

球形動力伝達機構を用いたアクティブキャスタ および全方向移動車両に関する研究

Study on an Omnidirectional Robot with the Active-caster Robotic Drive
with a Ball Transmission

東京農工大学 大学院工学府
機械システム工学専攻

加藤 航甫

目 次

第 1 章 緒 言	1
1.1 本研究の背景	3
1.2 関連研究	4
1.2.1 オムニホイール	4
1.2.2 メカナムホイール	5
1.2.3 球体駆動式全方向移動装置	6
1.2.4 アクティブキャスト	7
1.3 本研究の目的	8
第 2 章 ACROBAT-S の理論	11
2.1 提案機構の概要	13
2.2 運動学解析	15
2.2.1 アクティブキャストの運動学	15
2.2.2 ローラによって駆動される球体の運動学	16
2.2.3 球体によって駆動されるキャストの運動学	20
2.3 静力学解析	23
第 3 章 ACROBAT-S の動力学シミュレーション	27
3.1 球体の駆動	29
3.2 キャスタの駆動	31
第 4 章 ACROBAT-S の試作	35
4.1 動作実験	43
4.1.1 無負荷動作	43
4.1.2 走行動作	45
第 5 章 ACROBAT-S ロボットの理論	53
5.1 提案ロボットの概要	55
5.2 運動学解析	57
5.3 駆動ローラ配置の検討	60
第 6 章 ACROBAT-S ロボットの試作	67
6.1 ACROBAT-S ロボットの動力学シミュレーション	69
6.2 試作機の開発	73

6.3 動作実験.....	77
6.4 駆動ローラ配置による動作への影響の実機検証	88
 第 7 章 結 言.....	 99
7.1 本論文のまとめ	101
7.2 今後の展望.....	102
 参 考 文 献.....	 103
 謝 辞.....	 107

第 1 章

緒 言

1.1 本研究の背景

移動能力を有するロボットシステムにおいて、その機能を提供する移動機構に求められる性能は多種に及ぶ[1]。蓄電池をエネルギー源とするロボットシステムは、限られた電力によって長時間の稼働を実現するために、移動機構にも高いエネルギー効率が求められている。車輪型の移動機構は、脚機構等と比較してエネルギー効率が高く、蓄電池によって駆動するシステムに適していると考えられる。

移動機構は、その特性から非ホロノミック移動機構、非ホロノミック全方向移動機構、ホロノミック全方向移動機構の 3 種に分類される。

非ホロノミック移動機構は、前後方向への移動と、左右への移動、その場での旋回を独立に制御することができない。これは、自動車等の操舵輪と駆動輪を組み合わせた移動機構に代表される。Fig. 1-1 に駆動輪と操舵輪を組み合わせた移動機構の例を示す。Fig. 1-1(a)は、2 つの駆動輪の発生させる速度差を変化させることによって旋回を行う機構である。(b)は操舵輪の方向を変化させることによって旋回を行う機構である。このような移動機構は姿勢を変化させるために、切り返し動作が必要になる。狭所では、この切り返し動作を行うための移動経路を確保することができない場合があり、姿勢制御が困難となる[2]。

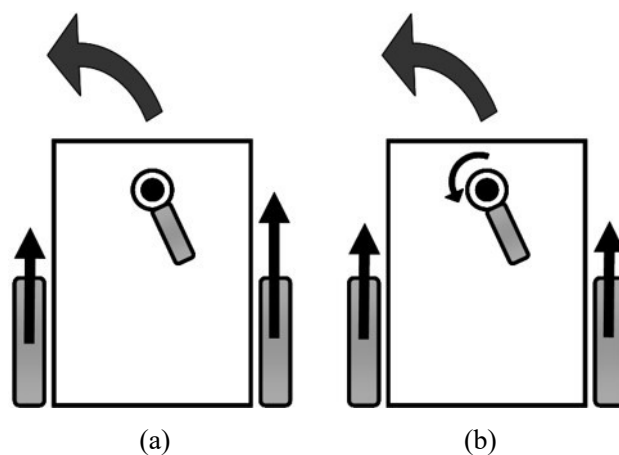


Fig. 1-1 Movement mechanism with steering

非ホロノミック全方向移動機構は前後、左右、その場での旋回を独立に制御することが出来るが、進行方向を変化させるために時間を要する。Fig. 1-2 に非ホロノミック全方向移動機構の例を示す。車輪を接地点中心に回転させることで進行方向を変化させ、全方向移動を実現する。進行方向を変化させるためには、車輪の向きを変更するという準備動作が必要となるため、瞬時に任意の方向に移動することはできない。

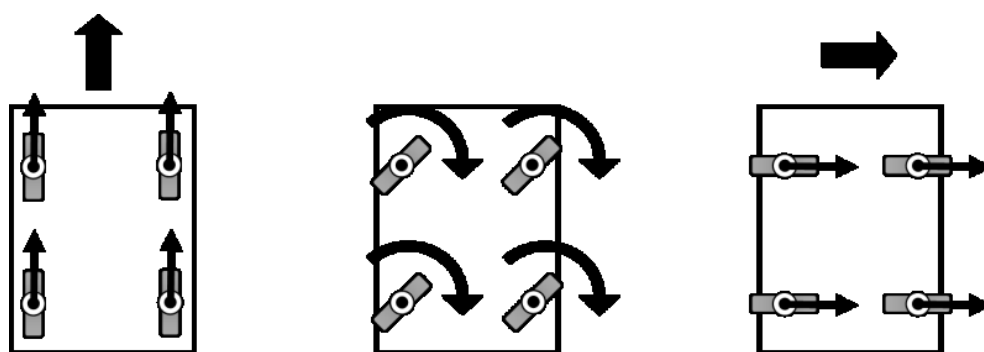


Fig. 1-2 Movement to side direction when each wheel rotates around the point of contact

これらの移動機構に対して、ホロノミック全方向移動機構は任意の方向に瞬時に速度を発生させることができる。前後、左右、旋回の動作を自在に行うことで、狭所や人間が居住する空間での姿勢制御や細かな位置調整が可能である。このため、特に人型のパーソナルロボット[3][4]等に採用されている。また、非ホロノミック移動機構に比べ経路設計が容易であり、人間が操縦する場合においても移動方向と速度を指令するだけでよいいため操作が容易である。このため、ホロノミック全方向移動機構は、サッカーロボット[5]や、全方向移動車イス[6]、パーソナルビークル[7]、あるいは全方向クローラを備えた車両[8]等にも広く用いられている。

1.2 関連研究

前節では、ロボットシステムに広く用いられる移動機構についてその特徴を説明した。本節では、ホロノミック全方向移動を実現する移動機構について説明する。ホロノミック全方向移動を実現する移動機構の研究は広く行われている。そこで、それぞれの機構に関して説明し、その特徴を整理する。

1.2.1 オムニホイール

オムニホイール(Fig. 1-3)[9][10]は、車輪の接地部分に受動回転要素である小さなコロを多数組み込んだ構造をしており、アクチュエータにより車輪回転方向に対して能動的に推進力を発生し、同時にこれと直行する方向には受動的に床面を滑ることで、車輪側面方向へ生じた速度に干渉しない。この車輪を複数用い、各車輪がそれぞれの方向に速度発生するように取り付けることで、全方向移動を実現する。オムニホイールはホロノミック全方向移動機構としては比較的構造がシンプルで、また、オムニホイールを用いた全方向移動システムを設計する場合、Fig. 1-4 のように 3 つのモータの速度の比を制御することで冗長にならずに 3 自由度の動作が決定でき、制御が容易である。このため、室内環境で動作するロボットに広く普及しており安価である。しかしながら、車輪機構は車輪径が大きいほど、耐荷重性、走破性が高くなるが、オムニホイールは構造上、車輪よりも小さな受動回転要素で接地するため、耐荷重性が小さく、段差踏破性能が低い。また、

車輪の接地面が多数の受動回転要素によって構成されるため、表面が不連続であり、地面の凹凸の影響を受けやすく、振動が発生する、床面のゴミを巻き込むなどの欠点があることから、屋外環境で運用されるロボットシステム、高速で移動する車両での利用には適さない。



Fig. 1-3 Omni wheel

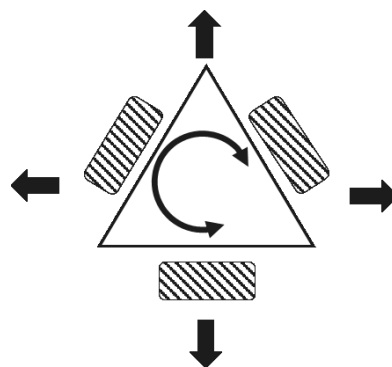


Fig. 1-4 Omnidirectional robot
with Omni wheel

1.2.2 メカナムホイール

オムニホイールと同様に車輪の接地部分に受動回転要素を多数組み込んだ全方向移動機構にメカナムホイール(Fig. 1-5)[11][12]がある。メカナムホイールは、受動回転要素を組み込む個数を増やし、車輪の外形を円形状に近づけたもので、オムニホイールよりも段差踏破性能、走破性能が改善されている。しかし、オムニホイールと同様に、受動回転要素を用いた構造上、耐荷重が小さい、コロが断続的に地面に接地することで振動や騒音が発生するという欠点があり、床面のゴミを巻き込む可能性があることから、屋外環境での利用には課題が残っている。なお、これらの欠点を改善するため、自由ローラの支持方法を工夫することで騒音対策を施したもの[13]、車体を変形させて段差昇降能力を向上させたもの[14]、車輪外周に組み込まれた小さなローラにも動力を伝達することで受動回転要素を無くしたもの[15]、受動的に回転する半球2つを組み合わせた球形状車輪全体を回転させるもの[16]、受動キャスタを傾斜させた円盤外周に多数配置し円盤を回転させるもの[17]等の研究が進められている。



Fig. 1-5 Mecanum wheel

1.2.3 球体駆動式全方向移動装置

球体を用いた全方向移動機構の研究には、2つのロッドによって球体を摩擦駆動することで全方向移動を実現する球体車輪機構[18]、球体車輪にローラを接触させて摩擦駆動する球体駆動式全方向移動装置(Fig. 1-6)[19][20][21]、1つの球の上でバランスを取りながら移動する玉乗りロボット[22][23]などがある。球体駆動式全方向移動装置は、モータによって駆動された球体が直接地面に接地することで駆動力を発生する。球体駆動式全方向移動装置はコロのような受動回転要素が無いため、走行性能が高い。さらに、2つの球で1つの駆動モータを共有することで、冗長にならずに全方向移動を実現することが可能である。しかし、球体駆動式全方向移動装置は駆動部分である球体と地面が直接接触しているため、地面の影響で球体表面に傷がついてしまう可能性や、地面のゴミや汚れ等を駆動部分に巻き込んでしまう可能性があるため、屋外で利用するのは困難である。

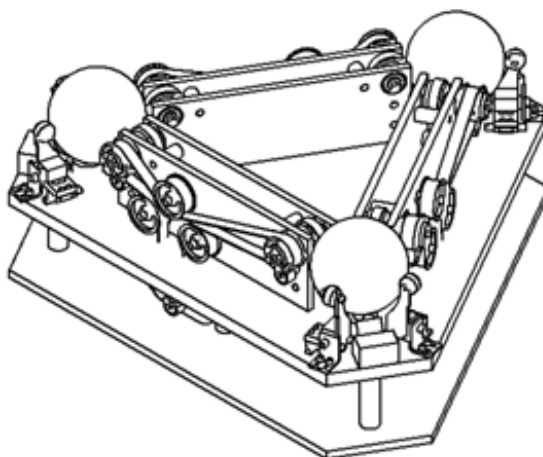


Fig. 1-6 Omnidirectional robot with ball wheel drive mechanism[21]

1.2.4 アクティブキャスタ

アクティブキャスタ(Fig. 1-7)[24]は操舵軸と車輪軸にオフセットを設けて、受動的なキャスタと同様な軸配置にしたうえで、操舵軸および車輪軸をアクチュエータによりそれぞれ独立した速度で駆動することで、全方向移動を行うものである。アクティブキャスタは受動回転要素を有しないうえ、接地部分に通常の空気圧あるいはゴムタイヤを用いることができるので、低振動で、高い耐荷重性、走破性と静粛性を発揮することができる。これらの利点を活かして、同様のキャスタ構造を用いた移動機構は医療補助ロボット[25]等に応用が進められている。しかし、アクティブキャスタの制御には車輪の姿勢角度が必須であり、各車輪ごとに絶対角センサを搭載し、サンプリング時間毎に車輪に要求される速度ベクトルを実現するための車輪軸と操舵軸の速度を制御する必要がある。これまでのアクティブキャスタの研究においては、この分解は制御装置により行っている[26]。また、アクティブキャスタ 1 輪に対して必ず 2 つのモータが必要となるため、例えばアクティブキャスタを 2 輪用いた全方向移動ロボットは、4 つのモータと 2 つの絶対角センサを取り付ける必要があり、冗長かつ高コストである。なお、これらの欠点を改善するため、車輪軸と操舵軸の速度分解を機械的に行う 2 つの球体を動力伝達機構として用いたトランスミッションの研究[27][28]が進められている。



Fig. 1-7 Active-caster

ここまで、ホロノミック全方向移動を実現する機構とその研究について説明した。その特徴と課題を以下にまとめる。

- オムニホイールやメカナムホイールといった移動機構は制御が容易であることなどから広く普及しており、安価である。しかし、受動回転要素で地面に接地するという構造的要因から走行性能が低く、特に段差踏破性能の低さ、振動の発生という課題から、屋外での利用は難しい。
- 球体駆動式全方向移動装置は、受動回転要素を有さないため高い走行性能、走破性能を発揮する。しかし、駆動部分である球体が直接地面に接地するため、地面のゴミを駆動部に巻き込んでしまったり、球と駆動装置が損傷してしまう可能性があることから、屋外での利用は難しい。
- アクティブキャスタは、接地部分にゴムタイヤを用いることで高い走行性能、走破性能を有し、屋外での利用に適する。しかし、複雑な制御が必要となるうえ、絶対角センサと冗長なモータにより高コストであるという課題がある。

1.3 本研究の目的

本論文では、上述のアクティブキャスタの課題を解決するために、車輪軸とステアリング軸の 2 軸に適切な比率で動力を機械的に分配する、球体を用いた新たな構造の動力伝達機構を導入した移動機構を提案する。本論文では、この移動機構を「ACROBAT-S」と称する。ACROBAT-S[29] は、導入した球を用いるトランスミッションにより、車輪の向きに応じた速度ベクトル配分が機械的に行われることから、これまで制御装置が行っていた車輪の角度検出と車輪軸、操舵軸の速度成分計算は不要となり、モータの制御は、従来のオムニホイールを用いた全方向移動ロボットと同様な簡素なものとなる。本研究で提案する移動機構「ACROBAT-S」について、前節で整理した移動機構の特徴と比較して説明する。

- 導入する球を用いるトランスミッションにより、オムニホイールと同様にモータの速度の比を制御することで容易に全方向移動を実現出来る。そのうえで、アクティブキャスタ同様に接地部分にゴムタイヤを用いる構造とすることで、走破性能、走行性能の課題を解決する。
- 駆動部分であるトランスミッションと接地部分であるゴムタイヤが直接接触しない構造とすることで、地面のゴミの巻き込みや駆動部の損傷を防ぎ、ゴムタイヤによる高い走破性能と合わせて、屋外での利用に適した移動機構を実現する。
- モータの速度比でキャスタの進行方向を制御することが可能であるため、車輪の姿勢角度を計測する絶対角センサが不要となる。また、1 つのモータで複数の車輪を駆動することが可能となり、冗長にならずに全方向移動ロボットを設計することが可能となり、コストの低減を実現する。

以上のように，本論文では，ホロノミック全方向移動機構の移動性能と制御の容易さを両立したうえで，屋外での利用に適した移動機構の開発を目的とする．ロボットシステムの移動範囲の拡大に寄与し，新たなロボットアプリケーションの普及にも期待ができることから，ロボット分野の研究において重要な意義を持つと考える．

第 2 章

ACROBAT-S の理論

本章では、提案するホロミック全方向移動機構「ACROBAT-S」の基礎構造を検討する、提案機構を実現するためには、キャストの動作を能動的に発生させるために必要な車輪軸、操舵軸の回転運動を適切に伝達するトランスミッションを設計する必要がある。モーター – トランスミッション – キャスタ間の伝達について運動学解析を行い、適切なキャスト動作を実現するために必要な諸条件を明らかにする。

また、提案機構のトランスミッションは球体による摩擦伝達を用いている。このため、各摩擦伝達部分における静力学解析を行い、適切なトルクを伝達するために必要な力学的条件を明らかにする。

2.1 提案機構の概要

ACROBAT-S のコンセプトを説明する。Fig. 2-1 に機構の概念図を示す。まず、2 つのモーターによる球の駆動は、球の赤道上の点に第 1、第 2 の 2 つのローラ(以下、駆動ローラと呼称する)を接触させ、このローラの回転速度の大きさおよび比率を変更することで、球の 2 自由度の回転駆動を行う。一方、球の大円上から外れる点にて接触する第 3 のローラ(以下、分配ローラと呼称)を配置し、この分配ローラの動作によりアクティブキャストの操舵軸、および車輪軸への速度配分の機能を実現する。

導入する球体動力伝達機構の特徴的な点は、球体大円以外の部分で接触する 1 つのローラによって、車輪軸と操舵軸の 2 つの軸に動力を分配する発想である。Fig. 2-2 に ACROBAT-S の動力伝達部のみを示す。ここで第 3 のローラは、本来球の下部に設置するが、座標系の設置あるいは図のみやすさの関係により、上部に配置するとして解析を行う。

ローラは球の鉛直軸周りに回転自由な支持梁によって球に接触する。ローラの横滑りは許容しないとすると、ローラは支持梁とともに、鉛直軸を中心に旋回運動を行う。同時に、ローラ回転方向の速度成分はローラを回転させることとなる。この旋回運動を操舵軸に、ローラ回転速度を車輪軸にそれぞれ伝達することで 2 軸を駆動する。

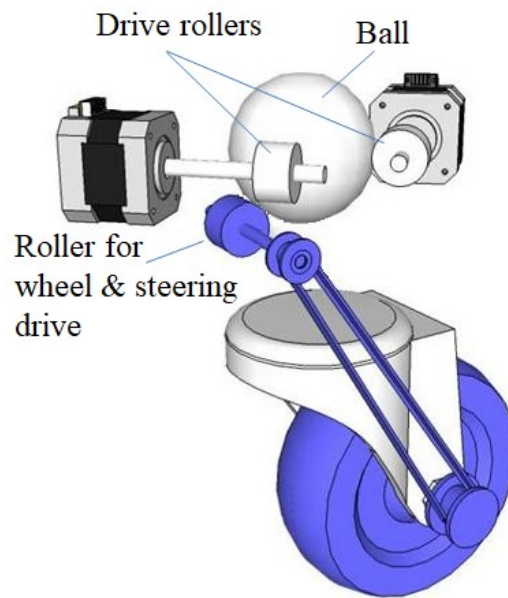


Fig. 2-1 Concept view of the single ball transmission

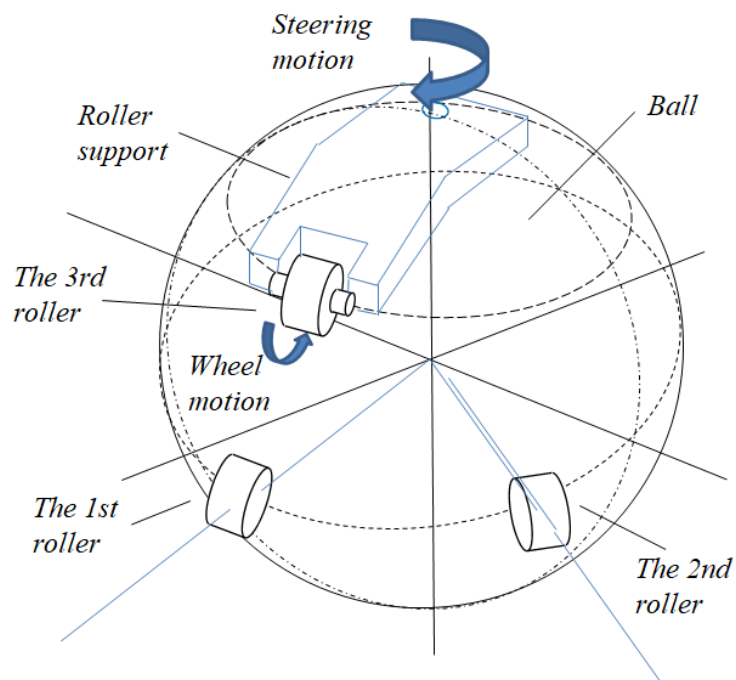


Fig. 2-2 Proposed transmission with a ball and rollers

2.2 運動学解析

本節では，ACROBAT-S の運動学モデルを構築する．ACROBAT-S のトランスミッションに求められるのは，アクティブキャスタを駆動する適切な速度配分で 2 軸の回転速度を伝達することである．したがって，ここではまずアクティブキャスタの運動学を整理し，アクティブキャスタの制御則を確認する．次に，2つの駆動ローラによって駆動される球体の運動について回転ベクトルを用いた解析を行い，駆動ローラの回転と，それにより駆動される球の 2 自由度の回転の関係を明らかにする．最後に，球によって駆動される分配ローラの運動について解析を行い，分配ローラの運動をキャスタに伝達することでアクティブキャスタの制御則と対応させる．以上により，モータによって回転する駆動ローラからキャスタまでの速度伝達を明らかにし，ACROBAT-S の制御則と全方向移動を実現するために必要な機械的諸条件を得る．

2.2.1 アクティブキャスタの運動学

ACROBAT-S の運動学はアクティブキャスタの運動学に基づいて導出される．アクティブキャスタの運動学を以下に表す．

Fig. 2-3 にアクティブキャスタの概略を示す．

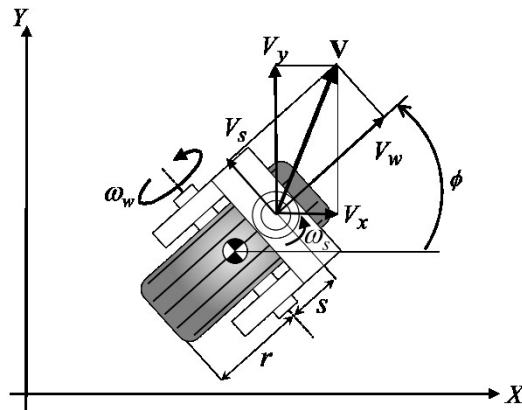


Fig. 2-3 Active-caster omnidirectional control

車輪軸の回転速度 ω_w および操舵軸の回転速度 ω_s により，アクティブキャスタの車輪方向および車輪と垂直方向に発生する速度成分は，車輪半径 r およびキャスタのオフセット距離 s を用いて以下の式で表される．

$$V_w = r\omega_w, V_s = s\omega_s \quad (2.1)$$

X 軸に対して車輪の向きを ϕ とすると，操舵軸上に発生する2つの速度成分から，地面座標の各軸方向に発生する速度は座標変換から以下の式で表される．

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_w \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

式(2.1), (2.2)を用いることで, アクティブキャスタの各軸の回転速度から, 地面座標系の各軸の方向に発生する速度ベクトルは以下の式で表される.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos\phi & -s \sin\phi \\ r \sin\phi & s \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

式(2.3)により, 車輪軸と操舵軸を適宜制御することにより, 任意の大きさの速度を任意の方向に発生させることができる.

また, 式(2.3)において行列の逆変換を用いることで, アクティブキャスタに任意の速度を発生させるための, 各軸の回転速度を求める式は以下で表される.

$$\begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos\phi & \frac{1}{r} \sin\phi \\ -\frac{1}{s} \sin\phi & \frac{1}{s} \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

式(2.4)を使用することで, 要求される速度ベクトルからアクティブキャスタの車輪軸と操舵軸に与える回転速度を一意に決定することができる. 式の中に車輪の姿勢角 ϕ が含まれることから, アクティブキャスタを制御するためには, 時々刻々の車輪の向きを考慮し, 各軸の速度比を可変にする協調制御を行う必要があることが分かる. ACROBAT-S のトランスミッションは, これらの式に基づいて各軸に回転速度を伝達する必要がある.

2.2.2 ローラによって駆動される球体の運動学

球を用いたトランスミッションの伝達を明らかにするにあたって, はじめに回転する球表面の周速度を求める. この運動学を導出するため, 回転ベクトルの手法を導入する.

Fig. 2-4 に示すような, 力ベクトル \mathbf{F} によるモーメント \mathbf{T} は力の作用点を定義する位置ベクトル \mathbf{R} を用いて以下のような外積により求められる.

$$\mathbf{T} = \mathbf{R} \times \mathbf{F} \quad (2.5)$$

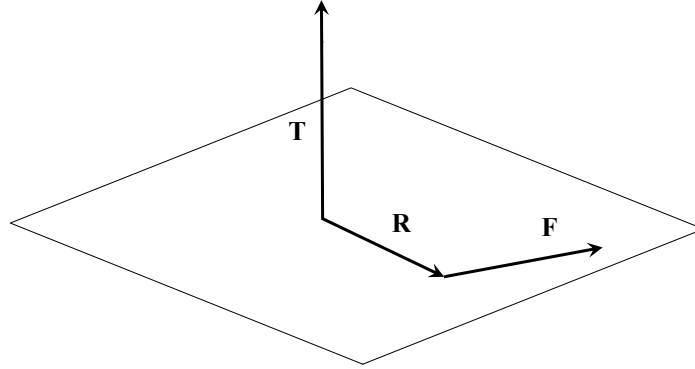


Fig. 2-4 Relationship between force and moment

ここで、モーメントのベクトルは通常のカベクトルと異なり、ベクトルの作用線を回転軸として、ベクトルの長さでそのモーメントの大きさを表す。ベクトル \mathbf{T} は、 \mathbf{R} と \mathbf{F} を含む平面に垂直となる。

Fig. 2-5 に球体の回転と球表面の周速度の関係を示す。球体表面の周速度と球体の角速度の関係を求めるため、以下の仮想仕事の原理の式を用いる。

$$\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} \quad (2.6)$$

式(2.6)に、式(2.5)を代入すると、

$$\boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{R} \times \mathbf{F}) = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F} \quad (2.7)$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}$ は球体の角速度、 \mathbf{R} は球体の表面の一点を定義する位置ベクトル、 \mathbf{v} は位置ベクトルにより定義される球体表面における周速度を示す。式(2.7)にベクトル混合 3 重積の交換則を利用することで \mathbf{F} を消去し、以下の式を得る。

$$\mathbf{v} = -\mathbf{R} \times \boldsymbol{\omega} \quad (2.8)$$

ここで速度ベクトル \mathbf{v} は、球体表面の点が並進方向に移動する方向とその速度を表し、また回転ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ はトルクベクトルと同様、ベクトルの作用線を球体の回転軸とし、ベクトルの長さは球体の回転の角速度の大きさを表す。このように、球体の回転速度と球体表面に与えられる周速度の関係が得られた。

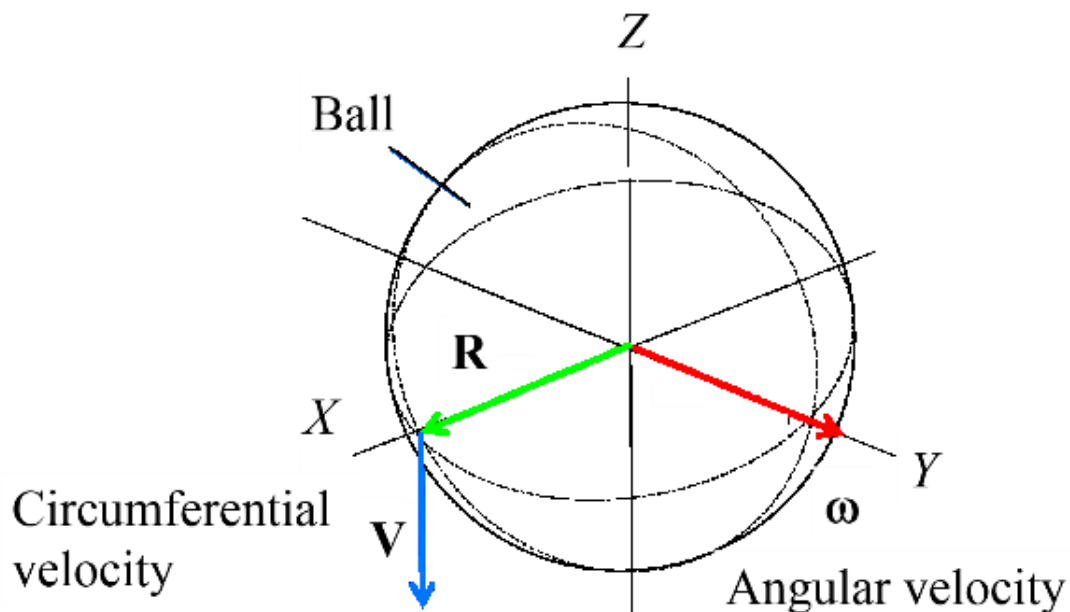


Fig. 2-5 Ball rotation and peripheral velocity

次に、ローラによって駆動される球の回転を明らかにする。この伝達機構では、球は2つのローラによって駆動される。これは、球表面に特定の方向の周速度を与えることで、球の回転運動を生成することである。球と接触するローラは、ローラの回転方向に周速度を与え、これと垂直な方向に球の回転を拘束する。回転自由な球体は、XYZ 軸周りに3自由度を有するので、球の回転運動を一意に決定するためには、少なくとも2つのローラが必要である。また、接触する2つのローラの方が異なる場合、球の自由度は1となってしまう、伝達機構として実用的ではない。このため、この伝達機構では、回転軸が同一平面上にある2つのローラによって球を駆動している。

Fig. 2-6 に XY 平面上に回転軸を有する2つのローラと接触している球の概略を示す。

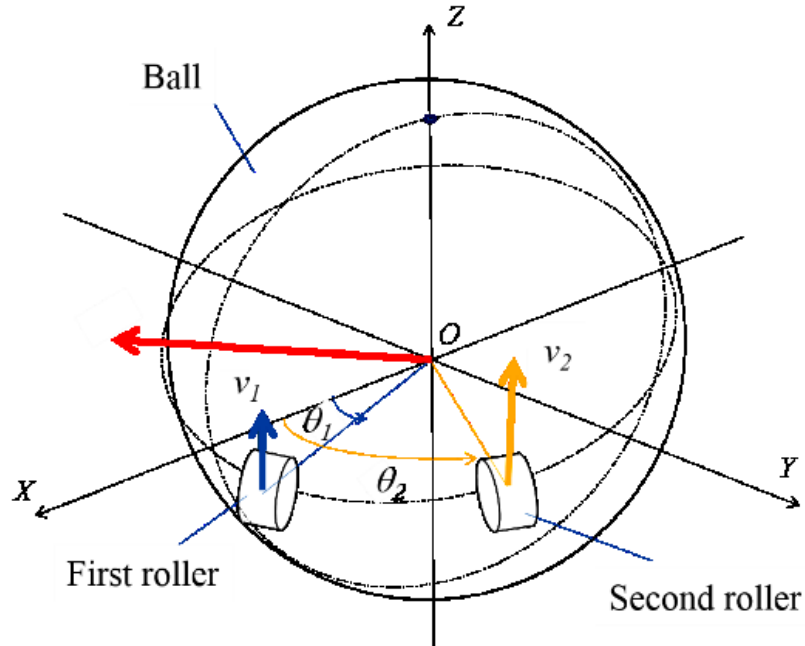


Fig. 2-6 Arrangement of drive roller

まず、第 1 のローラによる球の周速度と球の回転速度との関係は、

$$\boldsymbol{\omega}_1 = \frac{-\mathbf{v}_1 \times \mathbf{R}_1}{R^2} + p\mathbf{R}_1 \quad (2.9)$$

ここで、 \mathbf{R}_1 と \mathbf{v}_1 は第 1 のローラの接点における位置ベクトルと周速度ベクトルである。また、 p は任意のスカラーである。この項が決定されることで、球上の点の周速度と球の回転運動が一意に定まる。

同様に第 2 のローラによる周速度と球の回転速度との関係は、

$$\boldsymbol{\omega}_2 = \frac{-\mathbf{v}_2 \times \mathbf{R}_2}{R^2} + q\mathbf{R}_2 \quad (2.10)$$

ここで、 \mathbf{R}_2 と \mathbf{v}_2 は第 1 のローラと同様に定義される。また、 q は p とは異なる任意のスカラーである。各ローラの式(2.9), (2.10)の任意のスカラーは他の一方のローラによって決定される。 p , q を求める条件は以下の通りである。

$$1: \text{ 球体の回転運動 } \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2 \quad (2.11)$$

$$2: \text{ 第 1 ローラの周速度 } \mathbf{v}_1 = -\mathbf{R}_1 \times \boldsymbol{\omega} \quad (2.12)$$

$$3: \text{第 2 ローラの周速度 } \mathbf{v}_2 = -\mathbf{R}_2 \times \boldsymbol{\omega} \quad (2.13)$$

これらの条件から, p と q は,

$$p = \frac{v_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{R^2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}, \quad q = \frac{v_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{R^2 \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2.14)$$

このとき, 2 つのローラによって駆動される球の回転ベクトルは,

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \frac{-v_1 \cos \theta_2 + v_2 \cos \theta_1}{R \sin(\theta_1 - \theta_2)} & \frac{-v_1 \sin \theta_2 + v_2 \sin \theta_1}{R \sin(\theta_1 - \theta_2)} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.15)$$

式(2.15)により, 2 つの駆動ローラの周速度 v_1, v_2 により回転する球の回転ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を求めることができる.

