JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ロバスト推定による視覚サーボシステムの設計
Author(s)	川端，昭弘
Citation	
Issue Date	1998-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/854
Rights	
Description	Supervisor:藤田 政之，情報科学研究科，博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

博 士 論 文

ロバスト推定による視覚サーボシステムの設計

指導教官　藤田 政之

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

川端 昭弘

1998 年 3 月

Copyright © 1998 by Akihiro Kawabata

要 旨

視覚機構とマニピュレータを融合し，作業を行わせようとする視覚サーボの研究は，すでに30年を越える歴史をもち，センサや制御器の発展にともなって様々な応用が行われるようになった．近年では，その特徴において分類されるようになり，移動対象のように変化する環境に対して，正確な作業を行うための試みが望まれている．本論文では，画像面上の外乱や移動対象の変化に対してロバストな視覚サーボの設計について論ずる．本研究の目的は，マニピュレータの手先効果器にカメラを取り付けたアインハンド構造での視覚サーボの構成とロバストな設計の実現である．

まず，本論文では，2次元で移動対象をカメラが追従する場合の最も基本的な視覚サーボ問題について考える．この問題ではカメラの運動平面と平行な平面上を対象が運動することを仮定する．したがって線形時不変のシステムとしてモデル化し，これに出力レギュレーションの手法を用いて設計を行う．この手法での視覚サーボでは，フィードバックされる状態を推定するフィルタが重要とされる．従来，用いられてきたカルマンフィルタは，加速度や画像処理における外乱を白色雑音とみなし，推定を行っていた．ここでは，より一般的な信号である有界な外乱に対して，有効な評価基準をもつ$\mathcal{H}_\infty$フィルタを適用することを考える．さらにこの手法の実システムにおける有用性と問題点について検討する．実験では，特に対象の運動の変化に依存する外乱に対してのロバスト性について考察し，その結果を示す．この結果から，出力レギュレーションにロバストな推定器を適用した視覚サーボの有用性と$\mathcal{H}_\infty$フィルタの有効性を確認する．

さらに，例えば，ベルトコンベア上での移動対象に対する手先効果器上のドライバーの相対位置決め作業を想定した視覚サーボについて考える．このようなツールを有するアインハンド構造のシステムでは，カメラ視線方向の運動を含むため，3次元空間上での非線形モデルとなる．これを1次近似した線形時変システムで記述する．このシステムに，時変$\mathcal{H}_\infty$フィルタを適用した出力レギュレーションを用いて，行った設計，実験について示す．実験結果から，この手法の有用性と$\mathcal{H}_\infty$フィルタの存在性に関する問題点について考察する．また，非線形システムに対して適用できるように拡張された$\mathcal{H}_\infty$フィルタの提案と適用を考える．単眼視の3次元視覚サーボに適用したシミュレーションの結果から，視覚サーボの性能の改善とこの手法の問題点を示す．このことから，従来，多様なアプリケーションに用いられてきた拡張カルマンフィルタのように，拡張$\mathcal{H}_\infty$フィルタの有効性がいえる．

結論として，出力レギュレーションによる視覚サーボ手法において，ロバストな推定器を用いることの有効性と，実システムに$\mathcal{H}_\infty$フィルタを応用することによる性能の改善の可能性を示す．

目 次

1 序論 **1**

1.1 視覚サーボ研究の歴史と背景 1

1.2 研究の特色と従来研究 4

1.3 研究の目的と概要 6

1.4 構成 8

2 準備 **11**

2.1 出力レギュレーション 11

2.1.1 ロバストな状態推定器の必要性 13

2.2 ロバスト推定問題 14

2.2.1 時変システムに対する $\mathcal{H}_\infty$ フィルタ 15

2.2.2 拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの提案 16

2.3 実験に用いた視覚サーボシステムの構成 20

3 移動対象追従のための視覚サーボの設計 **23**

3.1 2 次元単眼視視覚サーボの仮定 23

3.1.1 移動対象とカメラの運動モデル 24

3.1.2 透視変換による観測モデル 27

3.1.3 2 次元視覚サーボ問題 28

3.2 線形時不変システムへの出力レギュレーションの適用 29

3.2.1 問題の設定 29

3.2.2 応答速度と安定性の改善 29

3.2.3 外乱を考慮した拡大系の構成 31

3.2.4 ロバストな線形時不変フィルタの適用 32
3.3 実験 33
3.3.1 単眼視視覚サーボシステム 33
3.3.2 実験目的と方法 35
3.3.3 実験結果 38
3.4 考察 39

4 3 次元ロバスト視覚サーボの設計 47
4.1 ステレオ視による 3 次元視覚サーボ問題 47
4.1.1 3 次元ステレオ視覚サーボ問題の仮定 47
4.1.2 作業対象とカメラの運動モデル 48
4.1.3 ステレオ視の観測モデル 49
4.1.4 線形時変システムへの出力レギュレーションの適用 52
4.1.5 外乱を考慮した拡大系の構成 54
4.1.6 線形時変フィルタの適用 54
4.1.7 ステレオ視による視覚サーボ実験 55
4.1.8 考察 59
4.2 単眼視による 3 次元視覚サーボ問題 64
4.2.1 単眼視 3 次元視覚サーボ 64
4.2.2 拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの適用 67
4.2.3 単眼視による視覚サーボシミュレーション 69
4.2.4 シミュレーションの考察 69
4.3 考察 73

5 結論 75

謝辞 79

参考文献 81

本研究に関する発表論文 85

第 1 章

序論

1.1 視覚サーボ研究の歴史と背景

マニピュレータやロボットの作業内容や作業場所の多様化にともない，カメラ等からの視覚情報を用いた変化する外界への対応が要求されるようになった．ロボットに視覚センサの情報を用いるという試みは，アクティブビジョンからの流れを組む”look-then-move” と呼ばれるオープンループ的な手法から，視覚情報を用いてリアルタイムに制御を行う”look-and-move” の手法へと変貌した [1].

これより，過去 30 年にわたって研究がなされるようになり，視覚情報からマニピュレータの手先効果器やツールの位置制御や作業をおこなう視覚サーボの研究は，その特徴において分類されるに至る [2][3]．フィードバックされる誤差信号の違いによる分類では，画像面上での特徴量誤差を用いるものとタスク (デカルト) 空間上の位置姿勢誤差を用いる手法に大別される．また，カメラを移動させるときの制御入力の違いによる特徴でも分類される．

表中 (表 1.1)，タスク空間上での位置姿勢誤差の情報をフィードバックに用いる (A)(C) の手法は，位置ベース視覚サーボ (Position-Based Visual Servoing) とよばれている．この手法では，タスク空間上でのカメラと対象の相対での位置姿勢を 2 次元の画像面の特徴量の情報から復元したデカルト空間座標系の位置姿勢に変換し [4]，目標位置姿勢との差をフィードバックする．画像面上の情報からの 3 次元情報の復元には，能動視覚，アクティブ

表 1.1: 視覚サーボの誤差信号と入力による分類

	デカルト空間上での位置姿勢誤差	画像面上での特徴量誤差
速度制御入力	図 1.1-(A)	図 1.1-(B)
トルク制御入力	図 1.1-(C)	図 1.1-(D)

ビジョン等で多く用いられてきた推定器による形状や位置姿勢の画像認識がベースになっている．閉ループ系において目標位置姿勢が入力となっており，オペレータや他の上位システムが考えるタスクの軌道生成が行いやすい利点をもつ．

タスク空間上での位置姿勢の再構成をおこなわずに画像面上の特徴量の情報の誤差を考えて [5] フィードバックに用いる (B)(D) の手法は，画像ベース視覚サーボ (Image-Based Visual Servoing) とよばれている．画像面上での特徴量とタスク空間位置姿勢 (B)，もしくは関節角 (D) との関係を偏微分することによって得られる画像ヤコビアンを直接制御則に取り入れる手法が一般的である．画像の解釈を必要としない高速処理と物体モデルやマニピュレータの機構学的モデルの不正確さに影響されにくい [6] 利点をもつ．

位置ベース法，画像ベース法，それぞれの利点は，対比される手法に対して，問題点となり，研究がすすめられてきた．また，近年の画像センサやディジタルコントローラの高速化などの発展にともなって，複雑な制御則が高速に処理できるようになるなどの技術的な改善によって解決された問題点もある．

視覚サーボのモデルには，マニピュレータダイナミクス，タスク／関節の空間変換，視覚センサの透視変換と 3 つの非線形なモデルが存在し，それぞれについてモデル誤差，観測外乱といった不確かな要素をもっている．外乱に対してロバストな制御を考える場合は，この要素の見積もりが重要であるといえる．制御入力の違いによる分類は，視覚サーボシステムのどこまでを制御対象とみなしてモデリングするかにかかわってくる．表中，(A)(B) と (C)(D) の違いは，制御入力信号の物理的な違い（トルク／速度）で分類した例となっている．産業用マニピュレータの多くは既にマニピュレータダイナミクスを補償するように閉ループが高速な内部ループによって，関節角速度やツール位置制御を入力とするよう構成されている．この場合，(A)(B) のようなモデリングが有効となる．またダイレクトドライブマニピュレータに代表されるようなロボットダイナミクスが性能に影響する場合には，

(C)(D) のように全体のシステムを考え，コントローラを構成する手法が妥当といえる．

90 年代にわたり，視覚デバイスや計算速度の向上とともに，視覚サーボ研究は，マニピュレータのタスクへの対応 [7] 等も行われるようになった．解説 [8][9][10][11] や分類がなされる中，近年においては，視覚サーボ研究はアプリケーションへの応用を考えた上で，視覚サーボそのものの性能改善や様々な視覚サーボの手法の性能比較が望まれている [12]．

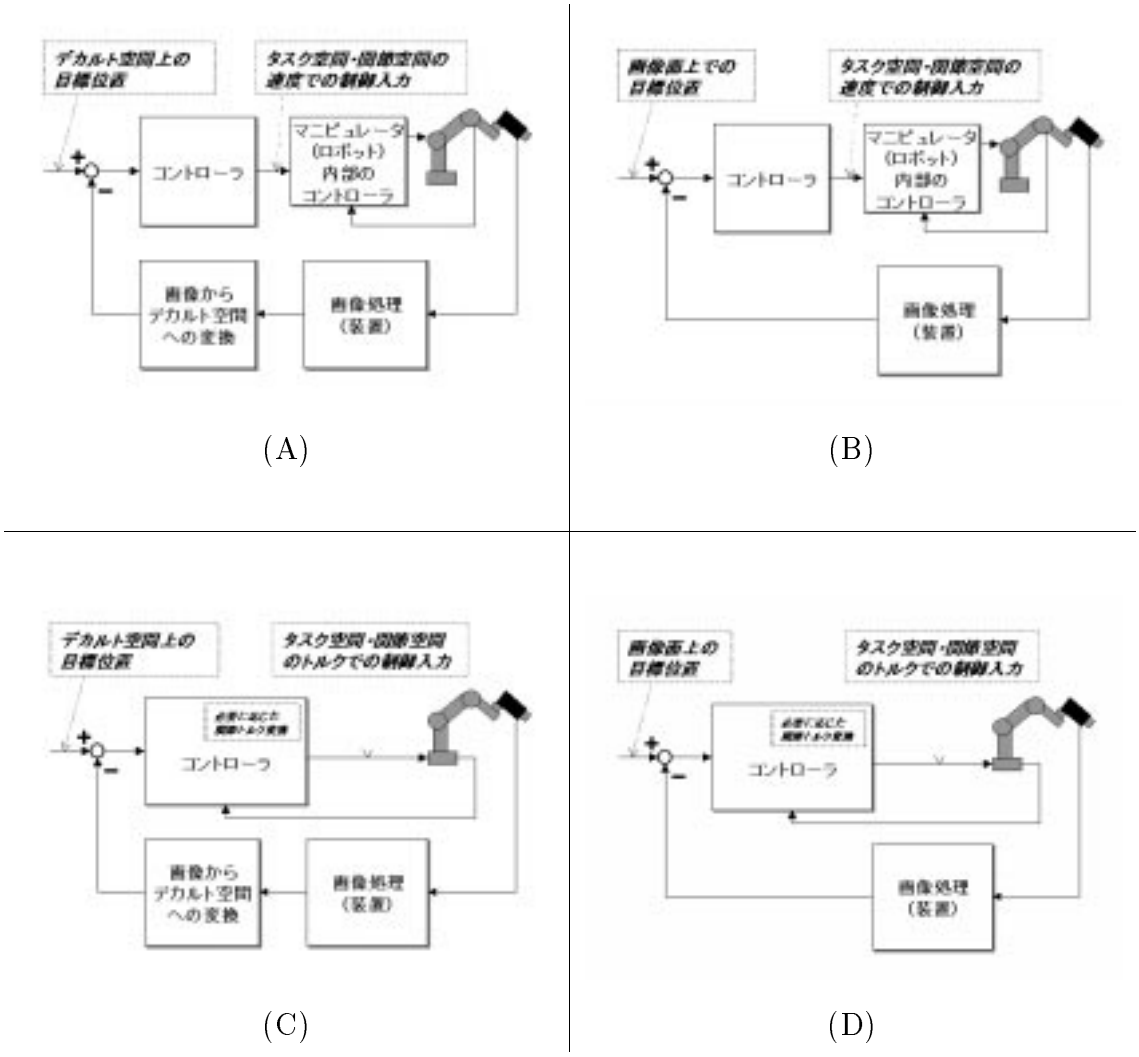


図 1.1: 視覚サーボの誤差信号と入力による分類

1.2 研究の特色と従来研究

視覚サーボを大別する手法の中で，画像ベース法に基づく研究では，画像ヤコビアンパラメータの推定による精度の改善や画像ヤコビアンの正則性 [14] への対応 [15] などが行われている．さらに，ダイレクトな視覚フィードバック制御が可能となるため，ロボットダイナミクスを考慮した視覚サーボ [17][18] やアプリケーションへの適用 [16] なども研究されるようになった．しかし画像面上における情報の直接的なフィードバックであり，デカルト空間上への復元を行わないために，移動対象に対する把持などの複雑な作業は困難である．

位置ベース法に基づく視覚サーボでは，図 1.2のような座標系の構成を考える．Σ_Tは，作業対象に固定されたフレーム，Σ_Cはカメラに固定されたフレームとする．このときマニピュレータが対象に作業を行うためには，カメラフレームΣ_Cに対する対象フレームΣ_Tの 3 次元空間位置姿勢をカメラ情報からリアルタイムに復元する必要がある．これと作業のための目標値の偏差をフィードバックすることによって，カメラや手先効果器に取り付けられたツールの位置姿勢を制御する問題となり，従来のマニピュレータの位置，姿勢制御の自然な拡張となっている．したがって外乱に対してロバストかつ高速な目標値との偏差の復元法が研究の対象となってきた．外乱に対してロバストな推定を行うことができれば，さらに位置姿勢速度の推定情報を他のマニピュレータの移動対象の把持タスク [19] 等にも利用できる．

カメラ情報から 3 次元空間の位置姿勢の復元は，従来アクティブビジョン [20] 等で行われてきたように [21] 作業対象の 3 次元の位置や速度を推定 [22] し，これを視覚フィードバックに用いる．この推定にカルマンフィルタ [23][24][25] が多く用いられてきた．アクティブビジョンや視覚サーボにこれが利用されてきた理由のひとつには，アルゴリズムが時間更新で記述でき，ディジタル制御装置に実装が行いやすいことが挙げられる．また，カルマンフィルタは非線形なシステムに対して，拡張することが可能であり，従来様々なアプリケーションに対して応用 [26][27] されてきた手法でもある．しかし，この手法において作業を高速かつ正確に実現するためには，推定器は最も重要な要素の一つであり，画像や移動対象の速度変化といった外乱に対してロバストな推定器が望まれている．

一方 $\mathcal{H}_\infty$制御理論の確立をうけて推定問題に $\mathcal{H}_\infty$評価基準を導入する試み [28] がなされるようになった．従来から用いられてきたカルマンフィルタは，加速度や画像処理における外乱を白色雑音とみなし，推定を行っている．$\mathcal{H}_\infty$フィルタ [30] は，$\mathcal{H}_\infty$評価基準を導入

