

修士論文

走行用の駆動力とリンク機構で変形する可変三輪移動体

VDRの開発

令和3年度

三重大学 工学研究科

永岡 拓磨

令和 3 年度 修士論文

走行用の駆動力とリンク機構で変形する可変三輪移動体
VDRの開発

所属 三重大学 工学研究科

研究室 知能ロボティクス研究室

令和 2 年度入学 420M136

氏名 永岡 拓磨

目次

第1章	はじめに	1
第2章	研究背景	2
2.1	自律走行	2
2.2	車体構成	3
2.3	従来研究	4
第3章	VDR について	6
3.1	低速形態	6
3.2	高速形態	8
3.3	変形について	8
第4章	リンクを採用する変形機構	10
4.1	リンク機構の例	10
4.2	四節リンク機構	11
第5章	変形機構	15
5.1	ホイールベース	15
5.2	トレッド	17
第6章	実験装置	23
6.1	3D モデル	23
6.2	1/5 スケールモデル	25

6.3 四節リンク機構を採用する機体	27
第7章 おわりに	31
参考文献	32
謝辞	33

目次

1.1	The concept of VDR.	1
2.1	Autonomous driving in parking	3
2.2	The previous mobility [3]	4
2.3	The previous mobility [4]	5
3.1	Low velocity mode at sidewalk	7
3.2	Phase of transformation	9
4.1	Example model of link mechanism.	11
4.2	Four-link mechanism	12
4.3	Parameters of four-link mechanism	12
4.4	The ratio of $Force_{output}$ to $Force_{input}$ by each angle	14
5.1	Parameters of wheelbase.	16
5.2	The ratio of wheelbase by each angle.	17
5.3	Parameters of tread.	18
5.4	The relation of links and ratios.	19
5.5	Forces of tread.	19
5.6	The ratios of horizontal and vertical direction by each angle.	22
6.1	The 3D model of VDR	24
6.2	Dreamer	25

6.3	1/5 scale model of VDR	26
6.4	Low velocity mode	27
6.5	High velocity mode	27
6.6	The four-link mechanism of VDR.	28
6.7	1/5 scale model of VDR.	28
6.8	Comparison of 3Dmodel and 1/5 scale model.	29
6.9	Comparison of 3Dmodel and 1/5 scale model.	29

第 1 章

はじめに

本研究の目的は低速形態と高速形態の 2 形態に相互変形可能な可変三輪移動体 (以下 VDR) の開発である。最近では様々なモビリティが提案・開発されているが、2 つの形態を持つというのがこの研究で提案するモビリティの特徴である。走行性の異なる 2 つの形態を持たせるには車体を変形する必要がある。以上から本論文ではこの目的に対する変形機構の設計を取り扱う。さらに変形機構をリンク機構のみで構成することを目標とする。

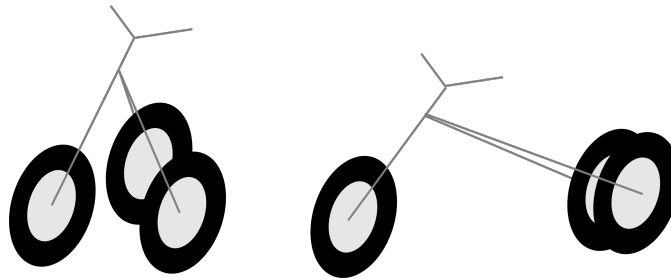


Fig. 1.1 The concept of VDR.

第 2 章

研究背景

小型モビリティは様々なものが開発されている。その中で VDR は変形機構を有するモビリティである。VDR にはこれから述べるように自律走行などの機能も想定しているため多くの問題がある。その問題の中で私が取り組むものが変形に関する部分である。これを踏まえ提案する背景について述べる。VDR の提案背景には大きく自律走行と車体構成がある。また変形を用いる移動体は過去に開発されており、それらを従来研究として紹介する。

2.1 自律走行

低速形態では自律走行させることを想定している。自律走行時は運転手は乗車せず、6 km/h 未満の極低速で走行させる。6km/h 未満というのはこの後に出てくる歩行補助車という枠組みに低速形態を入れるための条件の一つである。VDR は三輪を有するので極低速でも安定する。

自律走行を用いて Fig.2.1 のように自動駐車させることを考える。例えば目的地まで高速形態で走行し、そこからは自律走行で VDR に駐輪場まで走行させる。再び VDR に乗る際には事前に通信端末などで VDR と通信して目的地前まで待機させるという使い方もできる。この例のように人が搭乗しない、軽量な車両の極低速の自律走行であるため制御は重量の重い一般的な自動車の自律走行制御と比べ容易であると考えられる。

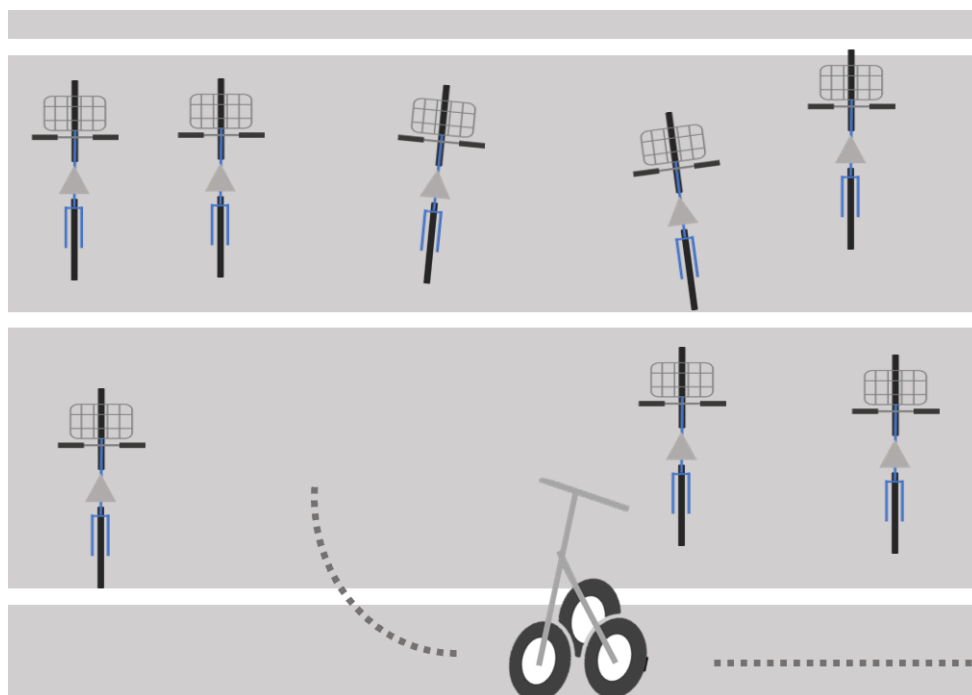


Fig. 2.1 Autonomous driving in parking

2.2 車体構成

VDR をより軽量にして電費を伸ばすために変形には変形専用のアクチュエータを使用しない。変形の際に必要な回転運動は制御しやすく、精度の高いモータを用いるのが一般的である。しかし VDR の場合ホイールベースなどを変形させるという大きなトルクが必要になるため、その分モータも大型化する。さらに変形が必要な箇所が複数あるためそのたびにモータを配置すると重量が大きくなる。また変形専用のモータは変形するときにはしか使用されず、変形前と変形後ではただの重りになる。

また変形機構に使うアクチュエータには油圧シリンダやワイヤなどがある。油圧アクチュエータは大きな力を伝達することができ、力の方向を自由に決めることができる。しかしメンテナンスが必要である [1]。ワイヤは力の方向を自由に決めることができるが、ホイールベースを変化させるような大きな力を伝達するには不安がある [2]。そのため変形機構にリンク機構を用いる。リンク機構は大きな力を伝達でき、メンテナンスの必要もない。しかし力の向き

を自由に設定できないため、構造が複雑化する。本論文ではこの複雑化する可能性のあるリンク機構の設計について取り扱う。

2.3 従来研究

状況に応じて変形する移動体はいくつか研究されている。Kim らは Fig.2.2 に示すような地面の傾斜角に応じてホイールベースと車輪の大きさを変化させる移動体を開発している [3]。

