

厚生労働科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）
（分担）研究報告書

広域歩行支援装置の柔軟な操作性に関する研究

Ⅱ－１ 歩行支援機における段差乗り越え装置及び操舵装置に関する研究

（分担）研究者 古川 修 芝浦工業大学

研究要旨

広域歩行者支援装置の実用化に向けた研究において、本研究では段差乗り越え装置及び操舵装置に関する検討を行っている。現状の歩行器では静止状態から10mm程度の段差も乗り越すことができず、使用者は歩行器を持ち上げて段差を乗り越えるという状況にある。筋力がある程度ある使用者であればそのようなことは可能であるが、筋力の衰えている高齢者にとって機器を持ち上げることは困難である。新たな歩行支援機には段差の乗り越し機能は必須であるため、検討を行ったものである。また、同様に、柔軟な操作性を実現する上で、操舵装置の検討は非常に重要なものとなってくる。使用者が高齢者であることを考えると、単純に機能だけを追及すればいいというものではなく、いかに違和感なくスムーズに操作でき、かつ、いかに扱いやすい機器にするかはこの操舵装置にかかっている。したがって、そのようなことを踏まえた上で、本研究において操舵装置についても検討を行っている。

A. 研究目的

福祉移動機器にとって段差を安定して乗り越すことは非常に重要な機能である。芝浦工業大学大宮校舎の半径1km以内について調査したところ、図A1のような分布で段差があることが判明した。

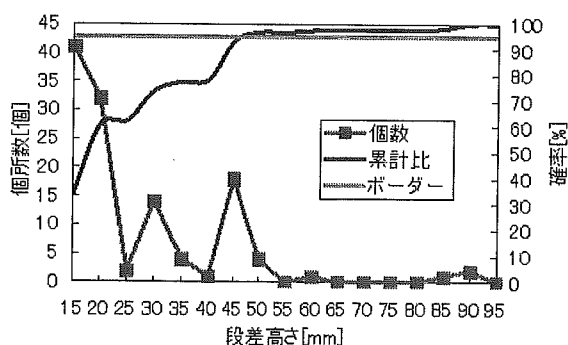


図 A1 段差の高さ分布

歩行支援装置を屋外・屋内問わず、広域で使用することを考えたとき、段差を乗り越すことができなければ大幅に行動範囲を狭めてしまうことにつながる。したがって、開発する歩行支援装置に段差乗り越すことができるよう

にするのが本研究のひとつの目的である。

また、段差乗り越しの機能と同様に、操舵機能も非常に重要である。街中での使用を想定した場合、安定性と旋回性を両立しなければ、高齢者には扱えないものになってしまう。そこで操舵装置の検討を行うのも、もう一つの本研究の目的である。

B. 研究方法

研究方法として、段差乗り越し・操舵機能を実現する装置を提案し、その装置の力学的モデルを作成し、シミュレーションをすることによりどのような挙動を示すか比較するという方式で検討している。また、検討したシミュレーション結果を元に試作機を製作し、それを評価した上で実際の歩行支援機に取り付ける装置を製作するという流れで研究を行う。

C. 結果と考察

段差乗り越しに関して、50mmの段差乗り越えを想定したときのタイヤの大きさとその力関

係を図 C1 に、段差乗り越し装置の提案について図 C2 を示す。

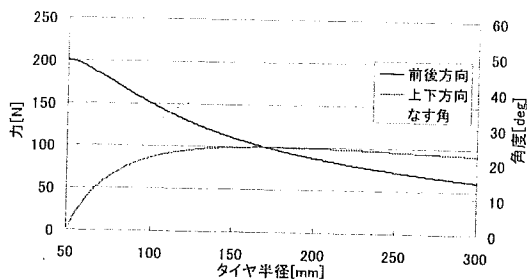


図 C1 前後方向と上下方向の力関係

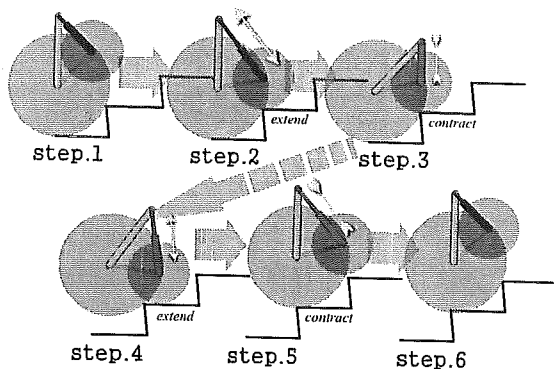


図 C2 段差乗り越し装置の提案

段差乗り越しに関し、製作しようとしている機器で考えた場合、タイヤ半径は 85[mm]以上にすればいいことがわかった。段差乗り越し装置に関してもシミュレーションにより、ひとつの方式を検討することができた。

また、操舵装置に関して検討した結果、操舵方法としては、前輪のみを操舵する方式とし、4 輪操舵は行わないという結論に至った。操舵装置に関しては、図 C3 のような第 3 輪方式と図 C4 のような条件式傾斜キャスタに関して検討を行った。第 3 輪方式は、前輪タイヤ間の中心に直進時には接地していない新たな車輪(第 3 輪)を配置し、ハンドル操作によって前輪を浮かせ旋回する方式で、ステアリング方式などと組み合わせて使用する。この方式により従来の方式の自転、公転に関する負荷よりも小さな負荷で自転、公転が可能となるというものである。

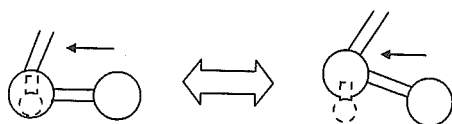


図 C3 第 3 輪方式

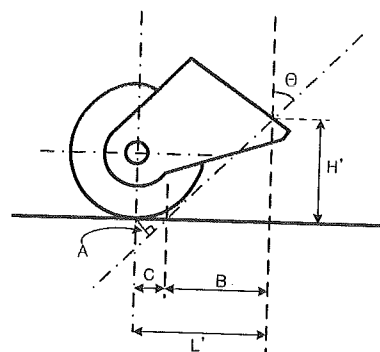


図 C4 傾斜キャスター

傾斜キャスターは車輪が使用者の進行方向とは異なる方向に向いてしまうことを解消するために、キャスター旋回軸の傾斜角度を制御することで、従来の自在キャスターと同様に高い旋回性を維持しつつ、直線性を向上させるための装置である。

これらの操舵装置はそれぞれ一長一短があるために、ステアリング方式と第 3 輪方式などの組み合わせによる使用なども含めた、より深い検討をしていく必要がある。

D. 考察・結論

歩行支援機における段差乗り越し装置及び操舵装置に関して検討を行ったが、検討段階ではあるものの、各装置の提案をし、それに関して力学的モデルの作成及びシミュレーションを行うことができた。今後はこれらの研究をベースとしてより細かな検討を行い、シミュレーションを繰り返した上で試作機を製作していく。

