

2018（平成 30）年度 修士学位論文

次世代型全方向輸送機構の開発

Development of next-generation omnidirectional transport mechanism

2019 年 3 月 11 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻

知能機械システム工学コース

1215013 竹中 克昭

指導教員 川原村 敏幸

目次

第1章 序論.....	1
1.1 ベアリングロード	1
1.2 基本概念.....	1
1.3 ベアリングロード実現への過程	2
1.4 先行研究「球体型第一世代」	3
1.4.1 球体を用いる理由.....	3
1.4.2 構造原理.....	3
1.4.3 試作機.....	4
1.4.4 試運転のための試行錯誤.....	5
1.4.5 考察.....	9
1.5 本研究の目的.....	9
第2章ベアリングロード 新規性.....	10
2.1 ユビキタスな設置.....	10
2.2 自点起発事象予測方式（制御概念）	10
第3章 球体型第二世代.....	12
3.1 球体型第一世代の問題点.....	12
3.2 三次元 CAD 設計と二次元の図面.....	12
3.2.1 球体型第二世代 全体像.....	12
3.2.2 輸送面	15
3.2.3 輸送球体保持器.....	18
3.2.4 動力球体軸.....	21
3.2.5 動力球体軸支柱.....	22
3.2.6 方位決定機構 テーブル.....	23
3.3 試作機の製作.....	24
3.3.1 輸送機構.....	24
3.3.2 輸送部	25
3.3.3 動力部	26
3.3.4 方位決定機構	27
3.4 輸送試験	29
3.5 考察	31
3.5.1 輸送機構.....	31

3.5.2 輸送試験.....	3 2
第 4 章 ベルト型第一世代	3 3
4.1 球体型からベルト型への派生	3 3
4.2 機構の設計・試作.....	3 3
4.2.1 機構の形状.....	3 3
4.2.2 回転体	3 4
4.2.3 コンベア機構	3 5
4.2.4 動力伝達機構 試作	3 7
4.2.5 動力伝達機構 改良	3 9
4.4 輸送試験	4 2
4.5 考察	4 3
4.5.1 動力伝達機構	4 3
4.5.2 輸送試験.....	4 3
第 5 章 性能評価.....	4 4
5.1 伝達効率 算出方法	4 4
5.2 輸送試験	4 5
5.2.1 球体型第二世代.....	4 7
5.2.2 ベルト型第一世代	4 8
5.3 伝達効率算出 結果.....	4 9
5.3.1 球体型第二世代.....	4 9
5.3.2 ベルト型第一世代	4 9
5.4 考察	5 0
第 6 章 結論.....	5 1
参考文献	5 2
付録.....	5 3
Apx.1 球体の減速比 考え方.....	5 3
Apx.2 ベルト型第一世代 動力源の開発.....	5 6
Apx.3 Zortrax M200	5 8
Apx.4 uPrint by dimension.....	6 0
謝辞.....	6 1

第1章 序論

1.1 ベアリングロード

皆さんは、アニメの世界に登場する摩訶不思議な道具や特殊能力に憧れたことはないだろうか。その中でも日本国民であれば、藤子・F・不二雄作のアニメ「ドラえもん」を一度は目にしたことがあるだろう。「ドラえもん」の世界に登場する、様々なひみつ道具に魅せられ、未来で実現していたらいいなと考えたことはないだろうか。著者はそんな世界に憧れ、実現したいと思い本研究を行っている一人だ。

本研究において開発する機構は、1996年に公開された映画「ドラえもん のび太と銀河超特急」において登場した「ベアリングロード」というひみつ道具からヒントを得ている[1]。作中では、「ドリーマーズランド」という星で道路上を登場人物らが歩くことなく、移動する場面が描かれていた。この道路が「ベアリングロード」というひみつ道具だと作中では言われている。個々が自由に回転方向を選択する球体がデバイスとなり、地面に敷き詰められている。利用者は自身の進みたい方向へ進むことが可能なシステムである。これは、次世代の移動手段として非常に魅力的なものではないかと考え、本研究室で実現に向け開発を進めている。映画の一コマを図1-1に示す。

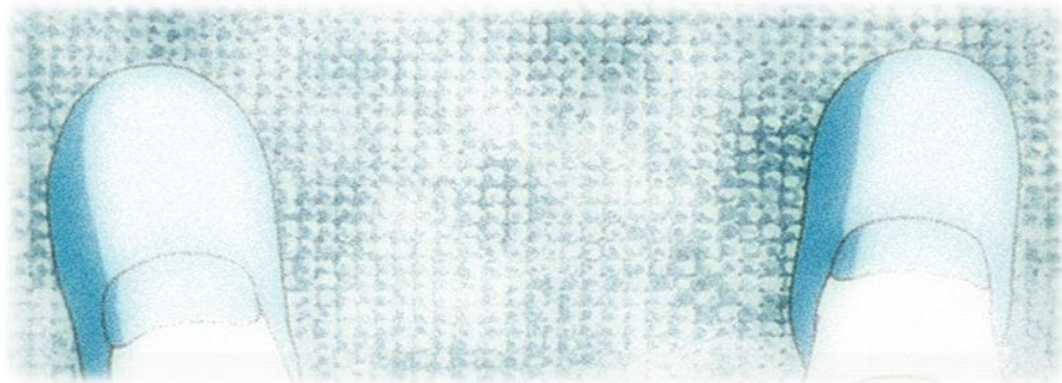


図1-1 球体を敷き詰めている映画の一コマ

1.2 基本概念

我々の研究室では、現状存在する技術や機械部品を用いて「ベアリングロード」を機構として再現できるのではないかと考えた。しかし、ベアリングロードを機構として開発する際に、構造のヒントとしたが映画の中で数コマ登場した程度であるため、想像可能な範囲で分析し、機構構築のための基本的な概念を考案した。

基本的な概念として考えられることは、床に敷き詰められている球体の回転力を上部に乗

っている対象者（モノ）に伝達し、前進する力を与えていることが前提条件である。次に、球体自身は回転方向に縛りがなく、自由に回転すること（自由度が高い）が理想的である。球体自身が回転力を生み出す機構であるのか、または球体が敷き詰めているさらに下の空間に何らかの動力源が存在しているかは、想像の域を超えるため自力で考案する他にない。このような機構・システムを構築することが可能となれば、「ベアリングロード」の実現も夢ではないのではない、と著者は考えている。

1.3 ベアリングロード実現への過程

床に敷き詰められている機構の上に対象物(者)を乗せ、輸送するベアリングロードのような次世代移動手段を現代技術で達成させるため、二つの既存類似技術を参考にした。対象が人間であるエスカレーターや空港などに設置されている動く歩道(三菱トラベーター：ムービングウォーク [2])と対象が物であるベルトコンベヤである。しかし、これらの機構は対象をあらかじめ決まっている一方向にのみ輸送する。そこで、エスカレーターやベルトコンベヤなどの機構に移動方向範囲の自由度の高さを組み込むことで、実現させられるのではないかと考えている。図 1-2 に三菱エスカレーター、図 1-3 に三菱トラベーターを示す。



図 1-2 三菱エスカレーター



図 1-3 三菱トラベーター

1.4 先行研究「球体型第一世代」

先行研究においてドラえもんが登場するベアリングロードを現代の技術で実現させるべく、球体を用いた球体同士の動力伝達を利用した三段構造を確立した [3] [4]。球体同士の接触による動力伝達を試み動作が可能であることを確認した。頭の中のイメージを具現化させ、今後の改良を可能にするべく試作した球体型のシステムである。その後、動力球に対してホイールの配置によって輸送球体の回転方向を制御することを可能にするべく、試行錯誤した [5]。先行研究で考案した機構を「球体型第一世代ベアリングロード」と名付けた。今後は「球体型第一世代」と記述する。

1.4.1 球体を用いる理由

本研究室で考案した機構には、球体を用いている。球体を用いた理由を二点挙げる。一つ目に元々参考をしているイメージが球体を敷き詰めていた点。二つ目に機構に輸送方向の自由度を持たせる為には、歯車を組み合わせることで実現が可能か検討した結果、機構が複雑かつ大掛かりなものになると考えた。そこで、球体が元々持つ回転方向の自由度の高さを生かすことを目指した。

1.4.2 構造原理

構造は三段構造となった。三段構造とした理由を、二点挙げる。一つ目に、球体一つ一つにモーターなどの動力源を組み込むことは小型化を考えた際、現実的ではない点。つまり、自由度を高く球体を回転させる方法を検討した結果、複数の球体に対し動力源と定めた球

体を接触させることを考えた。二つ目に、輸送部の球体一つの直径を小さくすることが可能な点。足を巻き込むなどの危険性を減らし、乗り心地も安定すると考えた。構造のイメージ図を図 1-4 に示す。

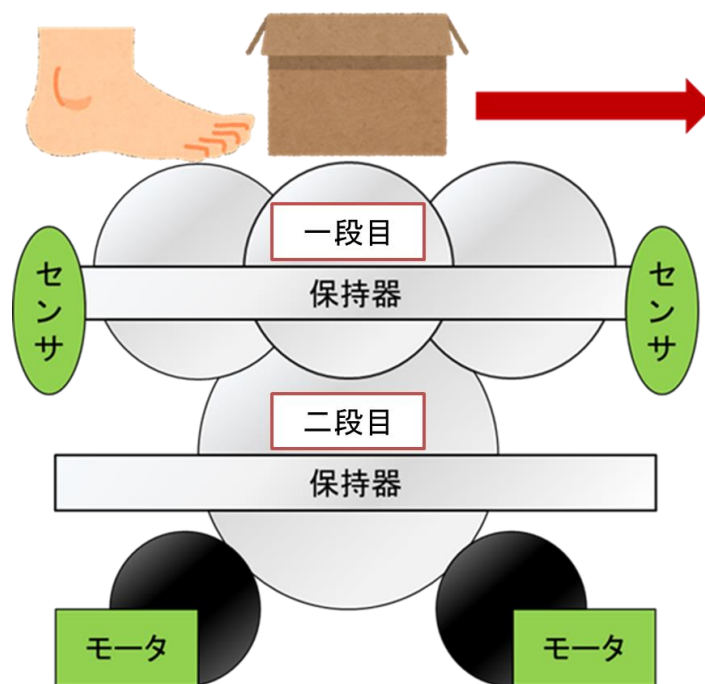


図 1-4 三段構造イメージ図

図 1-4 に示した構造の動作原理は、まず圧力または赤外線センサーなどにより対象物（モノ）を検知し、モーターが駆動する。次にモーターの回転力が二段目の球体に伝達する。一段目と二段目の球体が接触していることで、二段目の球体の回転力が一段目の球体に伝達し回転する。その後、対象物（モノ）に回転力が伝達されることで輸送する。

1.4.3 試作機

構造原理を基に製作した 3D モデルを図 1-5 に示す。さらに、図 1-5 に示したモデル図を基に、試作機を製作した。図 1-6 に製作した試作機を示す。

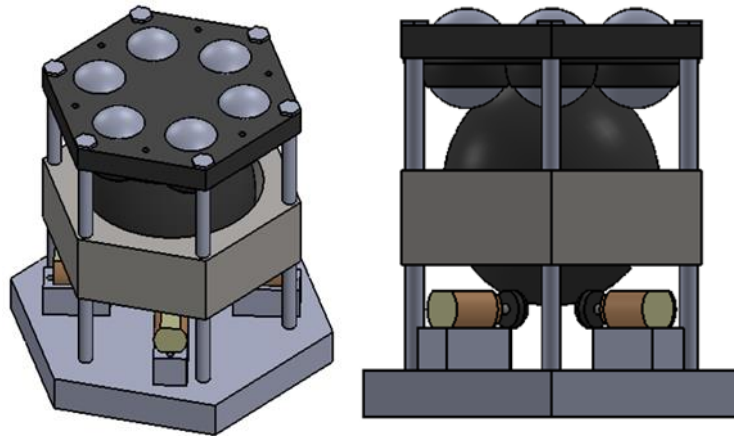


図 1-5 球体型第一世代 モデル図

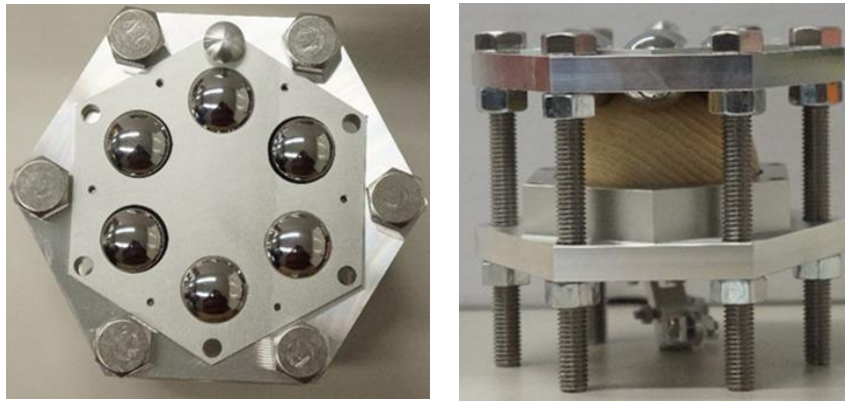


図 1-6 球体型第一世代 試作機

1.4.4 試運転のための試行錯誤

球体型第一世代の試作機に組み込まれていない動力部の構造の最適化を検討し、問題の解決に尽力した。

先ず、球体を自由度が高い状態で回転させる方法から検討した。球体を回転させることは容易に可能だが、自由度を高くすることが困難であった。そこで、考案した構造がモーターにホイールを接続し、複数個のホイールと球体を等間隔に接触させるものだ。この構造は、ホイールの回転力の合力によって球体の回転方向を制御することを狙ったものだ。

まず、SOLIDWORKS 上でシミュレーションを行い、基礎理論式としてホイール n 個の場合の一般式を構築した。ホイール n 個のイメージ図を図 1-7 に示す。さらに、球体の周速度

度
と
回
転
角
度
の

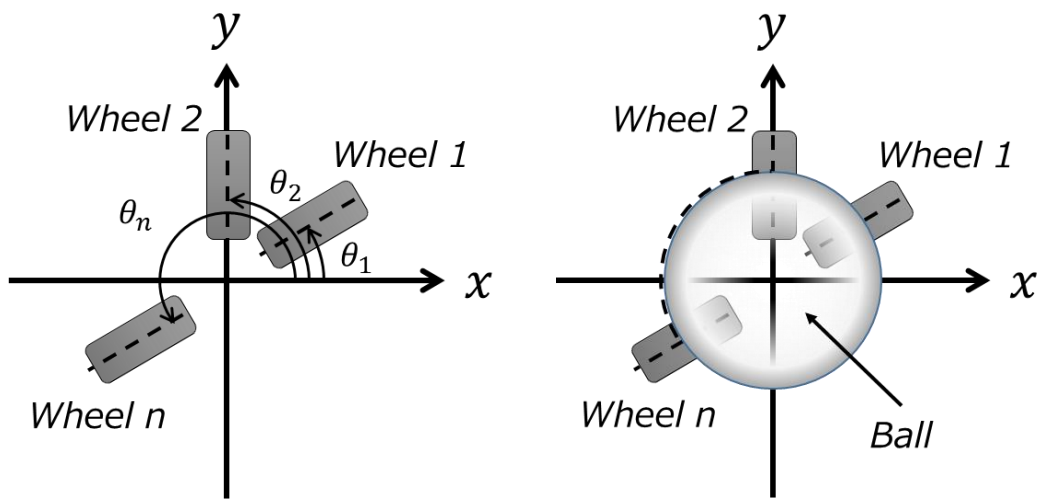


図 1-7 ホイール n 個の場合

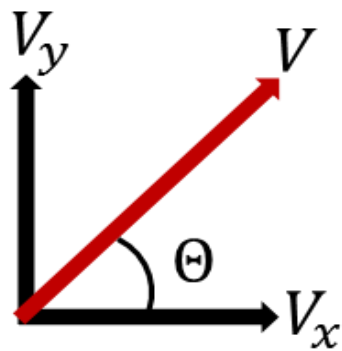


図 1-8 球体の周速度と回転角度の関係図

$$V_x = \sum_{i=1}^n r_n \omega_n \cos \theta_n \quad (1.1)$$

$$V_y = \sum_{i=1}^n r_n \omega_n \sin \theta_n \quad (1.2)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1.3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (1.4)$$

球体一個に対してホイール三個、四個の場合で球体の回転角度を考えた。図 1-9 にホイール三個の場合、図 1-10 にホイール四個の場合の球体とホイールの回転方向の関係をイメージ図として示す。

