が開発され、目覚ましい発展を遂げている。各移動手段には異なる特徴があり、我々は移動距離や移動時間、移動目的に合わせて、最も適した方法を選択し利用している。移動手段は大きく分けて、対象物とともに移動する自動車や飛行機などの移動型と、目的地への軌道が決まっている電車やエスカレーターなどの設置型に分けられる。移動型では、軌道に縛られていないため自由度が高いという利点があるが、それ故に危険予測のために移動先の情報を全方位に対して行わなければならない、事故が起きやすく安全性が低いという欠点がある。設置型では、軌道が決まっているので自由度が低いという欠点があるが、危険予測は目的地への軌道上とその周辺の情報収集のみで済むため、事故を防ぎやすく安全性が高いという利点がある。図 1.1 に移動距離と輸送コストを元にした各種移動・運送手段の活躍領域を示す。

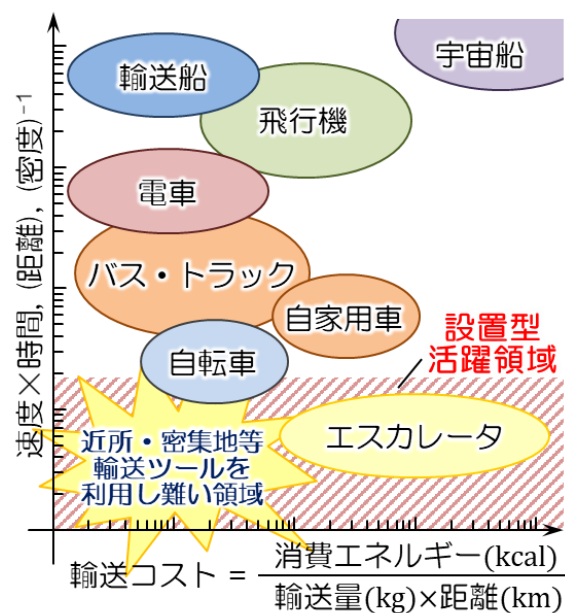


図 1.1 各種移動・運送手段の活躍領域

この図を見れば、徒歩圏内を機械的に移動・運送するツールは発展途上であることがわかる。エスカレーターなどの設置型のツールはあるが、これらは使用領域に合わせて特注しなければならないうえ、輸送コストも高く無駄が多くなってしまふ。そこで、本研究室では近所・密集地等における自由度と安全性を兼ね備え、汎用性が高く輸送コストの小さい移動・運送支援ツール「ユークリーター」の開発が行われている⁽¹⁻¹³⁾。

1.3 ユークリーター

ユークリーター (Euclitor)とは、全方向搬送可能なユニットを敷き詰め、それらが駆動することでユークリーターに乗った人や物を自由に移動させることができるというシステムである。このシステムは「映画ドラえもん のび太と銀河超特急」に登場するひみつ道具「ベアリングロード」より着想を得たものである。作中に登場するベアリングロードは球体が床に敷き詰められており、念じるだけで対象物を移動させるという装置になっている。

参考までに、ユークリーターの名前の由来は以下の2つを掛け合わせたものである。

- ① 直線や平面、空間等の概念について体系立てたユークリッド幾何学 (Euclidean geometry)
- ② エスカレーターやエレベーターといった移動手段の語尾ともなっている、行為者を表す接尾語の「or」

ユークリーターは図 1.2 に示すように第 1 世代 (G1) から第 4 世代 (G4) まで構想されており、まずは第 1 世代として、倉庫や市場といった荷物の搬送を行う場面での実装を目標とする。次に第 2 世代では病院や介護施設などの限定された屋内空間において、移動が困難な人の歩行支援を行う。第 3 世代ではさらに適用面積を広げて、ショッピングモールや空港など、歩いて移動するには少し苦勞を感じる距離の移動を支援する。第 4 世代では屋内にとどまらず屋外においてもあらゆる人や物の搬送を支援するシステムを目指す。



図 1.2 ユークリーター構想

上述のように、各種移動手段は多くの人々が自由に移動できる便利な社会を実現し様々な産業を発展させてきたが、一方で環境問題や安全性、エネルギーの問題など大きな社会課題を引き起こした。また、重厚長大的な進歩に注目してきたことにより、近場や密集地での移動手段はこれまであまり開発されていない(図 1.1)。最近になってようやく各種手段が提供されだしてきたばかりであるがまだまだ発展途上である。たとえば空港やショッピングモール、物流倉庫などに着目すると動く歩道やエスカレーター、ベルトコンベアなどが存在するが、これらは決められた軌道上しか搬送させることができず自由度が低いという欠点がある。

さらに、現行の移動手段の大半は他点起発予測方式である。すなわち運転者自身が進路上で起こり得る事象を予測しながら危険を回避する必要があり、これらの予測には限界があることから、事故を完全になくすことは困難である。

1.4 本論文の構成

本論文の構成について述べる。

第1章では本研究室が提案する新たな移動手段である「ユークリーター」の研究背景、及び、研究概要について述べた。

第2章ではユークリーターの先行研究や全方向搬送装置の類似研究、また本研究における目的について述べた。

第3章ではユークリーター現行機となるベルト型3号機が抱える課題点とそれらの解決を目標とした構造の開発を行った。

第4章では新型となるベルト型4号機の搬送能力に関する実験を行ったことについて述べる。

第5章では類似研究やベルトコンベアといった他の搬送装置との性能の比較した結果について述べる。

第6章では本研究の成果と今後の展望について述べる。

第2章 研究概要

2.2 目的と先行研究

2.2.1 類似研究

全方向搬送装置の類似研究として、Cellumation 社の Celluveyor(図 2.1)と Beckoff Automation 社の XPlanar(図 2.2)が存在する。Celluveyor はオムニホイールを用いた全方向搬送装置である。1 ユニットあたりにオムニホイールを 3 つ使用し、オムニホイール 1 つに対し、1 つのモーターが搭載されている。ユニットは上面から見て六角形で、それを敷き詰めて使用する。XPlanar は板のような形状をした可動部を電磁力により平面タイルの上に浮かべて自由自在に動かす全方向搬送装置である。

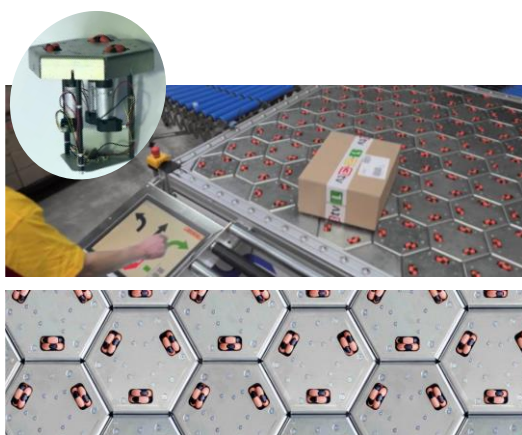


図 2.1 Celluveyor

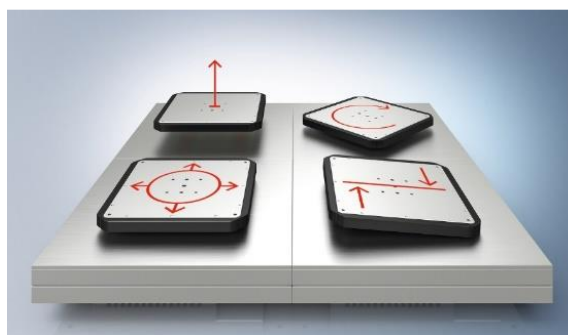


図 2.2 XPlanar

Celluveyor、XPlanar 共に実用で利用できるレベルで物の全方向への搬送を可能にしている。Celluveyor と XPlanar の大きな違いは、搬送するために移動対象物の保持用筐体を必要とするか否かである。Celluveyor は移動対象物の搬送を行う際に、基本的にはその移動対象物を保持する筐体を必要とせず搬送物を直接 Celluveyor に乗せてそのまま搬送することができる。搬送可能重量は 1800 kg/m^2 程である。XPlanar は搬送するために搬送物を保持筐体に載せる必要があり、搬送可能重量も最大 76 kg/m^2 程と重量物搬送には向かない。この点においては、Celluveyor の方が搬送機器としては有用であると言える。しかし Celluveyor は 1 ユニットあたりオムニホイールが 3 つあり、1 つのオムニホイールに 1 つのモーターを必要としているため、1 つのユニットに 3 つモーターが必要である。一方、この 2 つの全方向搬送装置は共に搬送速度が 2 m/min 程と、長い距離を搬送するには向いていない。このように、世の中の最先端の全方向搬送装置でも搬送できる物（重量や大きさ、速度）に限界があり、搬送にとっての汎用性においてさらなる向上の余地が十分にあると言える。

2.2.2 先行研究 I (球体型ユークリーター)

先行研究として存在する球体型ユークリーター⁽¹⁻¹⁰⁾の説明を行う。球体型ユークリーターの概念図を図 2.3 に示す。

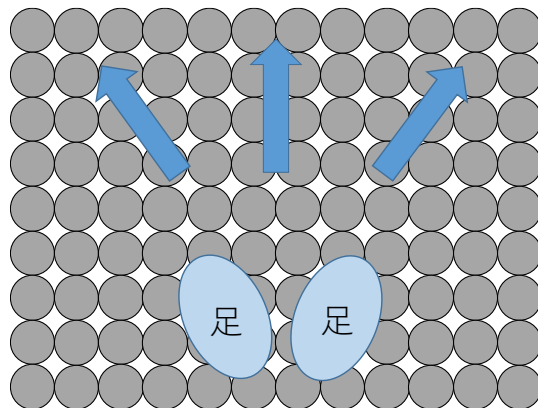


図 2.3 球体型ユークリーターの概念図

球体型ユークリーターは「映画ドラえもん のび太と銀河超特急」の映画の中で登場したベアリングロードというひみつ道具を参考に考案された。床面に球体を敷き詰め、行きたい場所を念じるだけで今いるところから対象物を行きたい場所まで移動させることのできる装置である。先行研究ではこのベアリングロードを現代技術で実現させるため、構造の考案と製作、制御が進められた。球体型ユークリーターは先行研究の時点で3機ある。球体型ユークリーター1号機の上面図を図 2.4、側面図を図 2.5 に示す。

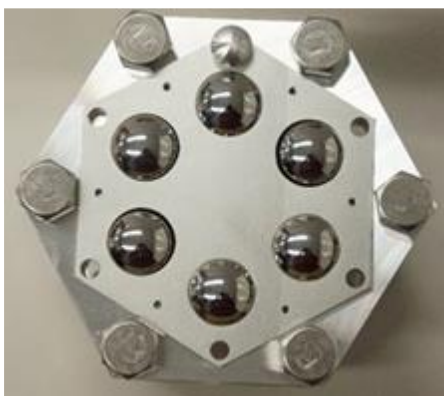


図 2.4 球体型1号機 上面図



図 2.5 球体型1号機 側面図

1号機は六角形のユニットで、3つもしくは4つのモーターで2段目の1つの球体を駆動させ、その動力を3段目の6つの球体に伝達し、対象物を搬送させるという仕組みである。このユニットを床面に敷き詰めて使用する。しかし、1号機には問題がある。1つ目はユニット上段の余白部分が多いということである。余白部分が多いと、移動対象物が余白部分に乗った時に摩擦が増加して移動の妨げになる。2つ目は球体と保持器の接触面積が大きい事に

よって、抵抗が大きくなり動力を3段目の6つの球体に伝えられないことである。3つ目は2段目の1つの球体で3段目の6つの球体に対して、動力伝達と方位の決定を同時に操作しなければならず制御が困難なことである。当時検討されていた球体を利用した移動対象物を搬送するための機構とその概念を図2.6 図2.7に示す。

図2.6 図2.7に示されるように4つまたは3つのモーターを用い、動かすモーターとその回転数により移動方向を決定するものである。この制御方法で全方向移動を可能にするにはパターンが多く制御が複雑になる。また、移動回転方向の一致しないホイールとの接触により抵抗が大きくなりすぎるなどの不具合も見られた。

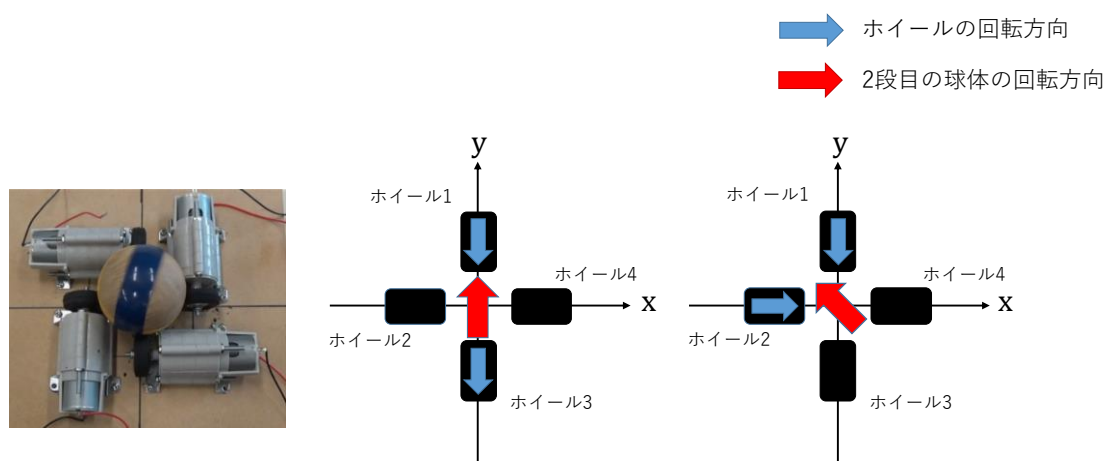


図 2.6 球体型ユークリーター1号機で検討されていた移動対象物を搬送するための機構とその概念

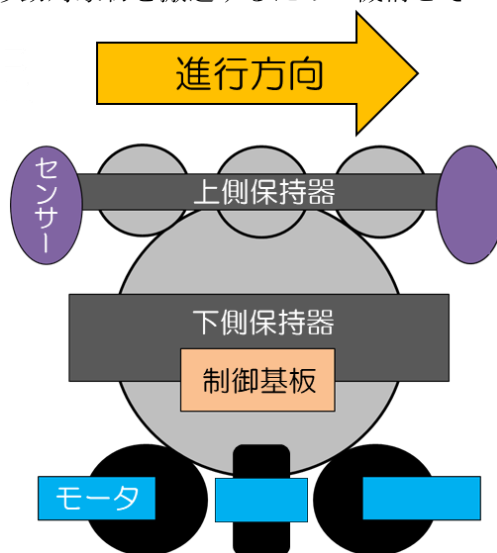


図 2.7 球体型ユークリーター1号機の機構概念図

搬送と方位決定を一括して行う仕様の球体型ユークリーター1号機には多くの問題が見られたため、新たに球体型ユークリーター2号機の製作がなされた。球体型ユークリーター2号機の全体図を図2.8、側面図を図2.9に示す。

