Title	移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボに関する研究
Author(s)	菅原, 健人
Citation	
Issue Date	1997-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1062
Rights	
Description	情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボに関する研究

指導教官　藤田政之 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

菅原健人

1997 年 2 月 14 日

要 旨

Keywords　移動機構, マニピュレータ, ビジュアルサーボ, 特異姿勢回避

本研究では, 移動機構とカメラを備えたマニピュレータ (今後, 本研究では作業移動ロボットと呼ぶことにする) のビジュアルサーボ問題に関する研究を行なう. カメラと移動機構を備えた利点を十分生かせる制御則を提案し, シミュレーションによってその妥当性を検証する.

従来研究では, マニピュレータにカメラと移動機構を備えたメリットを十分に生かしてはいないと考えられる. それはビジョンシステムによって予期せぬ外乱や未知の環境の情報を得られても, その情報を有効に処理してはいないことである. 予期せぬ動作に対応するためには, 制御対象を常に任意の方向へ操作できる最適姿勢を保たなければいけない. 制御対象の最適姿勢を考慮しなければ常に任意の方向へ移動することが困難になる.

そこで, 本研究ではカメラと移動機構を備えたマニピュレータにおけるビジュアルサーボについて考察する. 可操作性を用いた評価関数を利用し, マニピュレータの腕姿勢をより作業しやすい形状に, つまりマニピュレータが特異姿勢にならないように特異姿勢回避を行なう. 運動学的にシミュレーションによって移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボとしての妥当性を検証することを目的とする。

結論として, 可操作性を考慮した作業移動ロボットは作業範囲が広範囲にとれ, 対象物の予測不可能な移動に対応できるので, より実用的なビジュアルサーボであると考えられる. また, 速度レベルの制御においては, このシステムは十分に妥当性があると思われる.

目 次

1 序論 **1**

1.1 本研究の動機と背景 1

1.2 本研究の目的 4

1.3 本論文の構成 4

2 作業移動ロボットのビジュアルサーボについて **5**

2.1 ビジュアルサーボとは 5

3 作業移動ロボットのモデリングについて **8**

3.1 移動機構の関係式の導出について 8

3.2 マニピュレータの関係式の導出について 12

3.2.1 ロボットヤコビアンの導出 13

3.2.2 マニピュレータの関係式の導出 15

3.3 カメラの関係式の導出について 16

3.3.1 一般的なイメージヤコビアンの導出 16

3.3.2 手先効果器に取り付けたカメラの関係式の導出 19

3.4 作業移動ロボットのモデルの導出 20

3.4.1 移動機構とマニピュレータを含むカメラの関係式の導出 21

4 作業移動ロボットの制御則の導出について **24**

4.1 作業移動ロボットのビジュアルサーボ問題の設定 24

4.2 マニピュレータの特異姿勢とは 27

4.3 制御則の導出 29

4.4 可操作度を用いた評価関数の導出 29

5 作業移動ロボットのシミュレーション **32**
5.1 移動機構の関係式の設定 32
5.2 マニピュレータの関係式の設定 35
5.2.1 ロボットヤコビアン 35
5.2.2 マニピュレータの関係式 37
5.3 カメラの関係式の設定 37
5.4 作業移動ロボットのモデル設定 38
5.5 シミュレーションの準備 38
5.6 シミュレーション結果 41

6 結論 **60**
6.1 本研究のまとめ 60
6.2 今後の課題 61

第 1 章

序論

1.1 本研究の動機と背景

工場の無人化に伴う産業界の要求によりロボットマニピュレータや移動ロボットは大きく発展してきた. マニピュレータに移動機構を備えることで位置決め精度は低いが広範囲な作業空間を得られる. しかも, 稼働範囲は狭いが位置決め精度が高い器用さで作業が行なえるようになる. 利点としては, 移動できることにより工場のラインコース設置の制限が少なくなり, ラインの変更も容易になる. そして, 移動しながら作業ができるため, 必要とするマニピュレータの数が減り, また多品種少量生産が可能になる. これらはつまり, 設備投資コストが安くなるということにもなる.

搭載するマニピュレータ自身が目標作業に対して, 十分な自由度を有すると仮定すると, システム全体としては移動機構が加わった分, 運動学的には冗長自由度であるといえる. 冗長性を利用して, マニピュレータの特異姿勢回避や障害物回避, 関節動作範囲の制限などが行なえる [1][2].

見浪, R.P.Gibollet らは移動機構を備えたマニピュレータの運動学を同次変換行列を用いて表すことにしている. つまり, 冗長マニピュレータと見立てることにより, 移動機構を備えたマニピュレータをマニピュレータと同様に取り扱おうと試みている [7][6].

冗長マニピュレータの逆運動学解析にはヤコビアンの疑似逆行列が用いられている. ただし, 冗長性を利用した制御を行なおうとする場合何回かの疑似逆行列の計算やフルランクでない行列の疑似逆行列の計算のため, 膨大な計算量を要する特異値分解法を使用しなければならない. このため, 計算量を押えるためにヤコビアンを部分ヤコビアンに分解す

る方法もある [9][10][11].

Yamamoto らは移動機構と障害物回避機構を統合した移動マニピュレータの制御方法を研究している [2]. 成果としては障害物が一つのときはもちろん, 二つ存在しても一つ目の障害物を避けながら二つ目の障害物のことも考慮に入れながら手先が最適経路を通ることがシミュレーションで確認できたと示している. また, マニピュレータの特異姿勢回避のために可操作性を取り入れ, 姿勢制御も行なっている [3].

しかし, Yamamoto らの研究では障害物の位置を予め定められているので, 障害物の位置が不明の場合には適応できないという問題点がある. 今後, 工場で多品種少量生産を行なうときや, 作業効率の面から不規則な形状の物体がベルトコンベアなどの搬送機器で運ばれてくるという状況も考えられる. この場合, 作業点が制御対象から見て予測のつかない動作があると考えた方が自然である. そのため, なんらかの方法を使用して外界の情報を得るために, 外界センサが必要になる. カメラ, レーザセンサ, 超音波センサなど外界センサとして利用できるものは多数ある. ただし, 視覚センサとして人間の目と類似した情報を得られ, 人間と同様な環境を理解するロボットを目指す上ではカメラが最適と思われる.

ビジョンシステムを搭載した移動ロボットは画像認識の点から人工知能方面の研究 [4][5] も多いが, これは "見てから動く" 方法であり, 実時間での作業には向かない. 制御の面から見ると, "見ながら動く" 方法である, 視覚情報処理, 軌道計画, モータ制御がすべて並行して動くビジュアルサーボに重点がおかれている. 視覚からの情報を用いたロボットの制御にビジュアルフィードバック制御がある.

ビジュアルフィードバック制御には位置ベース法と特徴ベース法の二種類がある. 位置ベース法はカメラから得られた情報により画像の解釈を行ない目標物体との相対位置, 姿勢を求める. しかし, この方法では 2 次元情報から 3 次元情報を引き出すためにノイズに弱いなどの問題点がある. 特徴ベース法は画像面上に映し出された目標物体の特徴量を使用し, 画像の解釈を行なわなくても良いという長所を持っている [12]. さらに, 関節制御に内部フィードバックを入れ, ビジョンシステムがロボットの関節レベルのコントローラとして直接各関節への入力を計算するか, 画像特徴点からの情報で直接 $3D$ 座標を計算し関節の値を与えるかに分けられる. このようにビジュアルサーボシステムは大きく分けて 4 つの区分がある. そして, 制御入力としてはビジュアルサーボシステムの構成を簡単にでき, 一般的なコントローラである速度入力式とビジョンの低速なサンプリングレートを利

用して, 高速なサンプリングレートにによる内部フィードバックを使ってダイナミクスを考慮したコントローラを使用するトルク入力式がある [13].

特徴点からマニピュレータを制御するためにオプティカルフローを利用したイメージヤコビアンが用いられる. カメラが運動することことにより, 画像面上にある対象物体の特徴点が連続的にあたかも流体が流れるように変化する. これが速度場であるオプティカルフローを表す [12][14].

Nelson らは PUMA560 を使って動く対象物のビジュアルサーボと可操作性を利用したマニピュレータの特異姿勢回避を行なっている. ただし, マニピュレータは固定式なのでマニピュレータの作業範囲の境界付近では可操作性が低下することは避けられないことになる [15][16].

対象物がベルトコンベアなどに乗ってに動く場合には, その対象物に対してなんらかの作業を行なうために移動機構, カメラが必要になるというのは自然である. このため, マニピュレータにカメラと移動機構を備えることが必要になってくると考えられる.

移動ロボット, マニピュレータ, ビジョンの三つを組み合わせた研究は見浪, R.P.Gibdlet らによって行なわれている. しかし, 見浪はこれら三つのシステムを一つの対象としては考えておらず, ビジョンに関してはロボットの移動後に作業対象物の位置誤差検出のために使っているにすぎない. このため, 対象物が常に動く場合には適用できないという課題が残る [17].

R.P.Gibdlet らは移動ロボットの関係式記述の一般化を行ない, 三つのシステムを一つの対象として扱っている. ただし, 目標対象物は固定式であり, これも対象物が常に動く場合には適用できず, しかも, 移動機構のメリットである冗長性を生かしていない. ただし, R.P.Gibdlet らは実際に移動マニピュレータを使用し実験検証を行なっている [6] [9][18].

しかしながら, 上記の従来研究では, マニピュレータにカメラと移動機構を備えたメリットを十分に生かしてはいないと考えられる. それはビジョンシステムによって予期せぬ外乱や未知の環境の情報を得られても, その情報を有効に処理してはいないことである. 予期せぬ動作に対応するためには, 制御対象を常に任意の方向へ操作できる最適姿勢を保たなければいけない. 制御対象の最適姿勢を考慮しなければ常に任意の方向へ移動することが困難になる.

1.2　本研究の目的

本研究ではカメラと移動機構を備えたマニピュレータにおけるビジュアルサーボについて考察する．今後, カメラと移動機構を装備したマニピュレータを作業移動ロボットと呼ぶことにする．

手先効果器にカメラを取り付けたマニピュレータを移動ロボットに設置し, ビジュアルセンサを用いたビジュアルフィードバックによって目標対象をビジュアルサーボするシステムについて考える．移動機構を備えることにより運動学的に冗長になるマニピュレータを考え, その制御を考慮に入れながら全体を一つの対象とみなす．移動ロボット, マニピュレータ, ビジョンを分離せず, 同時に動作するようにする．これは対象物が常に動く場合にも適用できるようにするためである．さらに, 移動機構を備えたメリットを生かすために, 可操作性の考えを導入する．可操作性を用いた評価関数を利用し, マニピュレータの腕姿勢をより作業しやすい形状に, つまりマニピュレータが特異姿勢にならないように特異姿勢回避を行なう．また, 作業移動ロボットのモデリングの際, 従来あまり考慮されてなかった移動機構, マニピュレータ, カメラの各々の動作の影響を考慮する．そして, 導出されたモデルを基に運動学的にシミュレーションによって移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボとしての妥当性を検証することを目的とする．

1.3　本論文の構成

本論文の第 2 ではビジュアルサーボ問題について一般にどのようなものであるかを述べる．また本研究における作業移動ロボットの制御目的を示す．第 3 章では移動機構, マニピュレータ, カメラの各モデルを示し, それを基に作業移動ロボットのモデルを導出する．第 4 章では本研究で検討を行なうビジュアルサーボ問題を定義し, その問題を解くための制御則の提案を行なっている．第 5 では導出した作業移動ロボットのモデルと提案した制御則を用い, シミュレーションによってその妥当性を検討する．最後にまとめと今後の課題を挙げることにする．

第 2 章

作業移動ロボットのビジュアルサーボについて

2.1　ビジュアルサーボとは

本研究で扱うビジュアルサーボ問題を次のように考えることにする.

- カメラから得られる情報から目的を達成する動作を実現するようにマニピュレータの制御を行なう. つまり, 動的な対象に対し画像面上の特徴点の位置・姿勢が一定になるようにカメラを移動させる.

図 2.1に示すように空間上を運動するカメラと対象物を考える. このビジュアルサーボを達成するために, 次の事柄を定めておく.

外界の情報取得のためにカメラを使用する. 3 次元空間上を動く対象を 2 次元画像面上に投影するために, カメラのモデルである透視変換の関係式を用いる. このとき, 画面上での速度場を表すオプティカルフローを用いて画像情報が得られるとする [19]. また, ここでカメラはピンホールカメラと仮定する.

次にカメラの運動の制御にマニピュレータと移動機構を用いる. 対象物の動きに併せてカメラを空間上で自由に運動させなければならないので, マニピュレータの手先効果器にカメラをマウントさせる. さらにマニピュレータ自体にも移動機構を備えてより広い作業空間を確保し, ある空間上の平面を自由に移動できるようにする. マニピュレータに移動機構を備えることによってマニピュレータのみの場合に較べてより広い作業空間が得られ

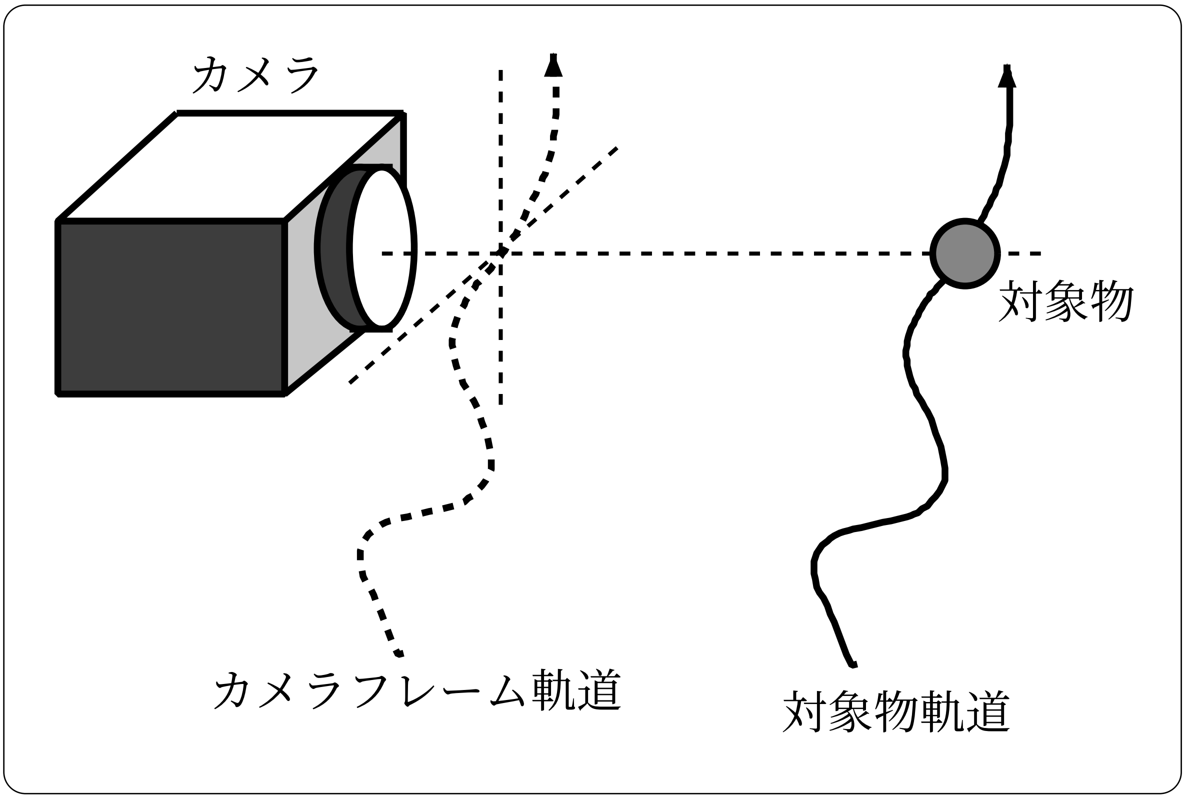

図 2.1: カメラと対象物の動作関係

るのは明らかであり, もし, マニピュレータのみなら図 2.2に示すように対象物が作業範囲の外に出るとビジュアルサーボできなくなるのは自明である (リンク $1 = 1.0e + 00$, リンク $2 = 5.0e - 01$ 対象物の移動速度は x 軸方向に-0.01[m/sec], y軸方向に 0.01[m/sec] ,対象物 (実線), カメラ (破線)) . そして, マニピュレータや移動機構をマニピュレータの手先

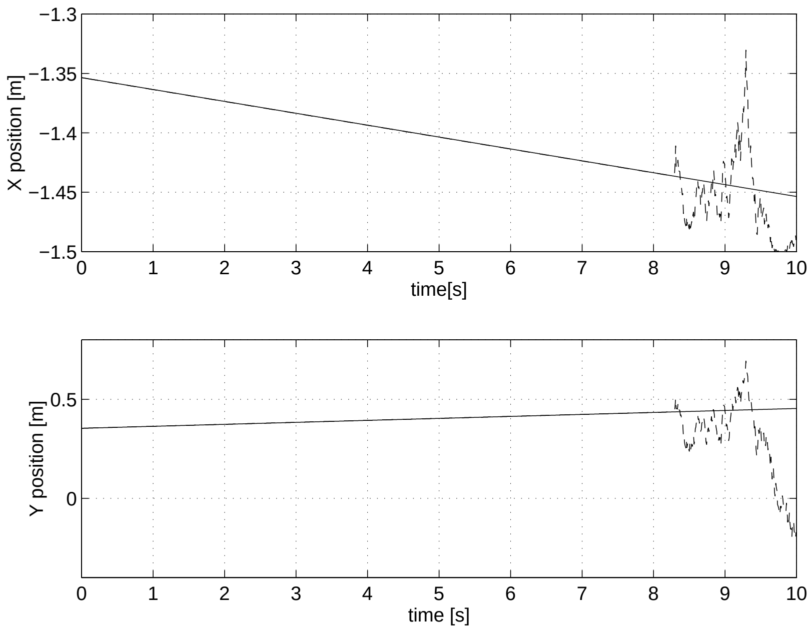

図 2. 2: 2 自由度マニピュレータのビジュアルサーボ

効果器に取り付けたカメラを対象に対して適切な位置に移動するように制御を行なう.

特徴点の目標位置ベクトルを$\boldsymbol{\xi}_d$とする. このとき, 制御目的は,

$$\boldsymbol{\xi} \rightarrow \boldsymbol{\xi}_d \tag{21}$$

を達成することである.

第 3 章

作業移動ロボットのモデリングについて

移動機構, マニピュレータ, カメラの各々の動作の影響を考慮した作業移動ロボットのモデルを作成するために,

- 車輪の速度を移動機構の速度に変換する関係式
- 関節角速度を手先の速度に変換するマニピュレータの関係式
- 手先の速度を画像面上の特徴点の速度に変換するカメラの関係式

を定義する.

3.1 移動機構の関係式の導出について

移動機構の座標上での位置を図 3.1のように表すことにする. 移動機構は自律移動型であり, x-y平面を移動するものと考えることにする. 水平面に x-y平面を持つフレームΣ_wをおき, これを基準フレームとする. そして, 移動機構の基準フレームΣ_vとし, 原点を O_v, Σ_wとΣ_vの角度をθ_zに設定する.

次に車輪について考察する. ここで考察する車輪は次の 3 つである [6][9][18].

- 決められた方向を向いている固定式車輪.
- 角度入力ができ, 指令通りの方向を向くことができるステアリング式車輪.
- 角度入力はできないが車両の方向づけに適してるキャスタ式車輪.

