

複写可

—修士学位論文—

画像特徴量を用いた
移動ロボットの誘導に関する研究

Navigation of Mobile Robots by Image Features



平成 20 年度
三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻

中村 亮太

学位論文要旨及び論文目録

学位論文提出者	氏名	中村 亮太	専攻	電気電子工学専攻	講座	電気システム工学
研究領域名	研究領域 A：ロボティクス・メカトロニクス					
学位論文題目	画像特徴量を用いた移動ロボットの誘導に関する研究					
論文審査委員	主査	平井 淳之	副査	駒田 諭	副査	石田 宗秋

学 位 論 文 要 旨

近年、ロボットには工場内での製造や組立に利用される産業用のみならず、病院や福祉施設における介護補助、宇宙や原子力プラントなどの人間が行くことができない危険が伴う環境下での作業、または一般家庭での応用が期待されている。従来のロボットであれば、決められた環境で決められた作業を行えば事足りたが、これらの新しい分野では環境が整備されていない場合が多く、その時々により自律的に適応できることが重要である。これには、環境の変化を認識するための外界センサが必要不可欠である。ロボットは外界センサにより周囲環境の情報を取り込み、その情報を基に自律的な行動に加えて、環境の変化に対して柔軟に行動することが求められる。

自身の情報を得るための内界センサに対して、自身と環境との相対情報を得るための外界センサには、触覚センサや力覚センサなどの力センサや、レーザや超音波などを用いた距離センサなどがある。外界センサの中でも、カメラなどの視覚センサは非接触で環境の変化を認識できるので非常に有用である。この視覚センサを用いたロボットの制御法の一つにビジュアルサーボがある。

視覚センサを用いたビジュアルフィードバック制御の中でも、環境を認識してからおもむろに動き出す“見ながら動く”静的なビジュアルフィードバックに対して、ビジュアルサーボはフィードバックループに直接視覚センサを組み込み、周囲の状態を観測しながら反射的に反応する“見ながら動く”動的なビジュアルフィードバックである。計測処理、軌道計画、アクチュエータ制御が全て並列して動作するという特徴を持つ。本研究では、このビジュアルサーボを用いて移動ロボットを目標へ誘導することを目的としている。

移動ロボットを目標へ誘導するためにビジュアルサーボを用いた研究はいくつか挙げられる。しかし、従来の研究では移動ロボットにカメラを固定しているために走行範囲が限定されるという欠点を有する。このため、目標姿勢を考慮できない、または目標への到着姿勢を考慮するために手法が複雑になることや必要以上に時間を要するなどの問題が挙げられる。

そこで我々の研究グループでは、移動ロボットの走行範囲を拡大することで、なめらかな動きで効率の良い軌道を描け、なおかつ目標への到着姿勢（目標に正対する姿勢）を考慮することができる手法を考えてきた。従来法において移動ロボットに固定されていたカメラのパン角をアクティブとし、その制御にビジュアルサーボを適用した。これにより、カメラの水平方向の旋回制御のみで目標を捉え続けることが可能となり、カメラと独立して移動ロボットの制御を行うことで移動ロボットの走行範囲を拡大した。

しかし、目標の設置位置が移動ロボットの走行面と同一でなければならぬという制約がある。そこで本研究では、走行面と同一でない目標に対応する手法とするため、目標との距離をステレオカメラにより計測する。さらにパン、チルト角を有するアクティブカメラを用いることで、広い範囲の目標を捕らえる。これらに加え、目的に応じて移動ロボットの軌道を変化させる方法を提案する。

上記に示した本手法の有効性をシミュレーションにより確認した。

論 文 目 録

- [1] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「画像特徴量を用いた移動ロボットの誘導に関する研究」, SICE 三重地区計測制御研究講演会講演論文集, A18-1, (2008.12)
- [2] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「オンラインキャリブレーションを付加したステレオビジュアルサーボによる三次元追従制御」, 産業計測制御研究会論文集, IIC-09-081, (2009.3 発表予定)
- [3] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「画像特徴量を用いた移動ロボットの誘導に関する研究」, 産業計測制御研究会論文集, IIC-09-135, (2009.3 発表予定)
- [4] R.Nakamura, S.Komada and J.Hirai: “Navigation of Mobile Robots by Image Features”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009.10 発表予定)

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 幾何学的関係.....	3
2.1 座標系とパラメータ	3
2.2 ステレオビジョンの透視変換	5
2.3 画像ヤコビ行列	7
第 3 章 画像特徴量推定による時間遅れ補償.....	8
3.1 画像特徴量の時間関係	8
3.2 画像特徴量の推定.....	10
第 4 章 アクティブカメラの制御	12
4.1 画像上での位置指令値	12
4.2 ビジュアルサーボの適用	14
第 5 章 移動ロボットの制御.....	16
5.1 移動ロボットの運動学	16
5.2 移動ロボットと目標の関係.....	17
5.1 速度指令	19
5.2 角速度指令.....	20
第 6 章 シミュレーション	24
6.1 シミュレーション条件	24
6.2 シミュレーション結果	26
第 7 章 結言	28

目次

付録	29
A 移動ロボットのパラメータ	29
B アクティブカメラのパラメータ	30
参考文献	31
謝辞	32
論文目録	33

第1章

緒言

ロボットに求められる役割が変化してきている[1]。工場内での製造や組立に利用される産業用ロボットのみならず，病院や福祉施設における介護補助，宇宙や原子力プラントなどの人間が行くことができない危険が伴う環境下での作業，または一般家庭での応用が期待されている[2]。従来のロボットであれば，決められた環境で決められた作業を行えば事足りたが，これらの新しい分野では環境が整備されていない場合が多く，その時々により自律的に適応できることが重要である[3]。これには，環境の変化を認識するための外界センサが必要不可欠である。ロボットは外界センサにより周囲環境の情報を取り込み，その情報を基に自律的な行動に加えて，環境の変化に対して柔軟に行動することが求められる。

自身の情報を得るための内界センサに対して，自身と環境との相対情報を得るための外界センサには，触覚センサや力覚センサなどの力センサや，レーザや超音波などを用いた距離センサなどがある。外界センサの中でも，カメラなどの視覚センサは非接触で環境の変化を認識できるので非常に有用である。この視覚センサを用いたロボットの制御法の一つにビジュアルサーボがある。

視覚センサを用いたビジュアルフィードバック制御の中でも，環境を認識してからおもむろに動き出す“見てから動く”静的なビジュアルフィードバックに対して，ビジュアルサーボはフィードバックループに直接視覚センサを組み込み，周囲の状態を観測しながら反射的に反応する“見ながら動く”動的なビジュアルフィードバックである[4]。計測処理，軌道計画，アクチュエータ制御が全て並列して動作するという特徴を持つ。本研究では，このビジュアルサーボを用いて移動ロボットを目標へ誘導することを目的としている。

移動ロボットを目標へ誘導するためにビジュアルサーボを用いた研究として[5]～[7]が挙げられる。しかし、これらの研究は移動ロボットにカメラを固定しているために走行範囲が限定されるという欠点を有する。[5]では目標姿勢を達成するために切り返しを多用している。[6]では目標姿勢を考慮していない。[7]では制限された範囲でのみ目標姿勢を達成している。

そこで我々の研究グループでは、移動ロボットの走行範囲を拡大することで、なめらかな動きで効率のよい軌道を描け、なおかつ目標への到着姿勢（目標に正対する姿勢）を考慮することができる手法を考えてきた。[8]では、従来法において移動ロボットに固定されていたカメラのパン角をアクティブとし、その制御にビジュアルサーボを適用している。これにより、カメラの水平方向の旋回制御のみで目標を捉え続けることが可能となり、カメラと独立して移動ロボットの制御を行うことで移動ロボットの走行範囲を拡大している。

しかし、[8]には目標の設置位置が移動ロボットの走行面と同一でなければならないという制約がある。そこで本研究では、走行面と同一でない目標に対応する手法とするため、目標との距離をステレオカメラにより計測する。さらにパン、チルト角を有するアクティブカメラを用いることで、広い範囲の目標を捕らえる。これらに加え、目的に応じて移動ロボットの軌道を変化させる方法を提案する。

上記に示した本手法の有効性をシミュレーションにより確認する。

本論文の構成を以下の通りである。まず、第2章で本手法を実行する上で必要となる幾何学的関係について説明する。次に、第3章では従来提案されている画像特徴量の推定法を利用し、移動ロボットとアクティブカメラの運動を考慮した推定法について述べる。第4章でビジュアルサーボを用いたアクティブカメラの制御、第5章で画像情報を利用した移動ロボットの制御について説明する。そして、第6章で移動ロボットの誘導についてシミュレーションを行い、本手法の有効性を確認する。