E. 研究発表

- 1) 那須 洋介, 桜井 南平, 岡本 俊輔, 岡村 宏, 古川 修: 歩行支援機の段差乗り越し機能に関する研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2005 論文集
- 2) 古川 修, 櫻井 隆太, 和田 卓士: 倒立伸子制御を応用した超コンパクトモビリティの研究, 関東支部ブロック講演会前刷集, 日本機械学会, 2005
- 3) 戸井田 直行, 古川 修: 倒立振り子制御を応用した超コンパクト荷物運搬支援カートの研究, 第 13 回交通・物流部門大会前刷集, 日本機械学会, 2005

F. 知的財産兼の出願・登録状況
なし

以上

(資料) 分担研究報告詳細 ー古川 修 (芝浦工業大学教授) ー

厚生労働科学研究費補助金 (長寿科学総合研究事業)
(分担) 研究報告書
広域歩行支援装置の柔軟な操作性に関する研究

Ⅱー1 歩行支援機における段差乗越え装置及び操舵装置に関する研究

(分担) 研究者 古川 修 芝浦工業大学教授

ー目次ー

1. 段差乗り越し機能について
 - 1.1 段差分布調査
 - 1.2 段差乗り越しについて
 - 1.3 段差乗り越し装置の検討
 - 1.3.1 緒言
 - 1.3.2 基本構想
 - 1.3.2.1 機能要件
 - 1.3.2.2 機器構成
 - 1.3.3 階段昇降方法の検討
 - 1.3.4 システム構成
 - 1.3.5 倒立カートのモデル化
 - 1.3.6 シミュレーション
 - 1.3.7 結言
2. 操舵方法について
 - 2.1 自転と公転について
 - 2.2 前輪系の設計候補
 - 2.2.1 第3輪方式
 - 2.2.2 条件式傾斜キャスト
 - 2.3 前輪系設計案の比較とまとめ
3. まとめ

1. 段差乗り越し機能に関して

1.1 段差分布調査

福祉移動機器にとって段差を安定して乗り越すことは非常に重要な機能である。この機能について考えるために実際の道路に、どのように段差が分布しているのかを把握する必要がある。そこで芝浦工業大学大宮校舎のまわりの日常生活道路について調査を行うことにした。

- ・方法 実際には現状のシルバーカーを使用して、日常生活道路を歩行し、その際に発見した段差の高さと個所数を記録する。
- ・調査範囲 芝浦工業大学大宮校舎の半径 1km 以内とする。また調査経路は 2 つのルートで行う。

図 1.1 は調査中に実際に道路で撮影した高さ約 40[mm]の段差である。この段差は歩道と車道の境目のところである。このように外出する際に必ず克服しなければならない大きな段差は意外にも多く存在した。

また 30[mm]以上の段差は図 1.1 と同じように歩道と車道の境目のところに多くあった。このことから、車道と歩道を行き来するには最低でも 30[mm]以上の段差は乗り越えなければならないと考える。

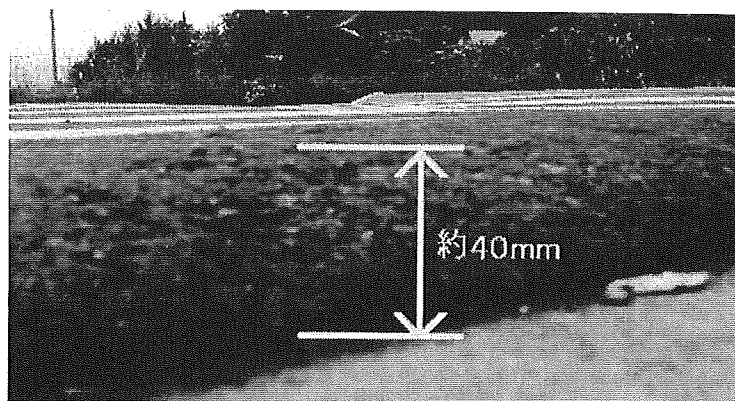


図 1.1 道路における段差の一例

調査結果は次のとおりである。なお、グラフの個所数は 2 つのルートの段差個所数を足し合わせたものである

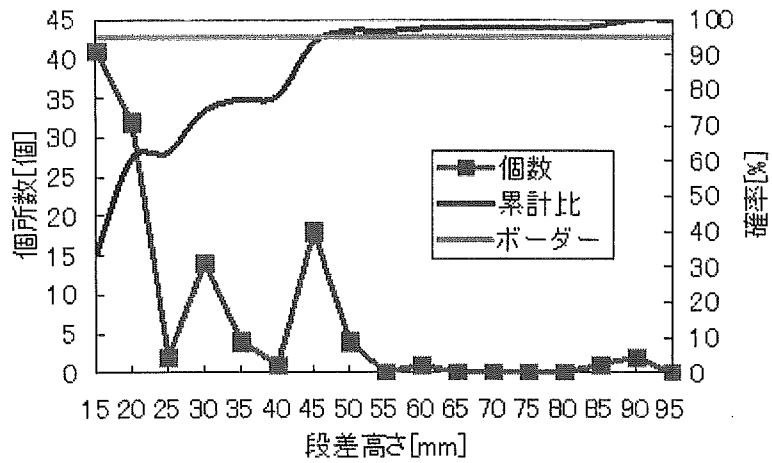


図 1.2 段差分布調査結果

このグラフにおける段差の個所数と高さの累計比を取り、信頼区間 95%とすると、50mmの段差をクリアできれば日常生活道路における段差のほとんどがクリアできる。

1.2 段差乗り越しについて

段差分布調査を行い、50[mm]の段差乗り越しを目標とすることにした。そこで 50[mm]の段差を乗り越すために必要な車輪の径を求める。

図 1.3 のようにタイヤが段差を乗越そうとするとき、タイヤは抗力 F を受ける。抗力 F は、タイヤの中心方向とタイヤの接線方向に分けられる。

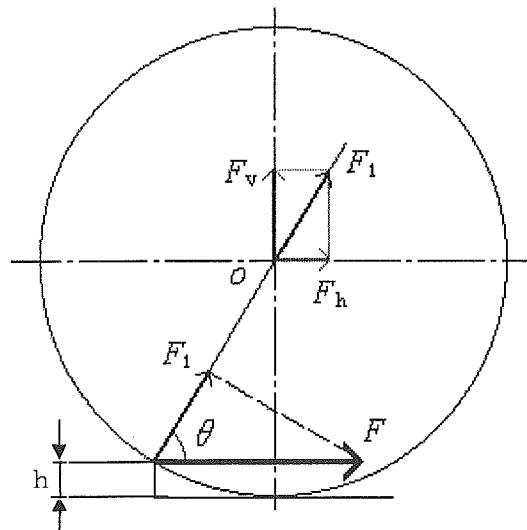


図 1.3 段差に衝突した際の力の伝達

このタイヤ中心方向の分力の大きさは、

$$F_1 = F \cos \theta \quad \dots (1.1)$$

である。さらに、タイヤ中心において F_1 を前後、上下方向に分ける。
前後方向の分力は

$$F_h = F \cos^2 \theta \quad \dots (1.2)$$

であり、上下方向の分力は

$$F_v = \frac{1}{2} F \sin 2\theta \quad \dots (1.3)$$

である。段差の大きさを h として θ は

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{r-h}{r} \right) \quad \dots (1.4)$$