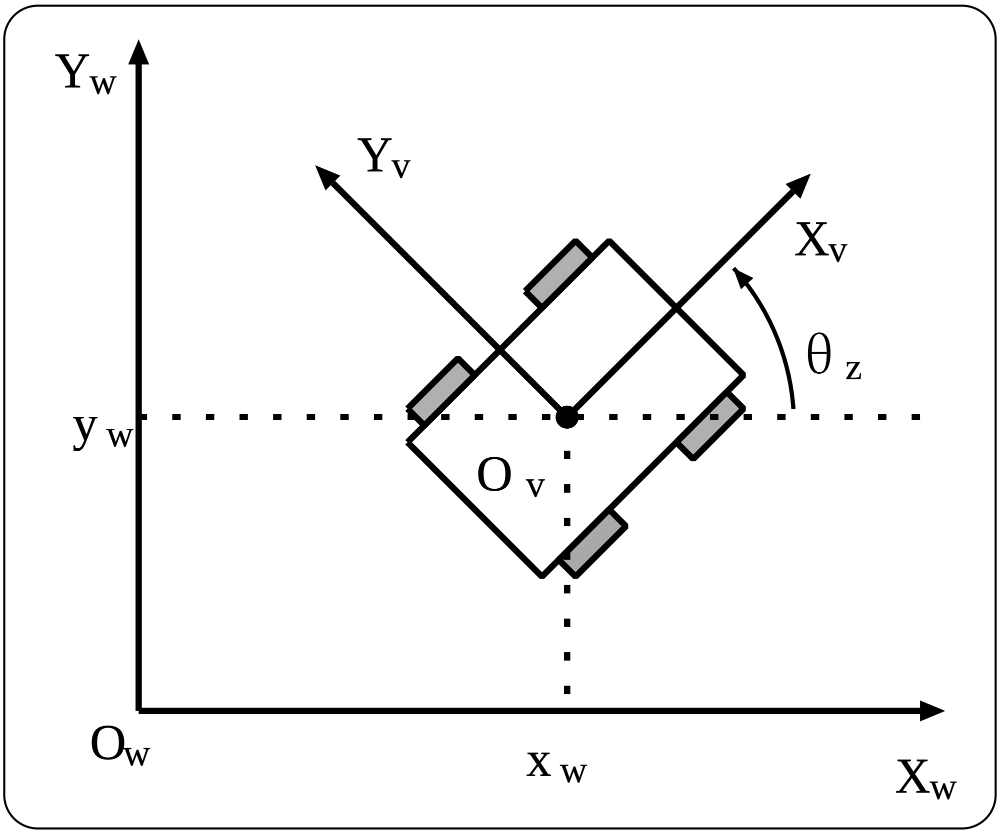

図 3.1: 移動機構の座標系

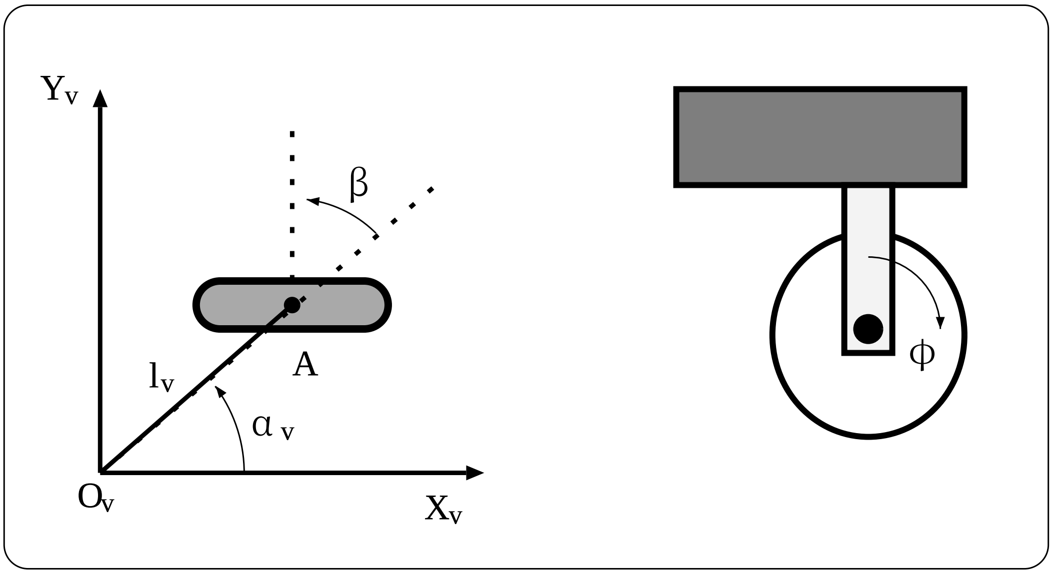

図 3. 2: 固定式車輪とステアリング式車輪

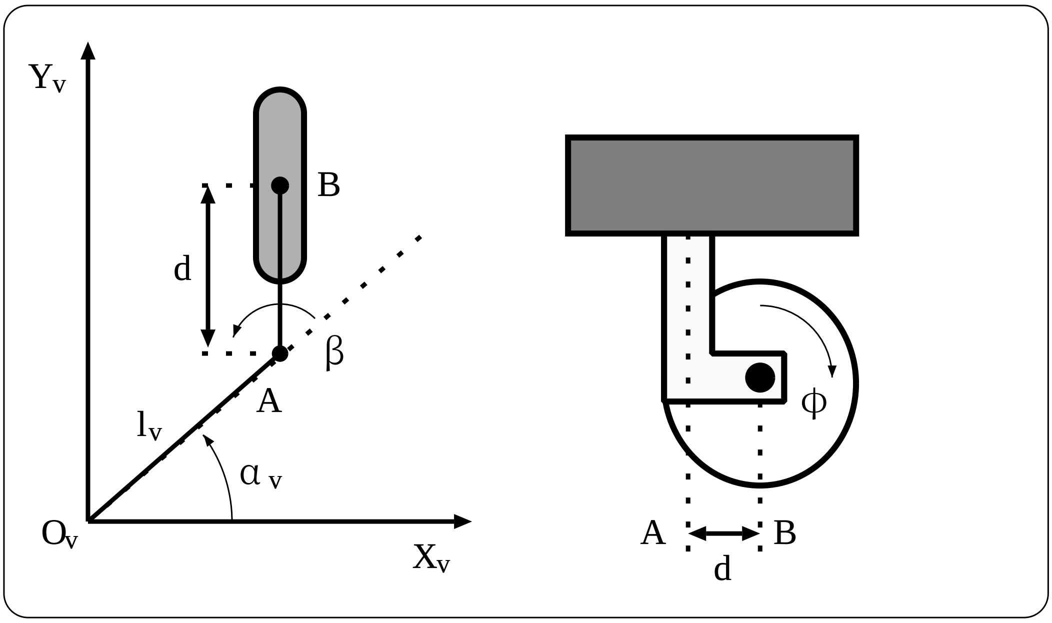

図 3.3: キャスタ式車輪

車軸と移動機構本体をつなぐ剛体の本体側の接合点をポイント A とおき, 車軸との接合点をポイント B とし, AB 間の距離を d とする. ただし, 固定式車輪とステアリング式車輪ではポイント A, B は移動平面に垂直な線上に重なっていることにする. そして, O_v から A への距離を l_v, 角度を α_v, l_v に関した車輪の姿勢を β とする. 水平軸に対する車輪の回転角は ϕ, 車輪半径は r で表す.

これらを各車輪によって定数, 変数に区別した表を表 3.1に示す.

表 3.1: 車輪の種類による定数と変数

	固定式	ステアリング式	キャスタ式
定数	α_v, β, l_v, r	α_v, l_v, r	α_v, l_v, r, d
変数	$\phi(t)$	$\beta(t)$, $\phi(t)$	$\beta(t)$, $\phi(t)$

また, 車輪と移動平面の接点における速度は零であると考える. つまり, 車輪は移動において滑べりはないものとする. そうすると, 各車輪は車輪の動作によって接点での速度成分は 2 つの拘束式によって表すことができる.

固定式, ステアリング式車輪の場合.

進行方向:

$$\begin{bmatrix} -\sin(\alpha_v+\beta) \\ \cos(\alpha_v+\beta) \\ l\cos\beta \end{bmatrix}^T {}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v + r\dot{\phi} = 0 \tag{3.1}$$

垂直方向:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_v+\beta) \\ \sin(\alpha_v+\beta) \\ l\sin\beta \end{bmatrix}^T {}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v = 0 \tag{3.2}$$

キャスタ式の場合.

進行方向:

$$\begin{bmatrix} -\sin(\alpha_v+\beta) \\ \cos(\alpha_v+\beta) \\ l\cos\beta \end{bmatrix}^T {}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v + r\dot{\phi} = 0 \tag{3.3}$$

垂直方向:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_v+\beta) \\ \sin(\alpha_v+\beta) \\ d+l\sin\beta \end{bmatrix}^T {}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v + d\dot{\beta} = 0 \tag{3.4}$$

ここで, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_v$は,

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_v = \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

となり, ${}^v_w\boldsymbol{R} \in \mathcal{R}^{3\times 3}$ は基準フレームをΣ_vにするための変換行列である.

N個の車輪を装備した一般的な移動ロボットについて考察する. 3 種類の車輪を区別するために, 固定式車輪のとき f, ステアリング式を s, キャスタ式を c と各変数に下付きをつけることにする. このとき, 全車輪の数 Nは $N = N_f + N_s + N_c$となる.

（３．１式),（３．２式),（３．３式),（３．４式)を一般的に次のように書かれる.

$$\boldsymbol{C}_{11}(\beta_s,\ \beta_c){}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v + \boldsymbol{C}_{12}\dot{\phi} = 0 \tag{３．６}$$

$$\boldsymbol{C}_{21}(\beta_s,\ \beta_c){}^v_w\boldsymbol{R}\dot{\boldsymbol{\theta}}_v + \boldsymbol{C}_{22}\dot{\beta}_c = 0 \tag{３．７}$$

$$\boldsymbol{C}_{11}(\beta_s,\ \beta_c) = \begin{bmatrix} C_{11f} \\ C_{11s}(\beta_s) \\ C_{11c}(\beta_c) \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\boldsymbol{C}_{12} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$\boldsymbol{C}_{21}(\beta_s,\ \beta_c) = \begin{bmatrix} C_{21f} \\ C_{21s}(\beta_s) \\ C_{21c}(\beta_c) \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$\boldsymbol{C}_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{22c} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

C_{11f}, C_{11s}, C_{11c}は(3.1)式, (3.3)式から求めることができる, それぞれ$(N_f \times 3)$, $(N_s \times 3)$, $(N_c \times 3)$行列である．特に, C_{11f}は定数, C_{11s}, C_{11c}はβ_s, β_cによって時変である．また, C_{22}は対角要素が車輪の半径である定数$(N \times N)$行列である．

C_{21f}, C_{21s}, C_{21c}は(3.2)式, (3.4)式から求めることができる, それぞれ$(N_f \times 3)$, $(N_s \times 3)$, $(N_c \times 3)$次元の行列である．特に, C_{21f}は定数, C_{21s}, C_{21c}は時変である．また, C_{22c}はN_c個のキャスタ式車輪による対角成分が$d \sin\gamma$に等しい対角行列である．

(36)式, (37)式を用いて$\dot{\boldsymbol{\theta}}_v$の各成分について解くと次式のように表される．

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_v = \boldsymbol{J}_{vehicle}\dot{\boldsymbol{\eta}}_v \tag{3.12}$$

$\dot{\boldsymbol{\eta}}_v$は移動機構の車輪の数, 種類によって変化する時変の変数速度ベクトルである．

(3.12)式が移動機構の関係式となる．

3.2 マニピュレータの関係式の導出について

マニピュレータの関係式を導出するために必要になるロボットヤコビアンを定義し, それを用いてマニピュレータの関係式を導出する．

3.2.1 ロボットヤコビアンの導出

マニピュレータは関節によって連結された物体と考えられる．この関節をフレームと呼ぶ．マニピュレータの各フレームの位置や姿勢を数学的に表現するために, Denavit-Hartenberg の表記法 [1][20] に基づくリンクパラメータの決定手順を示す．

1. 関節軸を定める．
   - 関節に空間上に固定された台座側から順に番号を 1〜n をつける．
   - 台座をリンク vとし, リンク vは関節 1 に結合されているとする．
   - 各関節 $i(v, 1, 2, \cdots, n)$ に対して, 回転関節の場合は回転軸を, 直動関節の場合は直動方向に平行な任意の直線を関節軸 i と定める．
2. 共通垂線を定める．
   - 関節軸 i と $i+1$ が平行な場合には共通垂線は一意でないが, この場合は任意に 1 つを選ぶ．
3. リンク座標系を定める．
   - Z_i軸は関節軸 i に合わせ, 方向はなるべく手先に向かう方向とする．
   - X_i軸は共通垂線の関節 i から $i+1$ に向かう方向にとる．
   - Y_i軸は Z_i, X_iと右手系をなすようにとる．
4. 関節軸または共通垂線の定め方に任意性のあるものについては, なるべく多くのパラメータを 0 にするように修正する．

ここで, 4 つのリンクパラメータはそれぞれ,

a_i(リンク長)	=	X_i軸方向に沿って測った Z_iから Z_{i+1}軸までの距離
α_i(リンクのねじれ角)	=	X_i軸まわり右ねじの方向に測った Z_iから Z_{i+1}までの回転角度
d_i(リンク間距離)	=	Z_i軸方向に沿って測った X_{i-1}から X_i軸までの距離
θ_i(リンク間角度)	=	Z_i軸まわり右ねじの方向に測った X_{i-1}から X_i軸までの回転角度

とし, 表 32 のようにリンクパラメータを求める．

表 3.2: リンクパラメータ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

α_{i-1} : リンクのねじれ角

a_{i-1} : リンク長 (軸間距離)

d_i : リンク間距離

θ_i : リンク間角度

リンクパラメータと次式を用いて，フレームΣ_{i-1}のフレームΣ_iに対する同次変換行列${}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}$を求めることができる．

$$
\begin{aligned}
{}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T} &= \boldsymbol{T}_T(X_{i-1}, i-1)\boldsymbol{T}_R(X_{i-1}, \alpha_{i-1})\boldsymbol{T}_T(Z_i, d_i)\boldsymbol{T}_R(Z_i, \theta_i) \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.13}
$$

$$
\begin{aligned}
s_i &= \sin\theta_i, & c_i &= \cos\theta_i, \\
s\alpha_{i-1} &= \sin\ \alpha_{i-1}, & c\alpha_{i-1} &= \cos\ \alpha_{i-1}
\end{aligned}
$$

$\boldsymbol{T}_T(X_{i-1}, a_{i-1})$ は X_{i-1}軸方向へ a_{i-1}だけ並進する同次変換，$\boldsymbol{T}_R(X_{i-1}, \alpha_{i-1})$ は X_{i-1} 軸まわりにα_{i-1}だけ回転する同次変換を表す ($\boldsymbol{T}_T(Z_i, d_i)$, $\boldsymbol{T}_R(Z_i, \theta_i)$ も同様に考える)．

関節角速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \in \mathcal{R}^n$から相対速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{P}} \in \mathcal{R}^m$ に変換するロボットヤコビアン$\boldsymbol{J}_{robot} \in \mathcal{R}^{m\times n}$ は同次変換行列${}^{v}_{c}\boldsymbol{T}$(c :カメラフレーム) から求まる [1][20]．

$$
\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \tag{3.14}
$$

$$
\boldsymbol{J}_{robot} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial}{\partial\theta_i}{}^{v}_{c}\boldsymbol{P} \\ {}^{v}_{i}\boldsymbol{Z} \end{bmatrix} \qquad (i = 1..c) \tag{3.15}
$$

${}^{v}_{c}\boldsymbol{P}$: フレームΣ_vから見たカメラフレームΣ_cの原点位置

${}^{v}_{i}\boldsymbol{Z}$: フレームΣ_vから見たフレームΣ_iの Z軸方向

3.2.2 マニピュレータの関係式の導出

図 4.2に示す作業移動ロボットのマニピュレータの関係式を導出する.

マニピュレータの関節変数ベクトルを$\boldsymbol{\theta}_m \in \mathcal{R}^3$, またマニピュレータの手先効果器に装備したカメラ (手先効果器) の位置・姿勢を表すベクトルを$\boldsymbol{r}_m \in \mathcal{R}^3$とする. このとき, マニピュレータの基準フレームΣ_vからみた${}^v\boldsymbol{r}_m$と$\boldsymbol{\theta}_m$の関係はマニピュレータの機構によって定まり,

$$
{}^v\boldsymbol{r}_m = \boldsymbol{f}_r(\boldsymbol{\theta}_m) \tag{3.16}
$$

と表される. 作業移動ロボットの基準フレームΣ_wからみた移動機構の位置・姿勢ベクトルを${}^w\boldsymbol{r}_{vehicle} \in \mathcal{R}^3$とする. フレーム$\Sigma_w$の$\Sigma_v$に対する変換行列を${}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z) \in \mathcal{R}^{3\times 3}$とすると, フレーム$\Sigma_w$からみたカメラ (手先効果器) の位置は次式のようになる.

$$
{}^w\boldsymbol{r}_m = {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z){}^v\boldsymbol{r}_m + {}^w\boldsymbol{r}_{vehiel} \tag{3.17}
$$

(3.14) 式を用い,

$$
{}^v\dot{\boldsymbol{r}}_m = \dot{\boldsymbol{f}}_r = \boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \tag{3.18}
$$

としたとき, (3.17) 式の両辺を微分すると次式のようになる.

$$
\begin{aligned}
{}^w\dot{\boldsymbol{r}}_m &= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} + {}^w_v\dot{\boldsymbol{R}}(\theta_z){}^v\boldsymbol{r}_m \\
&= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} + {}^w_v\dot{\boldsymbol{R}}(\theta_z){}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)^{-1}{}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z){}^v\boldsymbol{r}_m \\
&= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} + {}^w_v\boldsymbol{S}{}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z){}^v\boldsymbol{r}_m \\
&= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} + {}^w_v\boldsymbol{S}\left({}^w\boldsymbol{r}_m - {}^w\boldsymbol{r}_{vehiel}\right) \\
&= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}{}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} &(3.19) \\
&= {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\boldsymbol{J}_{vehiel}\dot{\boldsymbol{\eta}}_v &(3.20) \\
&= \left[\begin{array}{cc} {}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\boldsymbol{J}_{vehiel} \end{array}\right]\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_v \end{bmatrix} &(3.21)
\end{aligned}
$$

ただし,

$$ {}^{w}_{v}\boldsymbol{S} \;=\; {}^{w}_{v}\dot{\boldsymbol{R}}(\theta_z){}^{w}_{v}\boldsymbol{R}(\theta_z)^{-1} \tag{3.22} $$

であり, ${}^{v}\boldsymbol{P}_m = [P_{mx}, P_{my}, P_{mz}]^T$はフレーム$\Sigma_v$ からカメラフレームΣ_cまでのベクトルである. また, ${}^{w}_{v}\boldsymbol{S}$は歪対称行列となる.

(3.19) 式において, ${}^{w}\dot{\boldsymbol{r}}_{vehicle}$ は (3.12) 式と等しくなるので, (3.20) 式のようになることになる. (3.21) 式がマニピュレータの関係式となる.

3.3 カメラの関係式の導出について

カメラが運動することで得られる画像面上に映し出される対象物の軌跡をオプティカルフローと呼ぶ. このオプティカルフローを用いてカメラの運動パラメータを求めることができるイメージヤコビアンについて述べる. また, この手法では画像面上に 3 次元位置が既知である対象物と 3 次元位置が未知である対象物があった場合, 未知の 3 次元位置を求めることができる. 既知の対象物の 3 次元位置とオプティカルフローからカメラの運動パラメータが求まる. この運動パラメータと 3 次元位置が未知である対象物のオプティカルフローを用いて, 未知の対象物の 3 次元位置が求まる [14].