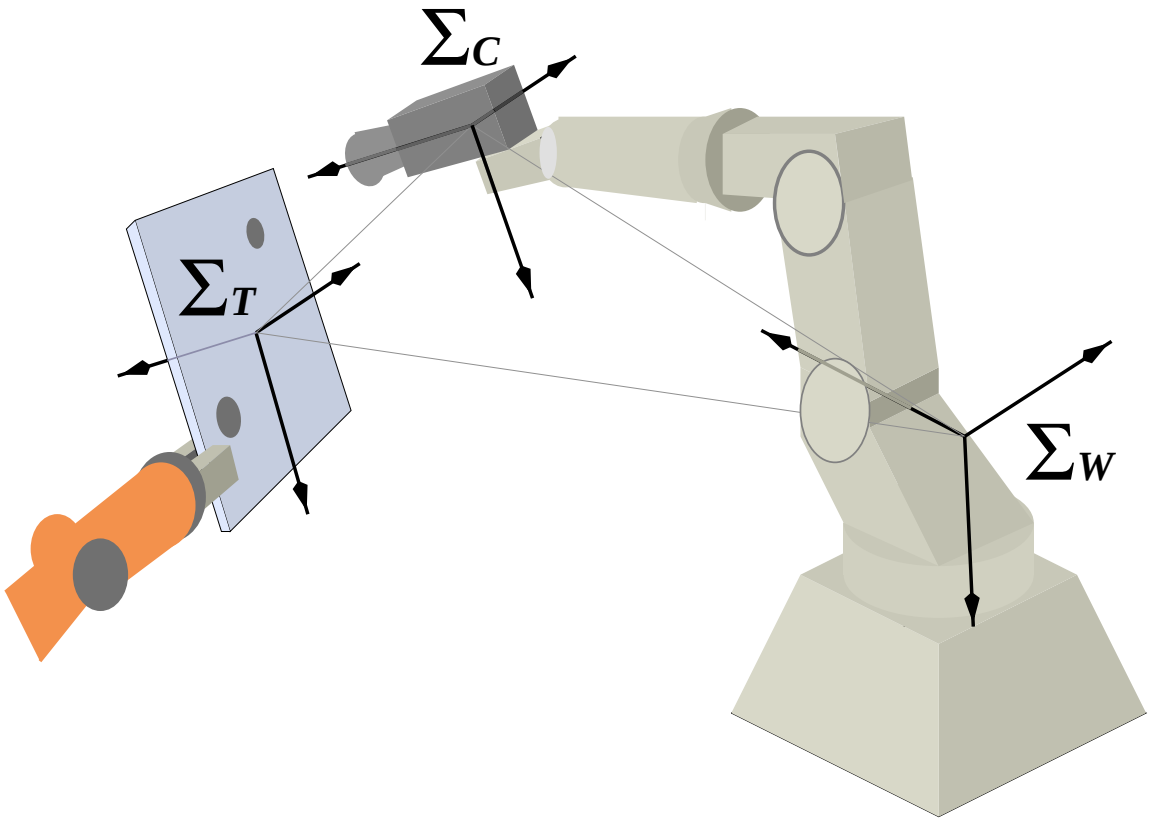


図 1.2: アイインハンドシステムを用いた視覚サーボのフレームモデル

することによって，最悪外乱を押さえる効果を有する．このアルゴリズムは，カルマンフィルタと同様に，コンピュータによる離散時間更新処理が可能であり，アクティブビジョン等にも適用 [31] されている．ただし，視覚サーボシステムの場合では，フィードバックループを形成する必要があるため，状態推定のためのフィルタを内部安定な出力レギュレーションに適用する形 [32] でもちいられる．出力レギュレーションをもちいる制御手法は，従来 [33] 等で磁気軸受システムの制御に適用され，有効性が実証されている方法である．文献では，推定器に最小次元オブザーバをもちいているが，パラメータの不確かさや外乱に対してさらにロバストな推定器が望まれている．

本研究で取り扱う視覚サーボはアイインハンドシステムを用いた 3 次元空間上の位置姿

勢を目標とする位置ベース法に分類できる．この手法で，極めて重要とされる 3 次元空間位置姿勢，また対象の速度のリアルタイムな推定に $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用い，出力レギュレーションの推定器として適用する．この実システムに対する有用性と問題点について考察する．

1.3 研究の目的と概要

研究の目的として，アイインハンド構造をもつマニピュレータをもちいて，外乱に対してロバストな視覚サーボ構成，設計について論ずることである．

したがって，位置ベース法で重要とされる推定問題ついて着目し，外乱についてロバストな推定器として $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの適用をおこなう．また，カルマンフィルタにおいて，非線形のシステムに対して推定を行うために，時変システムにおけるカルマンフィルタを拡張した拡張カルマンフィルタが多くのアプリケーションに適用されてきた．同じように $\mathcal{H}_\infty$ フィルタについても拡張を行い， そのアルゴリズムに明示できれば，実際の応用に対して有効であるといえる．そこで，離散時間で時変なシステムにおけるカルマンフィルタと $\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアルゴリズムを説明し，拡張カルマンフィルタのように $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを拡張した，拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを提案する．この拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを出力レギュレーションによって，制御に用いるという立場からその閉ループの安定性の問題点について示す．

視覚サーボシステムへの適用において，具体的には，カメラと対象の運動法則に基づいて状態空間のモデル化を行う．さらにカメラの透視変換モデルに基づいて観測方程式をたてる．この制御プラントのモデルについて出力レギュレーションを用いることによって，位置ベースに基づく視覚サーボシステムを構成する．本稿では，まず，移動対象を 2 次元で追従する視覚サーボで線形システムに対するこの手法の妥当性とフィルタの性能比較の考察をおこなう．つぎに，移動対象への作業をおこなうという観点から，カメラ視線方向の制御を考える． 第 1 にステレオ視による線形時変なシステムのモデルの視覚サーボ，第 2 に単眼視での非線形システムのモデルの視覚サーボについて考察する．内部安定な出力レギュレーション制御は従来の推定を必要とするアプリケーションに対して有効な手法であり，各タイプのモデル化に対して，状態フィードバックの応答速度と安定性の改善，推定器によるフィードフォワード補償，フィードバック実現のステップによって制御器を構成する．この手法の概要について説明し，システムの特徴に留意して適用するフィルタを定め，各タイプについて，モデリングと問題設定，出力レギュレーションの適用とフィルタの設計，シミュレーションと比較実験による考察を示す． 具体的な概要は以下のようにな

る．まず，対象を 2 次元で追従する視覚サーボ問題について，視線方向での回転 1 自由度とこれを垂線とする平面上での並進 2 自由度で 1 台のカメラが運動する場合を考える．対象がカメラの運動平面と平行な平面上を移動するという仮定からこのモデルは，線形時不変のシステムとなる．このシステムに対して内部安定な出力レギュレーションを適用する．ここで推定器として，線形時不変なシステムに対する定常 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタ及び定常カルマンフィルタを用いる．閉ループの安定性について考察し，視覚サーボ実験を行う．実験の目的として，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアプリケーションへの適用に対する有用性と問題点を探ること，および視覚サーボシステムへの影響を示す．具体的な実験として，外乱の中で特に対象の運動における加速度に着目し，カルマンフィルタと $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの比較実験を通じて，外乱に対するロバスト性を詳しく考察する．

次に，視覚サーボで，例えばベルトコンベア上の作業対象に対する手先効果器の作業のような事態を想定し，手先効果器にカメラとドライバーを取り付けたシステムについて考える．運動としては，カメラ視線方向に対する制御を行うため，並進 3 自由度とする．まず，ステレオ視を用いた作業対象の透視変換のモデルから，テーラ展開 1 次近似して，線形時変のシステムとみなす．このモデルについて，時変システムに対する推定器をもちいた内部安定な出力レギュレーションの手法を適用する．ここで，推定器として線形時変なシステムに対するカルマンフィルタと $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いて比較実験を行い，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの有用性と作業をおこなう場合の適用上の問題点，時変システムにしたことに対する安定性の問題点について考察する．

さらに，画像面上での線分の長さ等の特徴から，単眼視による視覚サーボを考える．モデルとして，非線形のモデルを考え，ここに内部安定な出力レギュレーションを構成する．このような構成のアプリケーションにおいて，従来拡張カルマンフィルタが多く用いられてきた．$\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアルゴリズムは，カルマンフィルタのアルゴリズムと類似した更新過程によって示されており，同様の拡張を $\mathcal{H}_\infty$ フィルタに行った拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを適用する．この手法での視覚サーボの構成の妥当性と拡張フィルタをアプリケーションにもちいる場合の有用性について考察する．まとめとして，位置ベース法に基づく視覚サーボシステムにおけるロバスト推定器の有用性と考察を要約する．

従来の推定器を必要とするアプリケーションにもちいられてきた内部安定な出力レギュレーション制御を視覚サーボシステムに対して適用した．この中の推定器を外乱に対してロバスト化することによって，位置ベース法に基づく視覚サーボシステムの性能の向上と

適用の問題点を詳細に論じたものになっている．さらに，従来カルマンフィルタにおいて行われてきた実験を通じての実システムに対する適用と詳細な考察を $\mathcal{H}_\infty$ フィルタにおいても行い，この有用性と問題点を考察する．

1.4 構成

本論文の構成を以下に述べる．

第 1 章 「序論」において，視覚サーボ研究の背景と従来研究をあげ，外乱にロバストな推定器をもちいた視覚サーボの有用性の考察を目的とすることを述べた．

第 2 章「準備」では，まず，推定則を適用するための内部安定な出力レギュレーション制御について説明する．次に状態を推定するためのフィルタについて論ずる．実際には，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの適用を考えているため，時不変，時変フィルタについて説明する．また，拡張カルマンフィルタのように非線形システムに対する拡張を考えるため，拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの提案を行う．さらに，研究で用いた視覚サーボシステムの構成について述べる．

3 章，4 章において，ロバスト推定器を用いた視覚サーボのモデリング，制御則の適用，実験，考察を述べる．

まず，第 3 章 「移動対象追従のための視覚サーボ」では，アイインハンド構造で，最も基本的な問題とされる平面空間での対象へのカメラの追従問題を考える．すなわち，単眼視をもちいた並進 2 自由度，回転 1 自由度の 2 次元平面における視覚サーボ問題の考察を行う．具体的には，単眼視のアイインハンド構造の視覚サーボシステムを線形時不変のシステムとしてモデリングし，これに出力レギュレーションと推定器として定常 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタをもちいる．実システムにおける物理的な外乱を考慮して，カルマンフィルタとの比較実験を行い，考察する．

第 4 章 「3 次元ロバスト視覚サーボの設計」では，作業を行わせる観点を取り入れ，単なる 2 次元的な移動対象への追従から 3 次元的動作へと拡張させる．具体的には，ステレオ視によってカメラ視線方向に対する運動を加え，この推定・制御について述べる．これを時変システムとしてモデル化し，出力レギュレーションに時変のフィルタをもちいる．シミュレーションとマニピュレータによる作業を交えた実験結果から，この問題点を考察する．さらに，単眼視における 3 次元視覚サーボ問題の推定・制御・作業を考える．これは非線形システムとしてモデル化し，出力レギュレーションに時変のフィルタを拡張した拡張フィルタを適用し，安定性，フィルタの設計の問題点について示した．ここでは，2 章

で提案した拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いたシミュレーションの結果と考察を述べる．

以上を第 5 章「結論」として，まとめる．

第 2 章

準備

本研究における視覚サーボシステムでは，出力レギュレーションを用いている．本章では，準備として視覚サーボに対する出力レギュレーションの適用の概要を述べる．次に，離散線形システムにたいして，適用する推定器として，時変$\mathcal{H}_\infty$フィルタについて示す．さらに非線形システムにたいする適用を可能とするために，拡張された$\mathcal{H}_\infty$フィルタを提案する．また，本研究の実験に用いた視覚サーボシステムの概要を記載する．

2.1 出力レギュレーション

ここでは，2 自由度の視覚サーボのシステムを例にして，出力レギュレーションの概要を示す．

2 自由度視覚サーボシステムは，対象の運動を$\boldsymbol{q}_k$，カメラの運動を$\boldsymbol{u}_k$とするとき，以下のような離散系のシステムとして記述できる [32][34]．

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k \quad (\boldsymbol{q}_0\text{は一定}) \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{y}_{k+1} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k \tag{2.3}$$

ここで，$\boldsymbol{x}_k \in \Re^2$ はカメラと対象の特徴点の相対位置，$\boldsymbol{y}_k \in \Re^2$ は画像面上での対象の特徴点，$\boldsymbol{u}_k \in \Re^2$ はカメラの速度，$\boldsymbol{q}_k \in \Re^2$ は対象の速度を表すベクトルである．行列 $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{I} \in \Re^{2\times 2}$，$\boldsymbol{B} = T_s\boldsymbol{I} \in \Re^{2\times 2}$，$\boldsymbol{E} = T_s\boldsymbol{I} \in \Re^{2\times 2}$，$\boldsymbol{C} = \dfrac{f}{s}\boldsymbol{I} \in \Re^{2\times 2}$とし，$T_s$はサンプリング時間，$f$，$s$ は焦点距離および 1 画素の長さ，$\boldsymbol{I}$ は 2×2 の単位行列である．

この視覚サーボの制御問題としては,

「閉ループ系を安定とし，$\boldsymbol{x}_k \to 0$ となるような$\boldsymbol{u}_k$ を選ぶ」

こととする.

出力レギュレーションでは以下に示す 3 つのステップの設計法によって，この目標を達成する (図 2.1).

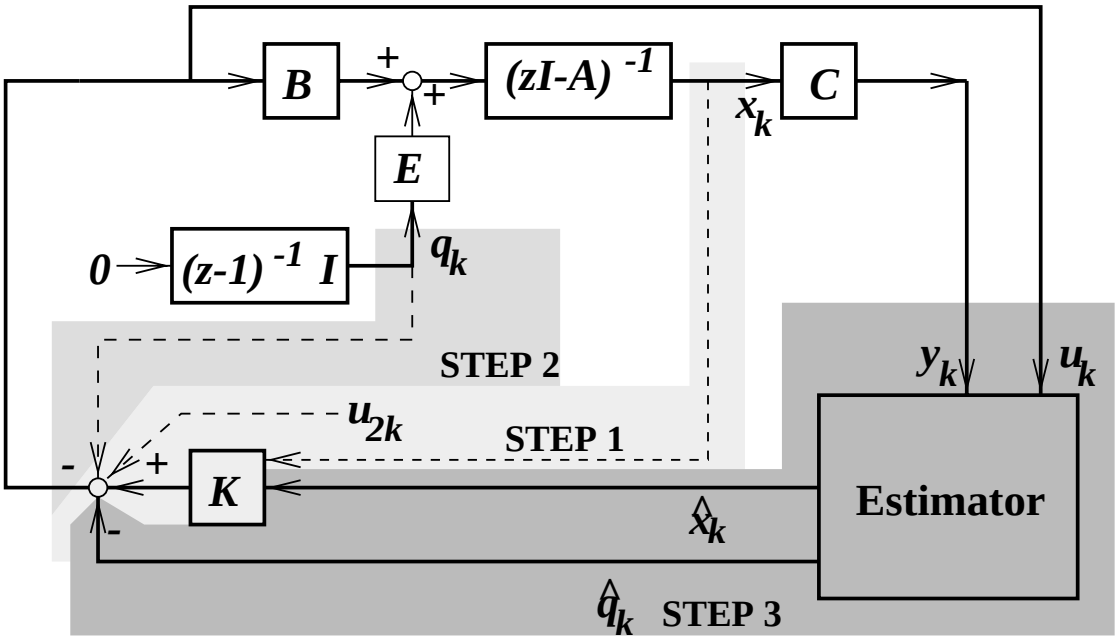


図 2.1: 出力レギュレーション

STEP 1： 状態フィードバックによって閉ループ系の応答速度と安定性を改善する.
(内部安定性の補償)
状態フィードバック入力

$$\boldsymbol{u}_k \;=\; \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{u}_{2k} \tag{2.4}$$

によってまず $(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})$ を安定にする．すなわち，内部安定性を補償するフィードバックゲイン$\boldsymbol{K} \in \Re^2$ が選ばれる.

STEP 2： 外部入力と平衡するために必要な制御入力を外部入力の関数としてもとめる．

(フィードフォワード補償)

式 (2.1) に式 (2.4) を代入すると

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = (\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{2k} + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k \tag{2.5}$$

となり，STEP 1 によって閉ループ系は安定化されている．

対象の速度$\boldsymbol{q}_k$がフィードフォワード入力として与えられるならば，

$$\boldsymbol{u}_{2k} = -\boldsymbol{q}_k \tag{2.6}$$

とすると， $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{E}=T_s\boldsymbol{I}$ から，$\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{2k}+\boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k=0$ となり，制御目的は達成される．

STEP 3： 外部入力を推定器によって選定し，フィードフォワード入力を出力フィードバックで実現する．

(フィードバック実現)

対象の運動モデルを含めた拡大系は，式 (2.1),(2.2) から，

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{k+1} \\ \boldsymbol{q}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ \boldsymbol{q}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{O} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}_k \tag{2.7}$$

となる．この拡大系の状態$\boldsymbol{x}_k$，$\boldsymbol{q}_k$は，直接観測できないため，出力$\boldsymbol{y}_k$を用いて推定する．その推定値を$\hat{\boldsymbol{x}}_k$, $\hat{\boldsymbol{q}}_k$とすると，これを用いて

$$\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}_k - \hat{\boldsymbol{q}}_k \tag{2.8}$$

を実現する．

2.1.1 ロバストな状態推定器の必要性

出力レギュレーションにおいて，拡大系の状態ベクトル$\boldsymbol{x}_k$，$\boldsymbol{q}_k$は推定されるとした．現実の視覚サーボシステムにおいては，以下のような外乱を含んでいると考えられる．

- カメラや対象の運動の速度は一定ではなく加速度をもつ．

- カメラ画像を観測量とするため，観測時における外乱が存在する．

また，ここでは 2 次元の視覚サーボを例にとったが，3 次元空間に拡張した場合では，非線形のシステムであり，モデル化の誤差が存在する．したがって，対象の相対位置や速度を以下に外乱に対してロバストに推定するかが視覚サーボの性能を決定する重要な要素となる．

2.2 ロバスト推定問題

従来，視覚サーボでは，この推定器にカルマンフィルタをもちいてきた．その例として以下に前節の視覚サーボシステムに対するアルゴリズムを示す．

拡大系 (2.7) に外乱 v_k,w_kを加えて，

$$\boldsymbol{x}_{ek+1} = \boldsymbol{A}_e\boldsymbol{x}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{v}_k \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{C}_m\boldsymbol{x}_{ek} + \boldsymbol{w}_k \tag{2.10}$$

ここで，$\boldsymbol{C}_m = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{O}_2 \end{bmatrix}$ とする．$\boldsymbol{H}_e$, $\boldsymbol{W}$をそれぞれ，外乱$\boldsymbol{v}_k$, $\boldsymbol{w}_k$の共分散行列として，$\boldsymbol{y}_{ek} = \boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{y}_k$, $\boldsymbol{C}_e = \boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{C}_m$とする．

定常カルマンフィルタ$\hat{x}_{ek}$は，リカッチ方程式 (2.11)(2.12) の解 Q をもちいて式 (2.13) のように計算される．

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{A}_e\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_e^T + \boldsymbol{H}_m\boldsymbol{H}_m^T \tag{2.11}$$

$$\boldsymbol{P}^{-1} = \boldsymbol{Q}^{-1} + \boldsymbol{C}_e^T\boldsymbol{C}_e \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{x}}_{ek+1} &= \boldsymbol{A}_e\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k \\ &\quad +(\boldsymbol{Q}^{-1} + \boldsymbol{C}_e^T\boldsymbol{C}_e)^{-1}\boldsymbol{C}_e^T(\boldsymbol{y}_{ek+1} - \boldsymbol{C}_e(\boldsymbol{A}_e\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k)) \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{e0} = \boldsymbol{O}$$

ここで，注意すべき点は，外乱$\boldsymbol{v}_k$, $\boldsymbol{w}_k$の取り扱いである．カルマンフィルタは，この外乱を白色雑音としてとらえた場合に有効といえる．したがって，対象の運動の急激な変化や視覚センサの出力にのる外乱に対応しきれない場合がある．これを解決するための推定則について以下に述べていく．ここでは，出力レギュレーションに適用するフィルタとして，時変システムに対する $\mathcal{H}_\infty$ フィルタについて説明する．さらに非線形モデルに対して適用を可能にする拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを提案する．

2.2.1 時変システムに対する $\mathcal{H}_\infty$ フィルタ

線形離散時間時変システムに対する $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの $\mathcal{H}_\infty$ フィルタが存在するための十分条件とアルゴリズムを示す.