で表される。

ここで、段差乗り越しのアシストや、旋回時のアシストのために後輪に取り付けるモータは約 100[N] のアシスト力を出せるようにしていることになっているので、後輪モータからのアシスト力を 100[N] とする。また、使用者が自らの力で機器を押す力は共同研究者の実験により約 100[N] であることがわかった。よって、 $F=200$ [N] とする。また、段差分布調査により乗り越すべき段差高さ $h=50$ [mm]、としたのでそれらの値を用い、タイヤ半径 r を求めてみる。

図 1.4 のグラフは式(1.2), (1.3)に $h=50$, $F=200$ を代入したものである。

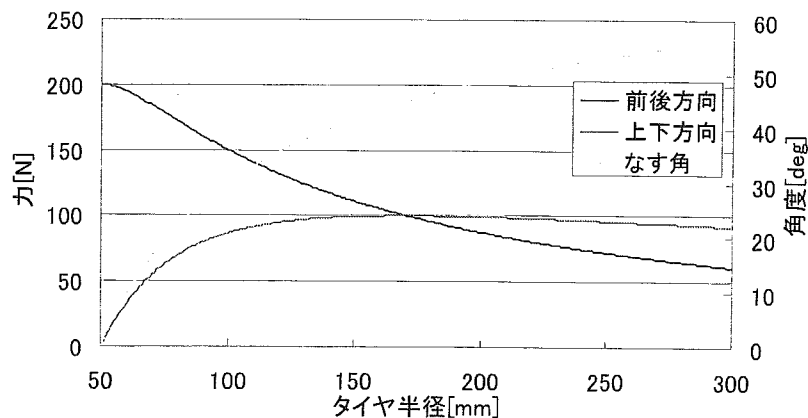


図 1.4 前後方向と上下方向の力の関係

今回、我々が製作しようとしている機器はバッテリーなどすべて含めた重量の目標を 15[kg]としている。その機器の重量の前輪負担分を 7.5[kgf]とすると、図 1.4 における上下方向の力は 7.5[kgf]つまり 75[N]以上の力を発揮しないと 50[mm]の段差は乗り越せないことになる。そこで、初めて上下方向の力が 75[N]を超えるタイヤ半径を表 1.1 にまとめる。

表 1.1 上下方向の力が 75[N]を超えるタイヤ半径

タイヤ半径[mm]	上下方向の力[N]
85	75.0
86	76.0
87	77.0
88	77.9
89	78.8
90	79.6

この表からタイヤ半径は 85[mm]以上にすればよいことがわかった。

1.3 段差乗り越し装置の検討

高さが一定以上の段差乗り越しに関しては、何らかの装置が必要となってくる。そこで、段差乗り越し装置の一例として、倒立振り子制御を利用した荷物運搬支援カートの開発について述べる。この装置を歩行支援装置に応用するものとして想定している。

1.3.1 緒言

従来の手動キャリアカート（図 1.5 参照）は動力がなく、タイヤが小さいものが多い。これらは凹凸の激しい路面や、段差のある場所において使用の際、牽引が困難になる。また階段では車輪を用いた連続牽引が不可能となり、持ち上げて運ぶことが必要となる。

倒立振り子の制御理論を利用し、牽引者の負担を大幅に削減するキャリアカートの開発。キャリアカートには階段を昇降する機能を持たせる。（以下、倒立振り子制御を利用した荷物運搬支援カートを倒立カートと呼ぶ。）

倒立振り子制御による安定化と、使用者の牽引操作に対する追従性を確保する制御系設計、システム開発を行う。

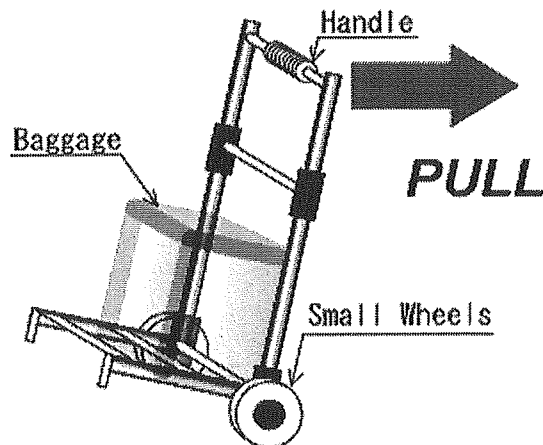


図 1.5 従来型のキャリアカート

1.3.2 基本構想

1.3.2.1 機能要件

- ・許容運搬重量： 30[kg]
- ・人間の歩行を安定追従可能である。
- ・最小限のアクチュエータとセンサを用いる。
- ・カートの大きさの上限（運搬物搭載時の寸法）

幅 400[mm]×高さ 800[mm]×全長 600[mm]

上記の条件付けは倒立カートを生活のなかで使用することを考慮したものである。許容重量は小さな子供を運搬できることを基準にした。倒立カートは手軽に扱えるコンパクトであるものでなければならない。このため、倒立カートは制御に必要な最小限のセンサと、駆動するために最小限のアクチュエータとそのパワー源で構成するものとする。