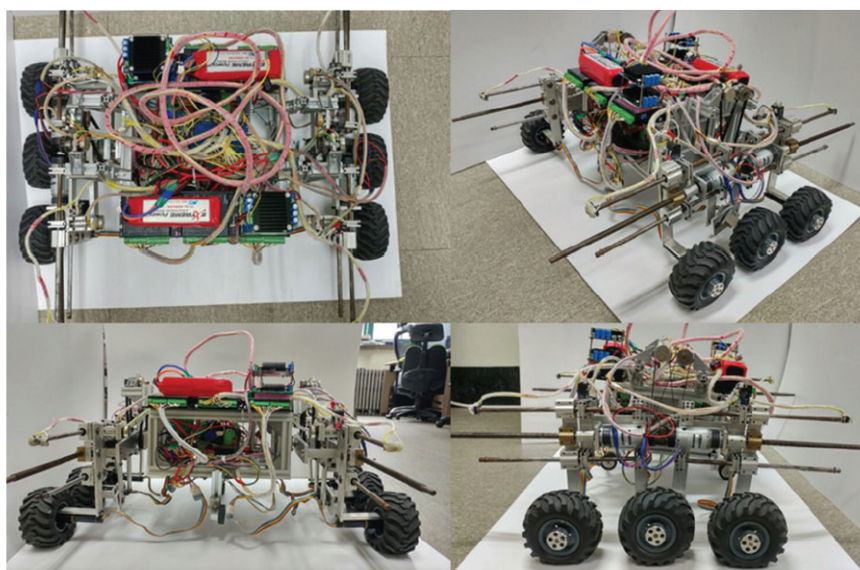


Fig. 2.2 The previous mobility [3]

この変化により傾斜が大きい坂道や凹凸がある道も走行できる。変形機構を採用することで踏破性の向上を示すものである。

山本らは交通を阻害しないように他の交通と同程度の走行性能を有し、人が生活する空間で人を支援できるサービスロボットにもなる二輪ロボットを開発している [4]。この移動体は Fig.2.3 に示すように 2 足の先端に車輪が配置されており、股関節に当たる部分が開くことでホイールベースを形成する変形機構を有する。ホイールベースを形成するとバイクのような走行性を実現する。また倒れないようにする制御手法も提案しており、実機での検証をして

いる。

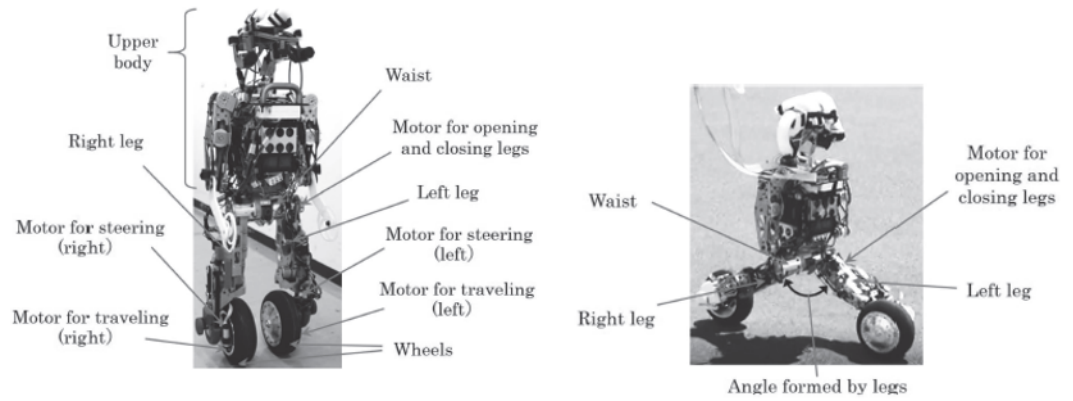


Fig. 2.3 The previous mobility [4]

これらの移動体は変形専用のアクチュエータを搭載しており、変形専用のアクチュエータを搭載しないVDRとは変形機構においては異なる。また走行のコンセプトも異なり、VDRには二つの形態に明確な違いがある。

第3章

VDR について

VDR は3つのインホイールモータを有する三輪移動体である。つまりすべての車輪が駆動する電動モビリティである。車輪は二等辺三角形の頂点上にあり、前輪に一つ、後輪に二つ配置される。この車輪配置を変化させることで低速形態と高速形態に変形させる。2つの形態に変形することにより、環境に応じた走行性を選択できる。

3.1 低速形態

低速形態では三輪は直角二等三角形の頂上に配置される。ホイールベースは短く、トレッドは広くする。そうすることで低速における旋回性と直立安定性を確保する。また低速形態時の運転手の乗車姿勢は立ち乗りを想定する。

日本の公道のうち Fig.3.1 のように歩道を走行できる歩行補助車という枠組みがある。VDR の低速形態を歩行補助車の枠組みに入れることで歩道を走行できるようにする。

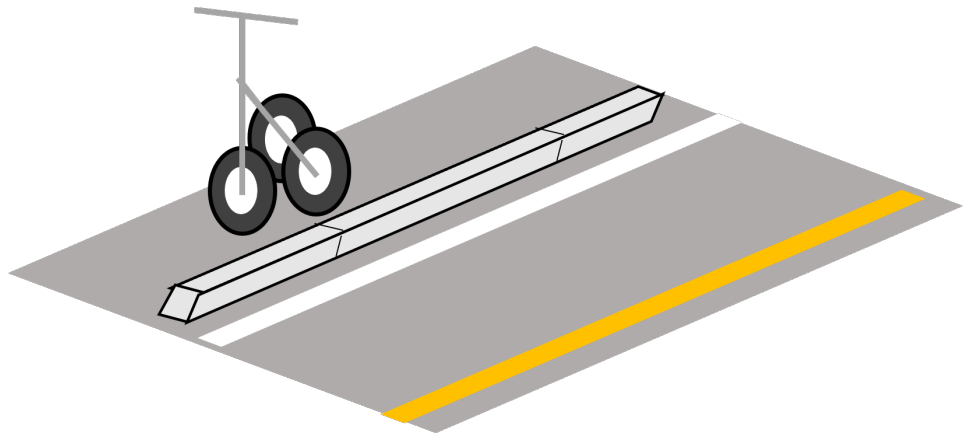


Fig. 3.1 Low velocity mode at sidewalk

歩行補助車には車体の大きさと構造に条件がある。車体の大きさは以下の長さ、幅及び高さ
に寸法の制限がある [5].

1. 車体の大きさ

(1) 長さ：120 cm (2) 幅：70 cm (3) 高さ：120 cm

2. 車体の構造

(1) 原動機として、電動機を用いること。

(2) 6 km/h を超える速度を出すことができないこと。

(3) 歩行者に危害を及ぼすおそれがある、鋭利な突出物がないこと。

(4) 歩行補助車等を通行させている者が、当該車から離れた場合には、原動機が停止すること。

以上の条件を満たすことで低速形態を歩行補助車とみなすことができる。そのため車体の大きさは寸法制限に収まるように設計する。車体の構造に関しては VDR にはインホイールモータを搭載するため電動機を使用するという条件は満たす。速度は低速形態時には指定の速度以上出ないように制御する必要がある。突起物が出ないように車体形状を設計することにも注意が必要である。

3.2 高速形態

高速形態では三輪は鋭角二等辺三角形の頂点上に配置される。ホイールベースは長く、トレッドは狭くする。そうすることで高速における操縦性と加速安定性を確保する。高速形態時の運転手の乗車姿勢はバイクに乗るように座席に座る姿勢をとる。

車道を走行できる特定二輪車という枠組みがある。高速形態時では特定二輪車の枠組みに入れることで車道を走行できるようにする。特定二輪車も歩行補助車と同様に条件がある [6]。以下がその条件である。

- (1) 3 個の車輪を備えるもの。
- (2) 車輪が車両中心線に対して左右対称の位置に配置されるもの。
- (3) 同一線上の車軸における車両の接地中心部を通る直線の距離が 460 mm 未満であるもの。
- (4) 車輪及び車体の一部又は全部を傾斜して旋回する構造を有するもの。

以上の条件を満たすことで高速形態を特定二輪車とみなすことができる。VDR は三輪を左右対称に有するので (1),(2) の条件を満たす。(3) は寸法制限に注意して設計する必要がある。

3.3 変形について

VDR の変形に用いる力は前輪と後輪に搭載されるインホイールモータの回転数の差により生み出される力を使う。具体的には Fig.3.2 のように前輪の回転数を小さく、後輪の回転数を大きくすると前輪と後輪の間に縮まろうとする力がはたらく。逆に前輪の回転数を大きく、後輪の回転数を小さくすると前輪と後輪の間に伸びようとする力がはたらく。