第2章

幾何学的関係

本章では、座標系とパラメータの定義、ステレオビジョンの透視変換、画像ヤコビ行列の定義など、本手法を実行する上で必要な事項について示す。

2.1 座標系とパラメータ

本研究では、パン、チルト角を有するステレオビジョンのアクティブカメラを搭載した移動ロボットを用いる。移動ロボットの制御は二輪速度差方式で行う。

図 2.1 に示すような座標系を設定する。移動ロボット座標系 M は、移動ロボットの回転軸上で走行面の高さに固定する。カメラ座標系 C はアクティブカメラのパン、チルト角の回転軸上で二つのカメラの midpoint の位置に固定する。ここで、座標系 M 、 C の回転方向は共に反時計回りを正とする。

図 2.1 の各パラメータについて説明する。 v は座標系 M の y 軸方向への移動ロボットの並進速度、 $\dot{\theta}$ は座標系 M の z 軸回りの回転速度を表す。 ϕ_1 、 ϕ_2 はそれぞれアクティブカメラのパン角の角度、チルト角の角度である。本手法では、これらを指令値として与える。

図 2.2 (a) は 3 次元上における移動ロボットと目標の関係である。目標となる物体の設置面や頂点等、物体の特徴を表す点を二点選出する。これを特徴点と呼ぶ。特徴点はカメラの高さと同じでないように選出する。

図 2.2 (b) に目標をカメラで捉えたときの画像と目標の関係を示す。この画像を画像座標系（画像平面）として定義し、その左上を原点とする。このとき、カメラの光学中心は画像座標系の中心とする。前述した特徴点は、左画像平面内で $({}^Lx_1, {}^Lz_1)$ 、 $({}^Lx_2, {}^Lz_2)$ 、右画像平面内で $({}^Rx_1, {}^Rz_1)$ 、 $({}^Rx_2, {}^Rz_2)$ として表され、これらを画像特徴点と定義する。画像座標系において縦軸は、下方向が正であることを注意する。

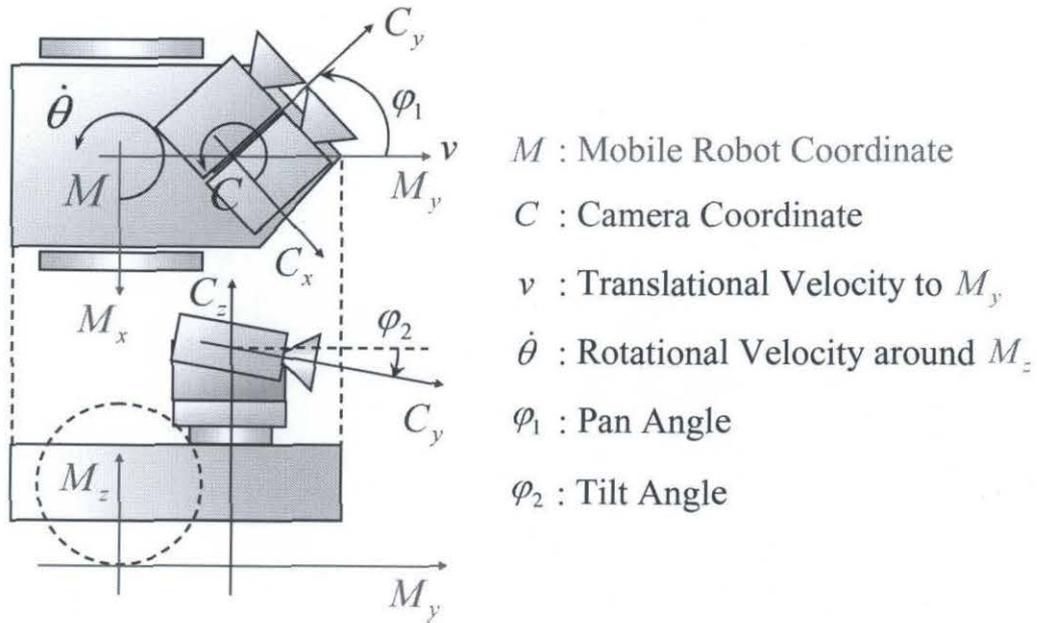


図2.1 移動ロボットの座標系
 Fig. 2.1 Coordinate Systems of Mobile Robot

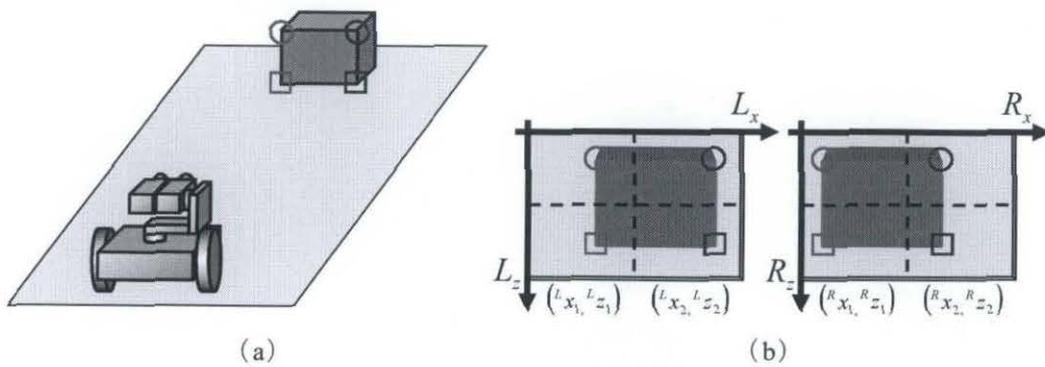


図2.2 目標と画像座標系
 Fig. 2.2 Targets and Image Coordinate System

2.2 ステレオビジョンの透視変換

図 2.3 にステレオビジョンにおける透視変換[9]のモデルを示す。 ${}^C Z-{}^C X$ 平面と平行に距離 f だけ離れたところへ画像座標系を左右にそれぞれ設ける。カメラがある物体に対して焦点があつていれば、 f はレンズの焦点距離となる。また、 b は基線長（レンズ中心間の距離）である。

図 2.3 でカメラ座標系に物体の位置を点 ${}^C r$ とすると、二つの画像座標系への像は、点 ${}^C r$ とカメラのレンズ中心を通る直線が画像座標系と交わる点であることから、(2.1)式～(2.4)式のように求められる。

$${}^L x = f k_x \frac{{}^C X + b/2}{c_Y} + x_0 \quad (2.1)$$

$${}^L z = f k_z \frac{{}^C Z}{c_Y} + z_0 \quad (2.2)$$

$${}^R x = f k_x \frac{{}^C X - b/2}{c_Y} + x_0 \quad (2.3)$$

$${}^R z = f k_z \frac{{}^C Z}{c_Y} + z_0 \quad (2.4)$$

ここで、 k_x 、 k_z はカメラの素子と画素数のスケール [pixel/m] を表し、 x_0 、 z_0 は光学中心を表す。

次に、ステレオビジョンにおける透視変換で得られた像を用いて奥行き情報が求められることを示す。(2.1)式、(2.3)式の差をとり、 c_Y について解くと次式が得られる。

$$c_Y = \frac{f k_x b}{{}^L x - {}^R x} \quad (2.5)$$

これは、対応する画像特徴量 ${}^L x$ 、 ${}^R x$ の差が決まり、焦点距離 f と基線長 b が既知であれば、奥行き c_Y は容易に計算できることを示す。

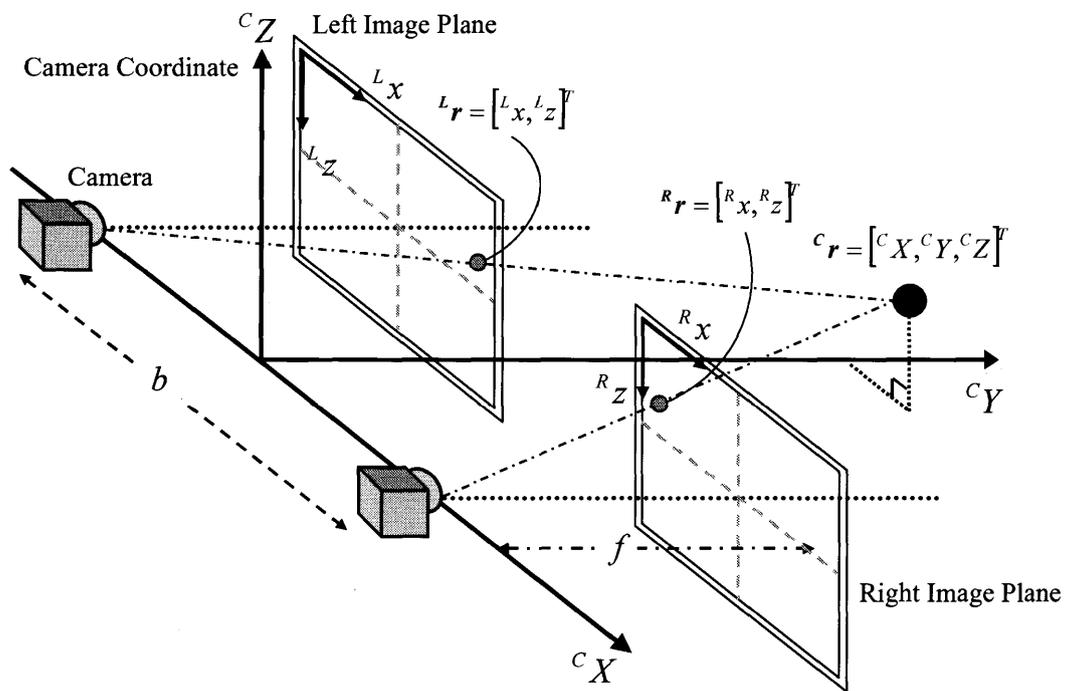


図2.3 ステレオビジョンの透視変換
 Fig. 2.3 Perspective Transformation of Stereo Vision

2.3 画像ヤコビ行列

移動ロボットの並進速度 v による M_x 方向の移動距離と M_y 方向の移動距離はそれぞれ次式で表される.