1.3.2.2 機器構成

姿勢制御センサとしてジャイロセンサ、タイヤ駆動用の主アクチュエータとして DC モータを採用した。搭載するパワー源として鉛蓄電池を考えている。

ハンドル部分には方向判別に用いるポテンショメータ、使用者の引張り力を検出する歪ゲージを用いることにする。

1.3.3 階段昇降方法の検討

階段昇降動作は2つの動作の組み合わせで行われ、図 1.6 にその様子を示す。

倒立カートに階段昇降させるにあたって、具体的目標として設定した階段の仕様を図 1.7 に示す。

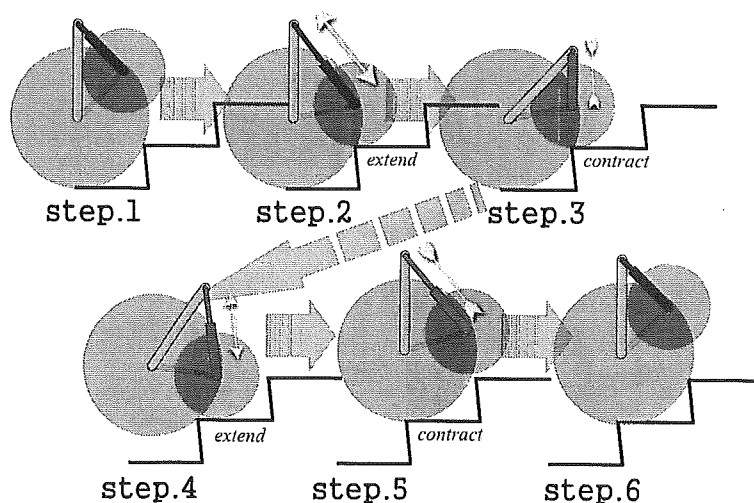


図 1.6 階段昇降の様子

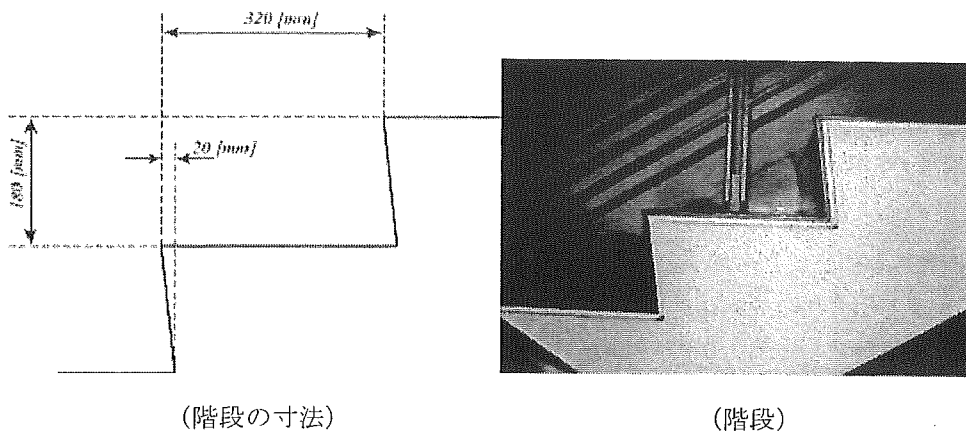


図 1.7 大学内の階段

1.3.4 システム構成

図 1.8 にシステム構成を示す。

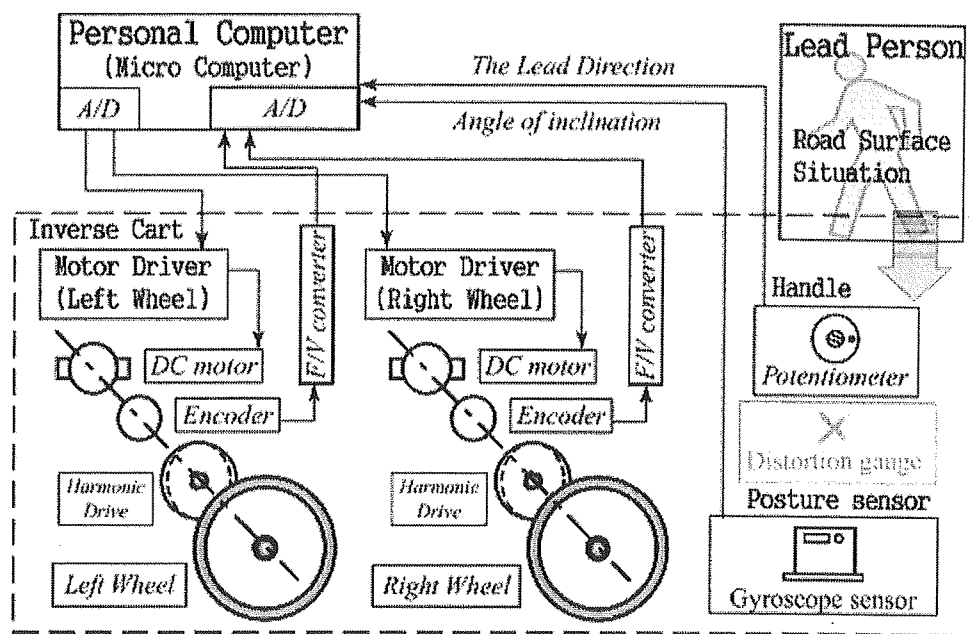


図 1.8 システム構成

1.3.5 倒立カートのモデル化

図 1.9 に倒立カートの力学モデルとパラメータを示す。シミュレーションを行うためにラグランジュ運動方程式を使用しモデリングを行った。導出した運動方程式は以下のとおりである。

$$\begin{cases} MrL_M\ddot{\theta} + (ML_M^2 + J_M)\dot{\phi} + \mu_M\dot{\phi} + MgL_M\phi = u_\phi \\ Mr^2\ddot{\theta} + MrL_M\dot{\phi} + (m_W r^2 + J_W + \mu_W)\dot{\theta} = u_\theta \end{cases} \quad \dots(1.5)$$

式を簡略化するために上式を以下のような係数を用いとめる。ここで、

$$D = M^2 r^2 L_M^2 - Mr^2 (J_M + ML_M^2)$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= Mr^2\mu_M/D, & a_2 &= -MrL_M(J_W + r^2m_W + \mu_W)/D, & a_3 &= gM^2r^2L_M/D, \\
 a_4 &= MrL_M\mu_M/D, & a_5 &= (J_M + ML_M^2)(J_W + r^2m_W + \mu_W)/D, & a_6 &= gM^2rL_M^2/D, \\
 b_1 &= Mr^2 + MrL_M/D, & b_2 &= -J_M - MrL_M - ML_M^2/D
 \end{aligned}$$

また、慣性力の関係から上式の入力部分を

$$u_\phi = -u_\theta = u$$

とし、式をまとめると以下のようなになる。

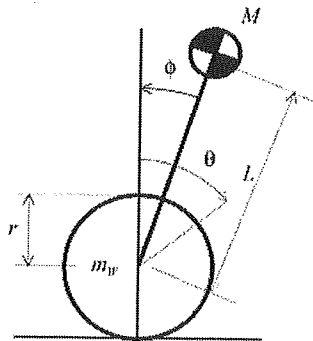
$$\begin{cases} \ddot{\phi} = a_1\dot{\phi} + a_2\dot{\theta} + a_3\phi + b_1u_\theta \\ \ddot{\theta} = a_4\dot{\phi} + a_5\dot{\theta} + a_6\phi + b_2u_\theta \end{cases} \quad \dots(1.6)$$

ここで、制御入力 u は車輪駆動トルク τ とし、 $u = \tau$ の関係とする。上式を状態変数表示にまとめると以下の関係式になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & 0 & a_2 & a_3 \\ a_4 & 0 & a_5 & a_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u_\theta \quad \dots(1.7)$$

また、駆動ベクトルは以下の式とする。

$$\mathbf{x} = (\phi \quad \theta \quad \dot{\phi} \quad \dot{\theta})^T \quad \dots(1.8)$$



- m_W [kg] : Mass of Wheel
- M [kg] : Mass of Load and Body
- L_M [m] : Length to Gravity Point of M and Shaft
- r [m] : Radius of Wheel
- J_M [kg · m²] : Inertia of Load and Body
- J_W [kg · m²] : Inertia of Wheel
- μ_M : Friction of Body
- μ_W : Friction of Wheel