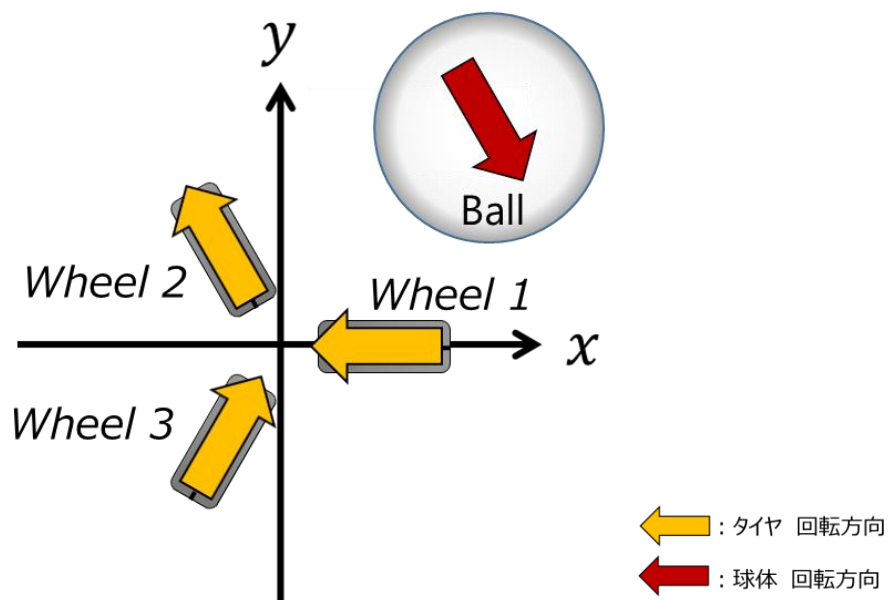


図 1-9 ホイール三個の場合 回転方向 イメージ図

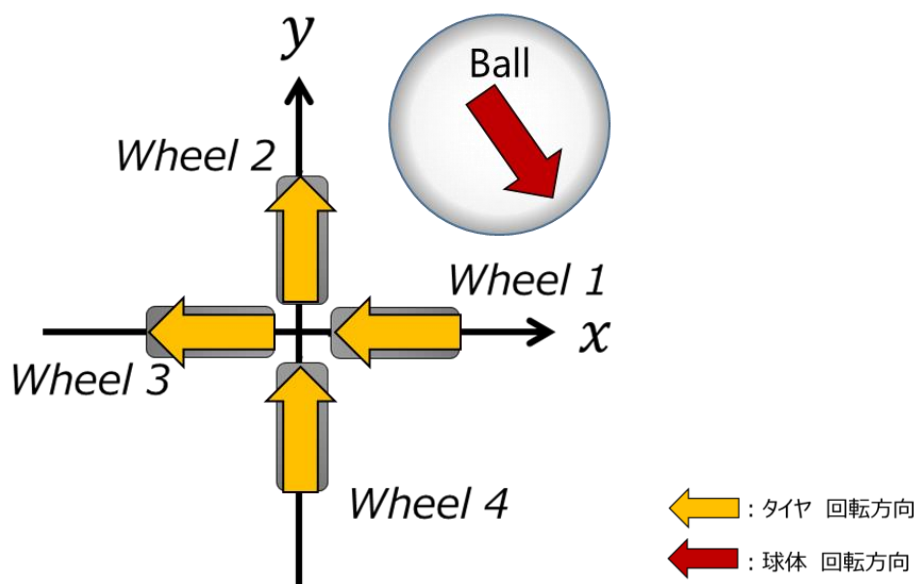


図 1-10 ホイール四個の場合 回転方向 イメージ図

次に、式 (1.1)、(1.2)、(1.4) を用い、図 1-9、図 1-10 に示した条件の球体の回転角度を算出した。なお、ホイール半径、角速度は一定とする。

(i) 図 1-9 ホイール三個の場合

ホイールの角度、0、120、240 [°]

$$\begin{aligned}V_x &= r\omega \cos 0^\circ + r(-\omega) \cos 120^\circ + r\omega \cos 240^\circ &= r\omega \\V_y &= r\omega \sin 0^\circ + r(-\omega) \sin 120^\circ + r\omega \sin 240^\circ &= -\sqrt{3}r\omega \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{-\sqrt{3}r\omega}{r\omega} = -60^\circ\end{aligned}$$

このことより、図 1-9 で示す球体の回転角度は -60 度と求まる。

(ii) 図 1-10 ホイール四個の場合

ホイールの角度、0、90、180、270 [°]

$$\begin{aligned}V_x &= r\omega \cos 0^\circ + r(-\omega) \cos 90^\circ + r(-\omega) \cos 180^\circ + r\omega \cos 270^\circ &= 2r\omega \\V_y &= r\omega \sin 0^\circ + r(-\omega) \sin 90^\circ + r(-\omega) \sin 180^\circ + r\omega \sin 270^\circ &= -2r\omega \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{-2r\omega}{2r\omega} = -45^\circ\end{aligned}$$

このことにより、図 1-10 で示す球体の回転角度は -45 度と求まる。以上の理論式から求めた計算結果が正しいか実証実験をした。実際に使用した実験系を図 1-11 に示す。



図 1-11 理論式実証実験系

図 1-9 に示すホイール三個の結果は、計算通りの回転角度で回転した。図 1-10 に示すホイール四個の結果は、球体は計算通りに回転せず、ほぼ 0° の角度に回転した。

1.4.5 考察

先行研究で製作された試作機の二段目の球体を回転させようと試みたが、滑らかに回転できなかった。このことから球体を保持している部品が関係していると考えた。保持している部品は、球体と同直径の面で接するお椀のような形状をしている。つまり、回転する球体を面で保持していることが原因で摩擦抵抗が大きくなっていると考えた。

次に、二段目の球体を回転させる機構を組み込んだ設計をしなければならない。今後、実際に輸送試験を行うことを考えた時に最も重要な問題点だと著者は考えている。そこでホイール配置によって球体の回転動力と方位制御を試みた。回転動力の伝達はできたが、方位制御を行うことができなかった。方位制御ができなかった原因は、実験系の精度が悪く球体とホイールが均等に接触していないことが考えられる。さらに、球体の材料、球体同士の接触圧力が重要だということも実際に製作し分かった。

1.5 本研究の目的

ベアリングロードの最終目標は、人が集まるショッピングモールや空港などで地面に敷き詰めることで人（者）や物などあらゆる「もの」を対象にした輸送を行うことである。そこで、本研究では最低でも一つの輸送機構を完成させ、物を対象とした輸送試験を行うことを目的とした。さらに、輸送試験の結果を用いて製作した輸送機構の性能評価を行うことである。

第2章ベアリングロード 新規性

2.1 ユビキタスな設置

ベアリングロードの輸送機構は人が片足で二機構踏むことを想定しているため、大きさは10 cm程度の予定である。自動車などの自動運転システムで問題となる「細い路地」、「人口密度の高い都会」、「整備されていない山道」などへも設置可能である。また、構造的に太陽光パネルを上面に組み込むことで太陽光発電により電源の確保が可能となれば、自立運転にすることも視野に入れている。さらに、雨や雪など気象現象の問題への対策として治水機能や融雪機能を組み込むことも検討中である。以上のことより、設置場所を選ぶことなく敷詰可能な移送手段である。

2.2 自点起発事象予測方式（制御概念）

自動車の自動運転システムは進行経路で何かが「いつ」、「どこから」、「どのような速度で来る」など様々な事象を予測する必要がある。つまり、運転者やAI等代理運転者自身が常に危険予測を行い回避することを前提に移動しなければならない。この予測方式の概念図を図2-1に示し、「他点起発事象予測方式」と呼ぶ。

一方でベアリングロードの場合、筐体自体を敷き詰めるので筐体自体が動くことはない。筐体上の対象物を隣の筐体へと輸送すればいいため、筐体が自身の周囲の情報を集め次の瞬間に筐体上でどのようなことが起こることのみ予測すればいい。この予測方式の概念図を図2-2に示し「自点起発事象予測方式」と呼ぶ。つまり、他点起発事象予測方式を用いる移動手段よりも安全の確保が容易にでき、運転者自身が未来を予測する負担を自動運転システムより減らすことができ、より安全な輸送が可能となる。

今後、自点起発事象予測方式のシステムの開発も必要である。

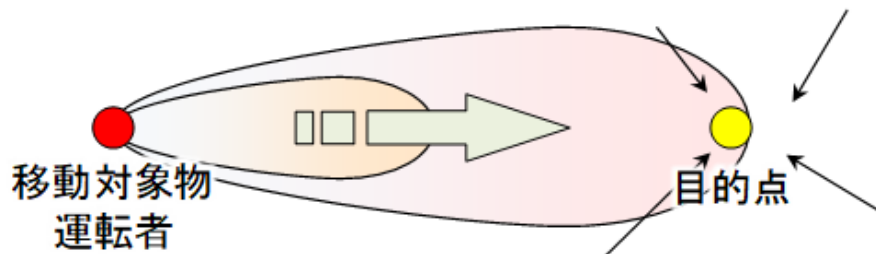


図 2-1 他点起発事象予測方式

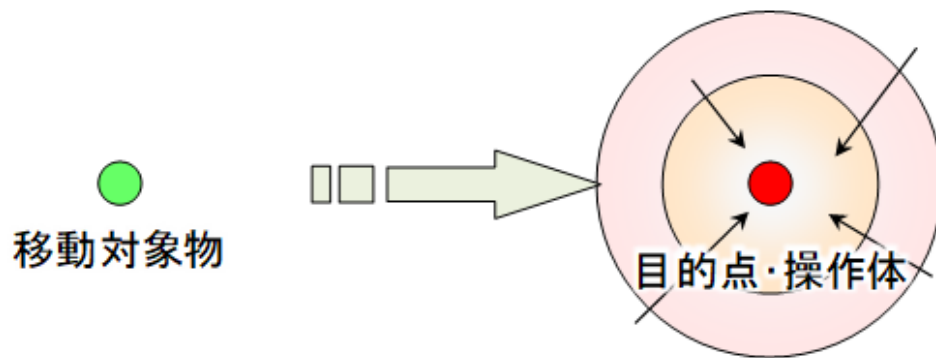


图 2-2 自点起発事象予測方式

第3章 球体型第二世代

3.1 球体型第一世代の問題点

先行研究では、球体型第一世代を実際に試作し組み立てていた。著者が学部生であった時には、球体型第一世代で手の付けていなかった動力部の構造の最適化を検討し、問題の解決に尽力した。その際、動力源を組み込むスペースや球体が回転することが困難だという機構的な問題点の大きさを痛感していた。そこで、まずは機構の改良に力を入れることとした。

第1章の先行研究で述べた球体型第一世代では、球体を回転させることが出来なかった。まずは、機構を1つ完成させ、「動かす」を実現することを目指した。そこで、早急に解決すべき問題点は、大きく三点ある。一つ目に、機構に組み込んでいる球体が回転する際に支持部が面であり、接触する面積が大きいため摩擦抵抗が大きくなり滑らかに回転していないこと。二つ目に、輸送対象物に接触する最上面に露出している球体の面積が小さく、十分な駆動力を生み出せていないこと。三つ目に、機構を作動させるために必要な動力源を組み込むことが出来ていないこと。これらを解決した新たな機構を設計、試作し輸送試験を行う。

3.2 三次元 CAD 設計と二次元の図面

設計の手順は、先ほど述べた問題点を解決するために 3D-CAD「SOLIDWORKS」を用い全体的な機構のイメージをモデルとして完成させた後に、各 부품のモデルを何度も造形することで、さらに理想的な機構へと近づけた。さらに、各 부품の形が決まり CAD 上で組み立て互いに干渉する部分に関して手を加え、試作機を製作する際にスムーズな進行を可能とするために努めた。さらに、三次元 CAD を用い設計したモデルを試作機として製作するために実際に、加工可能な図面へと改良し二次元の図面を引いた。

各 부품の CAD 図、各 부품の図面を載せ、問題点解決のために創意工夫をした点を説明する。[6]

3.2.1 球体型第二世代 全体像

最終的に全ての部品を組み込み完成させた球体型第二世代のモデルを図 3-1、3-2、3-3 に示す。球体型第一世代では動力伝達と方位決定を同時に制御しようと試みたが実現できなかったため、動力伝達と方位決定を分離した輸送機構として球体型第二世代を考案、設計した。動力伝達は動力球に軸を通し軸にモーターの動力を軸に伝えることで行う。方位決定は動力伝達部をテーブル上部に乗せモーターの動力で回転させ方位を決定することで行う。輸送球体を 70mm と動力球体を 60mm と設定し、輸送機構を大きく設計することで、問題点が明確にすることを目指す。今後、球体型第二世代を参考にした問題点の抽出を行い小型

化することを考えている。

実際に製作するための図面を図 3-4 に示す。

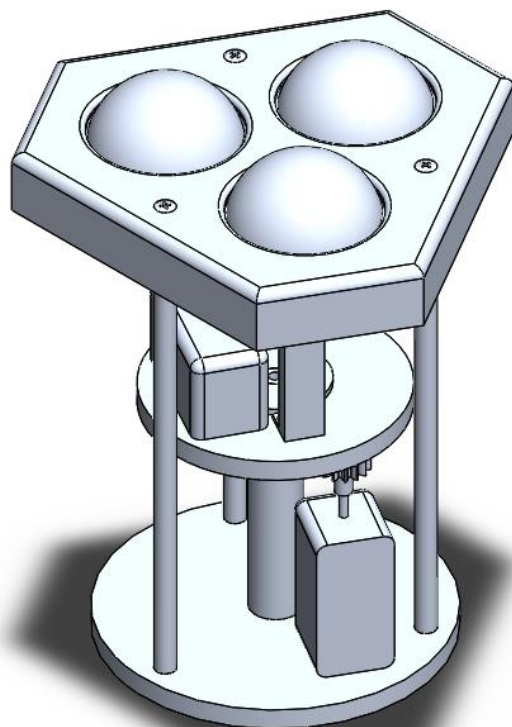


図 3-1 球体型第二世代 モデル等角図

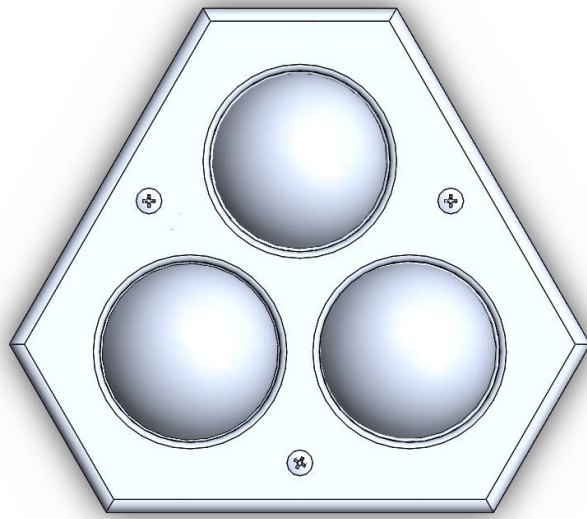


図 3-2 球体型第二世代 モデル上面図

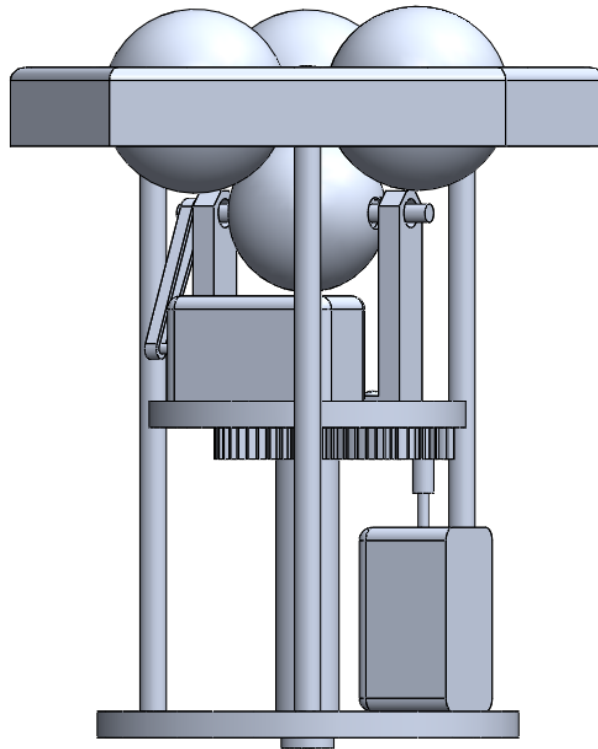


図 3-3 球体型第二世代 モデル側面図

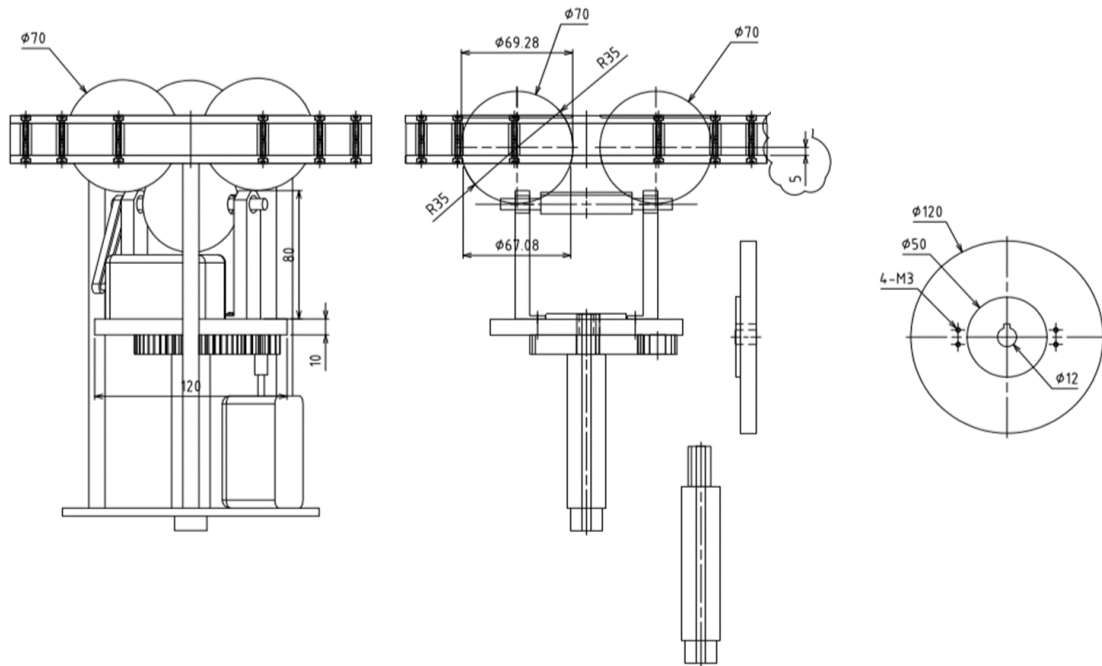


図 3-4 球体型第二世代 図面

3.2.2 輸送面

球体型第二世代の輸送機構で最上面に位置する部品である。輸送面のモデル上面図を図 3-5 に、モデル等角図を図 3-6 に示す。球体が飛び出ないよう球体の直径より穴の径を小さくしている。さらに、球体型第一世代では、球体が輸送面として面積が狭かったことを解決するべく、なるべく球体が上面へと出るような設計にしている。上面の球体のない面積を小さくすることを狙い、球体の数を六個から三つに減らし球体一個の直径を大きくすることにした。このことにより、図 3-5 に示すように上面の球体がない面積が少なくなった。