$$x(t) = \int v(t) \cos \theta(t) dt \quad (2.6)$$

$$y(t) = \int v(t) \sin \theta(t) dt \quad (2.7)$$

画像上の物体位置 ${}^I \mathbf{o}(t)$ は, 移動ロボットの並進運動によって変化する. 移動ロボットの並進速度 $\dot{\mathbf{r}}(t) = [\dot{x}(t), \dot{y}(t)]^T$ と画像上の物体位置の関係は次式で表される.

$${}^I \dot{\mathbf{o}}(t) = \frac{\partial {}^I \mathbf{o}(t)}{\partial \mathbf{r}(t)} \dot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \mathbf{r}) \dot{\mathbf{r}}(t) \quad (2.8)$$

また, 画像上の物体位置 ${}^I \mathbf{o}(t)$ は, 移動ロボットの姿勢変化によって変化する. 移動ロボットの回転速度 $\dot{\theta}(t)$ と画像上の物体位置の関係は次式で表される.

$${}^I \dot{\mathbf{o}}(t) = \frac{\partial {}^I \mathbf{o}(t)}{\partial \theta(t)} \dot{\theta}(t) = \mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \theta) \dot{\theta}(t) \quad (2.9)$$

同様に, 画像上の物体位置 ${}^I \mathbf{o}(t)$ は, アクティブカメラの姿勢変化によって変化する. アクティブカメラの関節速度 $\dot{\boldsymbol{\varphi}}(t) = [\dot{\varphi}_1(t), \dot{\varphi}_2(t)]^T$ と画像上の物体位置の関係は次式で表される.

$${}^I \dot{\mathbf{o}}(t) = \frac{\partial {}^I \mathbf{o}(t)}{\partial \boldsymbol{\varphi}(t)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}(t) = \mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \boldsymbol{\varphi}) \dot{\boldsymbol{\varphi}}(t) \quad (2.10)$$

(2.8)式~(2.10)式で, $\mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \mathbf{r})$, $\mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \theta)$, $\mathbf{J}({}^I \mathbf{o}, \boldsymbol{\varphi})$ は, 移動ロボットの速度やアクティブカメラの関節速度と画像特徴量の速度の関係を表す行列であり, これらを画像ヤコビ行列と呼ぶ. 画像ヤコビ行列は移動ロボットやアクティブカメラのパラメータで決定されるので, 既知の情報として扱うことができる.

第3章

画像特徴量推定による時間遅れ補償

本章では、従来提案されている画像特徴量の推定法[10]を利用し、移動ロボットとアクティブカメラの運動を考慮した推定法について述べる。始めに画像特徴量の時間関係について説明し、続いて画像特徴量の推定法について述べる。

3.1 画像特徴量の時間関係

図 3.1 に示す時間関係のモデルに基づいて画像特徴量の推定を行う。図 3.1 において添字 i は i 番目の画像処理周期を表す。制御周期は画像処理周期に比べて充分短い連続時間として考える。時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ の間に画像処理が行われている間、移動ロボットやアクティブカメラは時刻 t_i で得られた画像特徴量 $r(t_i)$ に基づいて制御される。しかし、この画像特徴量 $r(t_i)$ は、時刻 t_{i-1} の時点で画像座標上にあった画像特徴量であるため、時刻 t_i において出力された時点では、すでに画像処理のサンプリング周期で 1 周期分遅れている。さらに画像特徴量は時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ の間で同じ値で出力されるため、結果として現在得られている画像特徴量は実際の値から 1 ～ 2 周期分遅れていることになる。

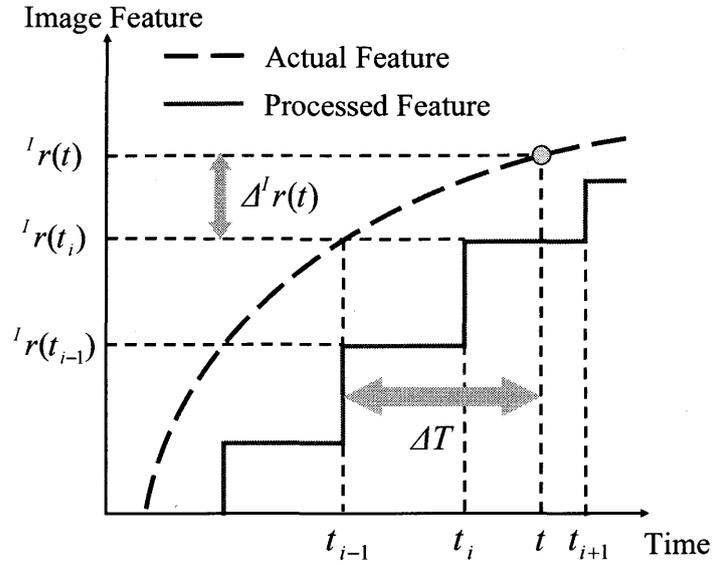


図3.1 画像特徴量の時間関係
Fig. 3.1 Time Sequence of Image Feature

ここで、画像データに含まれる遅れ時間 ΔT を図 3.1 より次式のように定義する。

$$\Delta T := t - t_{i-1} \quad (3.1)$$

よって、画像が取り込まれてから現在の時間までの移動ロボットの運動変位とアクティブカメラの関節角度変位はそれぞれ次式で表される。

$$\Delta \mathbf{r}(t) := \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t_{i-1}) \quad (3.2)$$

$$\Delta \theta(t) := \theta(t) - \theta(t_{i-1}) \quad (3.3)$$

$$\Delta \varphi(t) := \varphi(t) - \varphi(t_{i-1}) \quad (3.4)$$

遅れを含んだデータをそのままフィードバックすると制御性能が劣化するので、時間遅れの補償が必要となる。

3.2 画像特徴量の推定

(3.2)式～(3.4)式から得られる画像処理中の移動ロボットの運動変位およびアクティブカメラの関節角度変位と、既知情報である画像ヤコビ行列を用いることにより、画像処理間の画像特徴量の変位を推定することを考える。

画像特徴量は(2.8)式～(2.10)式で示した画像ヤコビ行列を用いて推定される。画像が取り込まれてから現在の時間までの画像特徴量の変位を加えることで推定を行う。

$${}^I\hat{o}(t) = {}^I\mathbf{o}(t_i) + \Delta {}^I\hat{o}(t) \quad (3.5)$$

$$\Delta {}^I\hat{o}(t) = \mathbf{J}({}^I\mathbf{o}, \mathbf{r})\Delta \mathbf{r}(t) + \mathbf{J}({}^I\mathbf{o}, \theta)\Delta \theta(t) + \mathbf{J}({}^I\mathbf{o}, \varphi)\Delta \varphi(t) \quad (3.6)$$

(3.6)式の右辺第1項は移動ロボットの並進運動による変位を、第2項は移動ロボットの姿勢変化による変位を、第3項はアクティブカメラの姿勢変化による変位を表している。

本章で説明した、画像特徴量の推定による遅れ補償を付加した本手法のシステムは図3.2のようになる。図中、実線は本体の制御周期であり、破線は画像処理周期を表す。目標を画像平面内に捉えたカメラの画像に画像処理および推定を施し、画像上の座標を取得する。これによりアクティブカメラと移動ロボットの制御を行う。