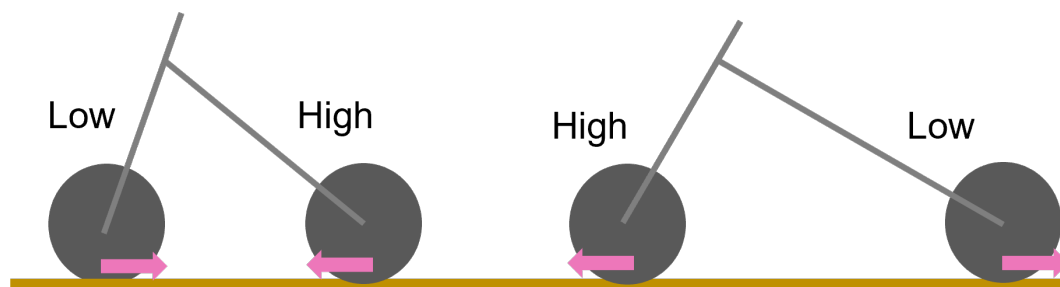


Fig. 3.2 Phase of transformation

この力をリンクを通して変形機構に伝達させることで変形が必要になる部分を駆動させる。これが VDR に変形専用のアクチュエータを使用しなくても変形ができる理由である。

第 4 章

リンクを採用する変形機構

変形機構にリンクを用いる場合, リンクの力点にかかる力と作用点にかかる力の比を考慮しなければ, 変形が途中で止まる可能性がある. これは変形させるためにかける力と変形機構が変形するために必要とする力のバランスがとれていないということである. 例として Fig.4.1 に示す簡単なリンク機構で解説する.

4.1 リンク機構の例

点 b に力を加え, 動かすことで点 a も動く場合を考える. この動きにより各点の移動距離の関係が以下になるとする.

$$a > b \quad (4.1)$$

仕事 W は移動距離を $Dist$, 力を $Force$ とすると以下の式で表せられる.

$$W = Dist \cdot Force \quad (4.2)$$

よって仕事と移動距離の関係から各点における力の関係は以下になる.

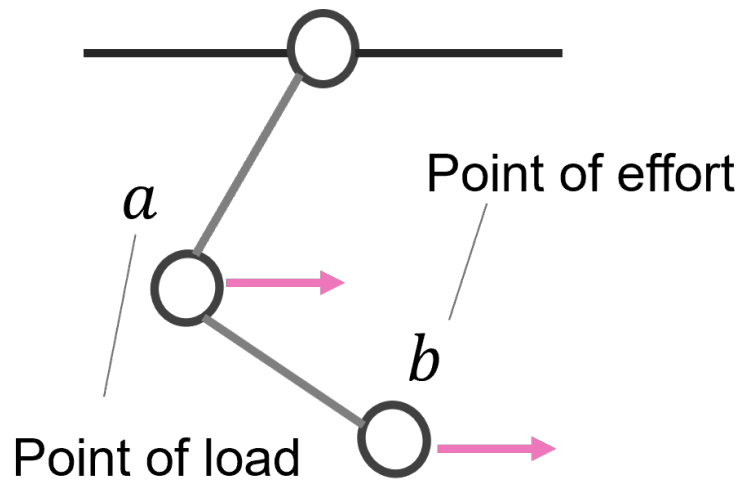


Fig. 4.1 Example model of link mechanism.

$$a < b \quad (4.3)$$

これはリンク機構を動かすために必要な力が大きくなることを表す。変形が進むごとに必要な力が大きくなり、それ以上の力を出すことができなくなると、各関節の摩擦などが影響する。そしてリンクが動かなくなり変形が止まる特異点が発生する。リンク機構を採用する変形機構にはこの特異点を回避する設計が必要となる。

4.2 四節リンク機構

次は Fig.4.2 に示すような正方形型の四節リンク機構について解説する。四節リンク機構は正方形から変形させることでひし形になる。ここでは力点と作用点にかかる力の比 R を計算する。この比により変形できるかどうか確認できる。

まず力点、作用点にかかる力をそれぞれ $Force_{input}, Force_{output}$ とする。さらに Fig.4.3 のように四節リンクの関節の内、上下の関節を結ぶ対角線方向である垂直方向の変化量を $Dist_{input}$ 、左右の関節を結ぶ対角線方向である水平方向の変化量を $Dist_{output}$ とする。ま

た四節リンクの上下の関節を結ぶ対角線と一辺がなす角を $\frac{\pi}{4} + \theta$ とする. さらに四節リンクが微小変形することでできる対角線と一辺のがなす微小角度変化を $\Delta\theta$ とする. 力点は Fig.4.2 のように四節リンクの 1 つの頂点である. この頂点に引っ張り方向の力がはたらくことにより, 別の対角の頂点同士が近づく. この頂点が作用点である.

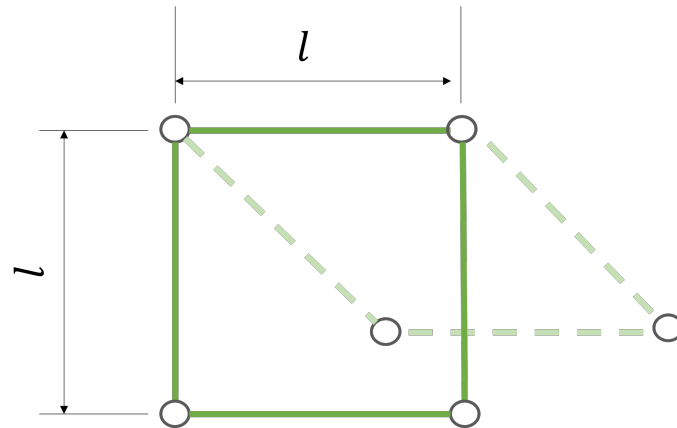


Fig. 4.2 Four-link mechanism

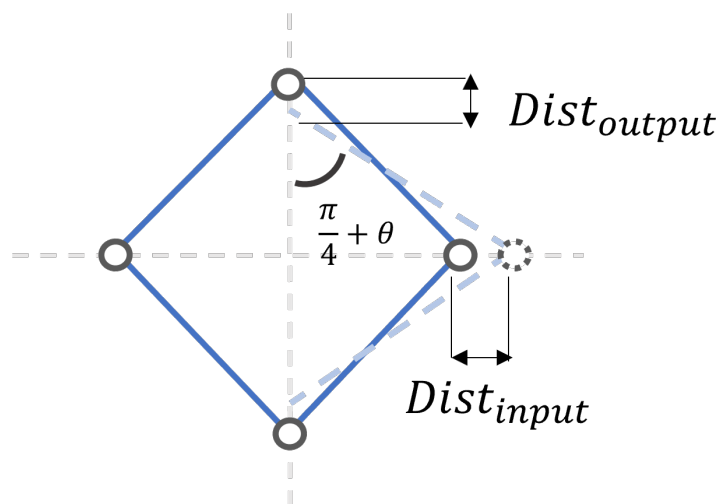


Fig. 4.3 Parameters of four-link mechanism

各方向の仕事が等しいとすると以下の式が成り立つ.

$$Dist_{input} \cdot Force_{input} = Dist_{output} \cdot Force_{output} \quad (4.4)$$

R は力の比であるため以下の式で表せられる.

$$R = \frac{Force_{output}}{Force_{input}} \quad (4.5)$$

式 (4.4) から R は以下の式になる.

$$R = \frac{Dist_{input}}{Dist_{output}} \quad (4.6)$$

$Dist_{input}$ は四節リンクの変形前後の垂直方向変化であり, これは四節リンクの対角線同士の接点と一辺が二つの対角線と交わることでできる二点の接点の計三点で出来る三角形の \sin の差である. よって $Dist_{input}$ は以下の式で表せられる.

$$Dist_{input} = l \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta\right) - l \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \quad (4.7)$$

$Dist_{output}$ は上記の三角形の \cos の差であるため, 以下の式で表せられる.

$$Dist_{output} = l \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta\right) - l \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \quad (4.8)$$

以上から R は以下のようなになる

$$\begin{aligned} R &= \frac{Dist_{input}}{Dist_{output}} \\ &= \frac{l \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta\right) - l \sin\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right)}{l \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta\right) - l \cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right)} \end{aligned} \quad (4.9)$$