3.3.1 一般的なイメージヤコビアンの導出

一般的なカメラのモデルを図 3.4に示す. カメラ焦点を原点に置き, カメラの視線方向に Z軸を置いた XYZ座標系に対して画像面 (X_i, Y_i) を $Z = f$なる平面にとる. 特徴点 (X, Y, Z) がこの点と原点 O_Cとを結ぶ直線との交点に写像されるとする. このとき, 透視変換の関係式が次通り成り立つ.

$$ x = f\frac{X}{Z}\ , \qquad y = f\frac{Y}{Z} \tag{3.23} $$

f : 焦点距離

また, カメラが並進速度を (a, b, c), 角速度 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ で運動し, 対象物が動かないとする. このときカメラの運動によって特徴点 (X, Y, Z) がカメラに相対的に次の運動を行な

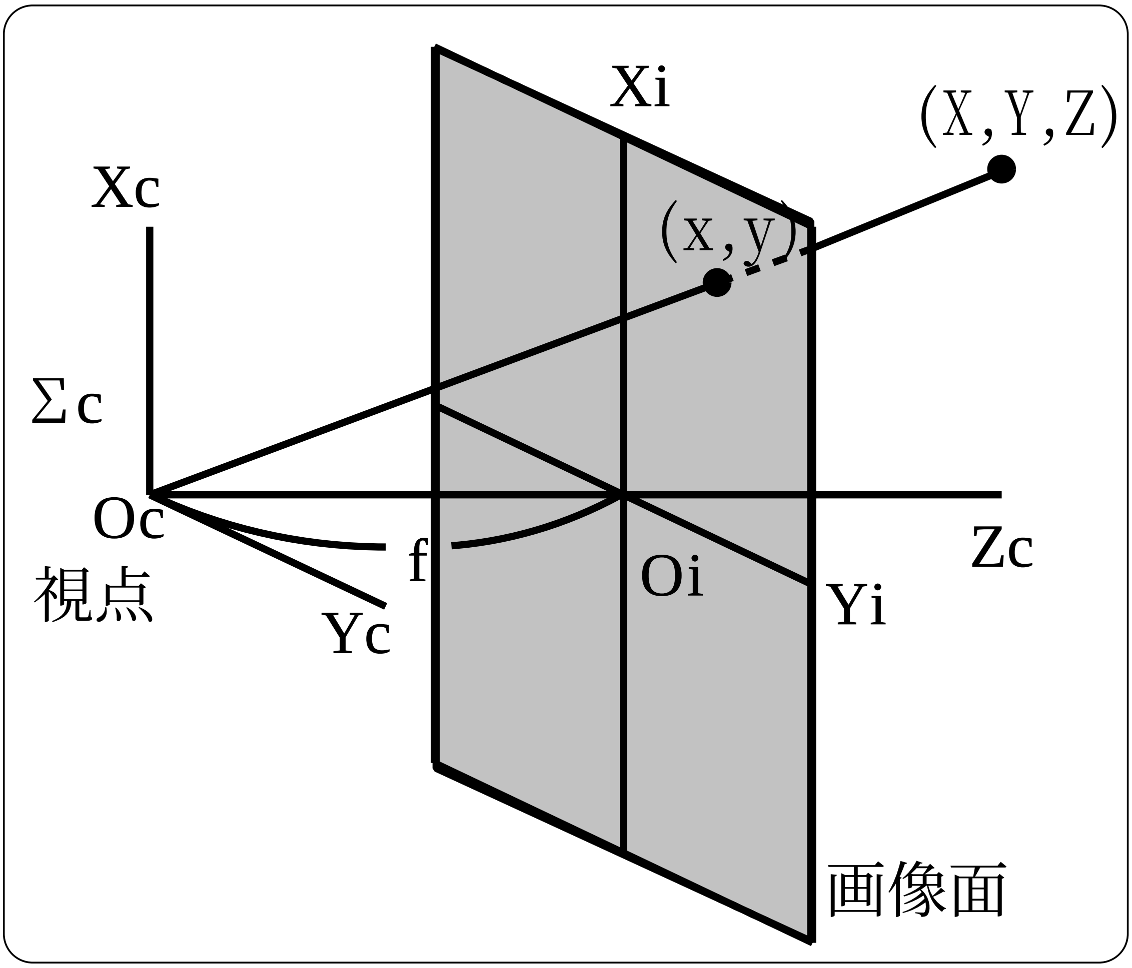

図 3.4: 透視変換

う [19].

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

ここで, $\{a, b, c, \omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ を運動パラメータとよぶ. カメラが並進し, 回転を行なう場合, 対称物体の特徴点 (X, Y, Z) がカメラに相対的に並進運動 $(-a, -b, -c)$, 角速度 $(-\omega_1, -\omega_2, -\omega_3)$ の瞬間運動をしていることに等しい. ゆえに (3.24) 式を得る.

(3.23) 式, (3.24) 式を用いてオプティカルフローを表すと次式のようになる.

$$\dot{x} = f\frac{\dot{X}Z - X\dot{Z}}{Z^2} = \frac{f}{Z}\left(\frac{x}{f}c - a\right) + \frac{xy}{f}\omega_1 - \left(f + \frac{1}{f}x^2\right)\omega_2 + y\omega_3 \tag{3.25}$$

$$\dot{y} = f\frac{\dot{Y}Z - Y\dot{Z}}{Z^2} = \frac{f}{Z}\left(\frac{y}{f}c - b\right) + \left(f + \frac{1}{f}y^2\right)\omega_1 - \frac{xy}{f}\omega_2 - x\omega_3 \tag{3.26}$$

(3.25) 式, (3.26) 式をまとめてオプティカルフローの式を次のように表す.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{f} & -f - \frac{x^2}{f} & y \\ 0 & -\frac{f}{Z} & \frac{y}{Z} & f + \frac{y^2}{f} & -\frac{xy}{f} & -x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

並進速度 (a, b, c), 角速度 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ は対象物が剛体なら特徴点を剛体上のどの位置で選んでも同じである. (3.27) 式から特徴点の奥行き Z と $(\dot{x}, \dot{y})$ がわかると運動パラメータに関して線形になり, 3 点の特徴点について (3.27) 式が求まれば 6 つの式を連立させることにより運動パラメータを求められる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{y_1} \\ \dot{x_2} \\ \dot{y_2} \\ \dot{x_3} \\ \dot{y_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z_1} & 0 & \frac{x_1}{Z_1} & \frac{x_1 y_1}{f} & -f - \frac{x_1^2}{f} & y_1 \\ 0 & -\frac{f}{Z_1} & \frac{y_1}{Z_1} & f + \frac{y_1^2}{f} & -\frac{x_1 y_1}{f} & -x_1 \\ -\frac{f}{Z_2} & 0 & \frac{x_2}{Z_2} & \frac{x_2 y_2}{f} & -f - \frac{x_2^2}{f} & y_2 \\ 0 & -\frac{f}{Z_2} & \frac{y_2}{Z_2} & f + \frac{y_2^2}{f} & -\frac{x_2 y_2}{f} & -x_2 \\ -\frac{f}{Z_3} & 0 & \frac{x_3}{Z_3} & \frac{x_3 y_3}{f} & -f - \frac{x_3^2}{f} & y_3 \\ 0 & -\frac{f}{Z_3} & \frac{y_3}{Z_3} & f + \frac{y_3^2}{f} & -\frac{x_3 y_3}{f} & -x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

逆に, 運動パラメータと特徴点の速度ベクトルが既知となれば, 対象物の奥行き Zを求めることができる. これらのことをまとめると次のことが言える. 対象物の 3 次元位置とその対象物の 3 点以上のオプティカルフローがわかれば, カメラの運動パラメータを求められる. また, ある未知の対象物の 3 次元位置はカメラの運動パラメータとそのオプティカルフローがわかれば求めることができる.

特徴点の速度ベクトルを$\dot{\boldsymbol{\xi}} \in \mathcal{R}^m$, 相対速度ベクトルを$\dot{\boldsymbol{P}} \in \mathcal{R}^m$とすると (327) 式は次のようになる.

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{J}_{image}\dot{\boldsymbol{P}} \tag{3.29}$$

ここで, $\boldsymbol{J}_{i\ \ maeg} \in \mathcal{R}^{m\times m}$をイメージヤコビアンと呼ぶ.

3.3. 2　手先効果器に取り付けたカメラの関係式の導出

カメラが移動機構を装備したマニピュレータの手先効果器に取り付けられてる場合について考える. このときのカメラの関係式を導出する場合, 移動機構やマニピュレータの動作を考慮しなければならない. 作業移動ロボットの作業空間の基準フレームをフレームΣ_wとし, カメラフレームをフレームΣ_c, 対象物フレームをフレームΣ_oとする. ここで, Σ_cからみたΣ_wへの変換を${}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z)(= {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}^v_w\boldsymbol{R}(\theta_z))$ とする. また, Σ_wからみたカメラの位置を${}^w\boldsymbol{P}_c = [{}^wX \quad {}^wY]$, Σ_wからみた対象物の位置を${}^w\boldsymbol{P}_o = [{}^wX_o \quad {}^wY_o]$ とした場合, (3.23) 式の透視変換を用いることによって得られる画像面上に投影された対象物の位置は次式のようになる (ただし, ${}^c_w\boldsymbol{R} \in \mathcal{R}^{2\times 2}$である).

$$\boldsymbol{\xi} \;=\; \boldsymbol{\Lambda}{}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \tag{3.30}$$

ここで, s :ピクセル長, α_c :アスペクト比とすると$\boldsymbol{\Lambda}$は,

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \frac{f}{sZ} & 0 \\ 0 & \frac{f}{\alpha_c sZ} \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

となる. さらに,

$$\dot{Z} = 0 \tag{3.32}$$

という仮定をおくと, (3. 30)式の微分は次のようになる.

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} \;=\; \boldsymbol{\Lambda}{}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z)\left({}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o - {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c\right) + \boldsymbol{\Lambda}{}^c_v\dot{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{\omega}){}^v_w\boldsymbol{R}(\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right)$$

$$
\begin{aligned}
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}_w^v\dot{\boldsymbol{R}}(\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \\
= \; & \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z)\left({}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o - {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c\right) + \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\dot{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{\omega}){}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}_w^v\boldsymbol{R}(\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \\
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}_w^v\dot{\boldsymbol{R}}(\theta_z){}_w^v\boldsymbol{R}(\theta_z)^{-1}{}_w^v\boldsymbol{R}(\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \\
= \; & \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z)\left({}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o - {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c\right) + \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{S}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \\
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}_w^v\boldsymbol{S}{}_w^v\boldsymbol{R}(\theta_z)\left({}^w\boldsymbol{P}_o - {}^w\boldsymbol{P}_c\right) \\
= \; & \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z){}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o - \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z){}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c + \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{S}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}){}_w^v\boldsymbol{S}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi} \\
= \; & \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z){}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o - \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z){}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c + \boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{\omega} \\
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}\dot{\theta}_z \\
= \; & \boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z){}^w\dot{\boldsymbol{P}}_o + \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z) & \boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \\
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}\dot{\theta}_z \\
= \; & \dot{\boldsymbol{\xi}}_o + \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Lambda}{}_w^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z) & \boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \\
& +\boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}\dot{\theta}_z
\end{aligned} \tag{3.33}
$$

ただし,

$$
{}_v^c\boldsymbol{S} \;=\; {}_v^c\dot{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{\omega}){}^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1} \tag{3.34}
$$

であり, ${}_v^c\boldsymbol{S}$は歪対称行列となる. (3.33) 式がカメラの関係式となる.

3.4 作業移動ロボットのモデルの導出

マニピュレータの関節角速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{\theta}}_m$と移動ロボットの速度$\dot{\boldsymbol{\eta}}_v$から新しく移動機構を備えたマニピュレータの関節角速度ベクトルを,

$$
\dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_v \end{bmatrix} \tag{3.35}
$$

とおくとする．また，$\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \in \mathcal{R}^3$なので対称物の特徴点は 2 点必要となる．それゆえ，2 点の (3.33) 式を用いることになる．また，このときの第 2 項の行列をイメージヤコビアンという．

$$\boldsymbol{J}_{image} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Lambda}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z) & \boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Lambda}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega},\theta_z) & \boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

これらの関係式を用い特徴点の速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{\xi}}$と関節角速度ベクトル$\dot{\boldsymbol{\theta}}$の関係を求めるために移動機構，マニピュレータ，カメラの関係式を一つの方程式にまとめる必要がある．

3.4.1 移動機構とマニピュレータを含むカメラの関係式の導出

(3.21) 式を見れば明らかなように，マニピュレータの関係式には，すでに移動機構の関係式が含まれる．(3.33) 式の第 2 項を見ると，

$$\begin{bmatrix} {}^w\dot{\boldsymbol{P}}_c \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_m \tag{3.37}$$

であるということがわかる．ゆえに，(3.21) 式を (3.33) 式に代入すればよいことになる．ただし，(3.33) 式の第 3 項にある$\dot{\theta}_z$は (3.19) 式の${}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel}$に含まれているため，そのまま代入はできない．そのため，(3.19) 式を (3.33) 式に代入する．

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o1} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{J}_{image}\left({}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel} \right) \\
&\quad + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_1 \\ \boldsymbol{\Lambda}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_z \\
&= \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o1} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{J}_{image}{}^w_v\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \boldsymbol{J}_{image}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehiel}
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_1 \\ \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_z \\
= & \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o1} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}_{o2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{J}_{image}{}_v^w\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\
& + \left(\boldsymbol{J}_{image} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right. \\
& \left. + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right) {}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehicle}
\end{aligned}
\tag{3.38}
$$

ここで,

$$
\boldsymbol{U}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.39}
$$

$$
\boldsymbol{U}_2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}_v^c\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{3.40}
$$

とおくことにする. したがって (3. 38)式は最終的に次のようになる.

$$
\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{\xi}} &= \dot{\boldsymbol{\xi}}_o + \boldsymbol{J}_{image}{}_v^w\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + (\boldsymbol{J}_{image}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{U}_2)\,{}^w\dot{\boldsymbol{r}}_{vehicle} \\
&= \dot{\boldsymbol{\xi}}_o + \boldsymbol{J}_{image}{}_v^w\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot}\dot{\boldsymbol{\theta}}_m + (\boldsymbol{J}_{image}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{U}_2)\,\boldsymbol{J}_{vehicle}\dot{\boldsymbol{\eta}}_v \\
&= \dot{\boldsymbol{\xi}}_o + \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{image}{}_v^w\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot} & (\boldsymbol{J}_{image}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{U}_2)\,\boldsymbol{J}_{vehicle} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}}_m \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_v \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.41}
$$

(3.41) 式を (3.35) 式を用いて表現すると,

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \dot{\boldsymbol{\xi}}_o + \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{3.42}$$

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{image}{}^{w}_{v}\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot} & (\boldsymbol{J}_{image}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{U}_2)\,\boldsymbol{J}_{vehicle} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

となる.

(3.42) 式が作業移動ロボットのモデルになる.

(3.43) 式を見れば明白だが, この関係式には { マニピュレータ+カメラ }, { 移動機構+カメラ }, { 移動機構+マニピュレータ } の関係式を組み合わせたものである. ただし, 各々の動作が互いに影響を及ぼすことを考慮した項が増した形式になっている.

第 4 章

作業移動ロボットの制御則の導出について

本研究で検討を行なうビジュアルサーボ問題を設定し, その問題を解くための制御則の提案を行なう.

4.1 作業移動ロボットのビジュアルサーボ問題の設定

本研究でのビジュアルサーボ問題の仮定は以下の通りである.

- カメラフレームΣ_cの平面と対象フレームΣ_{obj}の平面は視線方向の距離 Z_cで離れている. ただし、Z_cは既知とする.
- カメラと対象物は X_c, Y_c軸の並進運動, 視線方向である Z_c 軸を中心とする回転運動を行なう.
- 対象上にある特徴点はすべて対象フレームΣ_{obj}の平面上にあり, 特徴点同士の相対位置は変化しない. つまり, 対象物は剛体とする.
- 対象物はベルトコンベアなどの搬送機器の上に乗って移動する. このため, 対象物の運動パラメータ $\{a_o, b_o, c_o, \omega_{o1}, \omega_{o2}, \omega_{o3}\}$ は搬送機器の運動パラメータと同じになる.

これらを図で表したものを図 4.1に示す.

次に, ビジュアルサーボの例題として図 4.2のような作業移動ロボットを考える.

移動機構は 2 つの駆動輪と 1 つのキャスタ (2 駆動輪 1 キャスタ) の構造を持つ自律移動型であり, x-y平面を移動するものと考えることにする. 水平面に x-y平面を持つフレーム