2.2.3 球体によって駆動されるキャストの運動学

前項では, 駆動ローラの周速度と球の回転の関係を明らかにした. ここでは, 球の回転によって駆動されるキャスト側の分配ローラの運動を考え, 分配ローラによって伝達されるキャストの車輪軸, 操舵軸の回転を求める. これにより, 駆動ローラの回転とキャストの運動の関係が明らかとなる.

Fig. 2-7 は点 A で接触する球と分配ローラを示している.

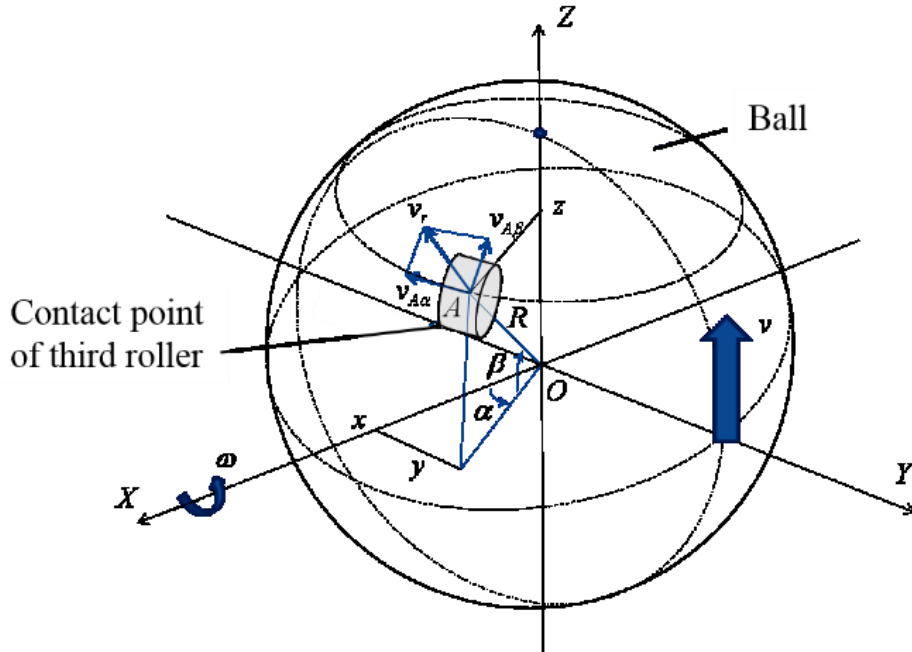


Fig. 2-7 The configuration of ball-roller pair

今、座標(x,y,z)にある接触点 A において球とローラが接触している．ここで、ローラの回転軸は常に XY 平面に対し並行であり、軸の高さを一定に維持し、かつ Z 軸周りに受動的に回転できるように支持されている．ローラの横滑りを許容しないとすると、ボールが回転する際、ローラは特定の収束位置以外に留まることが出来ない．例えば、Fig. 2-7 に示すローラ位置では、ローラは Z 軸周りに旋回しながら、Y 軸の負の方向の位置に向かって移動し、最終的に Y 軸上方で留まりながら、ローラが回転しつつける状態に収束する．これら一連の運動において、球の回転と分配ローラの旋回運動およびローラ軸の回転運動の関係を求める．

Fig. 2-7 から、接触点 A の位置ベクトルは、

$$\mathbf{R}_r = [R\cos\beta\cos\alpha \quad R\cos\beta\sin\alpha \quad R\sin\beta]^T \quad (2.16)$$

式(2.8), (2.15), (2.16)から、接触点 A における速度ベクトル \mathbf{v}_r は、

$$\mathbf{v}_r = \begin{bmatrix} \sin\beta \frac{-v_1\sin\theta_2 + v_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\ -\sin\beta \frac{-v_1\cos\theta_2 + v_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\ \cos\beta \left(\sin\alpha \frac{-v_1\cos\theta_2 + v_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - \cos\alpha \frac{-v_1\sin\theta_2 + v_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \right) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ここで、このベクトルの球の経度方向の速度成分を $v_{A\alpha}$ 、緯度方向の速度成分を $v_{A\beta}$ 、半径方向の速度成分を v_{AR} とする．この速度成分は、以下のようにベクトル \mathbf{v}_r を回転させることにより得られる．以下、行列内における S_α や C_β 等はそれぞれ $\sin\alpha$ 、 $\cos\beta$ の略記である．

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{AR} \\ v_{A\alpha} \\ v_{A\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_\beta & 0 & S_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\beta & 0 & C_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\alpha & S_\alpha & 0 \\ -S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_r \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\beta \left(\sin\alpha \frac{-v_1\sin\theta_2 + v_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \cos\alpha \frac{-v_1\cos\theta_2 + v_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \right) \\ -\sin\alpha \frac{-v_1\cos\theta_2 + v_2\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \cos\alpha \frac{-v_1\sin\theta_2 + v_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

半径方向の速度成分がゼロとなり、分配ローラの旋回運動に寄与する速度成分 $v_{A\alpha}$ 、ローラ軸回転に寄与する速度成分 $v_{A\beta}$ が得られた．

最後に、分配ローラから伝達される速度に従って、アクティブキャスタが地面に対して発生させる速度を考える．分配ローラは Z 軸周りで回転自由な梁によって支持されている．この軸は、

キャスタのステアリング軸である。支持梁は球表面からの速度成分 $v_{A\alpha}$ によって旋回し、この動作がアクティブキャスタのステアリング動作として使用される。ローラ自体の回転運動は v_{AB} によって引き起こされる。この回転運動は Fig. 2-1 で示したように、タイミングベルトによって一定の比でキャスタの車輪軸に伝達され、この動作がアクティブキャスタの車輪回転動作となる。ここで、ベルトの減速比 G 、分配ローラの半径 r_c 、ステアリング軸から接触点 A までのオフセット距離 S_c とすると、アクティブキャスタのステアリング軸に伝わる角速度 ω_s 、車輪軸に伝わる角速度 ω_w は、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{G}{r_c} v_{A\beta} \\ \frac{1}{S_c} v_{A\alpha} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{G}{r_c} \left(-\sin\alpha \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \cos\alpha \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \right) \\ \frac{1}{S_c} \sin\beta \left(\sin\alpha \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \cos\alpha \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.19)$$

式(2.19)で求めた操舵角速度 ω_s と車輪軸角速度 ω_w をアクティブキャスタの運動学式(2.3)に代入すると、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{Gr_w}{r_c} \cos\phi \sin\phi \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - \frac{Gr_w}{r_c} \cos^2\phi + \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \sin^2\phi \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \sin\phi \cos\phi \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\ \frac{Gr_w}{r_c} \sin^2\phi \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - \frac{Gr_w}{r_c} \cos\phi \sin\phi \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \sin\phi \cos\phi \frac{-v_1 \sin\theta_2 + v_2 \sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} + \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \cos^2\phi \frac{-v_1 \cos\theta_2 + v_2 \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ここで、式(2.19)における分配ローラの角度 α と、式(2.3)におけるキャスタ姿勢角 ϕ は同一の角度を表しているため、キャスタ姿勢角 ϕ で統一している。

式(2.20)を整理すると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} \frac{Gr_w}{r_c} \cos^2\phi + \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \sin^2\phi & \left(\frac{Gr_w}{r_c} - \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \right) \cos\phi \sin\phi \\ \left(\frac{s_w \sin\beta}{s_c} - \frac{Gr_w}{r_c} \right) \cos\phi \sin\phi & \frac{Gr_w}{r_c} \sin^2\phi + \frac{s_w \sin\beta}{s_c} \cos^2\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-\sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} & \frac{\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\ \frac{\cos\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} & \frac{-\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

式(2.21)に、駆動ローラの回転とキャスタの運動の関係を得ることができた。また、式(2.21)からキャスタ姿勢角 ϕ を消去するための条件は以下になる。

$$\frac{Gr_w}{r_c} = \frac{s_w \sin \beta}{s_c} \quad (2.22)$$

式(2.22)は、車輪軸に動力を伝達するプーリの伝達比や、キャストのオフセット距離を調整することによって実現できる。この条件を満たすとき、式(2.21)を整理すると次式を得る。

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{Gr_w}{r_c} & 0 \\ 0 & \frac{Gr_w}{r_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-\sin \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} & \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \\ \frac{\cos \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} & \frac{-\cos \theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

式(2.23)に、ACROBAT-S の制御則を得ることができた。この式はキャスト姿勢角をあらわす変数 ϕ を含まないため、キャストの姿勢角によらず、駆動ローラの周速度すなわちモータの回転速度とその比で移動方向とその速度を制御することができるのが確認できる。このため、従来のアクティブキャストのように絶対角センサによって車輪姿勢角を計測する必要がないことがわかる。

2.3 静力学解析

前節までで、2つのローラによる球の駆動、および分配ローラによる球の運動の分解とキャストの運動について検討した。ここではこの結果を利用して、機構の静力学解析を行う。これは、球とローラの接触点における摩擦力の大きさを推定するためである。要求される摩擦力を得るために、球とローラを適切な負荷で接触させる必要がある。このために仮想仕事の原理を用いて球と各ローラが接触点において伝達する駆動力を導出する。

式(2.18)において、 v_{AR} は常にゼロであることから、ベクトルの次元を下げ、 v_1, v_2 について整理すると以下の関係式を得る。

$$\begin{bmatrix} v_{A\alpha} \\ v_{A\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \begin{bmatrix} -S_\beta C_\alpha & -S_\alpha C_\beta \\ S_\alpha & -C_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -C_2 & C_1 \\ -S_2 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

これから、力の関係を求めると、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \begin{bmatrix} -C_2 & C_1 \\ -S_2 & S_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -S_\beta C_\alpha & -S_\alpha C_\beta \\ S_\alpha & -C_\alpha \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_s \\ f_w \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \begin{bmatrix} -C_2 & -S_2 \\ C_1 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -S_\beta C_\alpha & S_\alpha \\ -S_\alpha C_\beta & -C_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_s \\ f_w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.25)$$

を得る．ただし, f_1, f_2 は駆動ローラ 1, 2 それぞれの接触点における摩擦力, f_s, f_w は分配ローラの操舵駆動のための摩擦力および車輪駆動のための摩擦力である．

式(2.25)に, 製作する試作機の駆動ローラ配置である $\theta_1=0 \text{ deg}$, $\theta_2=90 \text{ deg}$ を代入し, さらに逆関数を求めることで, 試作機における静力学の関係式は以下となる．

$$\begin{bmatrix} f_s \\ f_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\alpha & C_\alpha \\ S_\beta & S_\beta \\ C_\alpha & -S_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

ここで, 角度 α はキャストの向きを表す変数でキャストの動作により変化する．一方, 角度 β は, 機構の設計により定数となる．よって, この関係から摩擦力が最大となる姿勢角 α を考える必要がある．

ここでは, 駆動ローラがアクチュエータによって定格トルクで回転駆動された場合に, その動力を車輪機構に伝達するために必要な分配ローラの摩擦力を求める．駆動ローラを駆動するアクチュエータはそれぞれ同一の仕様のもを用いると仮定すると, それによってローラと球の接触点に発生する摩擦力は等しくなり $f_1=f_2=f$ となる．このとき分配ローラに要求される摩擦力成分は車輪姿勢角によって変化する．また, 分配ローラは一点で球に接触し, 2 方向の摩擦力成分を伝達することから, その接触点における摩擦力は 2 成分の合成ベクトルとなる．

Fig. 2-8 に, 車輪角度の変化に伴う, f_s および f_w の変化, およびその合成の f_c のノルムを示す．ここで, 角度 β は試作機の設計における $\beta=\pi/4$ とした．

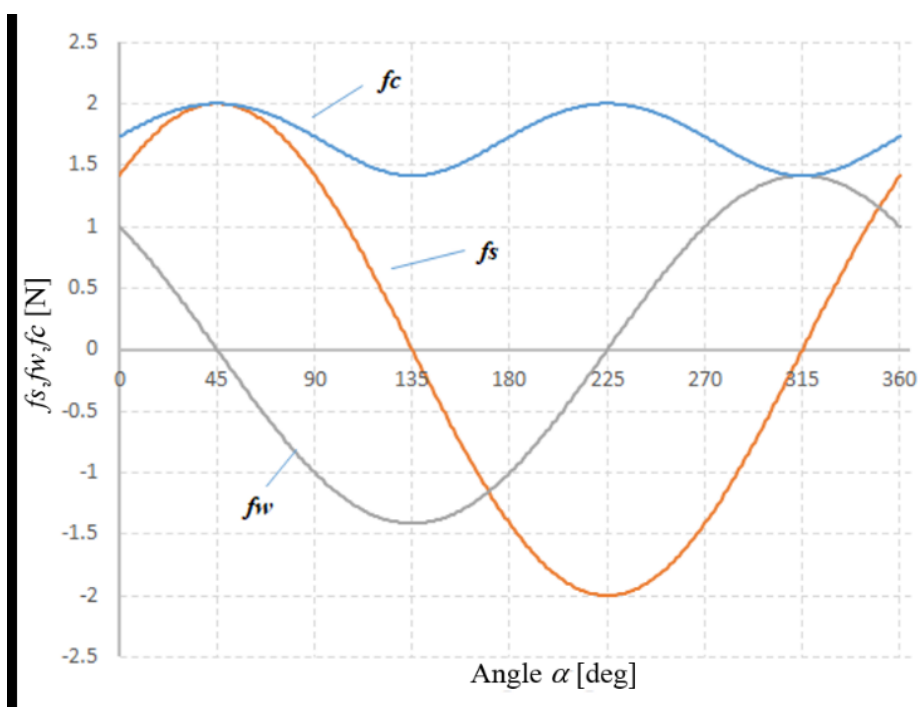


Fig. 2-8 Traction forces on the devide roller for varied α

これより、 f_c の最大値は、 $\alpha = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ のとき最大となり $f_c = 2f$ となることがわかった。モータの定格トルクにより伝達させる f_1, f_2 を車輪に確実に伝達するためには、上記で求めた摩擦力 f_c が確保できる与圧を付加する機構の設計が必要である。

第 3 章

ACROBAT-S の動力学シミュレーション

導出した運動学理論の妥当性を検証するため、動作シミュレーションを行う。シミュレーションには SolidWorks Motion を使用する。SolidWorks Motion は SolidWorks で構築した 3D モデルを用いて物理シミュレーションを行うことができるソフトである。球とローラの接触条件, 接触荷重, 球の回転等を与えることで, SolidWorks Motion は機械的動作を算出し, 摩擦力によって駆動されるローラ, キャスタの動きを生成する。

3.1 球体の駆動

まず, 2 つの駆動ローラによる球駆動部分の動作を検証するため, 球体と 2 つのローラを接触させ, 回転運動を行う物理シミュレーションを行った。シミュレーションでは 1 つの球体の回転方向を変化させ, 球体に接触させた 2 つのローラに伝達される周速度の変化をシミュレーション結果として得た。Fig. 3-1 にシミュレーションの様子を示す。

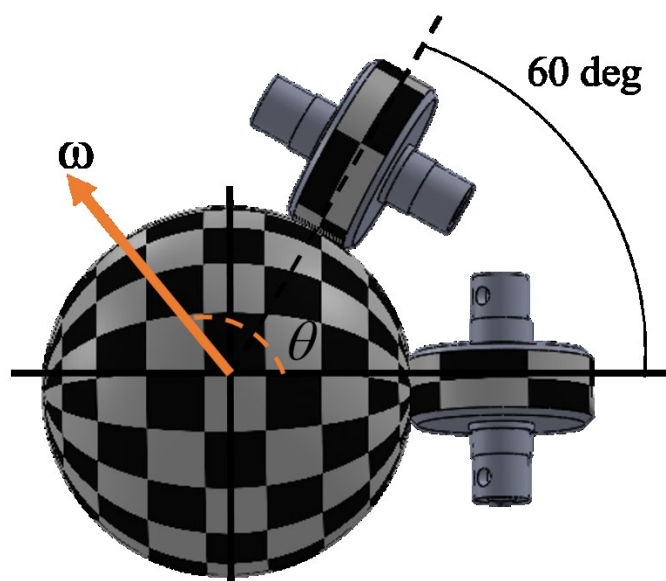


Fig. 3-1 Simulation of ball movement

Fig. 3-2 に大きさ一定の回転ベクトル ω の向き θ を 360deg 変化させた際の x 方向のベクトルの大きさ ω_x の真値を線で, シミュレーションにより算出された各ローラの周速度を, 式(2.15)に代入することによって求めた ω_x を点でプロットしたグラフを示す。Fig. 3-3 に同様に, y 方向のベクトルの大きさ ω_y の真値を線で, シミュレーション結果の各ローラの周速度から式(2.15)により求めた ω_y を点でプロットしたグラフを示す。

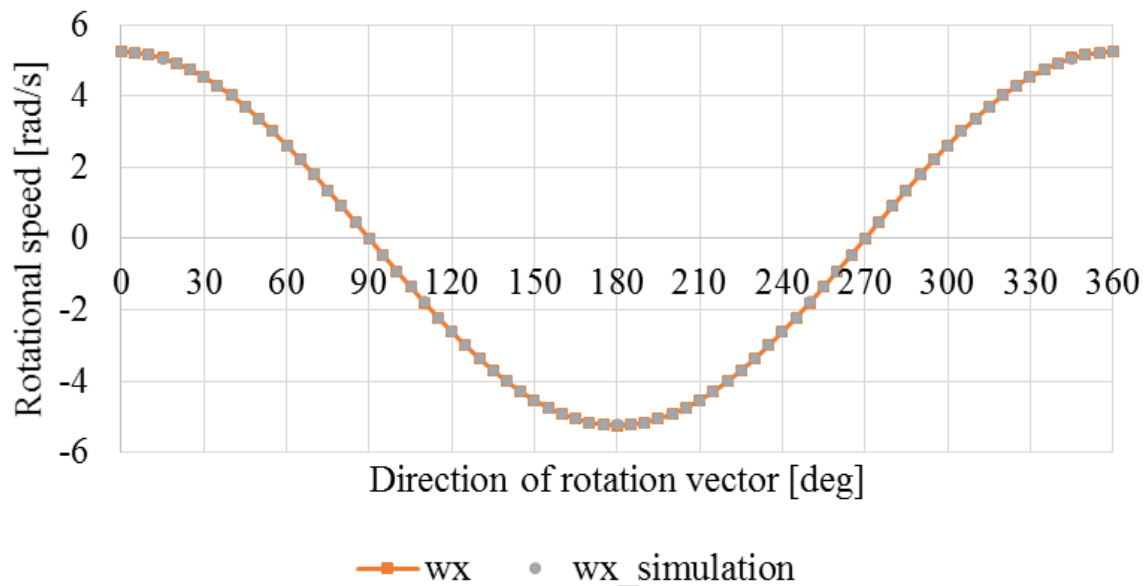


Fig. 3-2 Simulation result on ω_x

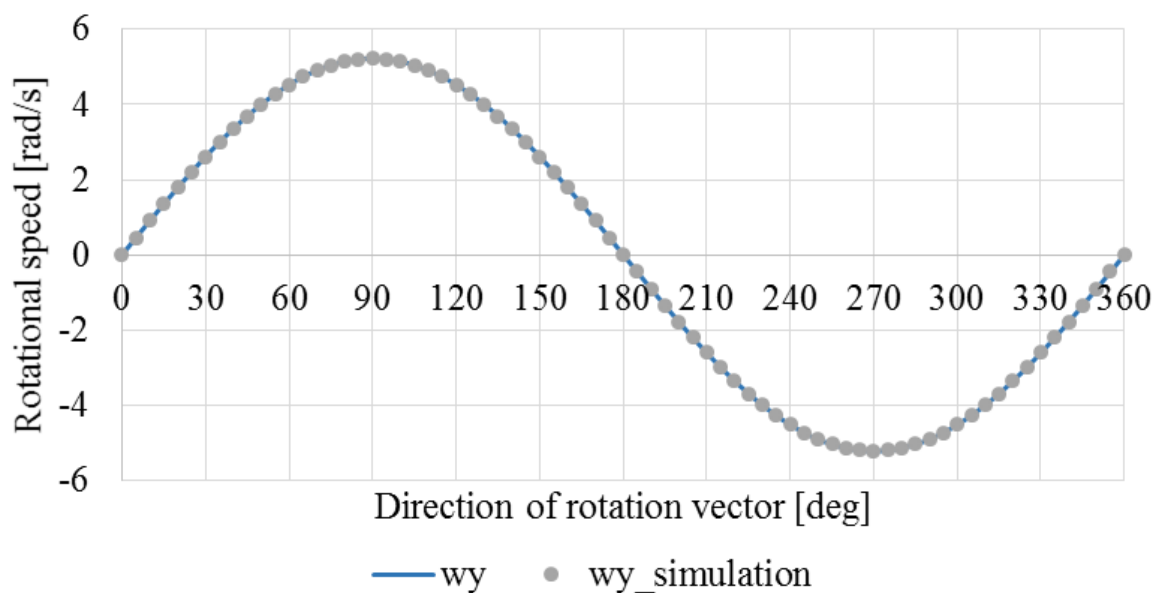


Fig. 3-3 Simulation result on ω_y

Fig. 3-2, Fig. 3-3 より, ω_x , ω_y とともに真値とシミュレーション結果から運動学によって求めた値がよく一致していることが分かる. これにより, 前節で導出したローラによって駆動される球体の運動学が妥当であることが確認できた.

3.2 キャスタの駆動

次に回転する球によるキャスタの動作を検証するため、球を回転させ、それに接触するローラによって周速度を分配しキャスタを動作させるシミュレーションを行った。ここでは、キャスタの反転動作を行うシミュレーションを構築した。キャスタ反転動作とは、進行方向逆向きにキャスタが向いている場合に、キャスタが旋回運動しながら移動動作を行うことである。キャスタは反転動作中であっても一定方向に移動することができるため、ACROBAT-S においては、キャスタを旋回させながら一方向に速度を発生させる移動動作となる。

Fig. 3-4 にシミュレーションの一連の様子を示す。初期状態(Fig. 3-4(a))では、キャスタは X 軸負の向きから 10deg の方向を向いている。ここで、球を Y 軸周りに回転させる。これは、X 軸正の向きに機構が移動するための速度ベクトルを生じる。この場合、キャスタの方向と球の回転方向が一致していない。よって、キャスタには旋回運動が生じる。Fig. 3-4(b)~(e)に示すように、キャスタは球の回転方向と一致するように旋回する。キャスタの方向は Fig. 3-4(f)に示すように、球の回転方向に収束し、その方向車輪が回転し続ける。このような一連の動作をキャスタの反転動作と呼び、反転動作中も、ACROBAT-S 本体は X 軸に沿って移動する。

Fig. 3-5 に、車輪回転方向、キャスタ旋回方向それぞれの速度成分を示す。この値は、車輪の接地点での速度成分を進行方向への理論速度でそれぞれ正規化したものである。プロットされた点は SolidWorks Motion によるシミュレーション結果であり、実線は式(2.19)を用いて算出した理論値である。Fig. 3-5 より、シミュレーション結果は、導出した運動学式より得られた理論値とよく一致していることが分かる。

Fig. 3-6 に、時間に対する ACROBAT-S の車輪が発生させた速度成分を示す。0.1sec のとき、球が回転を始め、0.35sec 時点で球表面の周速度が 3.0 m/s に達する。X 方向の速度は 0.35 sec で 1m/s に収束しており、ACROBAT-S が進行方向に理論と同様の速度を発生させていることが分かる。

これらのシミュレーション結果より、導出した運動学及び設計パラメータが妥当であることが確認できた。

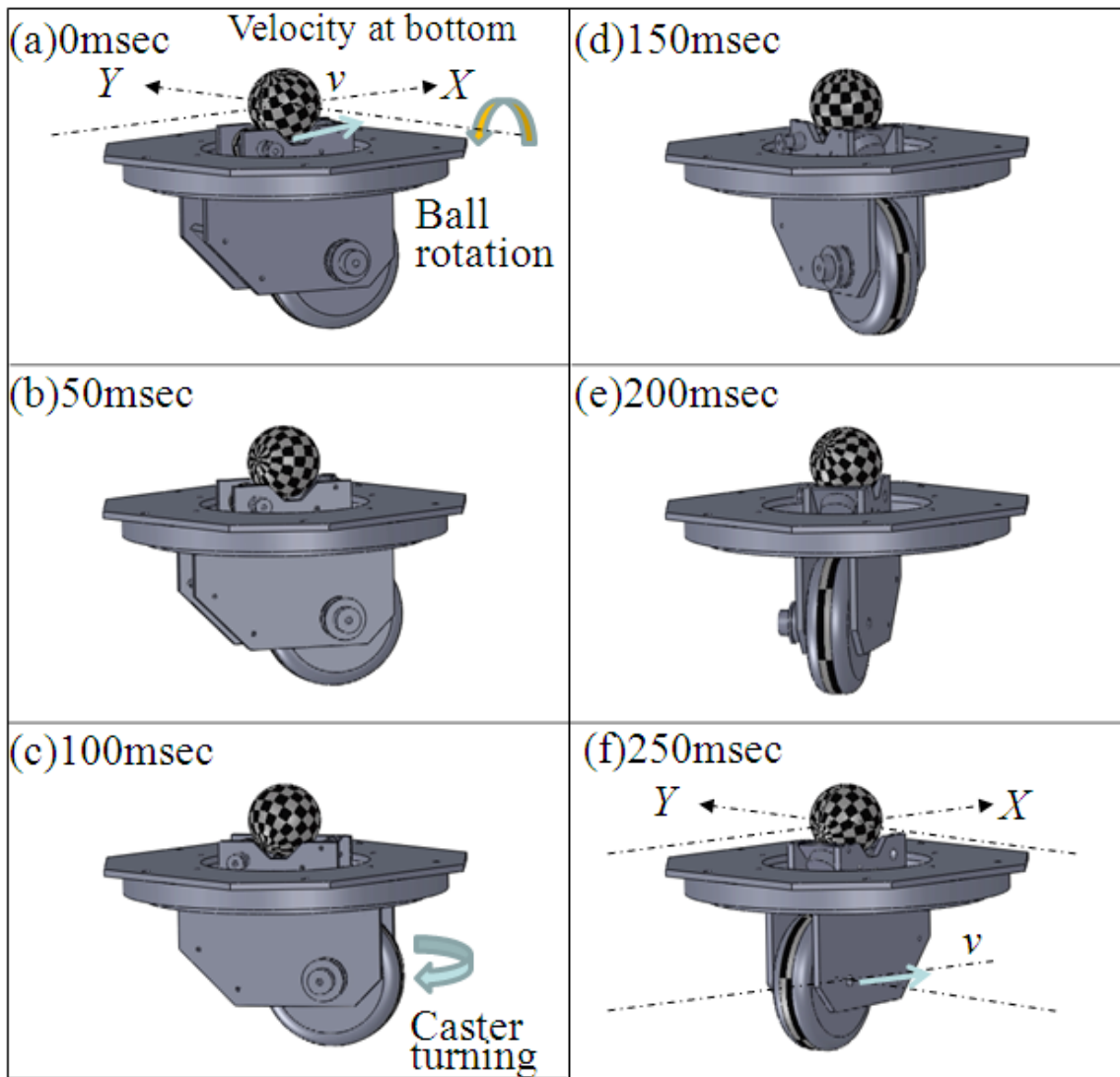


Fig. 3-4 Single wheel Simulation

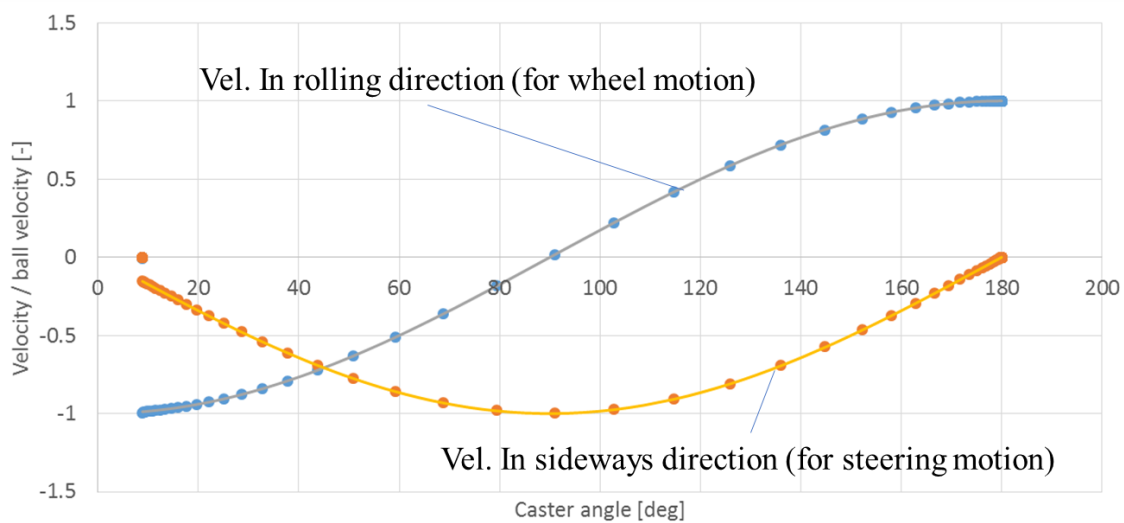


Fig. 3-5 Simulation results (Surface vel. against orientation α)

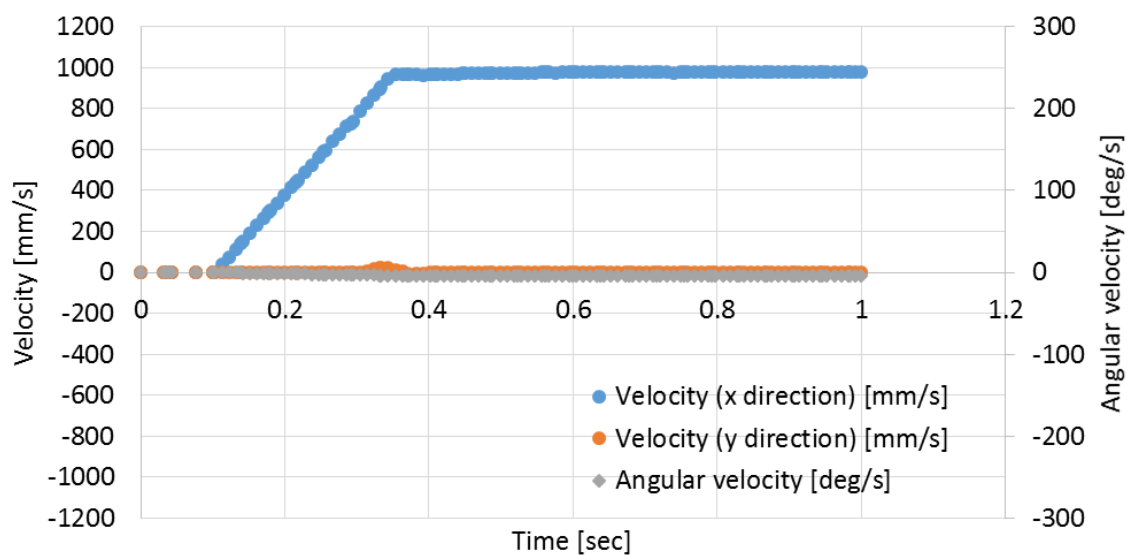


Fig. 3-6 Simulation results (Velocity profiles against time)

第 4 章

ACROBAT-S の試作

提案する ACROBAT-S 移動機構の性能を検証するため、試作機の製作を行った。

Fig. 4-1 に設計した ACROBAT-S の 3 次元 CAD ソフト Solidworks による 3D モデルを示す。中心に球を配置し、駆動ローラが 90deg に配置され、それぞれ球に接触している。駆動ローラはそれぞれオリエンタルモータ社製パルスモータ ARM46AC-PS25 によって駆動される。キャスト部分はターンテーブルベアリングを介して駆動ローラ等が固定されている基部に取り付けられており、回転自由に支持されている。

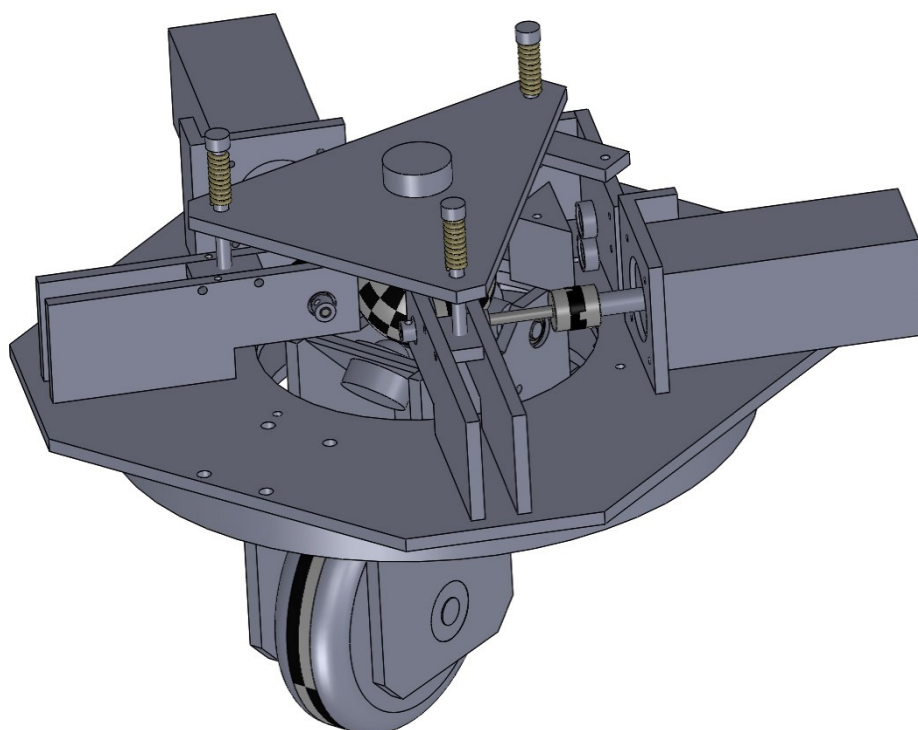


Fig. 4-1 ACROBAT-S 3D model

球とローラはバネを用いた押付機構により、一定の与圧を受けた状態で接触している。押付機構は球上側に配置され、球と分配ローラの接触に与圧を与える上部押付機構と、球側面に配置され、球と駆動ローラの接触に与圧を与える側部押付機構とがある。