次の離散時間時変システムΓ_Lを考える.

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{v}_k \tag{2.14}$$

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{w}_k \tag{2.15}$$

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{L}_k\boldsymbol{x}_k \tag{2.16}$$

ここで，$\boldsymbol{x}_k \in \Re^n$ は状態，$\boldsymbol{y}_k \in \Re^m$ は観測量，$\boldsymbol{u}_k \in \Re^r$ は時刻 kにおいて既知の外部入力，$\boldsymbol{v}_k \in \Re^p$，$\boldsymbol{w}_k \in \Re^m$ は外乱，$\boldsymbol{z}_k \in \Re^q$ は被推定量であるとする．行列$\boldsymbol{A}_k$，$\boldsymbol{B}_k$, $\boldsymbol{C}_k$，$\boldsymbol{L}_k$は適当な大きさの実行列とし，その要素は時間 kに依存するものとする．また$\boldsymbol{A}_k$は，すべての時間で正則であるという仮定をおく．システムΓ_Lは，時間区間 $[k_0, k_1]$ で定義されているものとし，$\sum_{k=k_0}^{k_1} ||\boldsymbol{v}_k||^2 < \infty$, $\sum_{k=k_0}^{k_1} ||\boldsymbol{w}_k||^2 < \infty$ とする．

システムΓ_Lについて，$\boldsymbol{z}_k$の推定のために次のような汎関数を定義する．

$$\begin{aligned} J(\hat{z}, v, w, x_0; k_0, k_1) \;:=\; & \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{z}_{k+1} - \hat{\boldsymbol{z}}_{k+1}||^2 \\ & - \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{v}_k||^2 - \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{w}_{k+1}||^2 - \boldsymbol{x}_0^T\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{x}_0 \end{aligned} \tag{2.17}$$

ただし，Nは正定行列とする．

ゼロでないすべてのベクトル $[\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}_0]$ に対して $J(\hat{z}, v, w, x_0; k_0, k_1) < 0$ が成立することは $\mathcal{H}_\infty$ 評価基準の成立

$$\frac{\displaystyle\sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{z}_{k+1} - \hat{\boldsymbol{z}}_{k+1}||^2}{\displaystyle\sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{v}_k||^2 + \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{w}_{k+1}||^2 + \boldsymbol{x}_0^T\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{x}_0} < 1 \tag{2.18}$$

を意味している．

この評価関数 Jを用いて線形時変の $\mathcal{H}_\infty$ フィルタリング問題は，以下のようになる．

問題 1　過去の測定量 $\{\boldsymbol{y}_i; k_0 \le i \le k\}$ を用いて，ゼロでない全ての $[\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}_0]$ に対して $J < 0$ とするような推定則$\hat{\boldsymbol{z}}_k$，$k_0 \le k \le k_1$の存在条件を求め，その計算アルゴリズムを時

間更新過程によって明示せよ．ここで，$\hat{\boldsymbol{z}}_k$を$\mathcal{H}_\infty$フィルタと呼ぶ．

定理 1　つぎのような条件 (A) を考える

(A) 離散時間リカッチ方程式

$$\boldsymbol{M}_{k+1} = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{\Sigma}_k \boldsymbol{A}_k^T + \boldsymbol{B}_k \boldsymbol{B}_k^T \tag{2.19}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{k+1}^{-1} = \boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{C}_{k+1}^T \boldsymbol{C}_{k+1} - \boldsymbol{L}_{k+1}^T \boldsymbol{L}_{k+1} \tag{2.20}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{t_0} = \boldsymbol{N} \tag{2.21}$$

が時間区間 $[k_0, k_\tau]$ 上で正定解$\boldsymbol{\Sigma}_k$をもつ．k_τは $[k_0, k_\tau]$ の固定した値である．

条件 (A) が成立するならば，時間区間 $[k_0, k_1]$ において，システムΓ_Lに対する $\mathcal{H}_\infty$ フィルタは存在し，その計算アルゴリズムは次式で与えられる．

$$\hat{\boldsymbol{z}}_k = \boldsymbol{L}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k \quad k_0 \le k \le k_1 \tag{2.22}$$

ここで，$\hat{\boldsymbol{x}}_k$は，

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} = \tilde{\boldsymbol{x}}_k + (\boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{C}_{k+1}^T \boldsymbol{C}_{k+1})^{-1} \boldsymbol{C}_{k+1}^T (y_{k+1} - \boldsymbol{C}_{k+1} \tilde{\boldsymbol{x}}_k) \tag{2.23}$$

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_k = \boldsymbol{A}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{u}_k \tag{2.24}$$

また$\boldsymbol{M}_k$は次の時間更新アルゴリズムで計算される．

$$\boldsymbol{M}_{k+1} = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{\Sigma}_k \boldsymbol{A}_k^T + \boldsymbol{B}_k \boldsymbol{B}_k^T \tag{2.25}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{k+1}^{-1} = \boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{C}_{k+1}^T \boldsymbol{C}_{k+1} - \boldsymbol{L}_{k+1}^T \boldsymbol{L}_{k+1} \tag{2.26}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{k_0} = \boldsymbol{N}. \tag{2.27}$$

証明については，平方完成によって直接的に行う手法が文献 [35] に詳しく示されており，さらに $\mathcal{H}_\infty$ フィルタが存在するための必要十分条件が証明されている．

2.2.2　拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの提案

拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタリング問題の設定

次の離散時間非線形システムΓを考える．

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{g}_b(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{v}_k \tag{2.28}$$

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{w}_k \tag{2.29}$$

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{L}_k \boldsymbol{x}_k \tag{2.30}$$

ここで，$\boldsymbol{x}_k \in \Re^n$ は状態，$\boldsymbol{y}_k \in \Re^m$ は観測量，$\boldsymbol{u}_{ak} \in \Re^r$ は時間 kにおいて既知の外部入力，$\boldsymbol{v}_k \in \Re^p$, $\boldsymbol{w}_k \in \Re^m$は外乱，$\boldsymbol{z}_k \in \Re^q$ は被推定量であるとする．関数$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) \in \Re^n$, 関数$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k) \in \Re^m$ は，滑らかな非線形関数であり，$\boldsymbol{x}_k$について偏微分可能であるとする．$\boldsymbol{L}_k$は，適当な大きさの実行列とし，その要素は時間 kに依存するものとする．$\boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{x}_k) \in \Re^{n\times r}$, $\boldsymbol{g}_b(\boldsymbol{x}_k) \in \Re^{n\times n}$は，$\boldsymbol{x}_k$に依存する関数を項に持つ行列であるとする．

システムΓは, 時間区間$[k_0, k_1]$で定義されているものとし，$\sum_{k=k_0}^{k_1} ||\boldsymbol{v}_k||^2 < \infty$, $\sum_{k=k_0}^{k_1} ||\boldsymbol{w}_k||^2 < \infty$ とする．

システムΓに線形の離散時間時変フィルタを適用するため，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k)$, $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k)$ を時点$k, k-1$における推定量$\hat{\boldsymbol{x}}_k, \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$の周りでテーラー級数展開をおこなう．

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) + \boldsymbol{F}_k(\boldsymbol{x}_k - \hat{x}_k) + ... \tag{2.31}$$

$$\boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{g}_a(\hat{\boldsymbol{x}}_k) + ... = \boldsymbol{G}_{ak} + ... \tag{2.32}$$

$$\boldsymbol{g}_b(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{g}_b(\hat{\boldsymbol{x}}_k) + ... = \boldsymbol{G}_{bk} + ... \tag{2.33}$$

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_k) = \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}) + \boldsymbol{H}_k(\boldsymbol{x}_k - \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}) + ... \tag{2.34}$$

ここで，

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{F}_k &:= \left.\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}=\hat{\boldsymbol{x}}_k} \in \Re^{n\times n} \\
\boldsymbol{H}_k &:= \left.\frac{\partial \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right|_{\boldsymbol{x}=\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}} \in \Re^{m\times n} \\
\boldsymbol{G}_{ak} &:= \boldsymbol{g}_a(\hat{\boldsymbol{x}}_k) \\
\boldsymbol{G}_{bk} &:= \boldsymbol{g}_b(\hat{\boldsymbol{x}}_k).
\end{aligned}$$

ただし，$\boldsymbol{F}_k$は正則となることを仮定する．高次の項を省略し，時点kにおいて，$\hat{\boldsymbol{x}}_k, \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$, $\boldsymbol{u}_{ak}$が既知であると仮定するとシステムΓは，システムΓ'の様に書きかえられる．

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{G}_{ak}\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{u}_{ck} + \boldsymbol{G}_{bk}\boldsymbol{v}_k \tag{2.35}$$

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{w}_k + \boldsymbol{\xi}_k \tag{2.36}$$

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{L}_k\boldsymbol{x}_k \tag{2.37}$$

ここで $\boldsymbol{u}_{ck}$, $\boldsymbol{\xi}_k$は以下の式からオンラインで計算される．

$$\boldsymbol{u}_{ck} = \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) - \boldsymbol{F}_k\hat{\boldsymbol{x}}_k \tag{2.38}$$

$$\boldsymbol{\xi}_k = \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}) - \boldsymbol{H}_k \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} \tag{2.39}$$

システムΓ'について，$\boldsymbol{z}_k$の推定のために次のような汎関数を定義する．

$$\begin{aligned} J'(\hat{z}, v, w, x_0; k_0, k_1) &:= \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{z}_{k+1} - \hat{\boldsymbol{z}}_{k+1}||^2 \\ &\quad - \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{v}_k||^2 - \sum_{k=k_0}^{k_1-1} ||\boldsymbol{w}_{k+1}||^2 - \boldsymbol{x}_0^T \boldsymbol{N}^{-1} \boldsymbol{x}_0 \end{aligned} \tag{2.40}$$

ただし，$\boldsymbol{N}$は正定行列とする．この評価関数 J'を用いて，つぎの問題を定義する．

問題 2　システムΓをテーラー級数展開 1 次近似を行うことによって変形したシステムΓ'について，過去の測定量 $\{\boldsymbol{y}_i; k_0 \le i \le k\}$ を用いて，ゼロでない全ての $[\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}_0]$ に対して $J' < 0$ とするような推定則$\hat{\boldsymbol{z}}_k$，$k_0 \le k \le k_1$の存在条件を求めよ．また，その計算アルゴリズムを時間更新過程によって明示せよ．この計算アルゴリズムを拡張$\mathcal{H}_\infty$フィルタと呼ぶ．

拡張$\mathcal{H}_\infty$フィルタのアルゴリズム

定理 1 よりシステムΓ'に対する $\mathcal{H}_\infty$フィルタの存在条件とアルゴリズムは以下のように表される．

定理 2　つぎのような条件 (B) を考える

(B) 離散時間リカッチ方程式

$$\boldsymbol{M}_{k+1} = \boldsymbol{F}_k \boldsymbol{\Sigma}_k \boldsymbol{F}_k^T + \boldsymbol{G}_{bk} \boldsymbol{G}_{bk}^T \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Sigma}_{k+1}^{-1} &= \boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} \\ &\quad + \boldsymbol{H}_{k+1}^T \boldsymbol{H}_{k+1} - \boldsymbol{L}_{k+1}^T \boldsymbol{L}_{k+1} \end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{t_0} = \boldsymbol{N} \tag{2.43}$$

が時間区間 $[k_0, k_\tau]$ 上で正定解$\boldsymbol{\Sigma}_k$をもつ．

条件 (B) が成立するならば，時間区間 $[k_0, k_\tau]$ において，システムΓ'に対する $\mathcal{H}_\infty$フィルタが存在し，その計算アルゴリズムは次式で与えられる．

$$\hat{\boldsymbol{z}}_k = \boldsymbol{L}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k \quad k_0 \le k \le k_1 \tag{2.44}$$

ここで，$\hat{\boldsymbol{x}}_k$は，

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1} = \tilde{\boldsymbol{x}}_k + (\boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{H}_{k+1}^T \boldsymbol{H}_{k+1})^{-1} \boldsymbol{H}_{k+1}^T$$

$$
\begin{aligned}
& (y_{k+1} - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) + \boldsymbol{H}_{k+1}\hat{\boldsymbol{x}}_k - \boldsymbol{H}_{k+1}\tilde{\boldsymbol{x}}_k) \\
\tilde{\boldsymbol{x}}_k &= \boldsymbol{G}_{ak}u_{ak} + \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) \qquad (2.45)
\end{aligned}
$$

また，$\boldsymbol{M}_k$は次の時間更新アルゴリズムで計算される．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{M}_{k+1} &= \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{\Sigma}_k\boldsymbol{F}_k^T + \boldsymbol{G}_{bk}\boldsymbol{G}_{bk}^T \qquad (2.46) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{k+1}^{-1} &= \boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{H}_{k+1}^T\boldsymbol{H}_{k+1} - \boldsymbol{L}_{k+1}^T\boldsymbol{L}_{k+1} \\
\boldsymbol{\Sigma}_{t_0} &= \boldsymbol{N}. \qquad (2.47)
\end{aligned}
$$

(証明）システムΓ'について以下の変数変換をほどこす.

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{A}_k &\leftarrow \boldsymbol{F}_k, \qquad \boldsymbol{B}_{bk} \leftarrow \boldsymbol{G}_{bk} \\
\boldsymbol{u}_k &\leftarrow \boldsymbol{G}_{ak}\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{u}_{ck} \\
\boldsymbol{C}_k &\leftarrow \boldsymbol{H}_k, \qquad \boldsymbol{y}_k \leftarrow \boldsymbol{y}_k - \boldsymbol{\xi}_k
\end{aligned}
$$

$\boldsymbol{G}_{ak}$，$\boldsymbol{u}_{ak}$は時刻 kにおいて計算されており，$\boldsymbol{u}_{ck}$は既知であるので$\boldsymbol{u}_k$は既知となる．したがって，この変形により線形$\mathcal{H}_\infty$フィルタの条件 (A) をもちいて条件 (B) が導出される．また，アルゴリズムについても以下に示す変形が可能であり，式 (2.44)–(2.47) が導出される．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{y}_{k+1} &\rightarrow \boldsymbol{y}_{k+1} - \boldsymbol{\xi}_{k+1} \\
&= \boldsymbol{y}_{k+1} - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) + \boldsymbol{H}_{k+1}\hat{\boldsymbol{x}}_k \\
\tilde{\boldsymbol{x}}_k &\rightarrow \boldsymbol{F}_k\hat{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{G}_{ak}\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{u}_{ck} \\
&= \boldsymbol{F}_k\hat{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{G}_{ak}\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_k) - \boldsymbol{F}_k\hat{\boldsymbol{x}}_k \\
&= \boldsymbol{G}_{ak}\boldsymbol{u}_{ak} + \boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{x}}_k)
\end{aligned}
$$

(Q.E.D.)