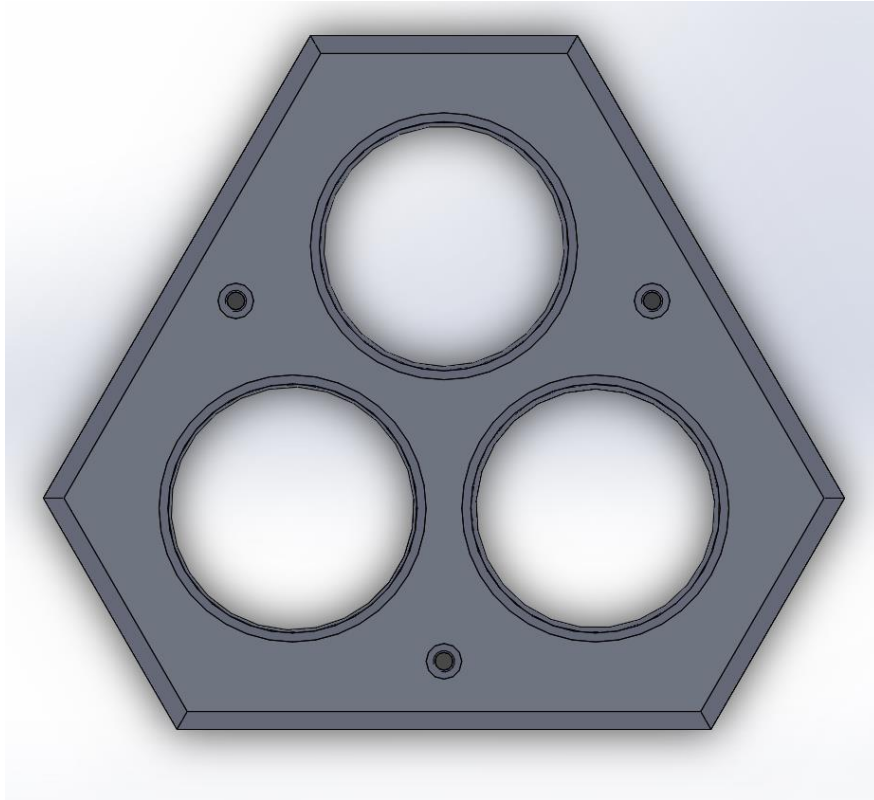


図 3-5 輸送面 モデル上面図

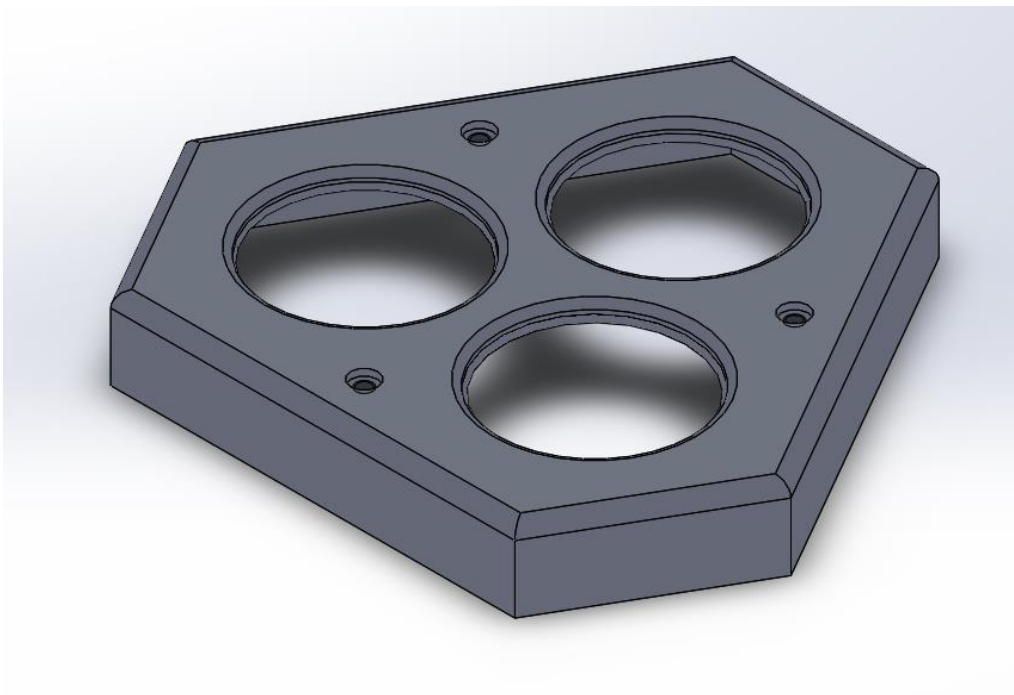


図 3-6 輸送面 モデル等角図

図 3-5、3-6 に示すモデル図を基に、実際に加工することを考慮した設計にした。球体伝達機構は、輸送球体を挟み込むような機構にしたため後述する輸送球体保持器との間にシャフト 両端めねじタイプ (PSSFGW8-20-M4-N4) を設置し、ネジで両サイドから締めることで球体が逃げないようにする構造だ。この構造を締結構造と呼ぶ。シャフトを図 3-7、設計図を図 3-8 に示す。



図 3-7 PSSFGW8-20

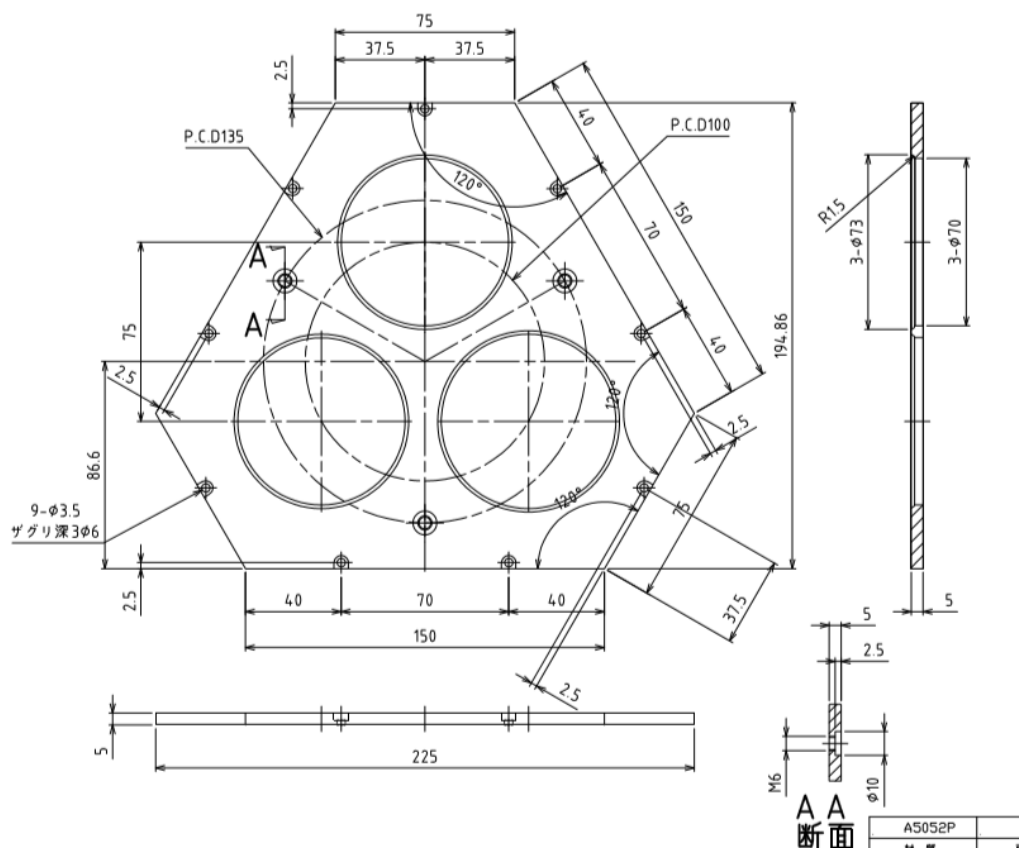


図 3-8 輸送面 図面

3.2.3 輸送球体保持器

球体型第二世代の輸送球体を支持する最も重要かつ設計に手間を使った部品である。球体型第一世代の問題点の抽出から前提条件として、「輸送球体と保持器の摩擦軽減」、「球体が落ちないように保持する」の二つを満たすことを最優先に考えた。

「輸送球体と保持器の摩擦軽減」を解決するために、回転機構に必ず組み込まれるベアリングの構造から発想を受け輸送球体を面ではなく点で保持することにした。つまり、輸送球体を複数の球体で支持することを考案した。そこで注目したのは、本体にスプリングを内蔵し、先端の球体は荷重を与えると本体の内部に沈み込むことで位置決め、固定するための機械要素部品の「プランジャ」である。図 3-9 に実際に機構に組み込んだ「PPSS-5」を示す。輸送球体一個にプランジャを等間隔に三つ配置する設計にした。主にプランジャは垂直方向の荷重の指示に使用されるが保持器の幅が厚くなることが考えられたため、保持器にある程度の角度をつけ組み込むことにした。摩擦軽減問題は解決した。

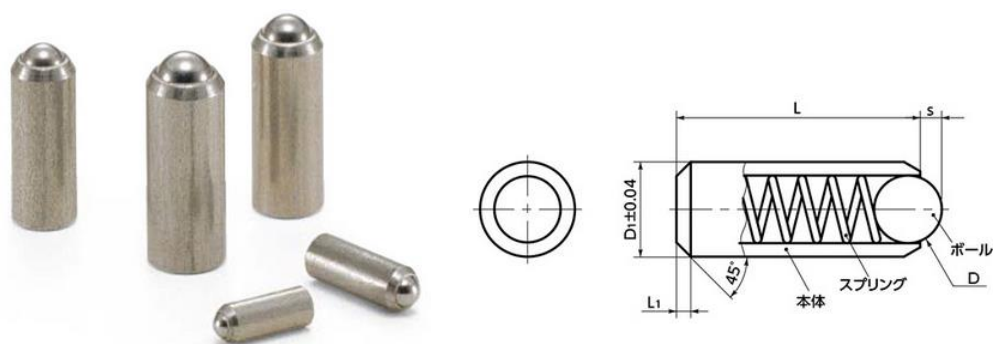


図 3-9 PPSS-5

次に、「球体が落ちないように保持する」を解決するために、保持器の輸送球体が動力球体と接触させるために空ける穴を輸送球体の直径より小さくした。以上の条件で設計した結果、動力球体が保持器に接触してしまうことが判明したので、さらに中央部に穴を開けた。完成した保持器のモデル図を図 3-10、3-11 に示す。

図 3-10、3-11 に示すモデル図を基に、実際に加工することを考慮した設計にした。プランジャは角度をつけ組み込むことを考えていたが、加工が困難だということで水平に圧入することとした。その他に輸送球体を締結構造にするためのネジ穴など追加で製図した。保持器の図面を図 3-12 に示す。

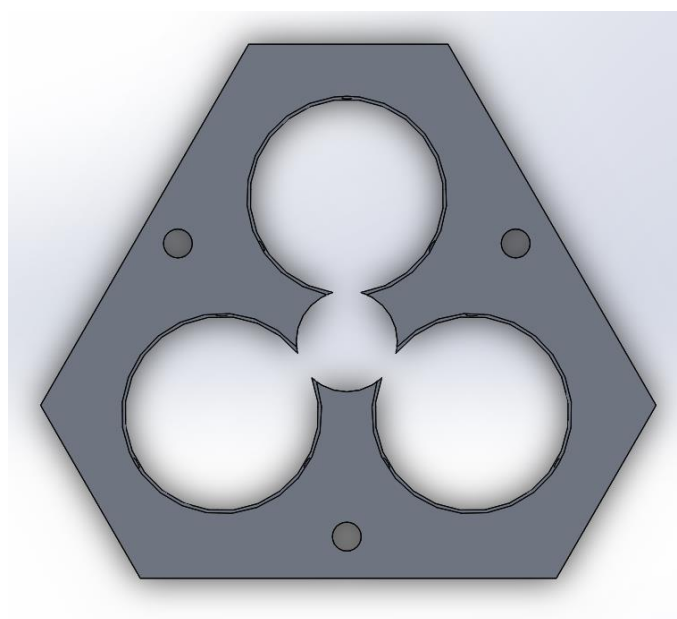


図 3-10 輸送球体保持器 モデル上面図

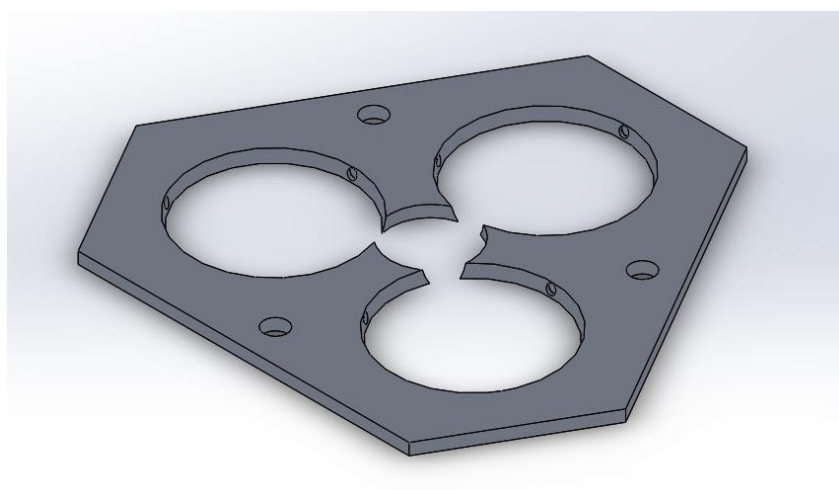


図 3-11 輸送球体保持器 モデル等角図

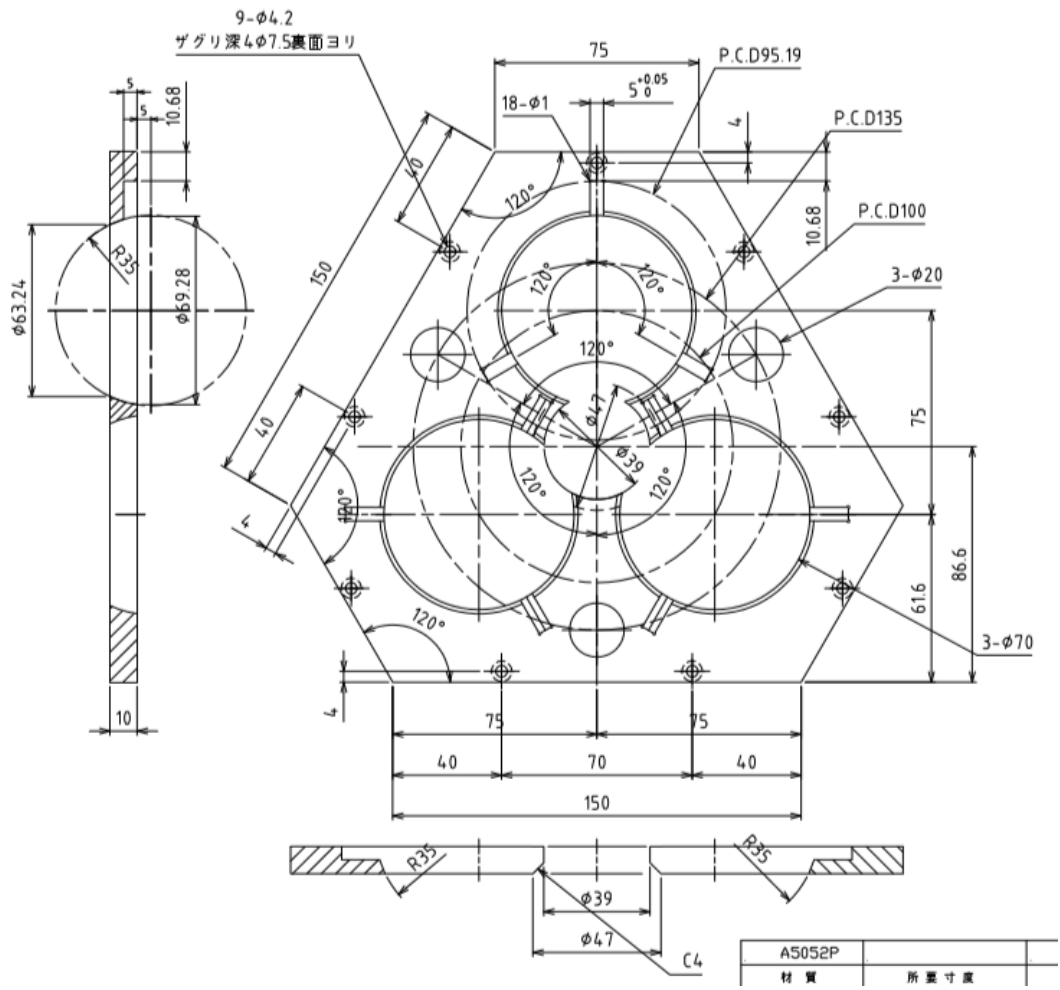


図 3-12 輸送球体保持器 図面

3.2.4 動力球体軸

安定して動力球体を回転させるために球体に軸を通すことにした。モデル図を図 3-13、
図面を図 3-14 に示す。動力球体軸は軸にキー溝を掘り、キーを取り付ける形で既製品を使用
することとした。