Fig. 4-2 に球と分配ローラとの間に接触力を与える上部押付機構の概略図を示す。上部押付機構は 3 自由度に回転自由なボールローラが球中心を真下に押し下げるようにバネを介して取り付けられており、球の自由度を妨げずにバネの押付力を球に与える。バネと上部押付機構を介して

本体ネジ穴に固定されたネジは、固定する長さに応じてバネを圧縮し、これによって球と分配ローラに与える荷重を調整することが可能となっている。また、球下側で分配ローラと球の中心を挟んで向かい合う位置に回転自由なボールローラを配置し、球をキャストの回転中心からずれないように支持している。

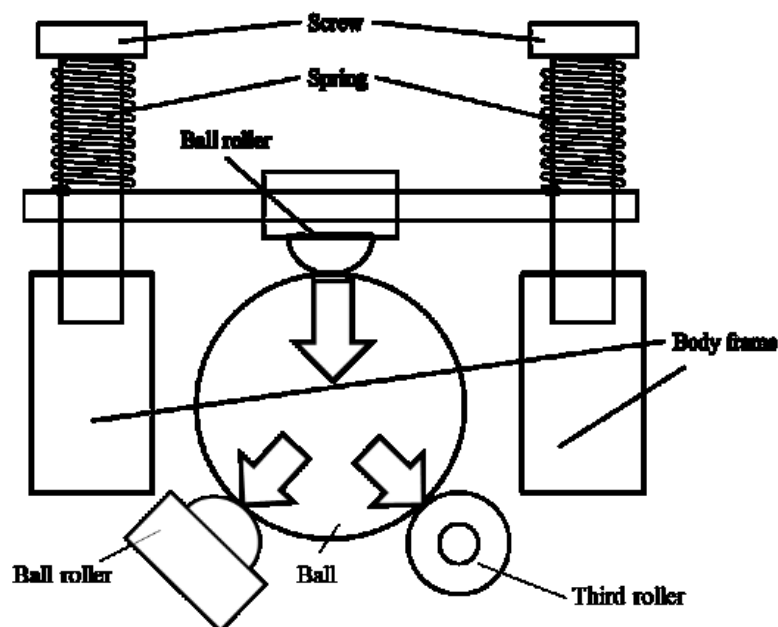


Fig. 4-2 Schematic of upper load unit

一方、球の駆動を行う 2 つの駆動ローラへの与圧構造について、球と駆動ローラの接触部分を確認するため上部押付機構を除いた試作機の上面図を Fig. 4-3 に示す。また、Fig. 4-4 は球と 2 つの駆動ローラとの間に接触力を与える側部押付機構の概略図を示している。側部押付機構は 1 自由度回転自由な円筒ローラが球を 2 つの駆動ローラに押し付けるようにバネを介して設置されている。ローラの軸の一端を回転自由に固定し、もう一端をバネによって押し付ける。バネはネジの先に取り付けたナットによって押し縮められており、ネジを回すことで荷重を調整することが可能である。この押付力によって球と 2 つの駆動ローラを一定の与圧で接触させる。

試作機において使用するモータ、オリエンタルモータ社製パルスモータ ARM46AC-PS25 の定格トルクは 2.5Nm であり、2 つのモータが同時に定格トルクを出力した場合でも滑りなく動力を伝達できることを基準として、これらの押付機構の与圧の調整を行った。

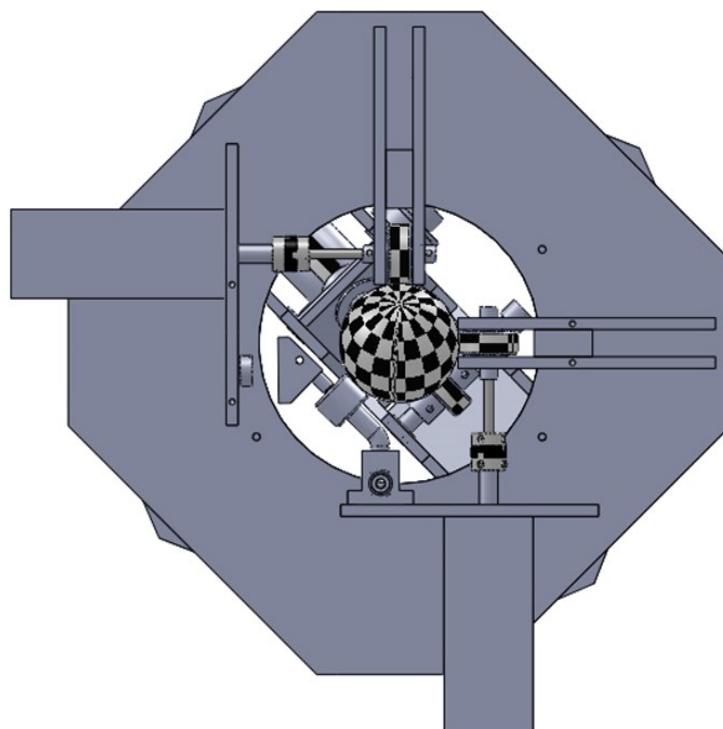


Fig. 4-3 Top view of ACROBAT-S

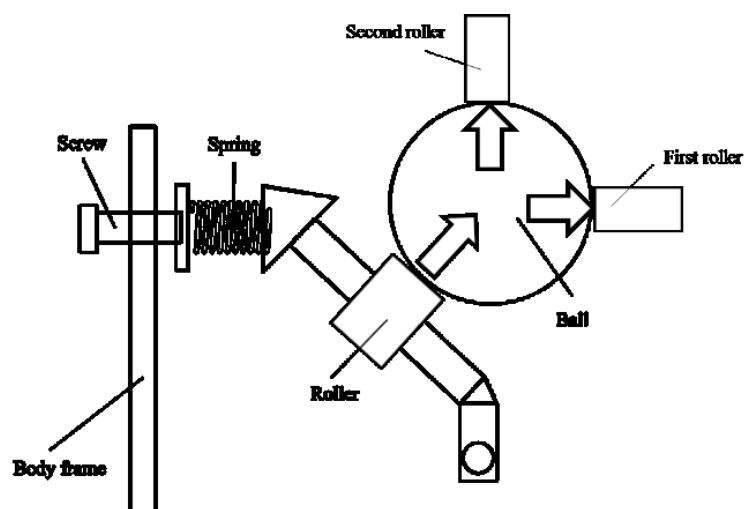


Fig. 4-4 Pre-loading mechanism for the 1st and 2nd drive rollers

Fig. 4-5 に試作機の駆動側部分を除いた、キャスト部分を示す．このキャスト部分はテーブルベアリングによって、駆動側基部に取り付けられ、自由に旋回することが可能である．分配ローラの回転は、プーリとタイミングベルトによって車輪に伝達される．駆動側部分においてモータが回転すると、2つの駆動ローラによって球が駆動され、その回転は分配ローラに伝達され、車輪の回転とキャストの旋回動作を行う．

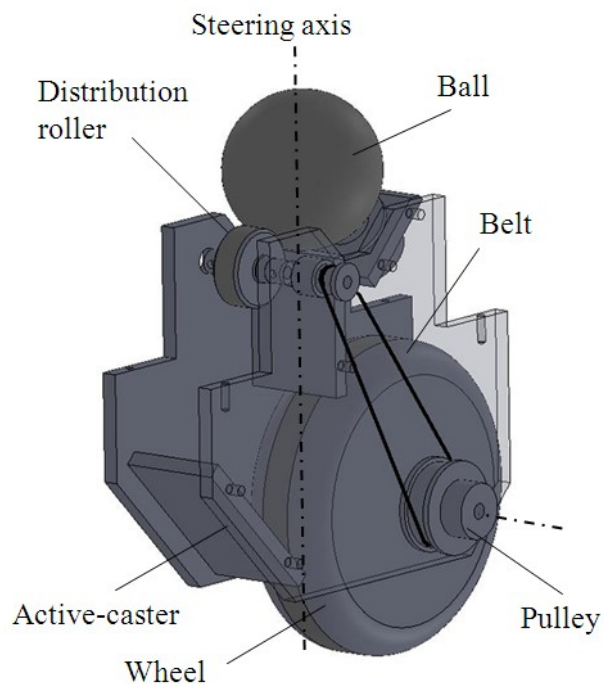


Fig. 4-5 ACROBAT-S without driving part

Table 4-1 に試作機の制御に関する設計パラメータを示す．各パラメータは ACROBAT-S の制御則の各変数に対応している．

Table 4-1 Parameters of ACROBAT-S

Radius of rollers : r_a, r_b, r_c [m]	0.0126
Reduction ratio : G_w	1/3
Radius of wheel : r_w [m]	0.05
Offset distance of roller C : a [m]	0.0180
Offset distance of a wheel : b [m]	0.0336
Position of the roller a : α [rad]	0
Position of the roller b : β [rad]	$\pi/2$

これらの設計に基づき，試作機の製作を行った．

Fig. 4-6 から Fig. 4-9 に試作機の写真を示す．

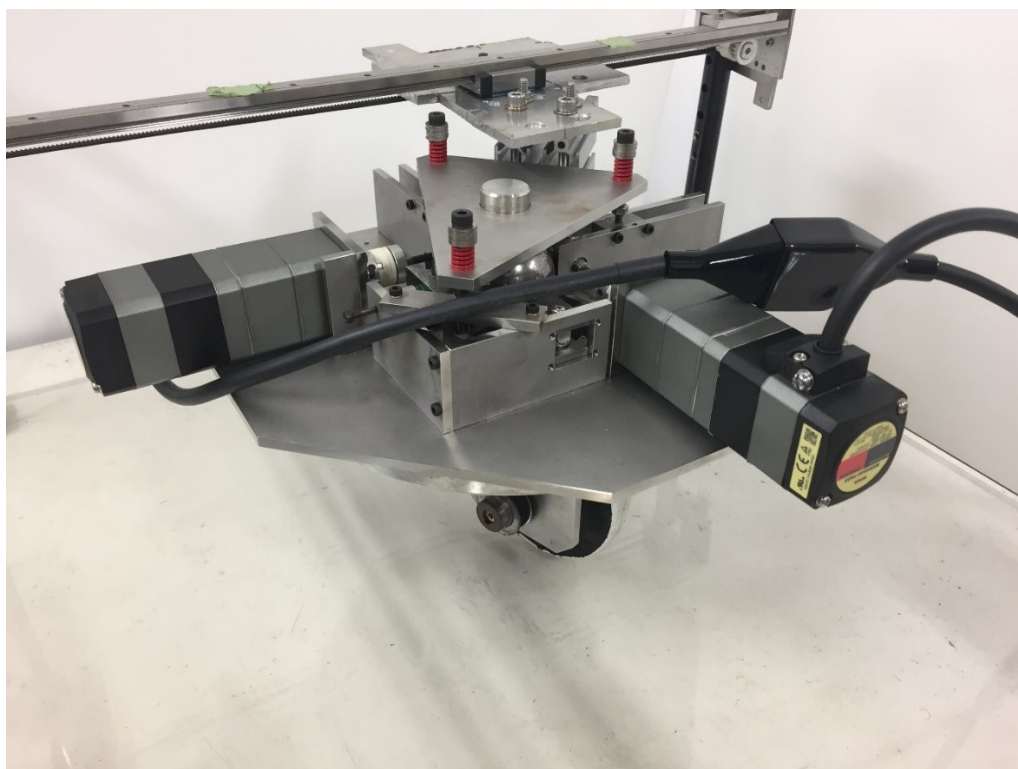


Fig. 4-6 Prototype of ACROBAT-S

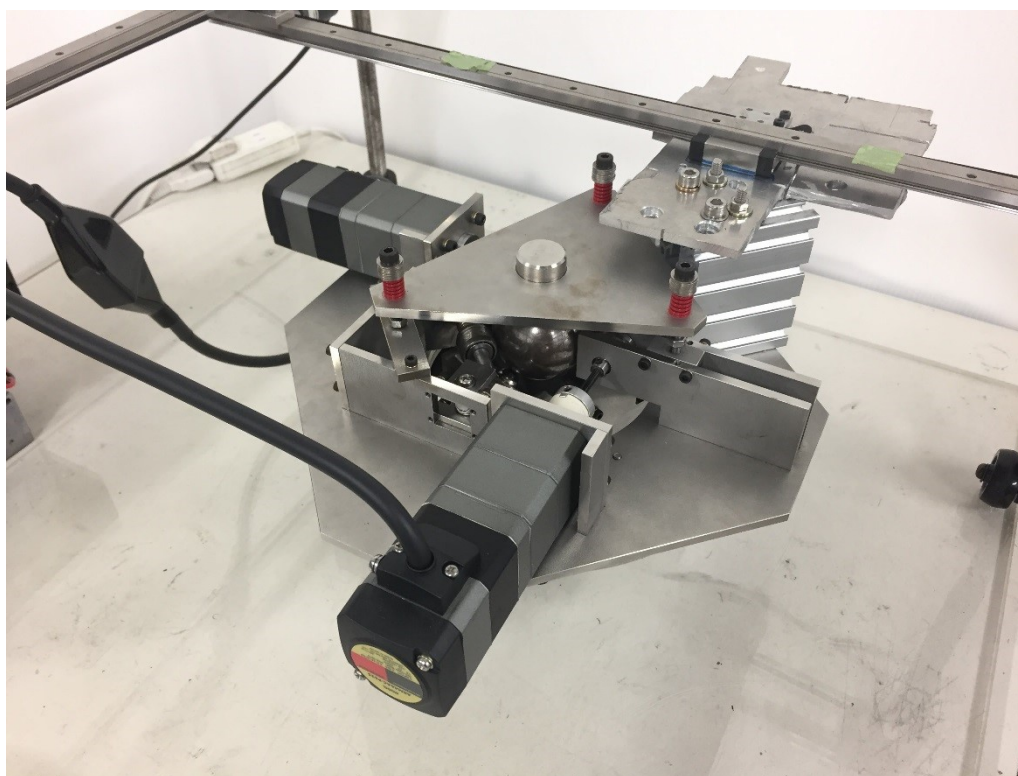


Fig. 4-7 Prototype of ACROBAT-S(isometric view)

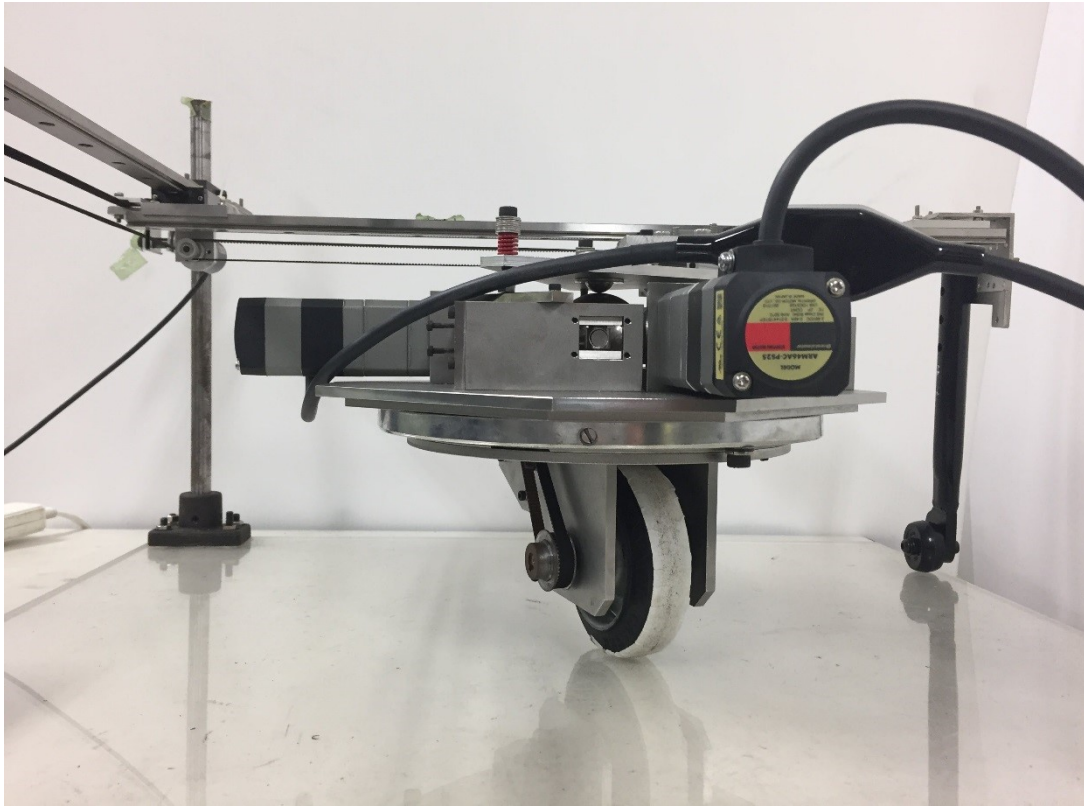


Fig. 4-8 Prototype of ACROBAT-S(front view)

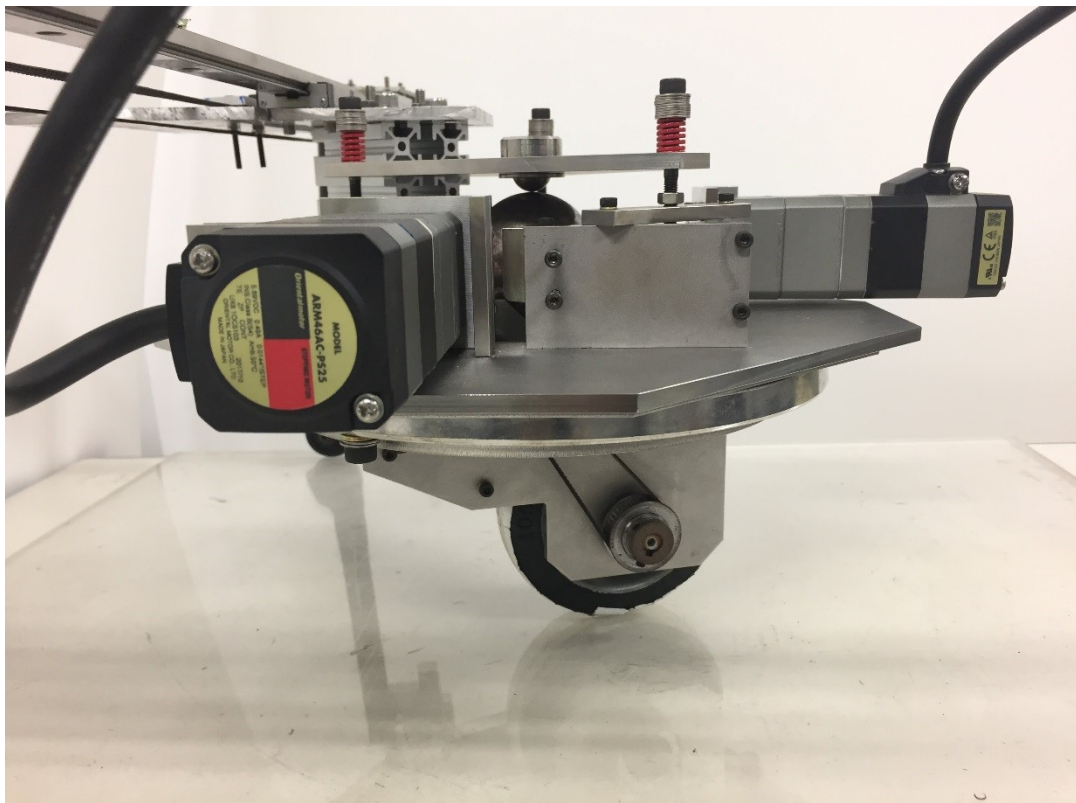


Fig. 4-9 Prototype of ACROBAT-S(side view)

4.1 動作実験

製作した試作機の動作を確認するため、動作実験を行う。まず、車輪が地面に接地していない無負荷の状態では、試作機を動作させる基礎的な動作実験を行い、運動学理論との比較を行う。次に、試作機を実際に走行させ、試作機の移動量とその軌跡を計測し、モータへの回転速度指令と比較し性能を評価する。

4.1.1 無負荷動作

車輪が地面に接触していない状態で、試作機を無負荷動作させる基礎実験を行った。試作機をジャッキで持ち上げ、キャストが空転する状態で固定した。Fig. 4-10 に無負荷動作の一連の写真を示す。



Fig. 4-10 No-load motion

初期状態(Fig. 4-10(a))では、車輪は進行方向(Fig. 4-10 内 右方向)に対して約 170deg を向いている。モータを回転させると、キャストの反転動作が生じ、Fig. 4-10(b)~(g)に示すようにキャストは進行方向に向かって旋回運動を行う。Fig. 4-10(j)において、進行方向にキャスト姿勢角が収束して

おり、その後 Fig. 4-10(k)~(l)においては車輪だけが回転していることが確認出来る。モータは常に一定速度で回転しており、このようなキャストの反転動作は機械的に生成されている。

ここで、ACROBAT-S には車輪の回転軸やキャストの旋回軸を直接計測するセンサが付随しないため、実験結果の計測のため車輪とステアリングの回転を測定するロータリエンコーダを試作機に取り付けた。実験では、一方のモータ(Y 方向)の回転を拘束した状態で、他方のモータ(X 方向)を 36rpm の一定速度で回転させた。Fig. 4-11 に車輪角速度及び、キャスト旋回角速度の変化をそれぞれ示す。

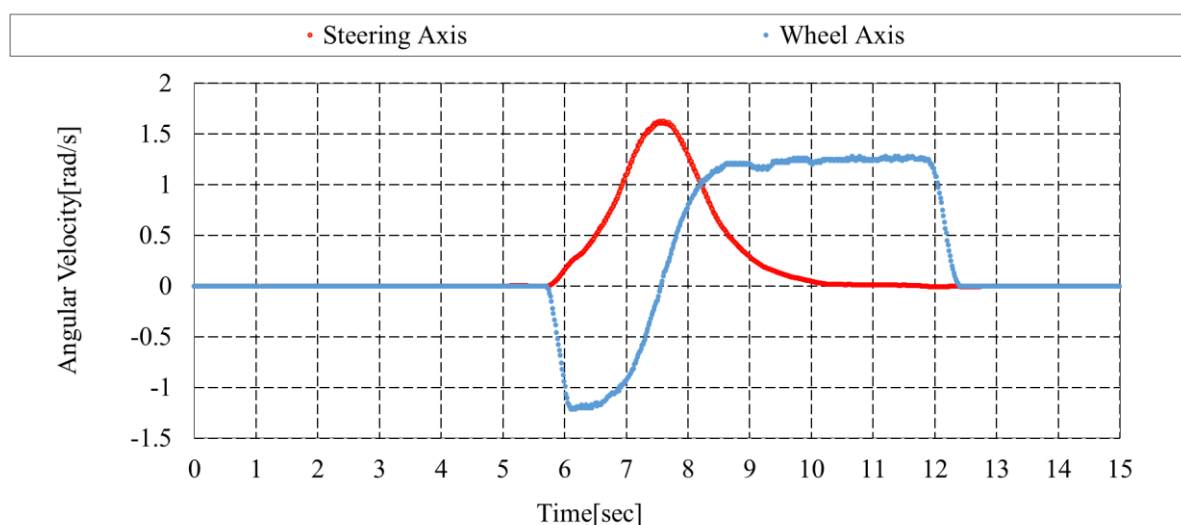


Fig. 4-11 No-load trial result (against time)

Fig. 4-11 を見ると、7.5sec 付近で車輪角速度の正負が反転していることが分かる。これは、キャストが 180deg 反転する動作に伴って、車輪の向きが変化したことを表している。また、同様に 7.5sec 付近で旋回角速度が最大となっている。これは、7.5sec 付近でキャストが球回転方向に対して 90deg を向いていることを表している。

Fig. 4-12 にキャスト角度に対する、車輪回転角速度および、キャスト旋回角速度をプロットで示す。また、運動学式(2.19)にモータ速度を入力することで算出した理論値を線で示す。Fig. 4-12 より、理論値と実験結果を比較すると極大値の位置や速度の変化の様子は同様の傾向を示しているものの、その最大値や正負の切り替わりの点など若干の差が見受けられる。これは、与圧を与えるボールベアリングの抵抗が原因と考えられる。理論検討では、与圧を与えることで、伝達可能な摩擦力が増加するとの仮定で検討を行ったが、実際には、与圧を与えるボールベアリングの摩擦も大きくなり、また回転方向により滑らかさが変化する。これが球の回転を阻害する方向に働いていると考えられる。

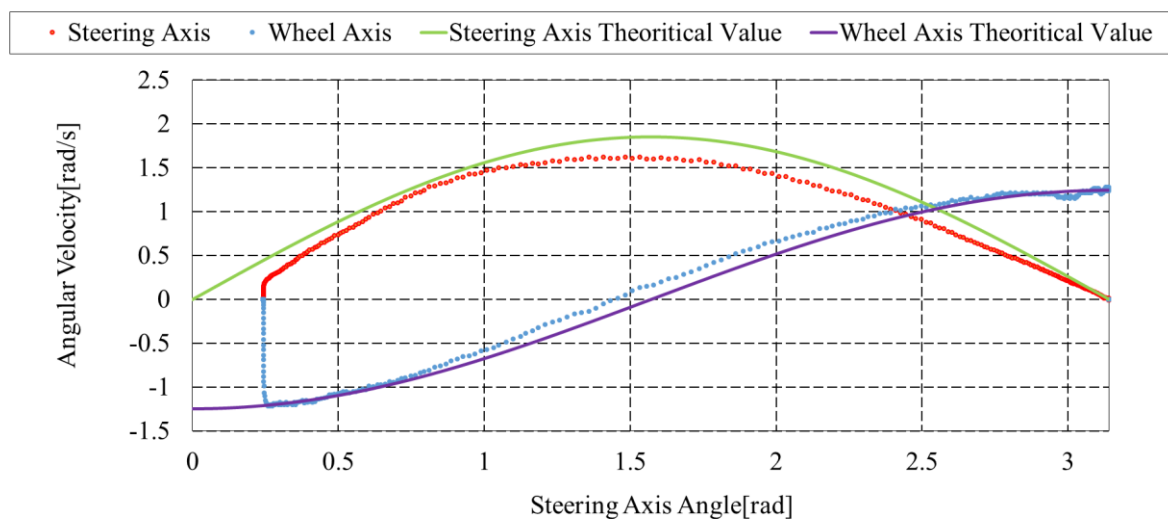


Fig. 4-12 No-load trial result (against caster angle)

4.1.2 走行動作

走行動作を評価するための動作実験を行った。1 輪で走行させるため、H 字型に 3 本のリニアガイドを組み合わせた計測ステージにより試作機を支持した。この計測ステージの X 方向、Y 方向それぞれのリニアガイドのスライダに移動量を計測するためのロータリエンコーダを取り付け、試作機の軌道と走行量を計測することを可能にした。試作機の 2 つのモータが X 方向および Y 方向の動作をそれぞれ独立して担うように設置した。Fig. 4-13 に計測ステージに設置した試作機の写真を示す。これを用いて、走行軌道を計測する動作実験を行った。

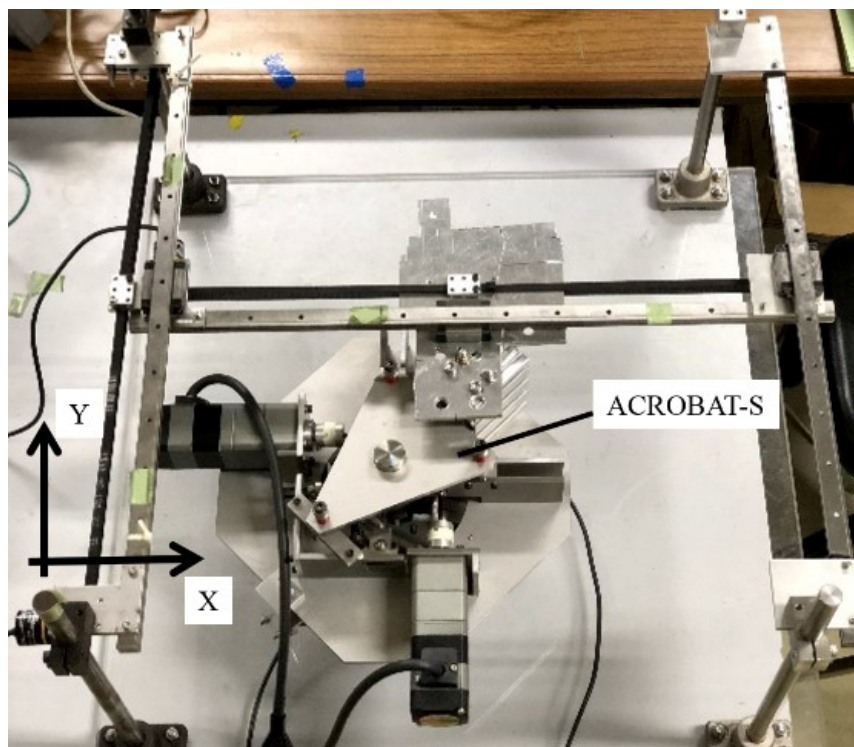


Fig. 4-13 The prototype wheel on the XY stage

試作機が一边 200mm の正方形に走行するように 2 つのモータの回転角度を PTP 制御で駆動した。つまり、移動する方向を担うモータを加減速を施した台形波速度指令により駆動するのみで、ACROBAT-S の試作機を駆動している。X 軸方向に移動する場合には、X 軸方向用モータのみを駆動し、Y 軸方向モータは停止状態にする。一方、Y 軸方向に移動する場合には、Y 軸用モータのみを駆動し、X 軸用モータを停止状態にする。この方法により、正方形の一边 200mm の正方形の軌道をたどる実験を行った。

Fig. 4-14 に走行実験の結果を示す。目標軌道を細い直線で、計測結果を点でプロットしている。

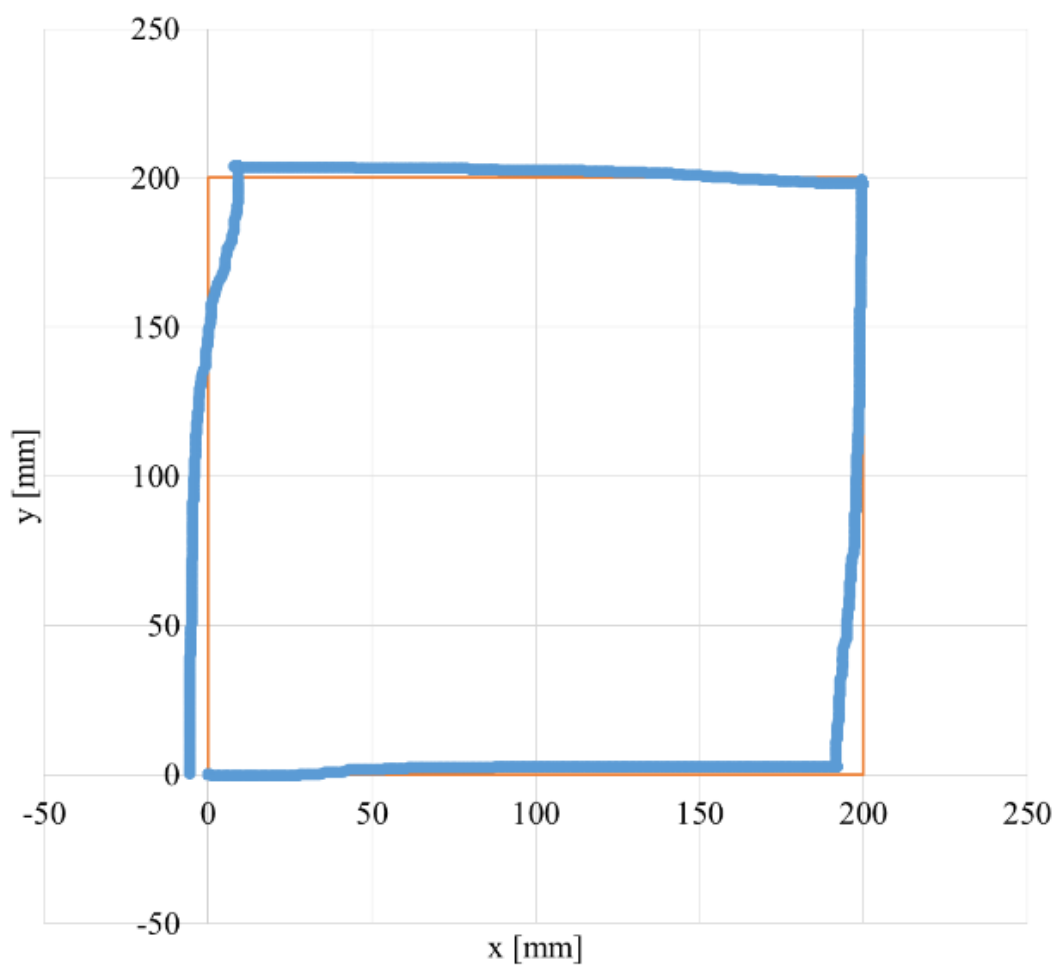


Fig. 4-14 Experimental result (square trajectory)