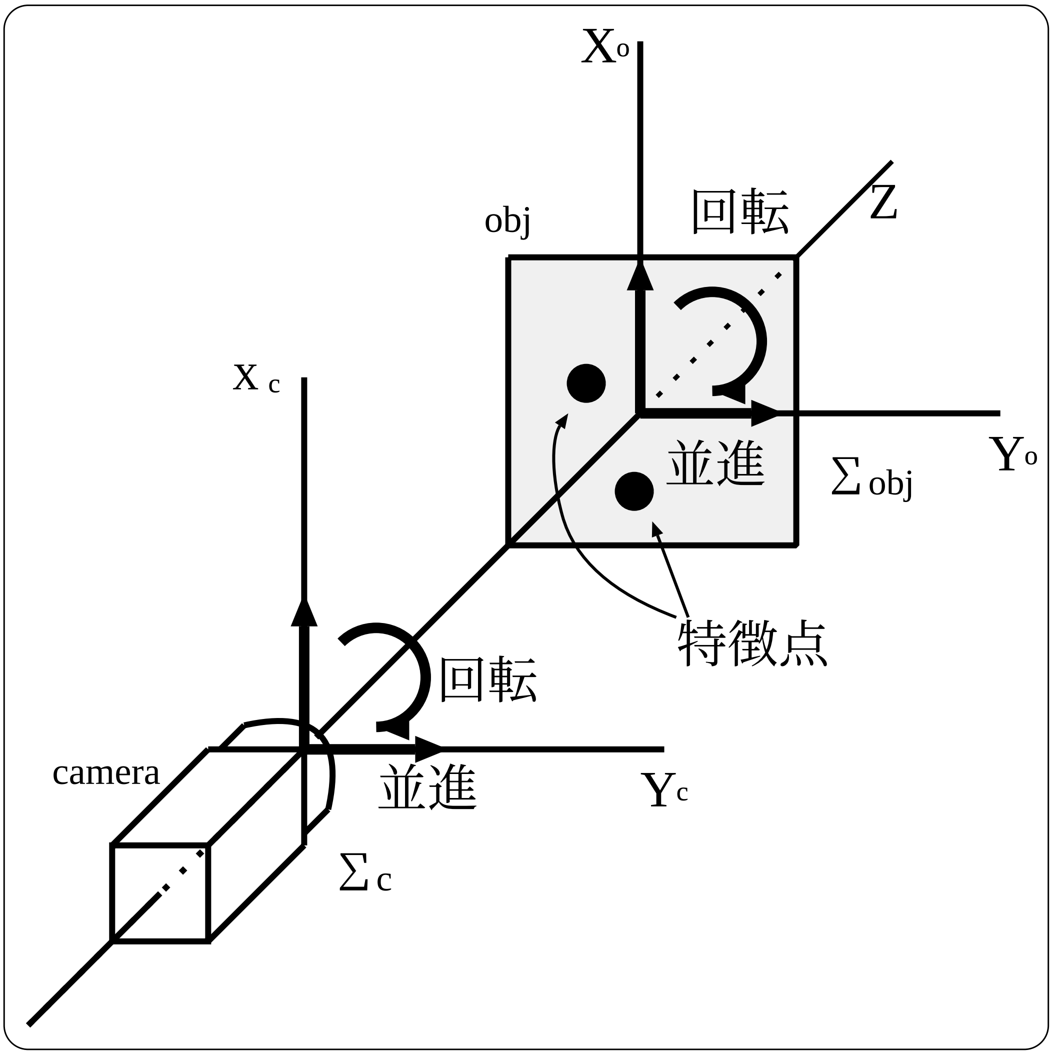

図 4.1: ビジュアルサーボ問題の設定

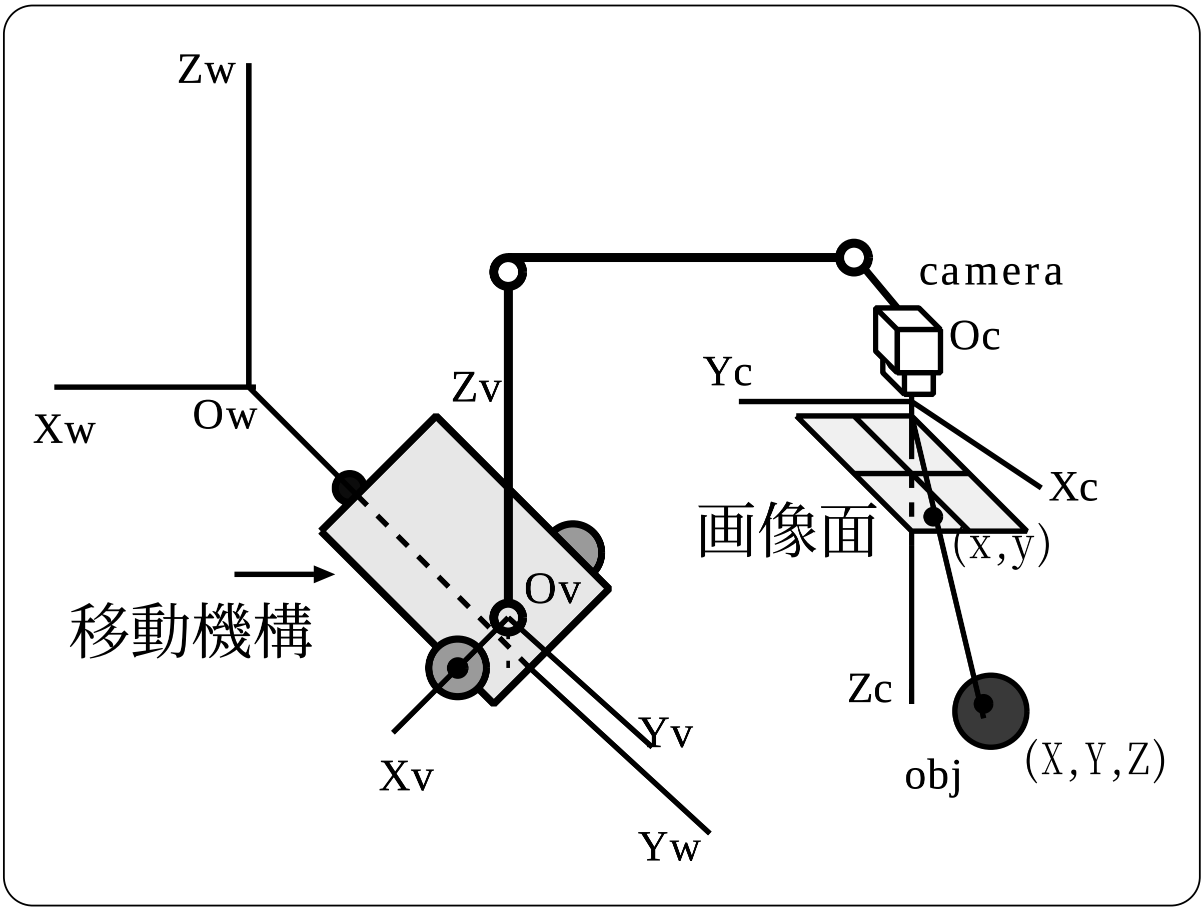

図 4.2: 作業移動ロボットの概略図

Σ_wをおき, これを作業移動ロボットの基準フレームとする. 移動方向を y軸, 車輪方向を x 軸とし車輪間の中点に移動機構の基準フレームΣ_vを設定する. マニピュレータの基準フレームは移動機構の基準フレームと同じ位置に置き, マニピュレータの基準フレームも同じΣ_vとする. カメラはマニピュレータの手先効果器に取り付けられ, カメラにはカメラフレームΣ_cを設置する. ここで, Σ_cの Z軸の向きはΣ_wとは逆になっていることに注意する.

対象物は移動機構が移動する x-y平面と同じ平面を移動することにする. ただし, 対象物はある搬送機器 (ベルトコンベアなど) の上にのって移動するものとし, その移動速度は既知とする.

さらに, 可操作性の考えを導入し予期せぬ外乱や未知の環境に対して備えられるように, マニピュレータが常に任意の方向へ移動することができるようにする. つまり特異姿勢回避を行なうということになる.

4.2 マニピュレータの特異姿勢とは

マニピュレータの制御を行なうにあたって, マニピュレータが特異姿勢の近傍を通ったときに起きる問題がよく知られている. なぜなら, ヤコビアンの逆行列を使う制御アルゴリズムは特異姿勢の近傍では逆行列が取れず実現できない. 一般的なマニピュレータの特異姿勢は 2 種類存在する.

例として 2 自由度マニピュレータの特異姿勢を図 4.3に示す. マニピュレータが作業領域内で 2 つの軸が一直線に重なったとき, マニピュレータが作業領域の境界に達したときに特異姿勢になる. 前者は図 4. 3の A, 後者は Bである. 図 43 の A, Bの姿勢のとき, 関節速度をどのように与えても手先速度を座標原点 Oと手先を結ぶ直線方向には向けられない. したがって, その方向には手先を動かせないことになる.

任意に動く対象物のビジュアルサーボを行なう場合, 任意のアクチュエータに極端に大きい関節速度を要求されることがないようにしなければならない. なぜなら, 対象物の将来の動きを予測することは難しく, わかったとしても不正確にしかわからない. そのため, 対象物がどの方向に移動してもカメラが追従できるように, どの方向にでも動作可能なようにマニピュレータの形状を維持しなければならない. これはつまり, マニピュレータを特異姿勢の近傍に近付けなければよいことになる.

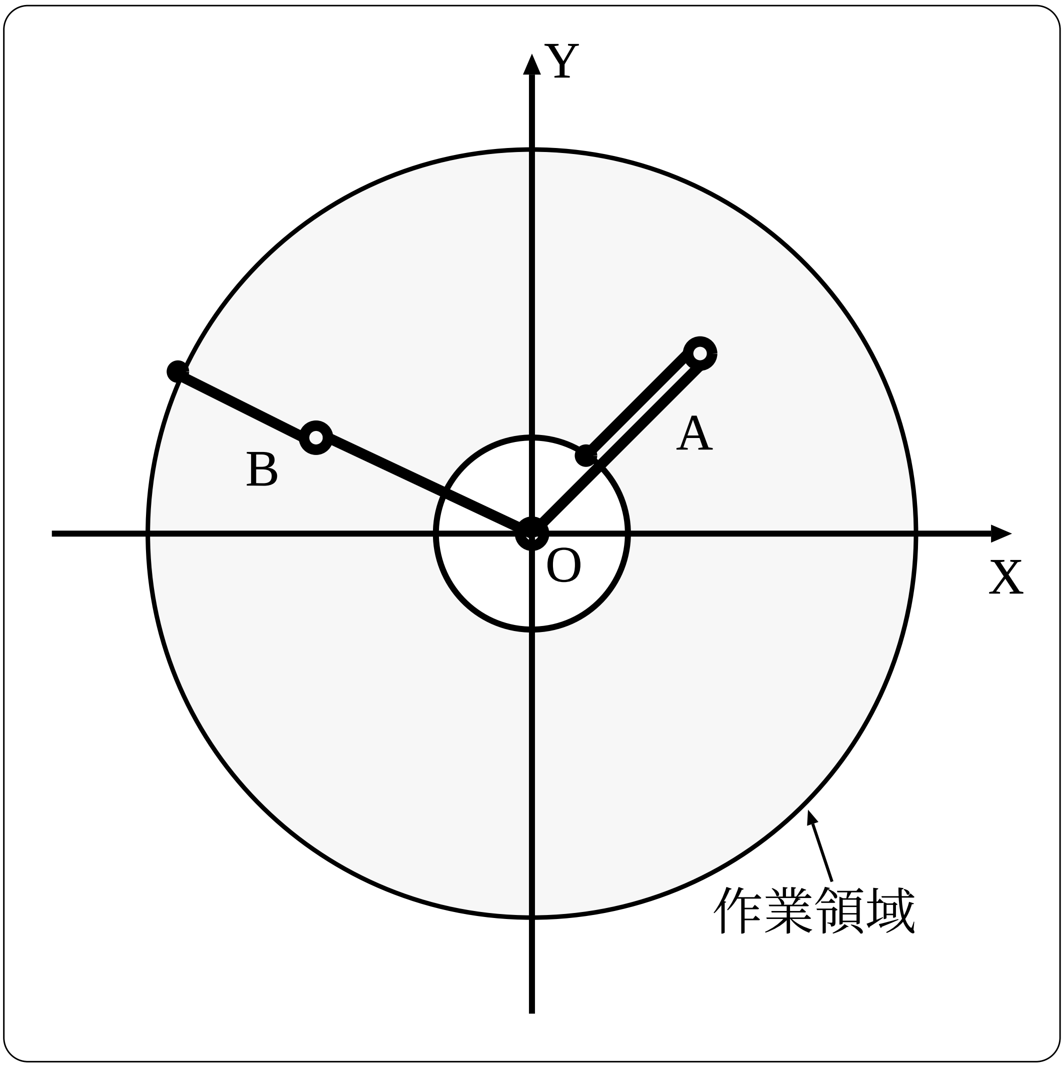

図 4.3: 2 自由度マニピュレータの特異姿勢

4.3　制御則の導出

画像データから関節角速度ベクトルを求める本研究の問題である作業移動ロボットの制御入力$\boldsymbol{u}$を (3.42) 式を基に, 次のように定める [1][2][3][2].

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u} &= \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ &= \boldsymbol{J}^{\dagger}\left(-\dot{\boldsymbol{\xi}}_o - \boldsymbol{K}_{\xi}\left(\boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\xi}_d\right)\right) \\ &\qquad + \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{J}\right)\boldsymbol{K}_w \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_{mm} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.1}$$

$\boldsymbol{K}_{\xi}$　:　位置ゲイン

$\boldsymbol{K}_w$　:　可操作度ゲイン

ここで, 本研究は作業移動ロボットの移動機構も含めてマニピュレータとみなしているので$\boldsymbol{J}$は冗長マニピュレータ $(m < n)$ のものになると考える. したがって, (4.1) 式の$\boldsymbol{J}^{\dagger}$は$\boldsymbol{J}$の疑似逆行列となる [9][10].

4.4　可操作度を用いた評価関数の導出

(4.1) 式の$\boldsymbol{W}_{mm}$はマニピュレータの特異姿勢回避を行なうための評価関数である.

マニピュレータの特異姿勢回避を行なうに当たって, マニピュレータの形状測定に可操作度を用いることにする [15][3][16].

マニピュレータの腕姿勢$\boldsymbol{\theta}$における可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ は次の性質を持つ.

$$w(\boldsymbol{\theta}_m) = \sqrt{\det \boldsymbol{J}_{robot}(\boldsymbol{\theta}_m)\boldsymbol{J}_{robot}(\boldsymbol{\theta}_m)^T} \tag{4.2}$$

ただし, 関節角ベクトル$\boldsymbol{\theta}_m \in \mathcal{R}^n$ の個数と手先の速度$\boldsymbol{P} \in \mathcal{R}^m$の個数が等しい場合,

$$w(\boldsymbol{\theta}_m) = |\det(\boldsymbol{J}_{robot}(\boldsymbol{\theta}_m))| \tag{4.3}$$

となる.

例えば, 図 4.3に示すようなリンク 1 の長さを l_1, リンク 2 の長さを l_2の 2 自由度マニピュレータを考える. このときのロボットヤコビアンは次式のようになる.

$$\boldsymbol{J}_{robot} = \begin{bmatrix} -l_1\sin(\theta_1) - l_2\sin(\theta_1+\theta_2) & -l_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ l_1\cos(\theta_1) + l_2\cos(\theta_1+\theta_2) & l_2\cos(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

ゆえに, 可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ は,

$$w(\boldsymbol{\theta}_m) = l_1 l_2 |\sin(\theta_2)| \tag{4.5}$$

となる. (4.5) 式の可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ は l_1, l_2, θ_1 の値に無関係に無関係に $\theta_2 = \pm 90°$ のときマニピュレータは最適姿勢になる. $l_1 = 1.00e+00$ $l_2 = 5.00e-01$ $\theta_2 = 0 \sim 180°$] のときの可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ の変化を図 4.4に示す. また, 図 2.2で使用したマニピュレータの可操

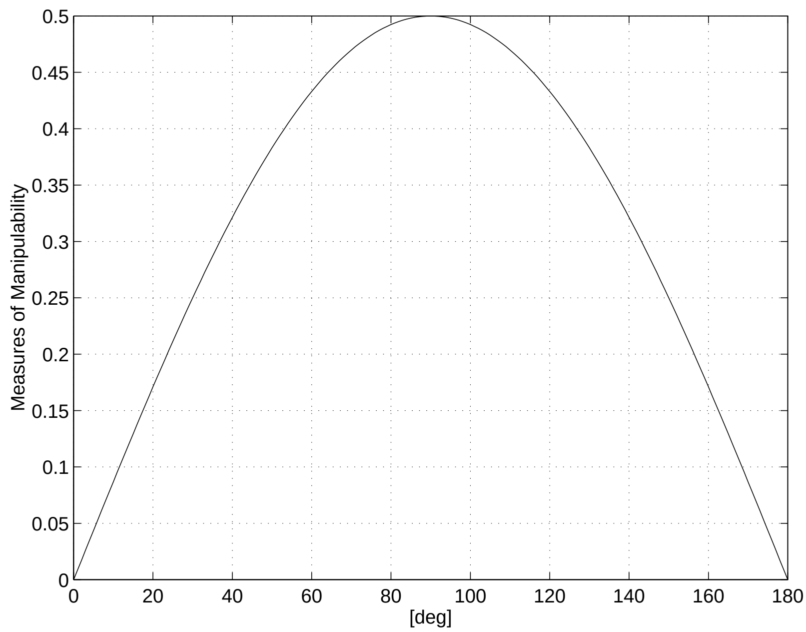

図 4. 4: 2 自由度マニピュレータの可操作度 (1)

作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ の変化を図 4. 5に示す. 作業範囲外に対象物が近付くにしたがい可操作度の値が小さくなり, マニピュレータが特異姿勢になるとマニピュレータの動作が発散していることがわかる. ゆえに, この可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ を最大になるようにマニピュレータの腕姿勢を制御すればよい.

可操作度を用いた評価関数として, 可操作度 $w(\boldsymbol{\theta}_m)$ を関節角ベクトルで偏微分した $\boldsymbol{W}_{mm}$ を使用することにする.

$$\boldsymbol{W}_{mm} = \frac{\partial w(\boldsymbol{\theta}_m)}{\partial \boldsymbol{\theta}_m} \tag{4.6}$$

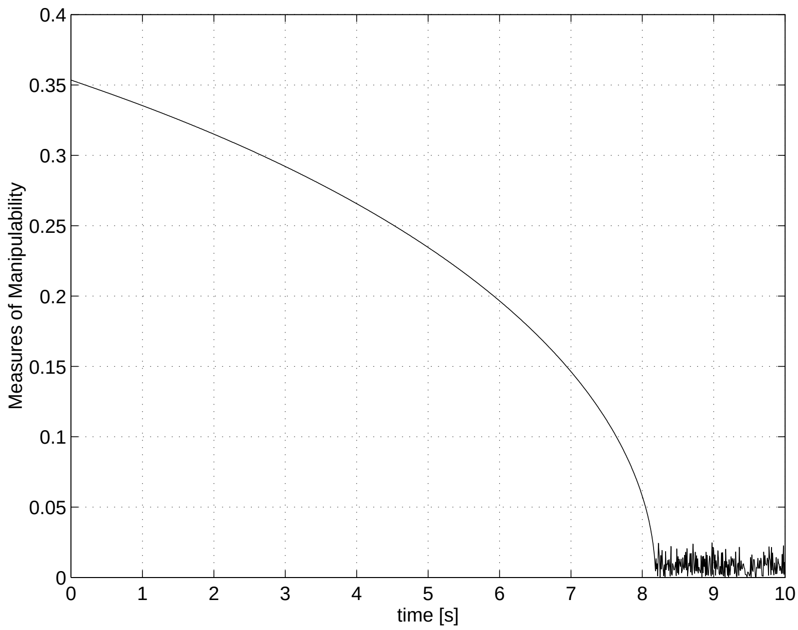

図 4.5: 2 自由度マニピュレータの可操作度 (2)

第 5 章

作業移動ロボットのシミュレーション

図 4.2に示す作業移動ロボットのシミュレーション行なう. そのため, 各関係式の数値を次に示す.

5.1 移動機構の関係式の設定

図 5.1に示すように, 移動機構は 2 つの駆動輪と 1 つのキャスタ (2 駆動輪 1 キャスタ) の構造を持つ自律移動型であり, x-y平面を移動するものと考えることにする. 表 51 に特徴変数を示す.

表 51: 2 駆動輪 1 キャスタの特徴変数

Wheels	α_v	β	l_v
$1f$	0	0	L_v
$2f$	π	0	L_v
$3c$	$\frac{3\pi}{2}$	−	L_v

拘束式である, (3. 6)式, (3. 7)式から各変数は次のようになる.

$$\boldsymbol{C}_{11} = \begin{bmatrix} C_{1f} \\ C_{1c}(\beta_{c3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & L_v \\ 0 & -1 & L_v \\ \cos\beta_{c3} & \sin\beta_{c3} & L_v\cos\beta_{c3} \end{bmatrix} \tag{5. 1}$$

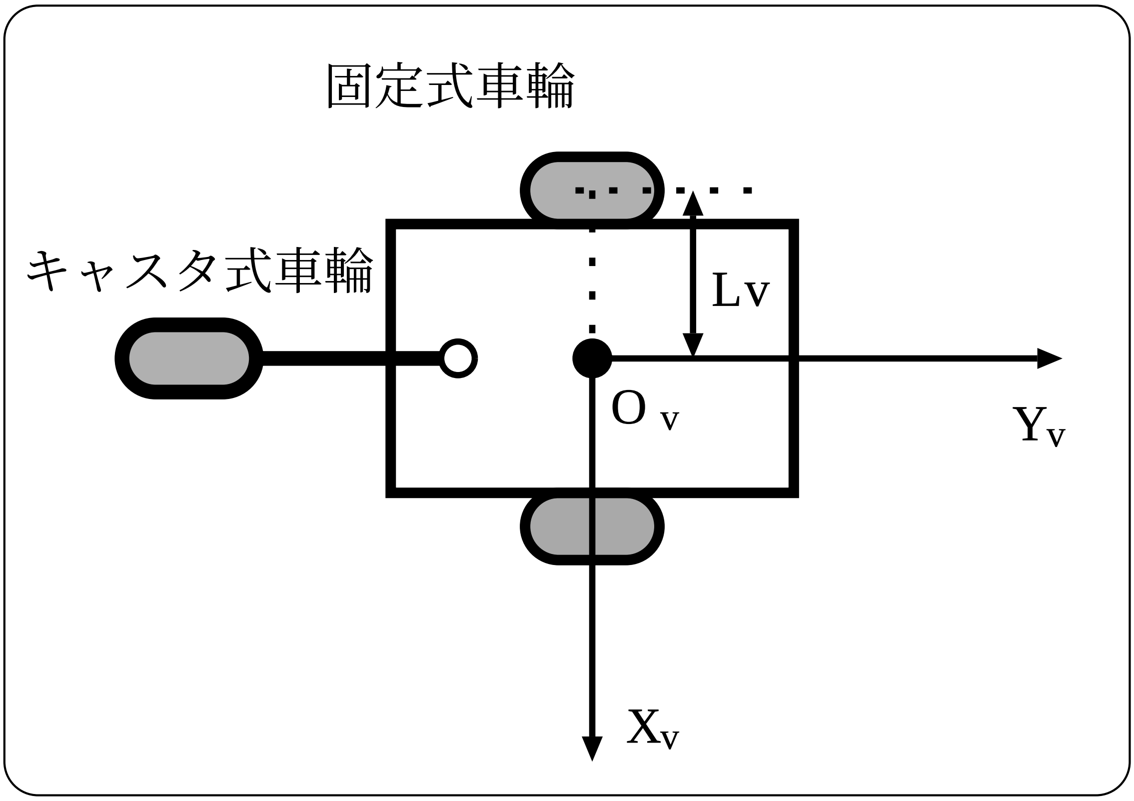

図 5.1: 2 駆動輪 1 キャスタ

$$\boldsymbol{C}_{12} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

$$\boldsymbol{C}_{21} = \begin{bmatrix} C_{21f} \\ C_{21c}(\beta_{c3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ \sin\beta_{c3} & -\cos\beta_{c3} & L_v \sin\beta_{c3} \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{C}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

(3.6)式, (3.7)式, (5.1)式, (5.2)式, (5.3)式, (5.4)式から$\dot{\boldsymbol{\theta}}_v$の各成分について解くと(3.12)式は次式のように表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_z & 0 \\ \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_{v1} \\ \dot{\eta}_{v2} \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

ここで, $\dot{\eta}_v$はX_vに沿ったロボットの速度成分, $\dot{\eta}_{v2}$はZ_vまわりの旋回速度である.