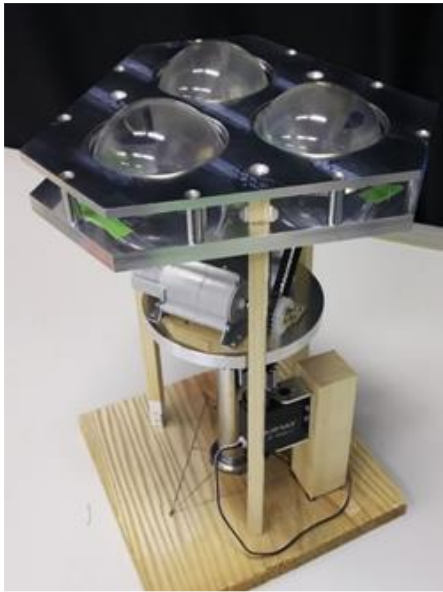


図 2.8 球体型ユークリター
2号機 全体図

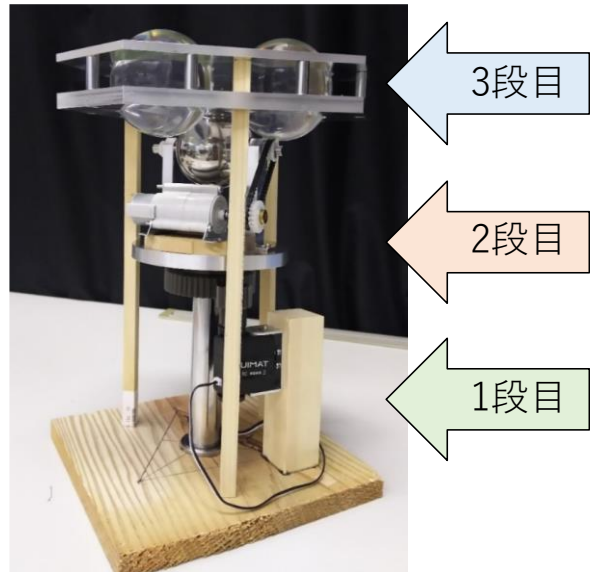


図 2.9 球体型ユークリター
2号機 側面図

球体型ユークリター1号機では方位決定と搬送を同じモーターで行っていたが、球体型ユークリター2号機では搬送と方位決定を別々のモーターで行っている。一方、1段目と2段目に駆動系および制御系があり、3段目で移動対象物の搬送を行うという3段構造は踏襲されている。また、3段目の保持器の形状には三角形の様な変則的な六角形が採用されている。この形状であれば余白スペースを最小化することが出来るからである。球体型ユークリター2号機の動作原理を図 2.10 に示す。また動作原理を以下の①～⑦に示す。

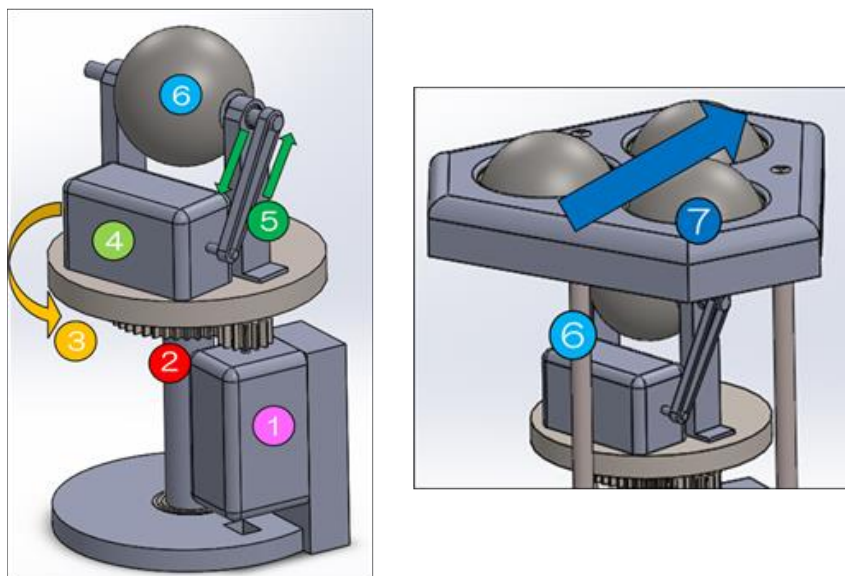


図 2.10 球体型ユークリター 2号機の動作原理

搬送方位決定	①サーボモーターが駆動
	②小歯車→大歯車の順に回転
	③大歯車と共にテーブルが回転し、方向を決定
対象物搬送	④DC モーターが駆動
	⑤モーターの動力をベルトで伝達
	⑥下側の球体が回転
	⑦上側の3つの球体が回転し、対象物を搬送させる

また、1号機で問題点となっていた球体と保持器の摩擦を減らすために、図 2.11 のように保持器にボールプランジャをはめ込み、球体と保持器の摩擦を小さくし、球体の回転を妨げないようにしている。1号機は3段目の球体を回転させることすら厳しかったが、2号機は3段目の球体を円滑に回せ、ユニット1つあたり 1.35 kg までの搬送を可能にした。



図 2.11 球体型ユークリーター2号機の球体保持方法

2号機では球体同士の接触により物が搬送できることが分かった。続いて敷き詰めての搬送を可能とするため、3号機の開発を行った。3号機の全体図を図 2.12、上面図を図 2.13 に示す。

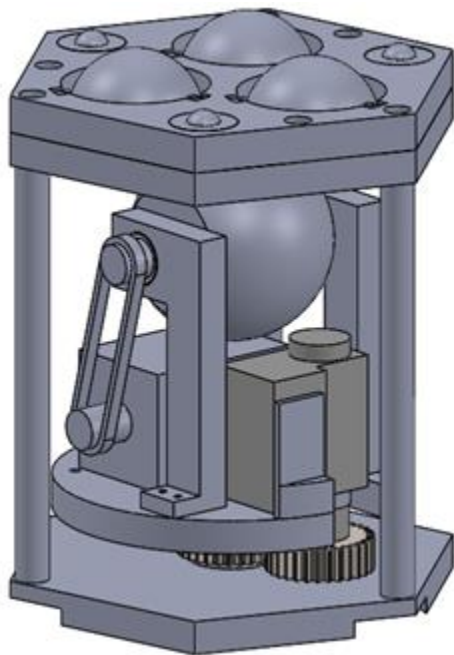


図 2.12 球体型ユークリーター3号機
全体図

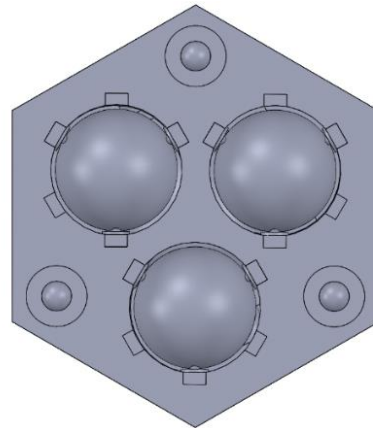


図 2.13 球体型ユークリーター3号機
上面図

3号機での改良点は主に4つある。1つ目は小型化である。2号機では概略寸法が200×220×300 (mm)であったのに対し、3号機では140×140×160 (mm)まで小型化された。2つ目は球体保持器の形状と球体の保持方法を変更した点である。2号機の球体保持器の形状は変則的な六角形であった。そのためユニットを複数個敷き詰めるとどうしても空白が出来てしまい、本体とは別の治具を用意する必要があった。そこで3号機では正六角形に変更した。球体の保持方法についても、2号機では図2.11のように下側のみで球体を保持していたが、3号機では図2.14のように上下から保持するように変更した。

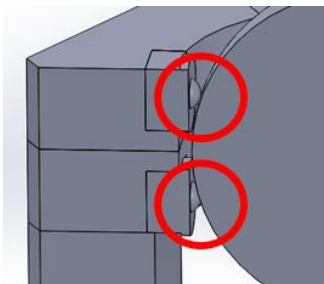


図 2.14 球体型ユークリーター3号機の球体保持方法

3つ目は、3段目の球体の素材をアクリルからクロロプレンゴムに変更した点である。アクリル球では2段目の鋼球との摩擦が小さく、滑りが発生してしまうため、摩擦が大きいゴム

球に変更した。4つ目はサーボモーターの位置を1段目から2段目のテーブルの上に変更したという点である。これにより無駄なスペースを無くし、高さを160mmまで抑えることができた。

球体型3号機では1ユニット当たり3kgまで搬送可能なことが判明した。しかし、ベルトコンベア等の一般的な搬送機器の動力伝達効率が80~90%なのに対し、球体型3号機では30%程と非常に低いことも分かった。この原因の1つ目は球体同士の動力伝達は点接触での動力伝達のため動力損失が大きいことである。このため、2段目の1つの球体から3段目の3つの球体に動力を伝える際、モーターからの動力を効率よく伝えることができなくなる。2つ目は3段目の3つの球体がそれぞれ違う方向に回転することである。2段目の1つの球体により3段目の3つの球体を回転させているため、合成ベクトルは進行方向へ向いているようであるが、3つの球体がそれぞれ違う方向を向いて回転する。このため搬送したい方向に全ての動力を伝えることができなくなる。このように2つの原因による動力伝達効率の低下が推察されている。

球体型ユークリーター3号機までの開発で物体を安定して搬送できるようになったことで、搬送能力以外の付加価値を与えることを目的に開発されたのが球体型4号機である。球体型4号機では、ユークリーター上面に太陽光パネルを設置して日中の発電および充電を行えるようにし、さらに赤外線センサを設置して、ユークリーター上に物体が載っているときにはモーターが駆動し、載っていない場合はモーターが作動しないようにした。要するに消費電力を抑え、ユークリーター稼働に必要な電力を抑え、さらに発電や充電を行えるようにすることで自立運転ができるようにし、さらには余分な電力を緊急時に供給できる機能まで備えた自立分散型電源化を目指し、一般的なベルトコンベアや先述した類似研究との差別化を図った。

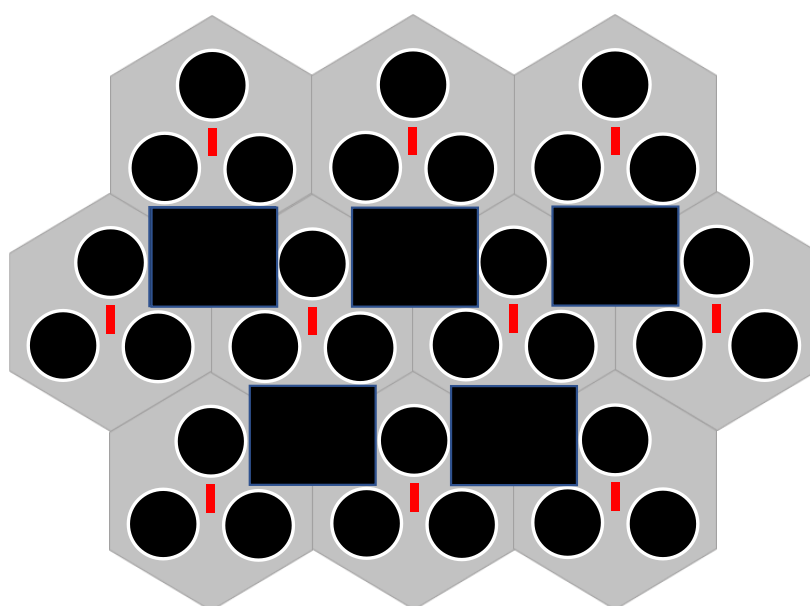


図 2.15 センサ・太陽電池付き球体型の敷き詰めイメージ

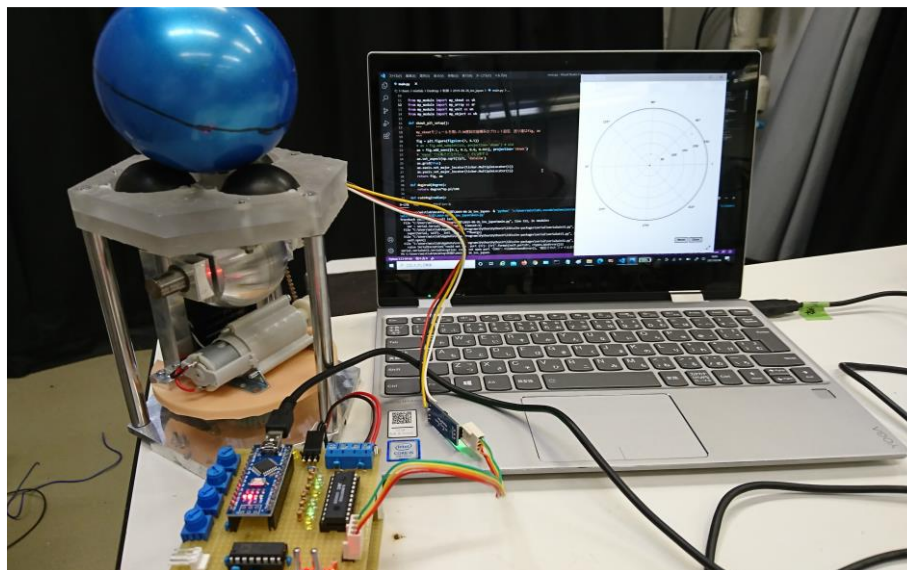


図 2.16 赤外線センサを搭載したユニットでの実験

太陽光発電によって日中約 2.66 Wh の発電を行うことが可能であると判明した⁽¹⁰⁾。またユークリーター上面中央に赤外線センサを搭載することで、ユークリーター上に搬送物が存在しない場合モーターが駆動しないように出来た⁽⁹⁾。これら 2 つの開発により、不要な消費電力を抑え、日中は発電・充電を行うという 2 段構えで電力面での進化がなし遂げられた。