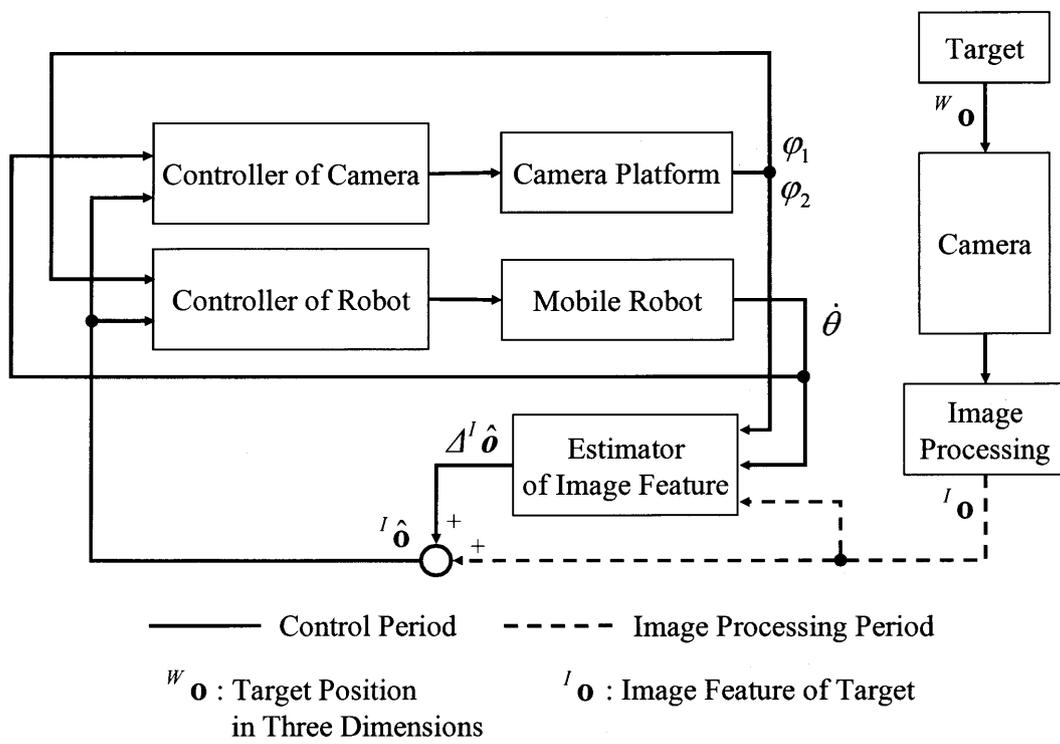


図3.2 画像特徴量の推定を用いた移動ロボットの誘導システム
 Fig. 3.2 Navigation System of Mobile Robots Using Estimated Image Feature

第4章

アクティブカメラの制御

本章では、アクティブカメラの制御方法について述べる。アクティブカメラの制御にはビジュアルサーボを用いる。画像上での位置指令値の導出方法を説明した後、ビジュアルサーボを適用する方法について述べる。

4.1 画像上での位置指令値

左画像平面内での特徴点の中心を $({}^Lx_m, {}^Lz_m)$ 、右画像平面内での特徴点の中心を $({}^Rx_m, {}^Rz_m)$ とおく。

アクティブカメラは左右両方のカメラで目標物体を捉える必要がある。よって、アクティブカメラには、カメラ座標系で特徴点の中心が ${}^cX=0$ 、 ${}^cZ=0$ となるように指令を与えればよい。画像特徴量を用いてこの条件を満たすには、これを(2.1)式～(2.4)式に代入し、次式を得る。

$${}^Lx_m^{cmd} = \frac{fk_x b}{2^c Y} + x_0 = \frac{{}^Lx_m - {}^Rx_m}{2} + x_0 \quad (4.1)$$

$${}^Lz_m^{cmd} = z_0 \quad (4.2)$$

$${}^Rx_m^{cmd} = -\frac{fk_x b}{2^c Y} + x_0 = -\frac{{}^Lx_m - {}^Rx_m}{2} + x_0 \quad (4.3)$$

$${}^Rz_m^{cmd} = z_0 \quad (4.4)$$

左画像平面内で(4.1)式、(4.2)式となれば、右画像平面内では(4.3)式、(4.4)式を満たすので、アクティブカメラに与える指令値は、(4.1)式、(4.2)式とする。左右の画像で中心からの x 軸方向の画像特徴量が異なる場合、図4.1に示すようにアクティブカメラはこれを等しくするように動作することを示している。

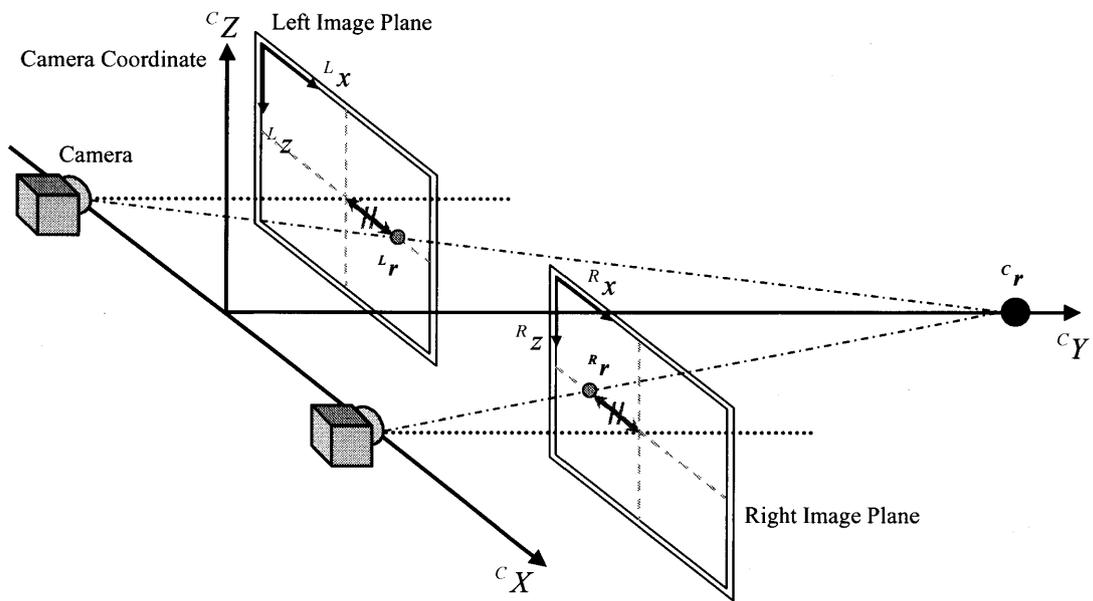


図4.1 カメラ座標系と画像座標系

Fig. 4.1 Camera Coordinate and Image Coordinate

4.2 ビジュアルサーボの適用

目標を画像平面内に捉え続けるためのビジュアルサーボはアクティブカメラのパン，チルト角の制御に用いられる．パン，チルト角は(4.1)式，(4.2)式を用いて次式で制御される．

$$\dot{\phi}_1^{ref} = J_x^{-1} K_x ({}^L x_m^{cmd} - {}^L x_m) - \dot{\theta} \quad (4.5)$$

$$J_x^{-1} = \frac{\partial {}^L x_m}{\partial \phi_1} \quad (4.6)$$

$$\dot{\phi}_2^{ref} = J_z^{-1} K_z ({}^L z_m^{cmd} - {}^L z_m) \quad (4.7)$$

$$J_z^{-1} = \frac{\partial {}^L z_m}{\partial \phi_2} \quad (4.8)$$

図 4.2 に示すように画像特徴量の midpoint が(4.1)式，(4.2)式の指令値と一致するようにアクティブカメラが制御される．ここで，(4.6)式，(4.8)式に示した J_x ， J_z はカメラの角速度と画像特徴量の速度を関係付ける画像ヤコビ行列である．また， K_x ， K_z はゲインである．カメラの回転運動が移動ロボットの回転運動に妨げられないようにするため，パン角の制御には移動ロボットの角速度 $\dot{\theta}$ がフィードフォワードで付加してある．