正方形軌道の各角では、車輪の方向に対して真横方向の動作が指令されている。Fig. 4-14 を見ると、4つの角のうち2つの角で、偏差が生じている様子が観測された。一方で良好に直角の軌道を追従できている場合もあることが確認できた。

Fig. 4-15 に時間軸に対する X 方向 Y 方向それぞれの速度を示す。

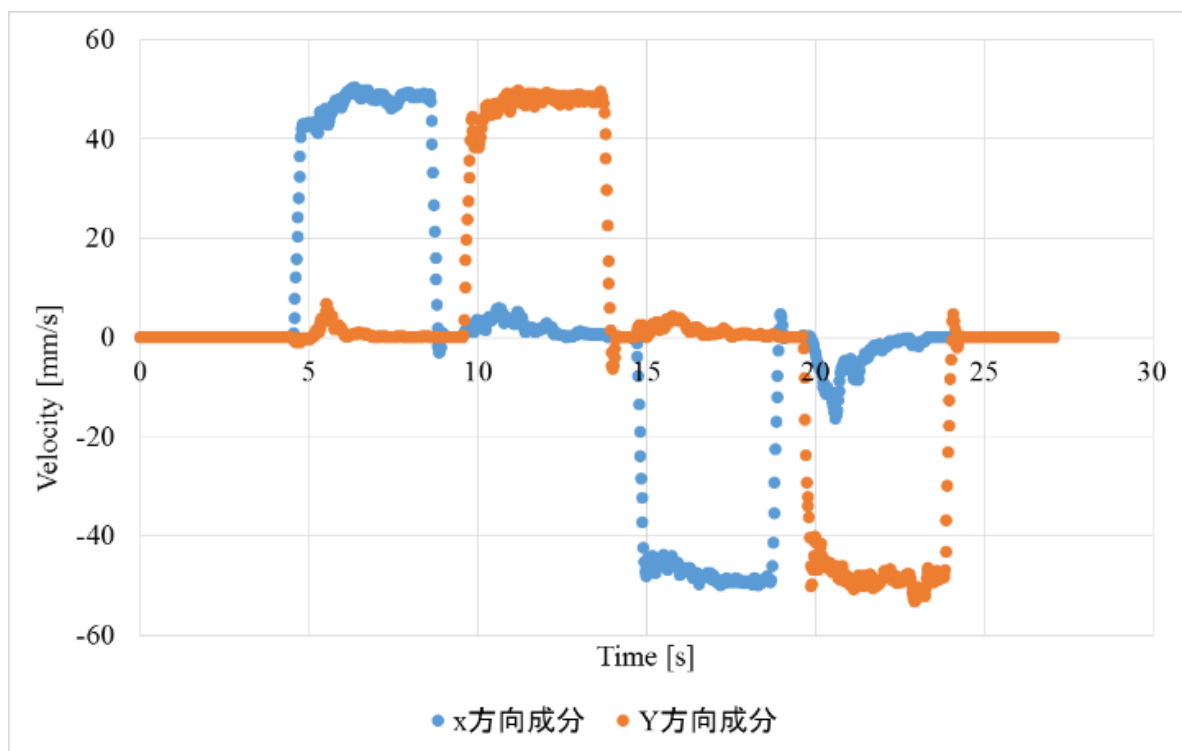


Fig. 4-15 Translation velocities along XY direction

Fig. 4-15 から、各方向に即座に速度を発生していることが確認でき、ACROBAT-S がホロノミック全方向移動機構としての性能を有していることが確認できる。しかし、進行方向が変化する際、進行方向に対して横向き速度が僅かに発生しており、これは、Fig. 4-14 における各角での軌道誤差に対応している。

また、Fig. 4-16 に正方形軌道を走行中の試作機の車輪角速度とキャスタ操舵角速度を示す。各辺の移動において、車輪角速度が理論に従っているのに対して、旋回角速度は特に正方形右下の角にあたる 2 度目の方向転換で最大値が不足していることが分かる。また、Fig. 4-15 において進行方向横向き速度が顕著に現れていた 10.5sec、20.6sec において旋回角速度に乱れが生じていることが分かる。これらの追従性の劣化の影響も与圧を付加するボールベアリングの影響であることが推測される。

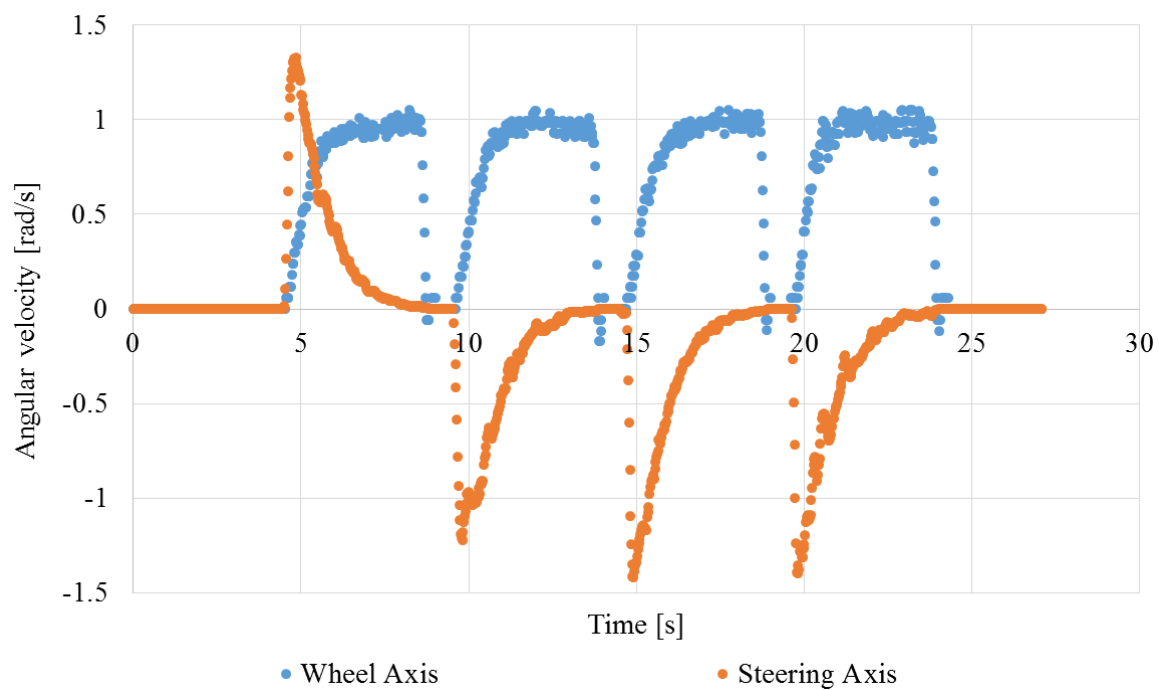


Fig. 4-16 Angular velocities of steering and wheel axes

次に、同様の制御方法で、軌道を変更し、様々な動作軌跡による走行実験を行った。距離 230mm で往復動作するようにモータ角度を制御した際の軌道を Fig. 4-17 に示す。

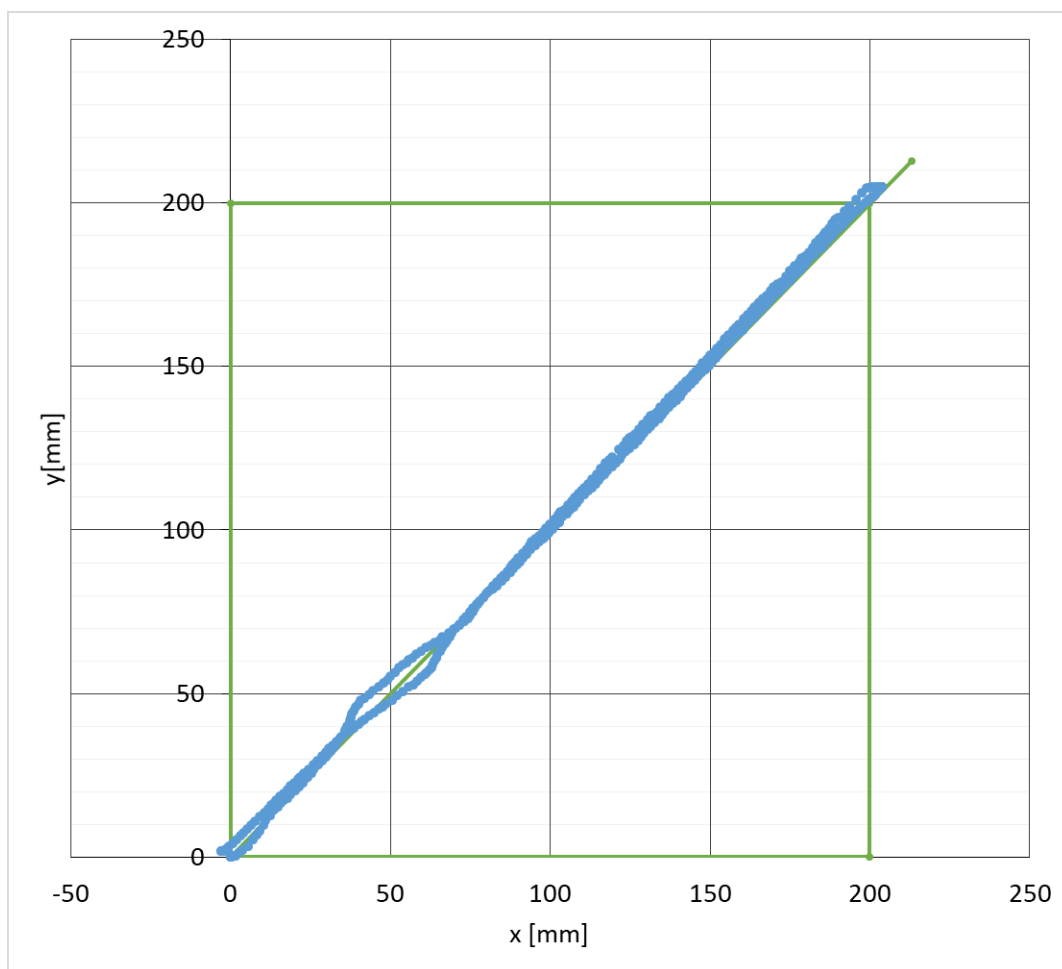


Fig. 4-17 Experimental result (230mm trajectory)

往復動作においては、X 方向に回転するモータと、Y 方向に回転するモータを 1:1 の速度比で回転させることで ACROBAT-S を斜め方向に駆動している。また、初期状態でキャストを進行方向反対に向け、動作開始時にキャストの反転動作が生じるようにしている。よって、往路と復路のどちらでもキャストの反転動作が生じることとなる。Fig. 4-17 を見ると、往路と復路ともに軌道に乱れが生じており、これはキャストの反転動作によるものである。また、移動量が目標距離に対して不足しているが、往路と復路の移動量は概ね等しくなっている。

また、一辺が 230mm の正三角形の軌道で動作するようにモータ角度を制御した際の軌道を Fig. 4-18 に示す。

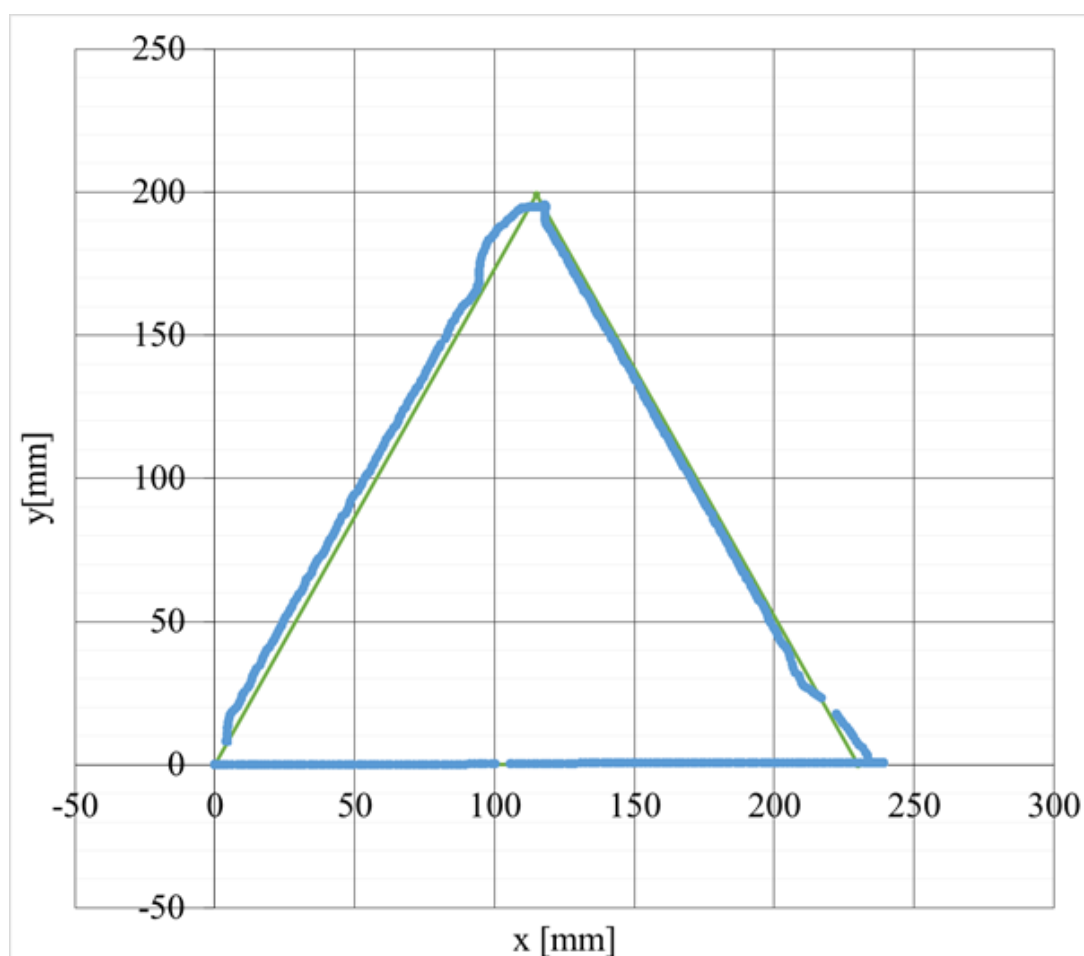


Fig. 4-18 Experimental result (triangle trajectory)

正三角形軌道の動作においては、まず、原点を初期位置として(230,0)の点を目標に移動する。このとき、X方向用モータのみを駆動し、Y方向用モータは停止している。(230,0)の点に移動した後、(230/2,200)の点を目標点として移動する。このとき、X方向用モータとY方向用モータを 1:1.73 の速度比で同時に回転させることで、斜め方向に ACROBAT-S を駆動する。

また、一辺が 230mm の星型の軌道で動作するようにモータ角度を制御した際の軌道を Fig. 4-19 に示す。

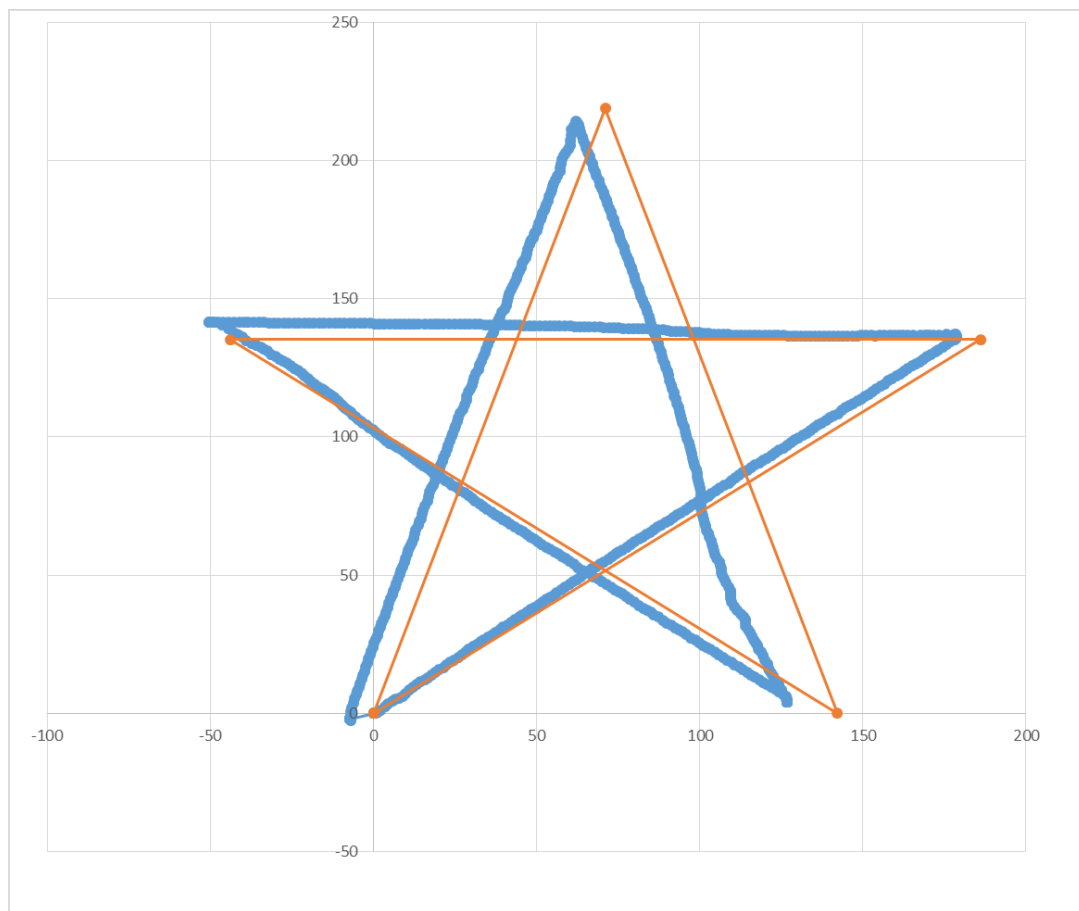


Fig. 4-19 Experimental result (star trajectory)

星型軌道の動作においては、まず、原点を初期位置として(186.1,135.2)の点を目標に右斜上方向に移動する。次に、(-43.9,135.2)の点に左方向に移動し、その後(142.1,0)の点に右斜下方向に移動する。続けて(71.1,218.7)の点に左斜上方向に移動し、最後に原点に向かって左斜下方向に移動する。進行方向が変化する度に誤差が生じ、目標軌道に対して誤差が蓄積していていることが確認できるが、最終的な位置誤差は 10mm 以内に収まっている。

これらの基礎実験の結果、試作した提案機構は、動作精度に関して課題が見えてきたものの、ホロノミック全方向移動機構として基本的な性能を満たしていることを確認した。

第 5 章

ACROBAT-S ロボットの理論

本章では、前章において動作を確認した提案機構「ACROBAT-S」を用いた全方向移動ロボットの構造を検討する。

ACROBAT-S ロボットは同方向に駆動力を発生させる複数輪の駆動ローラを 1 つのモータで駆動することで、冗長にならずに全方向移動を実現できる。この構造を適用したロボットについて運動学解析を行い、ロボットの制御則を導出する。

次に、試作機の設計に先立って、任意の角度で配置できる駆動ローラについて、車輪に生じるトルクやモータの回転角速度に基づいた適切な配置角度を検討する。

5.1 提案ロボットの概要

複数の ACROBAT-S を制御する場合、それぞれの ACROBAT-S を独立に駆動する場合には一輪につき 2 つのモータが必要となるため、二輪ロボットにおいては 4 つのモータ、三輪のロボットにおいては 6 つのモータが必要となり、冗長となってしまう。しかし、全方向移動ロボットにおいては、車輪を完全に独立に駆動する必要はない。これは例えば、ロボットの進行方向と同一軸上に並んだ 2 つの車輪は同一方向に速度を発生させ、2 つの車輪がお互いの速度を打ち消し合う方向に速度を発生させる必要はないためである。ACROBAT-S の駆動ローラは任意の角度で配置できる。この特徴により、ローラ配置を工夫することで、同一方向に ACROBAT-S を駆動するローラを同一のモータで駆動させ、モータを複数輪で共有し、ロボットの駆動に必要なモータ数を減らすことができる。Fig. 5-1 に二輪ロボットを構成する際のローラ配置の例を示す。

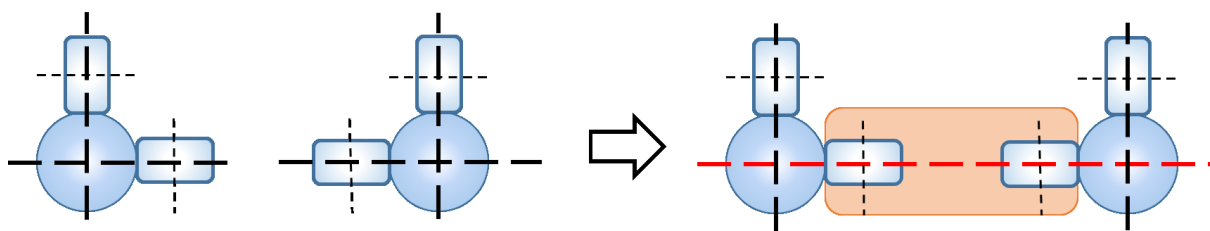


Fig. 5-1 Example of roller arrangement for a two-wheeled robot

Fig. 5-1 のように ACROBAT-S が横並びに 2 つ配置されている場合、同一軸上にある 2 つの駆動ローラは同一方向に同じ速度で回転する。よって、この 2 つの駆動ローラを同一のモータで回転させることが可能となる(Fig. 5-2)。

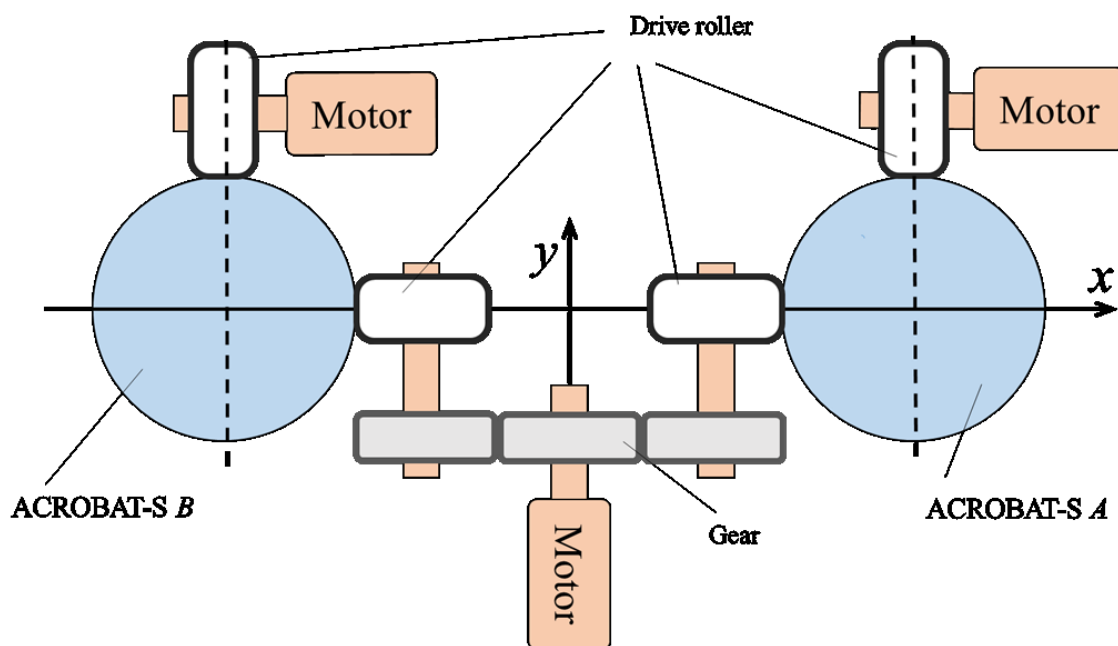


Fig. 5-2 Motor arrangement for two-wheel robot

この構成であれば、4つのローラを3つのモータで駆動することができ、冗長にならずに二輪の ACROBAT-S を備えた全方向移動ロボットを実現できる。

同様に三輪構成のロボットにおいても、Fig. 5-3 のように配置を工夫することでそれぞれのモータを共有し、3つのモータで三輪を駆動することができ、冗長にならずに全方向移動ロボットを実現することができる。

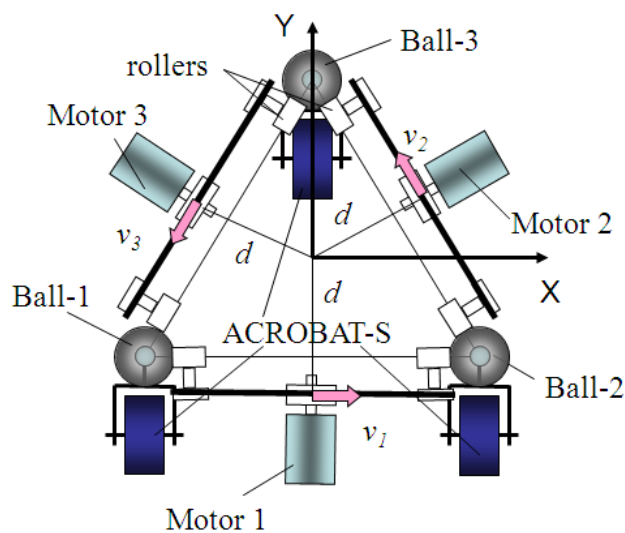


Fig. 5-3 Motor arrangement of three-wheel robot

5.2 運動学解析

ここでは，二輪構成のロボットについて，Fig. 5-1 で例示したように横方向に並んだ 2 つの駆動ローラが同一のモータにより同一の回転速度で駆動される場合での運動学の導出を行う．

ロボットの座標系を Fig. 5-4 に定める．単位ベクトル \mathbf{e}_i はロボットの回転中心を中心とした円に接する単位ベクトルであり，それぞれの ACROBAT-S から伸びている．

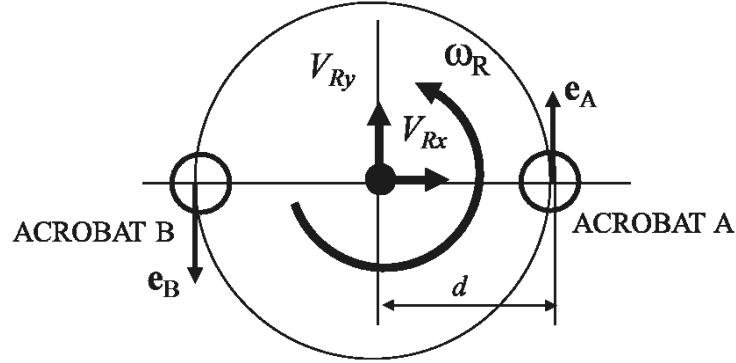


Fig. 5-4 Coordinate settings of robot

このとき，それぞれの車輪 ACROBAT A，ACROBAT B の発生させる速度ベクトルをそれぞれ \mathbf{V}_i とすると，ロボットの並進速度 V_{Rx} ， V_{Ry} 及び旋回角速度 ω_R を用いて \mathbf{V}_i は以下の式で表される．

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \end{bmatrix} + d\omega_R \mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} d\mathbf{e}_i \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

前章で求めた ACROBAT-S の運動学とロボットの座標系を対応させると，それぞれの ACROBAT-S の運動学から求める \mathbf{V}_i は以下の式で表される．

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = -\frac{Gr_w}{r_c} \begin{bmatrix} \frac{-\sin\theta_{i2}}{\sin(\theta_{i1} - \theta_{i2})} & \frac{\sin\theta_{i1}}{\sin(\theta_{i1} - \theta_{i2})} \\ \frac{\cos\theta_{i2}}{\sin(\theta_{i1} - \theta_{i2})} & -\frac{\cos\theta_{i1}}{\sin(\theta_{i1} - \theta_{i2})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

式(5.1)，(5.2)より，それぞれの ACROBAT-S を駆動するモータの回転角速度とロボットの運動の関係式を得ることができる．

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix} \\ &= -\frac{Gr_w}{r_c} \begin{bmatrix} \frac{-\sin\theta_{A2}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & \frac{\sin\theta_{A1}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & 0 & 0 \\ \frac{\cos\theta_{A2}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & \frac{-\cos\theta_{A1}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\sin\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{\sin\theta_{B1}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} \\ 0 & 0 & \frac{\cos\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{-\cos\theta_{B1}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{Gr_w}{r_c} \begin{bmatrix} \frac{\sin\theta_{A2}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & 0 & \frac{-\sin\theta_{A1}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} \\ \frac{-\cos\theta_{A2}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & 0 & \frac{\cos\theta_{A1}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} \\ 0 & \frac{\sin\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{-\sin\theta_{B1}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} \\ 0 & \frac{-\cos\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{\cos\theta_{B1}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.4)$$

ここで、3つのモータの回転角速度 v_0 , v_1 , v_2 と ACROBAT-S の駆動ローラの回転角速度との対応およびローラ配置角度の設定を Fig. 5-5 に示す。

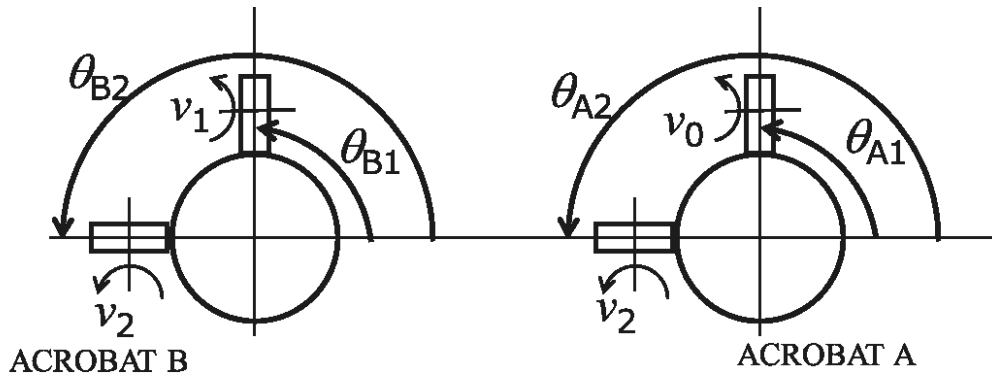


Fig. 5-5 Drive roller coordinate settings

同一軸上で同方向に駆動力を発揮する 2 つのローラの回転角速度を v_2 とすることで、モータの共有を表現する。

式(5.3)および式(5.4)を次の形に置き換える。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad \text{ここで,} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -d \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad \text{ここで,} \quad \mathbf{H} = \frac{Gr_w}{r_c} \begin{bmatrix} \frac{\sin\theta_{A2}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} & 0 & \frac{-\sin\theta_{A1}}{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})} \\ -\cos\theta_{A2} & 0 & \cos\theta_{A1} \\ \frac{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})}{0} & \frac{\sin\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{\sin(\theta_{A1}-\theta_{A2})}{-\sin\theta_{B1}} \\ 0 & \frac{-\cos\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})}{\cos\theta_{B1}} \\ 0 & \frac{-\cos\theta_{B2}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} & \frac{\cos\theta_{B1}}{\sin(\theta_{B1}-\theta_{B2})} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

式(5.5), (5.6)より,

$$\mathbf{Q}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

式(5.7)を擬似逆行列を用いて解くと, 順運動学と逆運動学を得る.