式 (4.9) の右辺の分子, 分母を $\Delta\theta$ で割り, $\Delta\theta$ を 0 にする \lim をとる.

$$\begin{aligned}
 R &= \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{l \sin(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - l \sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}{l \cos(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - l \cos(\frac{\pi}{4} + \theta)} \\
 &= \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - \sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\Delta\theta}}{\frac{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - \cos(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\Delta\theta}} \\
 &= \frac{\{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta)\}'}{\{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta)\}'} \\
 &= -\frac{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Fig.4.4 は縦軸に力の比を表す R 、横軸に変形の量を表す角度変化 θ をとるグラフである。グラフから角度変化が大きくなると R は小さくなる。つまり変形に必要な力が大きくなることを示す。この必要な力を出せなくなると変形が止まる。

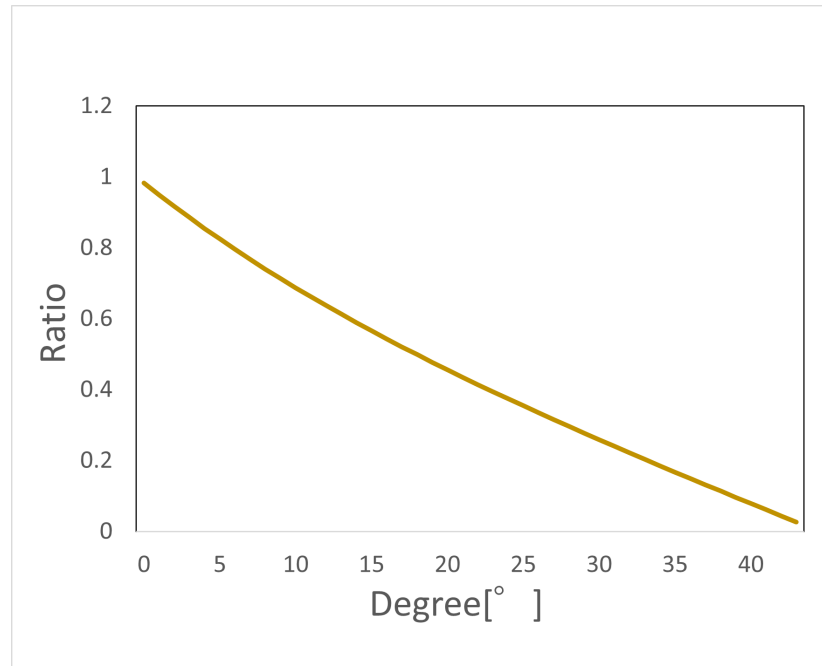


Fig. 4.4 The ratio of $Force_{output}$ to $Force_{input}$ by each angle

第 5 章

変形機構

提案する設計には以下の条件がある.

- (1) 三輪の配置を変えることで低速形態と高速形態の走行性能の違いを実現する.
- (2) VDR を軽量にするために変形専用のアクチュエータは使用しない.
- (3) 前輪と後輪のインホイールモータの回転数の差による力とリンク機構を用いる.

(1),(2) に関しては第 3 章と第 4 章で述べられているので, ここでは (3) について言及する. 前輪と後輪のインホイールモータの回転数の差による力を想定し, その力が伝わるように変形機構を考える. VDR の変形機構のうち大きく分けてホイールベースとトレッドについて解説する. この二つが変化することにより VDR の走行性の変化を出すことができる.

5.1 ホイールベース

Fig.5.1 は黄色の矢印で示す車体の進行方向に対し横方向から見たときの図である. 横方向であるため前輪と後輪の間を表すホイールベースの変化のモデルである. 中心の関節が開き, 下降することによりホイールベースが変化する.

Fig.5.1 の真ん中の一点鎖線で示す中心軸の方向である車体上下方向にかかる力と変化を $Force_v, Dist_v$, Fig.5.1 の左右方向である車体進行方向にかかる力と変化を $Force_h, Dist_h$ とする. また Fig.5.1 の中心軸とスイングアームがなす角度を θ とし, ホイールベースが微小変

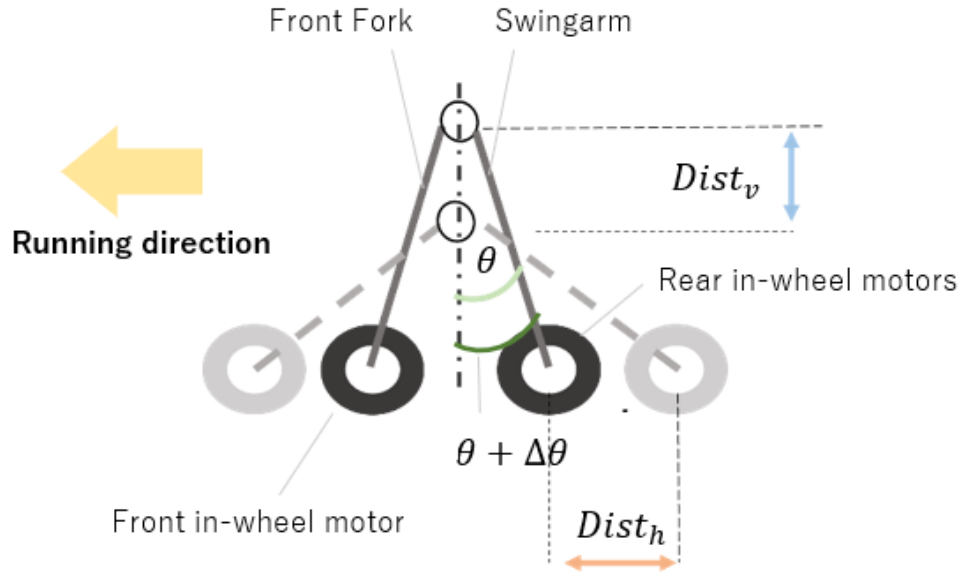


Fig. 5.1 Parameters of wheelbase.

化するときの中心軸とスイングアームがなす微小角度変化を $\Delta\theta$ とする. ホイールが力点になるため車体水平方向が力を加える方向である. $Dist_v$ と $Dist_h$ の力の比を $R_{wheelbase}$ とすると, 4 章と同様に $R_{wheelbase}$ は以下の式で表される.

$$\begin{aligned}
 R_{wheelbase} &= \frac{Force_v}{Force_h} \\
 &= \frac{2Dist_h}{Dist_v} \\
 &= \frac{2 \sin(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - l \sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}{l \cos(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - l \cos(\frac{\pi}{4} + \theta)} \\
 &= \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - \sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\Delta\theta}}{\frac{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta + \Delta\theta) - \cos(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\Delta\theta}} \\
 &= \frac{\{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta)\}'}{\{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta)\}'} \\
 &= -\frac{\cos(\frac{\pi}{4} + \theta)}{\sin(\frac{\pi}{4} + \theta)}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Fig.5.2 は Fig.4.4 と同様に縦軸に力の比を表す $R_{wheelbase}$, 横軸に変形の量を表す角度変化をとるグラフである。 $R_{wheelbase}$ は角度変化とともに小さくなっていくが, 常に 1 よりも大きい。これは力点における力よりも作用点の力が大きいことを示し, ホイールベースに関しては変形が進むことがわかる。

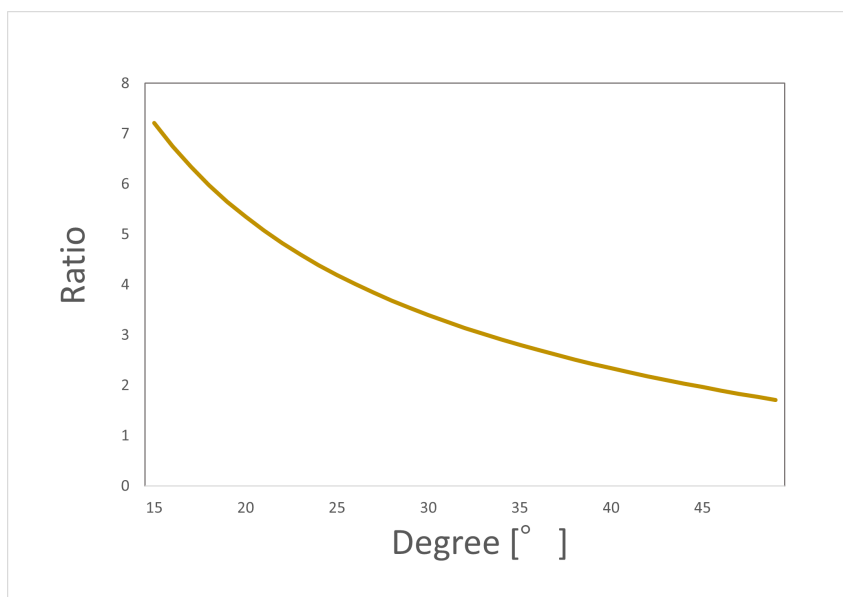


Fig. 5.2 The ratio of wheelbase by each angle.