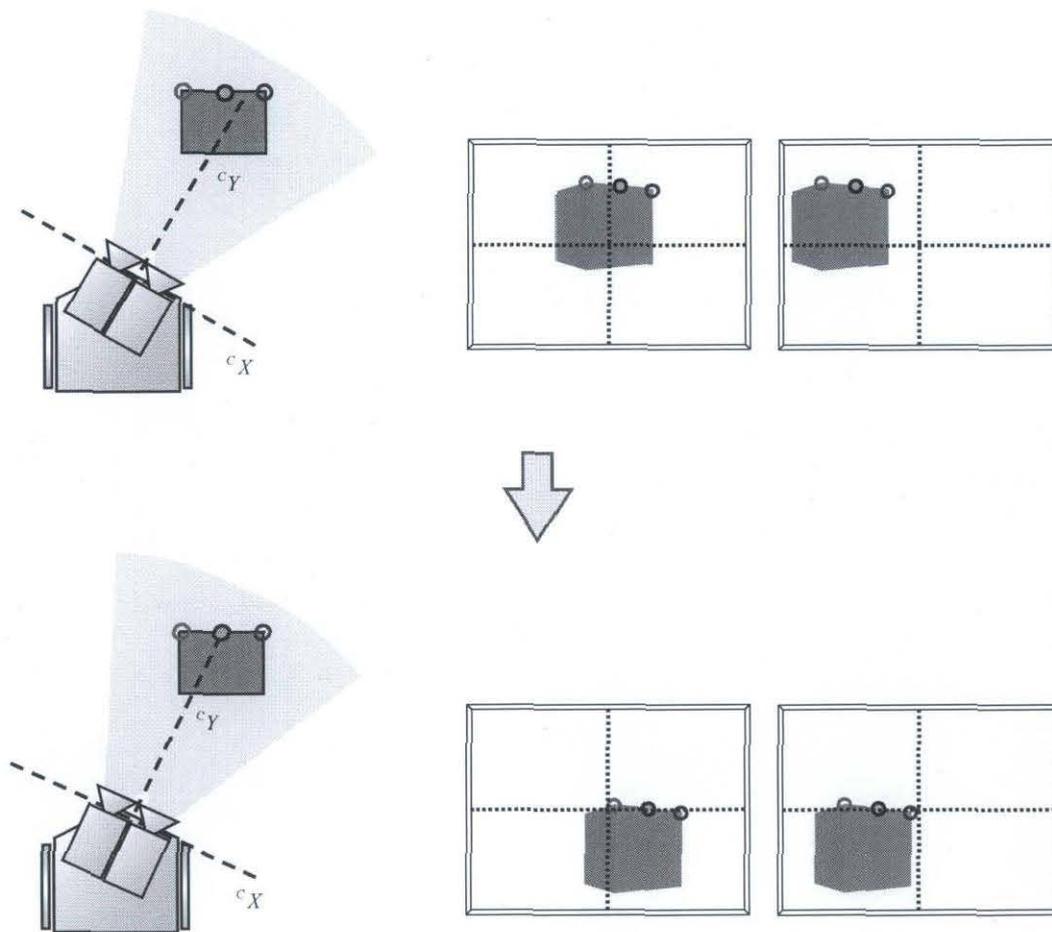


図4.2 アクティブカメラのビジュアルサーボ
Fig. 4.2 Visual Servo of Active Camera

第5章

移動ロボットの制御

本章では，移動ロボットの制御方法について説明する．本手法では移動ロボットの各車輪の角速度指令を与えるために，車体の速度と角速度を指令値として生成する．始めに移動ロボットの運動学について説明し，続いて移動ロボットと目標の関係について述べる．その後，指令値となる移動ロボットの速度と角速度の生成の方法について説明する．

5.1 移動ロボットの運動学

移動ロボットの運動学，逆運動学の式はそれぞれ次式で表される[11]．

$$\begin{bmatrix} v \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{T} & -\frac{R}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_R^{ref} \\ \omega_L^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{T}{2R} \\ \frac{1}{R} & -\frac{T}{2R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{ref} \\ \dot{\theta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

ここで， R は車輪半径， T はトレッド（左右車輪間の距離）， $\omega_{R/L}$ は各車輪角速度である．各車輪の角速度指令は(5.2)式より生成する．このときの移動ロボットの並進速度 v と角速度 $\dot{\theta}$ を指令値として与える．

5.2 移動ロボットと目標の関係

移動ロボットから目標物体までの距離 d 、およびカメラから目標の特徴点までの高さ h は、アクティブカメラの制御応答が理想であるならば、図 5.1 に示すように次式で表される。

$$d = {}^c Y \cdot \cos \varphi_2 \quad (5.3)$$

$$h = {}^c Y \cdot \sin \varphi_2 \quad (5.4)$$

奥行き ${}^c Y$ は(2.5)式で得られ、これとチルト角の大きさより、距離 d と高さ h を求めることができる。導出した距離 d と高さ h は、移動ロボットの速度と角速度の生成の際に利用される。

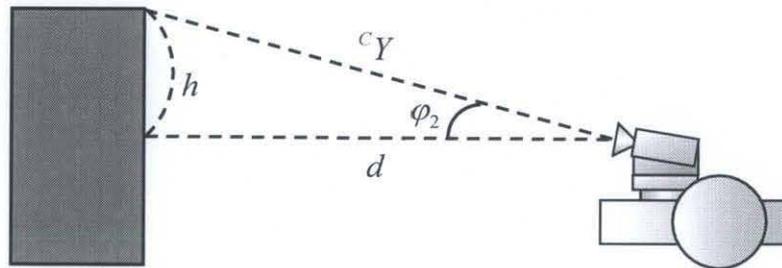


図5.1 移動ロボットと目標の関係

Fig. 5.1 Relation between Mobile Robot and Target

図 5.2 は、物体の高さによって画像平面内の物体の傾き q が変化する様子を示したものである。移動ロボットから見て近い方の辺と遠い方の比が $k:1$ とする。カメラの高さを基準線として一定の高さおきに線を結ぶと、 $1, 2, \dots, n$ 番目の傾きは次式で表される。

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \frac{kl-l}{w} = \frac{(k-1)l}{w} \\
 q_2 &= \frac{2kl-2l}{w} = 2\frac{(k-1)l}{w} \\
 &\vdots \\
 q_n &= \frac{nkl-nl}{w} = n\frac{(k-1)l}{w}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

(5.5)式から物体の高さが高くなるに連れ、画像平面内の物体の傾き q はそれに比例して大きくなっていることが分かる。物体の高さがカメラの高さより低い場合も同様のことがいえると考えられる。この比例の関係は、後述の角速度指令の生成の際に利用される。

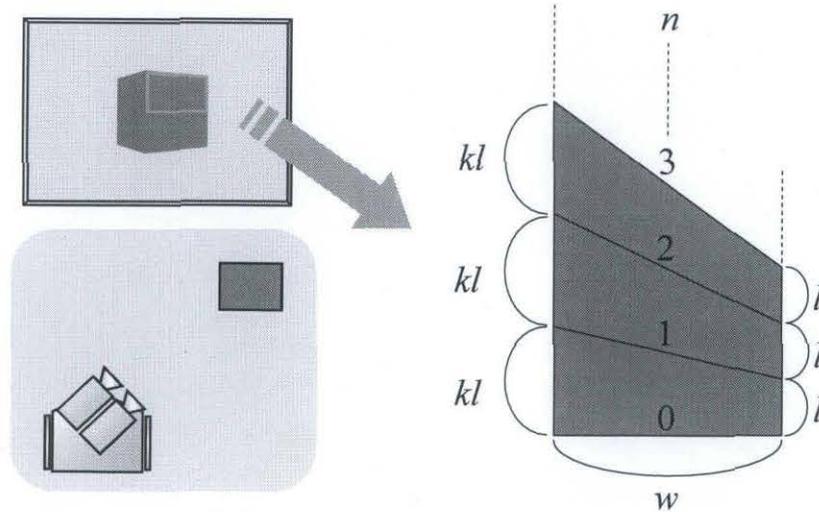


図5.2 画像平面内の物体の傾き
Fig. 5.2 Slope of Object on Image Plane

5.3 速度指令

移動ロボットの速度指令値 v^{ref} は、図 5.3 のように、(5.3)式で導出した移動ロボットから目標物体までの距離 d で決定される。距離 d に応じて速度指令値 v^{ref} を与え、停止の際に移動ロボットに負担をかけないように閾値 $d_{threshold}$ で減速を開始させる。また、移動ロボットを指定された距離 d_{finish} で停止させることができる。

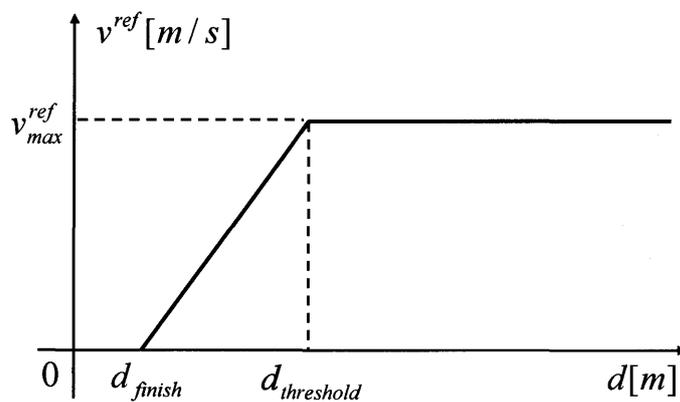


図5.3 速度指令値
Fig. 5.3 Velocity Command

5.4 角速度指令

移動ロボットの角速度指令値 $\dot{\theta}^{ref}$, つまり, 移動ロボットの姿勢を制御する指令には, 次式に示すように, ビジュアルサーボによって制御されたアクティブカメラのパン角 φ_1 を用いる.

$$\dot{\theta}^{ref} = K_{\theta} \cdot (\varphi_1 - \varphi_1^{cmd}) \quad (5.6)$$

ここで, K_{θ} はゲインであり, φ_1^{cmd} は移動ロボットに対する姿勢指令値である. (5.6)式より, 所望の姿勢を達成するような移動ロボットの角速度指令値が生成できる. 姿勢指令値 φ_1^{cmd} の与え方には, 画像特徴量間の傾きにより移動ロボットと目標の相対姿勢を推測できることを利用する.

図 5.4 のように, 目標がカメラの高さより, 低い位置にあるか, 高い位置にあるかの二通りに場合分けして考える. 前章で述べたように, アクティブカメラはビジュアルサーボによって常に目標を注視している. このことから, アクティブカメラのチルト角に着目すると, 目標がカメラの高さより低い位置にある場合は $\varphi_2 > 0$, 高い位置にある場合は $\varphi_2 < 0$ であることが分かる.