更に, 移動機構の原点であるO_vの移動速度$\dot{\eta}_{v1}$と旋回速度$\dot{\eta}_{v2}$は左右の駆動輪のことを考慮すると, 次のように表すことができる.

$$\begin{cases} \dot{\eta}_{v1} &= \dfrac{\dot{\eta}_{v1L} + \dot{\eta}_{v1R}}{2} \\ \dot{\eta}_{v2} &= \dfrac{\dot{\eta}_{v1L} - \dot{\eta}_{v1R}}{2L_v} \end{cases} \tag{5.6}$$

(5.6) 式を考慮に入れると, (5.5) 式は次のようになる. [17][21].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{s_{\theta_z}}{2} & -\frac{s_{\theta_z}}{2} \\ \frac{c_{\theta_z}}{2} & \frac{c_{\theta_z}}{2} \\ -\frac{1}{2L_v} & \frac{1}{2L_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_{v1L} \\ \dot{\eta}_{v2R} \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

ゆえに, (5.7) 式が (3.12) 式を表し, $\boldsymbol{J}_{vehicle}$は,

$$\boldsymbol{J}_{vehicle} = \begin{bmatrix} -\frac{s_{\theta_z}}{2} & -\frac{s_{\theta_z}}{2} \\ \frac{c_{\theta_z}}{2} & \frac{c_{\theta_z}}{2} \\ -\frac{1}{2L_v} & \frac{1}{2L_v} \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

である.

5.2　マニピュレータの関係式の設定

5.2.1　ロボットヤコビアン

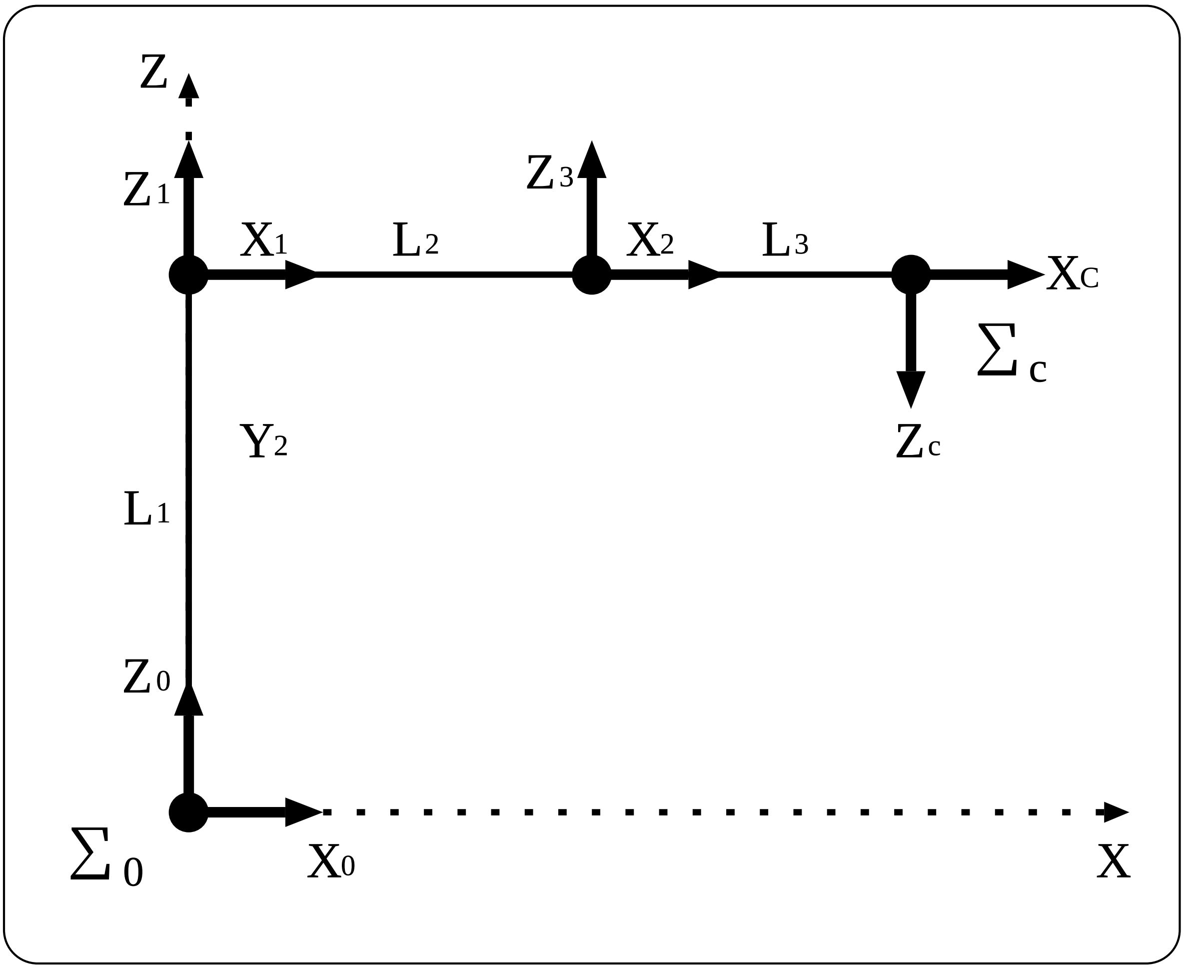

図 5.2: 各関節フレーム

手先効果器にカメラを取り付けるのでカメラフレームΣ_cを定義する．図 52 のようにリンクを設定するとリンクパラメータは次のようになる．

表 5.2: リンクパラメータ (シミュレーション用)

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	L_1	θ_1
2	L_2	0	0	θ_2
c	L_3	π	0	θ_3

表 5.2を基に各同次変換行列${}^{i-1}_{1}\boldsymbol{T}$を求める．そして，各同次変換行列を掛け合わせ，フレームΣ_c のフレームΣ_vに対する座標変換が求まる。

$$
{}^{v}_{1}T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & L_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},
$$

$$
{}^{2}_{c}T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_3 \\ -s\theta_3 & -c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.9}
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{v}_{c}T &= {}^{v}_{1}T{}^{1}_{2}T{}^{2}_{c}T \\
&= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & 0 & L_2c_1+L_3c_{12} \\ \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & -\cos(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & 0 & L_2s_1+L_3s_{12} \\ 0 & 0 & -1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.10}
$$

$$
\begin{aligned}
s_{12} &= \sin(\theta_1+\theta_2) \quad , \\
c_{12} &= \cos(\theta_1+\theta_2)
\end{aligned}
$$

(5.10)式を基に，カメラの並進速度を(a_c, b_c, c_c)，角速度を$(\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3})$とすると，(3.14)式は次のようになる．

$$
\begin{bmatrix} a_c \\ c_c \\ \omega_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(L_2s_1+L_3s_{12}) & -L_3s_{12} & 0 \\ L_2c_1+L_3c_{12} & L_3c_{12} & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{m1} \\ \dot{\theta}_{m2} \\ \dot{\theta}_{m3} \end{bmatrix} \tag{5.11}
$$

ゆえに, $\boldsymbol{J}_{robot}$は次式となる.

$$\boldsymbol{J}_{robot} = \begin{bmatrix} -(L_2 s_1 + L_3 s_{12}) & -L_3 s_{12} & 0 \\ L_2 c_1 + L_3 c_{12} & L_3 c_{12} & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

5.2.2 マニピュレータの関係式

(5.8)式と(5.11)式を用いることで(3.2)式が次のように求まる.

$$\begin{bmatrix} a_c \\ c_c \\ \omega_{c3} \end{bmatrix} = \left[\begin{bmatrix} c\theta_v & -s\theta_v & 0 \\ s\theta_v & c\theta_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{J}_{robot} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{J}_{vehicle} \right] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{m1} \\ \dot{\theta}_{m2} \\ \dot{\theta}_{m3} \\ \dot{\eta}_{v1L} \\ \dot{\eta}_{v2R} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

5.3 カメラの関係式の設定

カメラの運動パラメータを$\{a_c, b_c, c_c, \omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}\}$としたとき, 問題設定の仮定から$c_c = c_o = \omega_{c1} = \omega_{o1} = \omega_{c2} = \omega_{o2} = 0$になる. そして, 関節角速度ベクトルが3個なので特徴点数は2個とする. ゆえに, 特徴点数が2個であることを考慮に入れて(3.3)式を用いる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{o1} \\ \dot{y}_{o1} \\ \dot{x}_{o2} \\ \dot{y}_{o2} \end{bmatrix} + \left[\begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Lambda} {}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}_z) & \boldsymbol{\Lambda} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \\ -\boldsymbol{\Lambda} {}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\theta}_z) & \boldsymbol{\Lambda} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} a_c \\ c_c \\ \omega_{c3} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\Lambda} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \dot{\theta}_z \quad (5.14)$$

ここで, ${}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z)$, ${}^c_v\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})$は同次変換行列を使用して,

$${}^c_w\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_v + \theta_1 + \theta_2 - \theta_3) & \sin(\theta_v + \theta_1 + \theta_2 - \theta_3) \\ \sin(\theta_v + \theta_1 + \theta_2 - \theta_3) & -\cos(\theta_v + \theta_1 + \theta_2 - \theta_3) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$
{}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_3) \\ \sin(\theta_1+\theta_2-\theta_3) & -\cos(\theta_1+\theta_2-\theta_3) \end{bmatrix} \tag{5.16}
$$

となる．ただし，ここで$\boldsymbol{\xi}_{o1} = [x_1 \ \ y_1]^T, \boldsymbol{\xi}_{o2} = [x_2 \ \ y_2]^T$は問題設定から既知とする．

5.4　作業移動ロボットのモデル設定

作業ロボットのモデル作成のための各パラメータを求める．${}^{c}_{w}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}, \theta_z)$ は (5.15) 式，${}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})$ は (5.16) 式である．また，(3.39) 式，(3.40) 式は次式の通りである．

$$
\boldsymbol{U}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -P_{my} \\ 0 & 1 & P_{mx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.17}
$$

$$
\boldsymbol{U}_2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\Lambda}{}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega}) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} {}^{c}_{v}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\omega})^{-1}\boldsymbol{\Lambda}^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{5.18}
$$

(5.17) 式，(5.18) 式から，作業移動ロボットのモデルである (3.42) 式が次式のようになる．

$$
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{o1} \\ \dot{y}_{o1} \\ \dot{x}_{o2} \\ \dot{y}_{o2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{image}{}^{w}_{v}\boldsymbol{R}(\theta_z)\boldsymbol{J}_{robot} & (\boldsymbol{J}_{image}\boldsymbol{U}_1 + \boldsymbol{U}_2)\boldsymbol{J}_{vehicle} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{m1} \\ \dot{\theta}_{m2} \\ \dot{\theta}_{m3} \\ \dot{\eta}_{v1L} \\ \dot{\eta}_{v2R} \end{bmatrix} \tag{5.19}
$$

5.5　シミュレーションの準備

移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボとしての妥当性を確認するために，SPARC Station 上の行列演算ソフトウエアである MATLAB(The MathWorks Inc.) を用いてシミュレーションを行なった．

今回使用したパラメータを表 5.3に示す.

表 5.3　シミュレーションで使用したパラメータ

カメラと対象の特徴点 1 までの距離	Z_1	:	$6.30\ e-01$ [m]
カメラと対象の特徴点 2 までの距離	Z_2	:	$6.30\ e-01$ [m]
アスペクト比	α_c	:	$8.59\ e-01$
焦点距離/ピクセル長	f/s	:	$2.18\ e+03$ [pixel]
リンク 1 の長さ	L_1	:	$1.00\ e+00$ [m]
リンク 2 の長さ	L_2	:	$1.00\ e+00$ [m]
リンク 3 の長さ	L_3	:	$5.00\ e-01$ [m]
移動機構の中心から車輪までの距離	L_v	:	$2.00\ e-01$ [m]
対称物の移動速度 (x 軸)	${}^w\dot{P}_{ox}$	:	$1.00\ e-02$ [m/sec]
対称物の移動速度 (y軸)	${}^w\dot{P}_{oy}$	:	$2.00\ e-02$ [m/sec]
サンプリングタイム	T	:	$1/120$ [sec]
初期関節角度θ_{m1}	θ_{m1}	:	π [rad]
初期関節角度θ_{m2}	θ_{m2}	:	$-\frac{\pi}{4}$ [rad]
初期関節角度θ_{m3}	θ_{m3}	:	$\frac{\pi}{4}$ [rad]

ここで, アスペクト比, 焦点距離/ピクセル長, サンプリングタイムは実際のカメラを基にした値である.

実際に行なったシミュレーションは下記の通りである.

1. $\boldsymbol{K}_\xi$の値を変化させたもの (ただし, $\boldsymbol{K}_w=0$).
   - $\boldsymbol{K}_\xi=\{5.0e+00, 1.0e+01, 1.5e+01\}$
2. $\boldsymbol{K}_\xi$の値は一定で$\boldsymbol{K}_w$の値を変化させたもの.
   - $\boldsymbol{K}_\xi=1.0e+01,\quad \boldsymbol{K}_w=\{5.0e-01, 1.0e+00, 1.5e+00\}$
3. $\boldsymbol{K}_w$の値は一定で$\boldsymbol{K}_\xi$の値を変化させたもの.
   - $\boldsymbol{K}_w=1.0e+00,\quad \boldsymbol{K}_\xi=\{5.0e+00, 1.5e+01\}$

4. 移動機構の車輪の移動誤差を考慮した場合のもの.

   - $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$, $\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+00$

5. イメージヤコビアンが一定の場合のもの.

   - $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$, $\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+00$

6. イメージヤコビアンが一定で, 車輪の移動誤差を考慮した場合のもの.

   - $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$, $\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+00$

移動機構で一番誤差が出やすいのは車輪の移動誤差である. そのため, 移動機構の移動距離を${}^w\boldsymbol{P}_v = [{}^wP_{vx}, {}^wP_{vy}]^T$とした場合,

$$
{}^w\boldsymbol{P}_v = \begin{bmatrix} 1+K_m M_{verr} & 0 \\ 0 & 1+K_m M_{verr} \end{bmatrix} {}^w\boldsymbol{P}_v \qquad (5.20)
$$

$$
|K_m| \leq 1
$$

とし, (5.20)式で車輪の移動誤差を表すことにする. ここで, シミュレーション 4 では $M_{verr} = \{0.1e+00, 0.2e+00, 0.3e+00\}$, シミュレーション 6 では $M_{verr} = 0.2e+00$とする. イメージヤコビアンが一定というのは, 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の距離がある程度接近している場合は, イメージヤコビアンが一定値であってもビジュアルサーボを行なうという研究結果 [13] が報告されているので, それを用いた.

また, 本シミュレーションでは画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差を次式で表すことにする.

$$
err = \frac{\sqrt{(x_1-x_{d1})^2+(y_1-y_{d1})^2+(x_2-x_{d2})^2+(y_2-y_{d2})^2}}{4} \qquad (5.21)
$$

5.6 シミュレーション結果

シミュレーション 1 の$\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+01$, $\boldsymbol{K}_w = 0$ の計算結果を図 5.3∼ 5.7に示す．また, シミュレーション 2 の$\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+01$, $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$の結果を図 5.8∼5.12, シミュレーション 4 の$\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+01$, $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$, $Mverr = 0.2$ の結果を図 5.13∼5.17, シミュレーション 5 の$\boldsymbol{K}_\xi = 1.0e+01$, $\boldsymbol{K}_w = 1.0e+00$イメージヤコビアン一定の結果を図 5.18∼5.22に示す．図 5.3, 5.8, 5.13, 5.18は(5.21)式で表される評価関数を使った画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差 (実線) である．図 5.4, 5.9, 5.14, 5.19 は可操作度 (実線) である．そして, 図 5.5, 5.10, 5.15, 5.20 は基準フレームΣ_wの対象物 (実線), カメラ (破線), 移動機構 (一点鎖線) の位置を示す．

可操作性を考慮していない図 5.3∼ 5.7は, 対象物とカメラの位置を見てもわかるように画像面上の特徴点の誤差は小さい．可操作度の値は可操作性を考慮していないので, ここでは序々に小さくなっている．これに対し可操作性を考慮した図 5.8∼ 5.12では可操作度の値が時間の経過とともに増加していくことがわかる．可操作度の値の増加率が大きい時は誤差も多くなるが可操作度の増加率が定常に近付くにしたがい徐々に誤差も減少していくことがわかる．X軸に関する誤差が大きくなっているのは, 移動機構の拘束から X 軸方向には移動しにくいからである．そのため移動機構の移動距離の増加率が大きいほどX軸に関する誤差が大きくなっているものと考えられる．また, 可操作性を考慮していないものに較べて可操作度の値を増加させるサブタスクがマニピュレータに課せられてるので, そのぶん移動機構の移動距離が大きくなってることがわかる．

車輪の移動誤差を考慮した図 5.13∼ 5.17において誤差などに細かい振動が見られるが, ほぼ図 5.8∼ 5.12と同じような結果となった．これは, ビジョンシステムを用いることによって, 不確で予想できない誤差を補正しているものと考えられる．

イメージヤコビアン一定の場合の図 5.18∼ 5.22では初期状態で画像面上の特徴量の目標位置ベクトルと特徴量ベクトルは同位置, つまり誤差が零の状態からビジュアルサーボを行なっている．そのため, 対象物が移動しても画像面上の特徴量の目標位置ベクトルと特徴量ベクトルがある程度接近している状態になる．ゆえに, 結果的には図 5.8∼ 5.12と同じような結果となり, 誤差が零の状態からビジュアルサーボを行なう場合にはイメージヤコビアンを一定にし, 計算量を押えることができることが確認できた．