順運動学は次式となる.

$$\begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{H} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

逆運動学は次式となる.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Q} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

ここで簡単のため, 駆動ローラの配置角度を $\theta_{A1}=90 \text{ deg}$, $\theta_{A2}=180 \text{ deg}$, $\theta_{B1}=90 \text{ deg}$, $\theta_{B2}=180 \text{ deg}$ とすると, \mathbf{H} 行列は,

$$\mathbf{H} = \frac{Gr_w}{r_c} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

式(5.9)を計算すると、以上のローラ配置における ACROBAT-S 二輪ロボットの逆運動学式を得る。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\frac{Gr_w}{r_c}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & -d \\ 0 & -1 & d \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

以上のように、式(5.9)から得られる逆運動学の式を用いることで、全方向移動ロボットの制御が可能である。

5.3 駆動ローラ配置の検討

二輪の ACROBAT-S を駆動するにはそれぞれ 2 つの駆動ローラ、計 4 つのローラが必要である。このうち 2 つのローラは共有のモータで駆動され、その配置は同一軸上である。これに対し、残りの 2 つのローラは独立したモータで駆動され、共有モータで駆動されるローラと異なる任意の設置角度で配置される。この節では、この独立したローラの配置角度を検討するため、車輪の出力トルクやモータ回転角速度に、ローラ配置角度が与える影響について確認し、適切なローラ配置角度を決定する。

まず、車輪の出力トルクを検討する。式(2.23)に仮想仕事の原理を適用すると、駆動ローラ表面に発生する力と、車輪接地面に生じる推力の関係は次式で表される。

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f_s \\ f_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} & \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_1 & -\cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

ここで、車輪姿勢角 α は車輪接地面に生じる推力の出力方向を表す。駆動ローラの出力 f_1, f_2 を一定とすると、車輪姿勢角すなわち出力方向に応じて車輪推力の大きさが変化することが分かる。

ホロノミック全方向移動においては、移動方向の変化による車輪推力のばらつきが小さいことが好ましい。つまり、推力が最大となる方向における車輪推力と最小となる方向における車輪推力の差が小さいことが望まれる。よって、任意の駆動ローラ配置における車輪推力の最大、最小となる方向およびその値を調べ、その差が小さくなる駆動ローラ配置を求める。

ここでは、車輪の向きは移動方向に収束していることとし、車輪の旋回動作によって生じるトルクは考慮しない。つまり、式(5.12)における車輪軸回転によって生じる f_w のみについて考える。

共有モータによって駆動される一組のローラは互いに向かい合って配置されるため、角度は一意に決定される。ここでは、独立したローラの位置関係を直感的に理解できるように、Fig. 5-6 のように、ローラ配置を共有ローラに対する独立ローラの相対角度 θ_a 、 θ_b で表す。

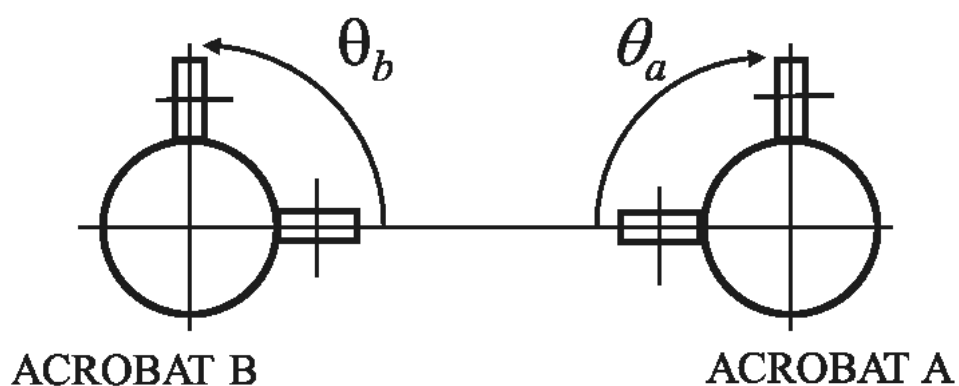


Fig. 5-6 Independent roller coordinate settings

駆動ローラ表面に発生する力を $f_1=f_2=1\text{N}$ で一定とし、 $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$ のときの車輪推力の変化を Fig. 5-7 に示す。グラフの x 軸、y 軸はロボット座標系における x 軸方向、y 軸方向に対応している。二輪の車輪推力を足し合わせた最大値と最小値はそれぞれ 2.23 と 1.00 となった。

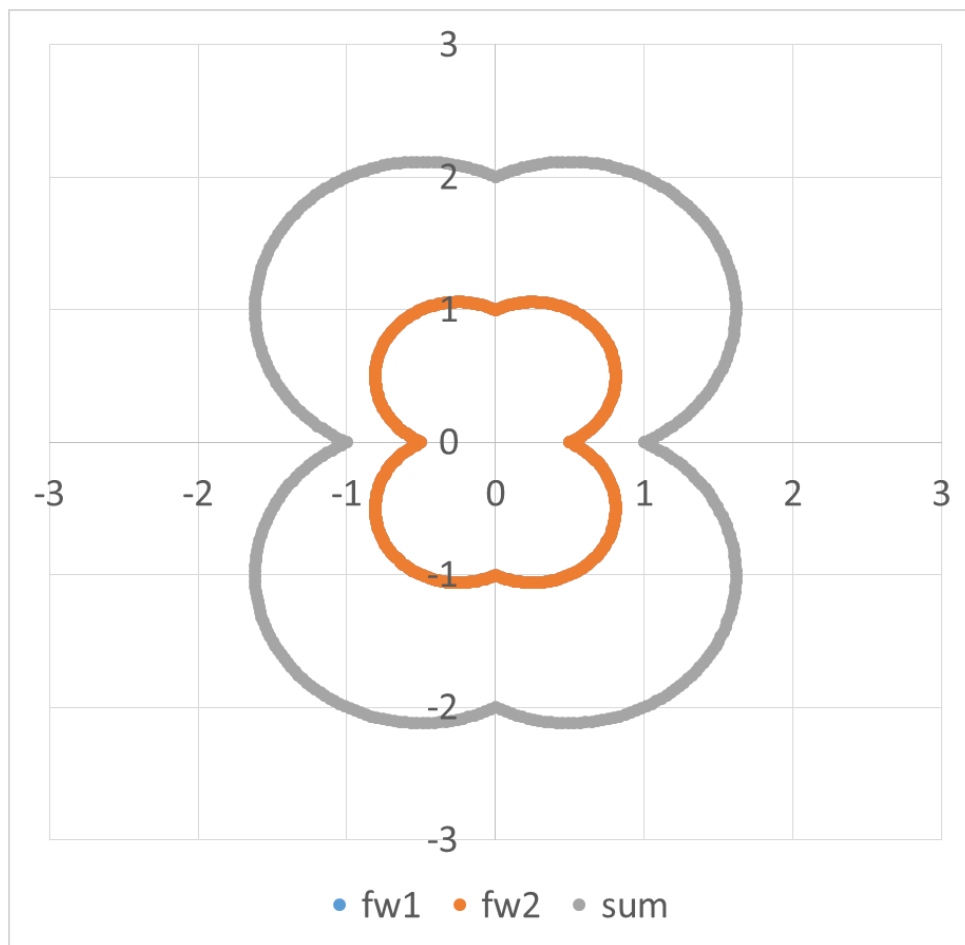


Fig. 5-7 Wheel force($\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

続いて、 $\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$ のときの車輪推力の変化を Fig. 5-8 に示す. 二輪の車輪推力を足し合わせた最大値と最小値はそれぞれ 2.00 と 1.73 となった.

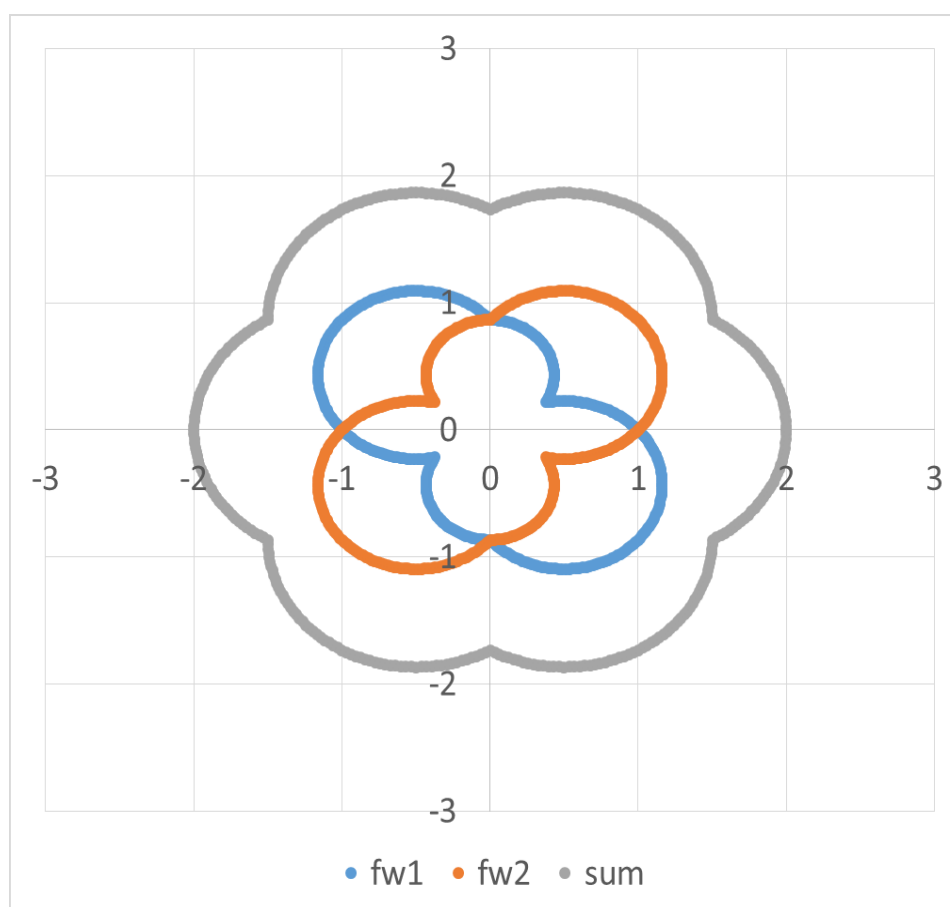


Fig. 5-8 Wheel force($\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$)

90deg 配置と 60deg 配置の推力分布を比較すると, 90deg 配置(Fig. 5-7)がそれぞれ同じ推力分布の二輪の足し合わせであり, x 方向に大きくくびれが生じているのに対し, 60deg 配置(Fig. 5-8)では二輪が互いの推力が小さくなる方向に互い違いに最大出力を発揮するような分布となっており, 二輪の推力の和において生じるくびれも小さくなっている.

同様に, $\theta_a=\theta_b=30\text{deg}$, $\theta_a=\theta_b=75\text{deg}$ における車輪推力の変化をそれぞれ Fig. 5-9, Fig. 5-10 に示す. またこれらの結果を表にまとめ, Table 5-1 に示す.

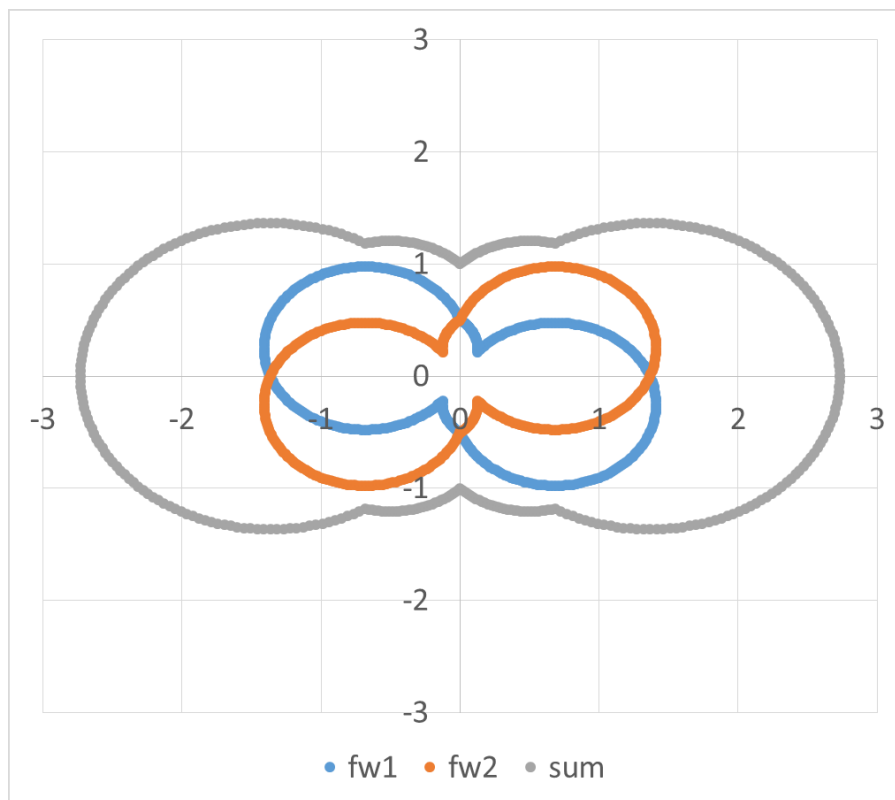


Fig. 5-9 Wheel force($\theta_a = \theta_b = 30\text{deg}$)

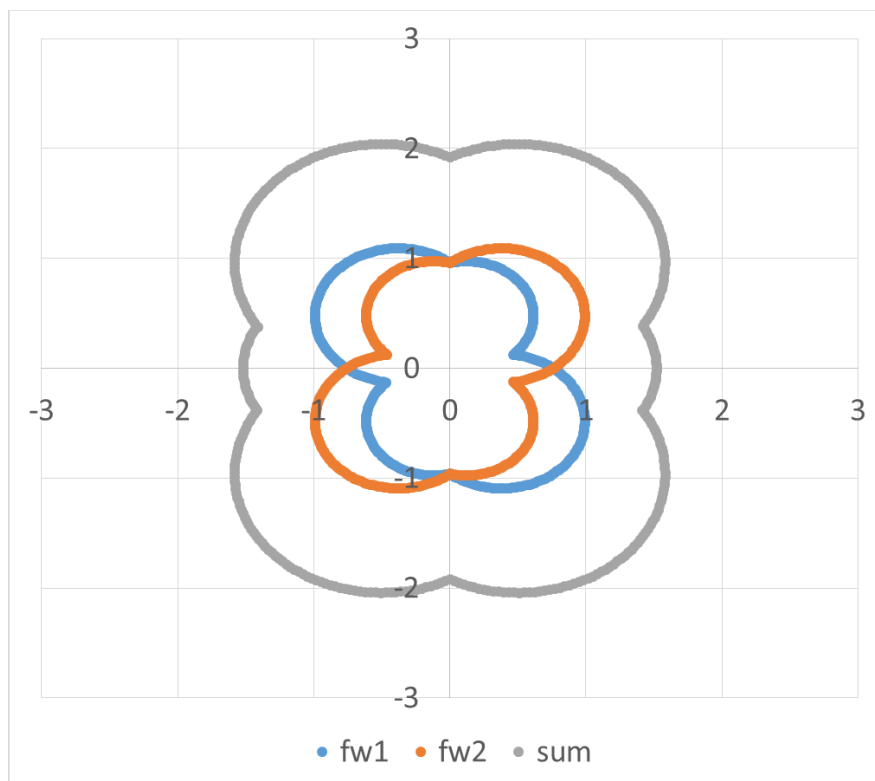


Fig. 5-10 Wheel force($\theta_a = \theta_b = 75\text{deg}$)

Table 5-1 Wheel force

θ_a	θ_b	wheel force $fA+fB$		
		max	min	diff
30	30	2.73	1	1.73
45	45	2.41	1.41	1
60	60	2	1.73	0.27
75	75	2.14	1.46	0.68
90	90	2.23	1	1.23
135	45	2.8	0.71	2.09

Table 5-1 から、 $\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$ のとき、方向による車輪推力の変化が少ないことが分かる．

以上の結果を踏まえて、試作機の駆動ローラ配置は、 $\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$ で設計することとする．

$\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$ のときの二輪ロボットの制御則は式(5.9)より、次式で表される．

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\frac{Gr_w}{r_c}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}d \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}d \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

第 6 章

ACROBAT-S ロボットの試作

本章では、前章において得られた知見に基づき提案する ACROBAT-S を 2 輪用いた全方向移動ロボットの試作とその動作確認を行う。

試作機の設計に先立って、動力学シミュレーションを行い、前章で導出した運動学理論が妥当であることを確認し、ACROBAT-S ロボットが全方向移動の動作を実現できることを確認する。

その後、ACROBAT-S ロボットの試作機を製作し、その動作を確認することで、提案するロボットが実現可能であることを示す。

6.1 ACROBAT-S ロボットの動力学シミュレーション

前章の結果を踏まえて、ACROBAT-S を用いた全方向移動ロボットの動力学シミュレーションを構築し、ACROBAT-S ロボットが全方向移動の動作を実現できることを確認する。

シミュレーションには SolidWorks Motion を使用する。球の回転によって生成されるロボットの動作を評価するため、その場での旋回動作と 135deg 方向への並進動作を生成するモデルを構築した。

Fig. 6-1 に旋回動作の 0msec から 500msec までのシミュレーションの様子を示す。

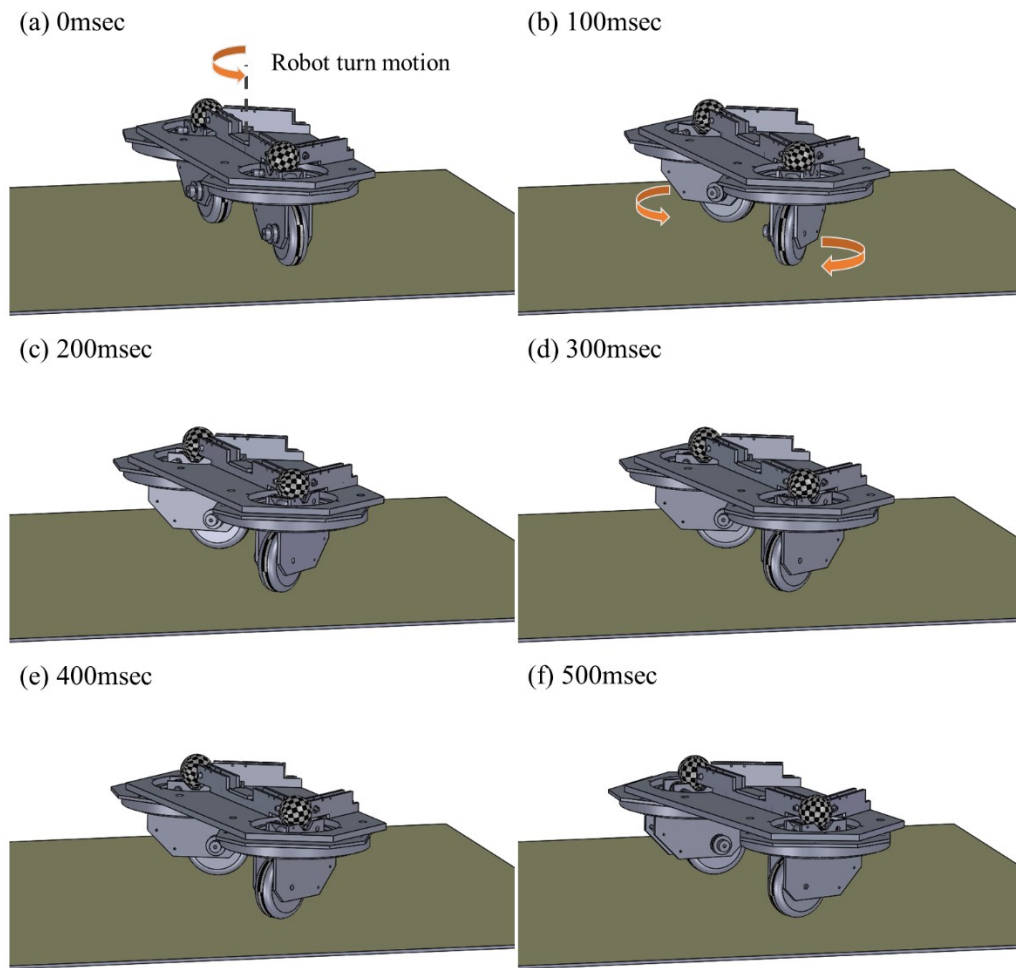


Fig. 6-1 3D animations of the three-wheeled robot in spin turn

初期状態(Fig. 6-1(a))において、キャストは同方向を向いている。100msec から 400msec にかけて((Fig. 6-1(b),(c))キャストが旋回し、500msec((Fig. 6-1(f))以降、それぞれのキャストの向きがロボットの旋回中心の接線方向に収束している。以上より、各 ACROBAT-S が与えられた速度ベクトルに従って独立して動作していることが確認できた。

Fig. 6-2 に旋回シミュレーションにより生成されたロボット動作の速度成分を示す。

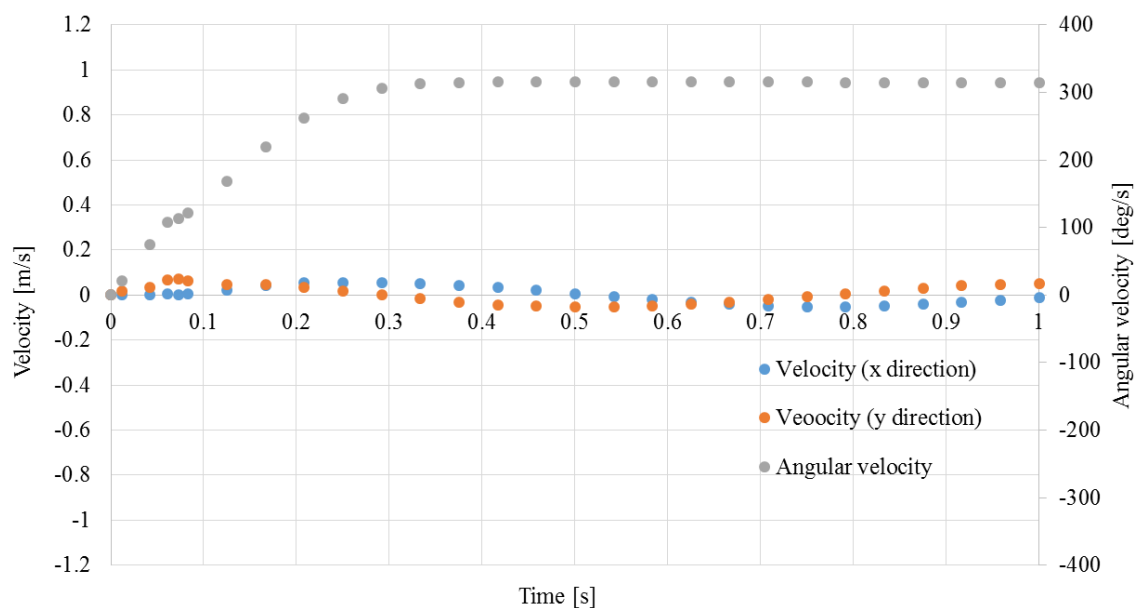


Fig. 6-2 Simulation results of an omnidirectional robot (spin turn)

旋回角速度は 0.35sec 時点で 310deg/sec に収束している。これは、それぞれの ACROBAT-S が 1m/s の速度を生成した際のロボットの旋回角速度である。したがって、それぞれのキャストがロボット旋回中心の接戦方向に与えられた入力に従って速度を生成し、ロボットを旋回動作させていることを示している。

Fig. 6-3 に 135deg 方向の並進動作の 1000msec までのシミュレーションの様子を示す。

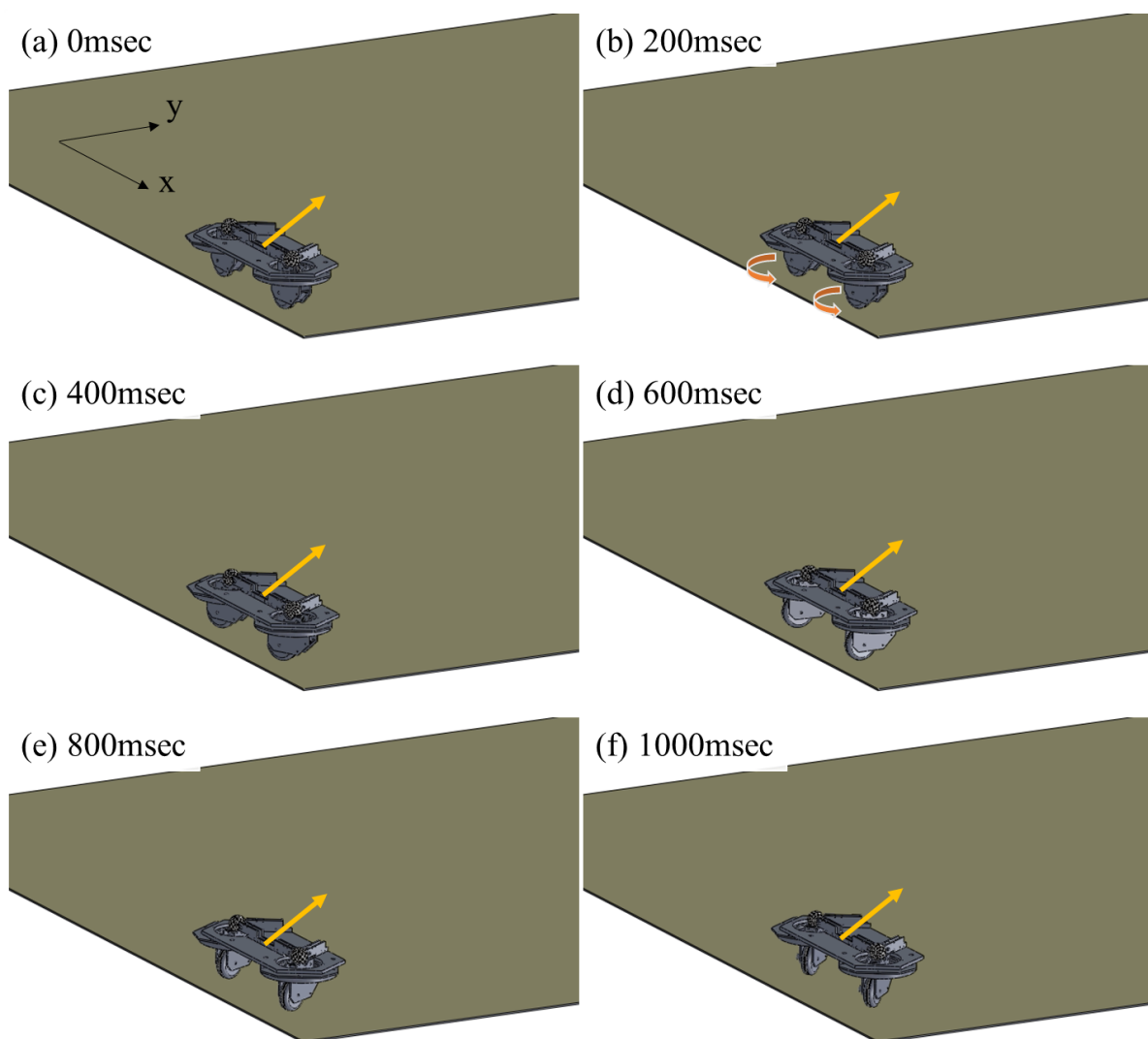


Fig. 6-3 3D animations of the three-wheeled robot in translation to 135°direction

初期状態 Fig. 6-3(a)において、キャストは同方向を向いている。200msec から 400msec(Fig. 6-3 (b)~(e))では、キャストがそれぞれ同じ方向に回転していることが確認できる。1000msec(Fig. 6-3 (f))以降では、それぞれのキャストが 135deg の方向に収束している。

Fig. 6-4 に 135deg 方向への並進動作シミュレーションで生成されたロボットの速度成分を示す。0.35sec でロボットの y 方向速度, x 方向速度はそれぞれ, 0.7m/s, -0.7m/s に収束していることが確認できる。したがって, それぞれの ACROBAT-S はロボットを 135deg 方向に 1m/s で動作させる速度を生成していることがわかる。

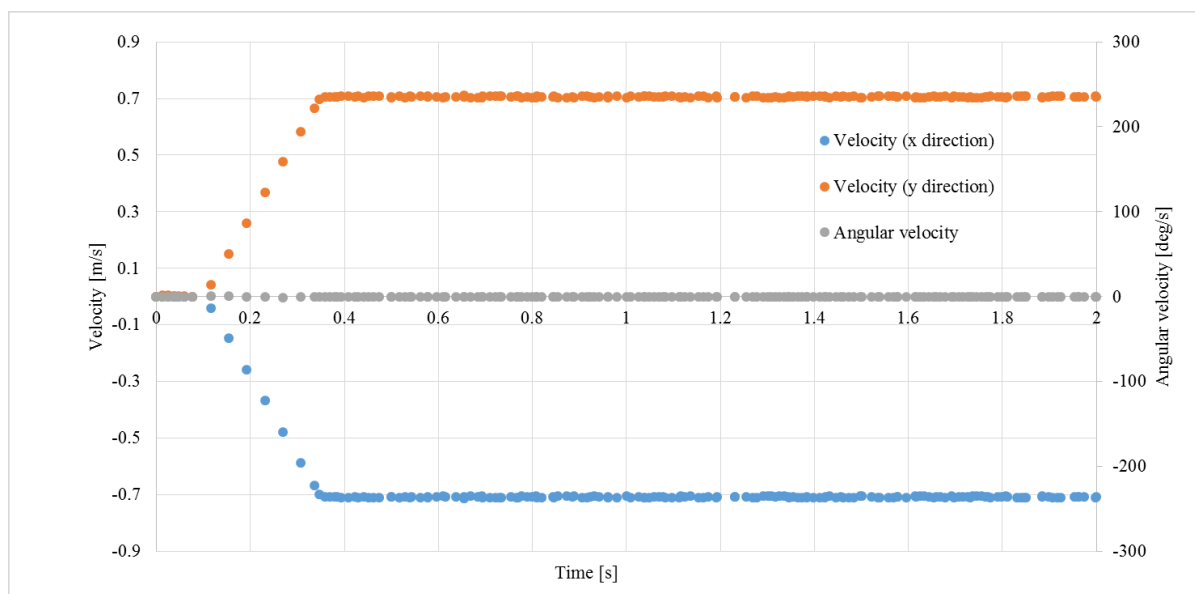


Fig. 6-4 Simulation results of the omnidirectional robot (135° translation)

以上の結果から、それぞれの ACROBAT-S が速度ベクトルを発生させることにより、ロボットの全方向移動動作が生成できることが確認できた。

6.2 試作機の開発

提案機構 ACROBAT-S を二輪用いた全方向移動ロボットの性能を検証するため、試作機的设计、製作を行った。Fig. 6-5, Fig. 6-6 に 3 次元 CAD ソフト Solidworks を用いてモデル化した ACROBAT-S 二輪ロボットを示す。

2 つの ACROBAT-S を 360mm の間隔で配置し、ロボットを安定して支持するため、受動キャスタを二輪取り付け、ロボットを支持している。また、ACROBAT-S を駆動する 4 つの駆動ローラと 3 つのモータおよび、球と駆動ローラに押付力を付加する側部押付機構、球と分配ローラに押付力を付加する上部押付機構をそれぞれ配置している。

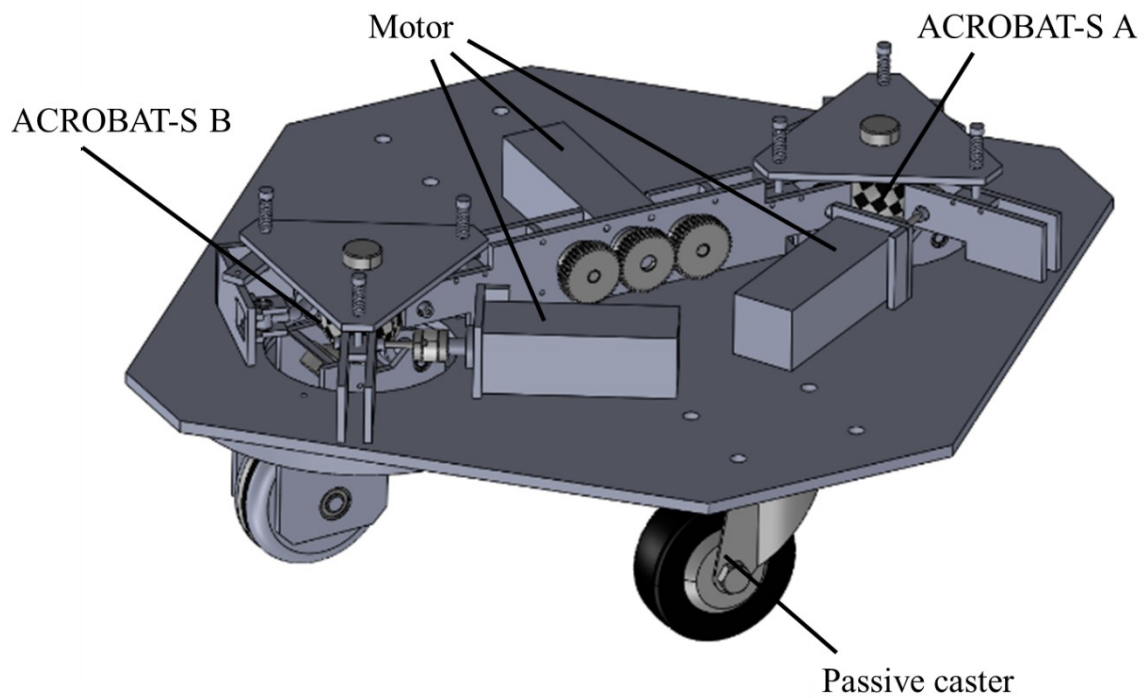


Fig. 6-5 CAD model of two-wheeled robot

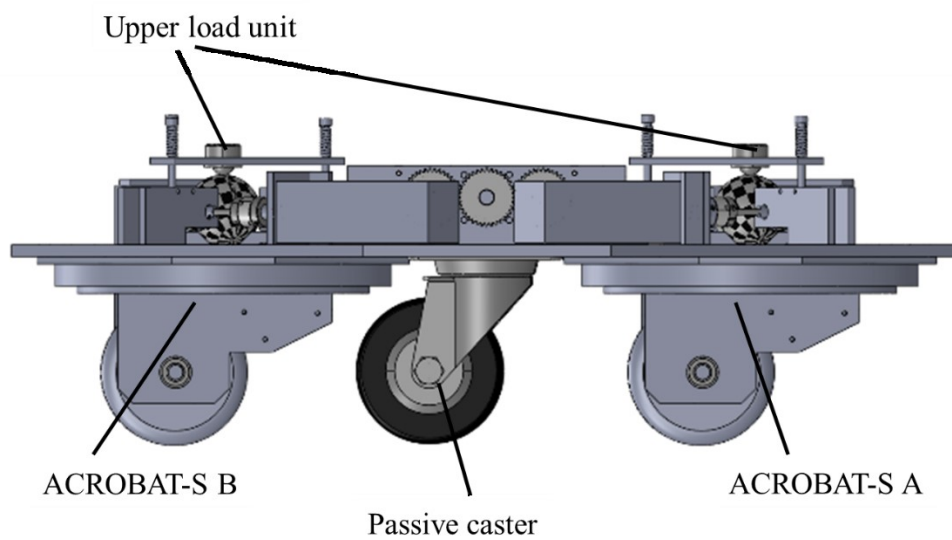


Fig. 6-6 CAD model of two-wheeled robot(side view)

Fig. 6-7 に試作機の駆動ローラ配置とモータ配置について模式図を示す. また, Fig. 6-8 に実際に設計した試作機の駆動ローラ配置とモータ配置を示す.