図 5.4(a) は目標がカメラの高さより低い位置にある場合, つまり $\varphi_2 > 0$ であるときの目標の様子を示したものである. まず, 同図(i), (ii)の場合について考える. 移動ロボットと目標が(i)のような位置関係のとき, 画像平面における目標の画像特徴点 I が下側に見え, 画像特徴点間の傾き q は負になっている (画像座標系の原点は左上で z 座標は下向きが正であることに注意). (ii)の場合は画像特徴点 II が下側に見え, 画像特徴点間の傾き q は正になっている. これを画像平面側から考えると, 傾きが $q < 0$ の場合は目標の左側に移動ロボットが存在し, $q > 0$ の場合は目標の右側に移動ロボットが存在しているといえる. このことから, $q < 0$ の場合は右方向へ旋回, $q > 0$ の場合は左方向へ旋回することで, 移動ロボットは目標の正面まで回り込むことができる. この操作によって傾きは $q = 0$ となり, 移動ロボットと目標の位置関係は(iii)のようになる. (iii)の場合, 姿勢指令値 φ_1^{cmd} を 0 にすることにより目標への正対が達成される. これらの操作によって, 移動ロボットを目標の正面まで誘導することができる.

図 5.4(b) に示す目標がカメラの高さより高い位置にある場合, つまり $\varphi_2 < 0$ であるときは, 画像特徴点間の傾きが図 5.4(a) と逆になる. よって, $q > 0$ の場合は右方向へ旋回, $q < 0$ の場合は左方向へ旋回することになる.

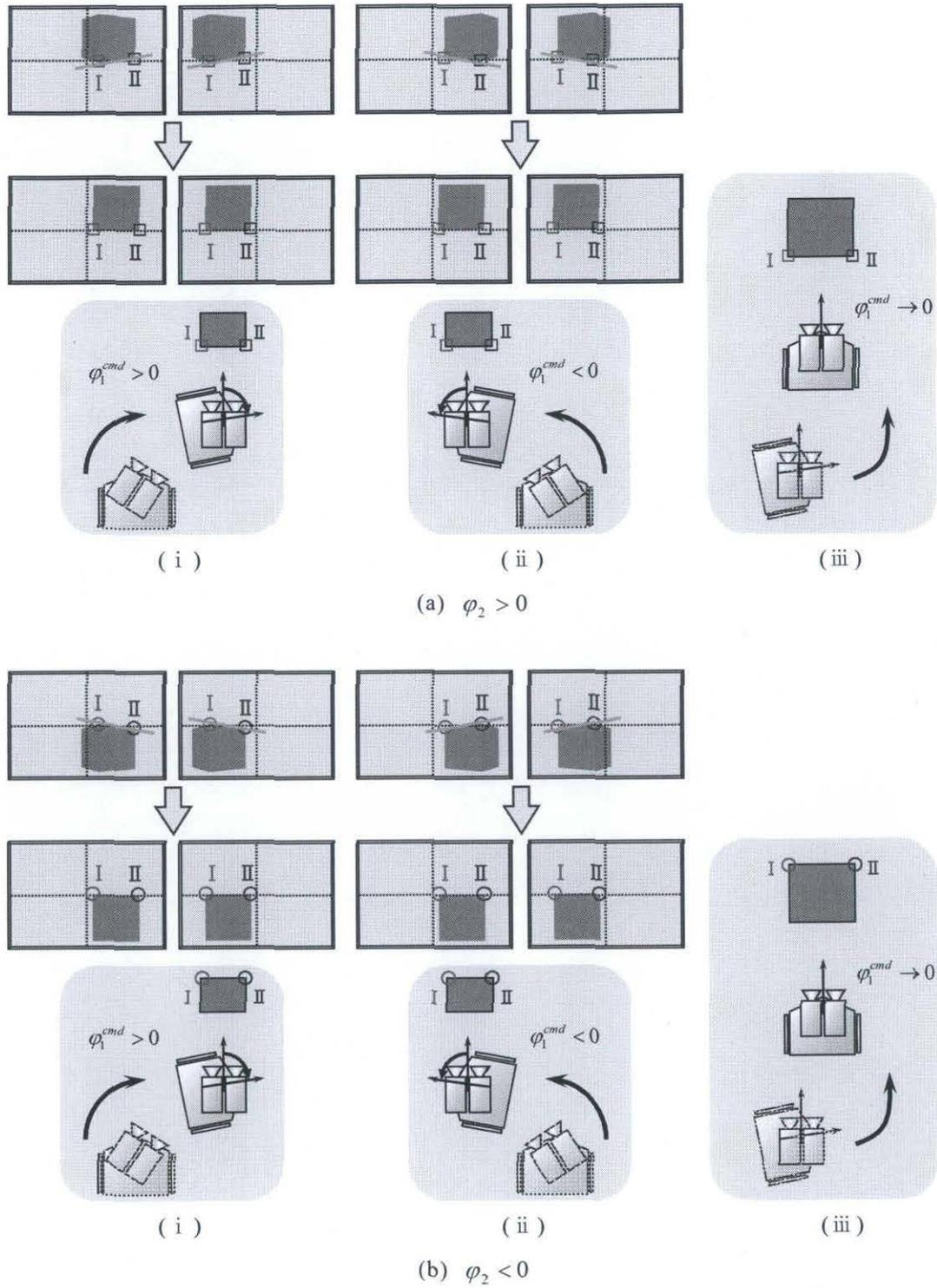


図5.4 移動ロボットの位置による目標の見え方の違い
 Fig. 5.4 Difference in Vision by Position of Robots

以上のことを関数で表すと次式のように示される。

$$\begin{aligned} \varphi_2 \cdot q > 0 \quad \dots \quad \varphi_1^{cmd} &= -\frac{\pi}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{|q|}{\tau}\right) \right] \\ \varphi_2 \cdot q \leq 0 \quad \dots \quad \varphi_1^{cmd} &= \frac{\pi}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{|q|}{\tau}\right) \right] \end{aligned} \quad (5.7)$$

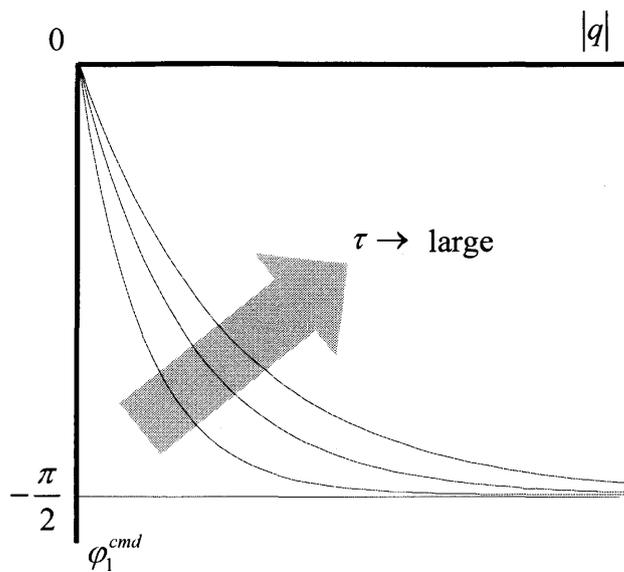
$$\tau = K_q \cdot d \cdot h \quad (5.8)$$

(5.8)式に示した K_q はゲイン， d は(5.3)式で導出した移動ロボットから目標物体までの距離， h は(5.4)式で導出したカメラから目標の特徴点までの高さである。

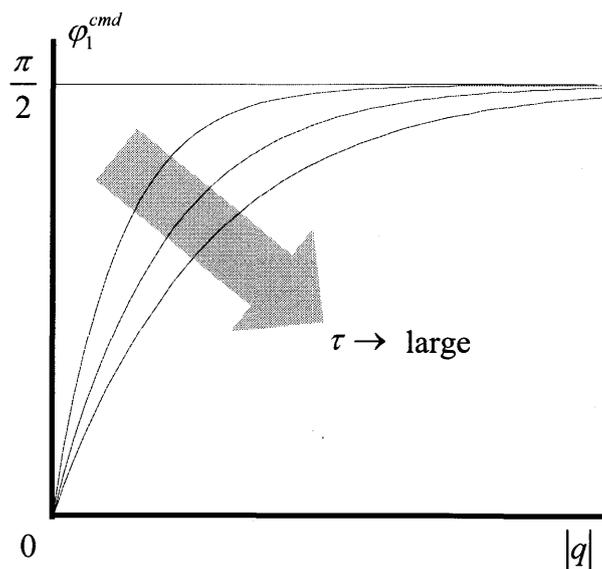
(5.7)式のグラフを図 5.5 に示す。画像特徴点間の傾き $|q|$ が大きい場合，移動ロボットは目標正面に大きく回り込む必要があるので，姿勢指令値 φ_1^{cmd} を $\pm\pi/2$ とする。傾き $|q|$ が小さくなるにつれ，姿勢指令値 φ_1^{cmd} を 0 に近づけていくことで，移動ロボットを目標に正対させる。

変数 τ の値によって目標への軌道が変化する。 τ が小さい場合，傾き q の減少に対する姿勢指令値 φ_1^{cmd} の低下が遅いため，移動ロボットは大きく回り込む軌道を描くことになる。一方， τ が大きい場合，傾き q の減少に対する姿勢指令値 φ_1^{cmd} の低下が速いため，移動ロボットは回り込みよりも接近を優先する軌道を描く。