5.2 トレッド

Fig.5.3 は黄色の矢印で示す車体進行方向に対し上から見る場合の図である。Fig.5.3 に示すようにトレッドを変化させる機構はスイングアームと中心につながるリンクで構成される。Fig.5.3 において青色で示す前輪側にあるリンクをトレッドリンクとし, トレッドリンクが接続される車体の中心にある関節とスイングアームの接続点の距離を h とする。トレッドリンクに接続され, オレンジ色のリンクをシートサポートアームとし, 車体中心にある関節とシートサポートアームがトレッドリンクと接続される関節の距離を x とする。シートサポートリンクに接続される緑色で示されるリンクをシートリンクとし, その長さを x' とする。

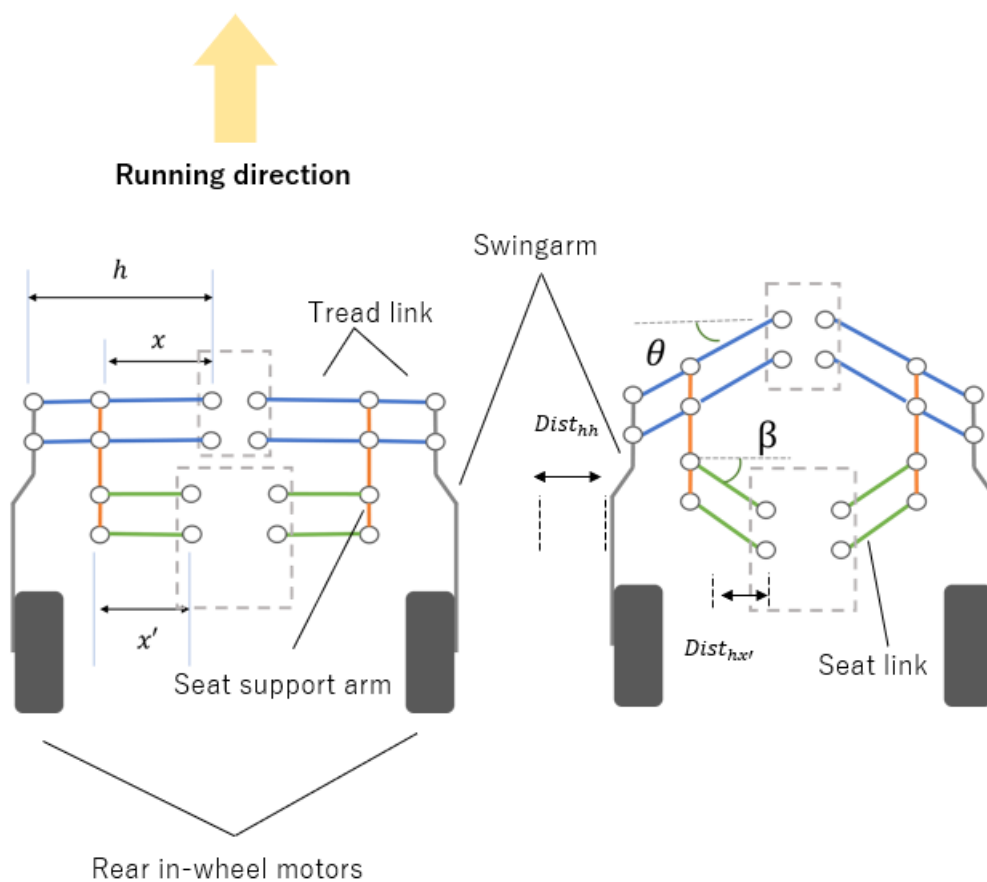


Fig. 5.3 Parameters of tread.

Fig.5.4 は力の流れと比を図にしたものである。前輪と後輪の回転数の差による力をスイングアームを通してトレッドリンクに伝える。トレッドリンクが動くとき座席 (seat) を支えるシートサポートアームも動く。この時シートリンクが押し出され、高速形態時の座席が展開する。

さらに Fig.5.4 に示す各力は Fig.5.5 のようにトレッドを構成する各リンクに作用する。

前輪と後輪の回転数の差による力 $Force_{swingarm}$ はリンク機構により車体中心に向かう方向の力に変化され、垂直方向の力 $Force_{hh}$ と水平方向の力 $Force_{vh}$ に分けられる。

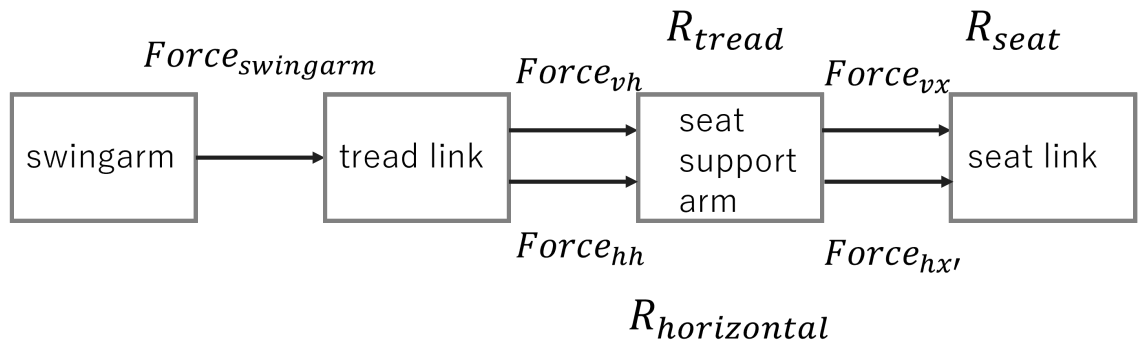


Fig. 5.4 The relation of links and ratios.

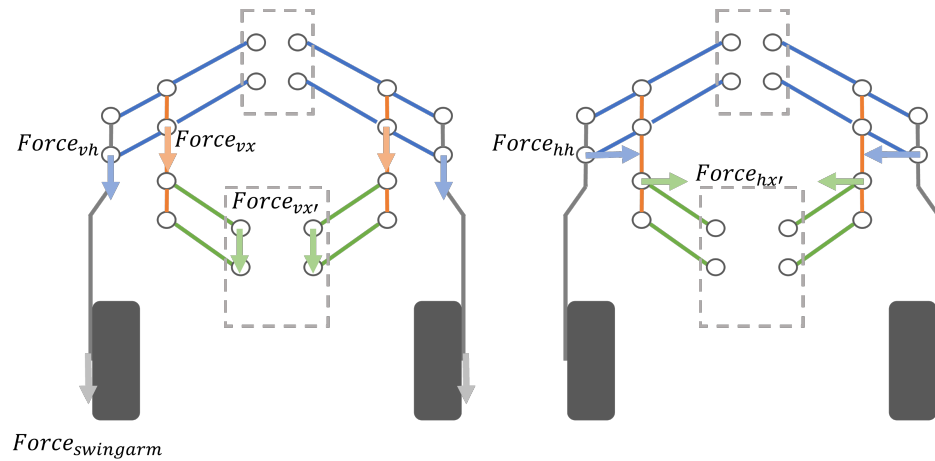


Fig. 5.5 Forces of tread.

$$Force_{swingarm} = Force_{hh} + Force_{vh} \tag{5.2}$$

トレッドリンク,シートサポートアーム,シートリンクにかかる力をそれぞれ $Force_{vh}, Force_{vx}, Force_{vx'}$ とする.また $Force_{vh}, Force_{vx}$ の比を $R_{tread}, Force_{vx}, Force_{vx'}$ の比を R_{seat} とする. Fig.5.3の左側のように変形前のトレッドリンクは黄色の矢印で示す車体進行方向と 90° 方向にある.この状態から角度変化することでトレッドが変化する.車体進行方向に対し 90° のときのトレッドリンクと変形した時のトレッドリンクがなす角度を θ とする.さらに微小変形したときの微小角度変化を $\Delta\theta$ とする.