2.2.3 先行研究Ⅱ（ベルト型ユークリーター）

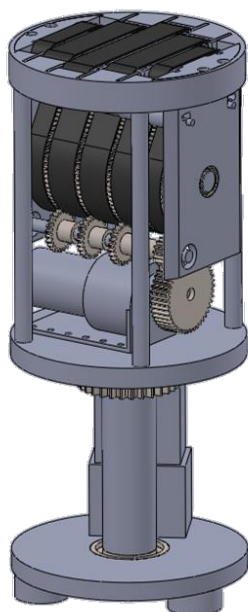


図 2.17 ベルト型ユークリーター1号機

球体を利用したユークリーターでは、動力伝達は球体同士の点接触となってしまうため損失が大きく、動力伝達効率が低いといった問題点が生じる。この問題を解決するべく、球体型から派生する形で開発されたのがベルト型ユークリーターである。ベルト型ユークリーター1号機の外観を図 2.17 に示す。ベルト型ユークリーターではタイミングプーリーとタイミングベルトが使用されており、球体型ユークリーターと比べ動力伝達効率が大幅に改善されている。一方当初開発されたベルト型1号機の問題として、両方向に物体を搬送できないという点があった。搬送可能な方向を正回転・不可能な方を逆回転とする。これはモーターを駆動させた際に搬送部に歪みが生じ、タイミングプーリー同士がずれることでモーターが空転し、結果動力を伝えることができないために生じた問題であり、駆動プーリー

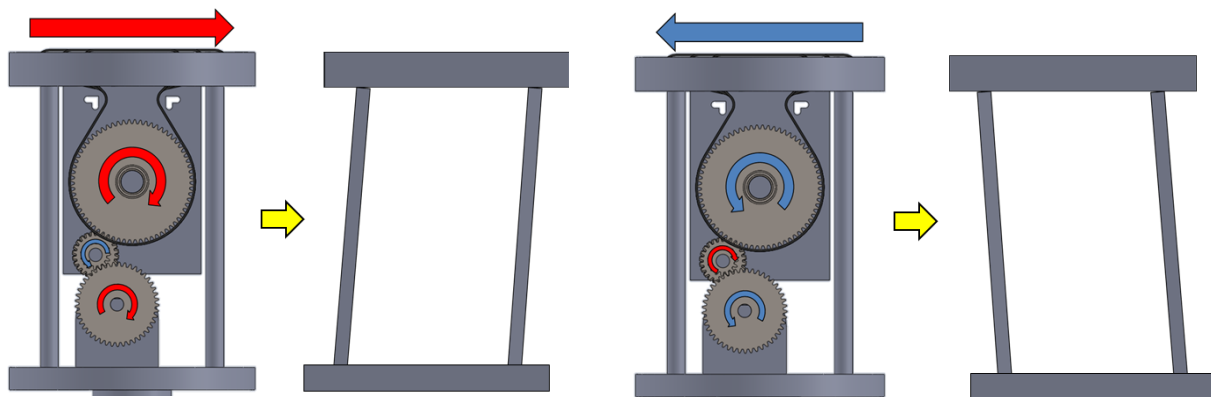


図 2.18 正回転 逆回転

が非常に大きく、モーターが加速する際に必要なトルクが大きいため生じると考えられた。

またほかにも、モーターを駆動させている際、ユニットが微振動するという問題があった。ベルト型ユークリーター1号機は直径が110 mmなのに対し、高さは240 mmとなっている。すなわち機構全体において高さ方向への安定性が著しく低く、駆動時に上述の問題などのため微振動が発生していることが考えられた。

1号機の問題点を顧みて開発されたのが図2.19のベルト型2号機である。変更点は

- ・ベルトの駆動方式を変更
- ・駆動プーリーの径を大幅に小さなものに変更

の2点である。

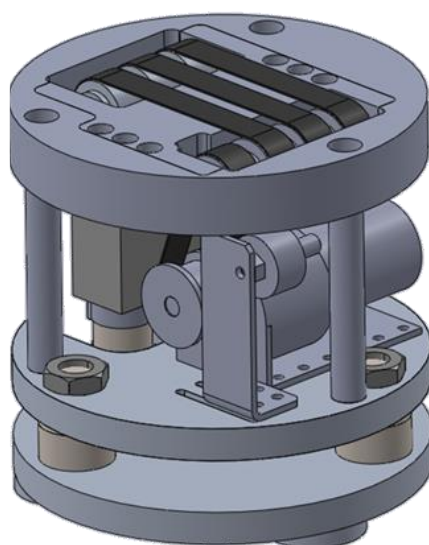


図 2.19 ベルト型ユークリーター2号機 全体図

まず1つ目の変更点であるベルトの駆動方式についてだが、ベルト型1号機では駆動プーリーが中央下部にある「センタードライブ方式」(図2.20)を採用していた。しかし、この駆動方式では高さが不必要にかさみ、そのため先に話したようにモーター駆動時にユニットが微振動してしまうという問題が生じていた。それに対し、「ヘッドドライブ方式」にすることで必要プーリー数を削減し、ユニットの高さを抑え、搬送部への負荷を小さく出来た。

2つ目の変更点は駆動プーリーの径を小さくした点である。これにより駆動時に搬送部が歪むという問題の解消に成功、正方向・逆方向のどちらか一方でしか物体を搬送できないということが無くなった。

これらの改良により、両回転ともに5 kgまでのおもりを搬送できるようになった。

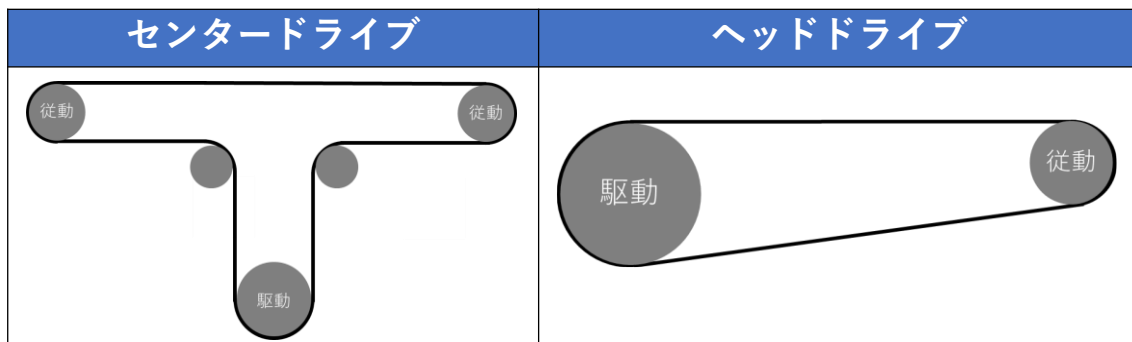


図 2.20 ベルトコンベアにおける駆動方式

ベルト型ユークリーター1号機から2号機になり、5kgまでのおもりを搬送することが出来るようになり、大きな進化を遂げた。しかし、搬送において汎用性の高い装置を作るには様々な大きさの物体を搬送できねばならない。ベルト型ユークリーター2号機のベルト部分は図 2.22 に示すようにユニットの一部領域を占めているに過ぎず、図 2.21 に示すような理想的な配置ではない。そこでベルトの配置面積をより大きくとれるようベルト型ユークリーター3号機の開発が進められた。

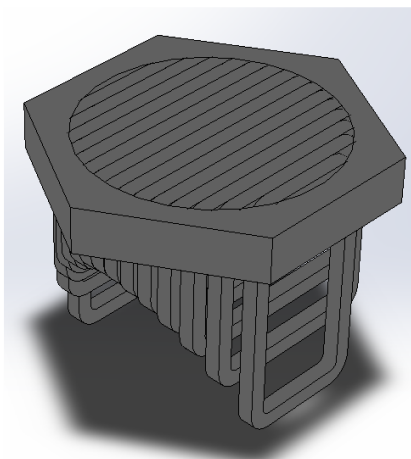


図 2.21 ベルト型ユークリーター 理想

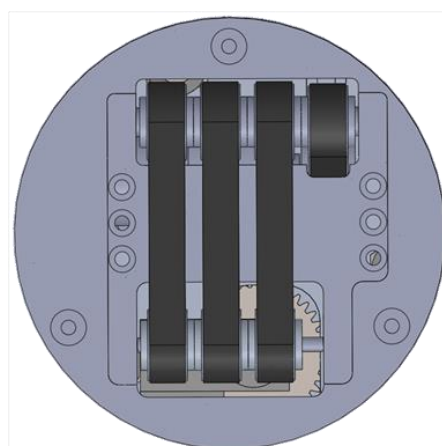


図 2.22 ベルト型2号機 上面図

ベルト型3号機では、2号機で採用した駆動方式であるヘッドドライブ方式はそのまま踏襲した。ただし、駆動プーリーを中央に、従動プーリーを互い違いに配置した。図 2.23 にベルト型3号機の全体図を示す。

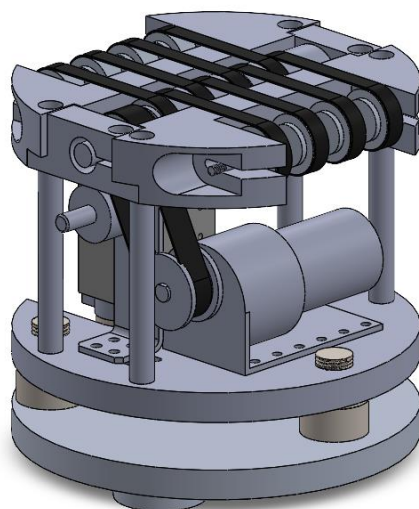


図 2.23 ベルト型ユークリーター3号機 全体図

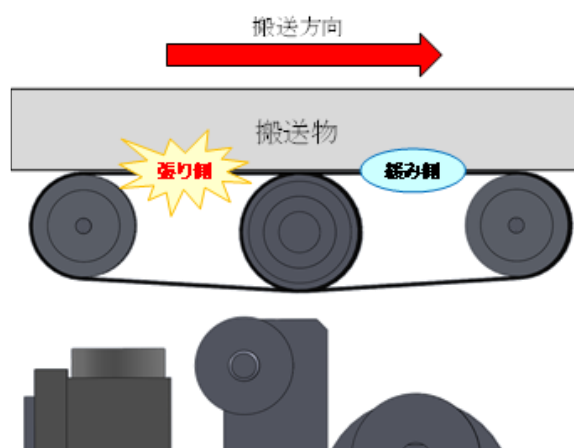


図 2.24 ベルト型3号機における搬送イメージ

ベルト型ユークリーター3号機では、プーリーの配置変更に伴い、ベルトの配置方法も2号機から大きく変更された。ベルト型ユークリーター3号機のベルト配置について、物体を搬送した際のイメージ図を図2.24に示す。ベルト型3号機は駆動プーリーを中央に配置したヘッドドライブ方式を採用したため、搬送する際に搬送物と接触するベルトの部分に張り側と緩み側が同時に存在する構造となっている。ベルト型2号機において、ベルト上面が緩み側となる「逆回転」でも5kgまでのおもりを搬送できたことからベルト型1号機のように、ベルト上面が緩み側となる逆回転を必要以上に避ける必要はないだろうという発想からこのような構造となった。

また、搬送時に常時ベルトの緩み側と張り側が存在するために、正回転・逆回転がなくなった。これにより搬送方向に関係なく一定の搬送能力を発揮する機器となった。

この構造の変更により、ベルトの占める面積は2号機と比較して大きく増加した。図 2.25 にベルト型ユークリーター2号機と3号機のベルト面積の比較図を示す。これにより、3号機では2号機では搬送できなかった小型の物も搬送することが可能となった。