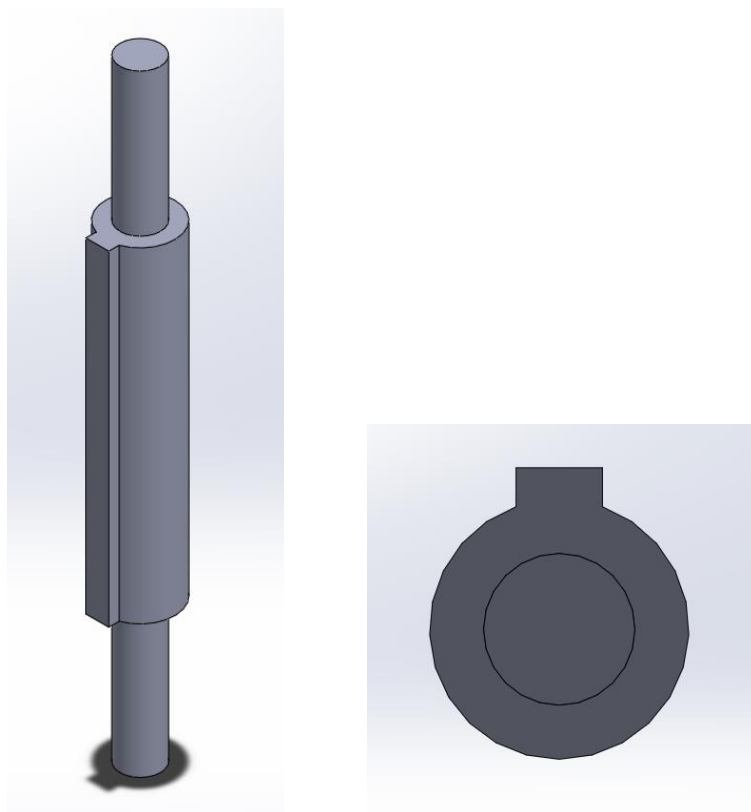


図 3-13 動力球体軸 モデル図

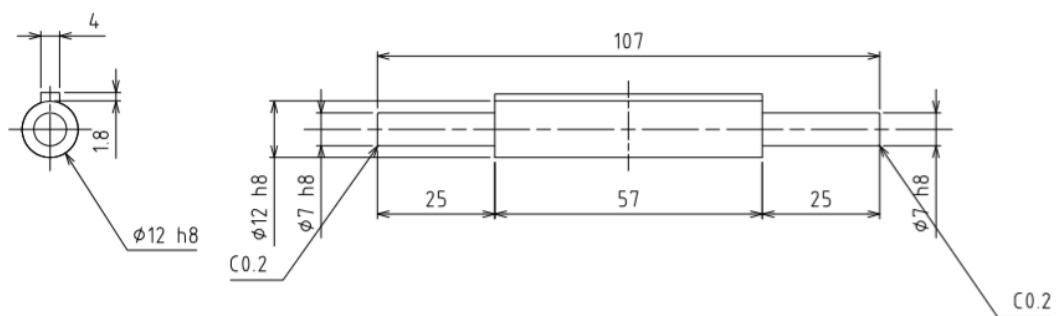


図 3-14 動力球体軸 図面

3.2.5 動力球体軸支柱

動力球体軸を支えるための支柱としてモデルを製作した。初めは長方形であったが、角が球体と接触してしまったため角をなくしている。モデル図を 3-15、図面を 3-16 に示す。

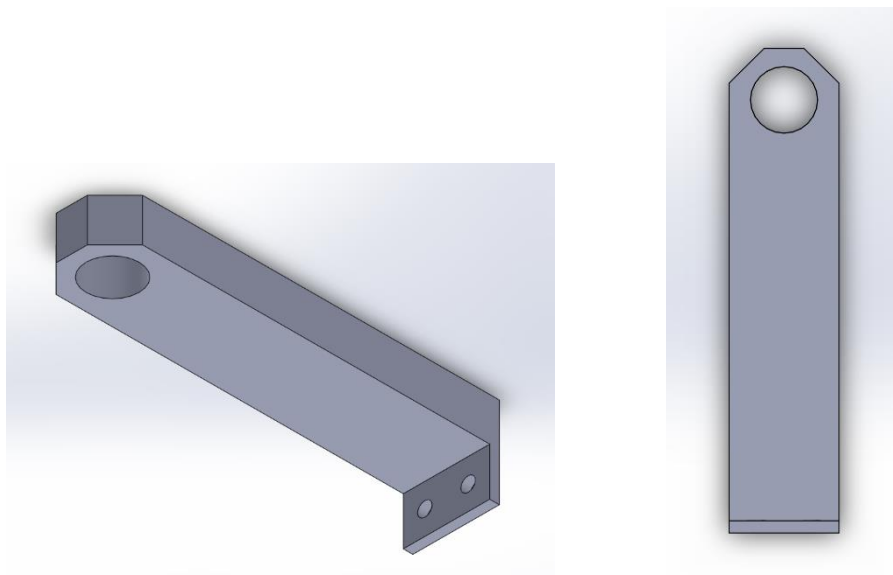


図 3-15 動力球体軸支柱 モデル図

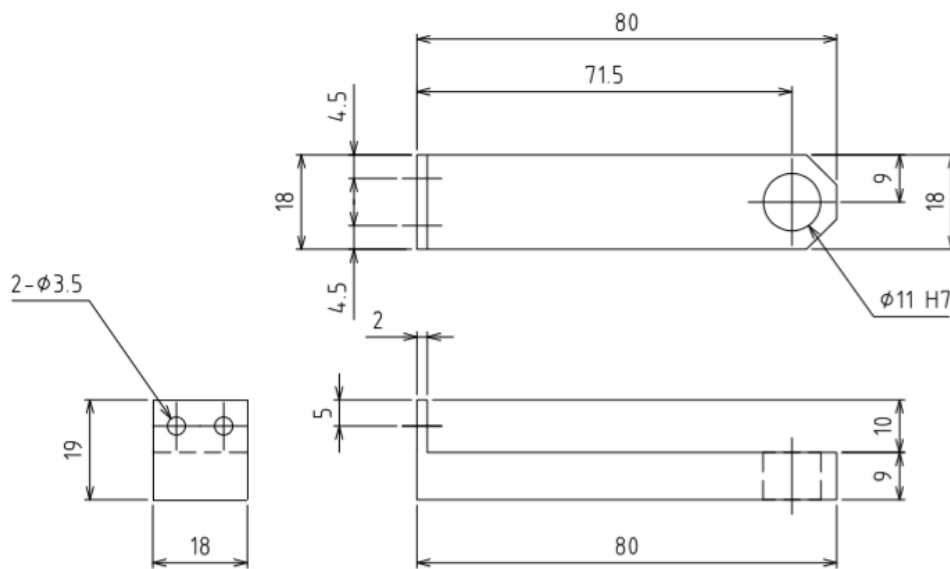


図 3-16 動力球体軸支柱 図面

3.2.6 方位決定機構 テーブル

球体型第二世代の動力供給源である動力球体と接続しているモーターを上部に設置し回転させることで、方位決定を変更する部品である。モデル図を図 3-17 に示す。モデル図を基に、実際に加工することを考慮した設計にした。初めに設計していた段差は必要ないと考えなくした。さらに、モーターを固定するためのネジ穴も追加した。方位決定には歯車を用いる。設計図を図 3-18 に示す。

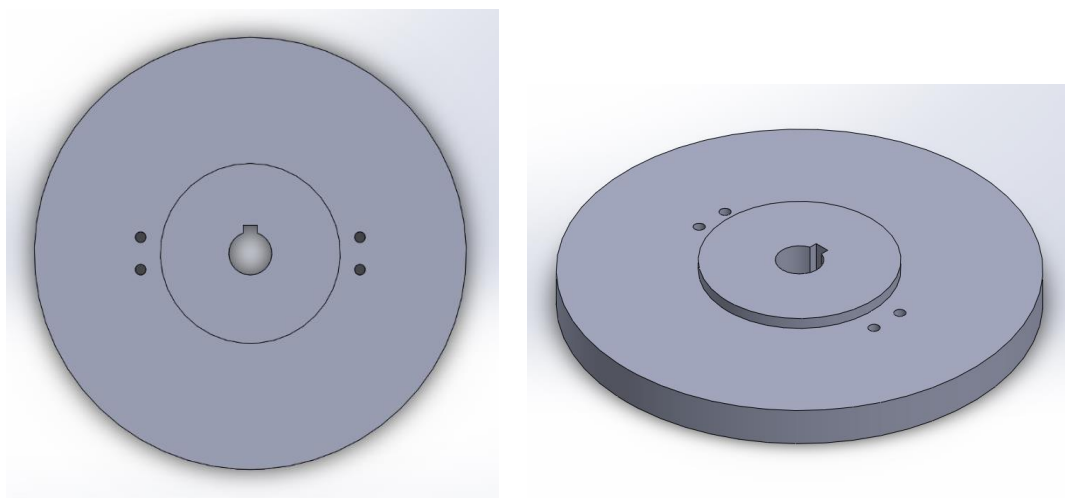


図 3-17 方向決定機構 テーブル モデル図

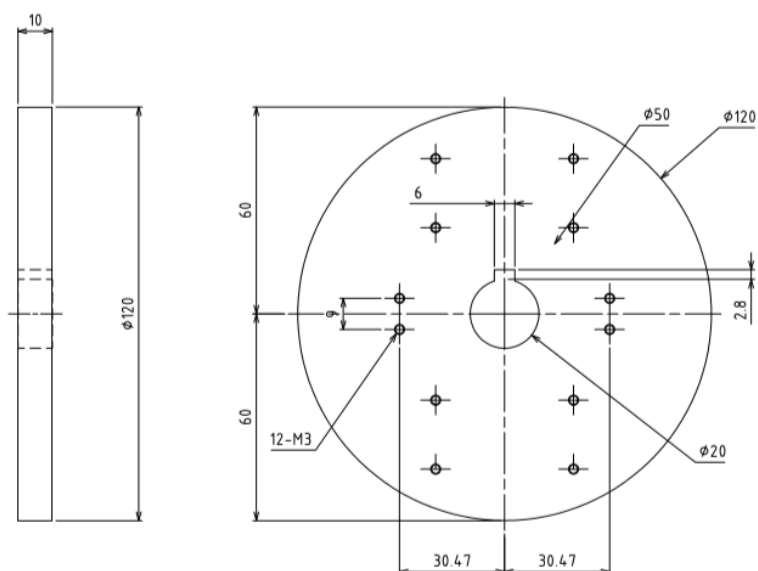


図 3-18 方向決定機構 テーブル 図面

3.3 試作機の製作

3.3.1 輸送機構

先ほど述べた各 부품の図面を基に製作したものを組み立てた輸送機構を図 3-19 に示す。構成は輸送部、動力部を合わせた動力伝達機構と方位決定機構からなっている。それぞれを分けて説明する。

寸法：200×200×300mm



図 3-19 輸送機構

3.3.2 輸送部

輸送機構は輸送球体を締結構造により挟み込み一球体を三点で保持する機構である。構成部品を以下に示す。図 3-19 に示すようにプランジヤを埋め込んでいる。組み立てた輸送部を図 3-20 に示す。

- ・ 輸送面
- ・ 輸送球体保持器
- ・ 輸送球体 アクリル 直径 70mm (3 個)
- ・ ミスミ SUS ハンヨウシャフト PSSFGW8-20-M4-N4 (9 個)
- ・ プランジヤ PPSS-5 (9 個)



図 3-19 プランジヤ埋め込み部

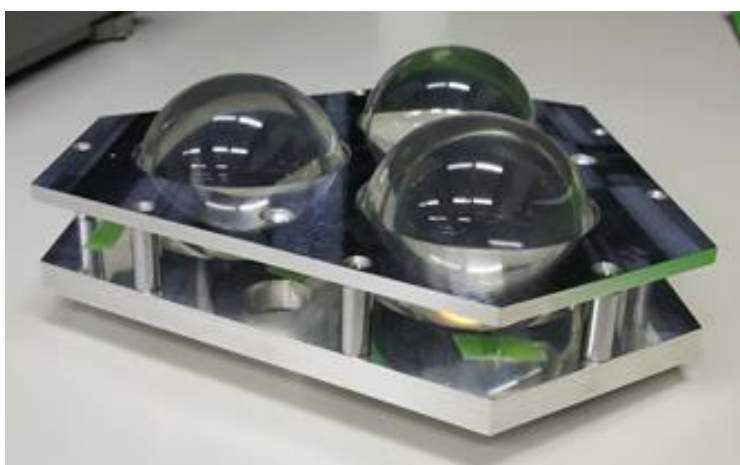


図 3-20 輸送部

3.3.3 動力部

動力部はモーターの動力を動力球体に伝えるためのベルトを使用した。構成部品を以下に示す。組み立てた動力部を図 3-21、3-22 に示す。

- ・ 動力球体 高炭素クロム軸受鋼 60mm
- ・ 動力球体軸 SSFRHQ12-57-F25-P7-T25-Q7-KC0-A57
- ・ 動力球体軸支柱 (2 個)
- ・ IKO シェル型ニードルベアリング TLA79Z (2 個)
- ・ 動力球体軸歯車
- ・ ベルト ローフリクションベルト (OP-464)
- ・ モーター歯車
- ・ RE-280RA DC モーター
- ・ タミヤ遊星ギアボックス ITM72001 ギア比 400 : 1
- ・ 方位決定機構 テーブル



図 3-21 動力部

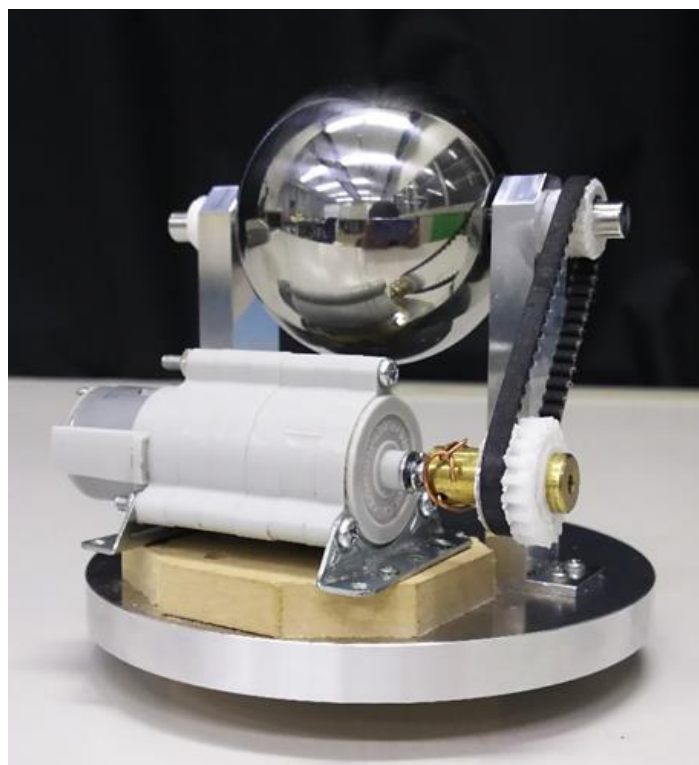


図 3-22 動力部 側面

3.3.4 方位決定機構

方位決定機構はサーボモーターの動力を小歯車に伝え大歯車を回転させる。大歯車は動力伝達機構の方位決定機構テーブルと噛合っているので動力伝達機構が回転する仕組みである。構成部品を以下に示す。組み立てた方位決定機構を図 3-23、3-24 に示す。

- ・ 大歯車 MSGB1.5-45 小原歯車工業
- ・ 小歯車 SSG1.5-15 小原歯車工業
- ・ 方位決定軸 ミスミ 回転軸 %SC1711-0480J-PSPJQ25
- ・ 方位決定軸ベアリング NSK 904-H-20T1XZZ
- ・ サーボモーター Quimat LDX-218