駆動ローラの配置は 5.3 節での検討に基づき $\theta_a = \theta_b = 60\text{deg}$ で配置している。ただし、駆動ローラの支持部品とモータ等の干渉を防ぐため、設計において独立した駆動ローラは球を中心とした向かい側に配置している。これは、同方向に逆向きの駆動力を発生させていることに等しい。つまり、ローラの回転方向を反転させることで、 $\theta_a = \theta_b = 60\text{deg}$ のローラ配置と同様に球を駆動する。

モータを共有する駆動ローラは ACROBAT-S 二輪間に距離があるため、共有モータの回転を歯車によって二方向に分配した後、タイミングベルトとプーリによってそれぞれの駆動ローラに動力を伝達する設計としている。

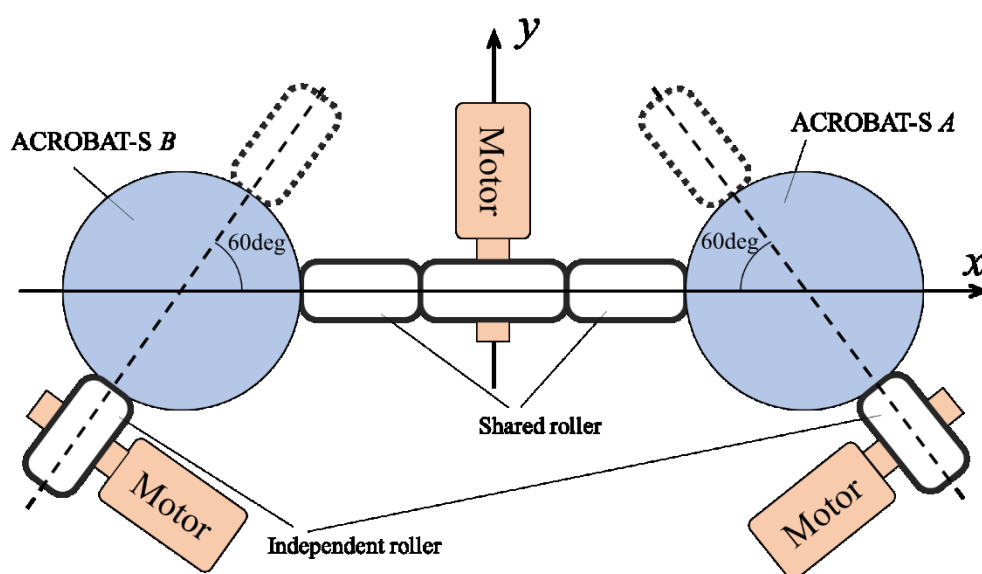


Fig. 6-7 Motor arrangement of two-wheel robot

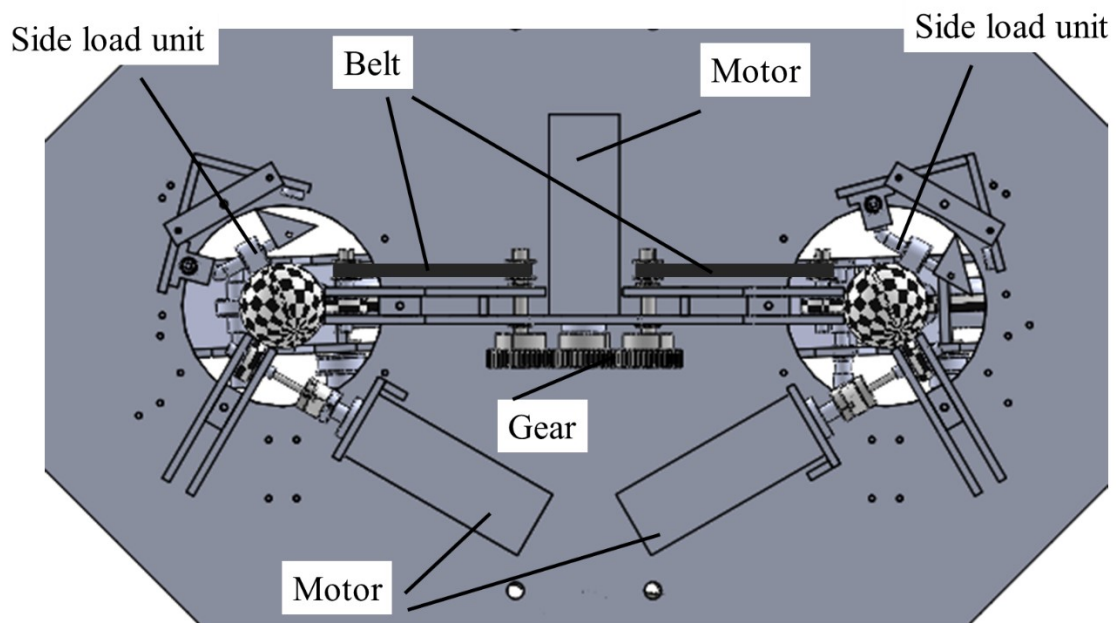


Fig. 6-8 Motor arrangement of two-wheel robot(CAD model)

これらの設計に基づいて、実際に製作した試作機の写真を Fig. 6-9, Fig. 6-10 に示す.

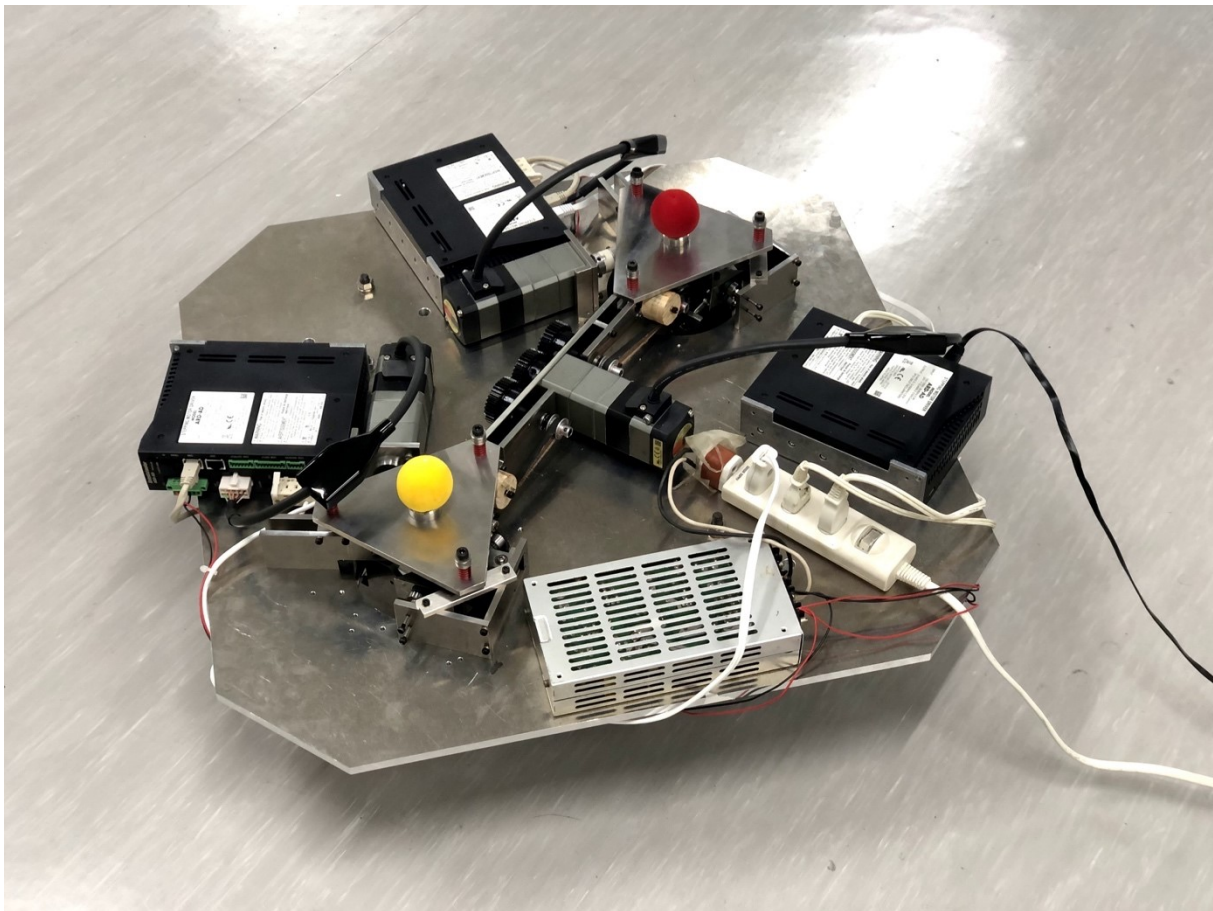


Fig. 6-9 ACROBAT-S two-wheeled robot

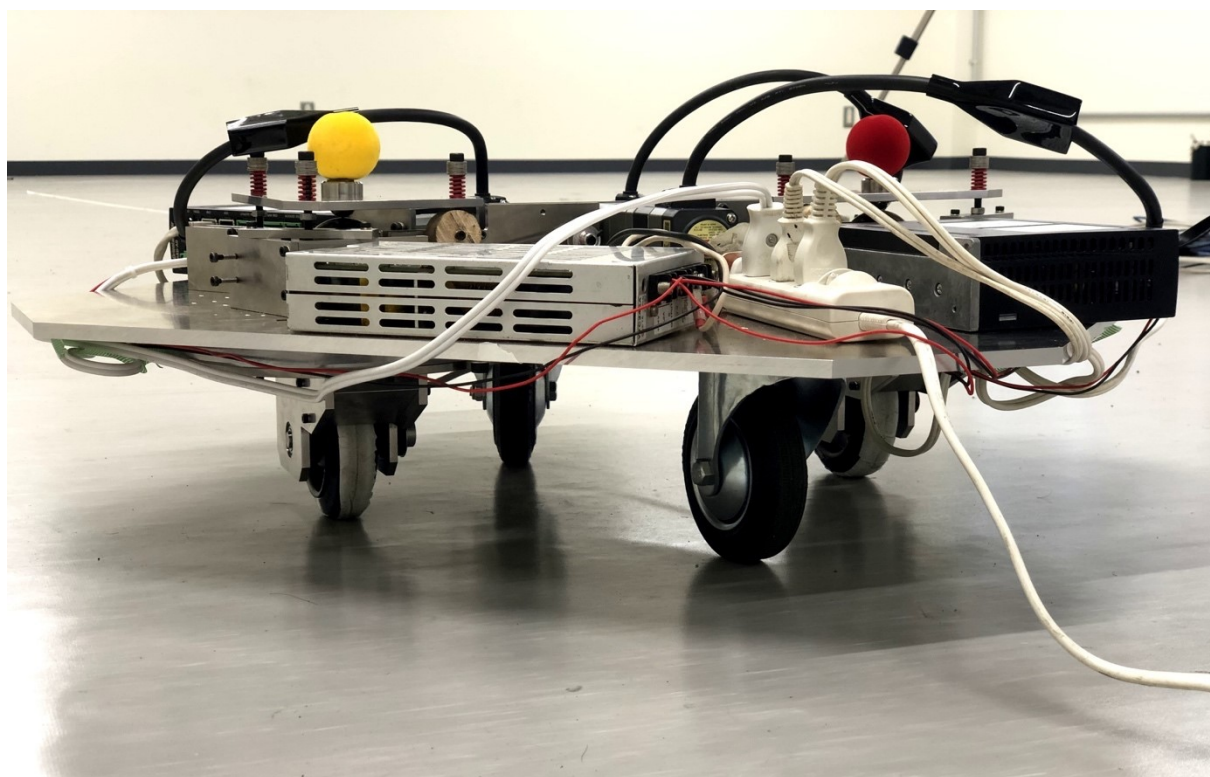


Fig. 6-10 ACROBAT-S two-wheeled robot(side view)

モータには，単輪の試作機と同様にオリエンタルモータ社製パルスモータ ARM46AC-PS25 を使用している．

先程示した CAD によるモデル図との差異として，3 つのモータのモータドライバを試作機上面にそれぞれ設置している．また，モータドライバの制御電源を供給する AC/DC コンバータ，およびこれらに電源を供給する電源タップをそれぞれ試作機上面に設置した．また，次節での動作の計測に利用するカラーマーカをそれぞれの ACROBAT-S 上部に設置している．

6.3 動作実験

製作した ACROBAT-S 二輪ロボットの試作機の動作を確認するため，動作実験を行った．目標の軌道からロボットの制御則に基づいてモータの回転角度を PTP 制御で駆動した．Fig. 6-11 に示すように，ロボットの上部，左右の ACROBAT-S 上にカラーマーカを設置し，このマーカ位置を三次元ステレオビジョン計測システム「Quick MAG」を用いて計測することで，ロボットの実際の動作軌道を計測した．

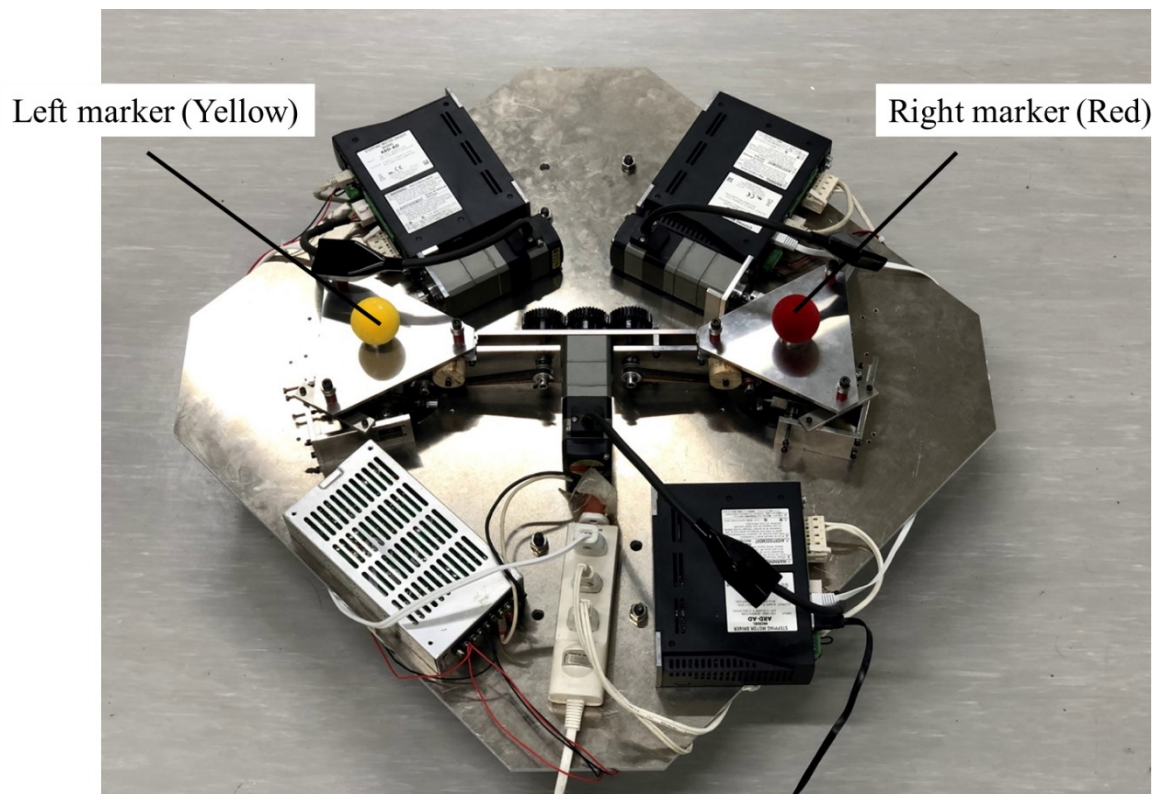


Fig. 6-11 Acrobat-s two-wheeled robot(top view)

最初に, xy 方向それぞれの並進動作を確認するため, 速度 0.1m/s で一辺 1m の正方形軌道を目標とする動作指令を行い, その動作を計測した. Fig. 6-12 に計測した動作軌道を示す. また, 走行動作中の写真を Fig. 6-13 に示す.

左右のマーカーおよびその中点をロボットを中心としてプロットしている. 初期位置を原点とし, $(1000,0)$ 点, $(1000,1000)$ 点, $(0,1000)$ 点, $(0,0)$ 点の順に移動することを目標とし, x 方向に 1m , y 方向に 1m , x 方向に -1m , y 方向に -1m の順でロボットに動作指令を与えた. また, 車輪方向は初期状態において, y 正方向に揃え, 四辺それぞれの移動動作によってキャストが 90deg 旋回動作を行うようにした.

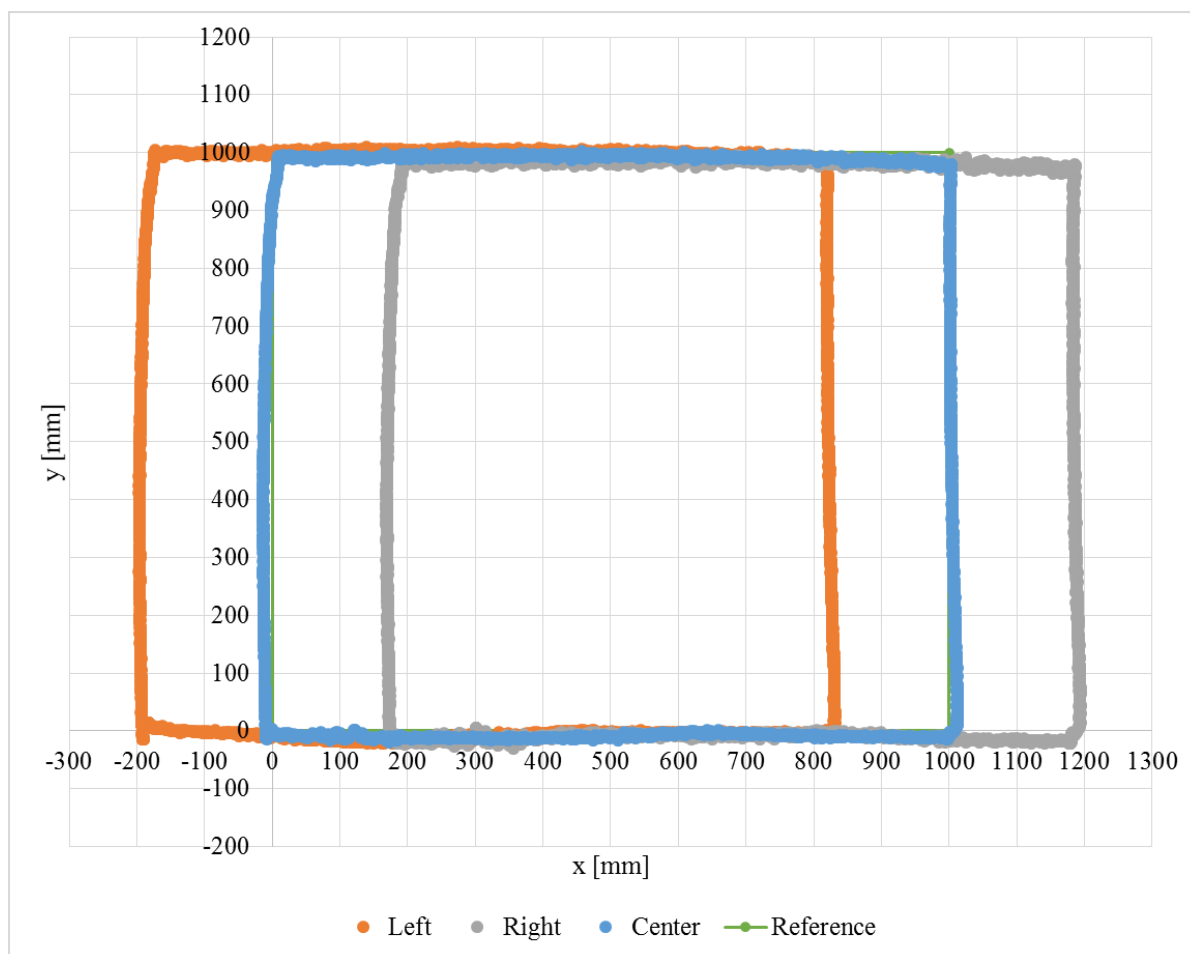


Fig. 6-12 Running result(square trajectory)

Fig. 6-12 より，一辺の移動距離は目標距離である 1m で動作できていることが確認できる．右上角や，左辺においてわずかに目標軌道との間に誤差が生じているが，目標座標との間の誤差は最大で約 12mm であり，目標軌道に良く従っている．

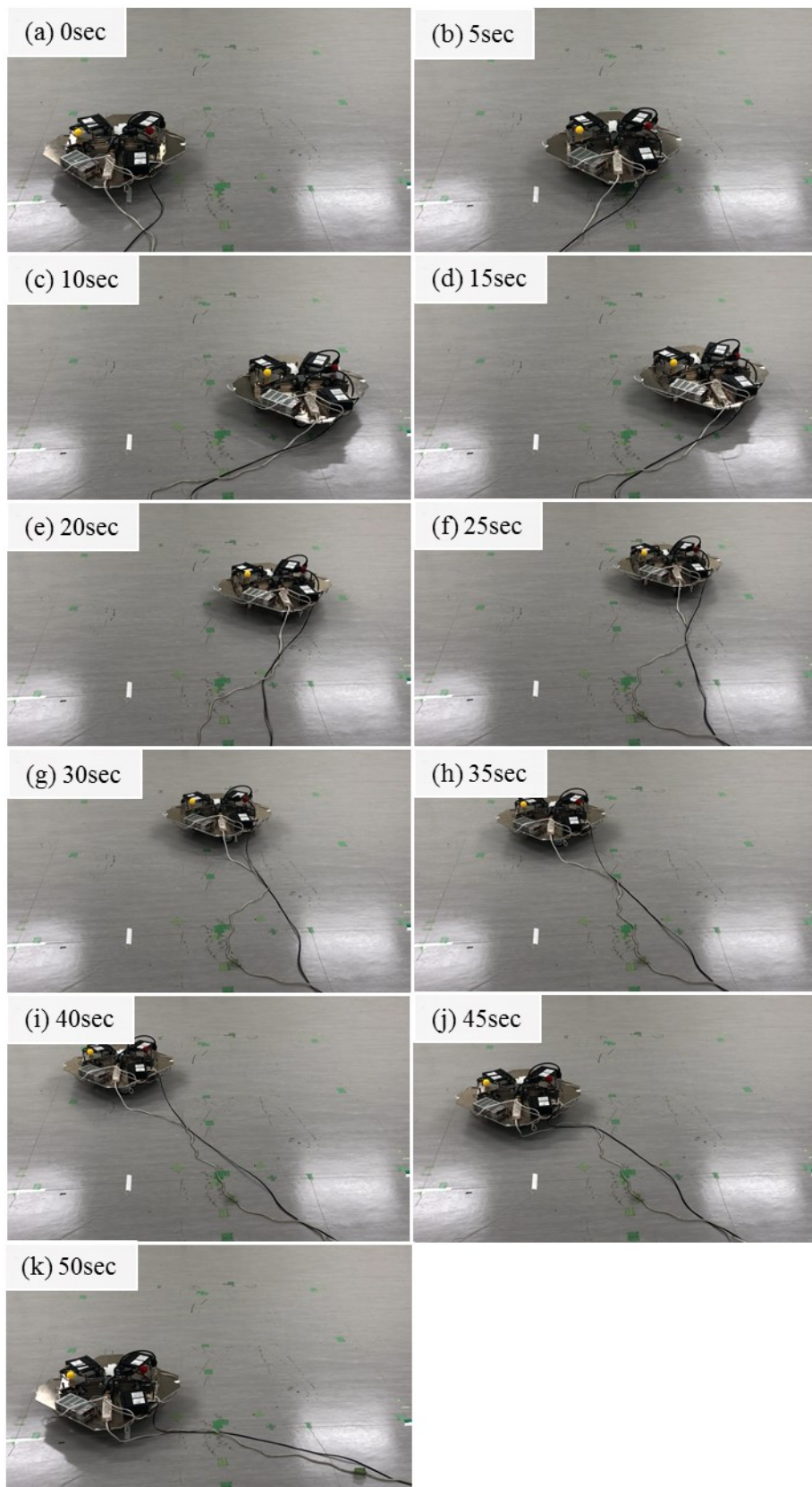


Fig. 6-13 Running motion(square trajectory)

次に, 速度 0.1m/s で斜め 45deg 方向に 1m 並進移動する動作指令を行い, その動作を計測した. Fig. 6-14 に計測した動作軌道を示す. また, 走行動作中の写真を Fig. 6-15 に示す.

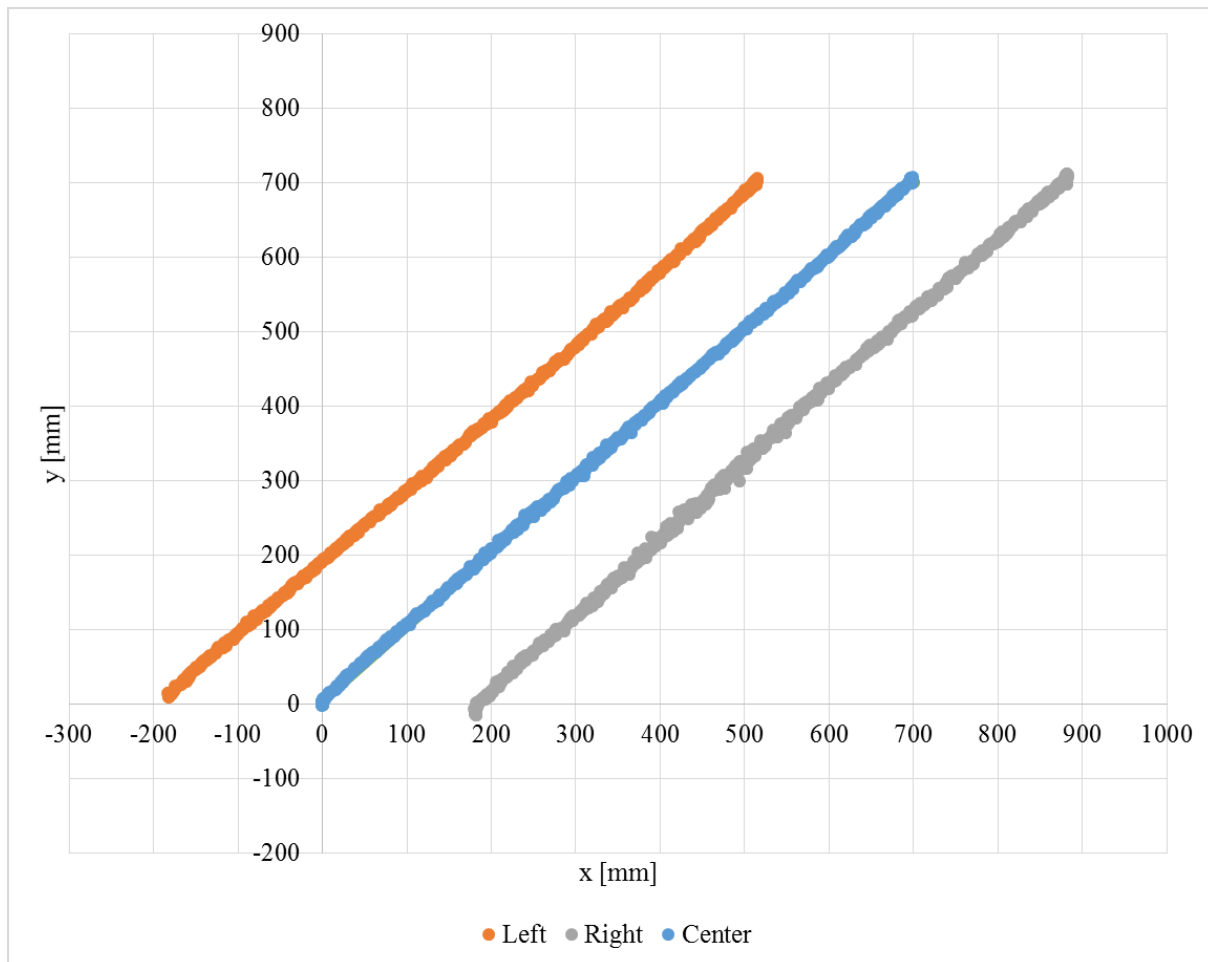


Fig. 6-14 Running result(45deg trajectory)

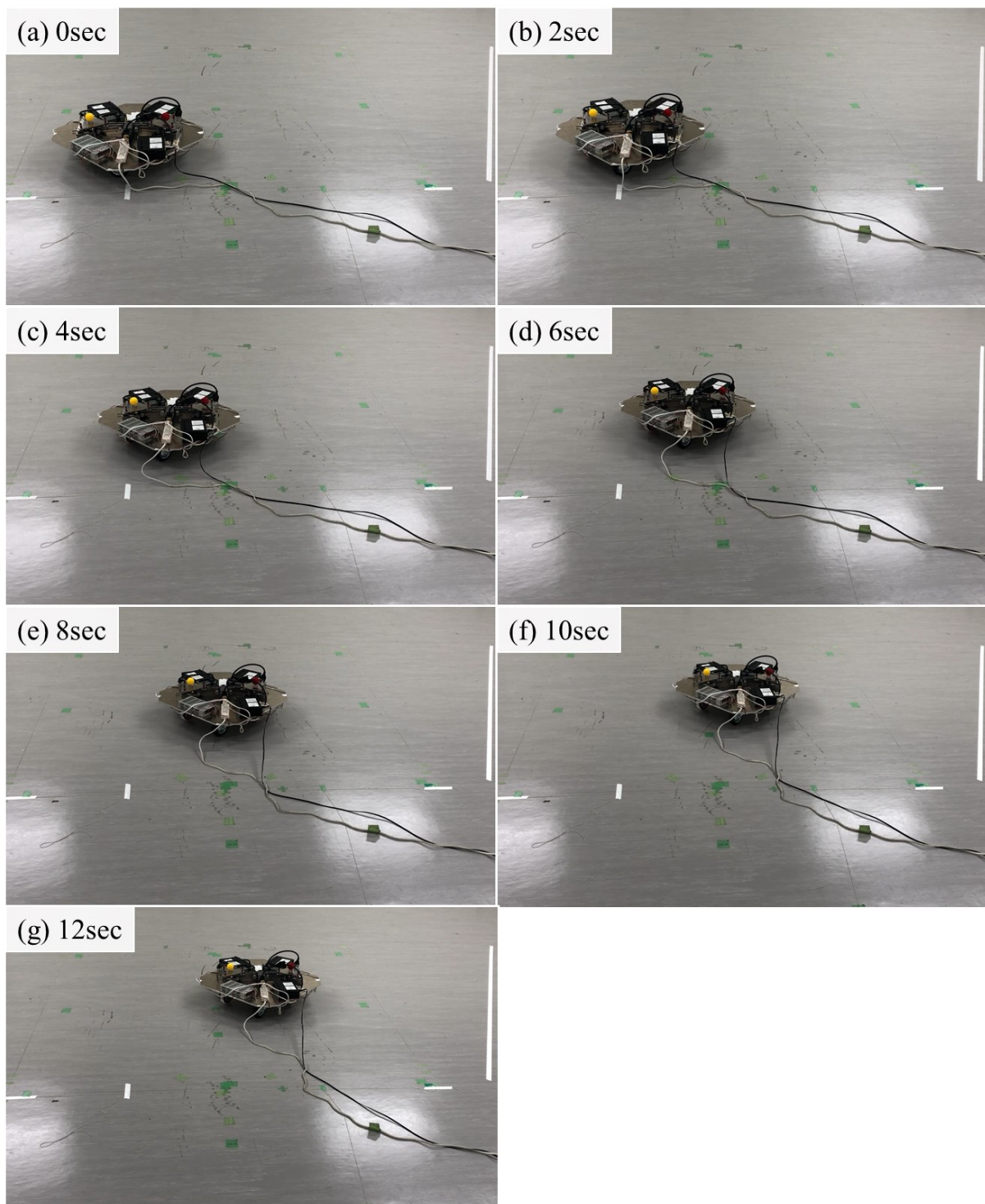


Fig. 6-15 Running motion(45deg trajectory)

初期状態において車輪方向は y 正方向に揃っている． Fig. 6-14 より， ロボットの直進距離は 991mm であった． 進行方向の角度は 45.3deg であり， 目標軌道に良く従っていることが確認できた．

また，旋回速度 -0.324rad/s で，その場旋回する動作指令を行い，その動作を計測した．Fig. 6-16 に計測した動作軌道を示す．また，走行動作中の写真を Fig. 6-17 に示す．