またトレッドリンクと同様にシートリンクも変形前は車体中心方向に対し 90° 方向にある。車体進行方向に対し 90° のときのシートリンクと変形後のシートリンクがなす角を β とする。 θ と同様に変形が微小に進んだ時の微小角度を $\Delta\beta$ とする。

各リンクの移動距離を $Dist_{vh}Dist_{vx}Dist_{vx'}$ とする。4 章での R と同様に R_{tread} と R_{seat} を計算する。

$$\begin{aligned}
 R_{tread} &= \frac{Force_{vx}}{Force_{vh}} \\
 &= \frac{Dist_{vh}}{Dist_{vx}} \\
 &= \frac{h\{\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta\}}{x\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta} \\
 &= \frac{h\{\frac{\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta}{\Delta\theta}\}}{x\frac{\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta}{\Delta\theta}} \\
 &= \frac{h\{\sin(\theta)\}'}{x\{\sin(\theta)\}'} \\
 &= \frac{h}{x}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned}
 R_{seat} &= \frac{Force_{vx'}}{Force_{vx}} \\
 &= \frac{Dist_{vx}}{Dist_{vx'}} \\
 &= \frac{x\{\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta\}}{x'\sin(\beta+\Delta\theta)-\sin\beta} \\
 &= \frac{x\{\frac{\sin(\theta+\Delta\theta)-\sin\theta}{\Delta\theta}\}}{x'\frac{\sin(\beta+\Delta\theta)-\sin\beta}{\Delta\beta}} \\
 &= \frac{x\{\sin(\theta)\}'}{x'\{\sin(\beta)\}'} \\
 &= \frac{x\cos(\theta)}{x'\cos(\beta)}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$Dist_{hh}, Dist_{hx}, Dist_{hx'}$ をそれぞれの車体左右方向の移動距離とすると $Dist_{hx}, Dist_{hx'}$ は等しくなるため、以下の式が成り立つ。

$$Dist_{hx} = Dist_{hx'} \tag{5.5}$$

$$Dist_{hx} = x - x \cos \theta \tag{5.6}$$

$$Dist_{hx'} = x' - x' \cos \beta \quad (5.7)$$

$$x - x \cos \theta = x' - x' \cos \beta \quad (5.8)$$

以上の式から β を求めることができる.

$$\beta = \cos^{-1} 1 - \frac{x}{x'}(1 - \cos \theta) \quad (5.9)$$

トレッドリンク, シートリンクにかかる車体左右方向の力をそれぞれ $Force_{hh}, Force_{hx'}$ とする. この 2 つの力の比 $R_{horizontal}$ は以下の式で求められる.

$$\begin{aligned} R_{horizontal} &= \frac{Force_{hx'}}{Force_{hh}} \\ &= \frac{Dist_{hh}}{Dist_{hx'}} \\ &= \frac{h\{\cos(\theta+\Delta\theta)-\cos\theta\}}{x'\cos(\beta+\Delta\theta)-\cos\beta} \\ &= \frac{h\frac{\{\cos(\theta+\Delta\theta)-\cos\theta\}}{\Delta\theta}}{x'\frac{\cos(\beta+\Delta\beta)-\cos\beta}{\Delta\beta}} \\ &= \frac{h\{\cos(\theta)\}'}{x'\{\cos(\beta)\}'} \\ &= \frac{h \sin(\theta)}{x' \sin(\beta)} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Fig.5.6 は縦軸に力の比を表し, 横軸に変形の量を表す角度変化をとるグラフである. Fig.5.6 からすべての比が角度変化に対して 1 以上になることがわかる. これは変形が進むと常に力がかかる力点よりも作用点にかかる力の方が大きくなるということである. よってトレッドも変形可能であることが示される.

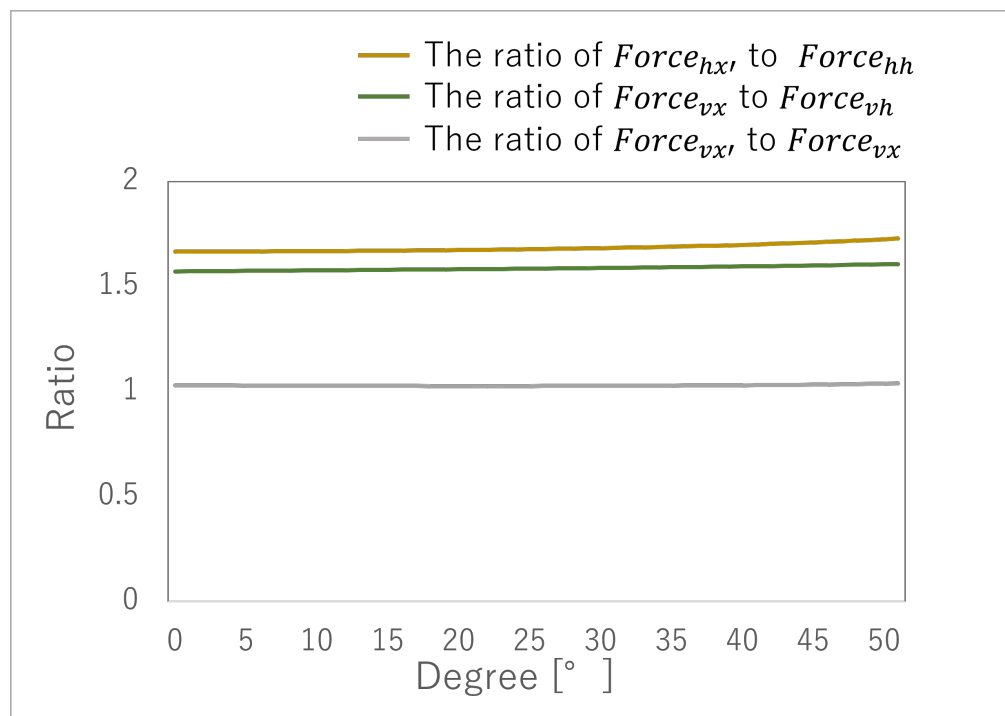


Fig. 5.6 The ratios of horizontal and vertical direction by each angle.

第 6 章

実験装置

6.1 3D モデル

Fig.6.1 は 3DCAD ソフト SOLIDWORKS で図面化した VDR の 3D モデルである。左側が低速形態時でホイールベースは 145mm, 横幅は 156mm, 高さは 177mm である。右側が高速形態でホイールベースは 265mm, 横幅は 132mm, 高さは 150mm である。図のように前輪はフロントフォーク, 後輪はスイングアームによって保持される。フロントフォークとスイングアームはステアリングシステムによって組み合わせられる。ホイールベースはステアリングシステムにある関節を中心として変化する。この関節を中心とすることでホイールベースをより大きくとることができ, 関節を開くだけなので変形としても容易である。

トレッドの構造はスイングアームとリンクから成り, リンクにより高速形態の座席が展開される。車体中心に配置されるステアリングシステムに付属する部品に組み合わせられるリンクの角度が変わることでトレッドを変化させる。前輪と後輪のインホイールモータの回転数の差動による力は車体進行方向にかかる。リンクの角度変化も車体進行方向に変化するため, 差動による力が伝わりやすい。

低速形態では立ち乗りを想定しており, 低速形態時の足を置く場所は後輪二輪の間に配置される。後輪二輪の車輪中心軸上に足があるため低速形態での移動でも違和感のない操作感

を実現する. 高速形態時では低速形態の足の置き場は折りたたまれ, 後輪二輪をより密着できるようにすることでよりバイクの形状に近づけ高速形態での操縦性の向上に繋げる. 高速形態時での足の置き場はトレッドが狭くなることで展開する円柱状の細いものに切り替わる. この形状が一般的なバイクにも採用される形状であり, よりバイクに近い操作感を実現する.