図 3-23 方位決定機構

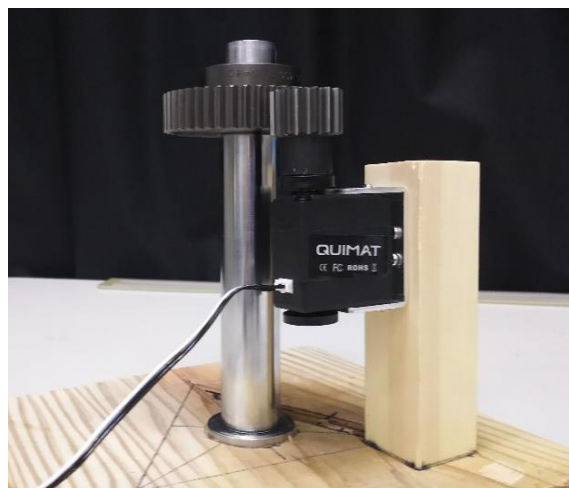


図 3-24 方位決定機構 側面

動作確認のためサーボモーターを駆動させ、動力部が回転させた。結果は方位の変更ができ、方位決定機構の役割は十分達成した。[7]

3.4 輸送試験

実際に完成した輸送機構を駆動させることを想定した水平状態での輸送試験を行い、輸送可能な最大荷重を測定する。実験装置の全体を図 3-25、側面を図 3-26 に示す。輸送機構の上に平らな板を乗せ、その上に錘を乗せていき荷重をかける。輸送機構が輸送できなくなるまで錘を追加し、最大輸送荷重を測定する。使用するモーターの性能を表 3-1 に示す。

実験手順 (i) ~ (iii) を以下に示す。

- (i) 輸送機構上に板を置き、さらにその上に錘を乗せる
- (ii) モーターを駆動させ、動力を伝達する
- (iii) 錘が輸送不可能になるまで追加し、最大輸送荷重を出す

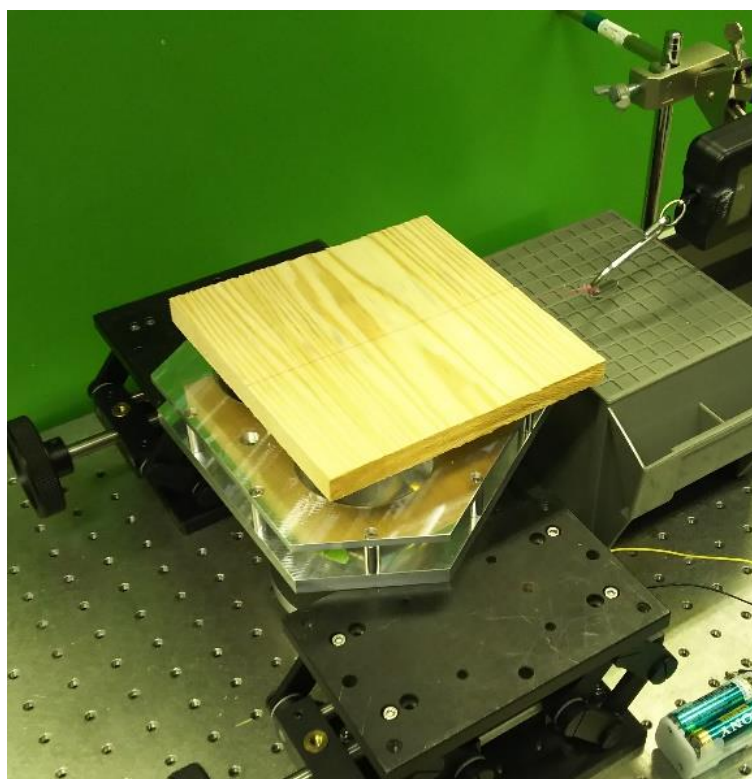


図 3-25 実験装置 全体

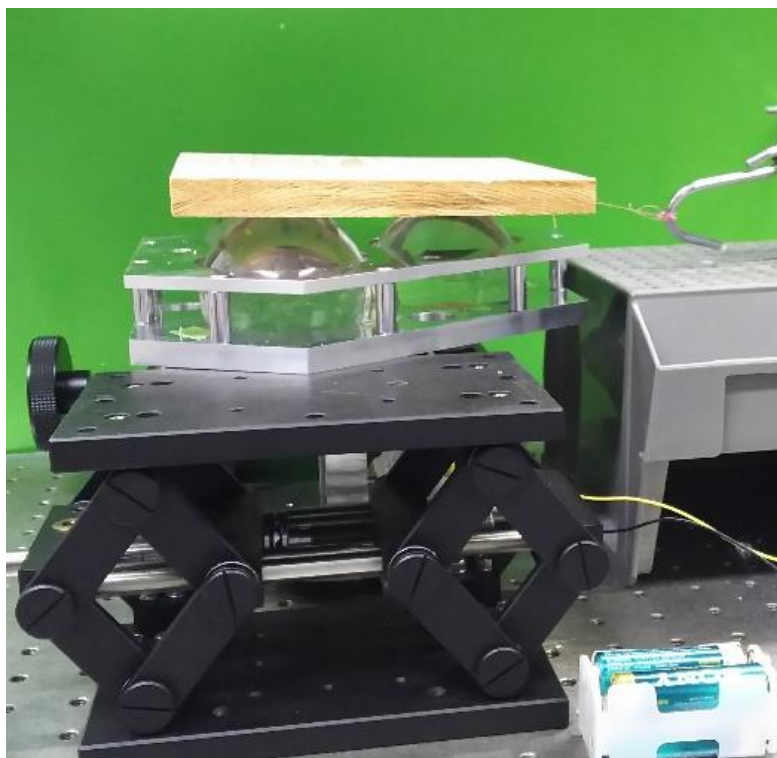


図 3-26 実験装置 側面

表 3-1 RE-280RA 性能

Model	Voltage		Maximum Efficiency	
	Operating Range	Nominal	Speed	Torque
		V	r/min	mN·m
RE-280RA	1.5 - 3.0	3.0	5800	1.47

結果は、輸送機構での最大輸送荷重は 1.35kg であった。0.4kg 以下の錘では輸送できず、錘を増やすにつれて安定した輸送が行えることが分かった。

3.5 考察

3.5.1 輸送機構

球体型第一世代で判明した問題点を参考にすることで、動力部を組み込んだ球体型第二世代を、設計・製作した。

輸送球体の摩擦が大きい問題点に関して考察する。輸送球体の支持方法を面ではなく、プランジャを用いた保持器を考案し一個の輸送球体に対して三点で支持する構造に変更したことで滑らかな回転を実現した。この結果、輸送球体の摩擦が大きい問題点は大幅に改善された。現在は、三個のプランジャを配置しているが、数を増やすことでさらに滑らかに回転すると考える。

輸送対象物に接触する最上面に露出している球体の面積が小さく、十分な駆動力を生み出せていないことに関して考察する。輸送面の形状を球体型第一世代の正六角形から六角形に変更した。輸送球体の個数を六個から三個に減らし、一個の直径を大きくすることで球体同士の中央の余白部分を減らそうと考えた。さらに、輸送面の形状は輸送機構同士の空白部分ができると考えたため、球体三個を並べた状態で最も余白の少ない形状に変更した。この結果、大幅に余白部が減り、輸送球体の占める割合が増え輸送対象物と接触する部分が増えることで駆動力が増加すると考える。輸送面の球体が占める面積の比較を図 3-27 に示す。

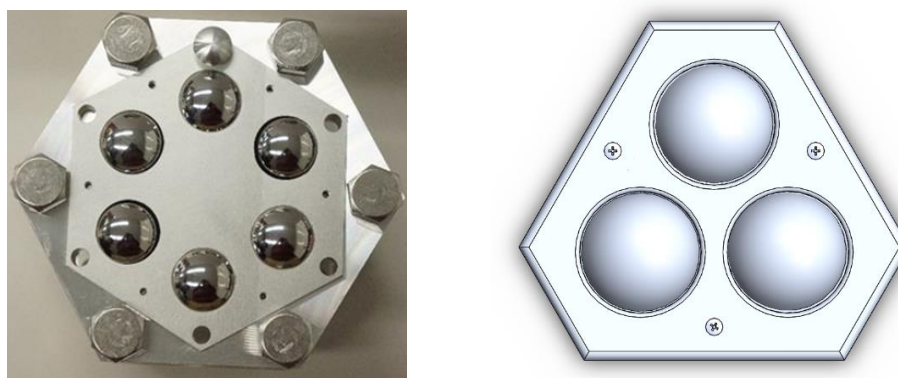


図 3-27 輸送面 球体部面積 比較

輸送機構を作動させるために必要な動力源を組み込むことが出来ていないことに関して考察する。構造原理は動力伝達と輸送方位の決定を同時に行うのではなく、構造的に分離することで全方位への輸送が実現できると考えた。実際に設計した輸送機構を製作し輸送試験を行った結果、動力伝達機構と方位決定機構はそれぞれ実際に動作することが分かった。この結果、輸送機構に全方位に輸送可能な動力源を組み込むことが出来た。

球体型第二世代は球体同士の減速比や最適な接触位置（角度）が明確に判明していないため、動力伝達機構の動力球の回転数を計測するなど部分ごとに試験をしていくことが、本機

構の改良を行うにあたり重要なことだと考える。

3.5.2 輸送試験

動力伝達機構に関しては、輸送球体まで動力伝達を行うことができた。輸送実験の結果、輸送球体に荷重をかけるほど安定した輸送ができることに関して考察する。球体は荷重がない状態だと平面と点で接触することは広く知られている。つまり、幾何学的な「点」には面積がないこととなり圧力は無限大になるので球体は接触部分を変形し接触面積を持った「面」となる。[8] この接触面積が球体同士の動力伝達に大きく関係していると考えられる。しかし、過剰な荷重を加えると球体に伝達した動力が回転を妨げる摩擦に負けてしまい球体が回転しなくなると著者は考えている。そこで、出力の高いモーターを使用することで輸送可能な荷重の範囲が広がるのだと考えている。

方位決定機構に関しては、サーボモーターによって回転させることに成功したが、機構の製作精度が良くなく歯車がうまく噛み合った状態が保つことが出来なかった。サーボモーターの設置位置をしっかりと設計し直す必要があると考えている。

さらに、動力伝達機構と方位決定機構の制御システムはある程度の完成はできたが、輸送機構が完全に完成していないため、方位決定後に動力部の駆動という同時の輸送試験が出来ていない。今後は今回設計製作した球体型第二世代から改良した球体型第三世代を設計・製作し敷き詰めた状態での輸送試験を行うことを目標とする。敷き詰めた状態での制御は第二章で述べた隣接している輸送機構同士での情報の共有を行うなどのシステム的な課題も残っている。

第4章 ベルト型第一世代

4.1 球体型からベルト型への派生

球体型第二世代で方位決定機構を確立したことにより、移動対象物の輸送に全方位への回転が可能な球体を用いずとも、一方向に動力を伝達するベルトのようなものを用いても、次世代移動手段として考案している技術を達成させることが可能ではないかと考えた。そこで注目したのはベルトコンベヤの構造である。ベルトコンベヤを円状に敷き詰めた機構自体を回転させることで全方位に輸送する仕組みとする。

4.2 機構の設計・試作

4.2.1 機構の形状

輸送機構の形は同じ機構を敷き詰めることを考慮し、三角形、四角形、六角形が挙げられる。次に円形状に敷き詰めたベルトコンベヤが回転する仕組みなので、先ほど挙げた形状に効率よく円を描けるのは、図4-1の輸送機能形状案に示すように六角形が適していると考えた。つまり、六角形の枠に円形の回転体を組み合わせることに決めた。

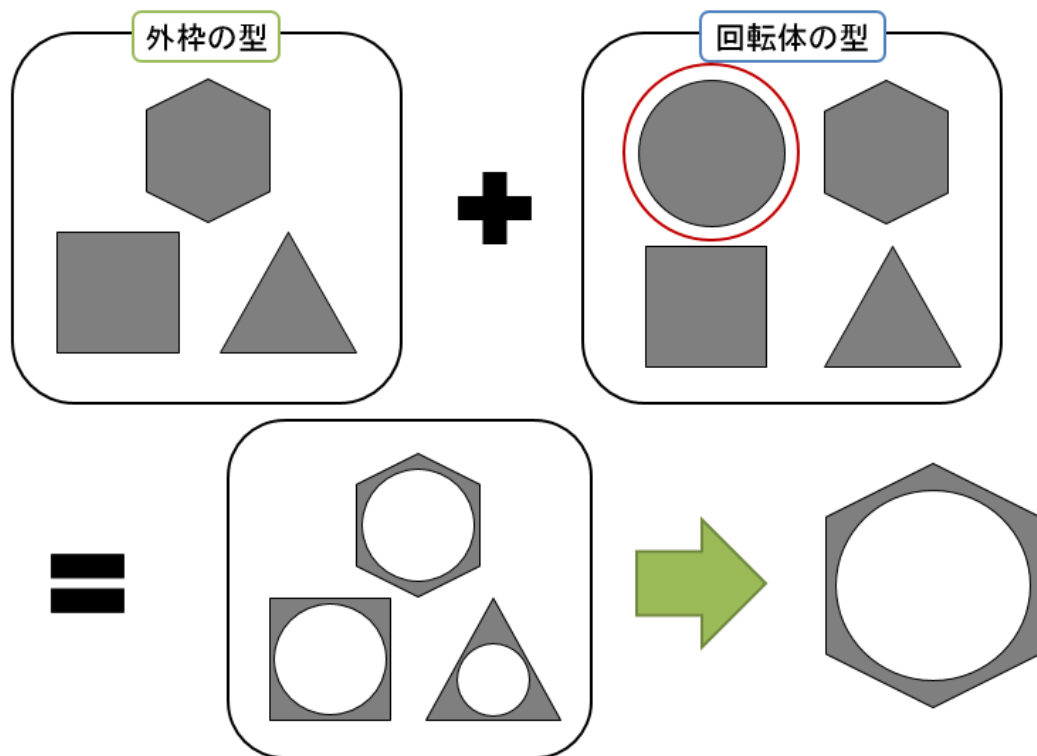


図4-1 輸送機構 形状案

4.2.2 回転体

ベルトコンベヤの構造を円状に敷き詰める構造を検討する。円に長さの異なる長方形を効率よく並べるかを考えた。理想的にはベルトは数が増えるほど滑らかな円形に配置が可能だと考える。しかし、円の中心から離れる程ベルトは短くなることや回転体にベルトを通す穴が増えることで強度が低下すると考えた。今回の試作機はベルトを五本使用する図4-2に示す概略図の形に確定した。

実際に3DCADモデルを製作した。図4-3に回転体の上面を示す。テールローラーを組み込むためのスペースを確保し、回転体にベルトを通す必要があるため貫通穴を開けた。上面と下面の直径を変えることで枠にはめ込んだ際に、落ちない工夫をした。

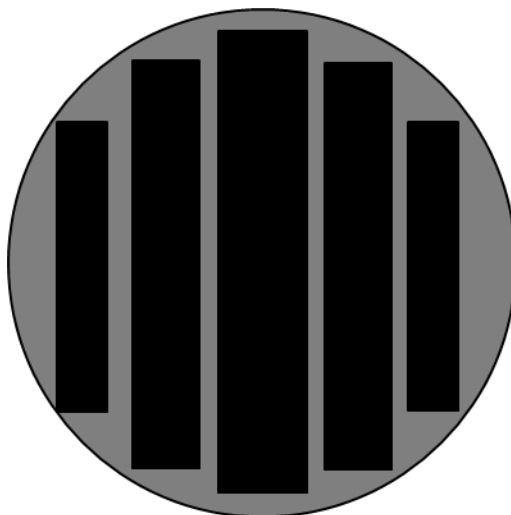


図 4-2 ベルト敷詰 概略図

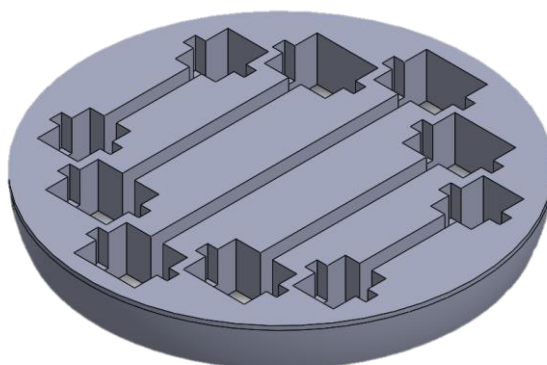


図 4-3 回転体上面 モデル

4.2.3 コンベア機構

本輸送機構の要であるベルト部分の構造を検討する。参考にしたベルトコンベアの構造は、図 4-4 に示すセンタードライブ方式である。①、②はテールローラーと呼ばれ輸送面の端に設置する部品である。③、④はスナップローラーと呼ばれ⑤に接触するベルトの張力を調節する部品である。⑤のドライブプーリがモーターから動力を得る部品である。動力源が輸送面がないため構造として組み込みやすいと考えた。