ここで，ゼロでないすべてのベクトル$[\boldsymbol{v}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}_0]$ に対して $J'(\hat{z}, v, w, x_0; k_0, k_1) < 0$ が成立することはシステムΓ'に対して $\mathcal{H}_\infty$評価基準が成立することを意味している．したがって，拡張$\mathcal{H}_\infty$フィルタは，システムΓ'に対する線形時変$\mathcal{H}_\infty$フィルタと等価であり，Γに対して直接的に $\mathcal{H}_\infty$評価基準を満たしているとはいえない．理論的には，テーラー展開の 2 次以上の

項の誤差について考える必要がある．応用としては，このアルゴリズムは，式(2.38), (2.39)のようにオンラインで 1 つ前の推定値によって計算されなければならない．ただし，非線形な関係をフィルタの状態更新に用いているため，テーラー展開して完全に線形化してから適用した場合に比べると，2 次以上の項の切捨てを緩和することができる．

2.3 実験に用いた視覚サーボシステムの構成

図 2.2に，本研究の実験で用いたシステムの構成を示す．本研究で用いた実験機は，アインハンドシステム，ディジタル制御装置，ホストコンピュータシステムの 3 つのシステムから構成される．

以下に各システムの概要を説明する．

アインハンドシステム： マニピュレータの手先効果器にカメラを装備したシステム．単眼視，ステレオ視の実験に応じて，手先効果器に装備できるように構成した．マニピュレータは関節角速度を 1ms 間隔で変化可能となっているが，運動学 [36] をもちいて後述するカメラフレームにたいするデカルト空間での速度指令を可能とし，視覚サーボに無関係な位置，姿勢についてはワールドフレーム上での制御によって変化しないように制御を行う．

表 2.1: アインハンドシステムのハードウェア

6 軸産業用マニピュレータ	MOTOMAN-K3S(安川電機)
CCD モノクロカメラ	TM-7EX(VIDTEX)

ディジタル制御システム： 制御則を計算するために数台のトランスピュータと DSP を用いた画像処理装置を組み合わせたシステム．マニピュレータ制御のための速度指令パルス出力回路，エンコーダパルスデコーダと 60Hz で画像処理を可能にした高速画像処理ボードをもつ．画像処理としてでは，横 256 ピクセル縦 240 ピクセルの画像情報を 60Hz で 2 値化し，メモリ上に展開されたものに対してトランスピュータで処理を行っている．ディジタル制御装置において数台のトランスピュータをプロセス毎に分割し，視覚サーボのフィードバックループを 3.33×10^{-2}[s] で実現している．

表 2.2: ディジタル制御システムのハードウェア

トランスピュータシステム	TCS(コンカレントシステムズ),
並列画像処理ボード	TRP-IMG(コンカレントシステムズ),
トランスピュータ	T805(IMMOS) ×7,
制御用ボード	ASSIS Control System (Tecno)

ホストコンピュータシステム： ソフトウエア実装，実行時の監視，設計および解析を行うためのシステム．視覚サーボの推定則，制御則の設計，オフラインでのシミュレーションを行う．シミュレーションや設計，解析では，制御用CAD(Matlab:Math Works, Matrixx:integrated systems) を用いる．また，トランスピュータ上でのリアルタイム処理，入出力処理は，全てC言語 (クロスコンパイル) をもちいてトランスピュータシステムのホストコンピュータ上で記述し，ダウンロードされる．

表 2.3: ディジタル制御システムのハードウェア

トランスピュータホストコンピュータ	PC9801FA (NEC)
ワークステーション	S-4/5 (Fujitsu)

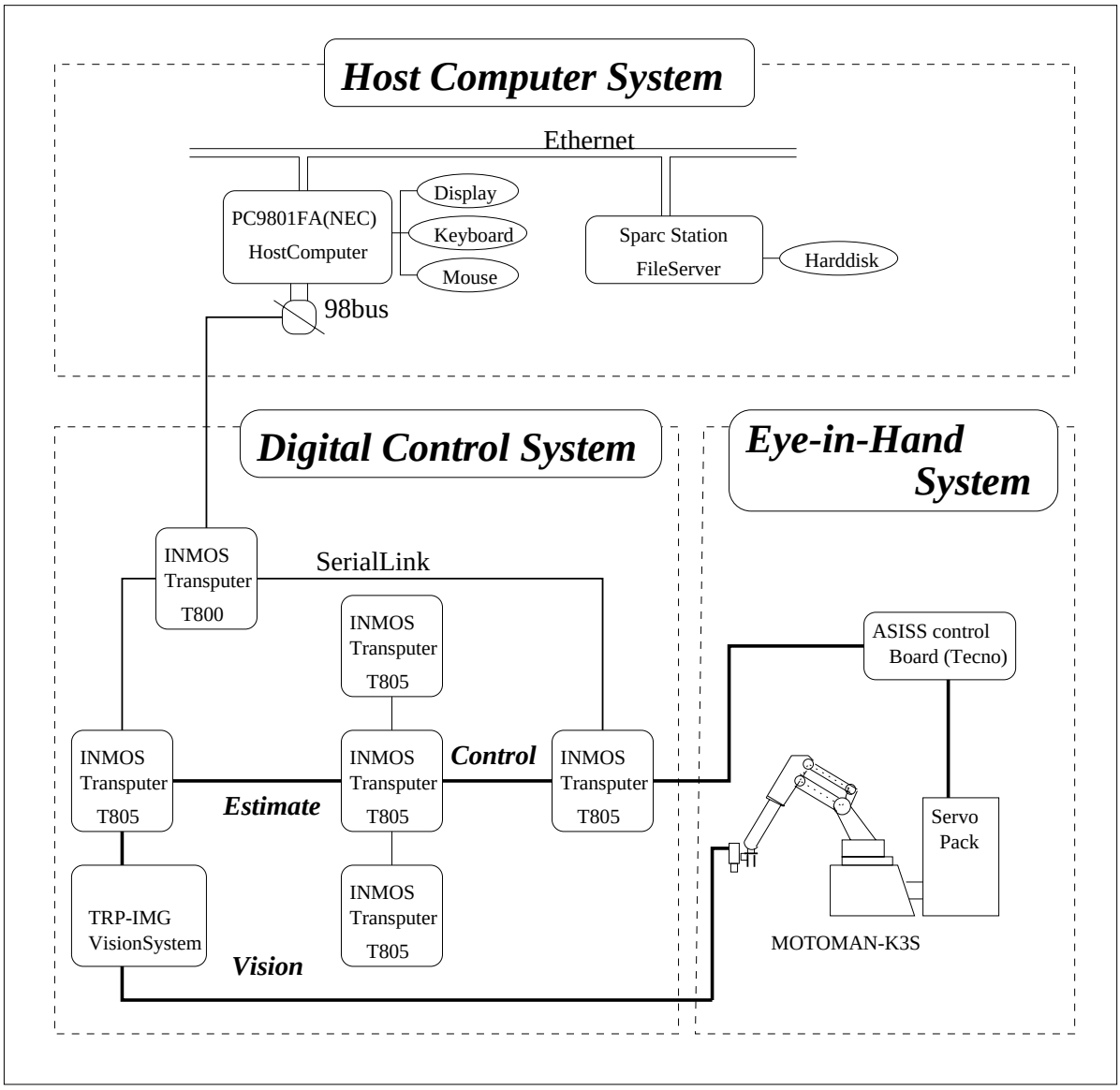


図 2.2: 視覚サーボシステムの構成

第 3 章

移動対象追従のための視覚サーボの設計

出力レギュレーションによる視覚サーボの問題点を探るため、本章では、線形のシステムで記述できる、2 次元空間上のカメラの移動のみの単眼視視覚サーボ問題を考える．ここでは，まず，そのカメラと対象の運動／観測のモデリングを行い，具体的に出力レギュレーションを適用する．さらに設計を行い，実システムによる実験を行う．実験では，特に対象の動きに対するロバスト性について考察する．

3.1　2 次元単眼視視覚サーボの仮定

単眼視による 2 次元での視覚サーボを考えるために，まず，以下のような仮定をおく．

仮定 1　対象はカメラの視線方向を垂線としてもつ平面上を運動する．

仮定 2　カメラは，マニピュレータの手先効果器にマウントされ，視線方向まわりの回転と，対象の移動平面に平行かつ焦点を含む平面上で並進の速度をマニピュレータに指令できるように構成されている．

仮定 3　2 平面のの距離 Z_0 は一定であり，カメラを運動させるマニピュレータにとって既知である．

仮定 4　対象上の 2 点の特徴点はすべて対象の移動平面上に位置しており，3 次元平面上では 特徴点同士の相対位置は変化せず，その 2 点間の画像面上での中心座標と角度を観測できる．

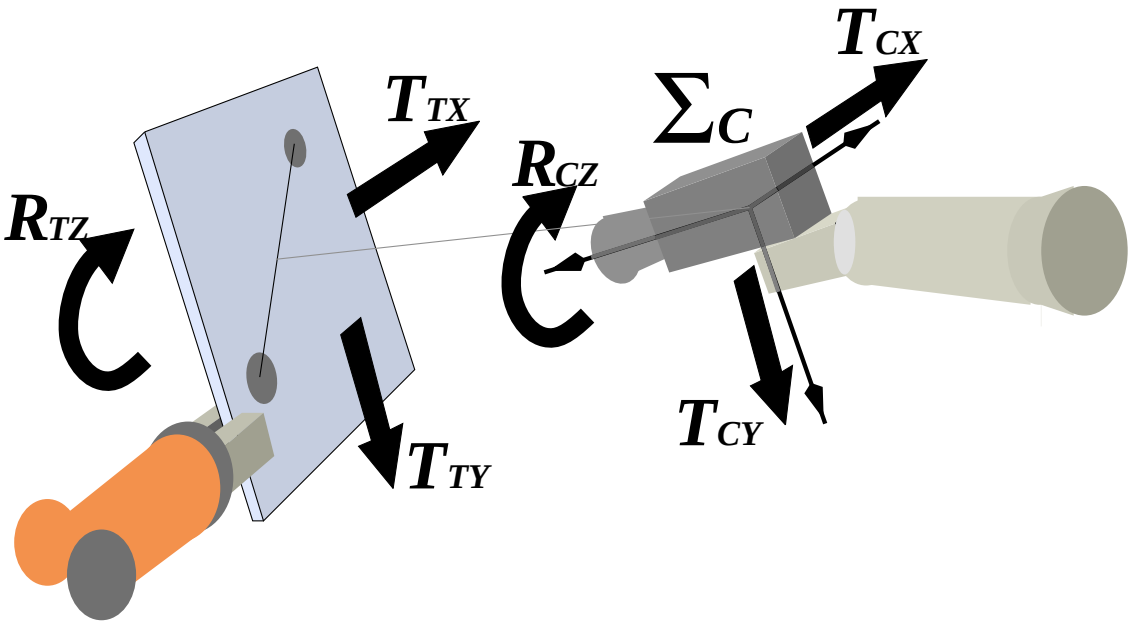


図 3.1: カメラと対象のモデル

この条件のもとでカメラからみた対象の位置，姿勢が変化しないようにカメラを運動させることを考える．本節では移動対象とカメラの運動モデル，カメラの透視変換モデルを導出し，2 次元視覚サーボ問題を定義する．

3.1.1 移動対象とカメラの運動モデル

前節の仮定によって，カメラと対象は一定かつ既知の距離を離れた 2 つの平面上でそれぞれが運動する．ここで図 3.1のような並進・回転の速度を考え，視覚サーボにおける運動のモデルを考える．

カメラ焦点を原点とし，視線方向に Z 軸，水平右方向に X 軸をとったカメラフレーム Σ_C に対する位置，速度について以下のように定義する．

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{P}_j = [X_j \quad Y_j \quad Z_0]^T &\quad : \quad 3-D\text{空間上での対象の特徴点} \\
\boldsymbol{P}_g = [X_g \quad Y_g \quad Z_0]^T &\quad : \quad \text{特徴点 } P_j \text{ の重心} \\
j &\quad : \quad \text{特徴点を示す正の整数 } (j = 1, 2)
\end{aligned}$$

$$
\begin{array}{rcl}
X & : & P_g \text{の} X \text{方向並進位置} \\
Y & : & P_g \text{の} Y \text{方向並進位置} \\
\Theta & : & \boldsymbol{P}_g \text{の回転位置} \\
\dot{X} & : & \boldsymbol{P}_g \text{の} X \text{方向並進速度成分} \\
\dot{Y} & : & \boldsymbol{P}_g \text{の} Y \text{方向並進速度成分} \\
\dot{\Theta} & : & \boldsymbol{P}_g \text{の回転速度成分} \\
T_{TX} & : & \text{対象の運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の並進速度} \\
T_{TY} & : & \text{対象の運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の並進速度} \\
R_{TZ} & : & \text{対象の運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の回転速度} \\
T_{CX} & : & \text{カメラの運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の並進速度} \\
T_{CY} & : & \text{カメラの運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の並進速度} \\
R_{CZ} & : & \text{カメラの運動による} \boldsymbol{P}_g \text{の回転速度}
\end{array}
$$

相対速度の関係および前節の仮定を用いると以下の式が成り立つ．

$$\dot{X} = T_{TX} - T_{CX} \tag{3.1}$$

$$\dot{Y} = T_{TY} - T_{CY} \tag{3.2}$$

$$\dot{\Theta} = R_{TZ} - R_{CZ} \tag{3.3}$$

よって，カメラと対象の運動方程式は以下のようになる．

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{q} + \boldsymbol{u} \tag{3.4}$$

ここで，

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{x} &= [X \quad Y \quad \Theta]^T \\
\boldsymbol{q} &= [T_{TX} \quad T_{TY} \quad R_{TZ}]^T \\
\boldsymbol{u} &= [-T_{CX} \quad -T_{CY} \quad -R_{CZ}]^T
\end{aligned}
$$

である．

状態空間表現

まず，時間微分可能な関数$\boldsymbol{p}$を考える．ディジタル制御におけるサンプリング時間をT_sと

し．時刻 $t = kT_s$(k は整数) における$\boldsymbol{p}$を$\boldsymbol{p}_k$とする．ニュートンの前進公式を 1 次近似して得られる差分方程式

$$\boldsymbol{p}_{k+1} - \boldsymbol{p}_k = T_s\dot{\boldsymbol{p}}_k + \frac{T_s^2}{2}(\dot{\boldsymbol{p}}_{k+1} - \dot{\boldsymbol{p}}_k) \tag{3.5}$$

を用いて式 (3.4) を離散化することを考える．$\boldsymbol{x}_k$, $\boldsymbol{u}_k$, $\boldsymbol{q}_k$をそれぞれ時刻 $T_s k$(kは整数) における状態 x，カメラ運動による速度$\boldsymbol{u}$，対象運動による速度$\boldsymbol{q}$とする．式 (3.5) の$\boldsymbol{p}_k$を$\boldsymbol{u}_k$とし，カメラの加速度の差分$\dot{\boldsymbol{u}}_{k+1} - \dot{\boldsymbol{u}}_k \cong 0$ として運動モデルを考えると

$$\boldsymbol{u}_{k+1} - \boldsymbol{u}_k = T_s\dot{\boldsymbol{u}}_k \tag{3.6}$$

式 (3.5) の$\boldsymbol{p}_k$を$\boldsymbol{q}_k$とし，対象の加速度の差分$\dot{\boldsymbol{q}}_{k+1} - \dot{\boldsymbol{q}}_k \cong 0$ として運動モデルを考えると

$$\boldsymbol{q}_{k+1} - \boldsymbol{q}_k = T_s\dot{\boldsymbol{q}}_k \tag{3.7}$$

対象の加速度における影響を外乱$\boldsymbol{v}_{qk} \cong \dot{\boldsymbol{q}}_k$ として考慮すると式 (3.7) は

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k + T_s\dot{\boldsymbol{v}}_{qk} \tag{3.8}$$

とおける．

$\dot{\boldsymbol{x}}_k = \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{q}_k$，式 (3.6),(3.8) を用いて式 (3.5) の$\boldsymbol{p}_k$を$\boldsymbol{x}_k$として変形すると

$$\boldsymbol{x}_{k+1} - \boldsymbol{x}_k = T_s\boldsymbol{u}_k + T_s\boldsymbol{q}_k + \frac{T_s^2}{2}(\dot{\boldsymbol{u}}_k + \dot{\boldsymbol{q}}_k) \tag{3.9}$$

離散化による影響を外乱$\boldsymbol{v}_k \cong (\dot{\boldsymbol{u}}_k + \dot{\boldsymbol{q}}_k)$ として考慮すると状態方程式は

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k + \boldsymbol{H}\boldsymbol{v}_k \tag{3.10}$$

となる．ここで

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A} &= \boldsymbol{I}_3, \qquad \boldsymbol{B} = T_s\boldsymbol{I}_3, \\ \boldsymbol{E} &= T_s\boldsymbol{I}_3, \quad \boldsymbol{H} = \frac{T_s^2}{2}\boldsymbol{I}_3 \end{aligned}$$

である．

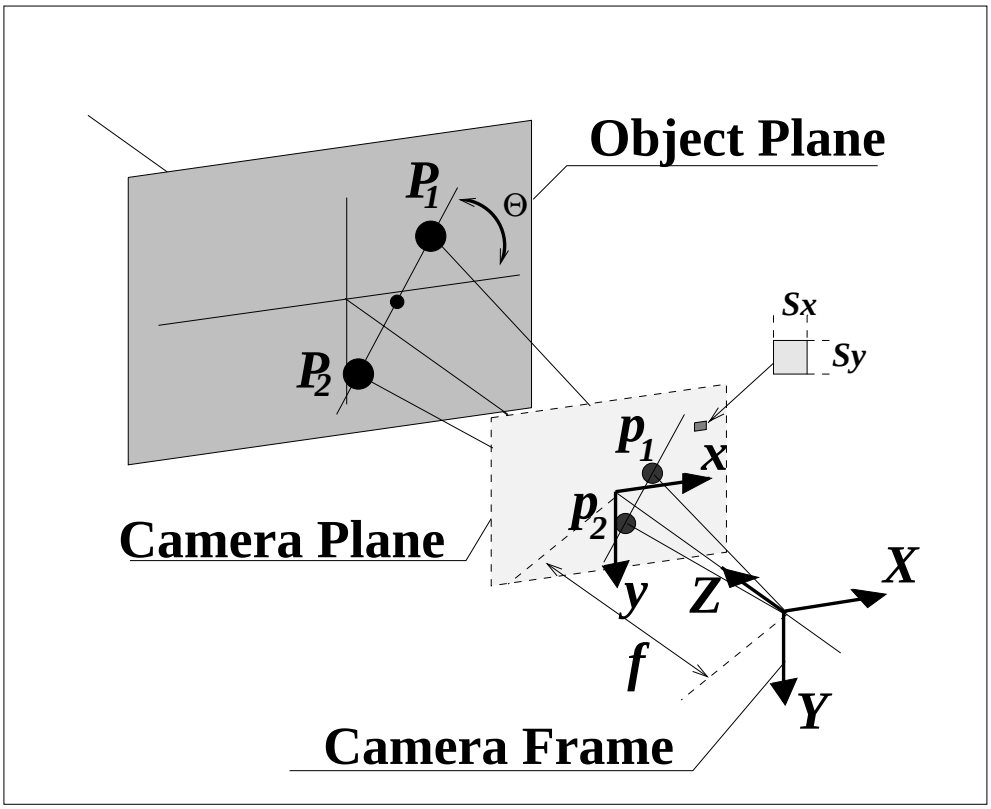


図 3.2: ピンホールカメラモデル

3.1.2 透視変換による観測モデル

図 3.2のような理想的なピンホールカメラのモデルを考える．

空間上の点 P_jがカメラの画像面上の点 $p_j = [x_j \quad y_j]'$に写像されるとすると，点 P_j，p_j間の関係 [37] は

$$x_j = \frac{f}{s_x}\frac{X_j}{Z_0}\ , \qquad y_j = \frac{f}{s_y}\frac{Y_j}{Z_0} \tag{3.11}$$