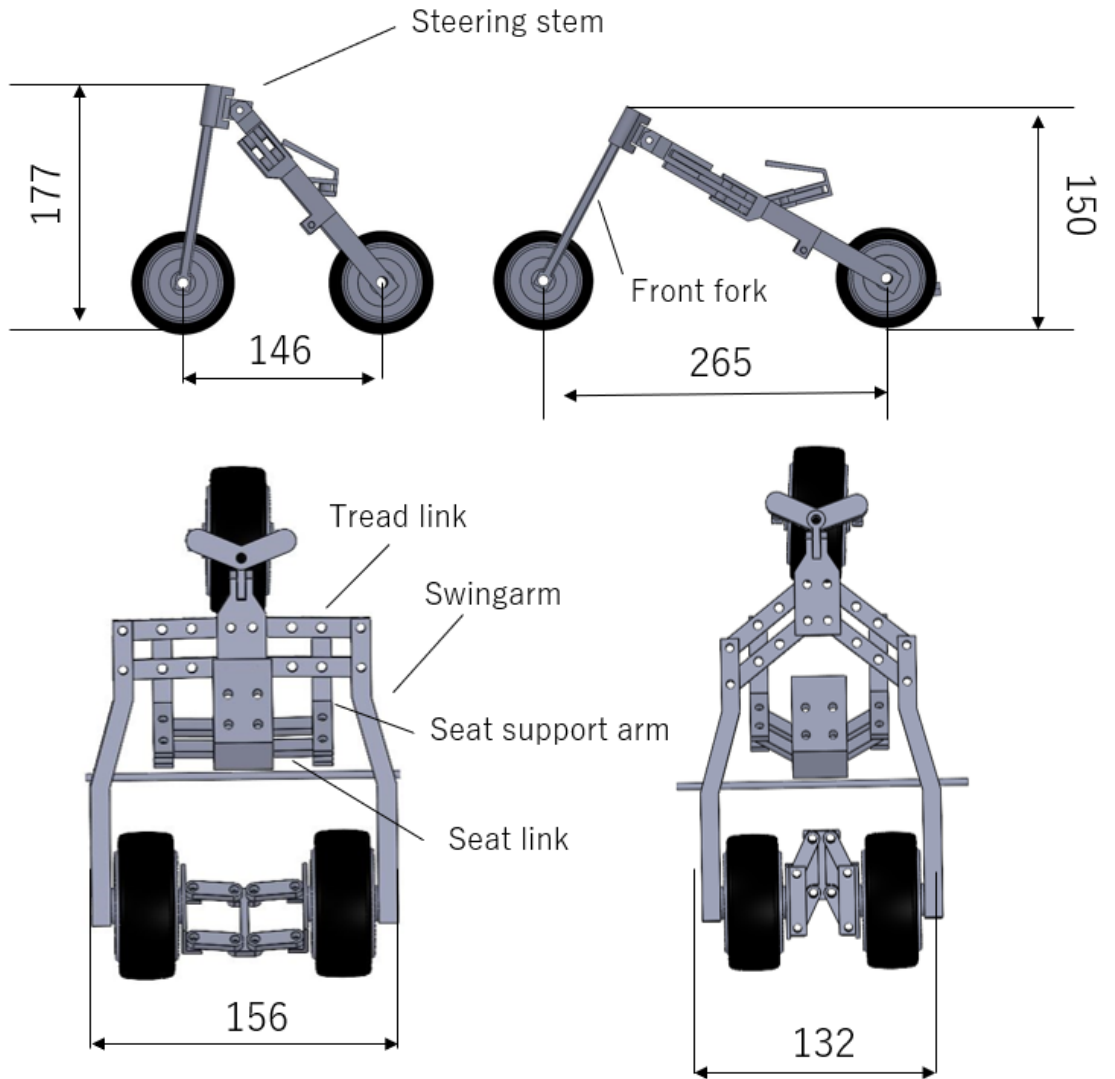


Fig. 6.1 The 3D model of VDR

6.2 1/5 スケールモデル

Fig.6.2 は FLASHFORGE 製の 3D プリンタ Dreamer である. この 3D プリンタを使い, 1/5 スケールモデルの VDR の模型を製作する. SOLIDWORKS の部品ファイルはそのまま 3D プリンタでは扱えないため, 一度 STL ファイルに変換する必要がある. 変換することで 3D プリンタのドライバーである Flash-Print(FLASHFORGE 製) で部品を扱うことができる. 使用材料は PLA 樹脂である. PLA 樹脂は寸法安定性に優れており, ABS など他の樹脂と比べ, 熱収縮がそこまで高くないため反りなどの不具合が起きにくく, モデルを安定して製作することができる特徴がある.

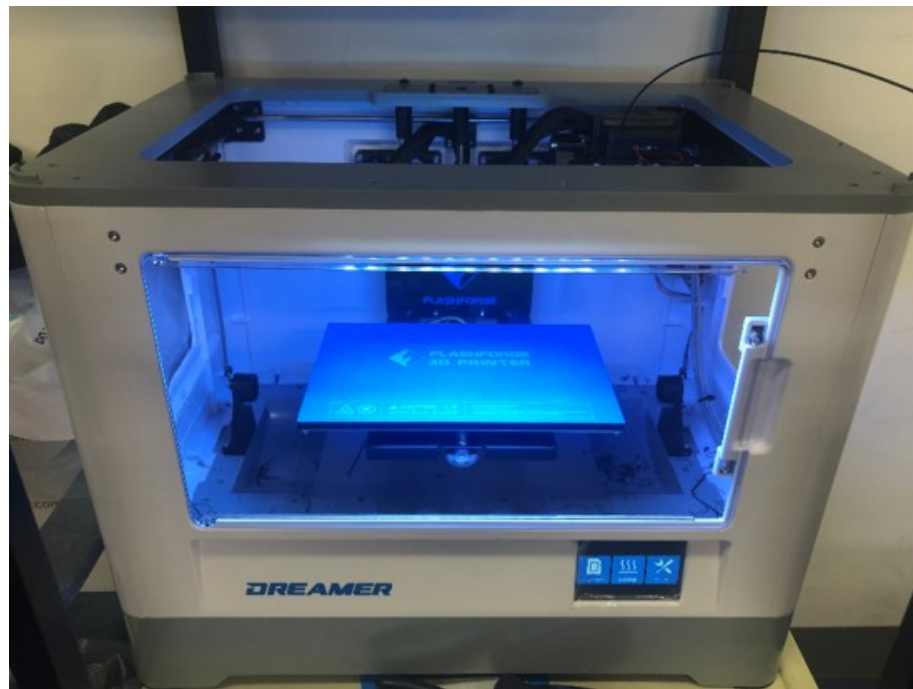


Fig. 6.2 Dreamer

Fig.6.3 に示すのが 1/5 スケールの VDR である. 車輪には一般的なキャスター用の車輪を使用している. 駆動部分である関節はボルトを通すことで組み合わされる. このモデルを使い変形するかどうかを検証する.

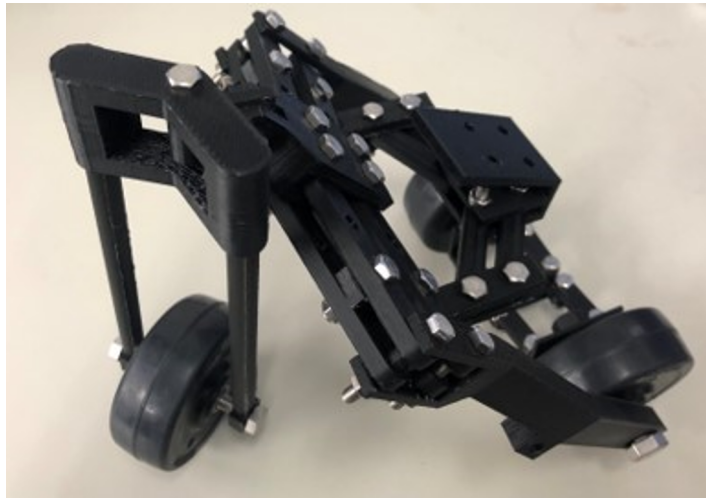


Fig. 6.3 1/5 scale model of VDR

Fig.6.4 と Fig.6.5 は実験の様子を示す. 前輪と後輪の回転数の差による力を想定する. 前輪, 後輪二輪ともに車輪中心軸上に対してタイヤの左右に糸をかける. この糸を車体進行 (図の左右方向) に引っ張ることで想定する力を模擬する.

実験は Fig.6.4 の低速形態から Fig.6.5 の高速形態への変形の検証である. 実験前の低速形態時の横幅は 155mm, ホイールベースは 145mm, 高さは 175mm であった. 実験後の高速形態時の模型の寸法は横幅は 134mm, ホイールベースは 285mm, 高さは 124mm であった. 低速形態から高速形態の変形で横幅は 21mm, ホイールベースは 140mm, 高さは 51mm の変化があった.