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 0$

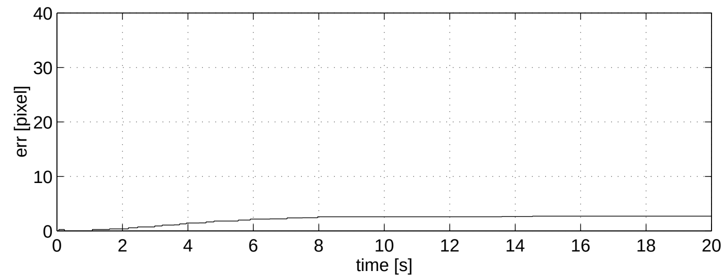

図 5.3: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

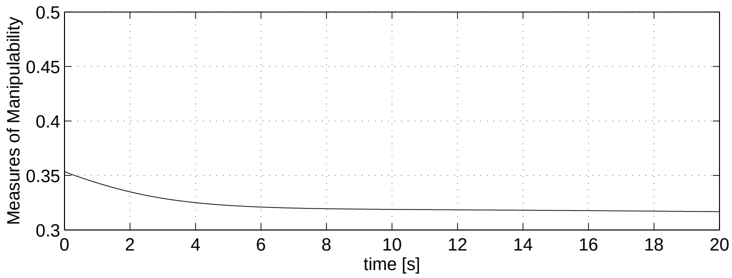

図 5．4可操作度

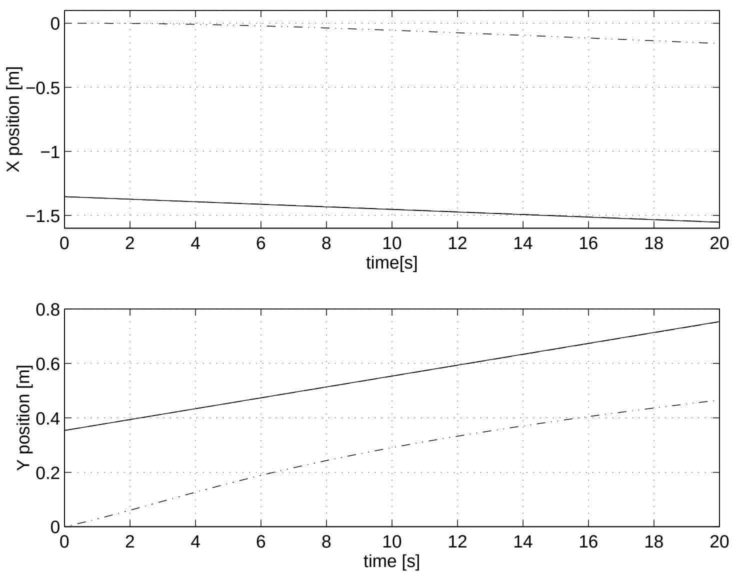

図 5．5対称物, カメラ, 移動機構の位置

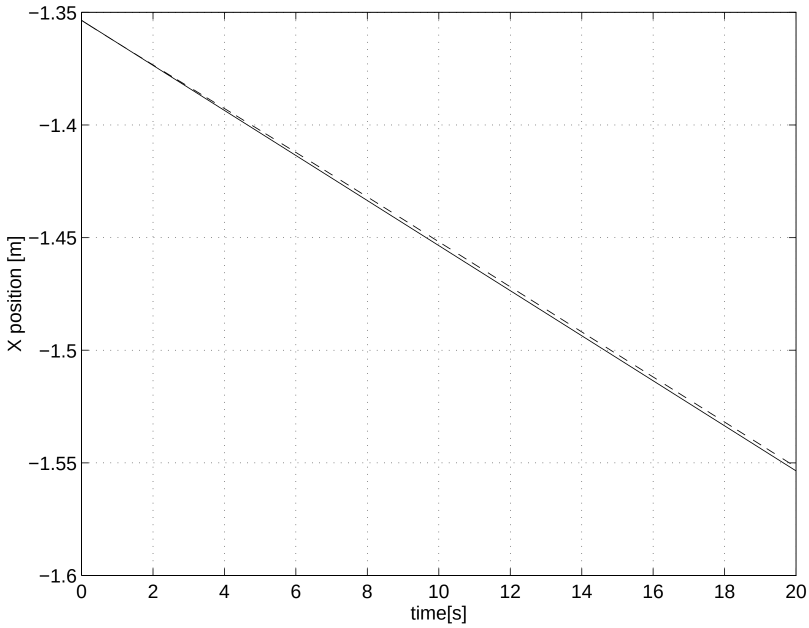

図 5.6: 対称物, カメラの位置 (X) 軸

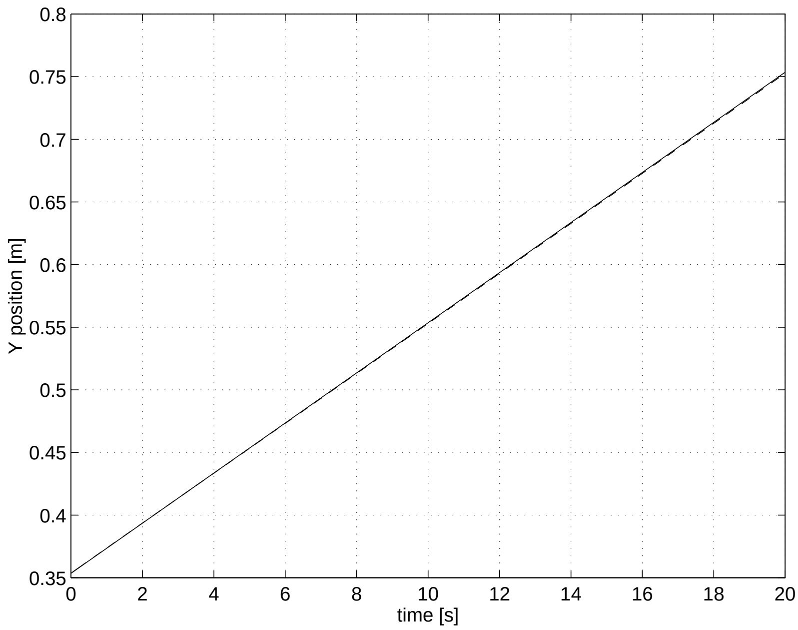

図 5. 7: 対称物, カメラの位置 (Y) 軸

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1$

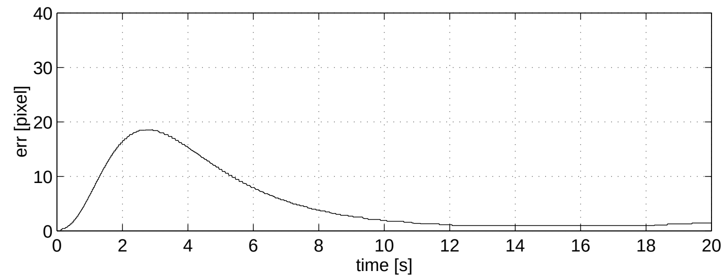

図 5.8: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

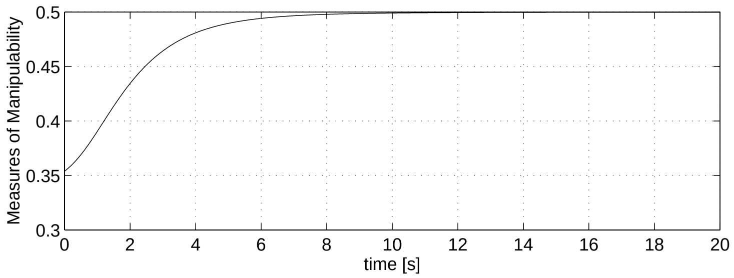

図 5. 9: 可操作度

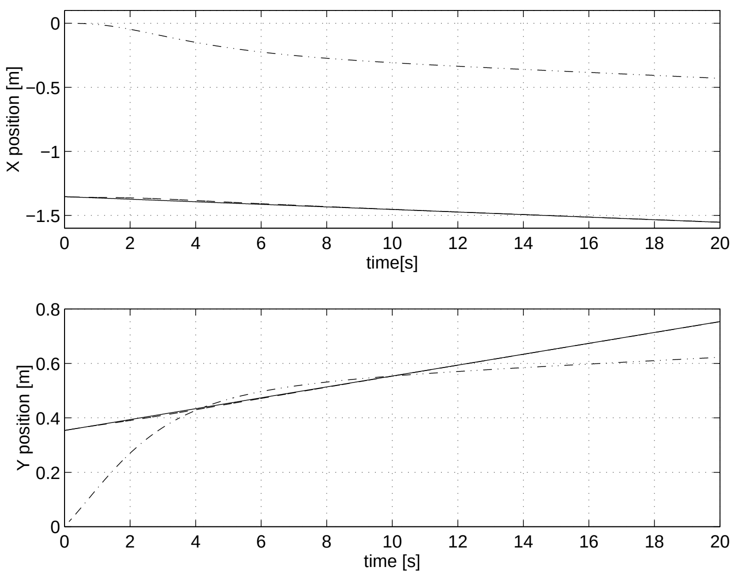

図 5. 10: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

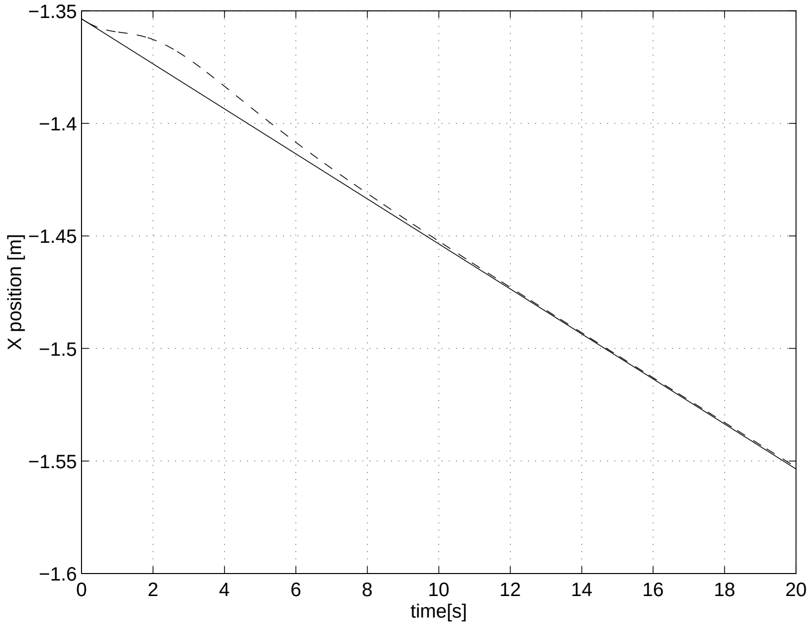

図 5.11: 対称物, カメラの位置 (X) 軸

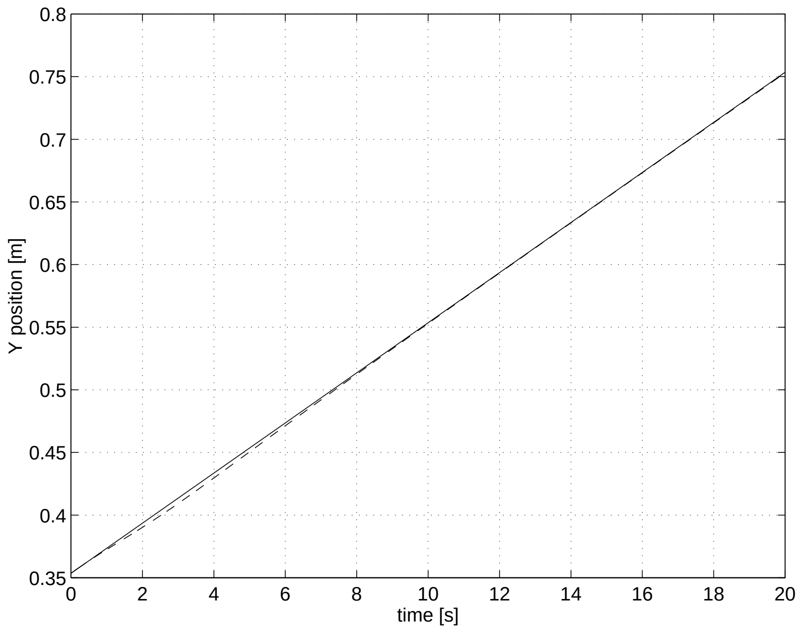

図 5. 12: 対称物, カメラの位置 (Y) 軸

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1$,$M_{verr} = 0.2$

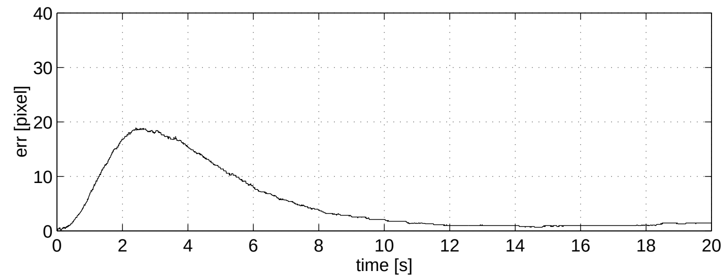

図 5.1 3: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

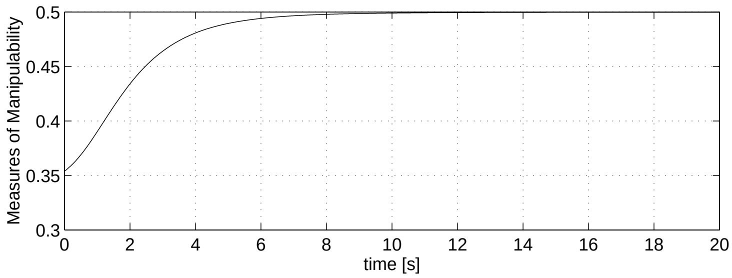

図 5. 14: 可操作度

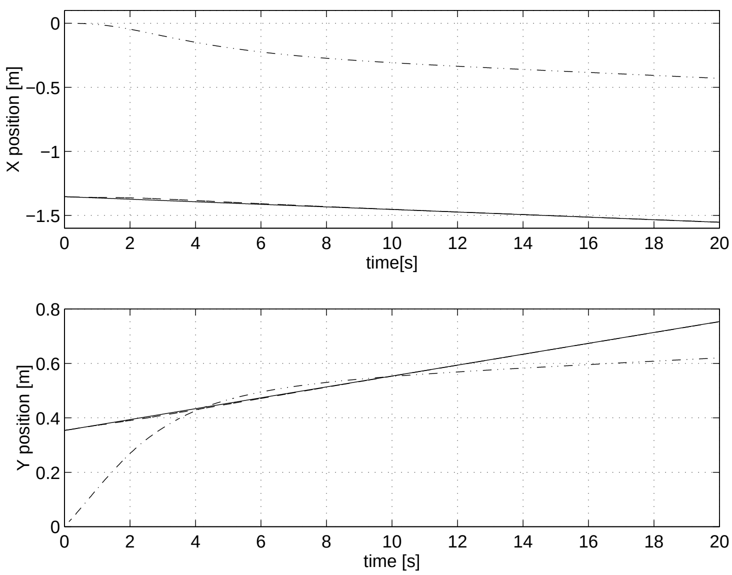

図 5. 15: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

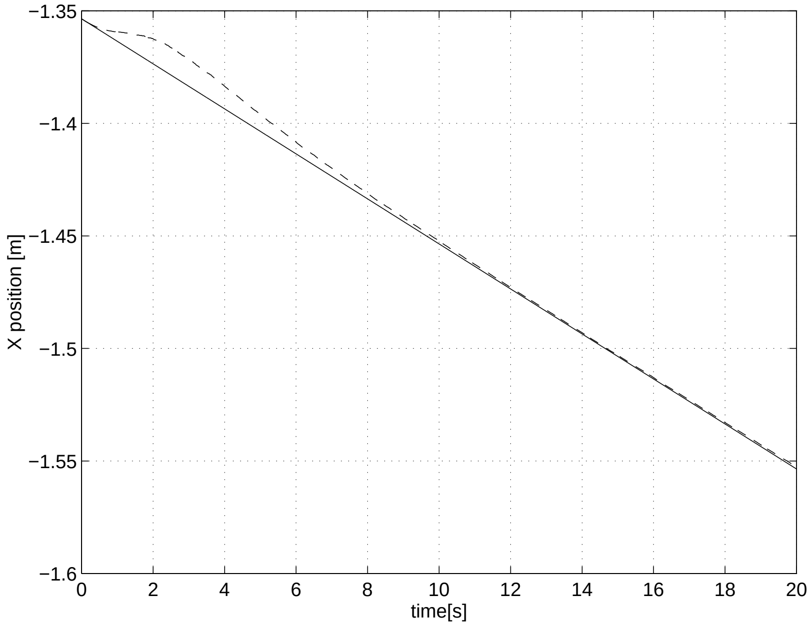

図 5.16: 対称物, カメラの位置 (X) 軸

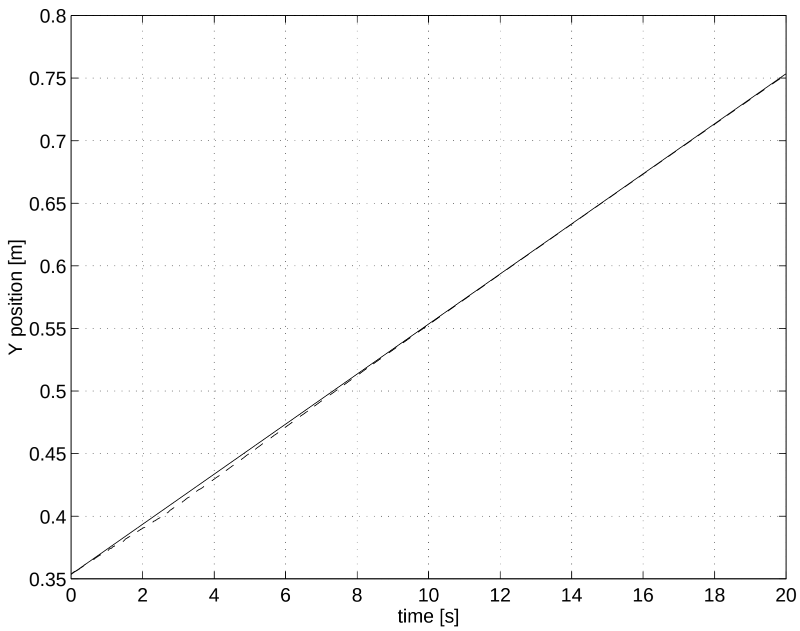

図 5. 17: 対称物, カメラの位置 (Y) 軸

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1$,イメージヤコビアン一定

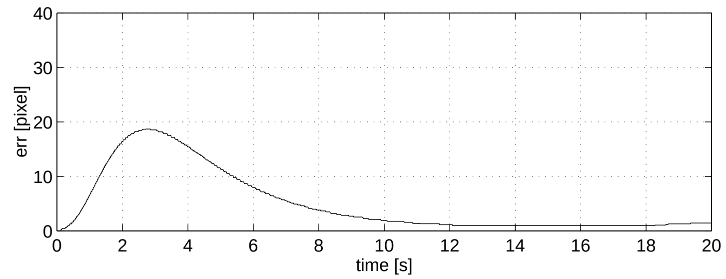

図 5.18: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

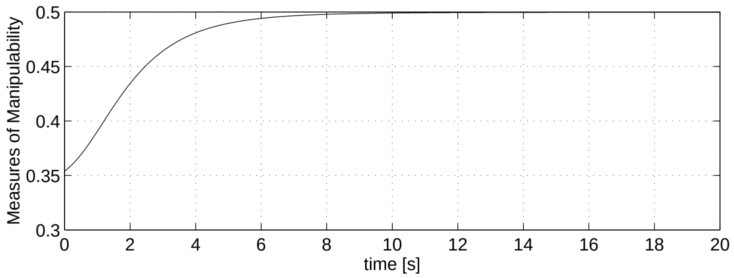

図 5. 19: 可操作度

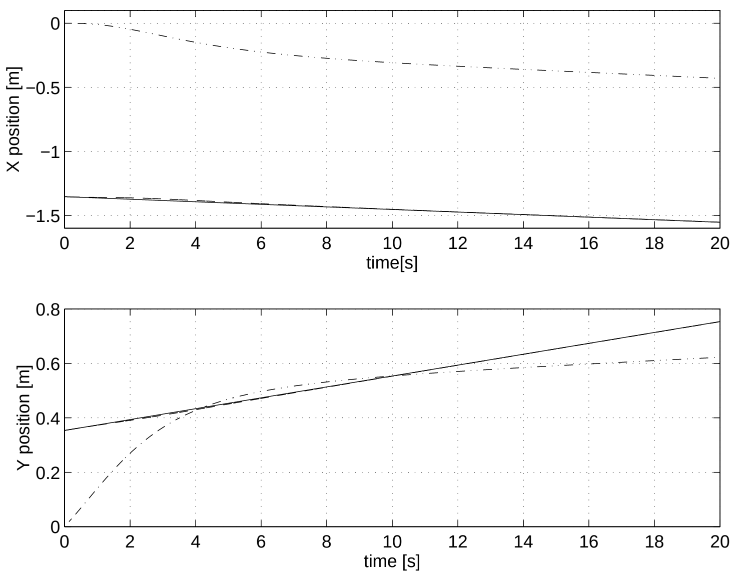

図 5. 20: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

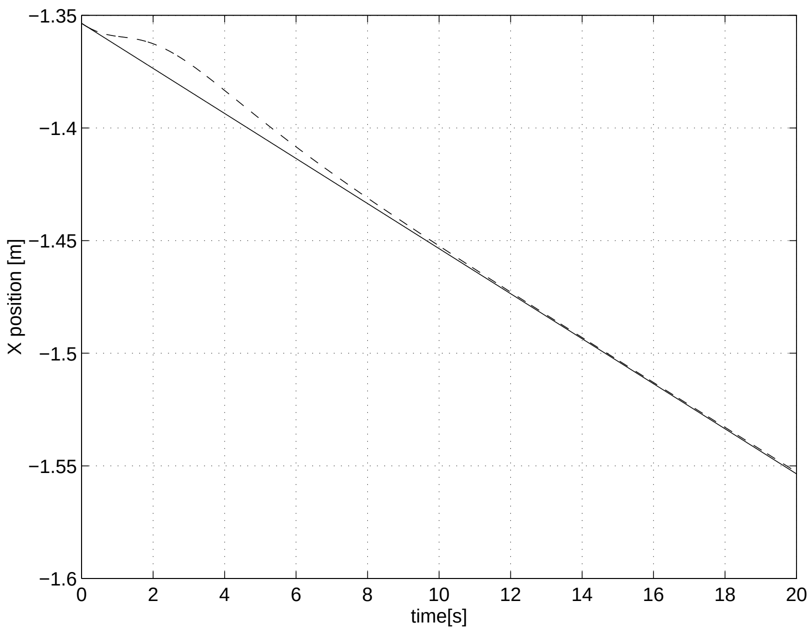

図 5.21: 対称物, カメラの位置 (X) 軸

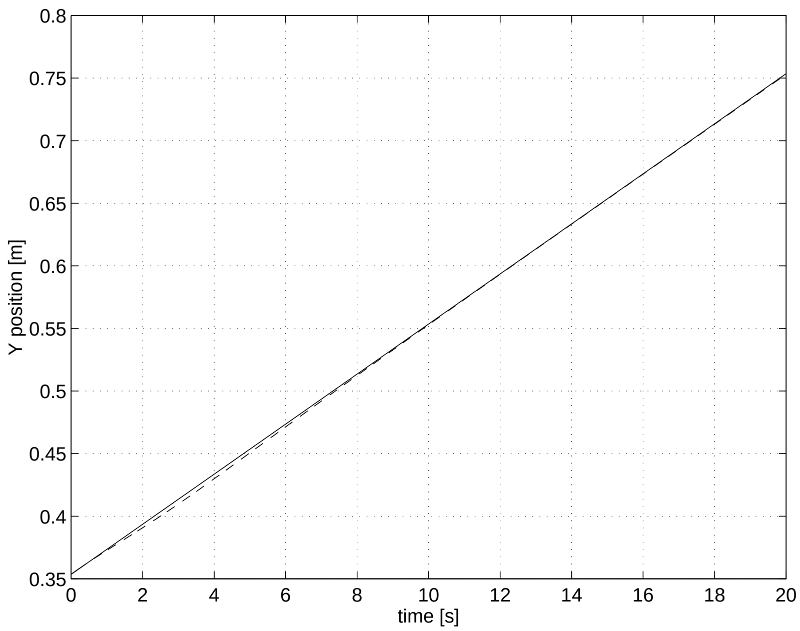

図 5. 22: 対称物, カメラの位置 (Y) 軸