前述したように，画像特徴点間の傾き q は目標の高さ h に比例する。傾き q を高さ h で割ることで，姿勢指令値 φ_1^{cmd} は目標の高さに関係なく生成される。また， τ に目標までの距離 d を加えることで，効率の良い軌道を生成することが可能となる。距離 d が大きい場合は τ を大きくすることで接近を優先させ，距離 d が小さくなるにつれ τ を小さくし回り込みを行う軌道を生成することができる。



(a) $\varphi_2 \cdot q > 0$



(b) $\varphi_2 \cdot q \leq 0$

図5.5 姿勢指令関数

Fig. 5.5 Posture Command Function

第6章

シミュレーション

本章では、本手法の有効性を確認するためシミュレーションによる検証を行う。始めにシミュレーション条件について説明する。続いてシミュレーション結果を示し、これに基づく考察について述べる。

6.1 シミュレーション条件

移動ロボットを目標の正面まで誘導させるシミュレーションを行う。表 6.1 にシミュレーションパラメータを示す。また、付録に移動ロボットとアクティブカメラのパラメータを示す。

目標は、図 6.1 に示す三通りの位置に設置した。A は Y 軸方向に長い位置、B は X 軸方向と Y 軸方向の長さが等しい位置、C は X 軸方向に長い位置とした。目標の高さは、0.0[m]、1.0[m]、1.5[m]とした。尚、カメラの高さは付録 B に示したように 0.33[m]である。

図 6.1 において、移動ロボットの姿勢 θ は X 軸を基準とし反時計周りを正とする。目標は X 軸方向と平行になっているので、移動ロボットの姿勢 θ が 90[deg]であれば目標に正対できているといえる。また、表 6.1 に示したように d_{finish} を 0.6[m]と与えているので、到着位置の Y 座標は目標から 0.6[m]離れた位置で停止することが望ましい。

表6.1 シミュレーションパラメータ

Table 6.1 Simulation Parameters

Control Period [ms]	1
Image Processing Period [ms]	70
K_x	15
K_z	15
K_θ	1
K_q	0.2
v_{max}^{ref} [m/s]	0.4
$d_{threshold}$ [m]	1.5
d_{finish} [m]	0.6

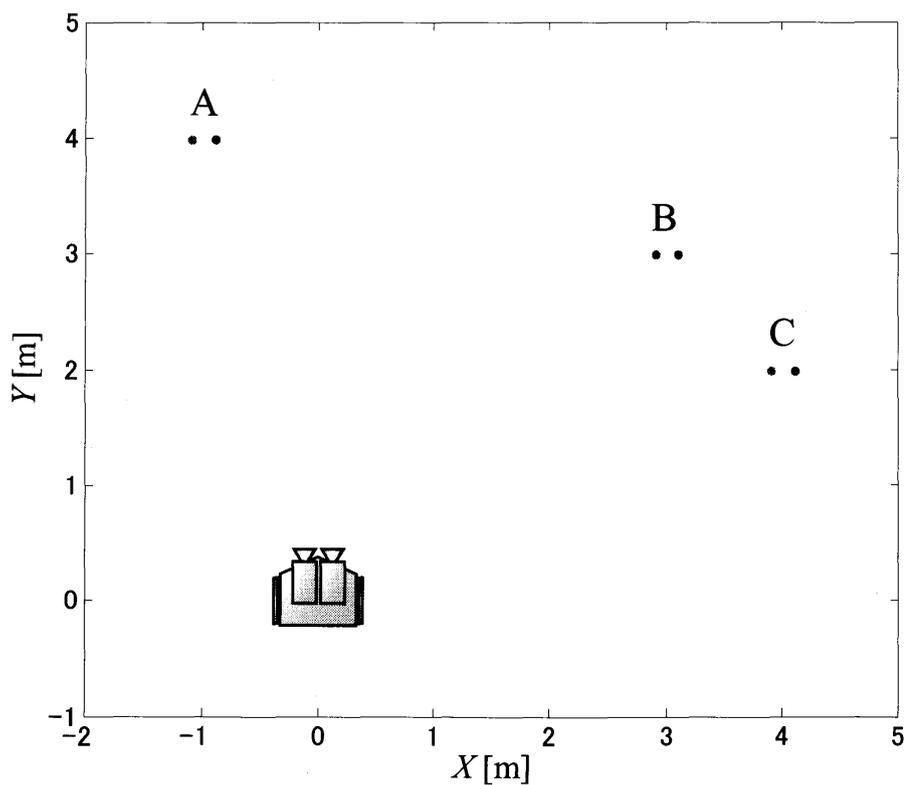


図6.1 目標の位置

Fig. 6.1 Position of Targets

6.2 シミュレーション結果

図 6.2 に走行軌道のシミュレーション結果を示す。また、表 6.2 に到着時における移動ロボットの位置・姿勢を示す。

図 6.2 より、移動ロボットの軌道は目標の高さに影響されずほぼ一致していることが分かる。また、目標との距離が大きい場合は接近を優先し、目標に近づいてから回り込みを行い正対を達成していることが確認できる。

表 6.2 の姿勢の結果を見ると、全ての場合で約 $90[\text{deg}]$ を示していることから回り込みが適切に行えているといえる。また、 X 座標は目標と一致、 Y 軸座標は目標から $0.6[\text{m}]$ 離れた位置で停止していて条件を満たしているといえる。このことから、位置・姿勢の精度は良好であり、目標に正対することも達成できていることが分かる。

以上のことから、本手法の有効性がシミュレーションにおいて確認できた。

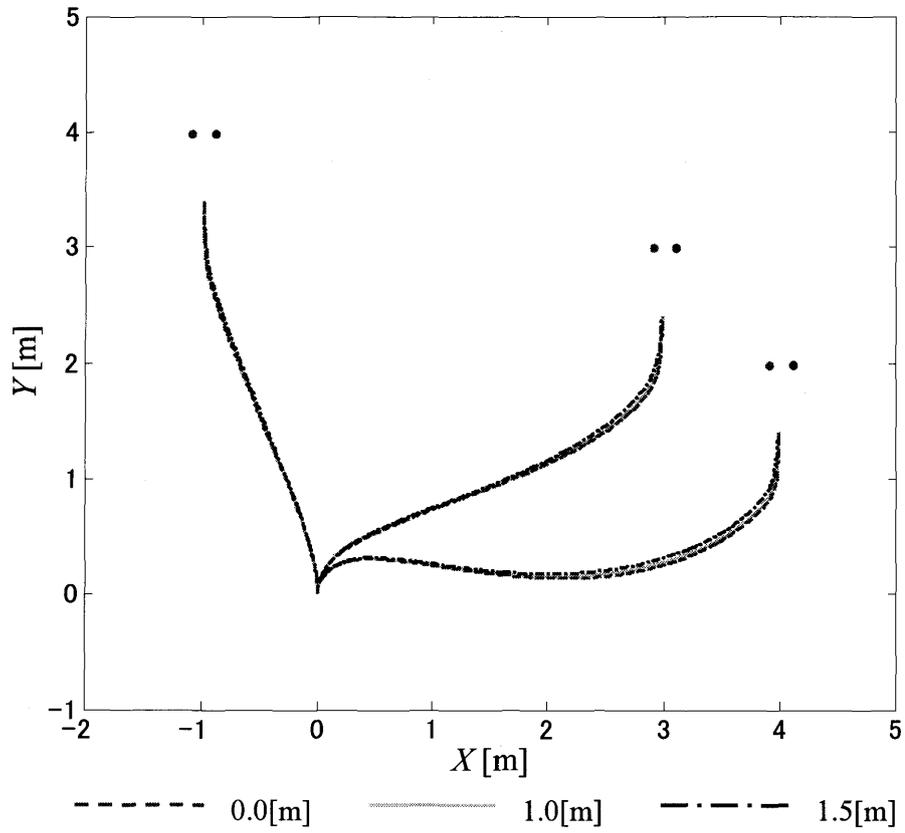


図6.2 軌道結果
Fig. 6.2 Trajectories

表6.2 到着位置・姿勢（目標の高さ1.0[m]）

Table 6.2 Final Positions and Postures

Target	X[m]	Y[m]	θ [deg]
A	-1.00	3.40	91.9
B	3.00	2.40	90.2
C	4.00	1.40	87.6

第7章

結言

本研究では，ステレオビジョンのアクティブカメラを搭載した移動ロボットを目標正面へ誘導するための方法を提案した．これまで我々の研究グループで行ってきた移動ロボットの誘導法には，目標の設置位置が移動ロボットの走行面と同一でなければならないという制約や，移動ロボットの到着位置を任意に決定できないという問題があった．そこで，パン，チルト角を有するステレオビジョンのアクティブカメラを用いて移動ロボットを誘導することでこれらの問題を解決することを提案した．

本手法では，まず，ステレオビジョンを用いることで得ることができる奥行きの情報を利用して，目標までの距離と高さを求めた．目標までの距離が計算できることで移動ロボットの到着位置を任意に決定できることが可能となった．次に，画像平面内の目標の傾きにより移動ロボットと目標の相対位置が推測できることを利用し姿勢指令値を求めた．この姿勢指令値は目標の高さに依存しないように生成させた．また，目的に応じて移動ロボットの軌道を変化させることを可能とした．シミュレーションを行うことで上記の有効性が確認された．

次に本手法における今後の課題について述べる．目標の高さがカメラの高さと同一である場合，画像平面内で物体の傾きが得られないため，誘導がうまく行えないと考えられる．これを解決するには，アクティブカメラの垂直方向に軸を追加しカメラの高さを調節できるようにする必要があると考えられる．また，本手法では移動ロボットの誘導に焦点を当てているが，障害物回避やロボットの意思決定と組み合わせも考える必要があると思われる．

付録

A. 移動ロボットのパラメータ

移動ロボットのパラメータについて図 A.1, 表 A.1 に示す.