となる．ここで，s_x，s_yは 1 画素の x，y方向のそれぞれの長さ，fは焦点距離である．

観測方程式

画像面上における 2 点の特徴点座標 $p_1 = [x_1 \quad y_1]'$，$p_2 = [x_2 \quad y_2]'$は，画像処理装置によっ

て計測され，画像面上での 2 点間の中心点座標と X 軸に対する角度が出力として得られる．これを観測量$\boldsymbol{y}_k$とし，観測時に生じる外乱 w_kを考慮すると式 (3.11) から観測方程式は，

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{w}_k \tag{3.12}$$

となる．ただし，

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_k &= \left[\frac{x_1+x_2}{2} \quad \frac{y_1+y_2}{2} \quad \mathrm{atan2}\left(y_2-y_1,\ x_2-x_1\right)\right]' \\ \boldsymbol{C} &= \mathrm{diag}\left(\frac{f}{s_x Z_0},\ \frac{f}{s_y Z_0},\ 1\right),\end{aligned}$$

ここで $\mathrm{atan2}(y,x)$ は $\tan^{-1}\dfrac{y}{x}$を範囲 $(-\pi\ ,\ \pi)$ について定義した関数である．

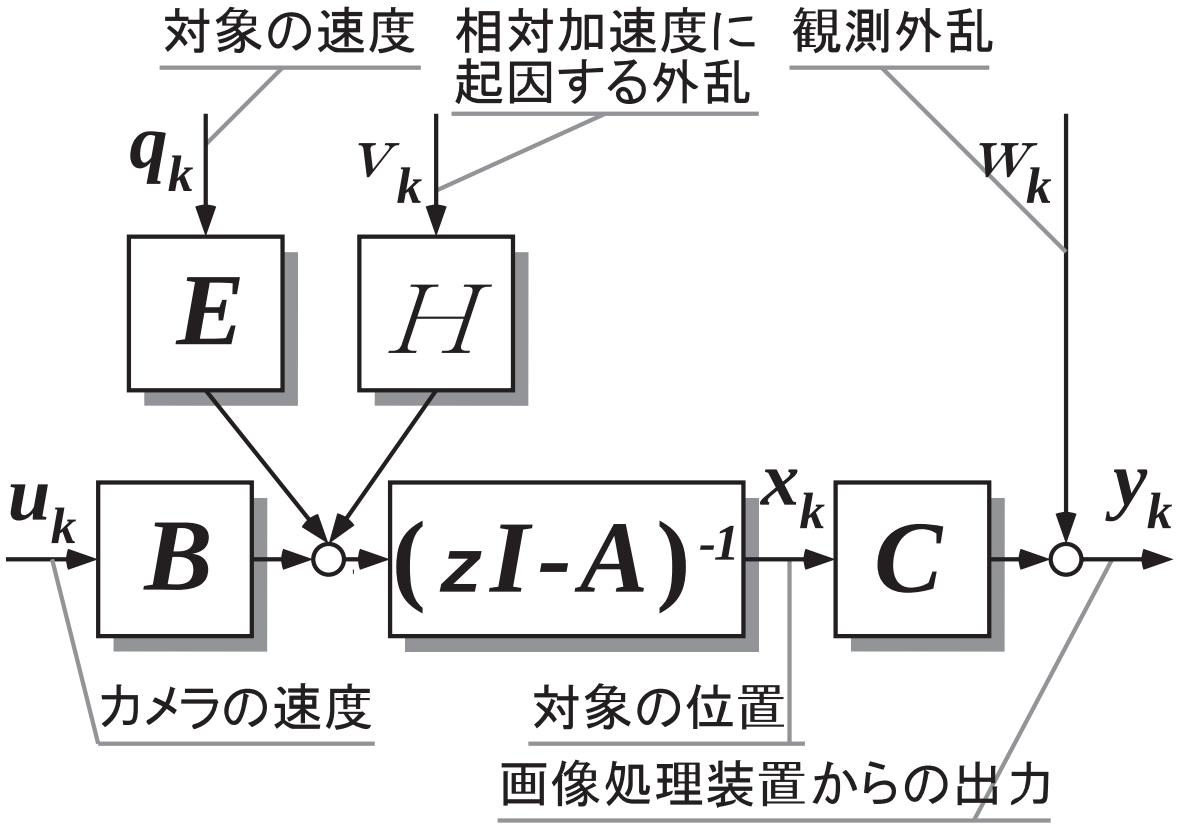


図 3.3: 視覚サーボシステムのモデル

3.1.3 2 次元視覚サーボ問題

ここまででモデル化した視覚サーボシステムのブロック線図は，図 3.3のようになる．

ここで考える視覚サーボ問題は，カメラからみた対象の位置，姿勢を変化しないようにカメラを制御することである．システムの状態 x_kは，カメラフレームにおける対象の位置であり，2 次元を仮定しているので，システム (3.10) の状態を一定値にするようにカメラの入力を決定すればよいことがわかる．したがって，状態$\boldsymbol{x}_k$を 0 にするようなカメラの速度$\boldsymbol{u}_k$を選ぶことを考える．次節では，出力レギュレーションを利用した視覚サーボの手法とフィルタの適用について述べる．

3.2 線形時不変システムへの出力レギュレーションの適用

視覚サーボシステムは，図3.3からもわかるように観測出力 y_k は得られるが，レギュレーションされる状態 x_kを直接的に得ることは出来ない．状態 x_kと対象の速度である外生入力 q_kを推定することによって閉ループ系を構成する．その手法として出力レギュレーションを適用することを考える．

3.2.1 問題の設定

式 (3.10),(3.12) で表される視覚サーボシステムに対して，カメラと対象の位置姿勢が変化しないようにカメラを制御するため，相対加速度に依存する外乱 v_kのない理想化されたシステム (3.13) を考える．

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{k+1} \quad = \quad \boldsymbol{A}\tilde{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}\tilde{\boldsymbol{q}}_k \tag{3.13}$$

また，式 (3.7) についても，対象の加速度に依存する外乱 v_{qk}のない対象の運動モデル

$$\tilde{\boldsymbol{q}}_{k+1} \quad = \quad \tilde{\boldsymbol{q}}_k \quad (\tilde{\boldsymbol{q}}_0 = \boldsymbol{q}_0) \tag{3.14}$$

を考える．視覚サーボの目的は，(i) 閉ループ系が安定 (内部安定)，(ii) 制御量$\xi_k = x_k$を $k \to \infty$ で$\xi_k \to 0$ となるように，対象の運動$\tilde{q}_k$に対して u_kを決定することである．これは，カメラから見た対象の位置姿勢が 0 となることを意味している．

3.2.2 応答速度と安定性の改善

STEP1 : 状態フィードバックによって閉ループ系の応答速度と安定性を改善する (内部安定性の補償)．

状態フィードバック入力

$$\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{K}\tilde{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{u}_{2k} \tag{3.15}$$

によってまず $(A+BK)$ を安定にする．

STEP2： 外部入力と平衡するために必要な制御入力を外部入力の関数としてもとめる (フィードフォワード補償).
STEP1 によって閉ループ系は,

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{k+1} = (\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\tilde{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{2k} + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k \tag{3.16}$$

と安定化されている．対象の速度$\boldsymbol{q}_k$がフィードフォワード入力として与えられるならば,

$$\boldsymbol{u}_{2k} = -\boldsymbol{q}_k \tag{3.17}$$

とすると，$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{E} = T_s\boldsymbol{I}_3$より，$\boldsymbol{B}u_{2k} + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k = 0$ となり，制御目的は達成される．

STEP3： 外部入力を推定器によって選定し，フィードフォワード入力を出力フィードバックで実現する (フィードバック実現).
対象の運動モデルを含めた拡大系は,

$$\begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_{k+1} \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{O}_3 & \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_k \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix} \boldsymbol{u}_k$$

$$\boldsymbol{\xi}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_k \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_k \end{bmatrix}$$

となる．そこで直接観測できない状態$\tilde{\boldsymbol{x}}_k$，対象の速度$\tilde{\boldsymbol{q}}_k$については推定し，その推定値$\hat{\boldsymbol{x}}_k$, $\hat{\boldsymbol{q}}_k$をもちいてフィードバック

$$\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}_k - \hat{\boldsymbol{q}}_k \tag{3.18}$$

を実現する．

3.2.3 外乱を考慮した拡大系の構成

対象の運動モデル (3.8) の導出方法が示すように，外乱$\boldsymbol{v}_{qk}$は，対象の速度変化，つまり加速度$\dot{\boldsymbol{q}}$ に依存している．この加速度を外乱として含めた形で式(3.8) と状態方程式(3.10) をもちいて次の拡大系を構成する．

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{k+1}\\ \boldsymbol{q}_{k+1}\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{O}_3 & \boldsymbol{I}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ \boldsymbol{q}_k\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{O}_3\end{bmatrix}\boldsymbol{u}_k\\ &\quad + \begin{bmatrix}\boldsymbol{H} & \boldsymbol{O}_3\\ \boldsymbol{O}_3 & T_s\boldsymbol{I}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}_k\\ \boldsymbol{v}_{qk}\end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\boldsymbol{y}_k = \begin{bmatrix}\boldsymbol{C} & \boldsymbol{O}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ \boldsymbol{q}_k\end{bmatrix} + \boldsymbol{w}_k \tag{3.20}$$

外乱$\boldsymbol{v}_k$, $\boldsymbol{v}_{qk}$, $\boldsymbol{w}_k$を大きさ 1 に正規化された外生信号$\boldsymbol{v}_{0k}$, $\boldsymbol{v}_{0qk}$, $\boldsymbol{w}_{0k}$ を用いて以下のように表す.

$$\boldsymbol{v}_k = \boldsymbol{V}\boldsymbol{v}_{0k},\quad \boldsymbol{v}_{qk} = \boldsymbol{V}_q\boldsymbol{v}_{0qk},\quad \boldsymbol{w}_k = \boldsymbol{W}\boldsymbol{w}_{0k} \tag{3.21}$$

ここで$\boldsymbol{V} = \mathrm{diag}(V_x,\ V_y,\ V_\theta)$, $\boldsymbol{V}_q = \mathrm{diag}(V_{qx},\ V_{qy},\ V_{q\theta})$, $\boldsymbol{W} = \mathrm{diag}(W_x,\ W_y,\ W_\theta)$ は外乱の重み係数行列である．さらに設計パラメータとして$\boldsymbol{\gamma} = \mathrm{diag}(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_\theta)$ を加えてフィルタを適用するための次の拡大系に変形する (図 3.4).

$$\boldsymbol{x}_{ek+1} = \boldsymbol{A}_e\boldsymbol{x}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{H}_e\boldsymbol{v}_{0ek} \tag{3.22}$$

$$\boldsymbol{y}_{ek} = \boldsymbol{C}_e\boldsymbol{x}_{ek} + \boldsymbol{w}_{0k} \tag{3.23}$$

$$\boldsymbol{z}_{ek} = \boldsymbol{L}_e\boldsymbol{x}_{ek} \tag{3.24}$$

ここで

$$\boldsymbol{x}_{ek} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ \boldsymbol{q}_k\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{y}_{ek} = \boldsymbol{\gamma}^{-1}\boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{y}_k,\quad \boldsymbol{v}_{0ek} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{v}_k\\ \boldsymbol{v}_{qk}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_e = \begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{O}_3 & \boldsymbol{I}_3\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B}_e = \begin{bmatrix}\boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{O}_3\end{bmatrix}$$

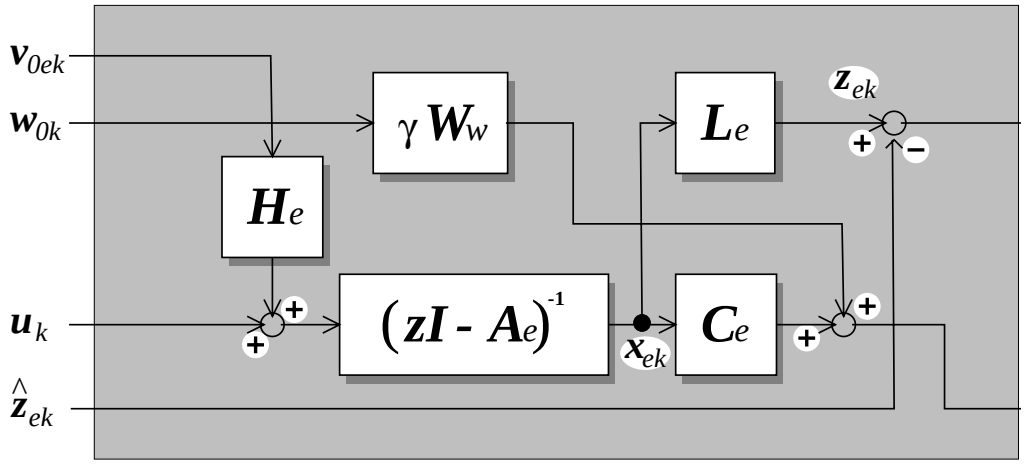


図 3.4: システムのブロック線図

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{H}_e &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{O}_3 \\ \boldsymbol{O}_3 & T_s\boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma\boldsymbol{V} & \boldsymbol{O}_3 \\ \boldsymbol{O}_3 & \gamma\boldsymbol{V}_q \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{C}_e &= \gamma^{-1}\boldsymbol{W}^{-1}\begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{L}_e = \boldsymbol{I}_6
\end{aligned}
$$

なお$\boldsymbol{z}_{ek}$は被推定ベクトルである．

3.2.4 ロバストな線形時不変フィルタの適用

出力レギュレーションの推定器にベクトル$\boldsymbol{z}_{ek}$を推定するため$\mathcal{H}_\infty$フィルタを用いる．$\mathcal{H}_\infty$フィルタは外乱ベクトル$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}'_{0ek} & \boldsymbol{w}'_{0k} \end{bmatrix}'$から推定誤差$\boldsymbol{e}_k = \boldsymbol{z}_{ek} - \hat{\boldsymbol{z}}_{ek}$への$\mathcal{H}_\infty$ノルムを1未満にするように推定値$\hat{\boldsymbol{z}}_{ek}$を定める推定器である．ここでは，システム (3.22)，(3.23)，(3.24) に対する$\mathcal{H}_\infty$フィルタを示す．これは，文献 [35] のアルゴリズムから導かれる定常$\mathcal{H}_\infty$フィルタである．

定常$\mathcal{H}_\infty$フィルタ$\hat{\boldsymbol{z}}_{ek}$は，つぎの (3.25)，(3.26) の離散時間リカッチ方程式が正定解Σを持つときに存在する．

$$
\boldsymbol{M} = \boldsymbol{A}_e\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{A}'_e + \boldsymbol{H}_e\boldsymbol{H}'_e, \tag{3.25}
$$

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \boldsymbol{M}^{-1} + \boldsymbol{C}_e'\boldsymbol{C}_e - \boldsymbol{L}_e'\boldsymbol{L}_e \tag{3.26}$$

もし，Σが存在するとき，そのアルゴリズムは以下のようになる．

$$\hat{\boldsymbol{z}}_{ek} = \boldsymbol{L}_e\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{x}}_{ek+1} &= \boldsymbol{A}_e\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k \\ &\quad +(\boldsymbol{M}^{-1} + \boldsymbol{C}_e'\boldsymbol{C}_e)^{-1}\boldsymbol{C}_e' \\ &\quad (\boldsymbol{y}_{ek+1} - \boldsymbol{C}_e(\boldsymbol{A}_e\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} + \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{u}_k)) \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{e0} = \boldsymbol{O}$$

この推定則によって得られた$\hat{x}_{ek}$により，制御入力

$$\boldsymbol{u}_k = [\boldsymbol{K} \ \ -\boldsymbol{I}_3]\hat{\boldsymbol{x}}_{ek} \tag{3.29}$$

が得られる．この制御入力を計算することによって，STEP1 による内部安定性と STEP3 による推定器の安定性からこの全体のシステムは安定となる．

3.3 実験

3.3.1 単眼視視覚サーボシステム

単眼視の視覚サーボシステムの実験のため，以下のような構成を考える．

アイインハンドシステム： ここでのアイインハンドシステムは，視覚サーボの制御入力であるカメラフレーム上でのカメラの瞬間的速度を制御入力とできるように構成される．

- 産業用 6 軸マニピュレータの手先効果器に 1 台のカメラを手先方向に向けて接続し，これをアイインハンドシステムとする．
- 運動学をもちいて，カメラフレームにおけるカメラフレームの速度を指令できるようにする．視覚サーボによって，指令する速度は，カメラフレーム上での X, Y 軸の並進速度と Z 軸での回転速度である．Z 軸並進，X, Y 軸の回転については，目標平面にカメラフレームの $X-Y$ 平面がのるようにタスク空間での制御を行う (図 3.5)．