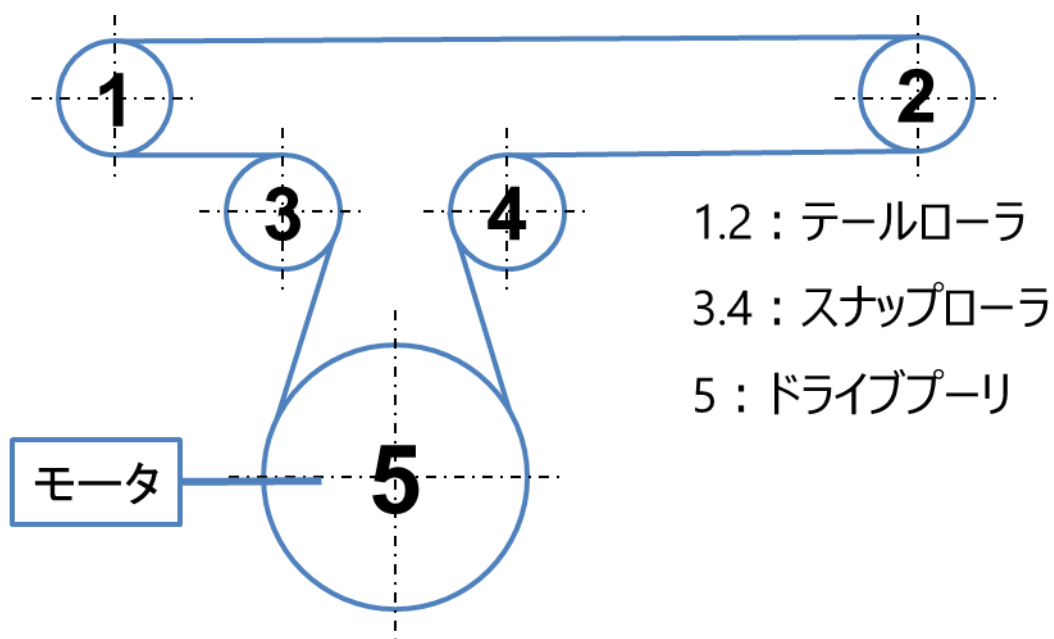


図 4-4 センタードライブ方式 ベルトコンベア

センタードライブ方式を基に製作した 3DCAD モデルを図 4-5、側面図を図 4-6 に示す。モーターなどの動力源に接続し駆動する駆動歯車に五本のベルトが接触し動力を得る仕組みである。ベルトの張力を調整するスナップローラーは五本のベルトと接触している。

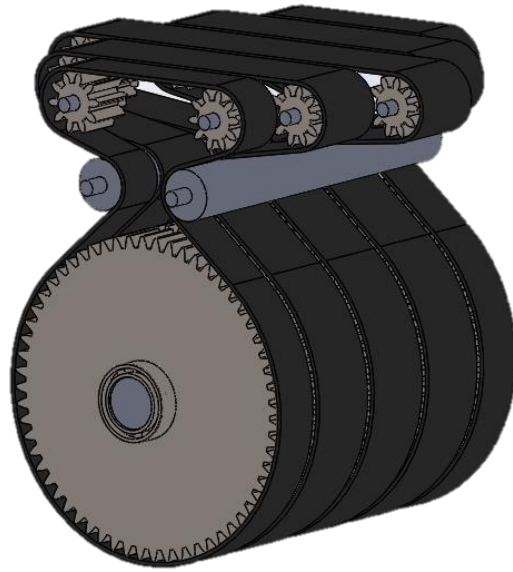


図 4-5 コンベア構造 モデル

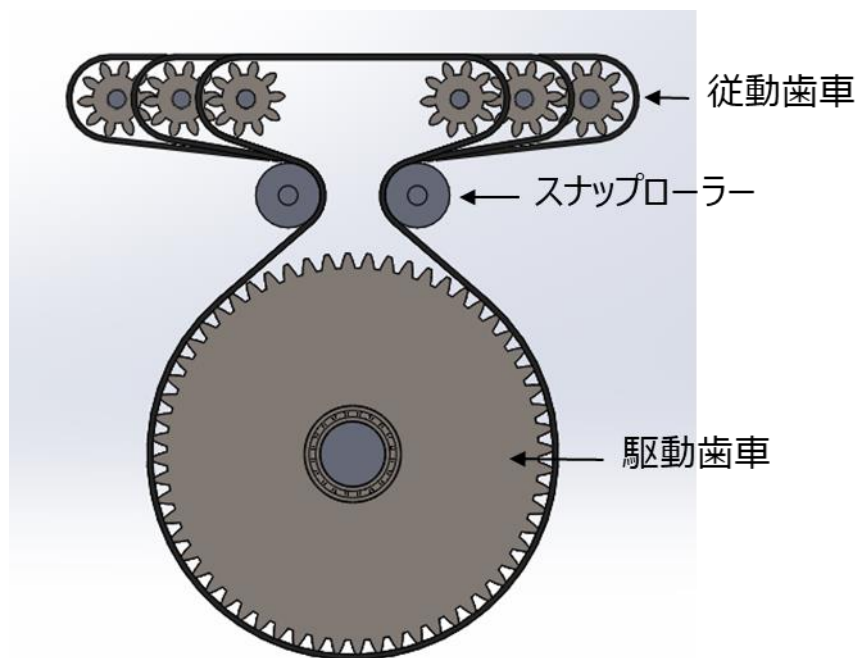


図 4-6 コンベア構造 モデル側面

4.2.4 動力伝達機構 試作

回転体とコンベア構造を組み合わせた動力伝達機構のモデル図を図 4-6 に示す。ベルト型第一世代は球体型第二世代の方位決定機構上に図 4-6 の動力伝達機構を設置する機構である。ベルトコンベアが円形状に配置する構造が全方位に回転し方位選択の自由度を高めた構造になっている。

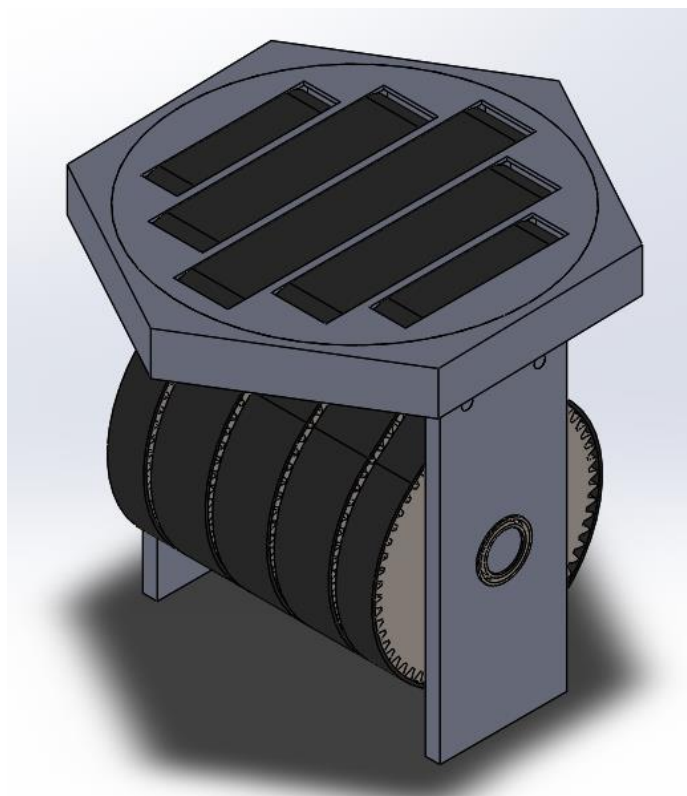


図 4-6 動力伝達機構 モデル

モデルを基に以下の部品を Zortrax M200 (付録 3) を使用し ABS 樹脂で造形した。

- ・ 回転体 上面 1 個
- ・ 支柱 2 個
- ・ 従動歯車 モジュール 1.0 歯数 10 幅 9mm 10 個
- ・ 駆動歯車 モジュール 1.0 歯数 60 幅 45mm 1 個
- ・ スナップローラー 2 個

ベルトの長さは図 4-7 に示すように CAD 上で設計したモデルから長さを計測した。計測した結果を基に既製品を検討した。駆動歯車の軸にはベアリングを組み込む。以下に使

用したタイミングベルト、ベアリングを示す。

- ・ ハイタイミングベルト HTBN375S3M-150(ミスミ) 1個 周長 375mm 幅 15mm
- ・ ハイタイミングベルト HTBN339S3M-150(ミスミ) 2個 周長 339mm 幅 15mm
- ・ ハイタイミングベルト HTBN300S3M-100(ミスミ) 2個 周長 300mm 幅 10mm
- ・ ベアリング B6700ZZ 2個

以上の部品を使用し製作した動力伝達機構の試作機を図 4-8 に示す。

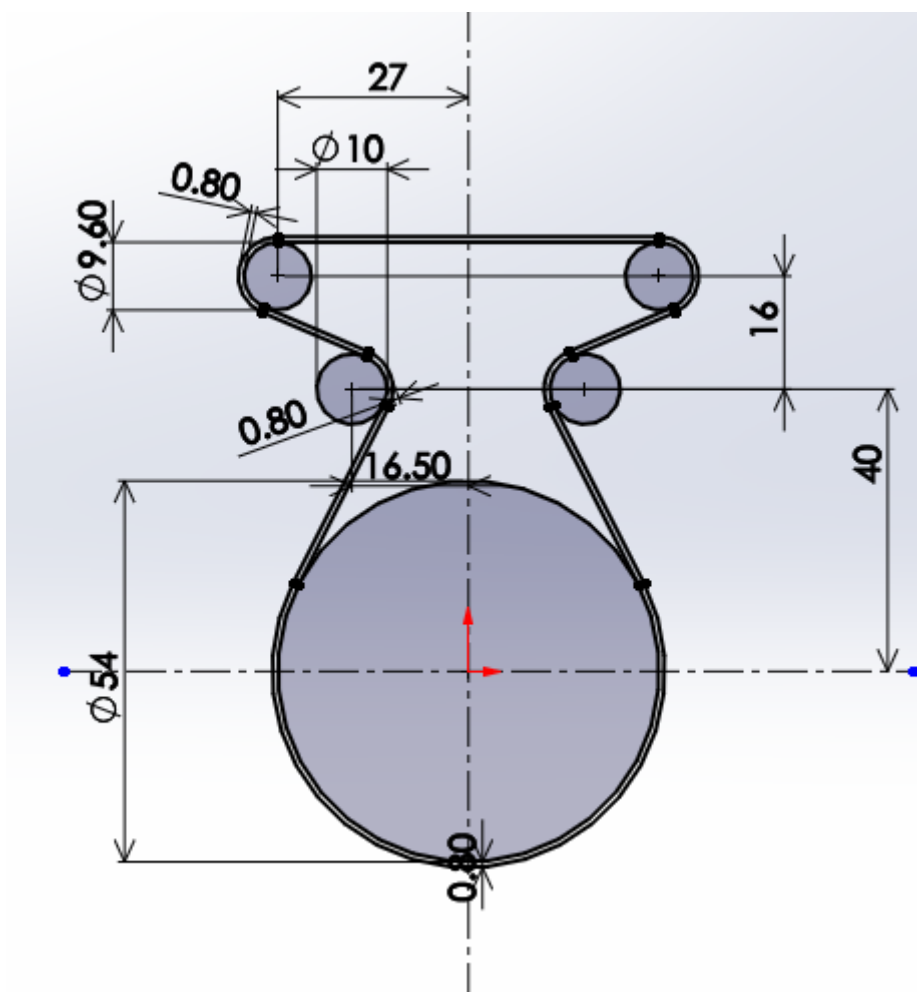


図 4-7 ベルト モデル



図 4-8 動力伝達機構 試作機

試作した結果、タイミングベルトの歯の高さが 1.0mm の物を使用したので従動歯車と駆動歯車のモジュールを 1.0 と設定したが綺麗に噛み合わなかった。さらに、五本のベルトは回転したが、ベルトの張力が一定ではないため輸送面で中央のベルトが張り過ぎることが分かった。

4.2.5 動力伝達機構 改良

ベルト型第一世代の動力伝達機構を試作結果から問題点である歯車のモジュールの調整、ベルトの張力を調整する構造を組み込むことを目指し改良を行った。3D プリンターは本大学の「ものづくり工房」に設置されている「uPrint by dimension」を使用した。(付録 4)

モジュールに関しては、1.0 から 0.9 に変更したところ噛合った。ベルトの張力を調整する構造は図 4-9 に示すようにスナップローラーの位置を可変にすることで解決した。さらにベルトごとに直径を変更した図 4-10 に示すようなスナップローラーに改良した。[9]



図 4-9 張力可変構造

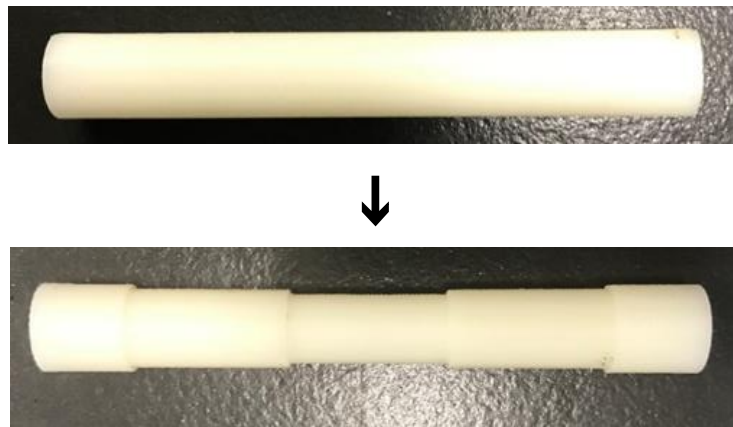


図 4-10 スナップローラー 改良

改良したモデルを基に 3D プリンターを使用し以下の部品を造形した。

- ・ 回転体 上面 1 個
- ・ 支柱 2 個
- ・ 従動歯車 モジュール 0.9 歯数 12 幅 9mm 10 個
- ・ 駆動歯車 モジュール 0.9 歯数 60 幅 70mm 1 個
- ・ スナップローラー 2 個

回転体の寸法を変更したのでベルトの周長も変更した。ベルトが滑らかに回転するように従動歯車とスナップローラーの両側にベアリングを組み込んだ。以下に示す。

- ・ ハイタイミングベルト HTBN339S3M-150(ミスミ) 1 個 周長 339mm 幅 15mm
- ・ ハイタイミングベルト HTBN300S3M-150(ミスミ) 2 個 周長 300mm 幅 15mm
- ・ ハイタイミングベルト HTBN264S3M-100(ミスミ) 2 個 周長 264mm 幅 10mm
- ・ ベアリング MR63ZZ 24 個
- ・ ベアリング B6700ZZ 2 個

以上の部品を使用し動力伝達機構を組み立てた。図 4-11、図 4-12 に示す。
寸法：φ100 × 150mm



図 4-11 動力伝達機構

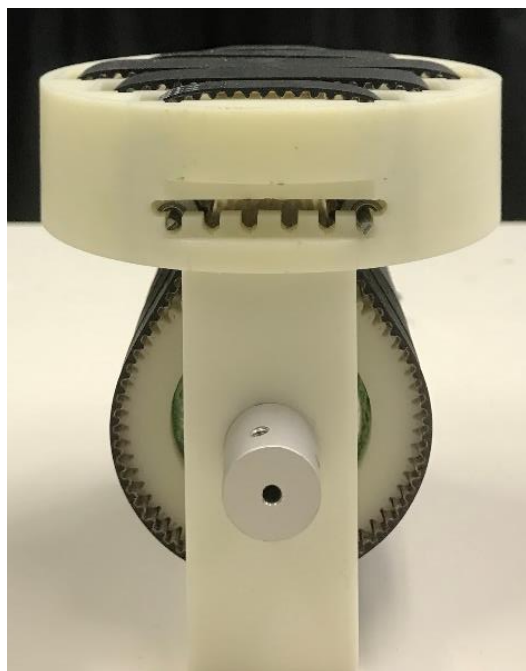


図 4-12 動力伝達機構 側面

ベルトの張力も均等になり、手動で滑らかに回転することが出来た。

4.4 輸送試験

実験装置の全体を図 4-8、上面を図 4-9 に示す。輸送機構上に錘を乗せ、荷重をかける。輸送機構で輸送不可能になるまで錘を追加し、最大輸送荷重を測定する。この実験値が、使用するモーターが輸送機構を介して出せる最大トルクだと分かる。使用するモーターは、第三章の輸送試験で使用したのと同じものである。動力源のモーターを歯車の内部に組み込むことも検討したが実現できなかったため、輸送実験はモーターに歯車を取り付け駆動歯車と噛み合わせた外付けの状態で行う（付録 2）。

実験手順 (i)～(iii)を以下に示す。

- (i) 輸送機構上に板を置き、さらにその上に錘を乗せる
- (ii) モーターを駆動させ、ドライブ歯車に動力を伝達する
- (iii) 錘が輸送不可能になるまで追加し、最大輸送荷重を出す