図 1.9 力学モデルとパラメータ

1.3.6 シミュレーション

1.3.6.1 歩行の追従

図 1.11, 1.13 は倒立カート牽引者の軌跡である。グラフのように歩行したときの倒立カートの姿勢を PID 制御しシミュレーションした。

制御系 : $u(t) = K_p\phi + K_i \int \phi dt + K_D \frac{d\phi}{dt}$

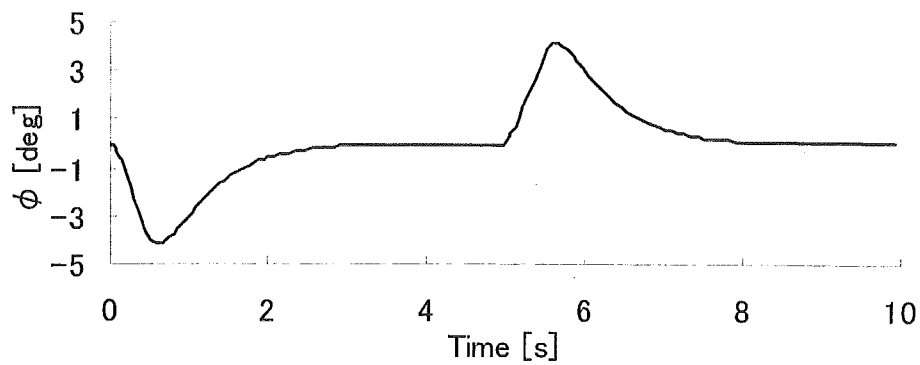


図 1.10 倒立カートの姿勢

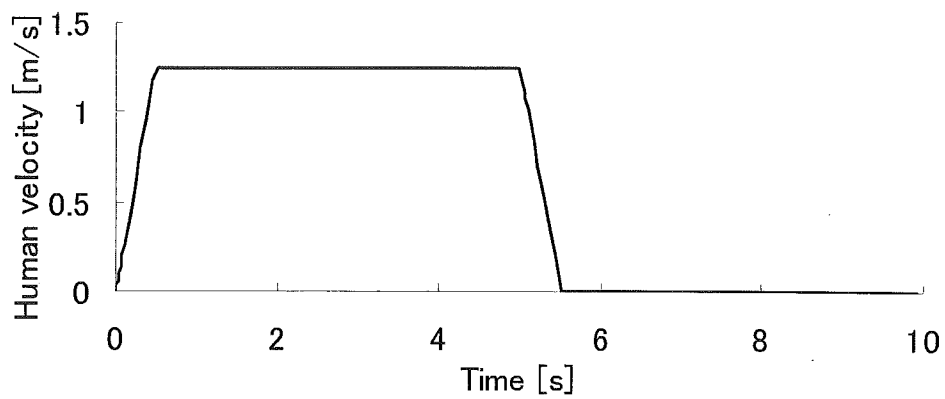


図 1.11 使用者の速度変化

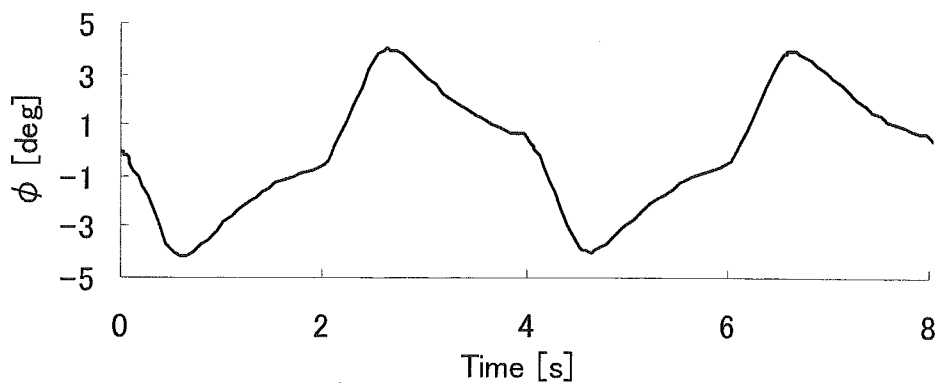


図 1.12 倒立カートの姿勢

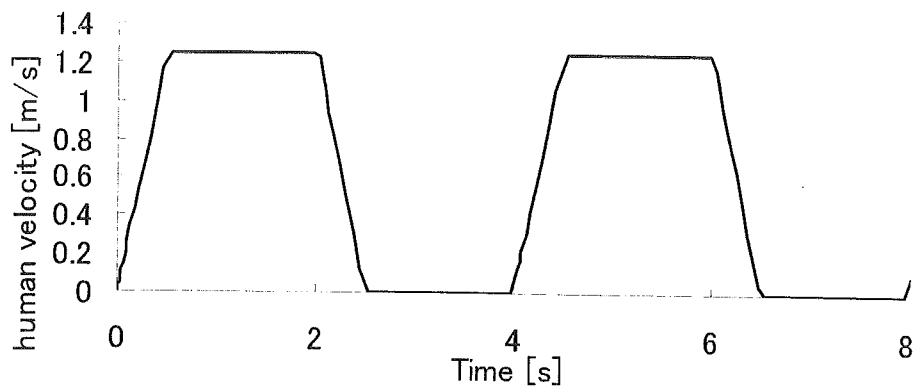


図 1.13 使用者の速度変化

1.3.7 結言

シミュレーション結果より，倒立カートの姿勢は，人間による外乱の後 3 秒程度でほぼ直立にもどることが確認できる．歩行と停止を 2 秒ごとに繰り返した場合，カートの姿勢は 0 度に落ち着かないが，転倒する結果は出なかった．シミュレーションでは人間の直線歩行に追従する制御が確立できた．今後実験機を完成させ歩行追従実験を行う．階段昇降時の倒立カートの動きをシミュレート・階段昇降機能を付加した実験機の作成へ移行する．

また，その結果を踏まえた上で歩行支援機への採用を検討する．

2. 操舵装置に関して

2.1 自転と公転について

自転とは使用者の付近を中心に旋回することで，公転とはある点を回転中心として旋回する，左折や右折のことである．従来のキャスタ方式ではキャスタの挙動の不安定さゆえ，自転や公転がうまくできない場合があった．また，狭い場所（エレベータの中など）や人ごみの中での自転可能かそうでないかは使用者にとって非常に重要な問題である．使用者は高齢者なので力が弱い場合が多い．そのため従来の方式では力不足ゆえ，うまく自転できないという問題もある．また，2.2 で説明していく各設計の候補はすべて，自転の際には後輪に取り付けたモータをそれぞれ逆転させることで自転を行うこととする．