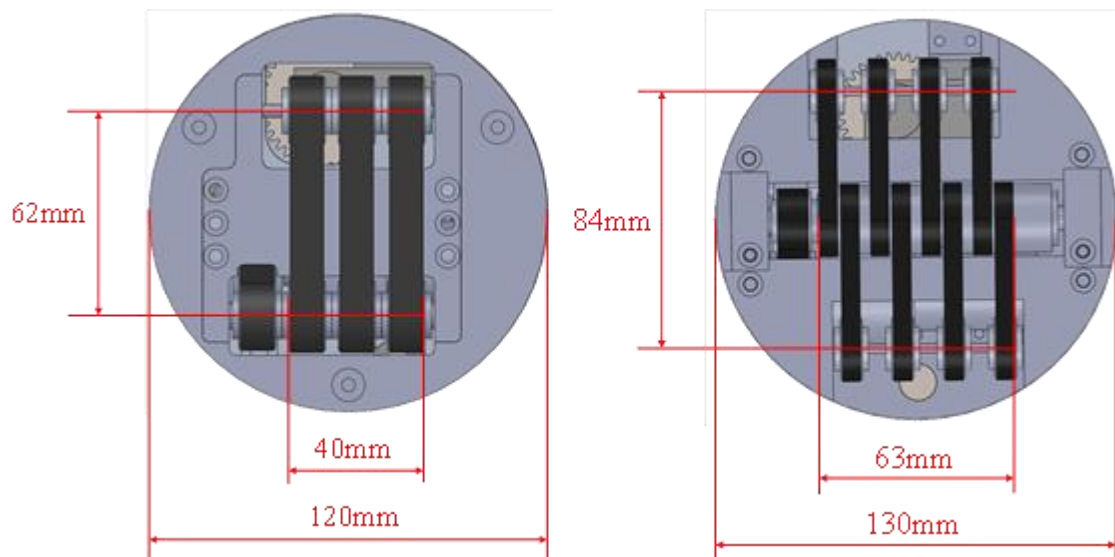


図 2.25 ベルト占有面積の比較

2.3 研究目的

本研究の最終目標は、前章にもあるようにユークリーターを様々な場所で様々な物を運送・移動するための手段として運用することである。しかし人間は重量のわりに接触面積が小さく、また転倒などのリスクも抱えているためもし人を移動させようとするには速度・加速度といった項目を考慮する必要がある。よって本研究では近場・密集地を対象とした新規移動・搬送手段開発の初期段階として、倉庫などでの導入を目標とし、ベルト型ユークリーターの構造面での開発を行った。

第3章 製作

3.1 問題点

現行のベルト型ユークリーター3号機には

- ・一般的なベルトコンベア等と比べ、搬送能力が劣っていること
- ・張力的な問題から、長期的な稼働が見込めないこと

などといった問題点がある。

ベルトを用いる以上、避けて通れないのが張力調節である。ベルト型ユークリーター2号機・3号機では従動プーリーの位置を調整し、適切な位置で固定することで張力調整を図ってきた。しかし、ベルト型ユークリーター3号機はヘッドドライブ方式を互い違いに配置するという構造上、ベルトの半分は搬送物を押し出す形で駆動している。そのためベルトが伸びやすく、従動プーリーの位置調整を頻繁に行う必要がある。またユークリーターは敷き詰めて使用することを想定しているため、従動プーリーの位置を調整（ベルトが伸びた分だけ外側に軸をずらす）することにも限界がある。ベルト型ユークリーターを長期的に稼働させるため、また、一般のベルトコンベアより少ないトルクで物を搬送するためには、ベルト部分に適切な張力を与え続ける必要がある。そこで、駆動-従動間のベルトにテンションプーリーを取り付けることでベルト型ユークリーター3号機が有する問題の解決に取り組んだ。

一般的なベルトコンベアにおいてテンションプーリーを使用する際、取り付け方式は大きく2種類に大別される。その様子を図3.1に示す。この2種類のうちどちらの方式を採用すべきかという問題であるが、先述したようにベルト型ユークリーターはタイミングプーリー・タイミングベルト（歯付きベルト）を使用している。そのため重鎮方式ではベルトの内側にタイミングプーリーをテンションプーリーとして取り付ける必要があり、製作に必要なコストが増加してしまう。また重鎮方式では高さが必要であるためユークリーターの高さを増加せねばならない恐れがある。これら2つの視点から重鎮方式はあまり好ましくないであろうと判断した。もう一方のスプリング方式では、ベルトの外側から押しつける形でテンションプーリーを取り付ける形となっている。そのためプーリーとベルトのまき付け角が増加し、テンションプーリーを用いない時よりも小さいトルクで駆動できるようになることが予想される。これらの条件より、テンションプーリーをスプリング方式で取り付けることとした。

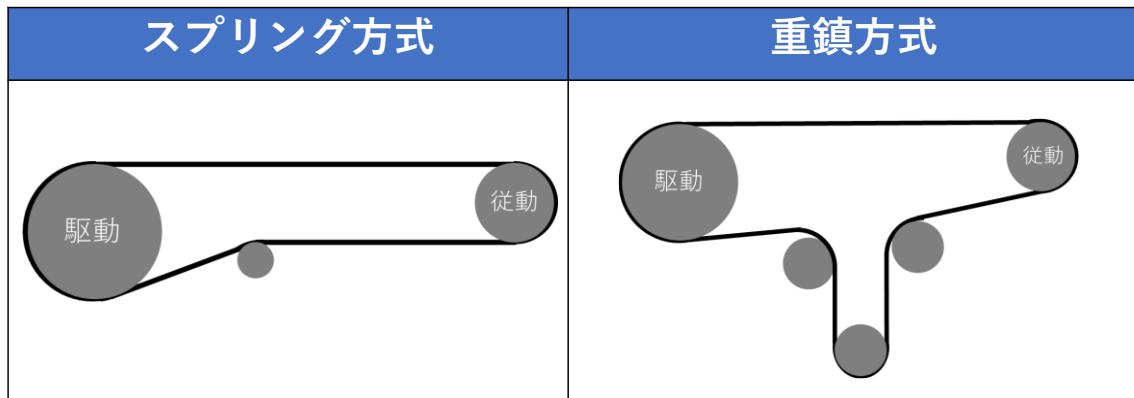


図 3.1 ベルト駆動方式

3.2 設計

上記検討の末、ベルトの駆動方式について、ヘッドドライブにテンションプーリーをスプリング方式で取り付けるとの方針を固めた。ここで問題となるのがベルトの配置である。要するにベルト型ユークリーター3号機のヘッドドライブ方式を互い違いに配置するという革新的なベルトの配置方法を改めて採用するか否かという問題である。そもそも2号機から3号機においてこのような配置になった理由は、ベルトの占有面積を増加させたかったことと、ベルト方式を用いる際に懸念される正回転（張り側）・反回転（緩み側）での搬送能力の差の発生を抑制したかったためである。またベルト型ユークリーターの方位決定の機能を担っているサーボモーターは180°までしか回転できない。つまり2号機の仕様では搬送能力の高い正回転を常に利用することは不可能である。そのため3号機のベルト配置方法を踏襲し、かつ3号機よりベルトの占有率を増加させることを目標に設計に取り組んだ。図3.2に新たに設計したベルト型ユークリーターの上上面図を示す。

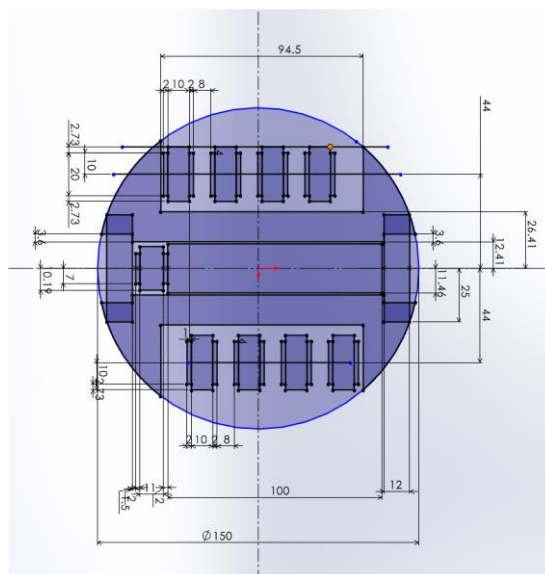


図 3.2 新たなベルト配置の設計

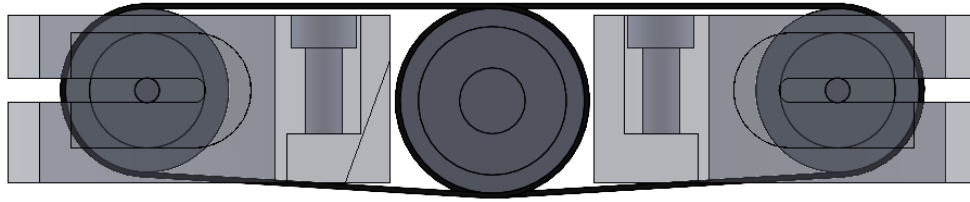


図 3.3 ベルト型 3 号機の側面図

ユークリーターにおけるベルト占有率を増やした構造の設計は出来たが、3号機の構造(図3.3)ではベルトと駆動部の間が僅かにしか存在しないためテンションプーリーを取り付けることができない。そこで、まずテンションプーリーを取り付けるのに適したプーリー・ベルトを選定することとした。選定方法は通販サイトの方法に従った。⁽¹⁴⁾ まず、ベルト型ユークリーター1号機のようにプーリー径を大きくしてしまうと加速に必要なトルクが大きくなり現在のユークリーターより重い物体を搬送する際の能力が低下してしまう恐れがあるため、モーター動力を直接受ける駆動プーリーに関してはベルト型ユークリーター3号機から変更しないこととした。そのためテンションプーリーを取り付けられるように従動プーリーの径を大きくし、またそれに適合するタイミングベルトの選定を行った。まず、ベルト種類の決定方法からであるが、タイミングベルトの種類は設計動力と小プーリーの回転数に基づいて決定される。本研究において、小プーリーは駆動プーリーに相当する。使用したモーターの特性グラフを図3.4に示す。

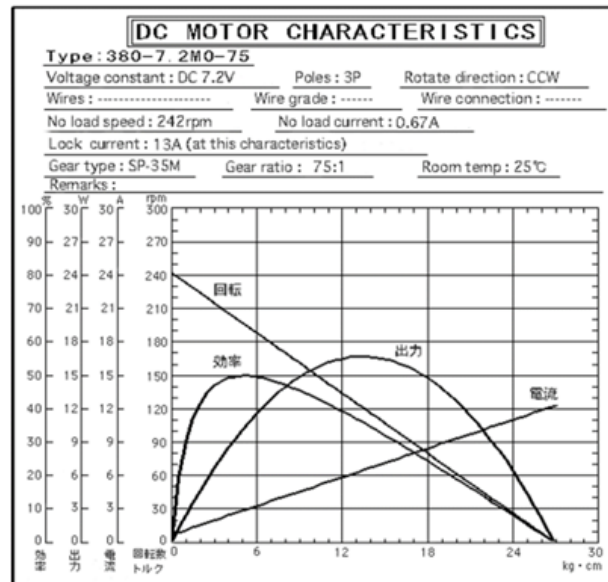


図 3.4 DC モーターの特性グラフ

$$\text{設計動力 (Pd) kW} = \text{電動動力 (Pt) kW} \times \text{過負荷係数 (Ks)} \quad (3-1)$$

$$\text{過負荷係数 (Ks)} = K_o + K_r + K_i \quad (3-2)$$

表20. 簡易選定表2(S□Mシリーズ)

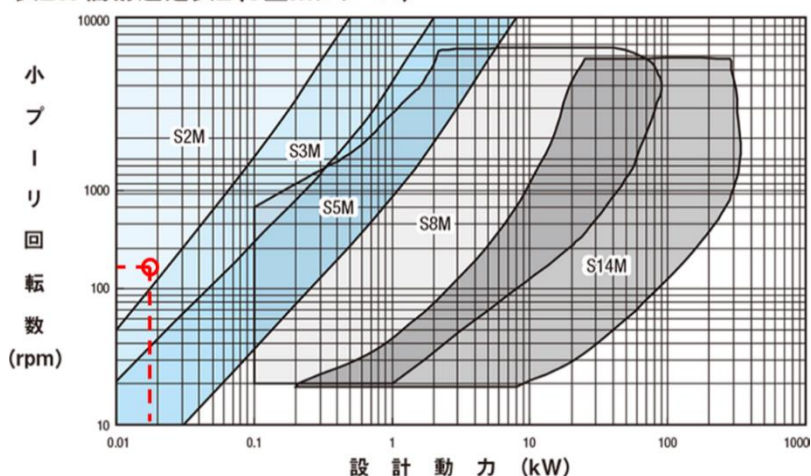


図 3.5 ベルト選定表

式(3-1)、(3-2)より、過負荷係数は1.4、設計動力は19.5、小プーリーの回転数は180 rpm とした。図 3.5 のベルトの簡易選定表 2 より、使用するベルトは S2M とした。

次にベルトの長さであるが、これは暫定軸間距離 (C') と大プーリー径 (Dp)、小プーリー径 (dp) から概略ベルト周長 (Lp') を求めることができる。

$$Lp' = 2C' + \frac{\pi(Dp + dp)}{2} + \frac{(Dp - dp)^2}{4C'} \quad (3-3)$$

概略ベルト周長 (Lp') に最も近い周長のベルトを選定した後、以下の数式で正確な軸間距離を定めた。

$$C = \frac{b + \sqrt{b^2 - 8(Dp - dp)^2}}{8} = \frac{\pm\sqrt{b^2 - 4ac}}{8} \quad (3-4)$$

$$b = 2Lp - \pi(Dp + dp) \quad (3-5)$$

ベルトの種類・長さが決定したので、最後の項目となるベルト幅の選定を行った。

$$b \geq \frac{Pd \times 25.4}{Pr} \quad (3-6)$$

$$Pr = \frac{\pi}{60} \times dp \times n_1 \times T_a \quad (3-7)$$

式 (3-3) から (3-7) より、従動プーリーの大きさおよび使用するベルトの種類・長さ・幅が決定した。

テンションプーリーの取り付け方は、図 3.1 で示したようにベルトの下外側からプーリーを押し当て、バネの弾性力を用いて適切な張力を維持するといった構造を想定しているので、ベルト・プーリーを取り付けたベルト型ユークリーターに下から取り付ける形で駆動部分にテンションプーリーを組み込んだ。また、使用するバネは通販サイトの選定概要に従い⁽¹⁵⁾、自由長・許容最大荷重・バネ定数などの基準を満たすものを購入し使用した。最後に新たなベルト型ユークリーターの構造設計の微調整を行った。ソリッドワークスにてモデリングした最終的な部品類を以下図 3.6～3.10 に、それらを組み立てた全体図を図 3.11 に示す。