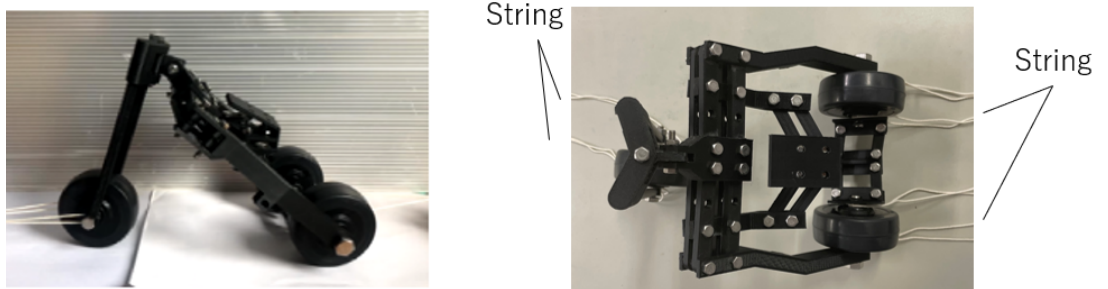


Fig. 6.4 Low velocity mode



Fig. 6.5 High velocity mode

6.3 四節リンク機構を採用する機体

第 4 章で取り上げている四節リンク機構を採用する機体について解説する. Fig.6.6 に示すのは四節リンク機構の変形を用いる機体の 3D モデルである.

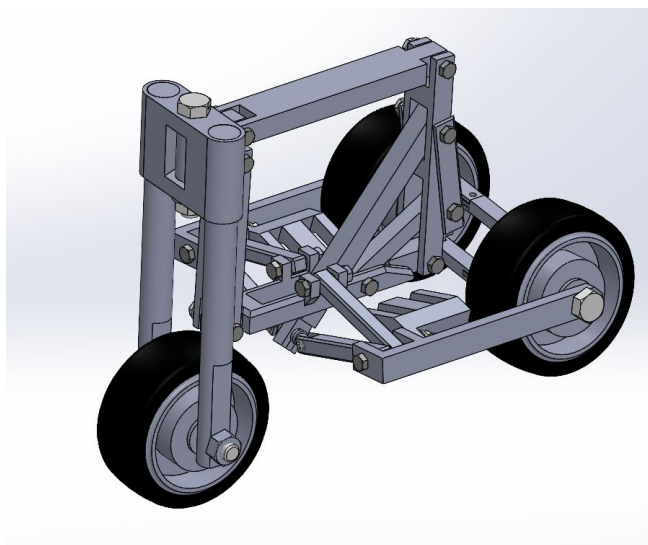


Fig. 6.6 The four-link mechanism of VDR.

四節リンク機構が長方形からひし形に変形することで各変形機構が動作する設計である。長方形からひし形になることでホイールベースを大きくする。ひし形になることにより四節リンクの各辺の距離が近くなることを活かし、トレッドも変化する機構を導入する。また高速形態時に使用する座席も展開する。Fig.6.7は3Dモデルを同様に3Dプリンタで出力した1/5スケールモデルである。



Fig. 6.7 1/5 scale model of VDR.

このモデルに対しても同様に想定される力を前輪と後輪にかける検証をする。Fig.6.8に示すのが四節リンクを採用するVDRの3Dモデルの高速形態と検証後の模型の高速形態である。

る. 左側に示すのが理想的な高速形態時の 3D モデルで, 四節リンクの二辺がなす角度が約 23° になるところで変形が完了する. 右側に示す検証後の模型の四節リンクのなす角度は約 46° であった.

3D モデルと模型がともに四節リンクの二辺がなす角が 90° から変形したとする. 角度変化を変形の進行割合と考えると 3D モデルと比べ, 模型の変形の進行割合は約 66% である.



Fig. 6.8 Comparison of 3Dmodel and 1/5 scale model.

変形が完全に完了しなかったのは, 四節リンクの二辺がなす角度の変化に伴い四節リンクを変形するのに必要な力が変わるためだと考えられる. Fig.6.9 は左から右にかけて角度変化が進行するときの四節リンクを示す.

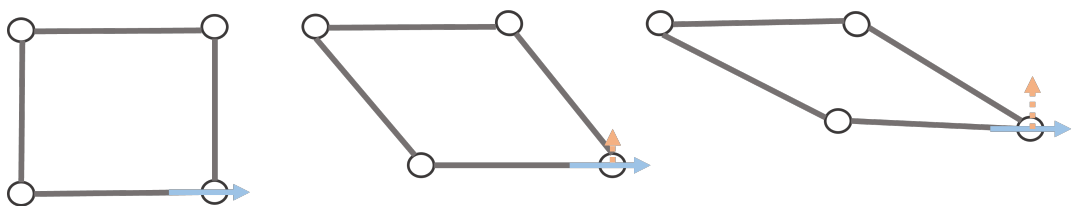


Fig. 6.9 Comparison of 3Dmodel and 1/5 scale model.

青色の矢印は設計したモデルにかかる力である. Fig.6.9 の真ん中に示す状態は検証で模型の変形が止まった時点を表すモデルである. Fig.6.9 の左図から真ん中の図までは青色で示す力だけで変形が可能とされるが, それ以上変形させようとするとリンク機構であるため角度

が変わり, Fig.6.9 の図に対して赤色で示す上向きの力が必要となる. しかし本設計では青色で示す前輪と後輪のモータの差動による力を想定しているため, 上向きの力は発生できない. よって模型の変形は途中で止まったと考える.

上記で示すように本設計の四節リンクという構造上, 角度変化により必要とされる力の向きが変化する. その向きに力を発生できないためモータの差動による力を大きくしても変形できない.

第 7 章

おわりに

低速形態と高速形態の 2 つの形態に相互変形可能な可変三輪移動体の開発という目的に対して、本論文では変形機構を取り扱った。この変形機構はリンクのみで構成されるため、力の方向を設定するのに難点があり、構造上、変形が進まなくなるという問題が起きる。この問題を回避するために、機構の力点・作用点に対して仕事に着目し、力関係を比にすることで変形できるかどうか確認した。比の計算から変形できることが確認されたのちに 1/5 スケールモデルの模型で実際に変形可能かどうか検証し、変形できることを確認できた。

本論文では変形という機能を実現させるため変形機構についてであるが、これは一部分にすぎない。VDR には様々な機能を持たせることを考えているため、その一つ一つの機能に対し研究が必要になることが考えられる。今後は実機設計から変形のためのインホイールモータの制御手法などを検討する必要がある。また本提案の VDR は自律移動させることを考えているため、自己位置推定のためのセンサの配置や手法なども研究の対象になる。

参考文献

- [1] Peng Zhang and Xinyuan Chen, "Internal Leakage Diagnosis of a Hydraulic Cylinder Based on Optimization DBN Using the CEEMDAN Technique", Hindawi, Shock and Vibration, Volume 2021, 2021
- [2] 姜 銀来, 李 文揚, 陳 鵬, 東郷 俊太, 横井 浩史, "モジュール化したワイヤ干渉駆動型ヒューマノイド・ロボットアーム", 日本ロボット学会誌, Vol7, pp.657-666, 2020
- [3] Inho Kim, Wonseok Jeon and Hyunseok Yang "Design of a transformable mobile robot for enhancing mobility", International Journal of Advanced Robotics Systems, 14-1, 2017
- [4] 山本 晃弘, 中村 亮介, 網野 梓, "二つの移動形態に変形可能な移動ロボットにおける変形制御システムの開発", 日本ロボット学会誌, Vol.38, No.9, pp.861-871, 2020
- [5] 昭和三十五年総理府令第六十号, 道路交通法施行規則, 第一章, 総則, 第一条
- [6] 内閣府告示第二百四十九号

謝辞

本研究を遂行するにあたり，ご指導ご鞭撻を賜りました知能ロボティクス研究室 松井博和先生に対して，深く感謝いたします．

本論文をまとめるにあたり，知能ロボティクス研究室 加藤典彦 准教授からご助言を頂き装置間の通信に成功しましたこと，謹んで感謝の意を表します．

本研究に際して，様々なご指導を頂きました知能ロボティクス研究室 矢野賢一 教授に対して深謝いたします．

また，本研究を進めるにあたり，知能ロボティクス研究室の諸氏の感謝いたします．