ここでは各パラメータを変動させたときの比較のためのシミュレーション結果を示す. 図 5.23, 5.26, 5.29, 5.32, 5.35, 5.38, 5.41, 5.44, 5.47, は (5.21) 式で表される評価関数を使った画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差 (実線) である. 図 5.24, 5.27, 5.30, 5.33, 5.36, 5.39, 5.42, 5.45, 5.48, は可操作度 (実線) である. 図 5.25, 5.28, 5.31, 5.34, 5.37, 5.40, 5.43, 5.46, 5.49, は基準フレームΣ_wの対象物 (実線), カメラ (破線), 移動機構 (一点鎖線) の位置を示す.

- $\boldsymbol{K}_{\xi} = 5$, $\boldsymbol{K}_{w} = 0$

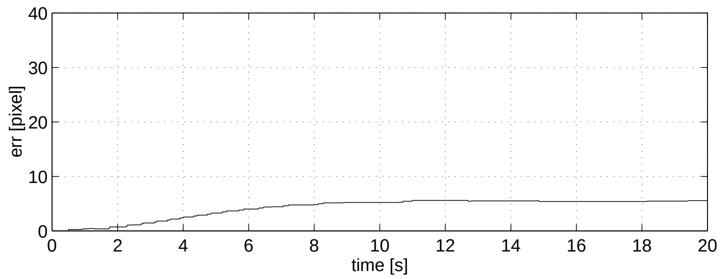

図 5.23: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

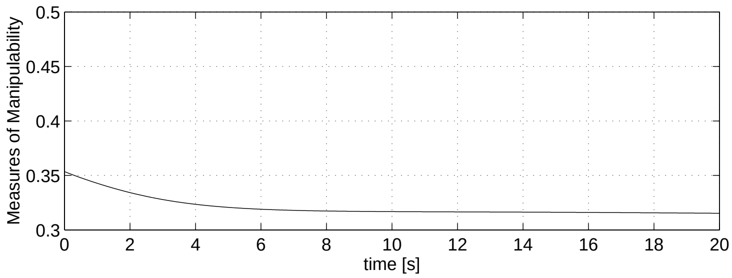

図 5. 24: 可操作度

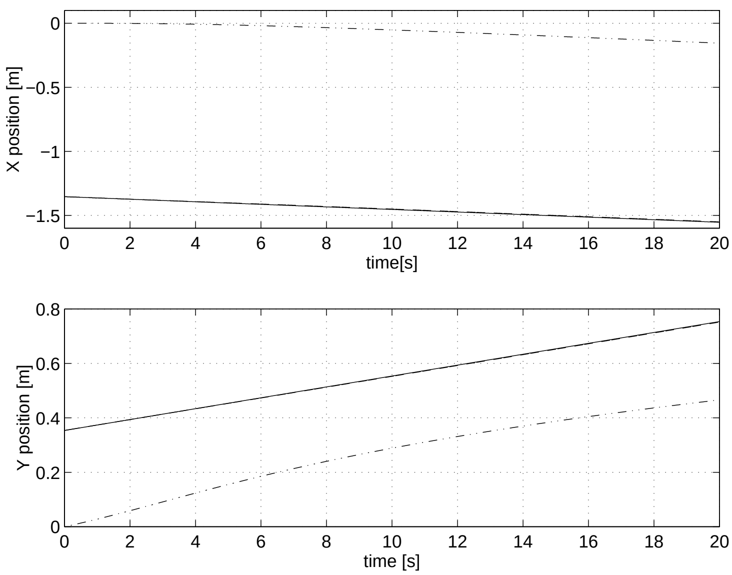

図 5. 25: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_\xi = 15$, $\boldsymbol{K}_w = 0$

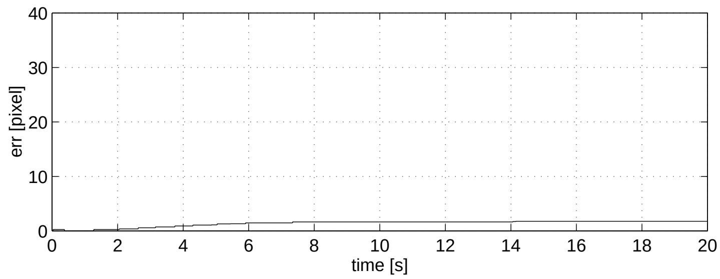

図 5.26: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

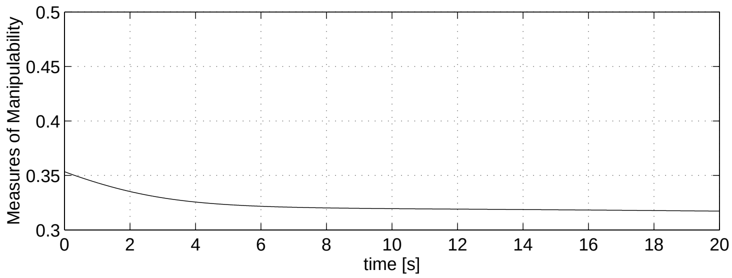

図 5. 27: 可操作度

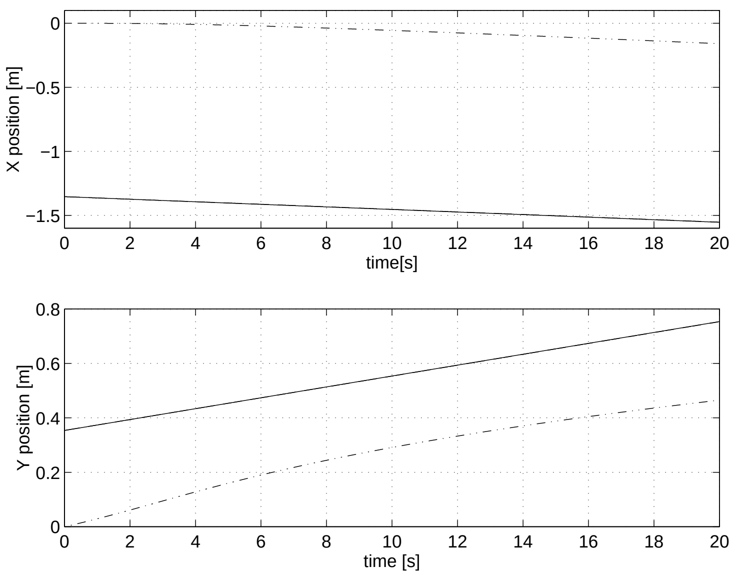

図 5. 28: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_{\xi} = 10$, $\boldsymbol{K}_{w} = 0.5$

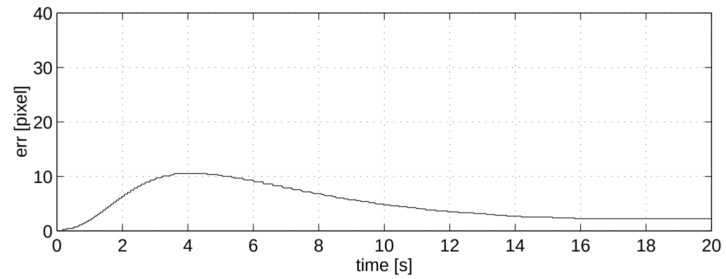

図 5 .29: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

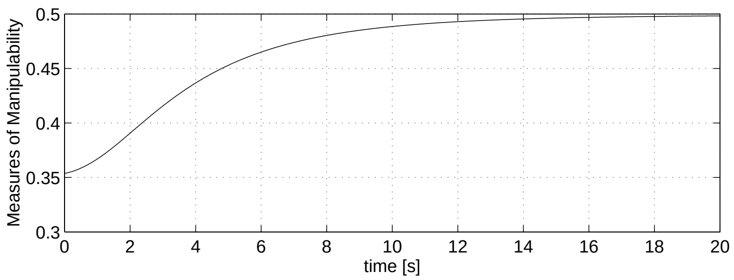

図 5. 30: 可操作度

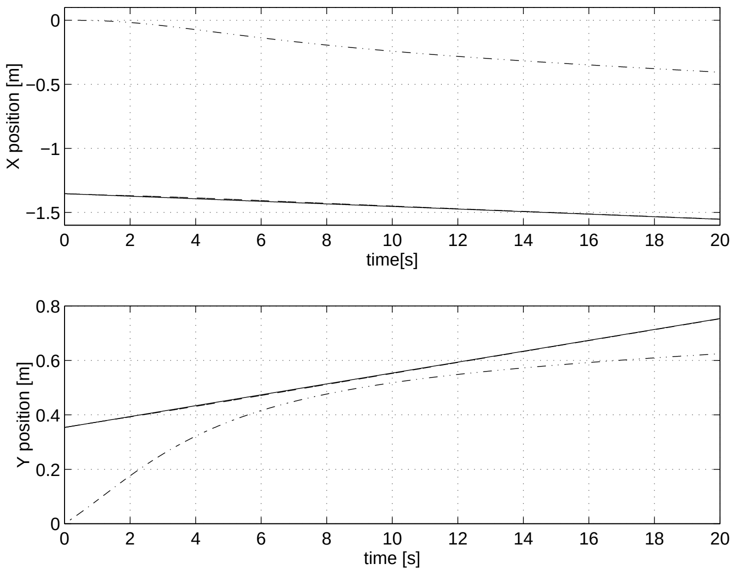

図 5. 31: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1.5$

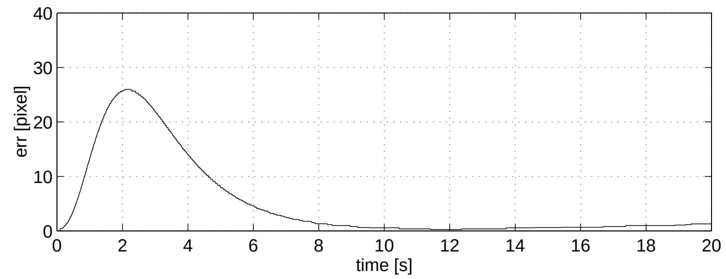

図 5 .32: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

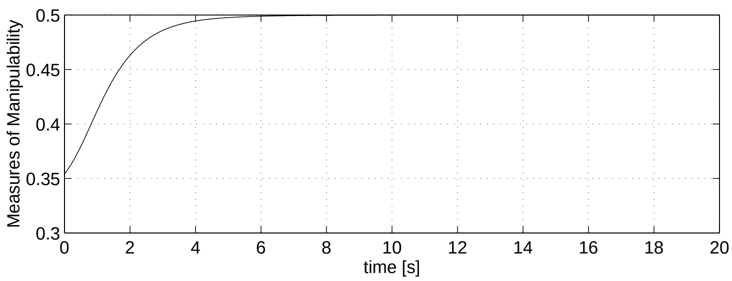

図 5. 33: 可操作度

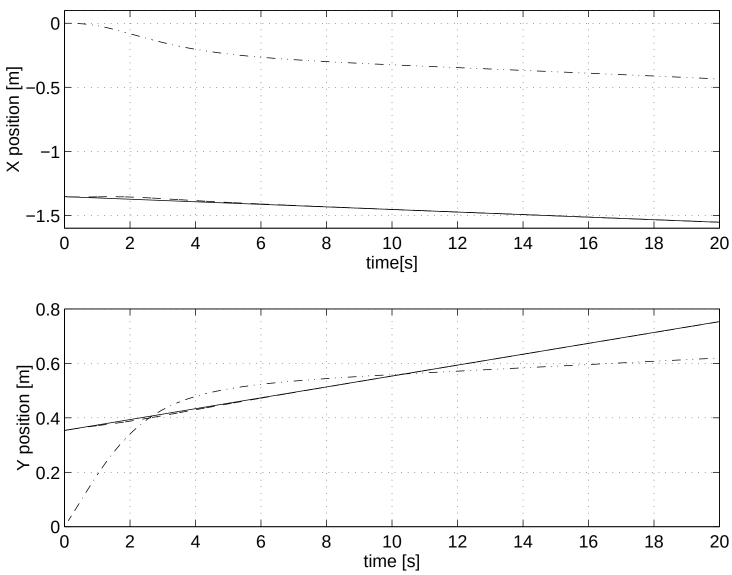

図 5. 34: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_{\xi} = 15$, $\boldsymbol{K}_{w} = 1$

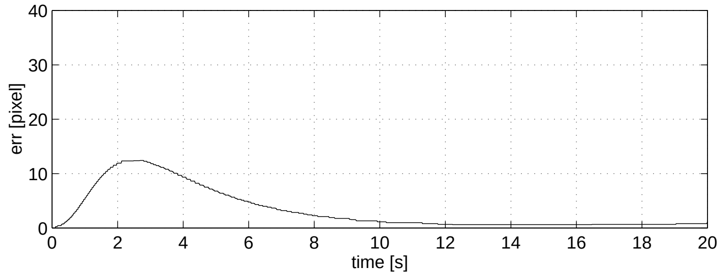

図 5.35: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

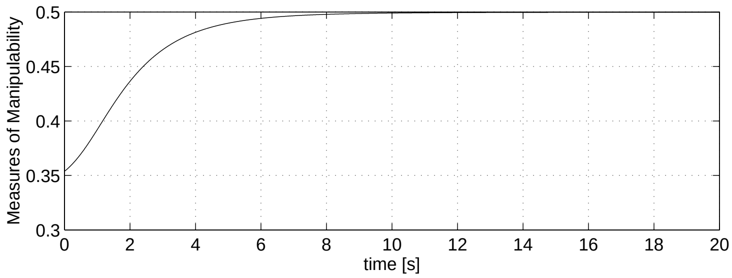

図 5. 36: 可操作度

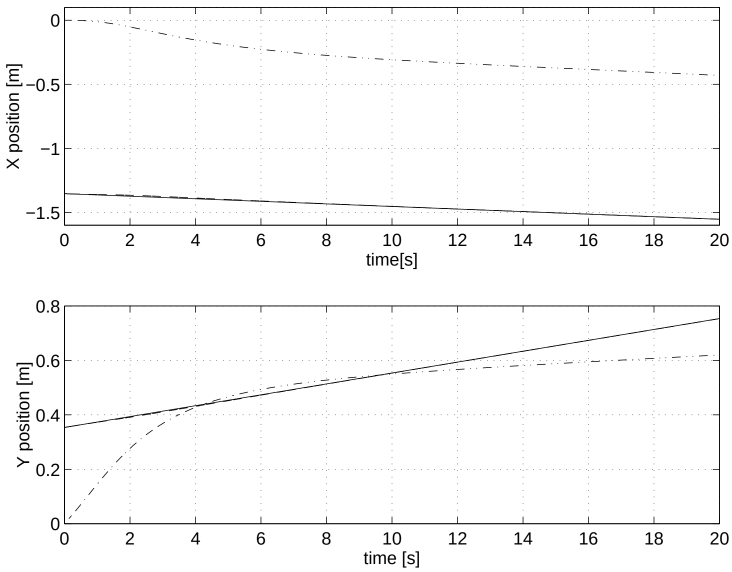

図 5. 37: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_{\xi} = 5$, $\boldsymbol{K}_w = 1$