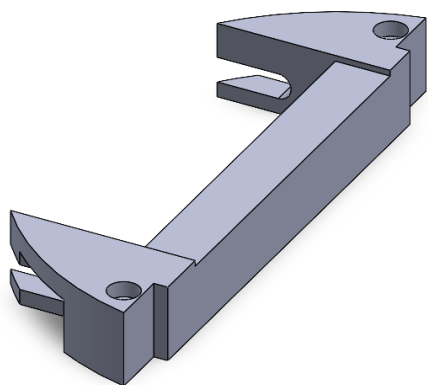


図 3.6 駆動部

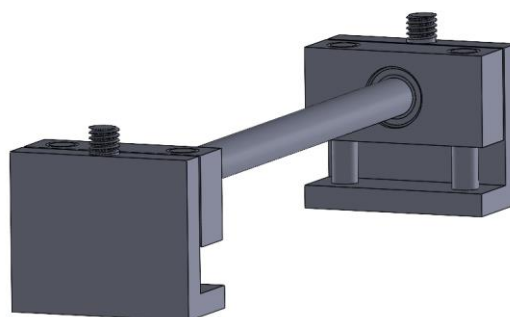


図 3.7 テンションプーリー

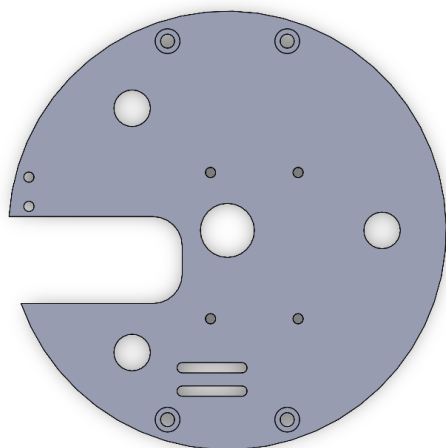


図 3.8 2段目

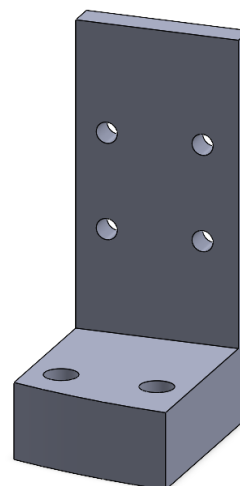


図 3.9 サーボモーター治具

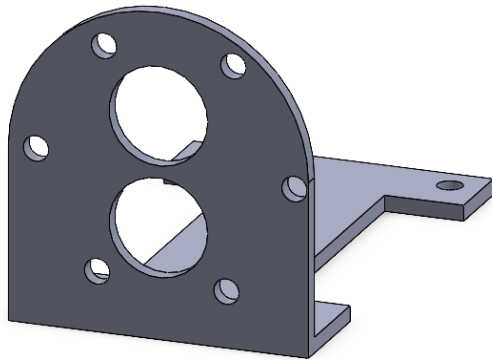


図 3.10 モーター用マウント

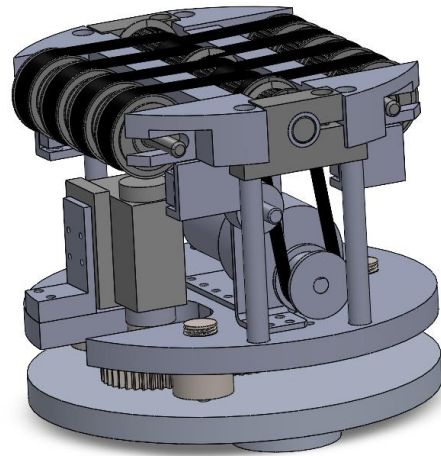


図 3.11 ベルト型 4 号機

ベルト型ユークリーター4号機的设计が完了したため、3号機とのベルト占有面積の比較を行った。その様子を図 3.12 に示す。

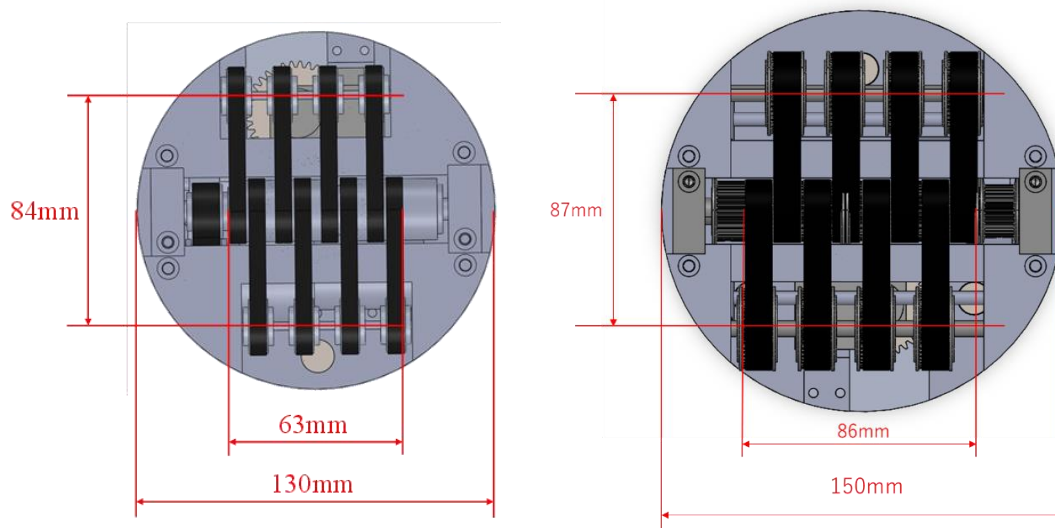


図 3.12 ベルト型の占有面積の比較

ベルト占有面積は3号機が約 2000 mm^2 、新たに製作を行った4号機では約 3500 mm^2 となっている。またユークリーターの上面部の面積に対しベルトの占有割合も15%から20%に増加している。

3.3 製作

新たなベルト型ユークリーター的设计を終えたのち、3Dプリンターを使用して、試作機の製作に取りかかった。

今回製作に使用した 3D プリンターは「FLASHFORGE Adventurer 4」であり、球体型を製作した際に使用していた「ANYCUBIC 3D PRINTING Photon MonoX」とは全くの別物となっている。2つの 3D プリンターを図 3.13 図 3.14 に示す。

以前使用していた 3D プリンターは「光造形方式」と呼ばれる種類のもので、基体を液体のレジンに浸漬し、レジンに所定の画が出力された光を照射して基体に固め、その基体を上昇させて積層させながら造形するものであった。

一方、今回使用した Adventurer 4 は「熱溶解積層方式」の 3D プリンターであり、加熱したノズルから PLA 材料を吐出しながら製作するものである。3D プリンターによって製作したベルト型 4 号機を図 3.15 に示す。



図 3.13 光造形型



図 3.14 熱溶解積層

表 使用した 3D プリンターの比較

	Adventurer4	Photon MonoX
造形方式	熱溶解積層方式	光造形方式
接続式	Wi-Fi、イーサネット、USB メモリ	USB Wifi
XY 分解度	0.1 (mm)	0.050 (mm) 3840×2400(4K)
Z 軸精度	0.05~0.4 (mm)	0.01 (mm)
印刷スピード	150 (mm/s)	MAX 60 (mm/h)
定格パワー	320 (W)	120 (W)
本体サイズ	500 (mm)×470(mm)×540 (mm)	270 (mm)×290 (mm)×475 (mm)
造形サイズ	220 (mm)×200 (mm)×250 (mm)	192 (mm)×120 (mm)×250 (mm)
パッケージ体積	220×200×250 (mm)	375×395×600 (mm)
本体重さ	22 (kg)	10.7 (kg)
材料	樹脂	UV レジン

3.4 余談

また、余談ではあるが本研究は3Dプリンターとの格闘といってしまうても過言ではなかった。3DプリンターというものはCADデータを元に樹脂などで立体造形する機器であるが、些細なことで造形に失敗してしまうことが少なくない。例えば材料であるフィラメントは湿気に弱く吸湿すると劣化するという特性を持っている。そのほか気温によっても造形時の設定を変更しなければならない。春・夏場の高い気温であれば初期設定で特に問題なく造形出来るのだが、問題は冬場である。気温が下がり、ノズルで熱されたフィラメントが冷えて硬化するまでの時間が他の季節と比べて早く、そのため上手く造形出来ずに3Dプリンターの設定の見直しを何度となくさせられた。これらの特性によって、使用初期は問題なく使用できていたにも関わらず、ある日突然使用できなくなったという経験が幾度かあった。まとめると、夏場は湿度、冬場は気温という問題が立ちはだかり、フィラメントの種類の設定にも悩まされ、3Dプリンターの設定究明に多くの時間を割かれてしまった。

3Dプリンターを使用し造形した部品とミスミで購入した部品を組み合わせで出来たベルト型ユークリーター4号機を図3.15に示す。



図 3.15 ベルト型ユークリーター4号機

第4章 実験

4.1 重量

ベルト型ユークリーター4号機が製作できたので、搬送能力を評価する実験を行った。ベルト型ユークリーターはベルトコンベアの構造を参考に設計している。そのため、ベルト型ユークリーターの駆動時における負荷トルク等の計算式はベルトコンベアにおいて使用されている式をそのまま使用してきた。ところで、図4.1のようにベルトコンベアではベルトと支持台が接しており、接触面すなわち摺動面での摩擦が非常に大きく存在する。一方、ベルト型ユークリーターではプーリー間距離が短く物体が支持台と接触することなく搬送されることが予測される。また支持台の高さをベルト面より僅かに低く設計したため、そもそも搬送の際に摺動面が発生しない、若しくは発生したとしても一般的なベルトコンベアのものよりは摩擦が小さくなることが予想される。つまり、ベルトと支持台間の摩擦係数 μ_1 がベルトコンベアの物より小さくなり、その結果ベルトコンベアよりも小さなトルクで物を搬送できる可能性がある。しかしベルト型ユークリーター3号機における全体の静止摩擦係数 μ は0.23ほどという結果になった。一方、ベルトコンベアの全体静止摩擦係数 μ は一般的に0.2~0.3ほどである⁽¹⁶⁾。つまりユークリーターとベルトコンベアはほぼ同等の静止摩擦係数に収まり、搬送の際に必要なトルクは先の予想に反してベルトコンベアと遜色ないという結果になってしまった。

このような結果となってしまった理由として、ベルトの張力が適切に調整出来ていないこと、またベルトと支持台間の距離を十分にとれていないため、搬送時にベルトと支持台が接触し、摩擦が発生している可能性があるとして先行研究にて考察されていた。

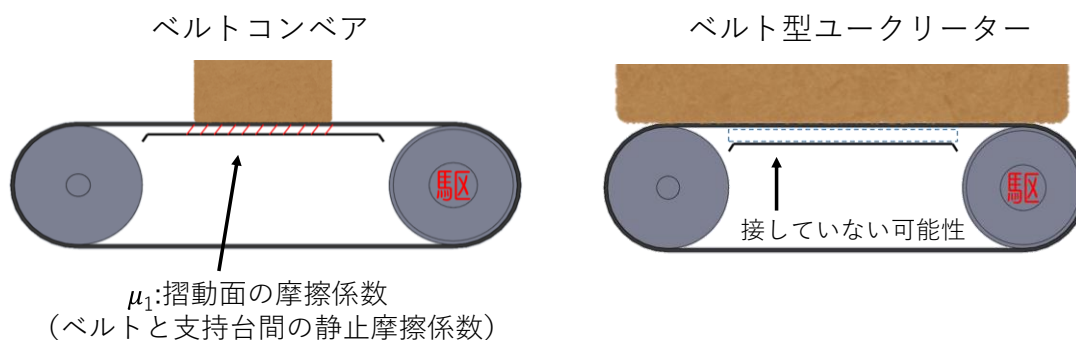


図 4.1 ベルトコンベアとユークリーターの摺動面の違い

新たに製作したベルト型ユークリーター4号機における全体の最大静止摩擦係数 μ (駆動軸の回転にくさ)を調べるための実験を行った。実験の様子を図4.1に、実験の概略図を図4.2に示す。

実験方法としては、ユークリーター上の錘を引っ張るように滑車を介しておもりを吊り下げる。ユークリーター上の錘の重さ M に対し、駆動プーリーが回転し始めたときの吊り下げた錘の重さ m をそれぞれ測定することで駆動係数 μ を導出した。