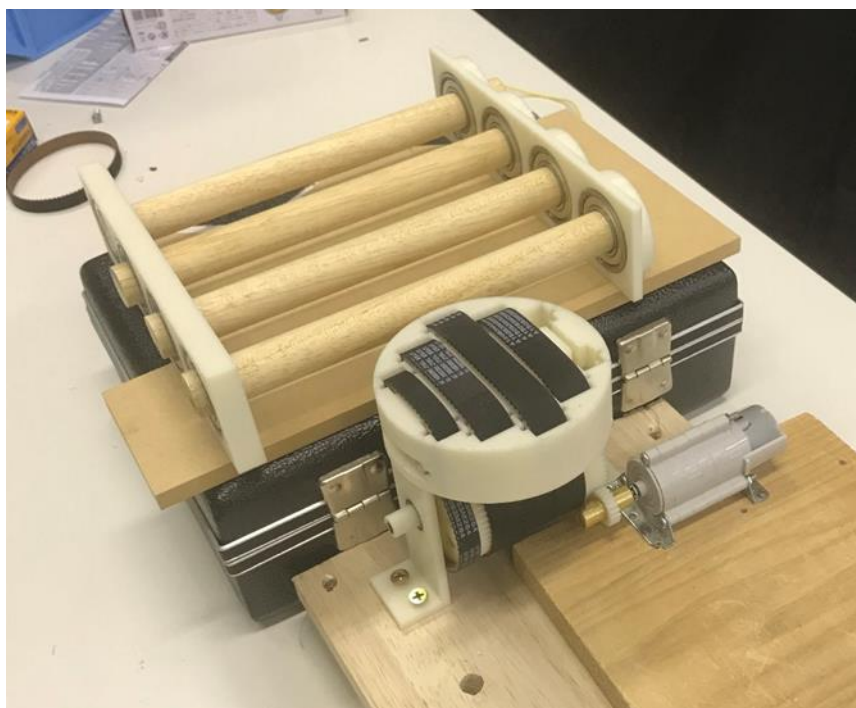


図 4-8 実験装置 全体

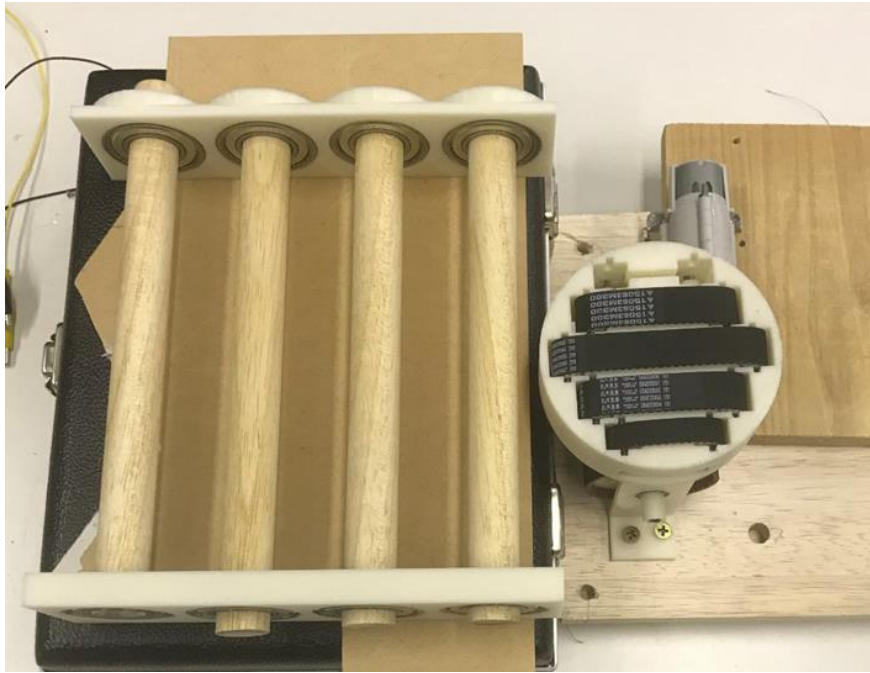


図 4-9 実験装置 上面

結果は、この輸送機構での最大輸送荷重は 2.5kg であった。球体型第二世代と比較すると比較的安定した輸送ができた。

4.5 考察

4.5.1 動力伝達機構

機構の大きさは大人が四機構踏む形の現状で確定したと考える。駆動歯車に複数のベルトを接触させているため、動力はベルトごとに分散し、ベルトの数が減ることで動力の総数は変わらないと考える。つまり、対象物と接触しているベルトの面積が重要な要素だと考えているので、ベルトの幅は中央の三本は 15mm としているが、中央のベルトの幅を二倍に変更し本数を減らす事も検討している。スナップローラーの形状に関しては、円形ではなく楕円にすることで微妙な調整も可能になるのではないかと考える。現在のベルト型の動力伝達機構の構造で確立できたと考える。

4.5.2 輸送試験

球体型では不安定であった輸送試験がベルト型だと安定した速度で輸送ができた。球体型第二世代と輸送機構の大きさは半分程度であるが輸送可能な質量は二倍になった。輸送にはある程度の摩擦が必要で、輸送対象物と点ではなく面で接触するためだと考える。

第5章 性能評価

現在まで製作してきた輸送機構で輸送試験が可能な球体型第二世代とベルト型第一世代に関して性能を評価する必要があると考えた。そこで、それぞれの輸送機構の伝達効率を算出することを検討した。

5.1 伝達効率 算出方法

輸送機構の伝達効率を算出方法は、輸送機構への入力値 P_{in} と出力値 P_{out} を比較することが最も単純だと考えた。この算出方法では、球体型第二世代の球体同士の伝達効率など不明な部分をまとめて効率を算出できる。次に入力値と出力値を何に設定するかが問題となった。入力値はモーターに設定するので、モーターの性能から算出できる「トルク[Nm]」、「仕事[W]」が挙げられる。つまり、輸送機構を用いた実験で算出できる出力値はどちらか検討した。それぞれ比較すると、トルクは回転する輸送球体に関しての値なので球体の加速度が必要である。仕事はある質量を鉛直方向に輸送した速度が必要である。

今回は、仕事を比較することで伝達効率を算出する。モーターの仕事を入力値、輸送機構に角度をつけた状態で輸送試験を行い、鉛直方向の輸送速度を用いて仕事を算出し出力値とする。図5-1に伝達効率の算出方法の概念図を示す。

伝達効率 η を算出する式を示す。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5.1)$$

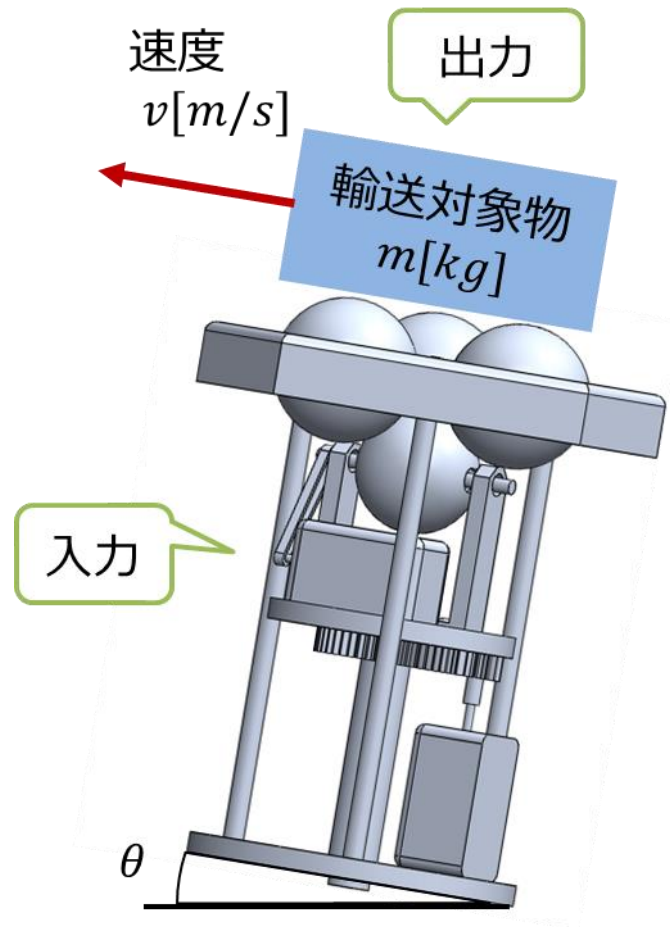


図 5-1 伝達効率 算出方法 概念図

5.2 輸送試験

各輸送機構を用い角度をつけた状態で輸送試験を行い、その様子を側面からカメラで撮影し画像編集ソフトを利用し、20mm 輸送する時間を測定し速度を算出する。

実験手順 (i)～(iv)を以下に示す。各輸送試験は傾け角度、錘の質量は同じである。

- (i) 輸送機構を 3° 傾け、錘 (0.846 kg) を乗せる
- (ii) モーターを駆動させ、20mm 輸送
- (iii) カメラで側面から撮影し、速度を測定
- (iv) (i)～(iii)を 5 回行い、平均速度 v を算出

実験結果から鉛直方向への輸送速度 v_y [m/s]を算出し、輸送質量 m [kg]と重力加速度 g [m/s²]から輸送機構の仕事 P_{out} [W]を求める。輸送試験のモデル図を図 5-2 に示す。

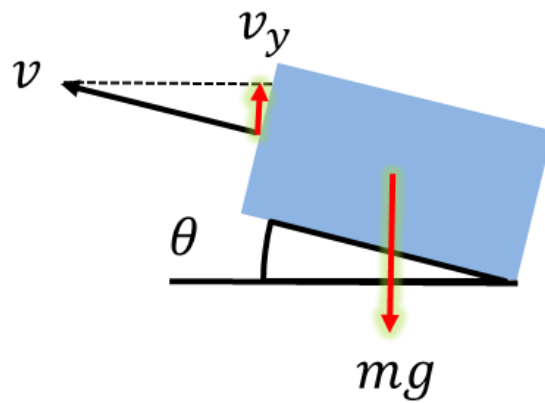


図 5-2 輸送試験 モデル図

鉛直方向の輸送速度の求め方は

$$v_y = v \sin 3^\circ \quad (5.2)$$

と表せ、式 (5.2) を用いて輸送機構の鉛直方向への仕事を算出する式は

$$P_{out} = mgv_y \quad (5.3)$$

と表せる。

5.2.1 球体型第二世代

実際に使用した球体型第二世代の実験系を図 5-3、実験結果を表 5-1 に示す。



図 5-3 球体型第二世代 傾け輸送試験系

表 5-1 実験結果

	距離[mm]	時間[s]	輸送速度[m/s]
1	20	1.00	0.0200
2		1.14	0.0175
3		0.57	0.0222
4		0.53	0.0377
5		1.07	0.0187

よって、平均輸送速度 $v = 0.0232[m/s]$ となり、式 (5.2) より

$$v_y = 0.0232 \times \sin 3^\circ = 0.00121[m/s]$$

さらに、式 (5.3) より輸送機構の鉛直方向への仕事は

$$P_{out} = 0.846 \times 9.82 \times 0.00121 = 0.010[W] \quad (5.4)$$

と算出できる。

5.2.2 ベルト型第一世代

実際に使用したベルト型第一世代の実験系を図 5-4、実験結果を表 5-2 に示す。



図 5-4 ベルト型第一世代 傾け輸送試験系

表 5-2 実験結果

	距離[mm]	時間[s]	輸送速度[m/s]
1	20	0.500	0.0400
2		0.533	0.0377
3		0.600	0.0333
4		0.433	0.0465
5		0.533	0.0377

よって、平均輸送速度 $v = 0.0390[m/s]$ となり、式 (5.2) より

$$v_y = 0.0390 \times \sin 3^\circ = 0.00204[m/s]$$

さらに、式 (5.3) より輸送機構の鉛直方向への仕事は

$$P_{out} = 0.846 \times 9.82 \times 0.00204 = 0.017[W] \quad (5.5)$$

と算出できる。

5.3 伝達効率算出 結果

輸送試験の結果を基に伝達効率を算出する。球体型第二世代とベルト型第一世代は動揺もモーターを使用している。よって入力値は同じとする。

モーターの入力値 P_{in} は回転数 $N[r/min]$ 、適正トルク $T_M[Nm]$ より算出する。今回は、モーターに遊星ギアを400:1で組み込んでいるので、回転数は減速しトルクは増加させている。

$$P_{in} = \frac{2\pi}{60} NT_M = \frac{2\pi}{60} \times \frac{5800}{400} \times 0.353 = 0.536[W] \quad (5.6)$$

5.3.1 球体型第二世代

伝達効率は式 (5.1)、(5.4)、(5.6) より

$$\eta = \frac{0.01}{0.536} = 0.0187(1.87\%)$$

と算出できた。

5.3.2 ベルト型第一世代

伝達効率は式 (5.1)、(5.5)、(5.6) より

$$\eta = \frac{0.017}{0.536} = 0.0317(3.17\%)$$

と算出できた。

5.4 考察

各輸送機構の伝達効率を仕事[W]の観点から算出した。結果は一桁の効率であった。伝達効率の算出方法に関して考察する。

まず、入力値について考察する。現在は輸送機構への入力値であるモーターの出力を性能から算出しているため、モーターの理論上の最大性能で算出していることが挙げられる。つまり、実際に輸送機構の効率ではなくモーターや遊星ギアの損失を含めた値を算出していたと考えられる。このことに関して、実際にモーターの動作時の電圧と電流を非接触の高電圧計測器やデジタルマルチメーターを使用し計測したが思うような結果が出なかった。今後、輸送機構への入力であるモーターの軸の回転数、トルクを計測し入力値を算出することが必要なことだと考えている。

次に出力値に関して考察する。現在の輸送試験での大きな問題点は測定した速度が初速度であり、等速状態での輸送試験が行えていないことが挙げられる。傾けた状態では、等速になるまで移動距離が必要である。このため、輸送機構を敷き詰めた状態での試験が必要だと考えている。しかし、現状で球体型第二世代は一個製作するために数十万円必要で量産ができない。今後、コストダウンできる構造、製作方法を検討する必要がある。さらに、輸送試験の方法も改善が必要だと考える。輸送機構を傾けることは敷き詰めた状態では困難だと考えているため、図 5-5 に示す錘を引き上げる形の試験を検討中である。

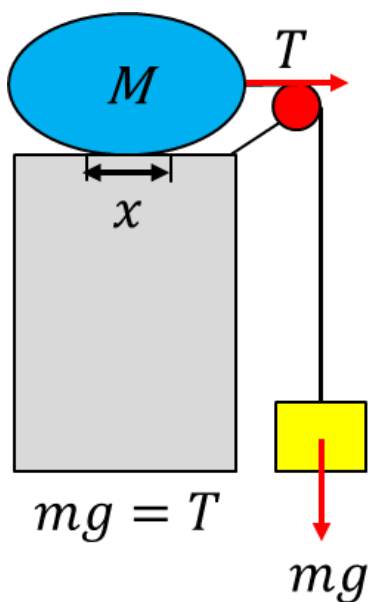
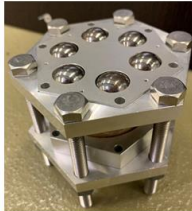

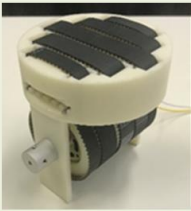


図 5-5 引き上げ試験 概念図

第6章 結論

本論文ではベアリングロードを実現するために、球体型第一世代の動作実験からベルト型第一世代の輸送実験まで開発を進めた事について記した。表 6-1 にベアリングロードの沿革を示す。赤枠で囲っている部分に著者は携わった。各章の内容についてまとめる。

表 6-1 ベアリングロード沿革

動力伝達部	球体		ベルト
世代	球体型第一世代	球体型第二世代	ベルト型第一世代
画像			
動力源	モーター複数個の合力	輸送球体の回転	動力歯車の回転
輸送方位		方位決定機構の回転	方位決定機構の回転
特徴	移動方向と動力を同時に制御	動力伝達、方位決定機構に分離	輸送方向が一方向に輸送機構自体を回転させる

第1章 序論

第1章は本研究の発端であるドラえものの映画に登場した「ベアリングロード」に関して述べ、全方位へ移動可能な輸送機構の原理と実現を目指し、球体型第一世代を製作した。著者が学士過程で取り組んだ試運転のための試行錯誤したことについても述べた。

第2章 ベアリングロード 新規性

第2章はベアリングロードと現代の自動車などの自動運転システムとの比較し今までにない革新的な移動手段であることを示した。さらに、制御概念に関しても現代の移動手段よりも安全の確保が容易にでき、運転者自身が未来を予測する負担を自動運転システムより減らすことができ、より安全な輸送が可能となることを述べた。

第3章 球体型第二世代

第3章は球体型第一世代を元に動力源を組み込んだ球体型第二世代の動力伝達機構、方位決定機構を確立した。さらに、水平状態での輸送試験では現在使用するモーターで球体型第二世代では最大輸送荷重 1.35kg の輸送に成功した。

第4章 ベルト型第一世代

第4章はベルトコンベアのような輸送方向が一定の輸送機構自体を回転させ、輸送方向の自由度を向上させるベルト型第一世代では動力伝達機構を確立した。さらに、水平状態での輸送試験では最大輸送荷重 2.5kg の輸送に成功した。

第5章 性能評価

第5章は各輸送機構の性能を評価するため、輸送機構への入力値と出力値について仕事[W]の観点から伝達効率を算出した。出力値を測定するために輸送機構を傾けた状態で輸送試験を行った。結果は各機構の伝達効率が一桁と算出できた。