自転，公転の動作を行うものとしての候補は前輪のみを操舵するものと，4 輪すべてを操舵するものとに分けられる．

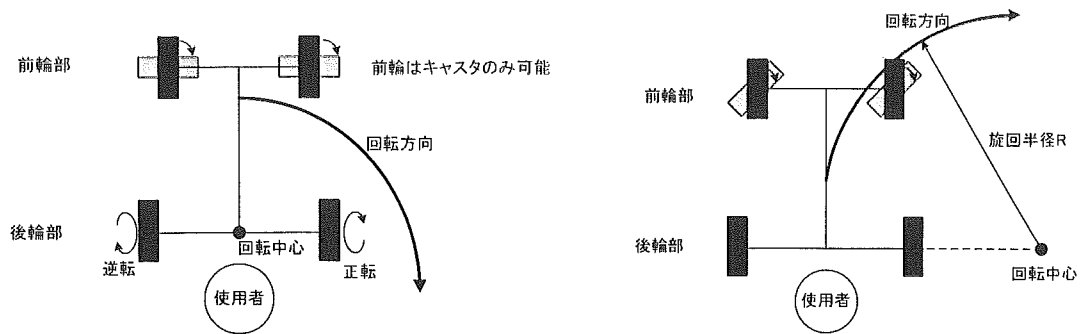


図 2.1 前輪のみ操舵可能な場合の自転と公転

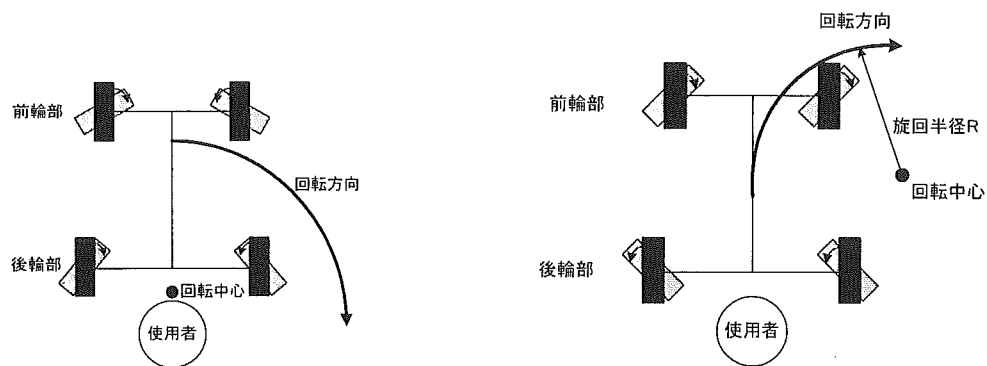


図 2.2 4輪操舵の場合の自転と公転

図 2.1 の前輪のみの操舵式では公転の旋回半径が 4 輪操舵方式よりも大きいですが、機構が簡便であるという長所がある。ここで公転の旋回半径について、前輪操舵(以下 2WS)と 4 輪操舵方式(以下 4WS)の場合を比較する。

条件(1) フレーム部との干渉を避けるために操舵角 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ の最大値は $45[\text{deg}]$ とする。

条件(2) 最小回転半径は比較を容易にするために、回転中心位置から車体中心位置までの距離とする。

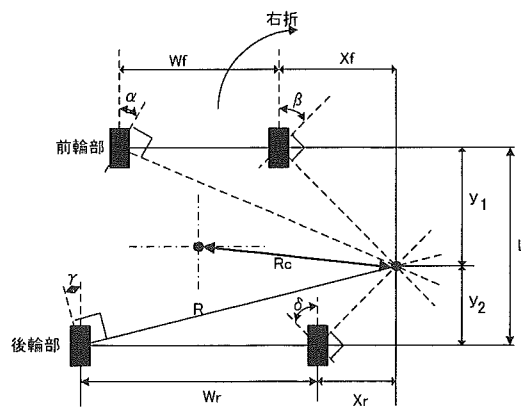


図 2.3 4WS の場合の各寸法

図 2.3 において各寸法は簡易移動支援デバイスの寸法の目標である。

ホイールベース $L=500[\text{mm}]$

前輪トレッド $W_f=400[\text{mm}]$

後輪トレッド $W_r=600[\text{mm}]$

x_f, x_r, y_1, y_2 はある回転中心までの位置とする。

また、4WS方式の有効性の検討に用いた式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{y_1}{T_f + x_f} \\ \tan \beta &= \frac{y_1}{x_f} \\ \tan \gamma &= \frac{y_2}{T_r + x_r} \\ \tan \delta &= \frac{y_2}{x_r} \\ R &= \frac{y_2}{\sin \gamma} \quad \text{もしくは} \quad R = \frac{y_1}{\sin \alpha} \end{aligned} \right\} \dots(2.1)$$

まず 2WS 方式時の最小旋回半径を求める。2WS 方式時は

$$\gamma = \delta = 0[\text{deg}]$$

である。条件(1)より

$$\beta = 45[\text{deg}]$$

であるとすると、 β に関する式より

$$y_1 / x_f = 1$$

2WS なので

$$y_1 = L = 500[\text{mm}]$$

よって

$$x_f = 500[\text{mm}]$$

α に関する式に x_f, y_1 を代入することにより α は求まり、

$$\alpha = 29.05[\text{deg}]$$

よって回転半径 R は

$$R = 1.03[\text{m}]$$

車体の中心までの回転半径

$$R_c = 0.84[\text{m}]$$

この時の R_c を基準とし、その時の回転中心位置を点Bとする。また、車体中心位置を点Aとおく。

旋回半径は回転中心位置で決まる。4WS方式が2WS方式の旋回半径より小さくなる時の回転中心位置の範囲を求めることにする。前輪・後輪のそれぞれについて操舵角がより大きくなるのは内側のタイヤであるので、 $\beta = \gamma = 45[\text{deg}]$ とし、操舵角を持った車輪の進行

方向に対して垂直方向に線分を描く。それと同時に車体中心 A を中心とし、半径を AB とする円弧を描いた図が図 2.4 である。

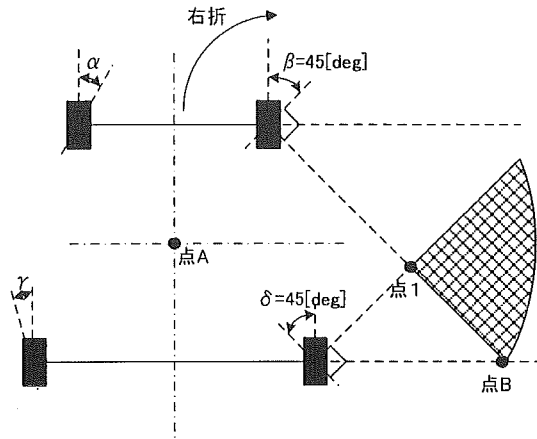


図 2.4 4WS が有効となる回転中心の範囲

図 2.4 のハッチング部に回転中心とることのできる機構であれば、4WS 方式は有効であるといえる。また、その中でも最も旋回半径が小さくなるのは回転中心を点 1 に取った場合で、その時の各操舵角は次の表の通りである。

表 2.1 旋回半径が最小となる操舵角

操舵角	[deg]
α	23.1
β	45
γ	14.0
δ	45

表 2.1 より 4WS 時の旋回半径がわかり、その値は

$$R_c = 0.53[m]$$

先に求めた 2WS 時の旋回半径と 4WS 時の旋回半径より 4WS の有効性がわかり、表にまとめると

表 2.2 2WS と 4WS の最小半径の比較

2WS時の最小旋回半径 R_{2WS} [m]	0.82
4WS時の最小旋回半径 R_{4WS} [m]	0.53
$(R_{4WS} / R_{2WS}) \times 100[\%]$	64.5