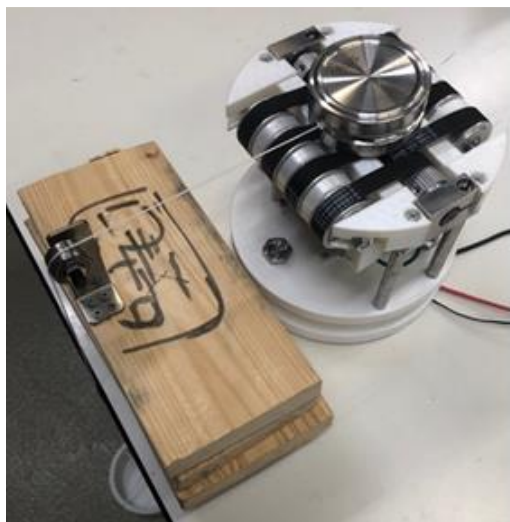


図 4.2 実験 1 の様子

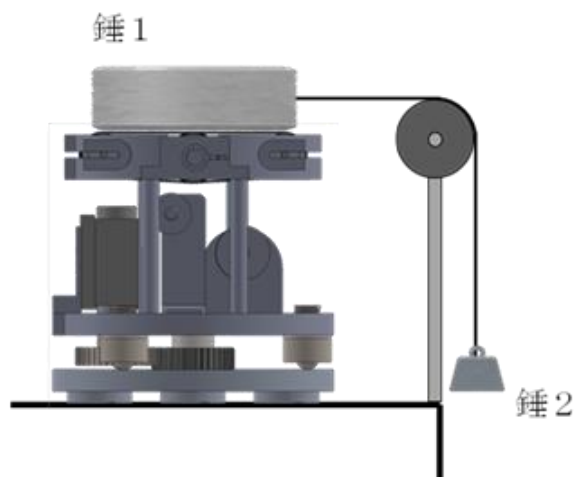


図 4.3 実験 1 の概略図

おもり M の質量は $0.5\sim 5\text{ kg}$ までの 0.5 kg 刻みで増加させ、その時々におもり M が動き出した時のおもり m の質量それぞれを用いて最大静止摩擦係数 μ を算出した。算出の際に用いた式を式(4-1) (4-2)に示す。

$$\mu Mg = mg \quad (4-1)$$

$$\mu = \frac{m}{M} \quad (4-2)$$

ここで、先ほど最大静止摩擦係数 μ を駆動軸の回転のしやすさと記述したが、実際に摩擦が発生する際には駆動軸・従動軸の回転の際に生じる摩擦 μ_1 、ベルト-プーリー間での摩擦 μ_2 、プーリーと回転軸の摩擦 μ_3 、ベルトと支持台間の摩擦 μ_4 、などとプーリーが回転しておもり M が動き出す際には多数の箇所摩擦が生じている。つまり実際の最大静止摩擦係数 μ はこれら同時多発的に発生する摩擦の和 (式 4-3) であると考えられる。

$$\sum_i^n \mu_i \quad (4-3)$$

4.1.2 実験結果

M と μ の関係を表とグラフとして図 4.4 に示す。先行研究であるベルト型ユークリーター3号機を比較するため、ベルト型ユークリーター3号機と4号機の測定結果を重ねている。

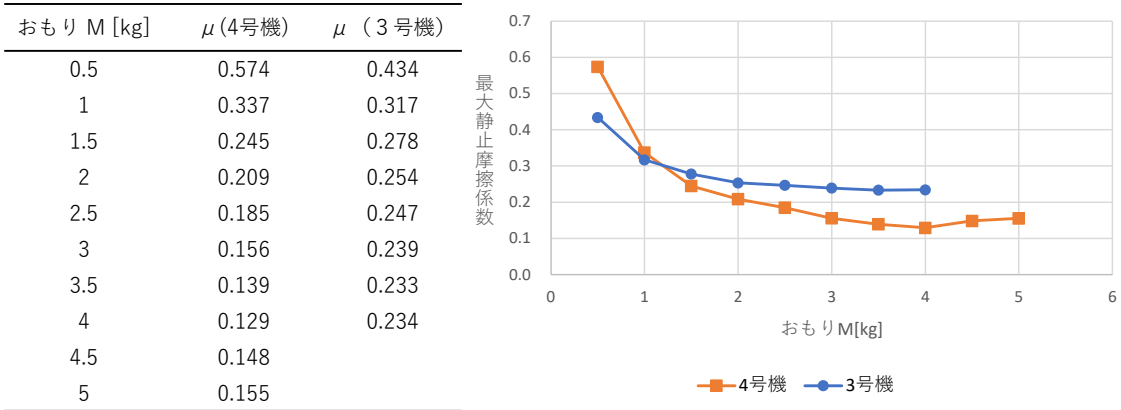


図 4.4 駆動プーリーが回転し始めた時のおもり M と最大静止摩擦係数

図を見ると、ベルト型ユークリーター4号機では3号機と比べ最大静止摩擦係数が小さくなっていることが分かる。3号機では0.23付近で収束した最大静止摩擦係数 μ であるが、4号機では0.13~0.15付近で収束した。

次に、4号機においてテンションプーリー等、駆動-従動間のベルト張力調整機構を取り外したものと利用したものによる測定結果を図 4.5 に示す。ところで、ベルト型ユークリーター4号機は、3号機で問題となっていたベルトの張力調整機構が搭載され、摺動面の摩擦も避けられる構造となっている。本実験を行うことにより、ベルトの張力調整機構の有用性を比較できる。

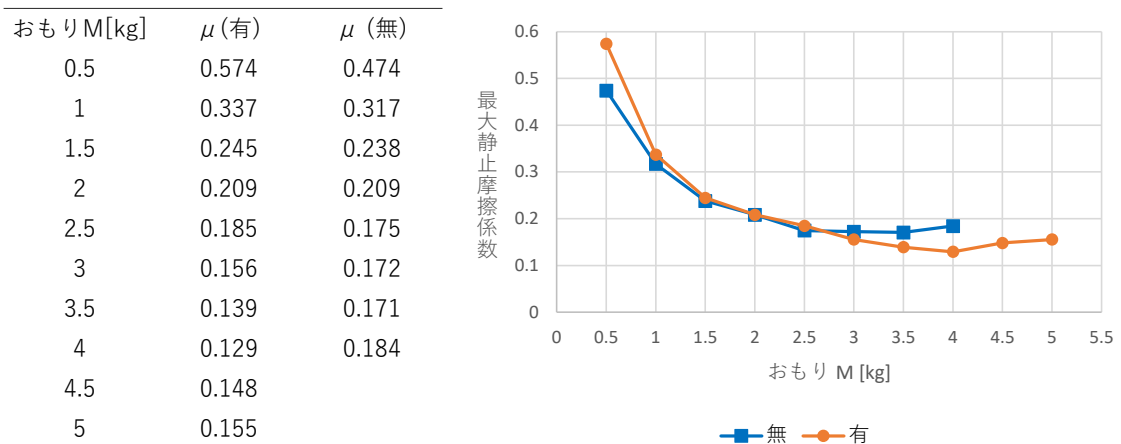


図 4.5 テンションプーリーの有無による最大静止摩擦係数の比較

図を見ると、おもり M が 3 kg まではテンションプーリーの有無で最大静止摩擦係数の大きな差は見られなかった。差が現れるのはおもりが 3.5 kg 以降の時で、最終的な最大静止

摩擦係数はテンションプーリーを用いる場合 0.13~0.15 付近に収束したが、テンションプーリーを用いない場合、0.17 付近で収束した。

また、ベルト型ユークリーター3号機、テンションプーリー付きベルト型ユークリーター4号機およびテンションプーリー無しベルト型ユークリーター4号機を用いて測定、算出した摺動面に搭載したおもり質量 M と吊り下げおもり質量 m の関係と最大静止摩擦係数 μ の比較図を図4.4、図4.5に示す。

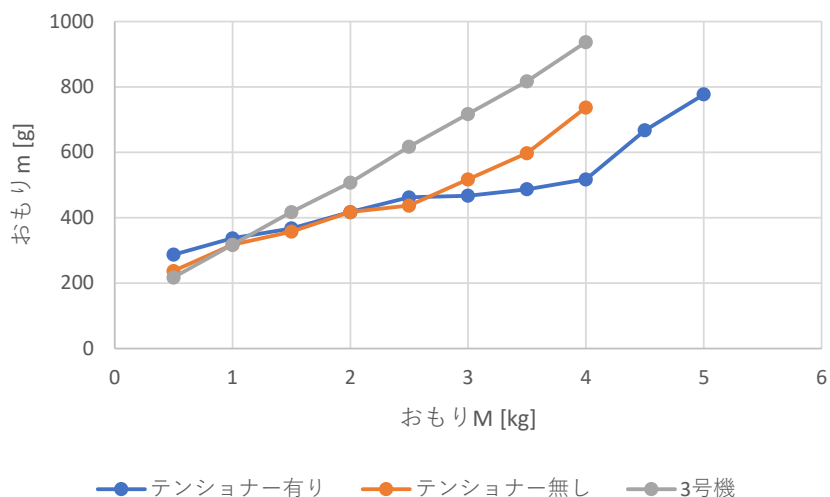


図 4.4 ベルト型ユークリーター3号機、テンションプーリー付きベルト型ユークリーター4号機およびテンションプーリー無しベルト型ユークリーター4号機の摺動面に搭載したおもり質量 M と吊り下げおもり質量 m の関係

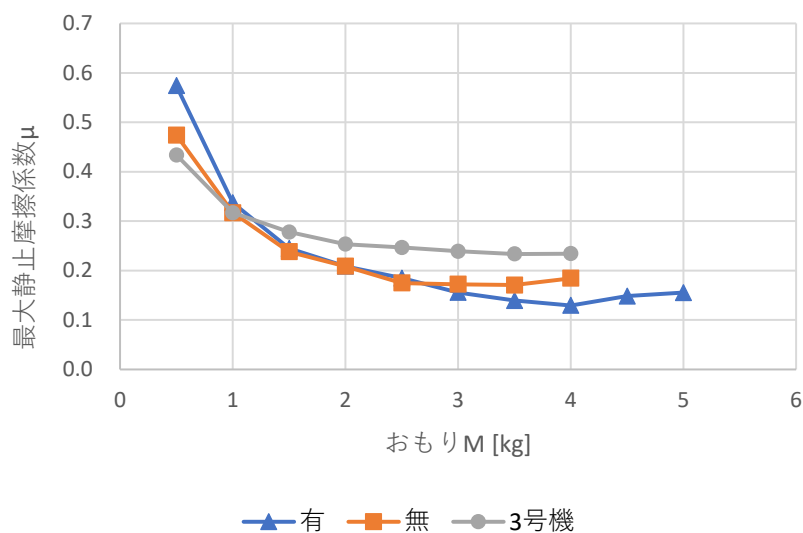


図 4.5 ベルト型ユークリーター3号機、テンションプーリー付きベルト型ユークリーター4号機およびテンションプーリー無しベルト型ユークリーター4号機の最大静止摩擦係数 μ の比較

4.1.3 考察

ベルト型ユークリーター4号機の開発において、当初の目標であった最大静止摩擦係数 μ を小さくし、ひいては稼働の際に必要なトルクの減少を達成した。

まず、おもり M が0.5 kgなどの軽量である際にテンションプーリー付きベルト型ユークリーター4号機が最も静止摩擦係数が大きく、ベルト型ユークリーター3号機が最も摩擦係数が小さく表れたことについて考察する。テンションプーリー無しベルト型ユークリーター4号機とベルト型ユークリーター3号機の2つを比較した時、3号機から4号機にかけて従動プーリーの径を大きくしたためにプーリー重量や抵抗が増加し、結果プーリーを回転させるためには吊り下げのおもり質量 m を3号機より増加させる必要があり、結果として最大静止摩擦係数 μ が大きくなってしまったことが考えられる。ベルト型ユークリーター4号機におけるテンションプーリーの有無による最大静止摩擦係数の差については、ベルトの外側からテンションプーリーを接触させているため、その間の摩擦抵抗が増加し、こちらもプーリーを動かすのに必要な荷重が増加したため最大静止摩擦係数 μ が大きくなってしまったことが考えられる。

次に、ユニット上にのせるおもりを増やしていった場合、最終的に最大静止摩擦係数が最も小さく収束するのがテンションプーリー付きベルト型4号機であったことについて考察する。1つ目の理由は、ベルトと支持台の距離を少し広げたことである。ベルト型3号機から4号機にかけて、支持台部分をベルト面の高さより1 mmほど低くなるように設計を行った。これにより摺動面が以前のベルト型と比べ小さくなったため摩擦抵抗が減少した可能性があげられる。2つ目は張力調整用のテンションプーリーを取り付けたことである。テンションプーリーを取り付けたことで、ベルトの張りが大きくなる。それに伴い、テンションプーリーが有る場合は無い場合に比べてユニットに積載するおもりの重さが増加していても摺動面で摩擦を小さく維持することができていたのだろうと考察する。

ベルト型4号機において、ベルトと支持台の接触が発生し始め、摺動面での摩擦が生じ始めるのはユニットに積載するおもりの質量 M が2.5~3 kg付近だと推察する。これは、図4.5のテンションプーリーの有無による最大静止摩擦係数の差を表したグラフにおいて、ユニットに積載するおもりの質量 M が0.5 kgを除き~3 kgまでテンションプーリーの有無によって有意な差が見られないことから裏付けられる。つまり搬送物が~3 kgの際、摺動面での摩擦は発生せず、その他プーリー・ベルト間やプーリー・回転軸間の摩擦が支配的となっていると考察する。

4.2 実験2 搬送重量・速度の測定

4.2.1 実験方法

製作したベルト型ユークリーター4号機を2台敷き詰めた状態で、搬送可能重量とその際の速度を測定した。先の実験ではテンションプーリーの有効性について調査するためテンションプーリーをはずして調査を行っていたが、本節ではテンションプーリー付きベルト型ユークリーター4号機を用いている。実験の様子を図4.7に示す。



図 4.7 搬送実験の様子

使用した錘は、金属製で直径 120 mm、高さ 15 mm である。直流安定化電源を使用し、電圧値は DC モーターの定格電圧である 7.2 V をかけた。また最大電流値を 1.59 A とした。ベルト型 3 号機の搬送実験の際に使用していた直流安定化電源の電流上限値が 1.59 A に設定されていたため、本実験でも同様の条件を採用し当時のデータと比較できるようにした。

搬送の様子をカメラで撮影し、搬送物であるおもりが所定の位置に達するまでの時間を計測した。使用したカメラは「iPhone 14」で動画再生ソフトは「Windows Media Player」を用いた。速度測定の方法としては、撮影した動画をコマ送りにし、測定距離に達するまでに要したフレーム数を測定、時間に換算し搬送速度を割り出した。60 fps で撮影を行ったため、1 フレームは 1/60 秒である。