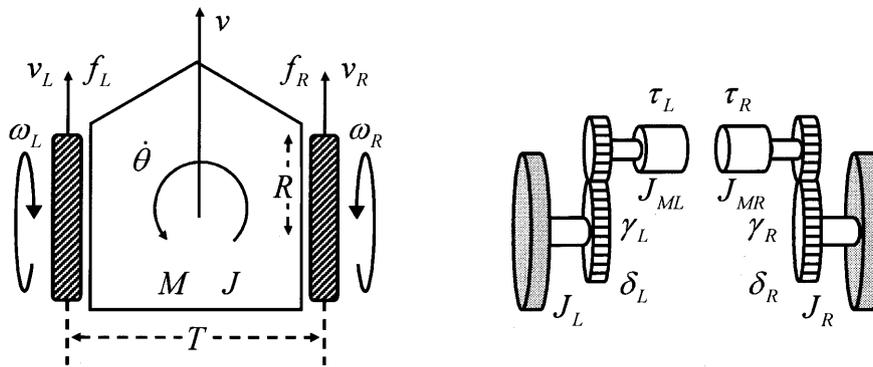


図 A.1 移動ロボットのパラメータ
Fig. A.1 Parameters of Mobile Robot

表 A.1 移動ロボットのパラメータ

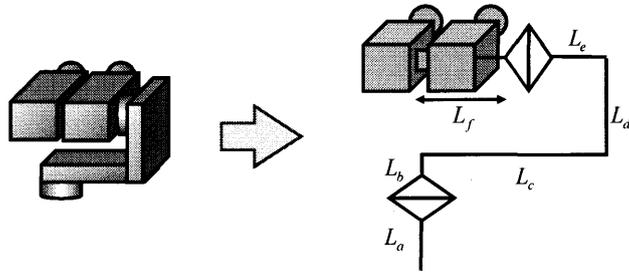
Table.A.1 Parameters of Mobile Robot

M	Robot Mass	10	[kg]
J	Robot Inertia	0.12363	[kgm ²]
J_{RL}	Wheels Inertia	5.4×10^{-4}	[kgm ²]
$J_{MR/ML}$	Motors Inertia	6.89×10^{-7}	[kgm ²]
δ_{RL}	Wheels Friction Coefficient	0.02	[kgm ² /s]
T	Tread Length	0.337	[m]
R	Wheels Radius	0.065	[m]
γ_{RL}	Gear Ratio	16	
τ_{RL}	Motors Torque		[Nm]
v	Robot Velocity		[m/s]
v_{RL}	Wheels Velocity		[m/s]
$\dot{\theta}$	Robot Angular Velocity		[rad/s]
ω_{RL}	Wheels Angular Velocity		[rad/s]
$\omega_{MR/ML}$	Motors Angular Velocity		[rad/s]
f_{RL}	Wheels Driving Force		[N]

B. アクティブカメラのパラメータ

アクティブカメラのパラメータについて図 B.1, 表 B.1 に示す.

ロボット座標系原点からアクティブカメラの設置位置までの奥行きは 0.175[m], 高さは 0.2[m]である. アクティブカメラの垂直方向のリンク長の合計が 0.13[m]であるので, ロボット座標系原点からカメラまでの高さは 0.33[m]である.



図B.1 アクティブカメラのパラメータ
Fig. B.1 Parameters of Active Camera

表 B.1 アクティブカメラのパラメータ
Table.B.1 Parameters of Active Camera

L_a	Link a	0.04	[m]
L_b	Link b	0.01	[m]
L_c	Link c	0.06	[m]
L_d	Link d	0.08	[m]
L_e	Link e	0.03	[m]
L_f	Link f	0.03	[m]
f	Focal Length	0.008	[m]
b	Base Length	0.05	[m]
	Size of Image Plane	640×480	[pixel ²]
k_x		640/0.0054	[pixel/m]
k_z		480/0.0047	[pixel/m]
(x_0, z_0)		(320,240)	[pixel]

参考文献

- [1] 吉川恒夫：「ロボット制御基礎論」，コロナ社 (1990)
- [2] 猪刈健一：「TRIGGER」，日刊工業新聞社，vol.19, No.2, (2000)
- [3] 太田 順, 倉林 大輔, 新井 民夫：「知能ロボット入門-動作計画問題の解法-」，コロナ社
- [4] 橋本浩一：「視覚と制御」，SICE 制御部門大会前日のワークショップ，pp37-68 (2001)
- [5] 橋本 浩一，蘇 昭仁，則次 俊郎：「画像面内での軌道生成に基づく車両の視覚フィードバック制御」，日本機械学会 C, Vol.66, No.652, pp.172-178, (2000)
- [6] 岡本 和也，山口 健吾，丸 典明：「線形ビジュアルサーボによる移動ロボットの追従制御」，日本機械学会 C, Vol.72, No.718, pp.1840-1847, (2006)
- [7] H. Zhang, and J. P. Ostrowski, “Visual Motion Planning for Mobile Robots”, IEEE TRANSACTION ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol.18, No.2, pp.199-208, (2002)
- [8] 蛭川 達彦，駒田 諭，平井 淳之：「画像特徴量に基づいたアクティブカメラ搭載型非ホロノミック移動ロボットの誘導」，平成 19 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集，pp.II-275--II-278, (2007)
- [9] 出口光一郎：「ロボットビジョンの基礎」，コロナ社，(2000)
- [10] 駒田 諭，吉田 将也，堀 孝正：「推定画像特徴量を用いたロボットのビジュアルサーボ」，電学論 D, Vol.123, No.10, pp.1200-1205, (2003)
- [11] 飯田 重喜，油田 信一：「車輪型移動車の走行制御—移動車の動特性を考慮した速度制御—」，第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp913-915

謝辞

本論文は、筆者の三重大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻在学中における研究活動の成果をまとめたものであります。

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、熱心なご指導と適切なお意見を賜りました、三重大学教授 平井 淳之 先生に深く感謝いたします。また、先生には機会のある度に技術者、研究者、そして社会人の先輩として貴重なご意見を頂き、併せてこの場を借りて感謝いたします。

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、適切な御指導と御助言を頂きました同大学准教授 駒田 諭 先生に深く感謝いたします。

また日頃から本研究の遂行および学生生活において、貴重な御意見を頂きました同大学助教 弓場井 一裕 先生、同大学技術職員 中村 勝 氏に深く感謝いたします。

本論文の作成にあたり、査読頂き貴重な御意見を頂きました同大学教授 石田 宗秋 先生に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、自律移動ロボットグループの先輩として親身な御指導を頂きました同大学院博士前期課程卒業生 宮崎 真吾 氏、同大学院卒業生 蛭川 達彦 氏に感謝いたします。

研究室の同期として時には切磋琢磨し合い、時には互いを励まし合い研究を遂行してきた 片山 周 君、藤井 厚志 君、三宅 圭二 君、藪井 将太 君に深く感謝いたします。

同じ研究グループとして共に研究を進め、貴重な経験を頂いた 木下 弘輔 君、山口 敦由 君、鈴木 勇介 君、小池 堂夫 君に深く感謝いたします。今後の活躍を心より期待しております。

また、何かと至らない自分を受け入れ、多くの御協力を頂き、学部から大学院までの三年間の研究生活を充実したものにしてくれた電機システム研究室の皆さんに深く感謝いたします。電機システム研究室の更なる発展を心より願っております。

最後に、大学院まで進学する機会を与えて下さり、さらには何一つ不自由なく学生生活を送らせて頂いた両親に心から感謝します。

論文目録

- [1] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「画像特徴量を用いた移動ロボットの誘導に関する研究」, SICE 三重地区計測制御研究講演会講演論文集, A18-1 (2008.12)
- [2] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「オンラインキャリブレーションを付加したステレオビジュアルサーボによる三次元追従制御」, 産業計測制御研究会論文集, IIC-09-081 (2009.3 発表予定)
- [3] 中村亮太, 駒田諭, 平井淳之: 「画像特徴量を用いた移動ロボットの誘導に関する研究」, 産業計測制御研究会論文集, IIC-09-135 (2009.3 発表予定)
- [4] R.Nakamura, S.Komada and J.Hirai: “ Navigation of Mobile Robots by Image Features” , IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009.10 発表予定)