のようになり、4WS 方式にすることで旋回半径を最大で 64.5%程度に抑える事ができる。

自転についてはどちらの場合にも可能であるが、4WS 方式では機構が複雑になってしまうという欠点がある。

以上の結果を表 2.3 にまとめる。

表 2.3 前輪操舵と 4 輪操舵の特徴比較

	自転	公転	機構のシンプルさ
前輪操舵	○	△	○
4 輪操舵	○	○	×

今回の研究では自転と機構の簡素さを重視し、モータ取り付けの関係からも後輪は固定方式にすべきであると考えている。よって今後、設計していく足回り系は前輪操舵可能方式とする。

2.2 前輪系の設計候補

段差乗り越しが容易にでき、かつ、旋回性のよい前輪系の設計候補として次に示す 4 つの候補が挙げられる。

- (1) キャスタ
- (2) ステアリング
- (3) ステアリング+第 3 輪方式
- (4) 条件式傾斜キャスタ

以上のもののうち(1)キャスタは現在、福祉移動機器で最も一般的に使用されているタイプである。(2)ステアリングは自転車のようにハンドル操作により前輪を操舵し旋回するタイプである。(3)第 3 輪方式と(4)条件式傾斜キャスタについては次の項以降説明する。

2.2.1 第 3 輪方式

前輪タイヤ間の中心に直進時には接地していない新たな車輪(第 3 輪)を配置し、ハンドル操作によって前輪を浮かせ旋回する方式で、ステアリング方式などと組み合わせて使用する。この方式により従来の方式の自転、公転に関する負荷よりも小さな負荷で自転、公転が可能となる。

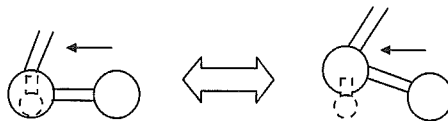


図 2.5 第 3 輪方式のイメージ

しかしながらこの方式で自転をする時の動作の流れは、一旦停止し、ハンドル等の操作により第 3 輪を出し、前輪部の 2 輪を浮かせ、自転するという方法をとらなければならないのでフィーリングに問題がある可能性がある。

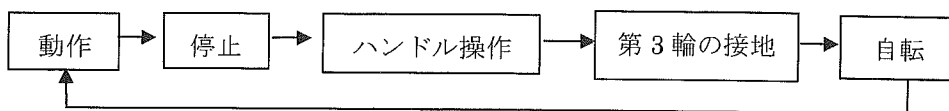


図 2.6 第 3 輪使用時の動作の流れ

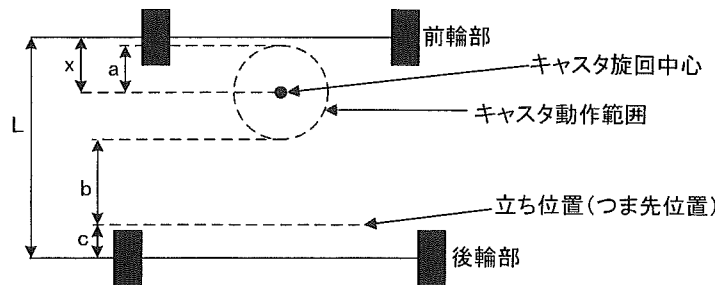
第3輪方式では制御が複雑になるという問題点と、段差乗り越しの際に第3輪が段差に衝突してしまう可能性がある。

なお、第3輪に関しては自在キャスタもしくは、固定キャスタのどちらかが考えられるが、自在キャスタを採用した場合、自在キャスタの動作範囲の問題から、使用者の脚部と干渉する可能性がある。干渉しないようにするには以下の条件を満たす必要がある。

図2.7において

$$b < L - x - a - c$$

ならば、キャスタと脚部が干渉することはない。



- x: 前輪の中心軸からキャスタ旋回中心までの距離
- a: キャスタの動作範囲の先端
- b: つま先位置からキャスタ動作範囲の先端までの距離
- c: 後輪の中心軸からつま先位置までの距離
- L: ホイールベース長

図 2.7 第3輪が使用者と干渉しない範囲

2.2.2 条件式傾斜キャスタ

表 2.4 に従来のキャスタと条件式傾斜キャスタの特徴をまとめる。

表 2.4 従来のキャスタと条件式傾斜キャスタの特徴

		通常のキャスター	傾斜させたキャスター
長所	①	ハンドル操作なしで進路変更が可能(操作が容易)	I 直進性が通常使用時と比べて向上する(キャスターの短所①の克服)
	②	操作の「慣れ」を必要としない	II 重心が後ろにあるのでキャスターの短所②が起らない III キャスターの短所③の心配がない
短所	①	移動開始時(特に直進時)にタイヤが暴れることがある	I 傾斜と通常の2状態を作るための機構が必要
	②	段差にさしかかった時、タイヤの進行方向が段差に対して水平になり、動けなくなることがある	II 高荷重に耐えられない
	③	下り坂で重心が前に行く	III 旋回性が限りなく0に近づく
	④	左右のキャスターの挙動が異なる場合がある	IV 接地点以外のところに力がかかるとタイヤが簡単に倒れてしまう

通常のキャスタでは段差乗り越しの際に車輪が使用者の進行方向とは異なる方向に向いてしまうことがある。そのため段差をうまく乗り越すことができないという問題が発生することがあった。車輪が使用者の進行方向とは異なる方向に向いてしまう原因としてキャスタの重心位置がある。段差乗り越しの際、段差が図 2.8 の右側にあれば問題なく乗り越せるが、左側にある時に前述の問題が起こる。このような問題を解決するものとしてキャスタ回転軸を傾斜させる条件式傾斜キャスタを考えた。図 2.8, 図 2.9 の2つの状態を直進時と回転時で切り替えて使用することで、旋回性と直進性を確保する。

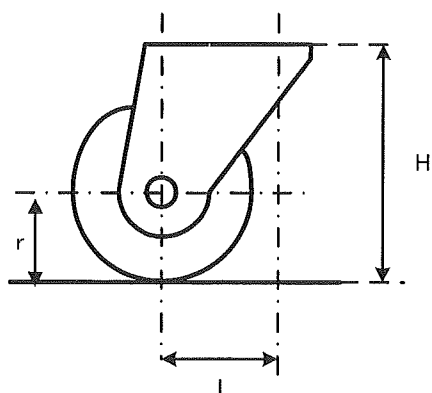


図 2.8 通常のキャスタ

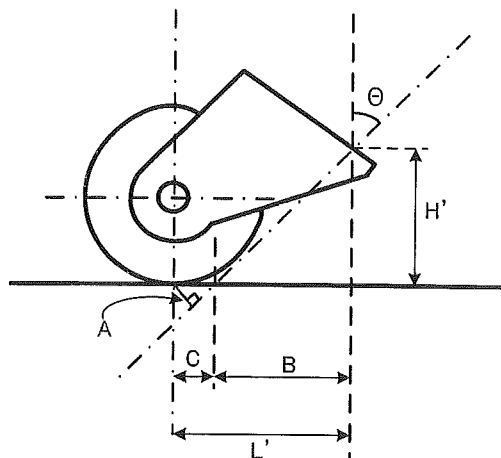


図 2.9 条件式傾斜キャスタ

現在使用されているキャスタには 1 つのキャスタにつき車輪が 1 つのもの（以下シングル, 図 2.10）と 2 つのもの（以下ダブル, 図 2.11）の 2 種類がある。これら 2 種類のキャスタについてどちらがより条件式傾斜キャスタに適しているか検討する。