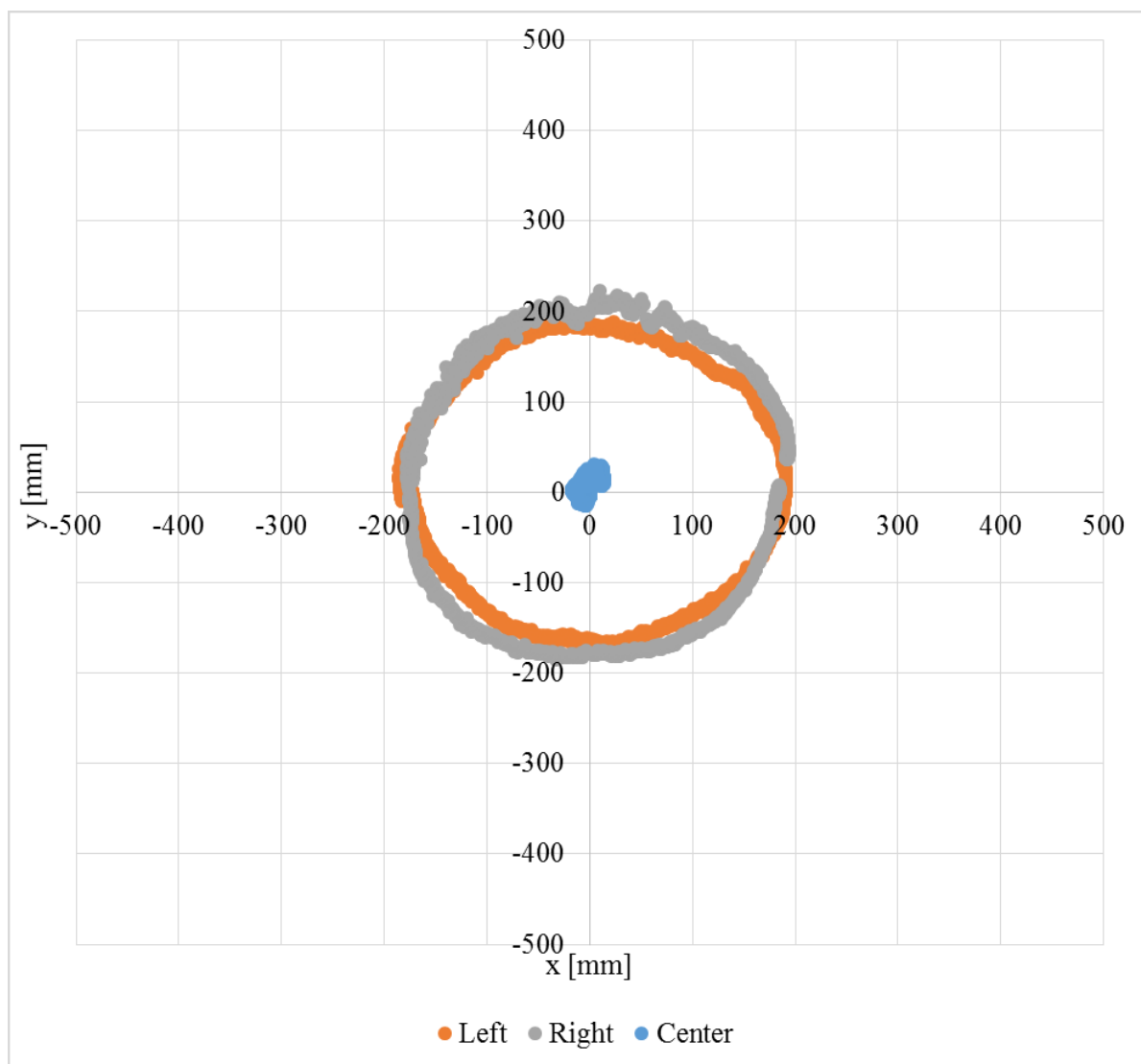


Fig. 6-16 Running result(spin turn)

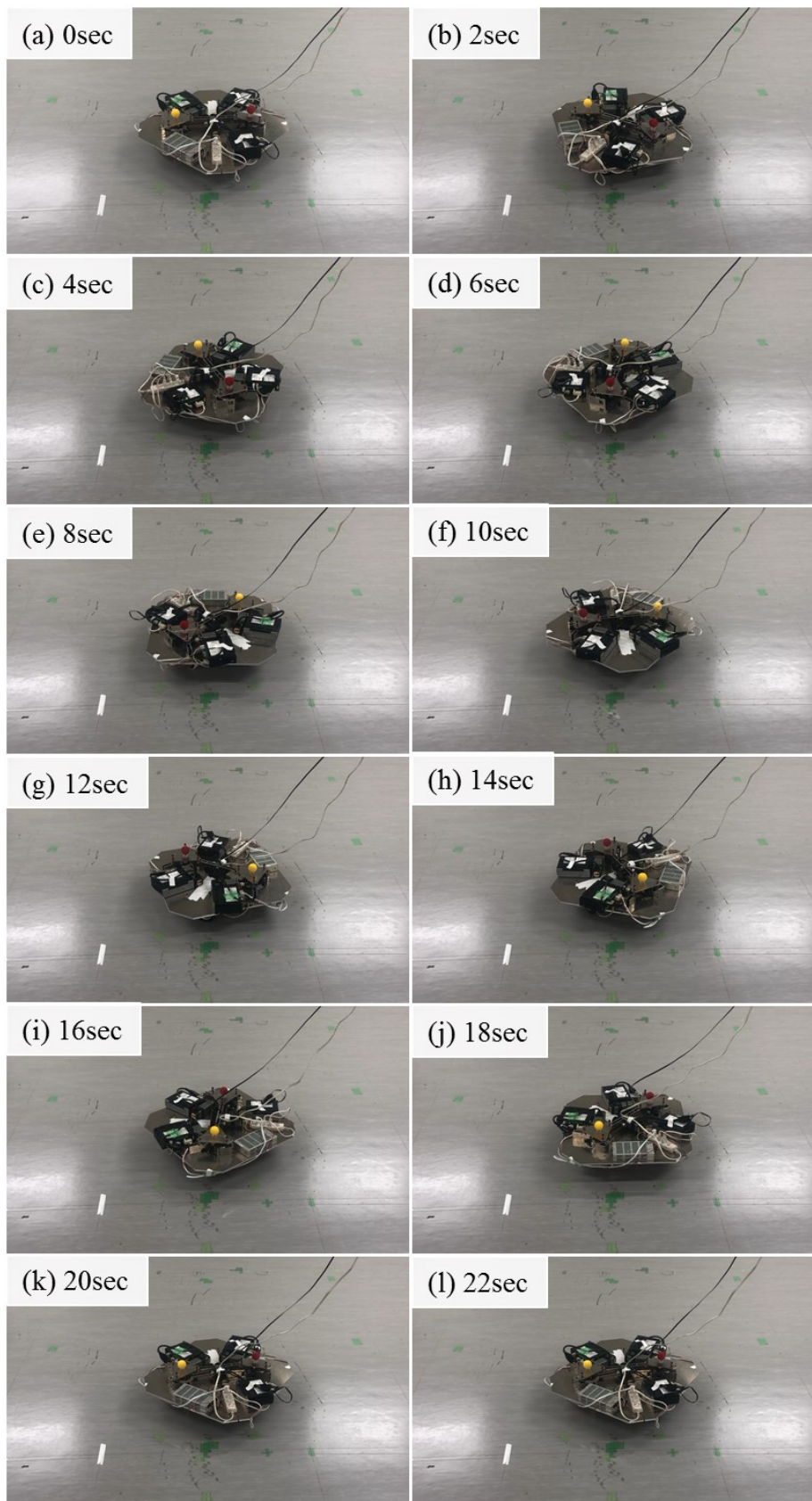


Fig. 6-17 Running motion(spin turn)

初期状態において車輪方向は x 正方向に揃っている．動作終了時において，姿勢角度は 7deg であった．また，その場での旋回にも関わらず，ロボット中心に多少のずれが生じていることが確認できた．ロボット中心の誤差は最大で 19mm であった．

次に，並進速度 0.1m/s 旋回速度 0.15rad/s で定常円旋回する動作指令を行い，その動作を計測した．Fig. 6-18 に計測した動作軌道を示す．また，走行動作中の写真を Fig. 6-19 に示す．

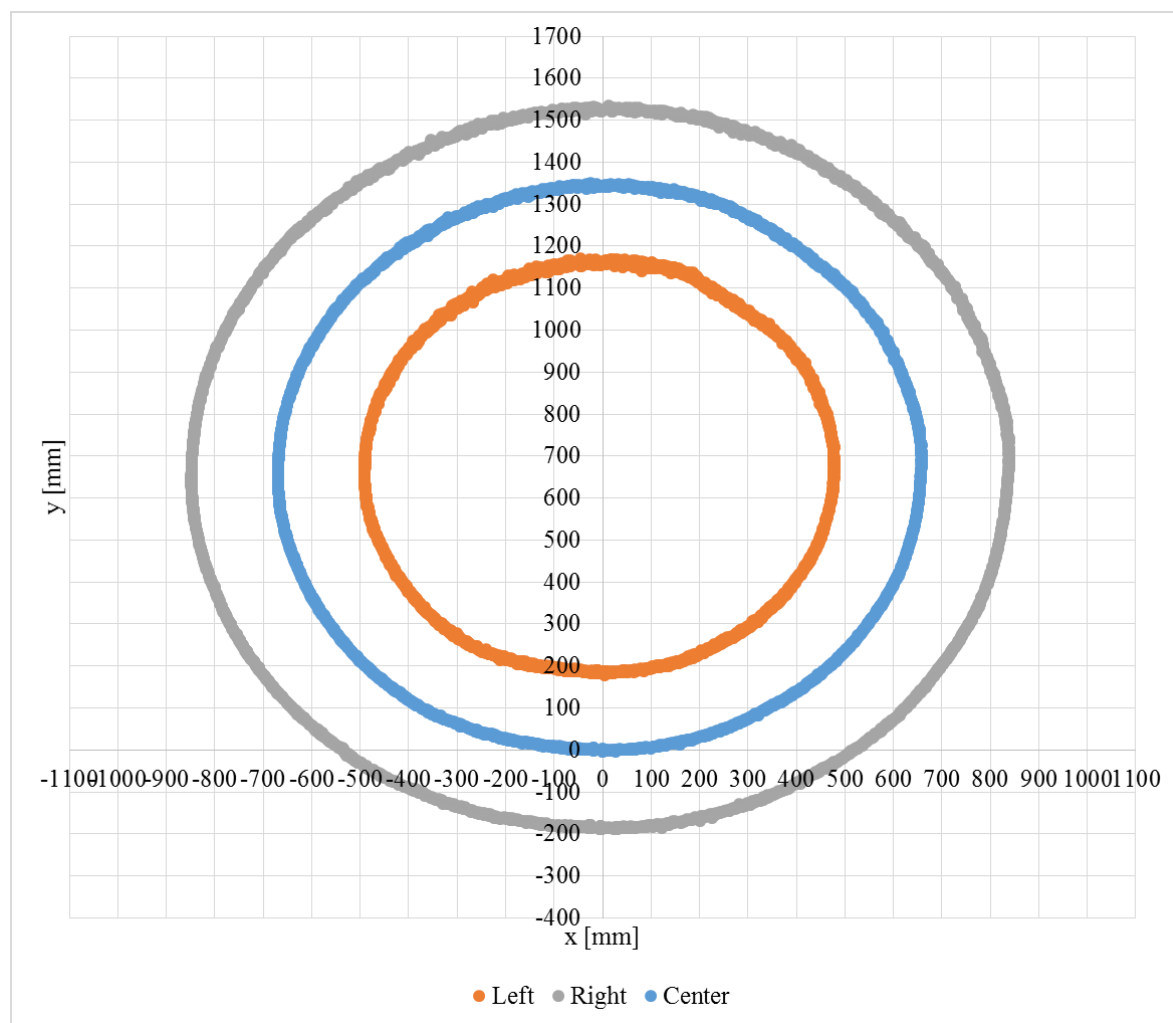


Fig. 6-18 Running result(curve motion)

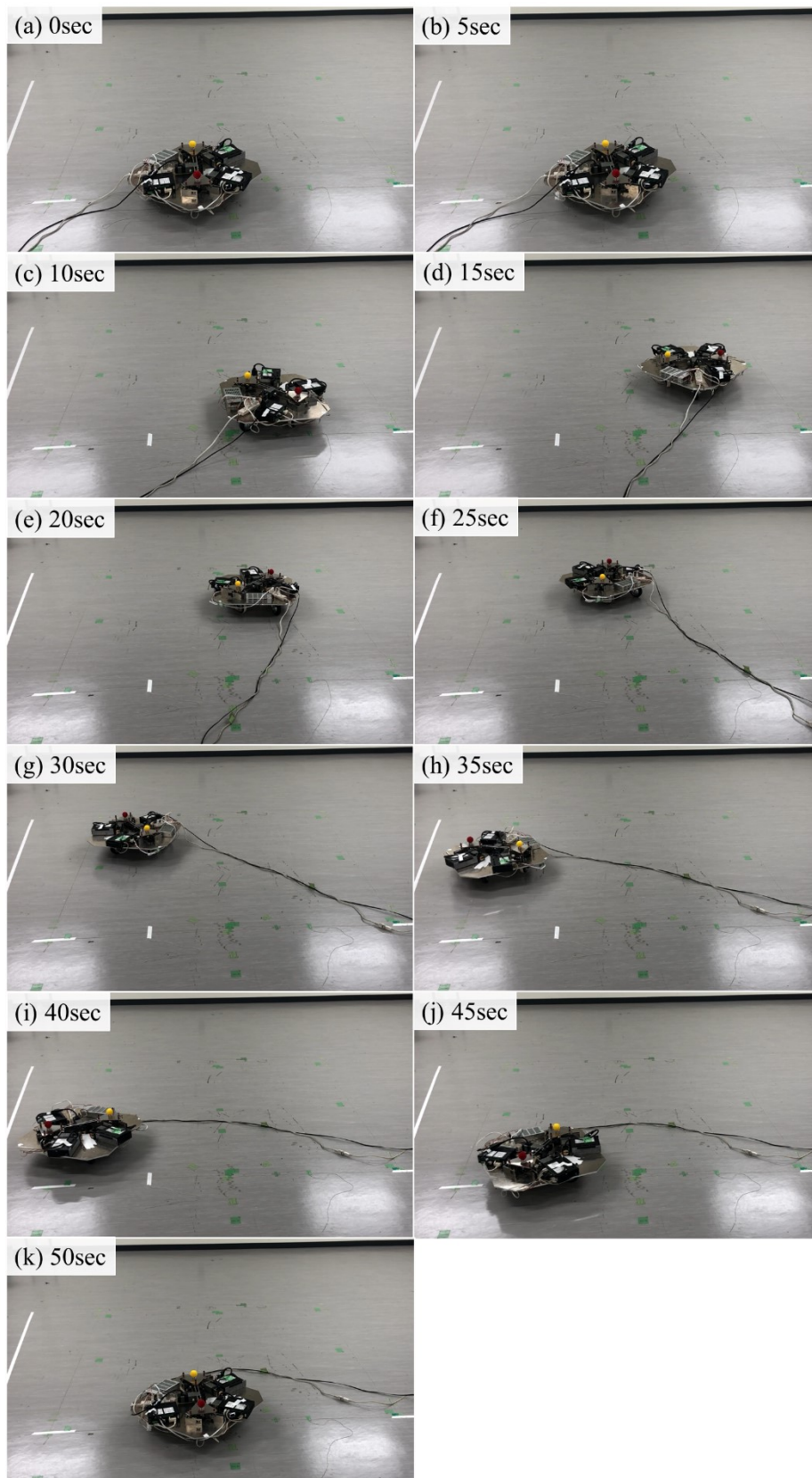


Fig. 6-19 Running motion(curve motion)

初期状態において車輪方向は y 正方向に揃っている。目標軌道の旋回直径は 1337mm であるのに対し、動作軌道は y 方向で直径 1347mm , x 方向で直径 1327mm であり、約 10mm の誤差があった。動作終了時のロボット座標と原点との誤差は 18mm であった。

以上の結果から、提案する移動機構 ACROBAT-S を用いた全方向移動ロボットが、ホロノミック全方向移動を実現できることを確認し、導出した制御則に基づいて動作させることが可能であることを確認した。

6.4 駆動ローラ配置による動作への影響の実機検証

5.3 節において、駆動ローラの配置による駆動力の変化を検討した。ここでは、製作した試作機の駆動ローラ配置を $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$ に変更し、これを $\theta_a=\theta_b=60\text{deg}$ 配置の計測結果と比較することで、駆動ローラ配置による影響を検証する。

Fig. 6-20 に駆動ローラ配置を $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$ に変更した試作機の CAD によるモデル図を示す。独立した駆動ローラの位置を変更し、それにともないモータの配置および、側部押付機構の配置を変更している。

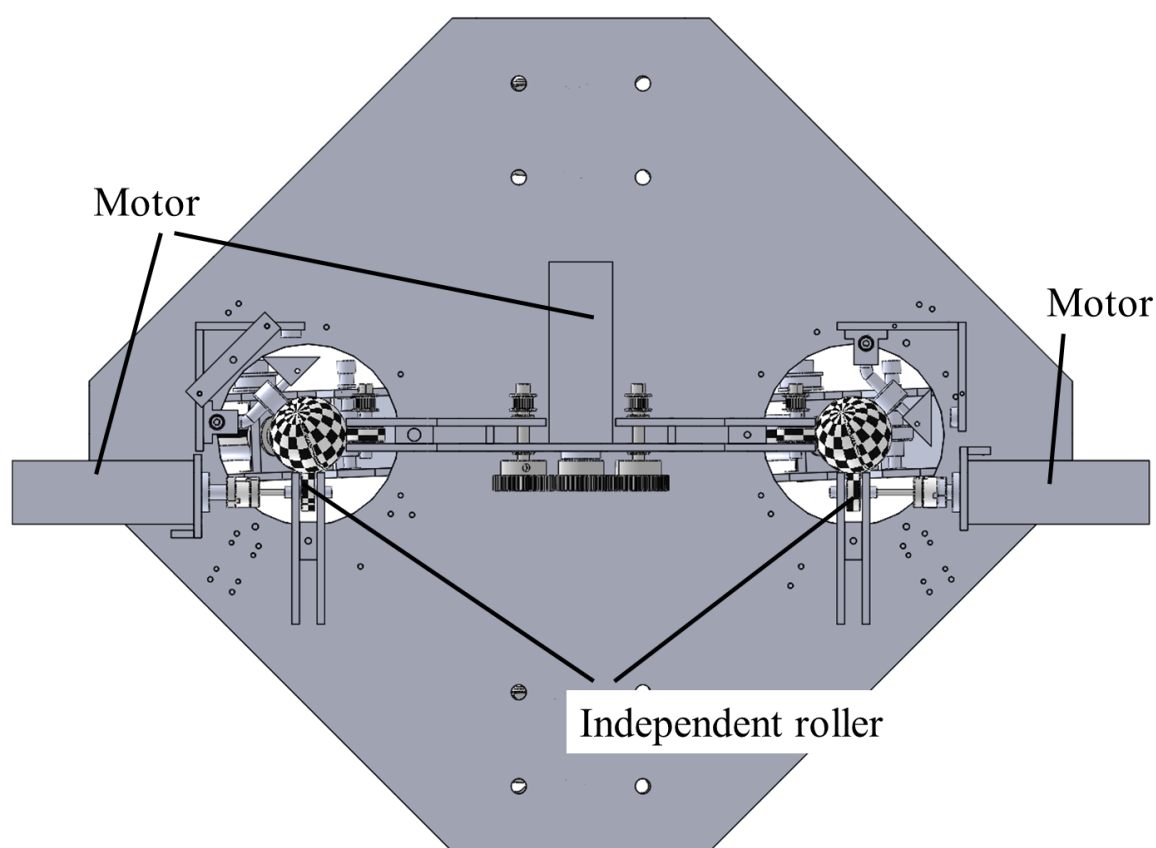


Fig. 6-20 CAD model of two-wheeled robot($\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

まず、6.3 節と同様にして $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$ 配置の試作機により、動作実験を行った。

まず、速度 0.1m/s で一辺 1m の正方形軌道为目标とする動作指令を行い、その動作を計測した。このとき、前節において Fig. 6-12 で示した実験と同様の実験条件とした。Fig. 6-21 に計測結果を示す。また、走行動作中の写真を Fig. 6-22 に示す。

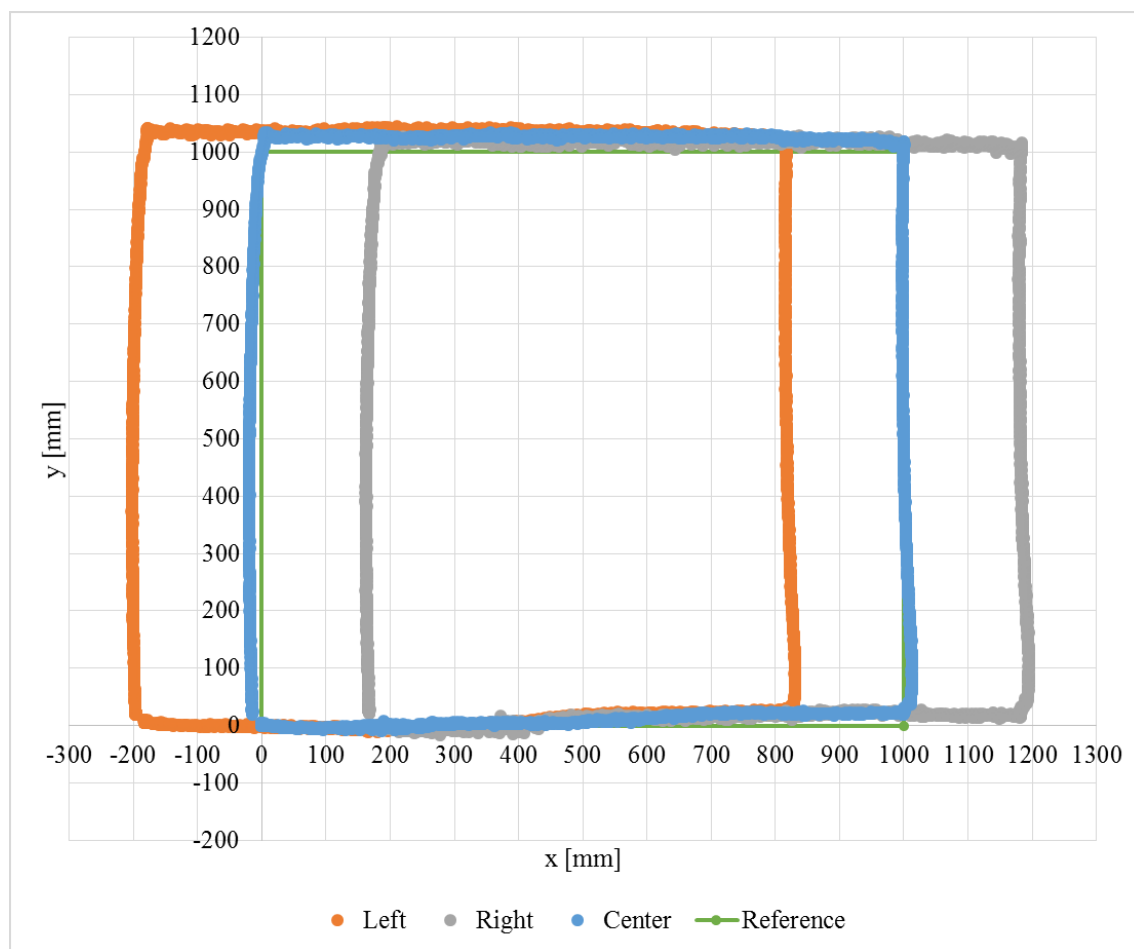


Fig. 6-21 Running result(square trajectory, $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

一辺の移動距離は概ね目標距離である 1m で動作できていることが確認できる．目標軌道と比較すると，移動するにつれ徐々に目標軌道とのズレが生じている．動作終了時のロボット座標と最終的な目標座標である原点との間には 31mm の距離が生じている．

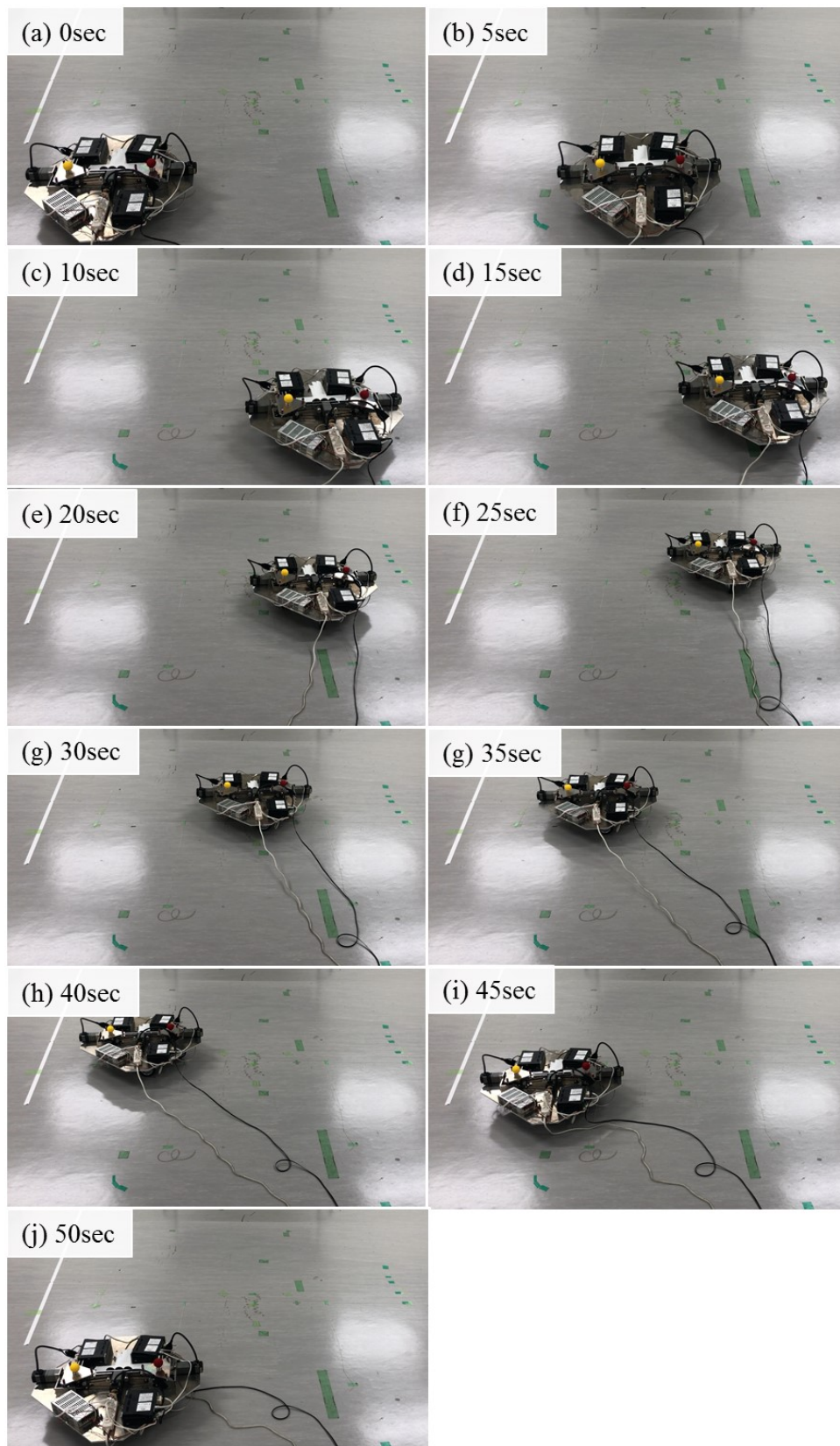


Fig. 6-22 Running motion (square trajectory, $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

次に，速度 0.1m/s で，斜め 45deg 方向に 1m 並進移動する動作指令を行い，その動作を計測した．前節において Fig. 6-14 に示した実験と同様の実験条件とした．Fig. 6-23 に計測結果を示す．また，走行動作中の写真を Fig. 6-24 に示す．

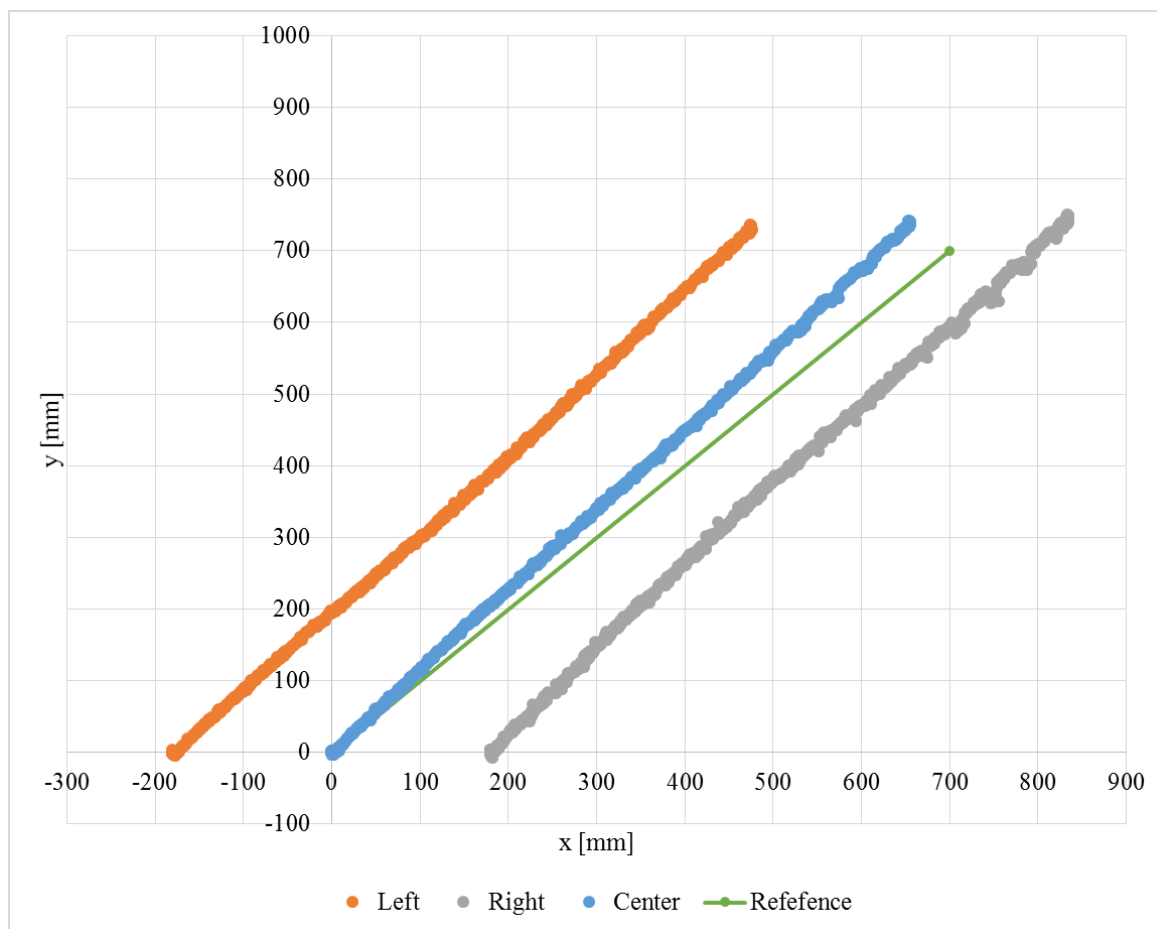


Fig. 6-23 Running result(45deg trajectory, $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

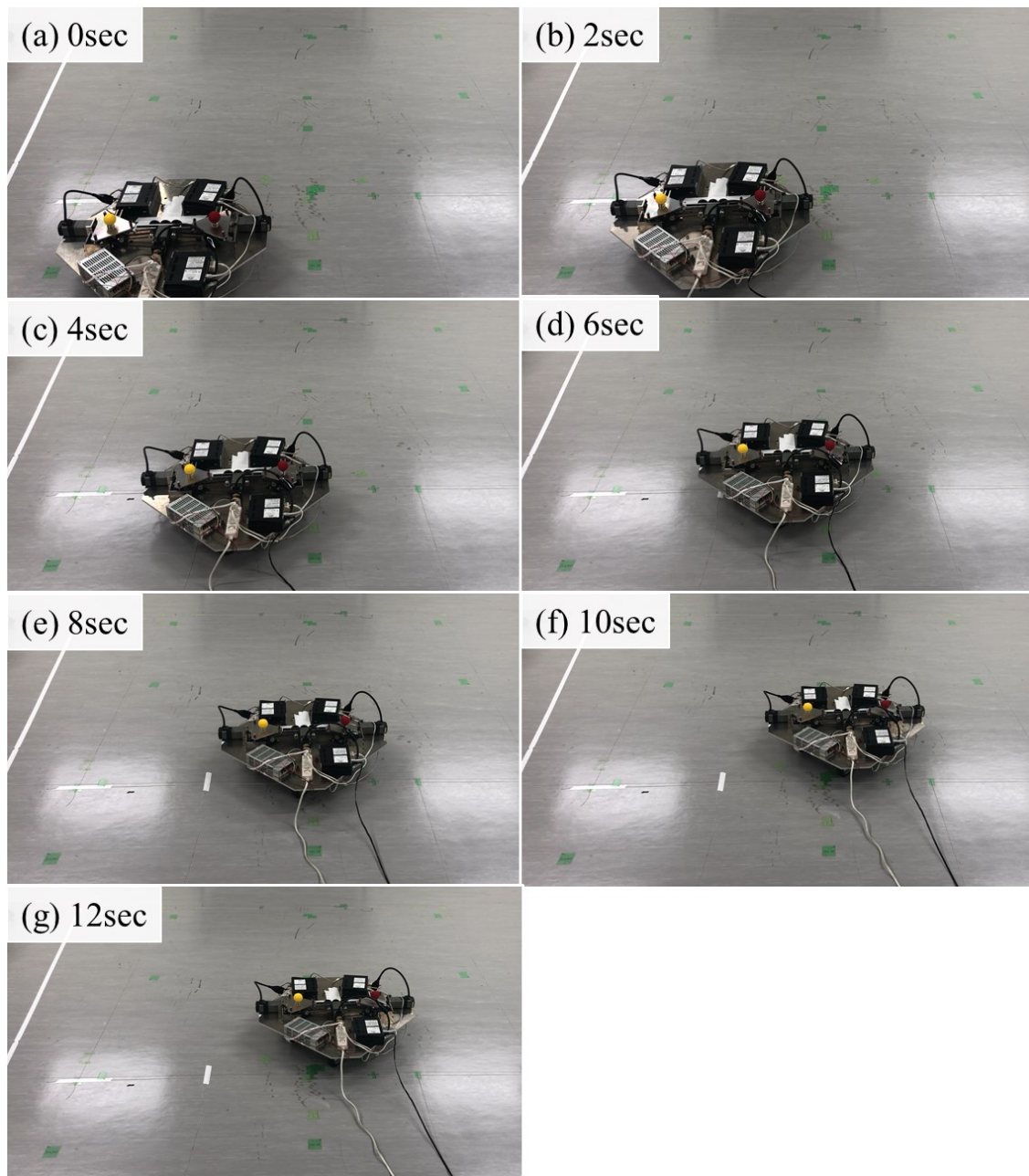


Fig. 6-24 Running motion (45deg trajectory, $\theta_a = \theta_b = 90\text{deg}$)