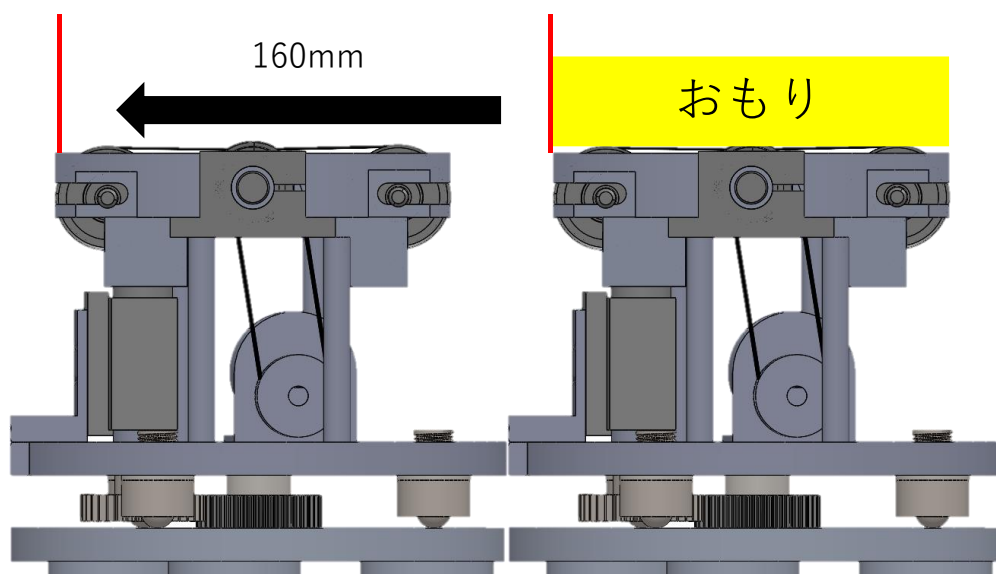


図 4.8 搬送実験の方法

4.2.2 実験結果

搬送したおもりの質量と速度をプロットした図を図 4.9 に示す。

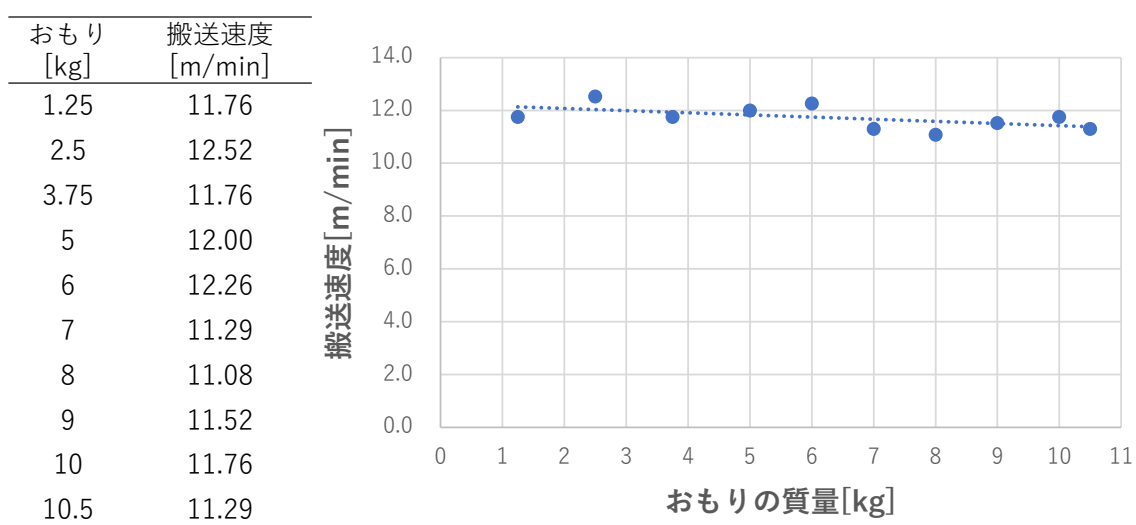


図 4.9 搬送速度の表とグラフ

研究室にある使用可能なおもりが 10.5 kg までしかなかったため 10.5 kg を超える測定は行えなかった。図 4.9 を見るとおもりの質量に対して搬送速度の低下は見られるものの、まだ余力を残していると思われ 11 kg 以上のものを搬送できる可能性は大いにある。

次に、ベルト型ユークリーター3号機と4号機における搬送されたおもりの質量とその速度の関係および、ベルト型ユークリーター4号機での理論速度をプロットした図を図 4.10 に示す。

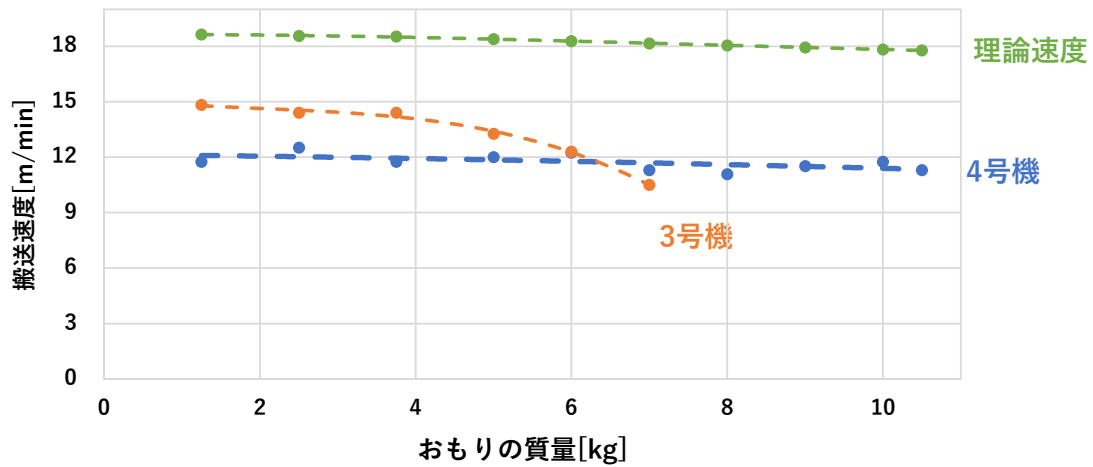


図 4.10 搬送速度の比較

図 4.10 を見ると、ベルト型 3 号機では最大で 7 kg までのおもりしか搬送できなかったのに対し、4 号機では 10.5 kg 以上のおもりを搬送できることを確認した。また搬送速度について、搬送物が 6 kg までのときはベルト型 3 号機の方が速く、12~15 m/min で搬送できるといった結果になった。3 号機では、おもりが 5 kg 以上になると搬送速度が大きく下がり始めたのに対し、4 号機ではそのような傾向が見られず、安定した搬送速度を示した。

4.2.3 考察

まず、搬送可能重量の増加について考察する。搬送物が動き出すときの条件は、式(4-3)であらわされるように有効張力が抗力を上回るときである⁽¹⁷⁾。

$$T_e \geq \mu_1 mg \quad (4-3)$$

$$e^{\mu_0 \theta} = \frac{T_t}{T_s} \quad (4-4)$$

$$T_e = T_t - T_s = T_t \left(1 - \frac{1}{e^{\mu_0 \theta}} \right) \quad (4-5)$$

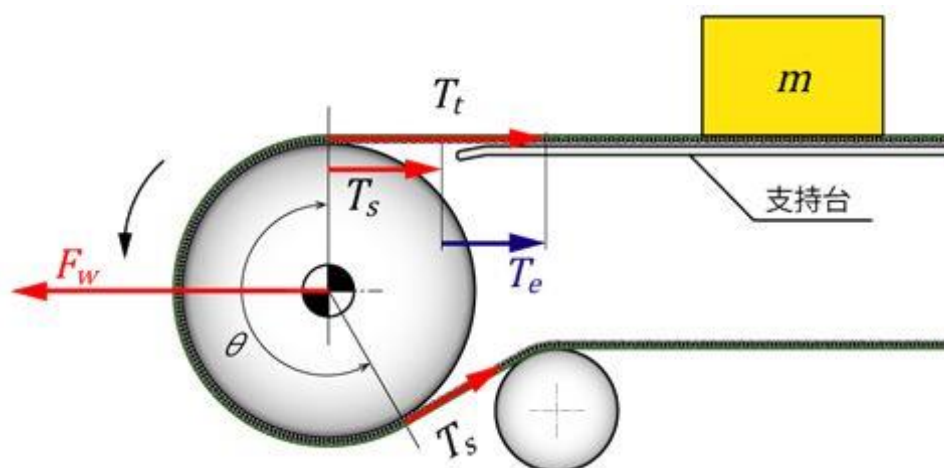


図 4.11 有効張力と搬送可能重量

T_t は張り側張力で、 T_s は緩み側張力、 μ_0 はベルトとプーリー間の最大静止摩擦係数である。図 4.11 に搬送と有効張力を図解したものを示す。ベルトコンベアは搬送の際に、回転の方向によってベルトに張力差が生じる。これを有効張力 T_e という。有効張力によってプーリーを回転させているが、この力が摺動面の摩擦力より大きい時に搬送物が動き出す⁽¹⁷⁾。 μ_1 は摺動面の摩擦係数、つまりベルトと支持台間の静止摩擦係数である。要するに式(4-3)が示すことは、有効張力がおもりの重量に起因する摩擦効力より大きい場合に限り搬送物が動き始めるということである。 μ_1 は、最大静止摩擦係数の測定実験（実験 1）から、ベルト型ユークリーター3号機よりも4号機の方が小さいことが判明している。また、有効張力 T_e について、図 4.11 のようにテンションプーリーを取り付けていることで、プーリーとベルトの巻き付け角が増加している。駆動部におけるベルトと支持台間の隙間の拡大とテンションプーリーの搭載、この2点の変更により有効張力 T_e が摩擦力 μ_1 より大きくなる場合が増え、結果的に搬送可能重量が7 kg から 10.5 kg 以上へと大幅に増加したと考えられる。

次に、搬送速度の理論値について解説する。

まず、実験 1 において測定した最大静止摩擦係数を用いて、タイミングベルト・プーリー駆動でのモーターに発生する負荷トルクを算出した。その際に使用した式を式(4-6)(4-7)に示す。

$$F = \mu mg \tag{4-6}$$

$$T_L = \frac{FD}{2\eta} \tag{4-7}$$

効率 η はタイミングベルトの伝導効率である 98%とした。これらの式から算出した負荷トルクを図 3.4 の DC モーターの特性グラフに代入し、モーターの1分間あたりの回転数を読

み取った。このモーターの回転数を式(4-8)に代入し、算出できた速度をベルト型ユークリーター4号機での理論搬送速度とした。

$$V_T = N_T \times \{(D_{O.D.} + 2t_b) \times 3.14\} \quad (4-8)$$

$D_{O.D.}$ は駆動プーリー外径、 t_b はベルトの厚さである。

以下、理論搬送速度と実測値に大きな差が生まれてしまった理由について考察する。

実測値と理論値の差が大きい理由の1つは、理論速度の算出の際にモーターの加速トルクを加味していないためであると考察する。加速トルクとは、モーターの加減速の際に一瞬のみ発生するトルクのことである。ベルトコンベアのように、搬送物がユニット上に長い時間滞在する搬送機器の場合、理論値算出にあまり大きな影響を及ぼさないかもしれないが、ベルト型ユークリーターは搬送物のユニット上滞在時間が0.5秒ほどと短いため加速トルクの影響が大きく、理論値計算の際に考慮しなければならない可能性が高い。しかしながら、加速トルクの算出は式(4-9)で表されるので、モーターの角加速度が必要となる。

$$\text{加速トルク} = \text{負荷慣性モーメント } J \times \text{モーターの角加速度} \quad (4-9)$$

しかし現在使用しているモーターはDCモーターであり、厳密な角加速度は不明なため、現時点で加速トルクを求めることは出来なかった。この問題を解決するためにはモーターの情報をより詳しく調査する必要がある。

理論値との差異が大きい2つ目の理由は、最大静止摩擦係数の実験(実験1)でモータープーリーの摩擦を考慮できていないためであると考察する。実験1において、静止摩擦係数を測定する際、モーター自体にブレーキが搭載されており、モータープーリーと伝達プーリーを外した状態で実験を行っている。理論値計算はその状態で測定した最大静止摩擦係数を使用しているため、実測値との差が大きく開いてしまった可能性がある。

最後に、1.25 kgなど搬送物の重量が小さいとき、ベルト型4号機での搬送速度が3号機と比較して遅くなっていることについて考察する。

一般的なベルトコンベアの速度は以下の式(4-10)より求めることができる。一方ベルト型3号機から4号機への改良に際し、モーターや駆動プーリーなどの搬送能力の変更に直結する部分には手を加えていない。つまり式(4-10)から得られる速度は変わらず搬送速度の低下の要因は従動プーリーの巨大化もしくはテンションプーリーを取り付けたことによる摩擦の増加のどちらか、または両方であると考察する。

$$V = D \times \pi \times n \times \frac{1}{k} \quad (4-10)$$

D は駆動プーリー径、 n はモーターの回転数、 k は減速比である。減速比 k はベルト型ユークリーターの場合、モータープーリーの歯数と伝達プーリーの歯数の比である。駆動プーリー

一の円周とその時間当たりの回転数を掛け、駆動プーリーが回転して 1 分間に進んだ距離を求めて速度が算出される。

たしかにベルト型ユークリーター3号機から4号機に改良するにあたり、従動プーリーの直径を3号機の 20.37 mm のものから 30.56 mm のものに大きく変更した。そのためプーリーの回転しにくさである慣性モーメントが増加し、慣性モーメントが増加したことでモーターの加速に必要なトルクが増加してしまった可能性が高い。しかしモーターに入力する最大電力を3号機の時から変更していないため加速しづらくなり、4号機での搬送速度はやや遅くなってしまったのではないかと考察する。

余談となるが、今使用している DC モーターを将来ブラシレスモーターに変更しようという話が浮上している。DC モーターとブラシレスモーターの大きな相違点は回転速度の安定性である。DC モーターは負荷が変化すると回転速度も変化してしまう。実際、図 4.10 を見てもおもりの重さが大きくなるほど速度の低下が見られる。一方ブラシレスモーターでは、フィードバック制御が行われているため負荷が変化しても安定した速度制御を行うことが出来る。