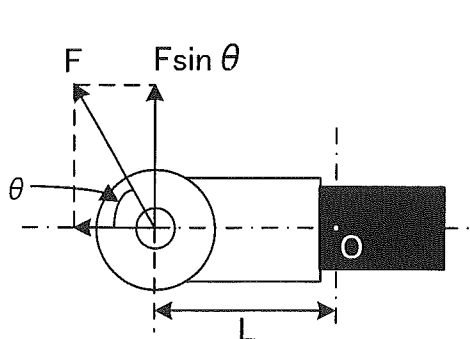


図 2.10 上方から見たシングルキャスタ

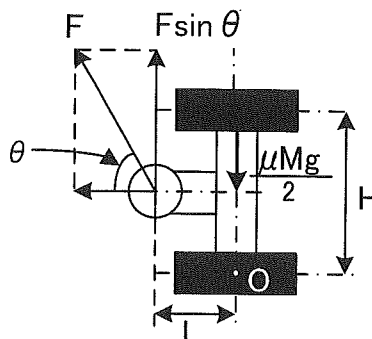


図 2.11 上方から見たダブルキャスタ

図 2.10, 2.11 にシングルおよびダブルのキャスタを上方から見た図を示す。この図を用いてキャスタが任意の角度 θ 方向に使用者からの力 F を受けた時の O 点廻りの力のモーメントを考えることでキャスタの旋回性について検討する。

シングルについて、 O 点の廻りに働く力は使用者からの力 F のみである。 O 点廻りの力の

モーメントに關与する力 F の分力は $F \sin \theta$ である。よつてキャストが旋回する際の O 点廻りの力のモーメントは

$$FL \sin \theta > 0$$

となり

$$F > 0$$

のときキャストは回轉する。

次にダブルについて、 O 点の周りに働く力は一方のタイヤの接地点に働く摩擦力と使用者からの力である。よつてキャストが旋回する際の O 点廻りの力のモーメントは

$$FL \sin \theta > \frac{1}{2} H \mu Mg \cos \theta$$

であり、

$$F > \frac{H \mu Mg \cos \theta}{2L \sin \theta}$$

のとき、キャストは回轉する。

以上よりダブルのほうが旋回に必要な力は大きい。よつてシングルのほうが旋回性に優れていることがわかる。反面、ダブルのほうが容易に旋回しないということなので直進性に優れており、安定性が高いとも言える。(表 2.5)

表 2.5 シングルキャストとダブルキャストの比較

	メリット	デメリット
シングル	旋回性がよい	挙動が不安定になりやすい
ダブル	安定性がよい	旋回性に劣る

以上の結果より今回の条件式傾斜キャストでは直進性はキャスト旋回軸を傾斜させることにより確保できるので、旋回性に優れているシングルのキャストを選ぶことにする。

次に、キャスト旋回軸を傾斜させ、もっとも直進性が高まるときの傾斜角 θ は次の式で表される。(図 2.10, 図 2.11 参照)

$$H' = H \sin(90 - \theta) = H \cos \theta$$

$$L' = L \sin(90 - \theta) + (H - r) \sin \theta = L \cos \theta + (H - r) \sin \theta$$

$$B = H' \tan \theta = H \cos \theta \cdot \tan \theta = H \sin \theta$$

$$C = L' - B = L \cos \theta - r \sin \theta$$

$$A = C \cos \theta = (L \cos \theta - r \sin \theta) \cos \theta$$

モーメントアーム $A=0$ のときキャスト旋回軸周りに車輪は動かないので

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{L}{r} \right) \quad \dots(9.6)$$

ここで L :キャストの偏心, r :車輪半径である。これらはカタログ値として既知の値なので、

キャスタのサイズが分かれば完全に回転が拘束される傾斜角 θ は求まる。たとえば、偏心 $L=45[\text{mm}]$ 、タイヤ半径 $r=90[\text{mm}]$ の場合、式 (2.2) に代入すると、傾斜角 $\theta \doteq 26.5[\text{deg}]$ となる。

また $0[\text{deg}] < \theta < 26.5[\text{deg}]$ の時、ある程度操舵可能な範囲があることを実際のキャスタの挙動から発見した。その挙動を定量化するために機構解析ソフト NSC.visualNastran 4D 2002 を用いてシミュレーションを行った。以下にシミュレーション条件を示す。

条件

キャスタ旋回軸の傾斜角度を $0[\text{deg}]$ 、 $5[\text{deg}]$ 、 $10[\text{deg}]$ 、 $15[\text{deg}]$ 、 $20[\text{deg}]$ 、 $26.5[\text{deg}]$ 、 $30[\text{deg}]$ の 7 通りに設定する。

つぎに簡易移動支援デバイスへ実装することを考慮に入れ、モデル化することにした。モデル化するキャスタは $50[\text{mm}]$ の段差を乗り越すのに必要な車輪半径である $85[\text{mm}]$ 以上のキャスタを選定すべきである。また、使用者のニーズなどから空気入りキャスタを使用することにした。

以上のことを考慮するとウカイキャスタの空気入り車輪付旋回キャスタの

HLJ6 $\frac{1}{2} \times 2-3$ を用いることにした。HLJ6 $\frac{1}{2} \times 2-3$ の詳細を次に示す。

表 2.6 モデル化したキャスタの主な寸法

最大荷重	800[N]
取り付け高さ	213[mm]
タイヤ外径	180[mm]
タイヤ幅	53[mm]
偏心	45[mm]
1 個あたりの重量	1600[g]

この空気入りキャスタを Solid Edge を用いてモデル化したものを図 2.12 に示す。

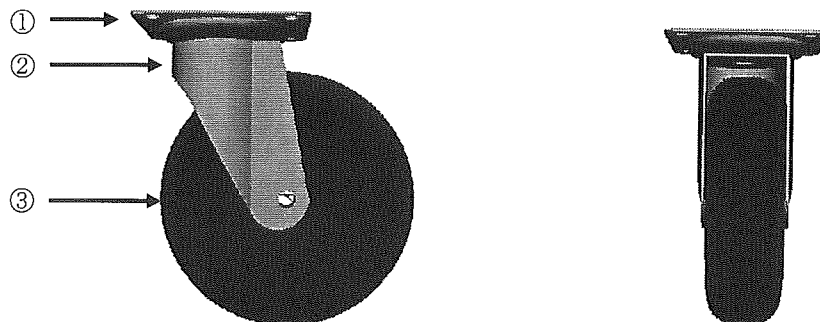


図 2.12 モデル化したキャスタ

次にシミュレーションにおける各パーツの拘束条件について説明する。①はある座標位置に対して、完全に固定する。①と②の拘束は実際のキャスタの拘束と同じように回転拘