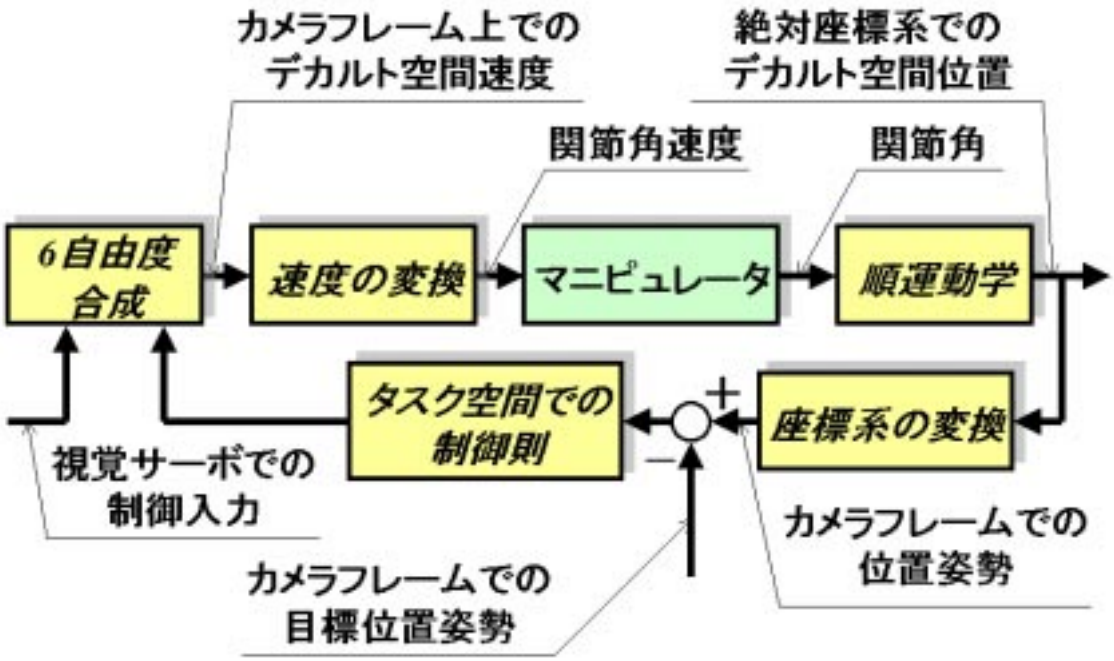


図 3.5: アイインハンドシステムの構成

画像処理： 画像処理については，一般的な画像について適用できるような様々な手法が考えられるが，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの適用に対して重点をおくという観点から画像処理についてある程度制限を加えて簡略化した．

- 対象は，ティーチング処理の可能なマニピュレータの手先効果器に白色の板を接続し，1.00×10^{-1}m 離した半径 1.00×10^{-2}m の黒点を 2 点つける．これは，2 点の中心とこのなす角度を計算させるために画像処理装置の観測できる画像面上に 2 点が存在するように選んだ．
- 十分な光源 (蛍光灯下・室内) の元で実験を行い，画像処理装置の DSP に 2 値化を指令することによって前処理する．
- 1 点ごとに 1 サンプリング時間前の画像におけるそれぞれの特徴点のまわりに縦横 41 ピクセルの窓をはいして，2 値画像の 1 次モーメント [38] を求め，各重心点を現在のそれぞれの特徴点として計測する．初期点を指定することによって，リアルタイムに画像面上で 2 点の位置 p_1, p_2を追従できる．

- 観測方程式の導出の際に述べられているように，観測量 y_kは，2 点の観測点 p_1,p_2の成分 x_1, y_1および x_2, y_2から計算できる．すなわち，

$$y_k \quad : \quad \left[\begin{array}{ccc} \dfrac{x_1+x_2}{2} & \dfrac{y_1+y_2}{2} & \mathrm{atan2}(y_2-y_1, x_2-x_1) \end{array} \right]'$$

を画像処理装置で計算し，これをシステムの観測量とする．

対象の運動： 対象の運動としては，ベルトコンベアやターンテーブル上の対象の運動を想定してカバーできるよう他のマニピュレータに設置する．対象の動きは，カメラによる観測量以外は視覚サーボシステムにとって未知であり，実験では任意の運動を行わせてその性能を評価する．

- マニピュレータのティーチング処理によって，カメラフレームの指令面と平行に 5.00×10^{-1}m 離して運動を行わせる．運動の速度，位置に関する詳しい考察は次節に記載する．

3.3.2 実験目的と方法

実験の目的は，

2 次元視覚サーボ問題について，定常の $\mathcal{H}_\infty$フィルタとカルマンフィルタを用いた場合の実験を行い，この結果を比較することによって，この手法におけるロバスト推定の必要性を探る．

である．この比較においては，$\mathcal{H}_\infty$評価基準をもちいた $\mathcal{H}_\infty$フィルタに望まれている実システムに対するフィルタの有用性の考察とも言える．

また実験は以下のような方法で行われる．

1. 制御則，推定則の実装と選定
   実験では，設計パラメータの設定は，各推定則で検討する．

   - 制御則のパラメータの選定
     制御則では，出力レギュレーションの制御ゲインの調整をする．
   - 推定則のパラメータの設定
     カメラの焦点距離といったキャリブレーションによって求められる物理パラメータと外乱の見積もり量を重み行列として決定する．

2. 実験

   固定対象，移動対象に対して，各フィルタを用いた場合について同様の実験を行う．

3. 解析

   - 実験によって得られた結果について，追従誤差の量をもってこれを評価する．
   - 検討された結果について，1 のパラメータの決定にもどり，再検討する．

パラメータの選定には，以下に述べるような予備的な実験を繰り返し，カルマンフィルタと $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの比較において，出来る限り妥当に考察できるようにした．以下にパラメータの設定方法について詳しく述べる．

物理的パラメータ

システムの係数となる行列の要素に用いられるパラメータには，カメラの透視変換に関するものとサンプリング周期 T_s がある．サンプリング周期は，画像処理装置のデジタイズによるものであり，カメラの CCD 素子からの NTSC 信号の奇数走査と偶数走査を交互にとる装置の構成となっている．したがってデジタイズ周波数は 60Hz(MAX) であるが，デジタイズ後に，2 値化と特徴点取得の処理を行うためにその半分である 30Hz となった．したがってサンプリング周期は，

$$T_s = 3.33 \times 10^{-2} \ \ [\mathrm{s}]$$

となった．また，透視変換に関するパラメータは，Z 方向に対象を 0.4 ～ 0.6m 平行移動で動かしたときの特徴点 2 点を観測し，透視変換の式からキャリブレーションを行った．このときの 100 回の平均をとることによって

$$\frac{f}{s_x} = 6.14 \times 10^2$$
$$\frac{f}{s_y} = 6.32 \times 10^2$$

とした．キャリブレーションの精度は小数点以下 1 桁までである．対象を 5.0×10^{-1}m の距離で運動させるので，

$$\frac{f}{s_x Z0} = 3.07 \times 10^2$$
$$\frac{f}{s_y Z0} = 3.16 \times 10^2$$

とした．

フィルタの設計パラメータの決定

推定器設計において，もっとも重要なの事項は，重み係数行列の決定である．視覚サーボシステムのの拡大系は$\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{V}_q$, $\boldsymbol{W}$の 3 つの重み係数行列をもち，その要素は以下のような物理的な意味を持っている．

$\boldsymbol{V}$　　$\boldsymbol{v}_k = \mathrm{diag}(V_x, V_y, V_\theta)\boldsymbol{v}_{0k} \cong (\dot{\boldsymbol{u}}_k + \dot{\boldsymbol{q}}_k)$ と書けることから，対象とカメラの運動におけるカメラフレーム上での相対加速度に大きく依存した重み係数行列である．

$\boldsymbol{V}_q$　　$\boldsymbol{v}_{qk} = \mathrm{diag}(V_{qx},\ V_{qy},\ V_{q\theta})\boldsymbol{v}_{0qk} \cong (\dot{\boldsymbol{q}}_k)$ と書けることから，対象の加速度に大きく依存した重み行列である．

$\boldsymbol{W}$　　画像面に投影された対象が前処理を含めて，観測量$\boldsymbol{y}_k$が計算されるまでの外乱の重み行列である．

したがって，物理的意味に基づいて以下のようなパラメータを選択した．

$\boldsymbol{V}$　　相対加速度の最大値として見積もる．実際には，対象の加速度が任意かつ相対位置，相対速度を 0 にするように制御しているためここでは，対象の加速度の見積もりの 2 倍 $\boldsymbol{V} = 2\boldsymbol{V}_q$とした．

$\boldsymbol{V}_q$　　対象の加速度の最大値として見積もる．対象は速度変化が最大となるような対象の加速度として，V_{qx}, V_{qy}については，半径 R_a，周波数 f_a の仮想的な円運動における加速度の最大値 $(2\pi f_a)^2 R_a$を選んだ．$V_{q\theta}$については，長さ L_a，最大角度α_aの仮想的な振り子運動における角加速度の最大値 $(g/L_a)\sin\alpha_a$ とした．実験結果で記載されているグラフにおいて，最終的に用いている値は，

$$\boldsymbol{V}_q \;=\; \mathrm{diag}(5.00\times10^{-2},\ 5.00\times10^{-2},\ 1.67\times10^{-2})$$

であるが，物理量の意味として，X, Y軸方向に 1.00s で $0.00 \to 5.00\times10^{-2}$m/s に達する加速度を最大と見積もっていることなり，円運動では半径6.25×10^{-2}m の円周を 10.0s 間で 1 周の等則運動するのときの向心加速度である．また Z軸周りの回転は，長さ 1.00m の振り子が 1.00×10^{-1}度の単振動しているときの最大加速度である．

表 3.1: 実験で用いたパラメータ

パラメータ名	値
$\boldsymbol{K}_\infty$	$1.50\boldsymbol{I}_3$
$\boldsymbol{K}_{KF}$	$1.50\boldsymbol{I}_3$
$\boldsymbol{\gamma}$	$\mathrm{diag}(1.96\times10^2,\ 1.96\times10^2,\ 1.08\times10^2)$

$\boldsymbol{W}$　対象が運動していない場合の観測量$\boldsymbol{y}_k$を実際に測定し，$\max|\boldsymbol{y}_k|$ とした．実験では，

$$\boldsymbol{W} = \mathrm{diag}(5.00\times10^{-1},\ 5.00\times10^{-1},\ 4.36\times10^{-3}) \tag{3.30}$$

とした．

また，実験で用いたパラメータを表 1 に示す．前節でも述べたように，マニピュレータはカメラを取り付けた手先効果器の速度を入力するとその速度を出すように設定する．$\boldsymbol{K}$については，閉ループ系が安定で過渡特性のよいものを選んだ．$\mathcal{H}_\infty$フィルタ，カルマンフィルタを用いた場合の$\boldsymbol{K}$をそれぞれ$\boldsymbol{K}_\infty$，$\boldsymbol{K}_{KF}$として示す．ここでは，推定の性能についての比較という観点から，いくつかの$\boldsymbol{K}$について実験を行い，$\mathcal{H}_\infty$フィルタとカルマンフィルタそれぞれについて良いサーボ性能が得られたものを示している．また，$\mathcal{H}_\infty$フィルタが存在できるγの最大値を 2 分法により選んだ．

3.3.3 実験結果

実験として，この視覚サーボの問題点とされる対象の加速度に依存する外乱の見積もりに対して考察を加えるため，以下のような実験をおこなった．

実験 1.　対象を固定した状態で，視覚サーボを開始して，その過渡応答をみる (図 3.7)．

実験 2.　対象を運動させ，追従誤差の推移をみる (図 3.8)．対象の運動は，(図 3.6) のように，対象を$\theta = -0.2$[rad] 傾けたまま，初期カメラフレームの X 軸 0.16[m] Y 軸 0.14[m] 速度 0.06[m/s] の長方形上を運動させた．

実験 3.　対象の加速度に依存する外乱の見積もりとしての重み行列V_q を変化させて，フィルタを設計し，固定対象，移動対象について，エラーの標本標準偏差をみ

る (図 3.9),(図 3.10)．さらに移動対象についてはエラーの最大値についても比較する．

3.4 考察

$\mathcal{H}_\infty$フィルタの有用性を検討するため，ここではカルマンフィルタと比較してサーボ精度がどのように向上したかを一つの指針とする．

実験結果として，まず，特徴点の初期点を指定し，対象を静止させたまま，視覚サーボを開始したときのカメラと対象の相対位置の変化を図 3.7に実線で，比較のためにカルマンフィルタを用いたものを点線で示す．横軸は時間，縦軸は同図中上から，X の相対位置，Y の相対位置，Z 回りの相対角度である．約 2 秒間で相対関係を 0 にするようにカメラが運動しており，若干 $\mathcal{H}_\infty$フィルタを用いた場合の結果の方が収束が早い．

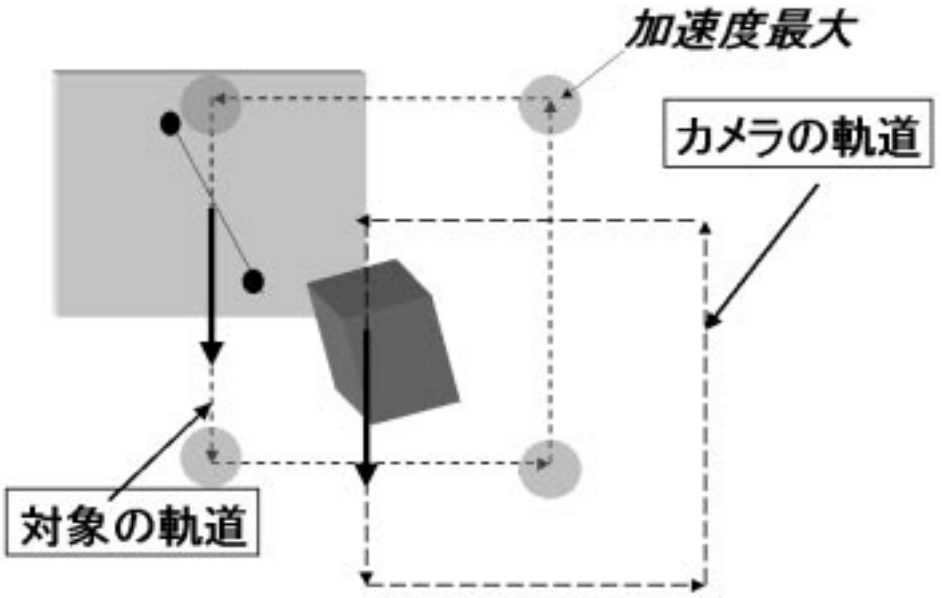
次に対象を$\theta = -0.2$[rad] 傾けたまま，初期カメラフレームの X 軸 0.16[m] Y 軸 0.14[m] 速度 0.06[m/s] の長方形上を運動させた時のカメラと対象の相対位置の変化を図 3.8に実線で，比較のためにカルマンフィルタを用いたものを点線で示す．横軸は時間，縦軸は同図中上から，X の相対位置，Y の相対位置，Z 回りの相対角度である．相対角度は変化がないため，両結果ともすでに 0 に収束しており，X, Yについての相対位置は，対象の速度が急激に変化する長方形の頂点でエラーが生じた．対象が移動した場合，$\mathcal{H}_\infty$フィルタを用いた場合のエラーはカルマンフィルタを用いた場合より小さい．

サーボ精度を数値的に解析するため，この指標として一定時間の観測によるエラーの標本標準偏差を用いた．この偏差が小さいほどサーボ精度は良いといえる． ここでは対象の加速度外乱として考慮したの重み行列$\boldsymbol{V}_q$を表の値の 0.2 倍から 2 倍の間で変化させて設計する．

図 3.9は，対象を静止させた時のサーボ精度を示したものであり，図 3.10は，移動する対象に対するサーボ精度を示したものである．横軸は$\boldsymbol{V}_q$の倍率，縦軸はエラーの標本標準偏差をとる．