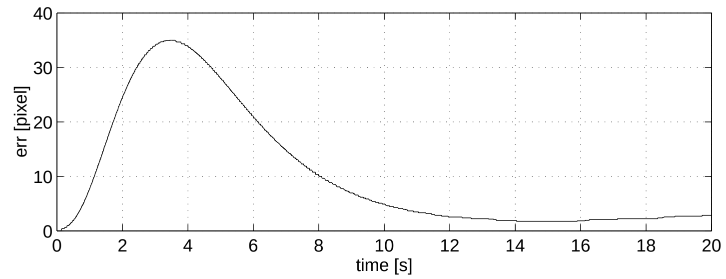

図 5.38: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

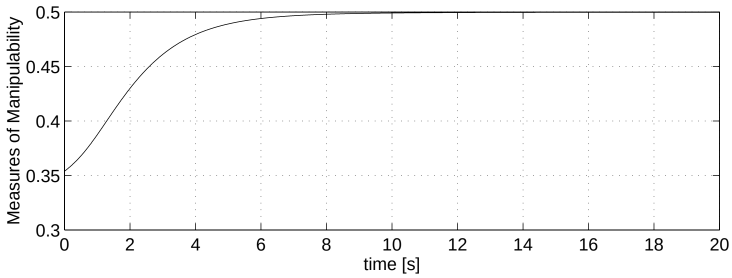

図 5. 39: 可操作度

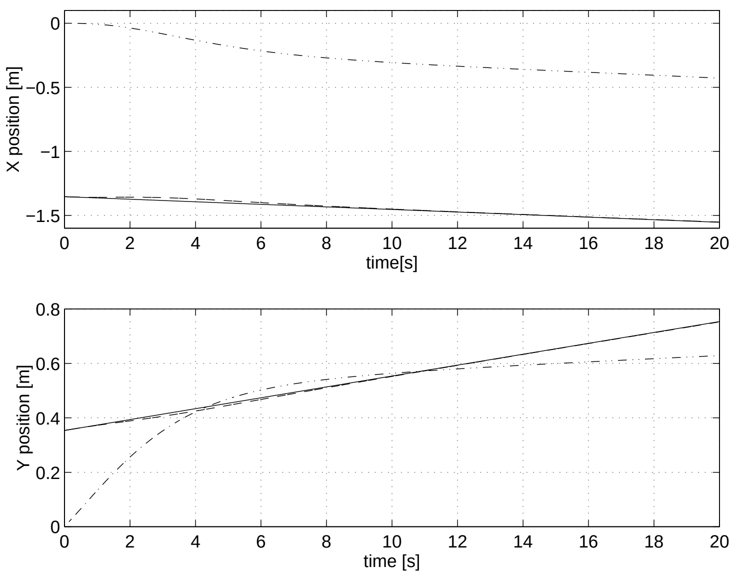

図 5. 40: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_{\xi} = 10$, $\boldsymbol{K}_{w} = 1$,$M_{verr} = 0.1$

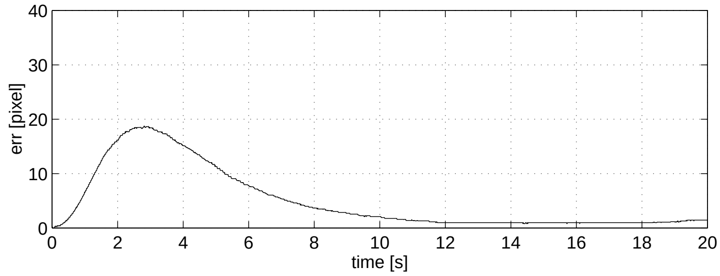

図 5.41 :画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

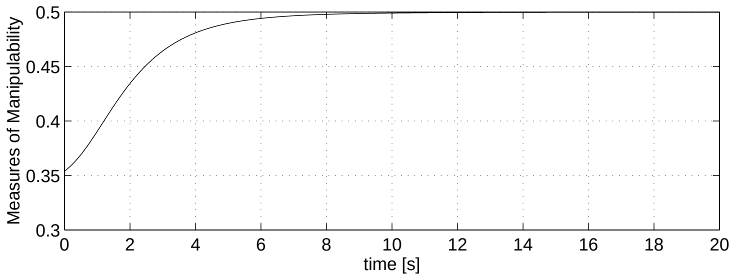

図 5. 42: 可操作度

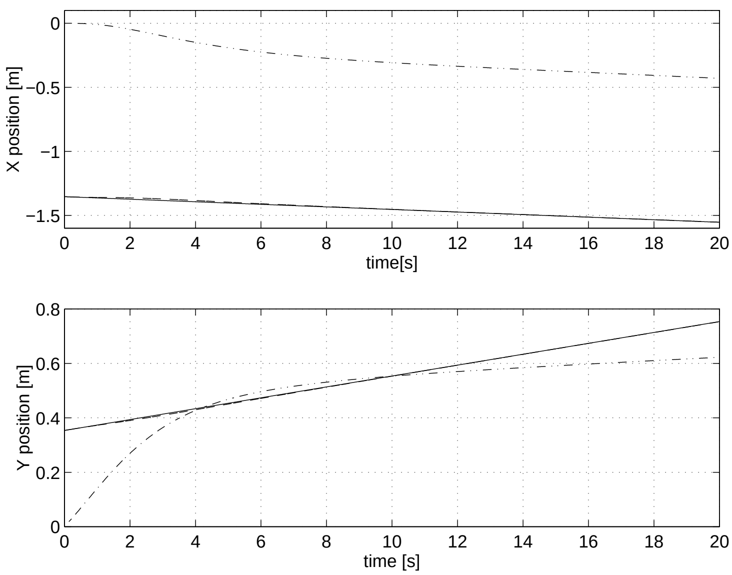

図 5. 43: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1$,$M_{verr} = 0.3$

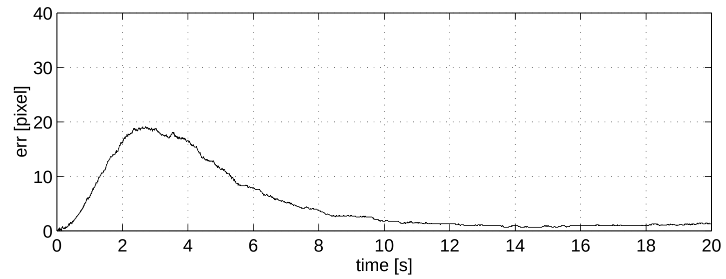

図 5.44 :画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

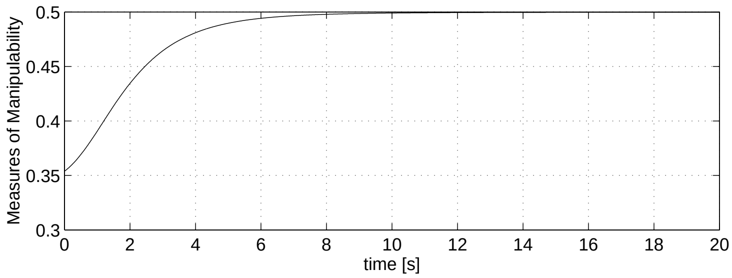

図 5. 45: 可操作度

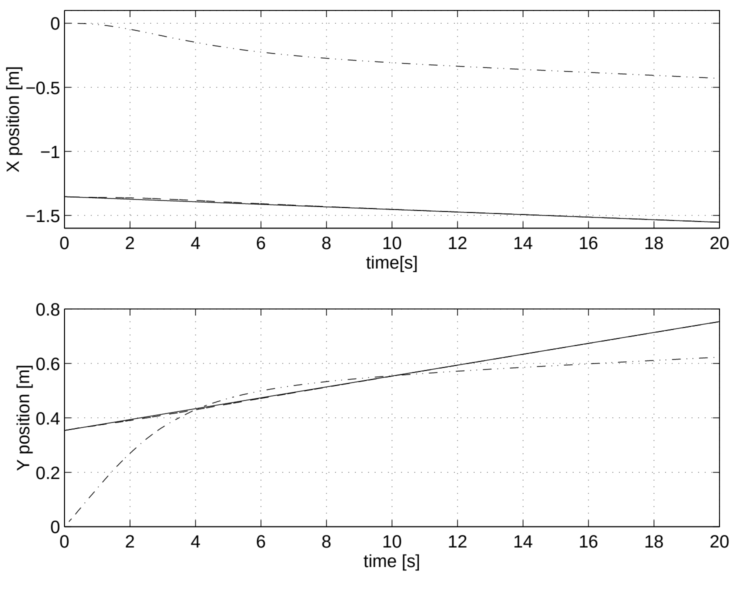

図 5. 46: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

- $\boldsymbol{K}_\xi = 10$, $\boldsymbol{K}_w = 1$,$M_{verr} = 0.2$, イメージヤコビアン一定

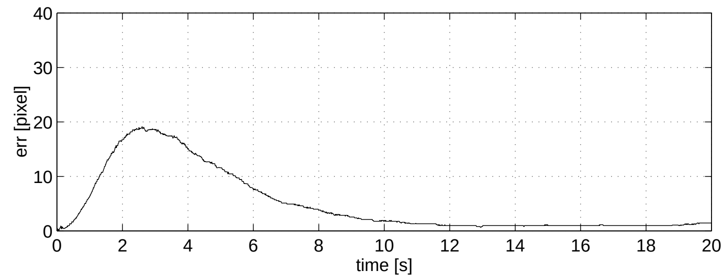

図 5.47: 画像面上の目標特徴点と実際の特徴点の誤差

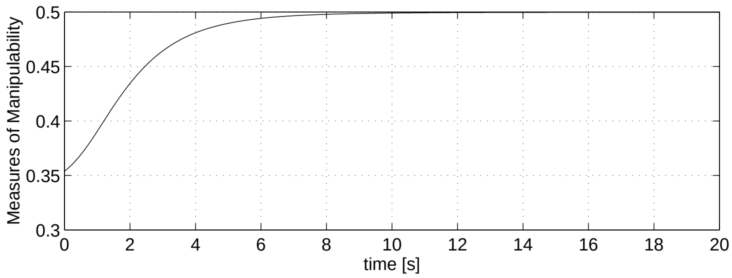

図 5. 48: 可操作度

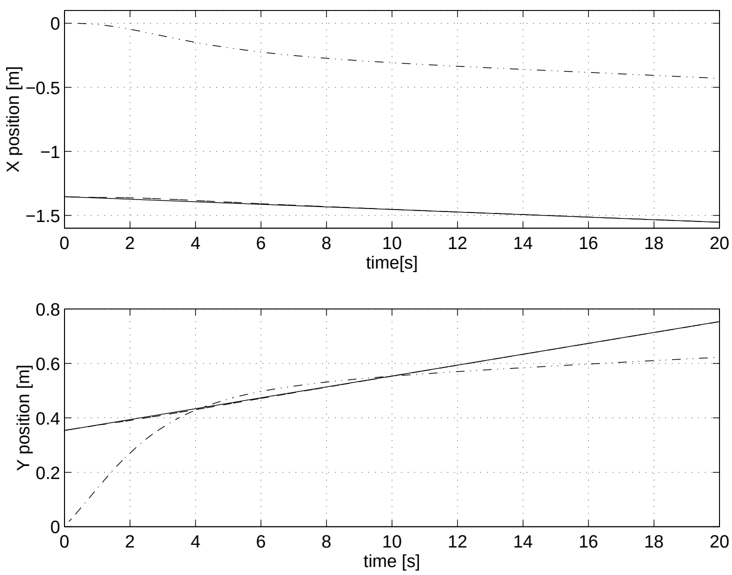

図 5. 49: 対称物, カメラ, 移動機構の位置

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

本研究において, 以下のことを行なった.

- 移動機構, マニピュレータ, カメラの各々の運動による影響を考慮した各関係式を求めた.
- 移動機構, マニピュレータ, カメラの各々のモデルを基に画像面上の特徴点の速度ベクトル$\dot{\xi}$から関節角速度ベクトル$\dot{\theta}$の関係を求める関係式を導出した.
- 可操作性を考慮した制御則を導き, マニピュレータの特異姿勢回避を行なえるようにした.
- 移動機構を備えたマニピュレータのビジュアルサーボとしての妥当性を確認するために, SPARC Station 上の行列演算ソフトウエアであるMATLAB(The Math Works Inc.)を用いてシミュレーションを行なった.

シミュレーションの結果, 可操作性を考慮した移動機構を備えたマニピュレータは可操作度の増加率が大きい時は可操作性を考慮してない場合に較べて誤差は大きくなる. しかし, 一旦, 可操作度の増加率が定常付近になると誤差は可操作性を考慮してないものより誤差が少なくなる. これは可操作度が大きい腕姿勢は目標対象物の動きに対応しやすいことを示している. このことは移動機構を備えた利点を十分に生かせる可操作性の概念を作業移動ロボットに導入することによってより汎用性のあるビジュアルサーボが行なえるこ

とが確認されたともいえる．また, 移動マニピュレータで最も誤差が発生すると思われる車輪の誤差もビジョンシステムを備えることで位置誤差修正が可能であることも確認できた．ゆえに, 作業移動ロボットは図 2.2に示されるような作業範囲が制限されているマニピュレータに較べ作業範囲が広範囲にとれるマニピュレータであり, しかも, 対象物の予測不可能な移動に対応できるように可操作性を考慮した場合のほうがより実用的なビジュアルサーボであると考えられる．また速度レベルの制御において, このシステムは十分に妥当性があると思われる.

6.2 今後の課題

今後の課題としては, 次のようなものが考えられる.

- シミュレーション上で作業移動ロボットの有効性が確認できたので, 実機に実装するために実験環境の整備を行なう.
- より精度のよい制御を目指し, ダイナミクスを考慮することも必要である [3][9].

上記の 2 つは是非実現して欲しい課題である．また, 非ホロノミックの拘束 [24]-[29] を考慮した制御則の導出, 移動速度が不確かな対象物に対するビジュアルサーボを行なうための推定フィルタ [30]-[32] などの導入が理論的に面白い問題だと思う.

幾つか今後の課題となるであろう事柄を挙げてみたが, まだまだ筆者の実力不足から多くの問題が残っていると思われる．しかし, この修士論文がこれらの課題に取り組むにあたってわずかでも参考になることを希望して, 終わりとしたい.

参考文献

[1] 吉川恒夫,“ロボット制御基礎論,” コロナ社, 1988.

[2] Y. Yamamoto and X. Yun, “Coordinated Obstacle Avoidance of a Mobile Manipulator,” Proc. 1995 ICRA, pp.2255-2260, 1995.

[3] Y. Yamamoto and X. Yun, “Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator,” IEEE Transaction on Automatic Control, Vol.39, No.6, June 1994.

[4] J. L. Crowley, “Navigation for an Intelligent Mobile Robot,” IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA1, No.1, March 1985.

[5] R. A. Brooks, “A Robust Layered Control System For A Mobile Robot,” IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA2, No.1, March 1986.

[6] R. P. Gibollet and P. Rives, “Applying Visual Servoing Techniques to Control a Mobile Hand-Eye System,” Proc. 1995 ICRA, pp.166-171, 1995.

[7] 見浪護, 藤原直史, 拓植広志, “カメラフィードバックを用いた自律移動マニピュレータの位置・速度制御,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2, pp.263-271, 1993.

[8] 大隅久, “移動マニピュレータの制御,” 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.7, pp.904-907, 1995.

[9] C. Canudas de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds.), “*Theory of Robot Control*,” Springer, 1996.

[10] Y. Nakamura, *Advanced Robotics Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley, pp.114-119, 1991.

[11] 馬書根, 広瀬茂男, 吉灘裕,"冗長マニピュレータの効率的な冗長制御法," 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5, pp.703-709, 1996.

[12] 橋本浩一, "視覚フィードバック制御 -静から動へ," システム/制御/情報, Vol.38, No.12, pp.659-665, 1994.

[13] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, " A Tutorial on Visual Servo Control," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.12, No.5, October 1996.

[14] 木下敬介, 出口光一郎, "能動視覚による 3 次元形式認識," 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.1, pp.144-153, 1992.

[15] B. Nelson and P. K. Khosla, "Increasing the Tracking Region of an Eye-in-Hand System by Singularity and Joint Limit Avoidance," Proc. 1993 ICRA, pp.418-423, 1993.

[16] B. Nelson and P. K. Khosla, "Strategies for Increasing the Tracking Region of an Eye-in-Hand System by Singularity and Joint Limit Avoidance," The International Journal of Robotics Research, Vol.14, No.3, June 1995.

[17] 見浪護, "自律型移動ロボットマニピュレータの誘導と制御に関する研究," 博士論文, 金沢大学, 1993.

[18] G. Campion, G. Bastin and B. D'Andréa-Novel, " Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.12, No.1, February 1996.

[19] 金谷健一, "画像理解," 森北出版, 1990.

[20] J.J. Craig 著, 三浦宏文, 下山勲 訳,"ロボティクス -機構・力学・制御-," 共立出版, pp.59-74, 1991.

[21] 高野政晴, "車輪移動機構の ABC[第 3 回] The ABC's of Wheeled Vehicle 3 運動学," 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3, pp.335-360, 1995.

[22] H. Seraji, "Configuration Control of Rover-Mounted Manipulators," Proc. 1995 ICRA, pp.2261-2266, 1995.

[23] K. Hashimoto, *VISUAL SERVOING*, World Scientific, pp. 199-228, 1993.

[24] 中村仁彦, "非ホロノミックロボットシステム 第1回 非ホロノミックなロボットって何?," 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 521-528, 1993.

[25] 中村仁彦, "非ホロノミックロボットシステム 第2回 幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動計画," 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 655-662, 1993.

[26] 中村仁彦, "非ホロノミックロボットシステム 第3回 幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 837-844, 1993.

[27] 中村仁彦, "非ホロノミックロボットシステム 第4回 動力学的な非ホロノミック拘束の下での運動," 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 999-1005, 1993.

[28] 中村仁彦, "非ホロノミックロボットシステム 第5回 動力学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 231-239, 1994.

[29] S. B. Skaar, I. Y. Mooshabad and W. H. Brockman, "Nonholonomic Camera-Space Manipulation," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 4, August 1992.

[30] 藤田政之, 丸山章, 川端昭弘, 内田健康, "離散時間 $\boldsymbol{H}_\infty$ フィルタアルゴリズムとそのビジュアルトラッキングへの応用," 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 8, pp. 1047-1053, 1995.

[31] 丸山章, "線形システムに対する H_∞ ロバスト推定器," 修士論文, JAIST, 1994.

[32] 川端昭弘, "ロボティック・ビジュアル・トラッキングにおける H_∞ フィルタ応用," 修士論文, JAIST, 1994.

[33] 藤原直史, 瀬尾達也, 松川和史, 尾西隆, "画像情報を利用した車両の自動追尾制御," 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 4, pp. 577-582, 1994.

[34] 新井健生, "作業移動型ロボットの研究動向と今後の展開," 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 896-899, 1995.

[35] 油田信一, “移動ロボットの研究のためのプラットフォーム,” 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.14-17, 1996.

[36] H. Michel and P. Rives, “Singularities in the determination of the situation of a robot effector from the perspective view of 3 points,” Technical Report n. 1850, INRIA, 1993.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 主指導教官として暖かい御指導と御支援を賜わりました示村悦二郎教授をはじめ, 主テーマ指導教官として懇切丁寧に御指導して頂いた藤田政之助教授, 本講座の助手である増淵泉助手, 金沢大学から度々来て御指導頂いた滑川徹助手に心より感謝致します.

そして, 本講座におきまして研究のみならず日常生活においても御指導, 御助言を頂きました博士後期過程の川端昭弘氏, 望山洋氏, 鈴木亮一氏, Hussein Mohammad Jaddu 氏, 平田研二氏, 田中奈津夫氏, 丸山章氏に心からお礼申し上げます. また, 同講座生として同じ日々を過ごし, 共に励まし学んできた博士前期過程 2 年の浅田幸則氏, 大滝直人氏, 置田宏幸氏, 奥村雅彦氏, 塩田良治氏, 田中敏氏, 内藤浩行氏, 花房聡人, 松尾誠一氏, Bud Rachmanto 氏, そして同 1 年の皆さんの今後の発展を祈って謝辞と致します.