第5章 他の搬送装置との比較

搬送実験によって新調したベルト型ユークリーターのパフォーマンスが判明したため、これまでに開発してきたユークリーターや汎用ベルトコンベア等と搬送能力や仕様の比較を行ってみました。比較結果を表(5-1)にまとめる。

表 5-1 各種ユークリーターとその他現行搬送装置の
搬送能力と仕様の比較

比較項目	球体型 3号機 (2020.3)	ベルト型 3号機 (2021.3)	ベルト型 4号機 (2023.2)	実用化 必要水準	ベルト コンベア (IHI製 SCU型)	Celluveyor (cellumation)	XPlanar (Beckhoff Automation)
①搬送速度 (m/min)	~3.0	10~15	11~13	20	3~25	≈2	≈2
②搬送荷重 (kg/m)	~40	~60	>~90	100	150	≈100	≈15
②'搬送荷重 (kg/m ²)	~330	~620	>~970	~1000	—	~1800	~76
③搬送用筐体必要性	無	無	無	—	無	無	有
④ユニット間連動性	△	△	△	◎	◎	○	○
⑤輸送可能次元数	2	2	2	1	1	2	2
⑥各ユニット独立駆動	○	○	○	×	×	×	○
⑦電源自律分散化	×	×	×	×	×	×	×
⑧自立運転	×	×	×	×	×	×	×

- ① 1分間に何m搬送可能か
- ② 装置長1mあたり何kgまで搬送可能か
- ②' 装置面積1m²あたり何kgまで搬送可能か
- ③ 搬送の際に移動対象物を乗せる筐体が必要か：有 必ず必要 無 無くてもよい
- ④ ユニット同士が連動しているか：◎ 長年の蓄積有 ○ 十分なされている △ 開発途上
- ⑤ 何次元に搬送可能か：1 X方向のみ 2 XY方向
- ⑥ 各ユニット同士独立して搬送しているか：○ している × していない
- ⑦ 電源が分散しているか：○ されている × されていない
- ⑧ 自動運転をしているか：○ されている × されていない

ユークリーターに関して、②は錘の質量を錘の直径で割った値、②'は錘の質量を錘の面積で割った値である。

項目内の実用化必要水準について、こちらは広く流通しているベルトコンベアをいくつかピックアップし、それらの代表的な値を掲載している。

①搬送速度の比較より、ベルト型ユークリーター4号機は3号機と比べやや速度が低下したものの大きく減少したわけではなく、ベルトコンベアの搬送速度と比較しても遜色ない程度の性能であるということがわかった。また、先行研究である球体型ユークリーターや類似研究の

Celluveyor や XPlanar と比較しても優位に立っているということが判明した。搬送速度が速いことで時間あたりに搬送できる物体の数も多く、広い場所で使用した場合においてもストレス無く使用できることの指標になる。また、搬送速度においては使用するモーターを変更することでさらなる向上が見込める。

次に②搬送荷重(kg/m)の比較より、ベルト型ユークリーター3号機から1.5倍以上の90 kg/m以上の物体を搬送可能となり、実用化必要水準をほぼ満たすことが出来た。また②'搬送荷重(kg/m²)の比較について、こちらもベルト型ユークリーター4号機では970 kg/m²以上まで性能が向上しており、実用化必要水準である1000 kg/m²をほぼ満たすことが出来ている。これはベルト面積の増加・張力調整機構の開発による功績といえる。

③～⑧に関しては、ユークリーターの構造面では無く制御・回路面での開発が進むことで発展すると見込まれる。特に⑦電源自律分散化、⑧自律運転が可能になった場合、他の全方向搬送装置との大きな相違点となり、ユークリーターの優位性は揺るぎない物になると期待する。

第6章 結言

6.1 まとめ

本研究は徒歩圏内や密集地帯における新たな移動・搬送手段「ユークリーター」の開発に関する研究である。本研究では先行研究であるベルト型ユークリーター3号機の課題点の解決、さらなる搬送能力の向上を目標に機構の開発を行った。その後搬送性能の測定、他の装置との比較を行った。以下に各章のまとめを記す。

第1章

第1章では移動手段の歴史について記し、その後現代の主な移動手段・搬送手段の活躍領域について記述し、移動・搬送ツールが未発達な領域である徒歩圏内・密集地帯での新たな移動・搬送手段となる「ユークリーター」の経緯についてまとめた。

第2章

第2章では Cellveyor や XPlanar といった類似研究となる機器に関する記述を行い、その後先行研究となる「ユークリーター」の説明を行った。「ユークリーター」は「映画ドラえもん のび太と銀河超特急」の中で登場したベアリングロードというひみつ道具を基に考案された。全方向搬送可能な装置を敷き詰めて利用するというシステムであり、自由度が高く、他の装置と比べ高い安全性を確保することが期待されるツールである。映画内でのベアリングロードは球体が敷き詰められている状態であったため、それに倣うように球体型ユークリーターが開発された。しかし、球体を用いた機構では動力の伝達効率が低く、高水準での搬送能力が見込めない可能性を感じ、球体型ユークリーターから派生する形でベルト型ユークリーターが開発されたことなど、ユークリーターの開発動向について記した。

第3章

第3章では先行研究までに開発されたベルト型ユークリーター3号機の課題点の洗い出し、それを解決するための機構の提案をし、ベルト型ユークリーター4号機的设计・試作を行った。ユークリーター上面部の面積におけるベルト割合の増加、張力調整機構の搭載がベルト型3号機からの主な変更点となる。設計時、理論式を用いてベルトやバネなどの部品選定を行った。ベルト型ユークリーター4号機の試作機は3Dプリンターを用いて製作した。

第4章

第4章では前章で製作したユークリーター4号機を用いて2種類の実験を行った。1つ目の最大静止摩擦係数を求める実験から、支持台とベルトの距離を離したことによる摺動面での摩擦の減少が判明した。また張力調整機構を取り付けたことにより、積載荷重が増加した際の摺動面による摩擦の減少を確認した。2つ目の実験である搬送速度・搬送可能重量の

測定においては、搬送速度は3号機よりやや遅くなってしまったものの、搬送可能重量は7 kg から 10.5 kg 以上へと大きく増加した。搬送可能重量が大きく増加した要因として、最大静止摩擦係数の減少とベルトの張力が大きく関係していると考えた。また、搬送物が6 kg 以下の際、ベルト型4号機の搬送速度が3号機よりも劣ってしまっている要因としては、従動プーリーの大型化が原因であると考えた。プーリーの大型化を行うことで慣性モーメントが増加し、モーターの加速トルクが増加する。それによりモーターの回転数が減少することで結果的に搬送速度の低下につながってしまったのではないかと考察した。

第5章

第5章では前章で判明したベルト型ユークリーター4号機の性能と他の搬送機器との性能比較を行った。そこで一般的なベルトコンベアや他の全方向搬送装置などと比較しても遜色ない程度の搬送能力を確保できていることを示した。

ベルト型3号機から4号機への改良で、搬送荷重を大きく増加させられたのが最大の功績であり、実用化必要水準をほぼ満たせるようになった。搬送速度については、使用するモーターの選定、入力する電力を増加することで比較的簡単に能力向上が見込めると考える。

6.2 展望

6.2.1 機構改良についての展望

本研究により、ベルト型ユークリーター1ユニットの基礎構造はおおよそ整ったと自負する。搬送能力として、現在実用化されている他の搬送装置と同等の性能を持たせることが出来ている。モーターの変更や入力電力の増加などによってさらなる搬送能力の向上が期待できるため、ベルト型ユークリーターの構造面における段階としてはほぼ完成に近づいているのではないだろうか。ユニット1台の組み立てが煩雑な点やユークリーター1台を製作するのに必要なコストが大きい点を改善すれば、今後民間で幅広く使用されることも期待出来る。

6.2.2 制御についての展望

制御面での目標として、DCモーターとサーボモーターの同時併用、つまり搬送と方位決定を同時に行うことがあげられる。現在ベルト型ユークリーター4号機のユニット数は2台しか無く、駆動や方位の制御が必要な条件下での搬送実験を行っていない。そのため、ユニットを増台し、実際に想定される状況下での搬送実験を行うなどの研究が実用化のためには必要である。全方向搬送装置の類似研究である Cellveyor や XPlanar などよりも先行して複数の物体を同時にあらゆる方向へ搬送できるような制御プログラムや回路の開発を目指してもらいたい。

参考文献

- (1) 吉本翔斗：「未来的移動手段を想定した球体による革新的駆動伝達機構の提案」高知工科大学 卒業論文 2016
- (2) 藤川涼平：「球体伝達機構と全方向移動装置を用いた次世代移動手段の開発」高知工科大学大学院 修士論文、2017
- (3) 佐藤雅也：「次世代移動手段「ベアリングロード」の構造解析」高知工科大学 卒業論文 2017
- (4) 秋山将太郎：「球体を用いた伝達機構の高効率化」高知工科大学 卒業論文 2017
- (5) 竹中克昭：「次世代型全方向輸送機構の開発」高知工科大学大学院 修士論文 2019
- (6) 長嶋晋也：「球体駆動機構を用いた次世代移動手段の開発」高知工科大学 卒業論文 2019
- (7) 狩野大輝：「球体を用いた敷詰型全方向搬送機構の開発」高知工科大学大学院 修士論文 2020
- (8) 鈴鹿紅音：「全方向移動システムの為の回路設計と制御・通信手段の開発」高知工科大学大学院 修士論文 2020
- (9) 亀岡正樹：「全方向搬送装置へのセンサの設置と制御機構開発」高知工科大学 卒業論文 2021
- (10) 高井友輝：「全方向搬送機器における太陽電池を用いた電力の自給自足化」高知工科大学 卒業論文 2021
- (11) 石井和磨：「ベルトを用いた全方向搬送装置の開発」高知工科大学大学院 修士論文 2021
- (12) 澤田陸斗：「全方向運搬装置のルート決定アルゴリズムの開発に向けた基礎研究」高知工科大学 卒業論文 2022
- (13) 和仁原季也：「全方向搬送装置ユークリーターの制御システムの開発」高知工科大学大学院 修士論文 2022
- (14) ミスミ 伝動 タイミングベルトの選定方法 1
https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/technical_data/td03/a0095.html
- (15) ミスミ 引っ張りばね、圧縮ばね選定のポイント（選定概要）
https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/machine_design/md05/g0101.html
- (16) オリエンタルモーター 選定事例ープーリ機構
https://www.orientalmotor.co.jp/tech/reference/sizing_motor07/
- (17) ベルト伝動技術懇話会
<http://www.sbte.jp/archives/qanda/%E5%B9%B3%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%99%E3%82%A2%E3%81%AB%E3%81%8A%E3%81%84%E3%81%A6%E3%80%81%E9%A7%86%E5%8B%95%E3%83%97%E3%83%BC%E3%83%A%E3%81%A8%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%88>

謝辞

本研究は筆者が高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻知能機械システム工学コース材料革新サステナブルテクノロジー研究室において、川原村敏幸教授の指導の下で行われたものである。

川原村敏幸教授には指導教員として本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始ご指導いただきました。厚く御礼申し上げます。研究活動を通して、人間として少しは成長できたかと思えます。先生の物事への取り組み方や考えなどを取り入れ、今後の人生に活かしていきたいと思えます。本研究室に所属してから本当にお世話になりました。本当にありがとうございました。

同研究室に所属している劉麗さん、劉小嬌さんにはなかなか英語ができない私に対して日本語でコミュニケーションを図ってくださり、拙い英語をくみ取っていただき本当にありがとうございました。

同研究室の先輩である安岡龍哉さんには論文発表会の発表練習などで数多く指導していただきました。博士課程を辿る人として尊敬できる方であると同時に、飲み会での威厳の損ない具合が非常に面白い先輩でした。本当にありがとうございました。

同研究室の同期である市川怜司君、草下圭太君とはお互いを切磋琢磨して高め合ういい仲間でした。研究室での談笑など、楽しい時間を過ごすことができたのは同期がいてくれたからだと思います。今後は別の道を歩むこととなりますが、今まで過ごす時間を忘れることはないだろうと思えます。本当にありがとうございました。

同研究室の後輩である M1 の小林俊介君、小松正彦君、澤田陸斗君、須佐美大夢君、B4 の荒木穂孝君、岡田裕明君、梶亮介君、宮崎晃大君、B3 の宇佐美忠信君、大川我覚君、岡田達樹君、田上遼君、B2 の大橋亮介君には研究会でアドバイスをいただき、楽しい時間を過ごさせてもらいました。頼りない先輩だったとは思いますが、何気ない日々を楽しく過ごすことができたのは後輩たちのおかげだったと思えます。残りの学生生活を悔いのないように、有意義に過ごせることを願っています。

2021 年度に修士課程を修了された研究室の先輩である石井和磨さんには、本研究を行うにあたり石井さんが著した論文から多くを学ばせていただきました。ご卒業後も時々遊びに来てくださり、在学時のようにお酒を飲み交わしたのはいい思い出です。本当にありがとうございました。

私は、川原村研究室に在籍できて本当に良かったと思っています。研究室配属から3年半、有意義な日々を過ごすことができたと感じています。優秀な先輩や後輩に感化され研究活動を行うことができましたし、日常生活においても、研究会後に大人数で外食に行くこともしばしばあり、時には麻雀やポーカーを楽しむこともできました。こんな楽しい日々を送れたのはひとえに周囲の人々やそれを容認してくださった先生の人柄のおかげだと思います。今までありがとうございました。

最後に、大学院含め6年間の大学生活において金銭的・精神的に支えていただき、何不自由なく学生生活を謳歌させていただいた両親に感謝の意を表して謝辞と代えさせていただきます。