エラーの標本標準偏差とは，時刻kT_sにおけるサーボ誤差を e_k とするとき，$k = k_1 \to k_2$ までの観測において

$$\sqrt{\frac{1}{k_2 - k_1} \sum_{k=k_1}^{k_2} e_k^2} \tag{3.31}$$



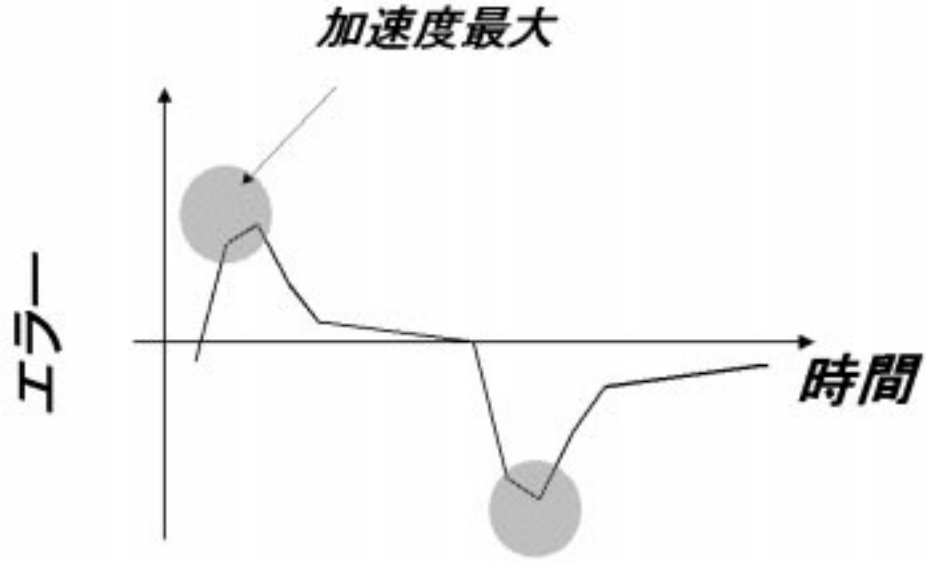


図 3.6: 移動対象に対する視覚追従実験

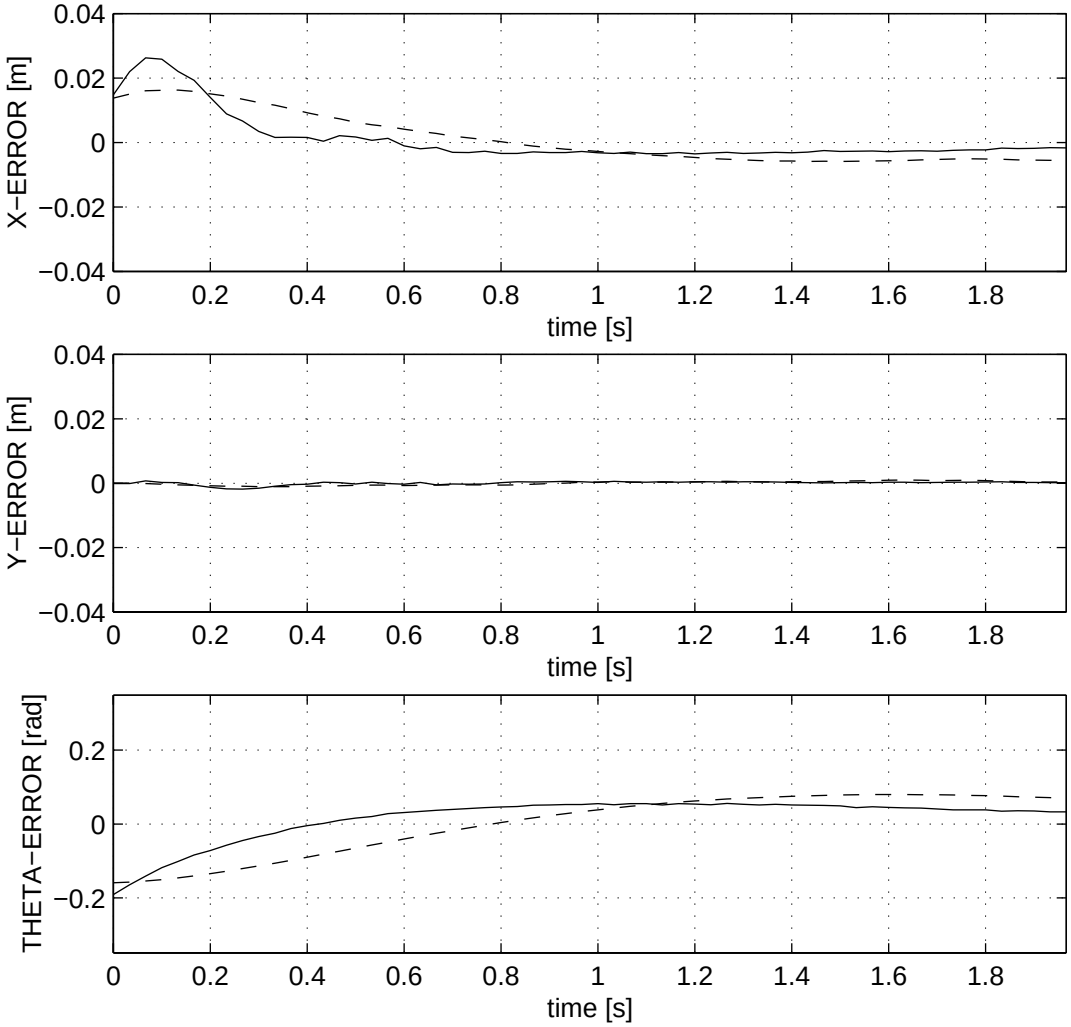


図 3.7: 視覚追従の初期動作に関する実験結果： $\mathcal{H}_\infty$ フィルタ (実線), カルマンフィルタ (破線)

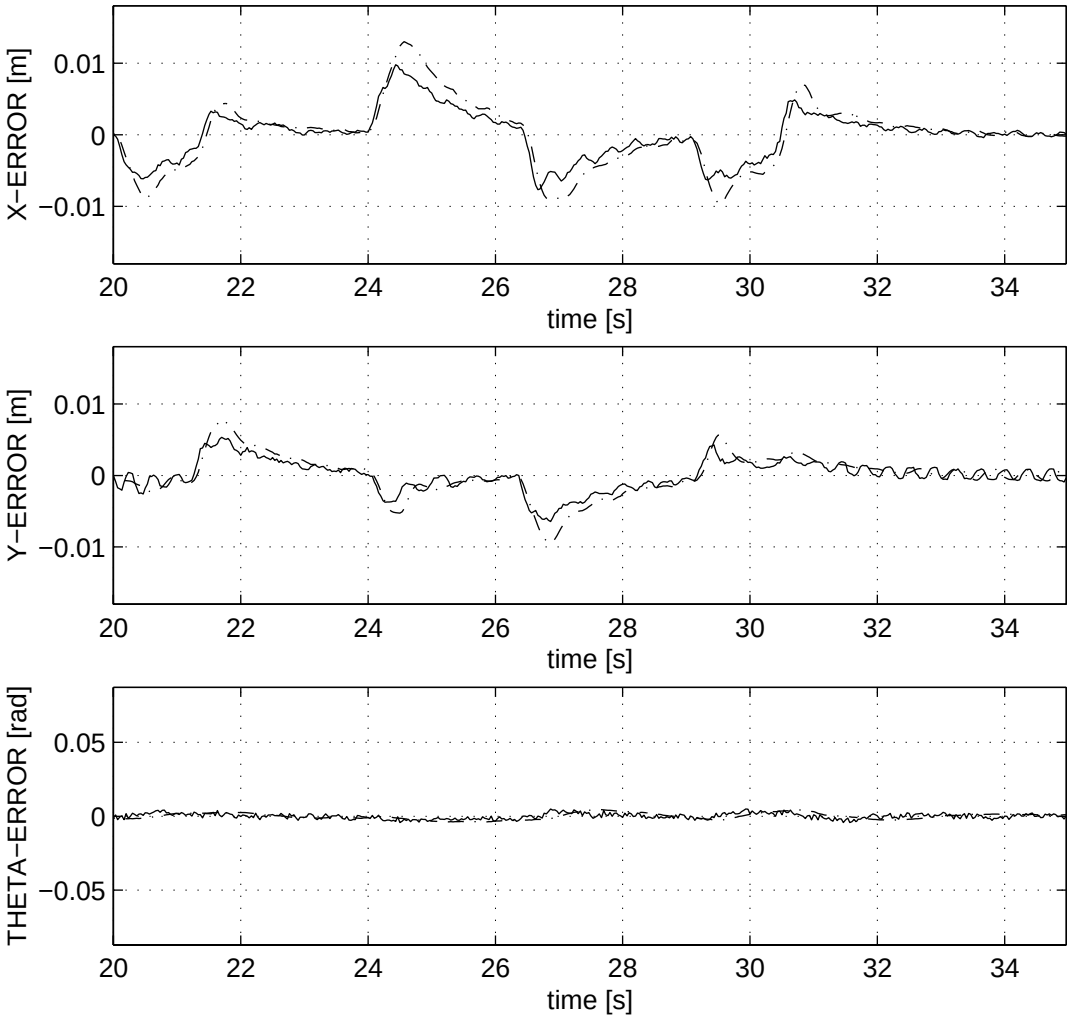


図 3.8: 移動対象に対する視覚追従に関する実験結果： $\mathcal{H}_\infty$ フィルタ (実線), カルマンフィルタ (破線)

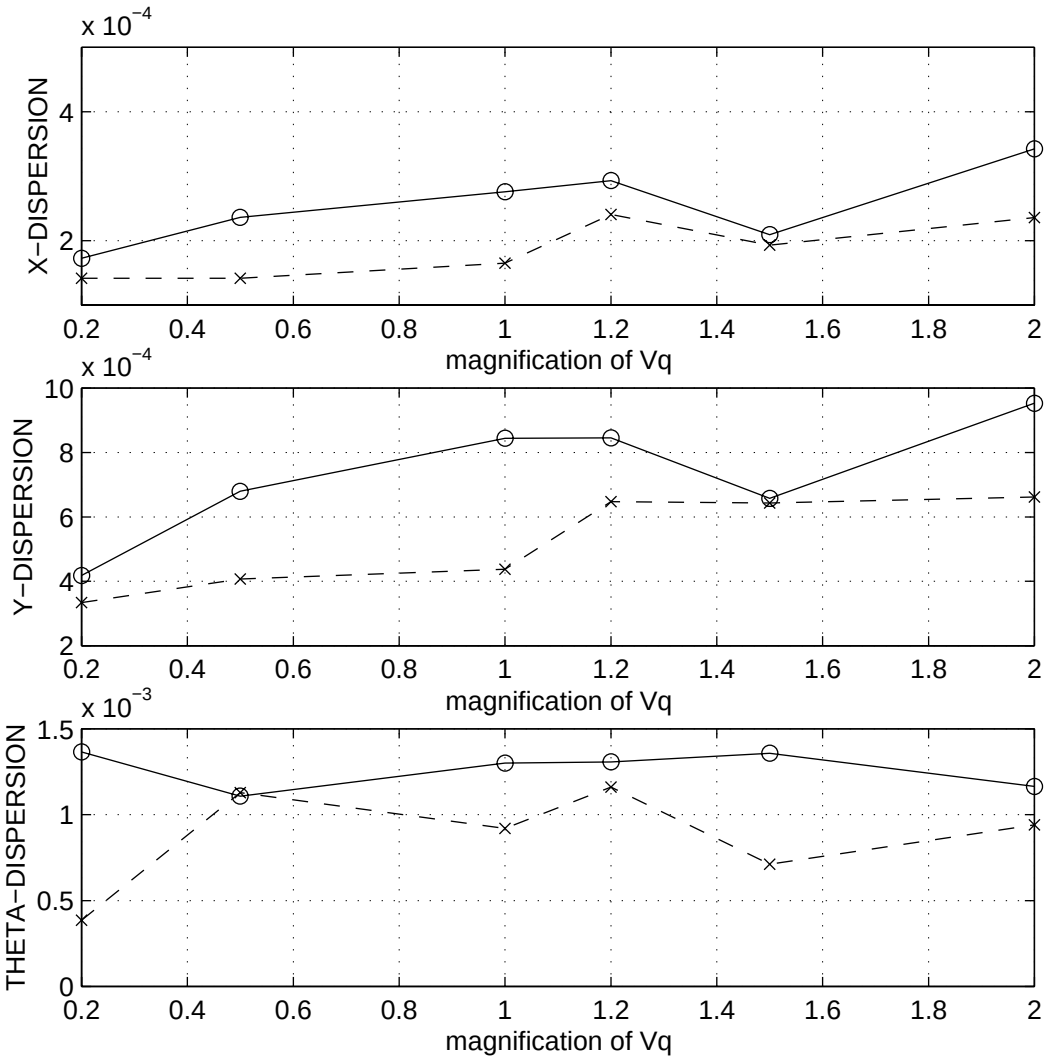


図 3.9: 固定対象に対する視覚追従に関するエラーの標本標準偏差

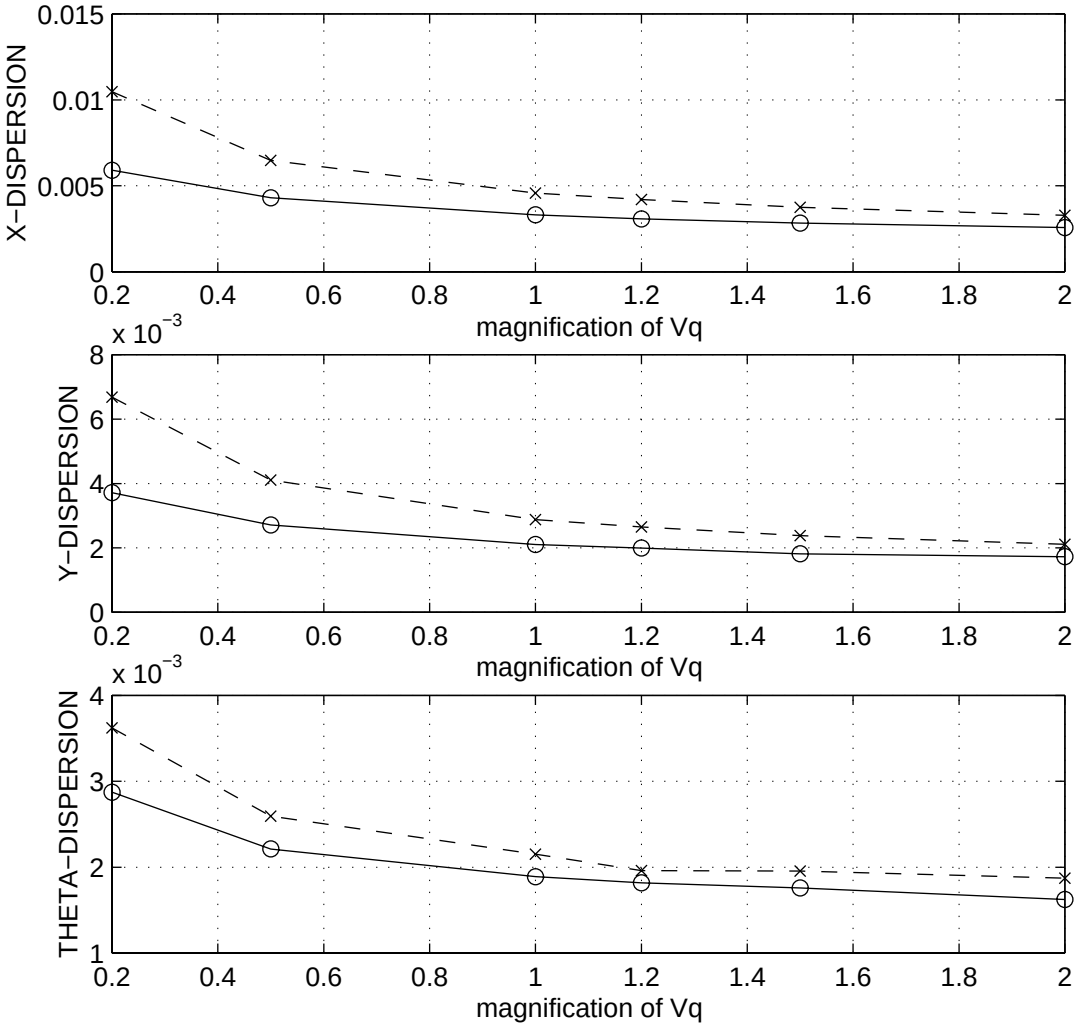


図 3.10: 移動対象に対する視覚追従に関するエラーの標本標準偏差

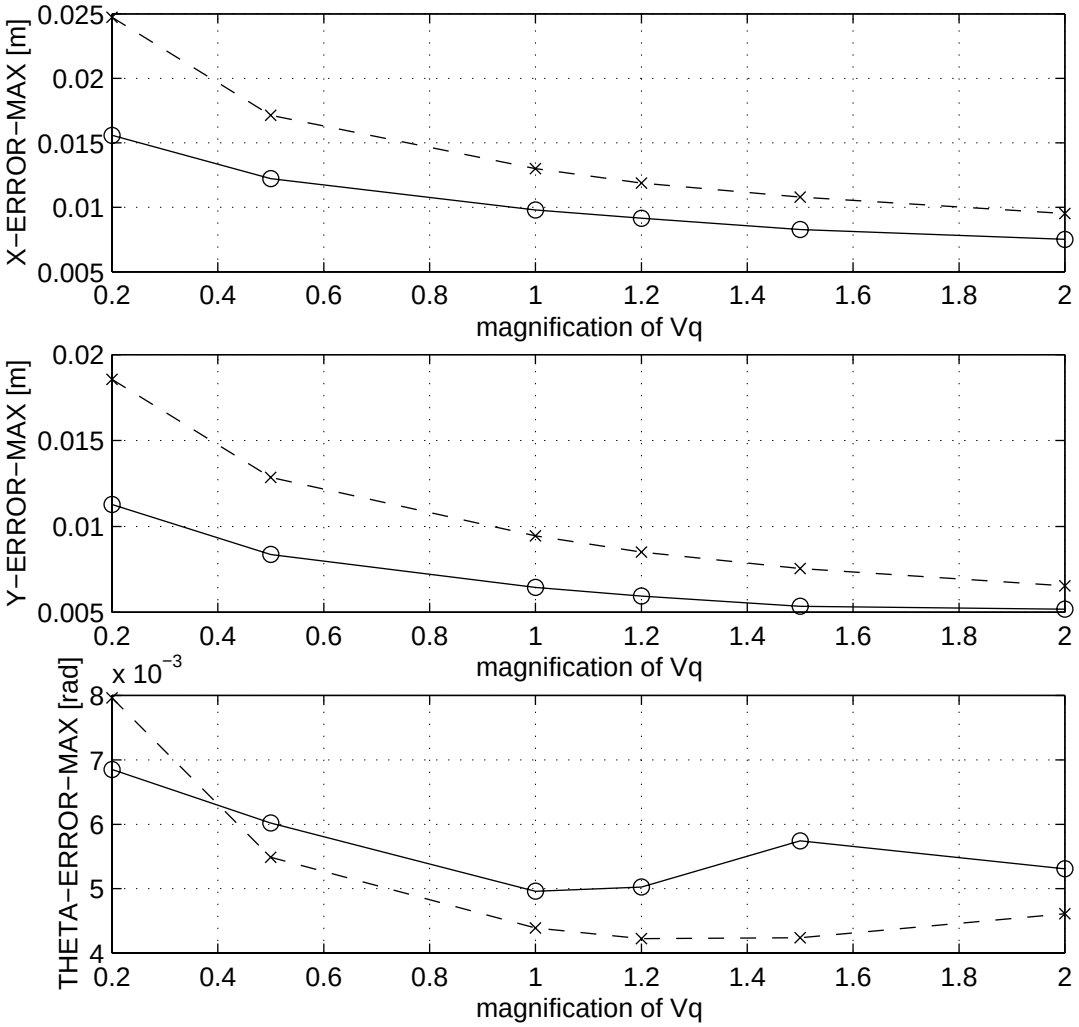


図 3.11: 移動対象に対する視覚追従に関する最大エラー

をいう．

実線は $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合，点線はカルマンフィルタを用いた場合である．対象を静止させた場合，10^{-4} オーダで微小な値といえるが，カルマンフィルタの性能の方が良いことがわかる．加速度のない対象においてある加速度を持っているとして設計した $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合，微小振動が増えてしまうことが原因である．

また対象が移動した場合，$\boldsymbol{V}_q$ を大きくすることによって，エラーは少なくなり，サーボ性能が改善されていることが解る．明らかにカルマンフィルタを用いた場合よりも $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた結果の方がエラーが減少している．図 3.11は，移動する対象に対するサーボのエラーの絶対値の最大値をサーボ精度としたものである．X, Y 方向の移動では加速度が大きくなる長方形のコーナーでエラーが最大となり，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの性能が良いが，固定した Z 軸の回転では，対象静止実験においてみられた微小振動によって結果は逆となった．

これは $\boldsymbol{V}_q$ が，移動対象の加速度による外乱を考慮したものであり，移動対象に対して適当といえる加速度を選ぶことによって外乱をある程度まで押え，視覚サーボの性能を改善できることがわかる．

第 4 章

3 次元ロバスト視覚サーボの設計

4.1 ステレオ視による 3 次元視覚サーボ問題

ここでは，視覚サーボにステレオ視を用いることにより，2 次元の視覚サーボ問題にカメラ視線方向の制御を導入する．この手法によって，従来マニピュレータを用いた作業に必要とされる手先効果器に取り付けられたツールの位置決定問題を考える．これに適用するために出力レギュレーションの推定器として時変のシステムに対するフィルタを適用する．

4.1.1 3 次元ステレオ視覚サーボ問題の仮定

2 次元単眼視での視覚サーボ同様，ステレオ視覚サーボ問題の仮定を以下に述べる．

仮定 1　対象物の運動は 3 次元の並進運動のみを行い，カメラの運動のために与える制御量もまたそれに対応する並進速度とする．

仮定 2　仮定 1. より，対象物における特徴点は画像上の 1 点で表すことができ，左右の画像面上での特徴点の対応はとれているものとする．

仮定 3　作業を行う際のカメラとツールの位置姿勢の関係は既知であり，カメラからの作業目標の相対目標位置が，可変であるが既知とする．

このような仮定のもとで『移動する物体とカメラの相対位置・姿勢が指定した目標位置になるようにカメラの動きを定める.』という問題を考える．以下に，ステレオ視による 3 次元視覚サーボの位置決定問題のモデルを示す.