以上より、本研究で製作した各輸送機構が実際に小型のモーターで 1.0 kg以上の物を輸送することに成功したことは本研究を進めるにあたって大きな進歩であると自信を持って言える。現在、トルクが高いモーターを使用することで最大輸送荷重の向上、伝達効率を向上させるために構造や材料を見直すなど改良が進められている。今後、研究の更なる進展と著者の憧れる世界の実現を切に願い期待を込めて託します。

参考文献

- [1] 芝山努(監督), 藤子・F・不二雄(脚本・原作), 「映画ドラえもののび太と銀河超特急」, (1996), シンエイ動画, テレビ朝日, 小学館
- [2] 三菱エスカレーター, 三菱トラベーター：
〈<http://www.mitsubishielectric.co.jp/elevator/escalator/index.html>〉 (最終閲覧日：2019年2月9日)
- [3] 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”, 修士論文(2017)
- [4] 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”, 学士論文(2016)
- [5] 竹中克昭, “ホイール配置による球体の全方向回転制御機構の開発”, 学士論文(2017)
- [6] 狩野大輝, “球体伝達機構を用いた全方向移動手段の開発”, 学士論文(2018)
- [7] 鈴鹿紅音, “球体と全方向制御装置を用いた次世代移動手段の開発”, 学士論文(2018)
- [8] 岡本純三, “ボールベアリング設計計算入門”, 2011年9月30日 初版1刷発行
- [9] 石井和磨, “ベルトを用いた全方向移動装置の開発”, 学士論文 (2019)

付録

Apx.1 球体の減速比 考え方

著者なりに球体同士の伝達効率を算出するべく球体同士の減速比に関して検討したことについて述べていく。

球体型第二世代の図 Apx.1-1 に示す輸送方向の場合に関して、理論式を構築し、理論輸送トルクを算出する。仮定として、モーターとベルト間、球体と軸間、二段目球体と輸送球体間、輸送球体と輸送対象物間のトルク損失なしとする。

著者は、球体同士のトルク伝達は球体が回転した際の接触周長の比だと考えている。例で挙げると、歯車同士のトルク伝達は歯車同士のギア比によって決まる。つまり、球体の場合では、球体同士の接触している周長の直径比によってトルク伝達が決定すると考えた。

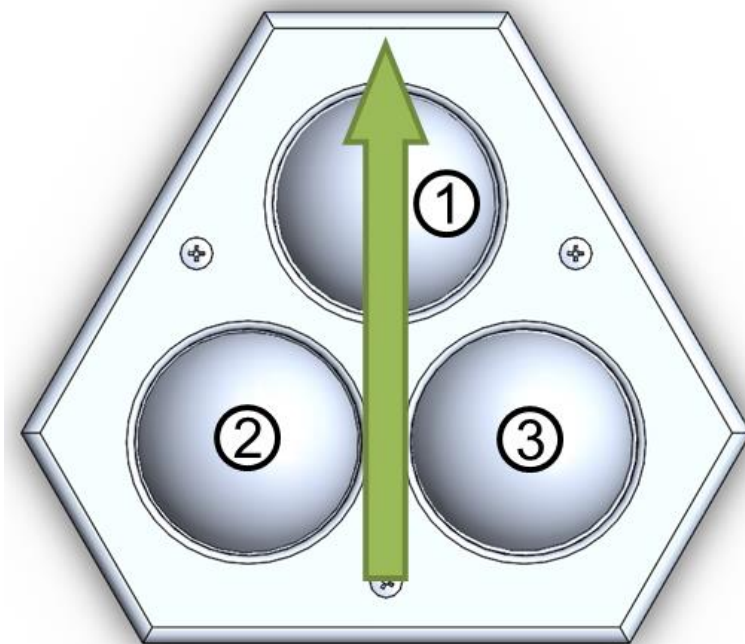


図 Apx.1-1 機構上面図 輸送方向

理論値を算出するために最も重要なのは、球体の接触周長である。図 Apx.1-1 の①に関しては、球体の直径上の周長が接触周長である。しかし、図 Apx.1-1 の②、③に関しては、接触周長が輸送方向上では、球体の直径ではない。そこで今回は、3DCAD 上に機構の全体図があるため、機構の断面を切り、球体の周長を測定する。機構の接触面での断面図を図 Apx.1-2 に示す。球体②、③は、輸送方向に対して左右対象である。球体①～③の接触周長

比を (i) ~ (iii) に示す。

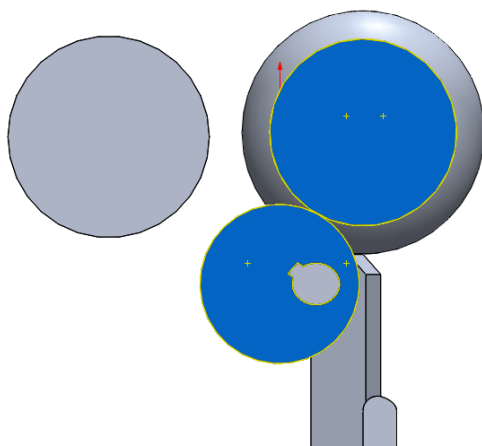


図 Apx.1-2 機構 接触面の断面図

(i) 球体①の場合

球体①周長 219.9mm、接触球周長 188.5mm

$$\text{接触周長比} = \frac{219.9}{188.5} = 1.17$$

(ii) 球体②の場合

球体②周長 169.3mm、接触球周長 144.0mm

$$\text{接触周長比} = \frac{169.3}{144.0} = 1.18$$

(iii) 球体③の場合

(ii) と同様 接触周長比 = 1.18

よって、平均の接触周長比は、

$$\frac{1.17 + 1.18 + 1.18}{3} = 1.177$$

この平均の接触周長比を減速比と考える。モーターにギアヘッドを取り付けた際のトルクの求め方を参考にすると、

$$T_G = T_M \times \iota \times \eta \quad (\text{A})$$

である。

仮に、伝達効率が 100% とすると理想輸送トルクは、

$$T_t = 353 \times 10^{-3} \times 1.18 \times 1.0 = 0.417 [Nm]$$

と算出できる。つまり、球体型第二世代が輸送機構としてのトルク損失がなければ、 $T_t = 0.417 [Nm]$ の輸送トルクが出る。

式(A)より伝達効率は、

$$\eta = \frac{T_e}{T_t} = \frac{0.46}{0.417} = 1.103$$

と算出できる。つまり、球体型第二世代の伝達効率は、110% となり、明らかに間違っていると分かる。

Apx.2 ベルト型第一世代 動力源の開発

三章で述べた球体型第二世代は、動力源を外付けした。ベルト型第一世代では、動力源を接続する歯車の直径が大きくスペースを必要としていた。そこで、歯車の内部にモーターを内蔵することができるのではないかと考えた。

モーターは軸が回転することが大前提であるが、モーターの軸を固定することでモーターの外側が回転させることが可能ではないかと考えた。さらに、モーター自体を歯車の軸の部分にはめ込むことで、動力源として組み込むことが出来ると考える。しかし、この構造には大きな欠点があると気が付いた。それは、モーターに電力を供給する同線がモーターの外側に接続しているため、モーターの外側が回転してしまうことにより絡まってしまう点がある。そこで、既存のモーターに整流子を追加することでこの問題は解決すると考えた。このモーター回転子・固定子の逆転の概念図を図 Apx.2-1 に示す。まず初めに、この発想から試作したものを図 Apx.2-2、整流子を図 Apx.2-3 に示す。

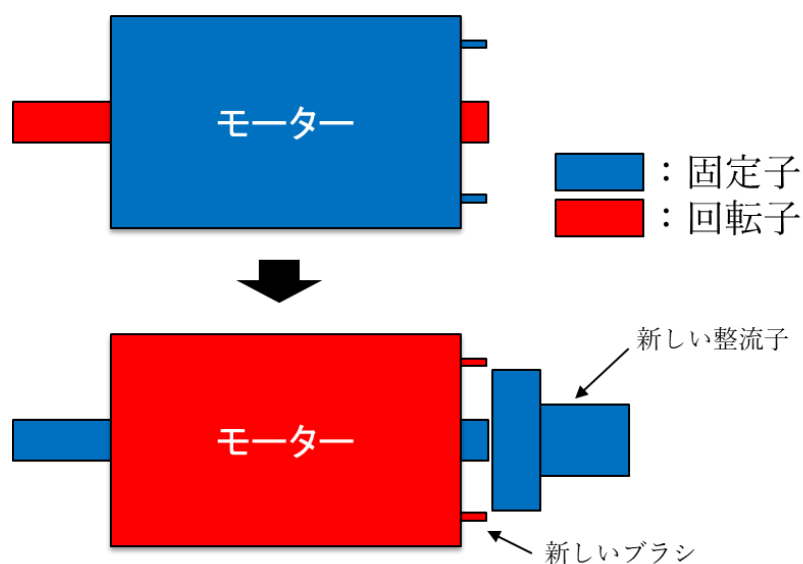


図 Apx.2-1 モーター回転子・固定子の逆転の概念図

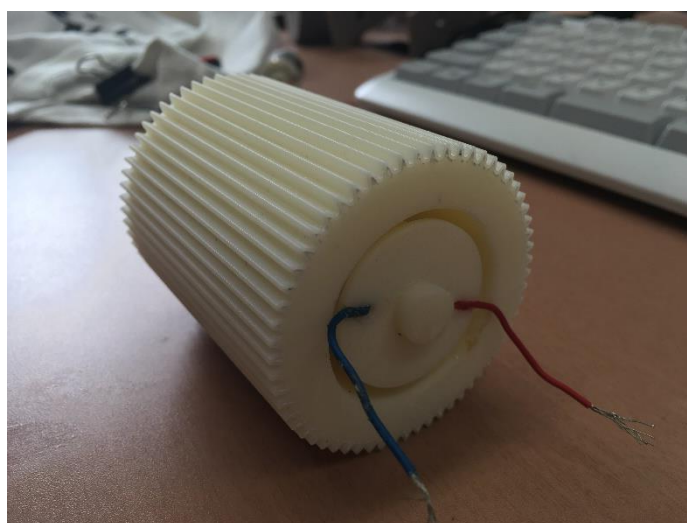


図 Apx.2-2 モーター内臓ドライブ歯車

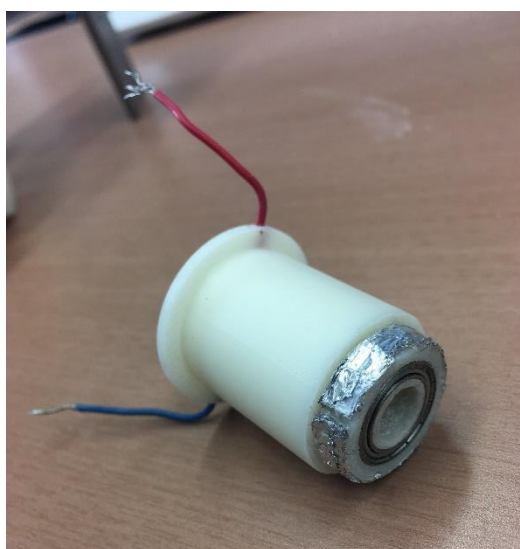


図 Apx.2-3 整流子 1 号

図 Apx.2-2 では、うまく電流が流れていなかった。図 2-3 で示す整流子とモーターの極の接触が出来ていなかった点が原因だと考察する。整流子を正確に製作するためには現状の環境では厳しいと考える。

動力源を内蔵した歯車を製作するには、遊星ギアの構造を利用することも考えられる。

Apx.3 Zortrax M200

機械・航空システム制御研究室(岡・原田研究室)の所有する3Dプリンターを使用した。
スペックを記す。製品を図Apx.3に示す。

Body

- ・ 本体サイズ： 34.5 X 36 X 43 cm
- ・ 本体重量： 13kg

プリント

- ・ 印刷可能領域: 200 x 200 x 185 mm
- ・ 最小積層ピッチ: 90microns(今後 25micron 対応予定)
- ・ ノズル直径: 0.4 mm
- ・ ノズル最高対応温度: 380 度
- ・ ヒーティングプラットフォーム

エレクトロニクス

- ・ 電源： 110-240V, 50/60Hz
- ・ 24V DC : 11A

ソフトウェア

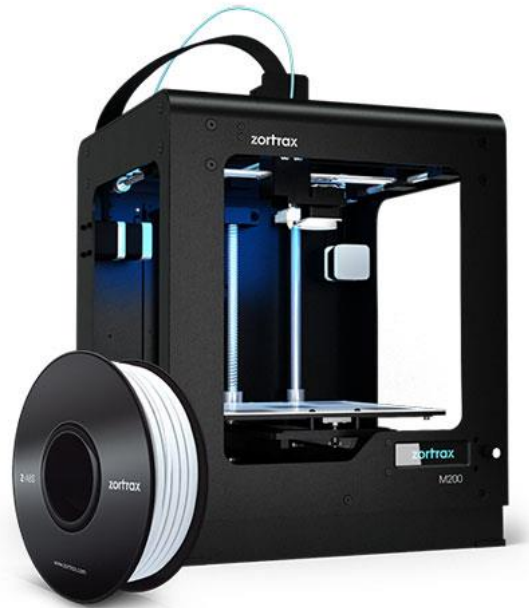
- ・ Z-Suite
- ・ 対応 OS: Windows(XP+), and OSX(10.6+)
- ・ 対応データフォーマット: STL, OBJ, DXF

樹脂

- ・ 対応材料： ABS 樹脂
- ・ 繊維直径： 1.75 mm

メーカー保証

- ・ 1年



☒ Apx.3 Zortrax M200

(BRULE Japan / Zortrax M200 <http://www.brule.co.jp/3d-printers/zortrax-m200.shtml>)

Apx.4 uPrint by dimension

本大学の「ものづくり工房」に設置している 3D プリンターを使用した。スペックを記す。製品を図 Apx.4 に示す。

マニュアルの URL を載せる。

http://rms.rscgd.edu/faculty/Sherod/lab/uPrint_user_guide.pdf (閲覧日:2019 年 3 月 9 日)



図 Apx.4 uPrint by dimension

謝辞

はじめに、本研究を進めるにあたり、ご指導、アイデアの提供を頂いた川原村敏幸 教授に深く感謝申し上げます。当研究室に配属した当初から研究室での研究するための雰囲気、環境づくりに気を使っただきました。特に、研究会、勉強会においては、それぞれ異なる分野の研究を行っているため、わからないことも多く疑問に思ったことに対しては素直に質問し、生徒同士が意見を交換、説明することに重きを置くことでお互いが切磋琢磨できる環境になっていたと実感しております。さらに本研究を進める際には、球体からベルトへの派生させることや機構の構造に関してまで様々な面でアイデアの提供を頂きました。本研究で得た経験は今後の人生でかけがえのない財産です。最後になりましたが、本修士論文を完成させるにあたり、ご多忙の中細部に亘ってご指導を頂き、心より深く感謝申し上げます。

当研究室に所属している Giang Thai Dang さん、劉 麗さん、Phimolphan Rutthongjan さん、Mejia Jose Carlos さんには、拙い英語にもかかわらずいつも笑顔で接していただきました。英語に対する苦手意識を克服するための大きな一歩となったことは間違いありません。心より深く感謝申し上げます。

同研究室の博士課程の佐藤翔太さんには、日々の研究室での研究姿勢、研究に対する考え方について大変勉強になりました。卒業研究発表でのプレゼン資料をより良くするため様々な視点からの意見をいただいたことで、発表をより完璧なものにすることができました。さらに、些細な質問に対してもより作業効率を良くするためのテクニックを真摯にご指導いただきました。心より深く感謝申し上げます。

研究室の同期である小林勇亮君、坂本雅仁君、西美咲さん、西村一宏君には、日々の研究室で楽しく研究生活を送りつつ、お互いの研究内容について意見の交換を行い、良い刺激となりました。充実した研究室生活を送れたのは同期に恵まれたからだと思います。心より深く感謝申し上げますとともに、これからみんなが新たな土地で活躍されますことを願っています。

研究室の後輩である修士1年生の上田真理子さん、岡田雄哉君、狩野大輝君、鈴鹿紅音さん、田頭侑貴君、秦暦君、宮地啓太君、学部4年生の安岡龍哉君、石井和磨君、長嶋晋也君、長谷川諒君、尾崎珠子さん、学部3年生の朝子幹太君、石川祐奈さん、松坂康永君、福江雅さん、宮田翔生君には、研究会、勉強会の場において真剣に話を聞いていただきました。心より深く感謝申し上げます。特に本研究の後輩である狩野大輝君、鈴鹿紅音さん、石井和磨君、長嶋晋也君には沢山迷惑をかけたかもしれません。しかし、みんなし

っかりと自分のやるべきことを考え、行動してくれたからこそ、対象物を輸送するところまで研究を進めることが出来ました。本当にありがとうございました。今後の進展を願っています。

最後になりましたが、本大学に入学してからの6年間共に過ごした友人達、部活動での先輩や後輩には、充実した大学生活を送る中でかけがえのない存在でした。みんながいなければこんなに楽しい学生生活は送れていなかったと思います。本当にありがとうございました。

そして、最後に両親、祖母、兄弟には、6年間という大学生活を送る上で、精神的な面はもちろん全ての面に対してサポートしてくださいました。病気で入院することや骨折することなどのご心配をかけたが、無事学業に専念でき、学生生活を終えることが出来ました。心より深く深く感謝申し上げます。