ロボットの直進距離は 986.8mm であった。しかし、進行方向の角度は 48.5deg であり、目標座標と動作終了時のロボット座標との距離は 60.3mm であった。

次に、旋回速度-0.324rad/s で、その場旋回する動作指令を行い、その動作を計測した。前節において Fig. 6-16 に示した実験と同様の実験条件とした。Fig. 6-25 に計測結果を示す。また、走行動作中の写真を Fig. 6-26 に示す。

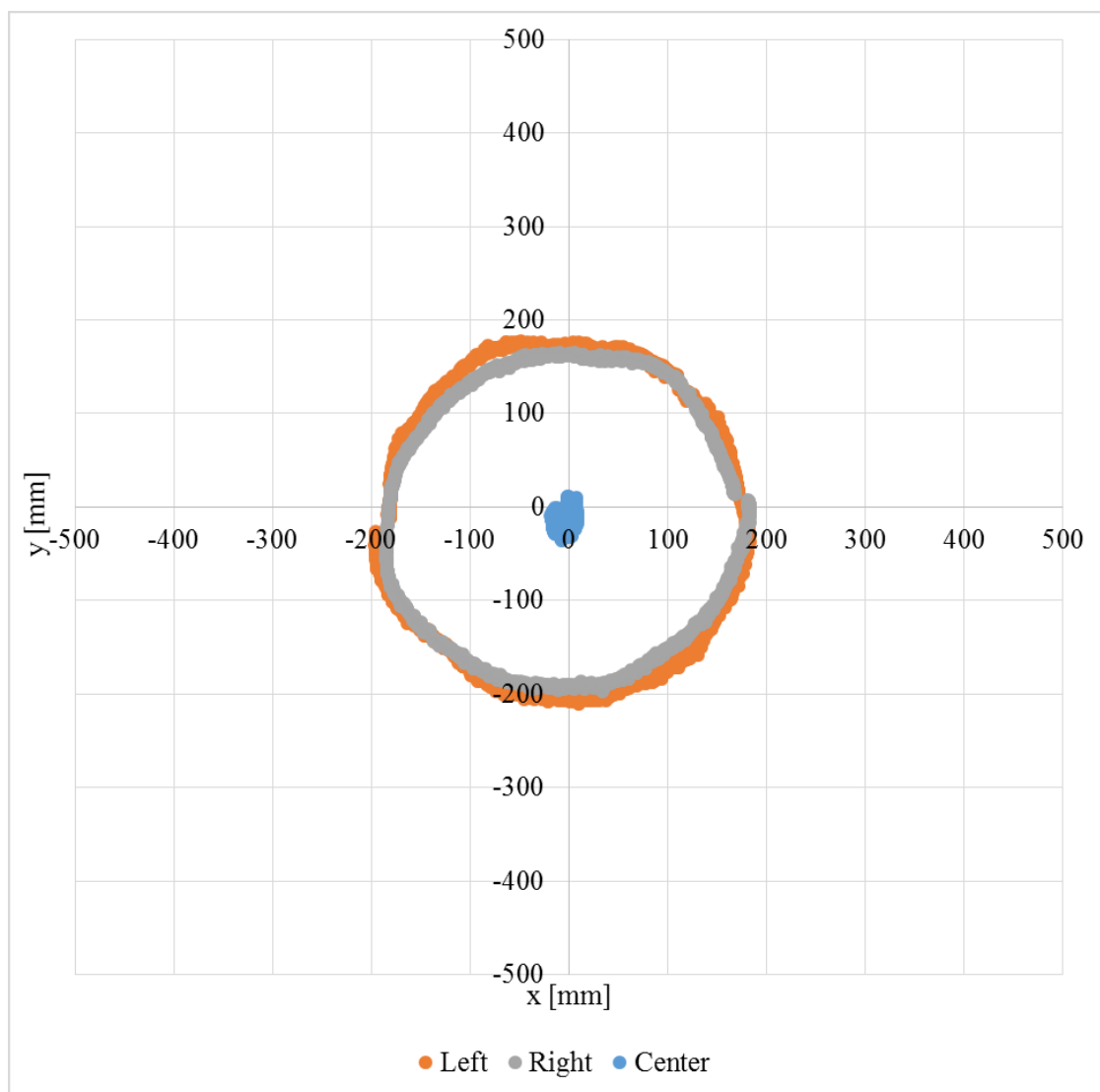


Fig. 6-25 Running result (spin turn, $\theta_a = \theta_b = 90\text{deg}$)

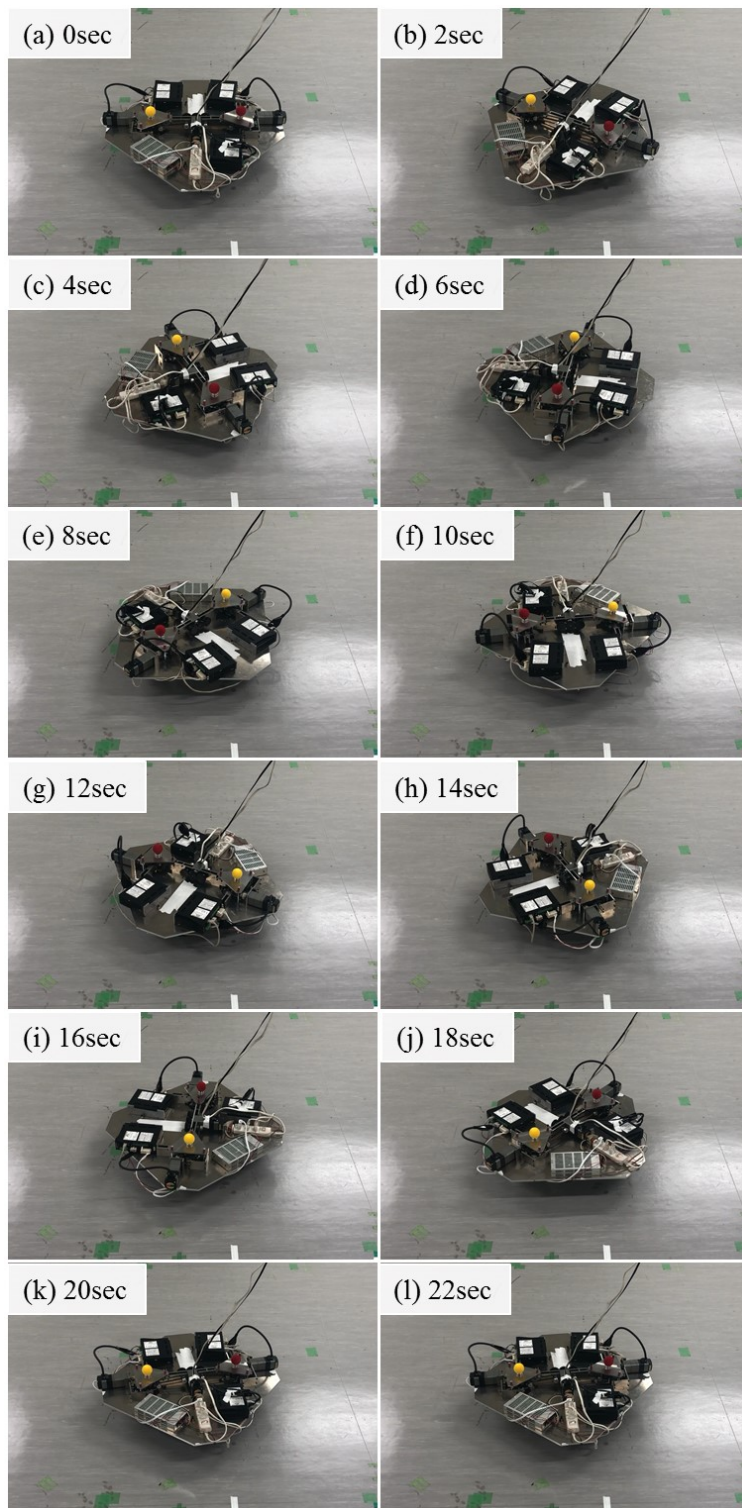


Fig. 6-26 Running motion (spin turn, $\theta_a=\theta_b=90\text{deg}$)

動作終了時において、姿勢角度は 8.2deg であった。また、その場での旋回にも関わらず、ロボット中心に多少のずれが生じていることが確認できた。ロボット中心の誤差は最大で 37mm であった。

以上のように、60deg 配置の場合と比較して、誤差が増大したものの、90deg 配置においても導出した運動学理論に従って動作することを確認した。

次に、ローラ配置の違いによる車輪推力の変化を比較するため、日本電産シンポ株式会社製デジタルフォースゲージ「FGP 50」(Fig. 6-27)を用いて静止したロボットの側面を押して外力を加え、ロボットが動き出すのに必要な力を計測することで、モータ - 車輪間の伝達力を計測した。このとき、モータに保持トルクが生じていると、車輪から伝わった外力によってモータが回転する前に車輪と地面の間や、動力伝達機構のローラと球の間で滑りが生じてしまい、モータ - 車輪間の伝達力を計測することが出来ないため、モータドライバの電源を切ることでモータには保持トルクが生じていない状態とした。また、3.3 節における検討の条件と同様に車輪はあらかじめ移動方向に向け、キャストの旋回動作は生じない状態とした。



Fig. 6-27 Digital force gauge

計測は、Fig. 6-28 に示すようにロボットの x 方向、y 方向及び斜め 45deg 方向の 3 方向行った。同様の計測を 90deg の駆動ローラ配置と 60deg の駆動ローラ配置でそれぞれ行った。計測結果をそれぞれ Fig. 6-29, Fig. 6-30 に示す。

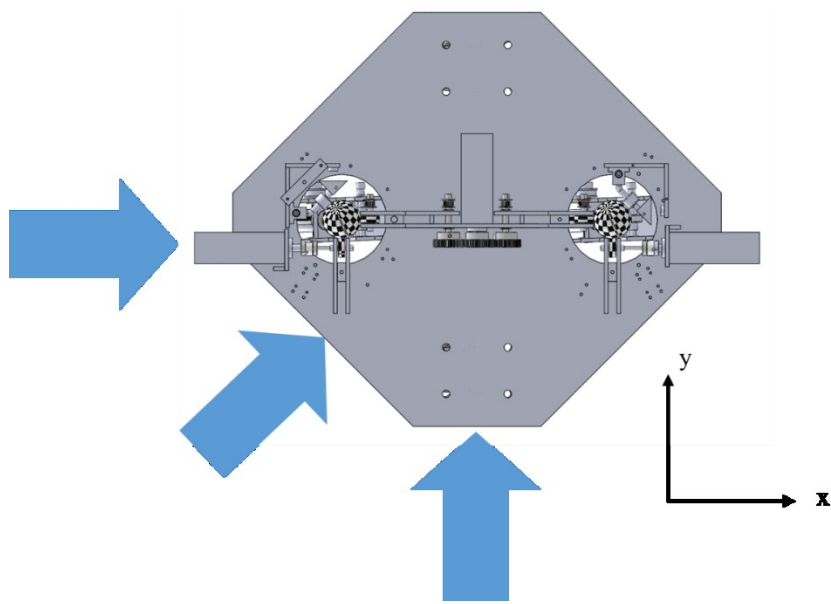


Fig. 6-28 Measurement direction

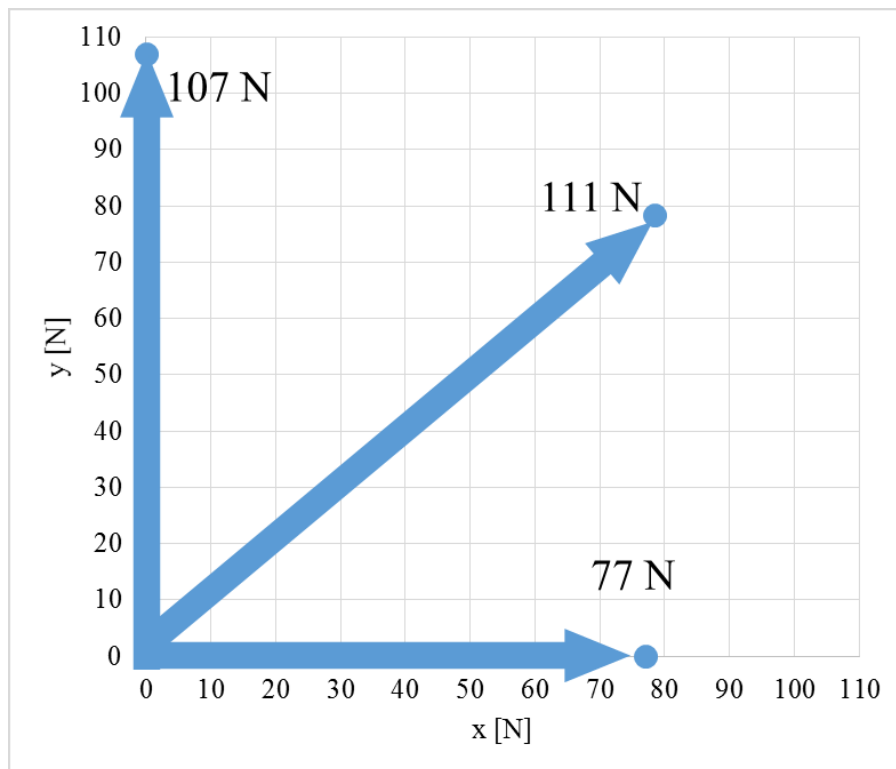


Fig. 6-29 Measurement of wheel force (90 deg arrangement)

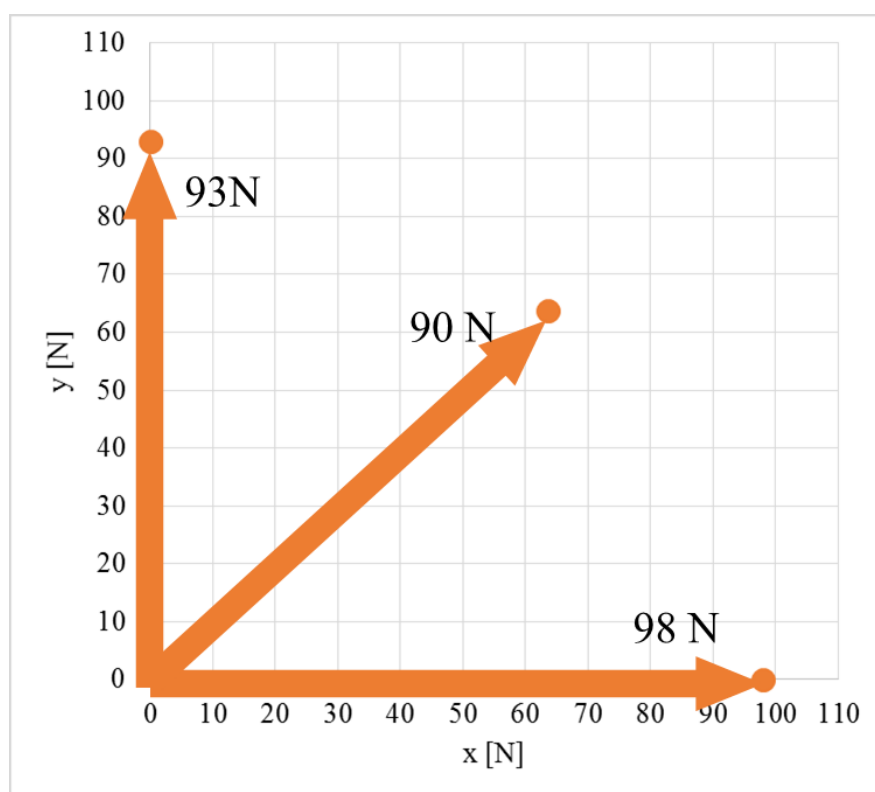


Fig. 6-30 Measurement of wheel force (60 deg arrangement)

Fig. 6-29 より，90deg 配置においては，y 方向にロボットを動かすのに必要な力が 107N，45deg 方向に動かすのに必要な力が 111N であったのに対して，x 方向にロボットを動かすのに必要な力は 77N であった．このように 3.3 節での検討で得られた 90deg 配置では x 方向の車輪推力にくびれが生じるという特徴と同様に，x 方向の車輪推力が減少する傾向が得られた．また，Fig. 6-30 より，60deg 配置においてはロボットを動かすのに必要な力は x 方向に 98N，y 方向に 93N，45deg 方向に 90N であった．同様に，3.3 節の検討で得られた 60deg 配置の特徴である，斜め方向にくびれが生じるという傾向が得られた．また，90deg 配置と比較して，60deg 配置は移動方向による車輪推力の変化が少ないという，車輪推力の検討に従った結果が得られた．

このように，駆動ローラを 60deg で配置することで，移動方向による車輪推力の変化を減少させることが出来ることを確認した．

第 7 章

結 言

7.1 本論文のまとめ

本研究は、ホロノミック全方向移動機構に関する研究である。本研究で提案する新しいホロノミック全方向移動機構 ACROBAT-S について、その実現可能性と有用性を確認した。

提案するホロノミック全方向移動機構 ACROBAT-S の構造とその実現可能性について、第 2 章において検討を行った。従来に研究されてきたキャスタ型のホロノミック全方向移動機構であるアクティブキャスタは、高い走行性能、段差踏破性と静粛性を持つホロノミック全方向移動機構であるが、その制御にはトランスミッションに取り付ける絶対角度センサが必須であり、制御が複雑であるうえ高コストであった。これに対し、本研究では、球体を用いる特徴的なトランスミッションによって駆動するキャスタ型ホロノミック全方向移動機構である ACROBAT-S を提案した。提案機構はキャスタ型移動機構の高い走行性能を維持したまま、絶対角度センサを不要とし、制御を容易にすることができる。提案機構の運動学解析を行い、運動モデルを構築した。

導出した運動学モデルの妥当性について、第 3 章において検討を行った。運動学モデルにより得られた諸設計パラメータより、動力学シミュレーションを製作し、導出した運動学モデルが妥当であることを確認した。

これらの結果に基づき、第 4 章において、試作機的设计、製作を行った。無負荷による基礎実験および走行実験により、提案機構が運動学モデルに従って指令した動作を遂行できることを確認し、ホロノミック全方向移動機構の性能を有することを確認した。

提案機構 ACROBAT-S を用いたホロノミック全方向移動ロボットの構造及び実現可能性とその有用性について、第 5 章において検討を行った。従来のアクティブキャスタを用いたホロノミック全方向移動ロボットにおいては、各車輪の駆動に必ず 2 つのモータが必要となることから、2 輪のホロノミック全方向移動ロボットにおいて 4 つのモータが必要となる等、複数輪を駆動するロボットにおいて全方向移動の自由度に対してモータ数が冗長になるという問題点があった。本研究で提案する機構 ACROBAT-S のトランスミッションはロボットの動作上同方向に回転する複数の駆動ローラを 1 つのモータで共有して駆動することで、複数輪を駆動し、冗長にならずにホロノミック全方向移動ロボットを実現できる。この ACROBAT-S を 2 輪用いた全方向移動ロボットについて、運動学解析を行い、ロボットの運動モデルを構築した。また、任意に配置できる駆動ローラについてその配置がロボットの動作に与える影響について検討した。

第 6 章において、導出した運動学モデルの妥当性の検討と、提案する ACROBAT-S ロボットの試作を行った。運動学モデルに基づき、物理シミュレーションを製作し、導出した運動学モデルが妥当であることを確認した。これらの結果に基づき、試作機的设计製作を行い、走行実験により、提案する全方向移動ロボットが運動学モデルに従って指令した動作を遂行できることを確認

し、ホロノミック全方向移動ロボットの性能を有することを確認した。また、任意に配置できる駆動ローラの配置がロボットの動作に与える影響を試作機を用いて比較し、検討した駆動ローラ配置が妥当であることを確認した。

7.2 今後の展望

本研究では、ホロノミック全方向移動機構を開発し、これを用いたホロノミック全方向移動ロボットについて検討を行った。提案機構は従来のホロノミック全方向移動機構に対して優位性を有しているが、実用化に際してはいくつかの検討が必要である。

提案機構を用いたホロノミック全方向移動ロボットの動作精度に関して、本論文で行った動作実験によって生じた目標座標との誤差は 20mm 程度であった。具体的な機構の利用目的によるが、オドメトリによる自己位置推定で位置制御を行う際には累積する誤差が課題となるため、誤差要因の追求と誤差改善の余地があると考えられる。誤差要因には、それぞれの ACROBAT-S を駆動する 2 つの駆動ローラに生じる滑りによるもの、それぞれの ACROBAT-S の押付機構のボールローラによって生じる負荷の差等が考えられる。今後の検討として、押付機構の押付力調整による誤差の変化の検証による実機における押付力の最適化や使用するボールローラの性能検証等により誤差の改善ができると考える。

キャスタ型移動機構のメリットとして、屋外での利用に適するという特徴がある。ACROBAT-S も同様に、屋外での走行に適した特性を有しているが、実際に屋外で走行させるには至っていない。試作した全方向移動ロボットは現状、有線で電源供給を行っている。今後の検討として、試作した全方向移動ロボットにバッテリー等の電源を搭載し、単独で走行可能に改良することで、屋外で走行試験を行うことが挙げられる。舗装路の走行、砂利等のある未舗装路の走行、スロープの昇降といった走行試験を行い、走行性能を評価する。また、様々な高さの段差を用意し、段差踏破性能を評価する。その他、屋外を走行するにあたって障害となる環境の検討を行い、順次走行試験を実施することが考えられる。

さらには、提案機構および提案機構を用いたホロノミック全方向移動ロボットを実用化するにあたり、構造部品の最適化による軽量化や低コスト化が必要となると考える。本研究で実現可能性を確認した構造を基本とした、さらなる設計の最適化やトランスミッション構造の改良により実用化につながると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田川頁, 金子透, “ロボットの移動機構に関する研究動向”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.3, (2003), pp.282-292.
- [2] 今井倫太, 高橋正樹, 森口智規, 岡田卓也, 湊雄一郎, 中野剛, 田中昌司, 下本英生, 堀俊夫, “病院内ロボット搬送システムの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.10, (2009), pp.1101-1104.
- [3] Softbank, Pepper, <https://www.softbank.jp/robot/>, (2018.6.23)
- [4] Toyota, HSR(Human support robot), http://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/robot/, (2018.6.23)
- [5] S. Ishida, N. Shimpuku, K. Ishii and H. Miyamoto,, “Holonomic omnidirectional vehicle with ball wheel drive mechanism and application to RoboCup soccer middle size league”, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol.26, No.3, pp.669-677, 2014 (in Japanese)
- [6] K.Terashima, H.Kitagawa, T.Miyoshi and J.Urbano, “Frequency Shape Control of Omni-directional Wheelchair to Increase User's Comfort,” Proc. IEEE 2004 Int. Conf. on Robotics and Automation, (2004), pp.3119-3124. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307542
- [7] Honda “U3-X” <http://www.honda.co.jp/robotics/u3x/>
- [8] Tadakuma, K., Tadakuma, R., Nagatan, K., Yoshida, K. and Iagnemma, K., Crawler mechanism with circular section to realize a sideling motion, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (2008), pp.2422-2428.
- [9] J.Grabowiecki: “Vehicle-wheel,” US Patent No.1, pp305,535, 1919.
- [10] Asama, H., Sato, M., Bogoni, L., Kaetsu, H., Matsumoto, A. and Endo, I., Development of an omnidirectional mobile robot with 3 DOF decoupling drive mechanism, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (1995), pp.1925-1930.
- [11] B.E.Ilon: “Directionally Stable Self Propelled Vehicle,” US Patent No.3, pp746, 112. 1973.
- [12] Muir, P.F. and Neuman, C.P., Kinematic modeling of wheeled mobile robots, Journal of Robotic Systems, Vol.4, No.2 (1987), pp.281-340.
- [13] M. Takahashi, T. Moriguchi, S. Tanaka, H. Namikawa, H. Shitamoto, T. Nakano, “Development of a Mobile Robot for Transport Application in Hospital” Journal of Robotics and Mechatronics Vol.24 No.6 pp. 1046-1053, doi: 10.20965/jrm.2012.p1046
- [14] A. Yamashita, T. Kanazawa, H. Asama, H. Kaetsu, I Endo, T. Arai, “Development of a Holonomic Omni-Directional Mobile Robot with Step-Climbing Ability” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 13, No. 2, pp. 160-167, doi: 10.20965/jrm.2001.p0160
- [15] M. Komori, K. Matsuda, T. Terakawa, F. Takeoka, H. Nishihara, H Ohashi, “Active omni wheel capable of active motion in arbitrary direction and omnidirectional vehicle” Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 2016 Volume 10 Issue 6 Pages JAMDSM0086, doi: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0086

- [16] K. Tadakuma, R. Tadakuma, J. Berengueres, "Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle with "Omni-Ball": Spherical Wheels ", Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.33 - 39, 2007
- [17] K. Tadakuma; R. Tadakuma; S. Hirose, "Mechanical Design of VmaxCarrier2, Omnidirectional Mobile Robot with Function of Step-Climbing". Journal of Robotics and Mechatronics Vol.17, No.2, pp198-207, 2005. doi: 10.20965/jrm.2005.p0198
- [18] M. West and H. Asada: "Design of a Holonomic Omnidirectional Vehicle," Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp97-103, May.1992.
- [19] Lee. Y.C., Lee D.L., Chung J.H. and Velinsky S.A., "Control of a redundant, reconfigurable ball wheel drive mechanism for an omnidirectional mobile platform" Robotica Vol.25, pp.385-395, 2007
- [20] S. Ishida, H. Miyamoto, "Ball wheel drive mechanism for holonomic omnidirectional vehicle", 2010 World Automation Congress (WAC), pp.(1)-(6), 2010.
- [21] 石田秀一, 宮本弘之, "球体駆動全方向移動機構の開発", 日本機械学会論文 C 編, Vol.78, No.790, (2013).
- [22] Nagarajan, U., Kantor, G. and Hollis, R., The Ballbot: An omnidirectional balancing mobile robot, e International Journal of Robotics Research, Vol. 33, issue 6 (2013), pp.917-930.
- [23] M. Kumagai, T. Ochiai: "Development of a robot balanced on a ball – Application of passive motion to transport", Proc. Of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4106-4111, 2009.
- [24] M. Wada and S. Mori, Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp3671-3676, 1996
- [25] K. Terashima, S. Takenoshita, J. Miura, R. Tasaki, M. Kitazaki, R. Saegusa, "Medical Round Robot – Terapio –" Journal of Robotics and Mechatronics Vol.26 No.1 pp. 112-114. doi: 10.20965/jrm.2014.p0112
- [26] M. Wada, "Caster Drive Mechanisms for Holonomic and Omnidirectional Mobile Platforms with no Over Constraint", Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1531-1538, 2000
- [27] M. Wada, Y. Inoue and T. Hiram, "A New Active-caster Drive System with a Dual-ball Transmission for Omnidirectional Mobile Robots," Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2525-2532, 2012.
- [28] Yusuke Inoue, Masayoshi Wada, Takahiro Hiram, "design of omnidirectional mobile robots with ACROBAT wheel mechanism," IROS, (2013), pp.4852-4895.
- [29] Wada, M. and Kato, K., Kinematic modeling and simulation of active-caster robotic drive with a ball transmission (ACROBAT-S), Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2016), pp.4455-4460.

謝 辭

本研究は、筆者が東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻博士後期課程に在学中、和田研究室にて和田正義准教授のご指導のもとで行った研究をまとめたものです。

和田先生には、学部4年次に研究室に配属されてから5年間におよび丁寧なご指導を頂き、研究に確たる方向性を示して頂きました。また、未熟であった筆者に対し非常に熱心な論文指導および発表指導を賜り、基本的な部分から多岐にわたり研究活動に必要な考え方、知識を学ばせて頂きました。研究室配属当初に提案した筆者の曖昧なアイデアを一つの研究テーマとしてこのような形で論文にまとめることが出来るのも、和田先生のご指導及びお力添えのおかげです。長きにわたりご指導ご鞭撻を頂き誠にありがとうございました。

東京農工大学の田川泰敬教授、鎌田崇義教授、石田寛教授、水内郁夫准教授には、博士論文の審査員としてお世話になるとともに、研究に関する貴重な議論をさせていただきました。ありがとうございました。

和田研究室の皆様にも大変お世話になりました。

筆者が学部、博士前期課程時代の先輩である宗方宥さん、青野貴広さん、遠藤玲子さん、石田真吾さん、木村耀平さん、矢崎史裕さん、井野邊修一さん、北村正樹さん、下川航さん、那須翔太さん、堀山智弘さん、松元洸樹さんには、研究に関する相談につぶさに応じて頂くとともに、研究室でのイベントの企画をして頂くなど研究室での活動の幅を広げて頂き、ありがとうございました。宗方さんには、筆者の研究に貴重なアドバイスを頂くとともに、ご自身もお忙しいなか筆者の学部卒業論文原稿の校正など多岐に渡りご協力を頂き、ありがとうございました。筆者が博士課程進学を決断し、そしてこのように修了を迎えることができるのも、研究室で初めての博士後期課程在籍であった宗方さんの存在あつてのことです。ありがとうございました。

また、学部、博士前期課程で同期の金沢公俊君、斎藤豪人君、谷勇輝君、TRAN Truong Phong君、米沢友貴君、楠瀬章太君、杉山高聖君、福澤希望君とは、技術と知識を互いに共有しながら共に研究に励むことができました。学部から居室で隣席だった谷君、斎藤君は出不精な筆者を幾度も食事に連れ出してくれるなど大変充実した時間となりました。ありがとうございました。

後輩である、大西林太郎君、小池理仁君、匂坂真依人君、藤川礼央君、村上拓君、田中健登君、乾俊介君、加藤圭悟君、京島徹昭君、西村直樹君、横山直哉君、飯田隼弘君、奥野真成君、石井隼人君、佐々木幹君、佐藤拓斗君、地阪雄一郎君、牧野端慶君、江波戸大介君、金子温毅君、菊地凜平君、小島航君、中山泰誠君、宮下献児君にはお世話になりました。小池君、匂坂君、藤川君、村上君には、研究の合間の雑談やレクリエーションを企画してもらうなど貴重な休息の時間となりました。特に、村上君には休日を含めて趣味に遊びにと大変充実した時間を過ごさせてもらいました。本当に気兼ねなく接してもらい、同期が卒業したあとの心細さの中にあつて大変救いにな

りました。また、後輩の皆さんとも日常の雑談から研究の議論まで、有意義な研究室生活を送ることができました。ありがとうございました。

筆者が卒業した都立産業技術高専荒川キャンパスの卒論担当教員であった堀滋樹先生をはじめ、ロボット工学コースの教員の皆様には学業、研究ともに知識を授けて頂き、また、筆者が研究者を志すきっかけを与えていただき、大変感謝しております。筆者が所属していたサークル「ロボット研究同好会」の顧問教員の皆様には、筆者の研究テーマに繋がる貴重な経験の機会をいただきました。特に、吉田喜一先生には、高専在学中から海外での学会発表の機会を頂き、ありがとうございました。頂いた経験が筆者にとっての大きな自信となりました。

ここに名前をお出しできていない多くの方にも大変感謝しております。本当にありがとうございました。

最後に、博士後期課程への進学を認め、見守ってくれた家族に感謝いたします。

著者紹介

加藤 航甫（かとう こうすけ）

1993 年 10 月 19 日生まれ。東京農工大学工学部機械システム工学科，東京農工大学大学院工学府専門職学位課程を経て，2018 年 4 月より東京農工大学大学院工学府機会システム工学専攻博士後期課程へ進学。日本機会学会学生会員。球形動力伝達機構を有するアクティブキャストの研究に従事。

博士学位論文

球形動力伝達機構を用いたアクティブキャスト
および全方向移動車両に関する研究

2020 年 3 月 加藤 航甫