4.1.2 作業対象とカメラの運動モデル

図 4.1に示すように 2 台のカメラの 2 つの焦点の中心に原点を持つカメラ座標系Σ_Cとする.

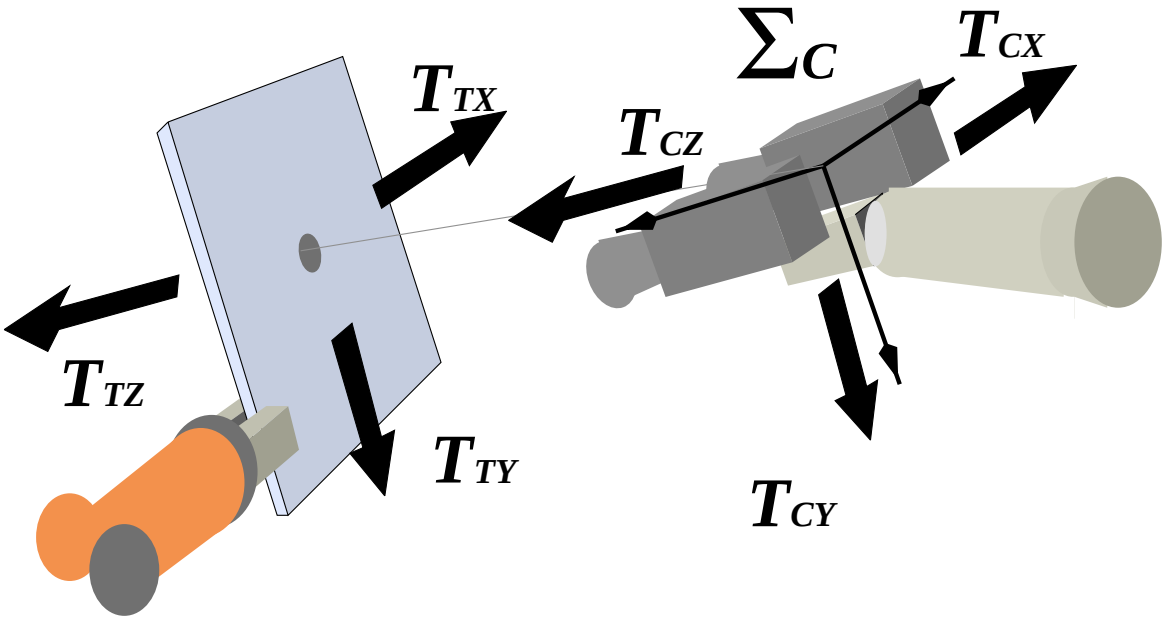


図 4.1: カメラ座標系

以下にΣ_Cに対する位置，速度の定義を示す.

$$\boldsymbol{P} = [X \quad Y \quad Z]^T \quad : \quad \text{特徴点 } P \text{ の相対位置}$$

$$X \quad : \quad P \text{ の } X \text{ 方向並進位置}$$

$$Y \quad : \quad P \text{ の } Y \text{ 方向並進位置}$$

$$Z \quad : \quad P \text{ の } Z \text{ 方向並進位置}$$

$$
\begin{array}{rcl}
\dot{X} & : & \boldsymbol{P}\text{の}\ X\text{方向並進速度成分} \\
\dot{Y} & : & \boldsymbol{P}\text{の}\ Y\text{方向並進速度成分} \\
\dot{Z} & : & \boldsymbol{P}\text{の}\ Z\text{方向並進速度成分} \\
T_{TX} & : & \text{対象の運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ X\text{方向並進速度} \\
T_{TY} & : & \text{対象の運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ Y\text{方向並進速度} \\
T_{TZ} & : & \text{対象の運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ Z\text{方向並進速度} \\
T_{CX} & : & \text{カメラの運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ X\text{方向並進速度} \\
T_{CY} & : & \text{カメラの運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ Y\text{方向並進速度} \\
T_{CZ} & : & \text{カメラの運動による}\boldsymbol{P}\text{の}\ Z\text{方向並進速度}
\end{array}
$$

2 次元の視覚サーボ同様，状態方程式について考える．

状態空間表現

システムのサンプリング時間を T_sとし，時間 kT_s(kは整数) における P を状態 x_kとすると，状態の差分方程式から次の状態方程式が得られる．ただし，u_kをカメラの速度の制御入力，q_kを対象物の速度とする．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{x}_{k+1} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{E}\boldsymbol{q}_k + \boldsymbol{H}\boldsymbol{v}_k \qquad (4.1) \\
& \boldsymbol{A} = \boldsymbol{I}_3, \quad \boldsymbol{B} = T_s\boldsymbol{I}_3 \\
& \boldsymbol{E} = T_s\boldsymbol{I}_3, \quad \boldsymbol{H} = \boldsymbol{I}_3
\end{aligned}
$$

状態の変化以外，状態については前章と同等のシステムであるといえる．v_kは離散化における誤差であり，その評価式は

$$
Rt = \frac{T_s^2}{2}\ddot{P}(\xi) \leq |\frac{T_s^2}{2}\ddot{P}_{\max}| \qquad (4.2)
$$

で与えられる．$\ddot{P}_{\max}$は Pの各要素の 2 階時間微分値の最大値，すなわち対象とカメラの相対加速度の最大値として考えられる．

4.1.3 ステレオ視の観測モデル

ステレオカメラのモデルを図 4.2に示す．ステレオ視においては，視差 [38] を用いて観測モデルを考える．

左右の画像面 S_l, S_r 上の特徴点の座標を

$$\begin{aligned} \boldsymbol{p}_l &= [x_l, y_l]^T \\ \boldsymbol{p}_r &= [x_r, y_r]^T \end{aligned}$$

とすると，ステレオカメラにおける特徴量と点 P とは次のような関係になる．

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_l + x_r) \\ \frac{1}{2}(y_l + y_r) \\ x_l - x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ x_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\frac{X}{Z} \\ f\frac{Y}{Z} \\ \frac{f \cdot b}{Z} \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

ここで $\boldsymbol{p}_c = [x_c, y_c]^T$ は S_l と S_r の中間に仮想的に考えた画像面 S_c における対象物の写像点である．また x_d は一般に視差と呼ばれる．

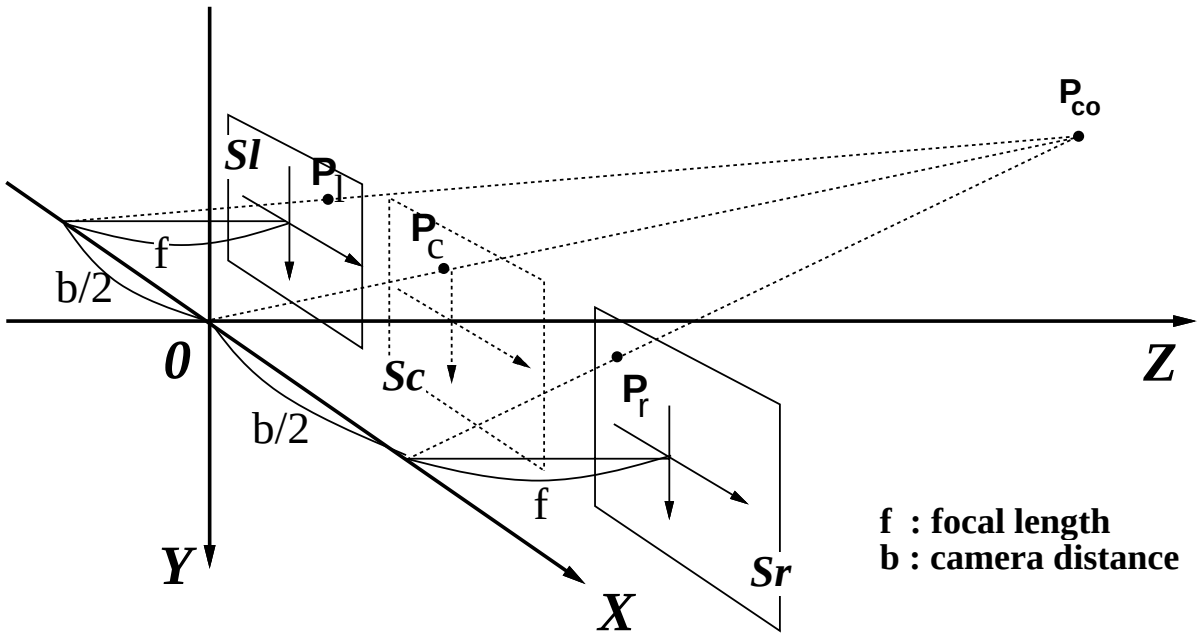


図 4.2: ステレオカメラのモデル

観測方程式

2 次元の場合のように観測における外乱について考える．実際の観測量を

$$\tilde{\boldsymbol{p}}_l = \begin{bmatrix} \tilde{x}_l & \tilde{y}_l \end{bmatrix}^T$$

$$\tilde{\boldsymbol{p}}_r = \begin{bmatrix} \tilde{x}_r & \tilde{y}_r \end{bmatrix}^T$$

とし，観測外乱δ_{xl},δ_{yl},δ_{xr},δ_{xr} を考えると以下のように書ける．

$$\begin{cases} x_l = s_x(\tilde{x}_l + \delta_{xl}) \\ y_l = s_y(\tilde{y}_l + \delta_{yl}) \end{cases}$$
$$\begin{cases} x_r = s_x(\tilde{x}_r + \delta_{xr}) \\ y_r = s_y(\tilde{y}_r + \delta_{yr}) \end{cases} \tag{4.4}$$

また，式 (4.3) は非線形であり，これを観測方程式として取り扱うには困難である．ここでは，

$$\text{目標相対位置} \ : \ \boldsymbol{P}_{ref} = [X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}]^T$$

の近傍で線形近似を行なうことで観測方程式を求める．

仮定より

$$\begin{aligned} \delta_x &= (\delta_{xl} + \delta_{xr})/2, \\ \delta_y &= (\delta_{yl} + \delta_{yr})/2, \\ \delta_{dx} &= (\delta_{xl} - \delta_{xr}), \\ \tilde{x}_c &= (\tilde{x}_l + \tilde{x}_r)/2, \\ \tilde{y}_c &= (\tilde{x}_l + \tilde{y}_r)/2, \\ \tilde{x}_d &= \tilde{x}_l - \tilde{x}_r \end{aligned}$$

と書けるので，式 (4.3) を変形すると，

$$\tilde{x}_c = \frac{f}{s_x Z_{ref}} \cdot X - \delta_x \tag{4.5}$$

$$\tilde{y}_c = \frac{f}{s_y Z_{ref}} \cdot Y - \delta_y \tag{4.6}$$

$$\tilde{x}_d - \frac{2\ f\ b}{s_x Z_{ref}} = -\frac{f\ b}{s_x Z_{ref}^2} \cdot Z - \delta_{dx} \tag{4.7}$$

となる．時刻 kT_sにおける式 (4.5)，(4.6)，(4.7) の左辺を観測量$\boldsymbol{y}_k$とし，kT_s時の目標状態を$\boldsymbol{r}_k$とすると次のような時変の観測方程式で表すことができる．

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{C}_k \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{w}_k \tag{4.8}$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{C}_k &= \mathtt{diag}(\frac{f}{s_x\ Z_{ref}}, \frac{f}{s_y\ Z_{ref}}, -\frac{f\ b}{s_x\ Z_{ref}^2}) \\
w &= [-\delta_x, -\delta_y, -\delta_{dx}]^T
\end{aligned}
$$

ここで $\mathtt{diag}(a, b, c)$ は a, b, c を対角要素とする対角行列を表す.

4.1.4 線形時変システムへの出力レギュレーションの適用

時刻 kTs における状態の目標値$\boldsymbol{P}_{ref}$を$\boldsymbol{r}_k \in \Re^3$とする．このときこの視覚サーボ問題は，式 (4.1)(4.8) 示されるシステムに対して，$\boldsymbol{x}_k \to \boldsymbol{r}_k$となるような入力$\boldsymbol{u}_k$を求めよ，という問題となる．

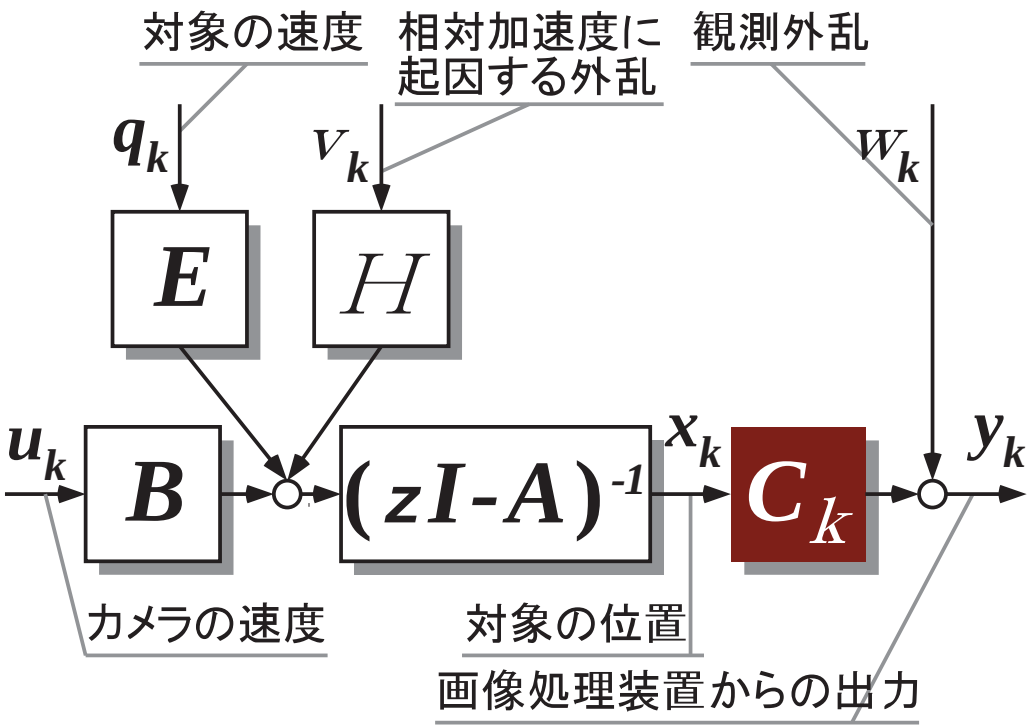


図 4.3: 視覚サーボシステムのモデル

ここで，注意すべき点は，ステレオ視による視線方向のモデルを導入したことによってシステムが時変系になることである．2 次元視覚サーボ問題同様，外乱のない時変のシステムに対して，出力レギュレーションを適用する．仮定 3 より状態の目標値$\boldsymbol{r}_k$は，全ての時刻において既知である．

応答速度と安定性の改善

STEP 1： 状態フィードバック制御によって閉ループ系の応答速度と安定性を改善する(内部安定性の補償).
状態フィードバック入力

$$\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{r}_k) + \boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{r}_{k+1} - \boldsymbol{A}r_k) + \boldsymbol{u}_{2k} \tag{4.9}$$

によって $(\boldsymbol{A} + \boldsymbol{BK})$ を安定にする.

STEP 2： 外部入力と平衡するために必要な制御入力を外部入力の関数として求める(フィードフォワード補償).
STEP 1 によって閉ループ系は,

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{k+1} - \boldsymbol{r}_{k+1} \quad = \quad (\boldsymbol{A} + \boldsymbol{BK})(\tilde{\boldsymbol{x}}_k - \boldsymbol{r}_k) + \boldsymbol{Bu}_{2k} + \boldsymbol{Eq}_k \tag{4.10}$$

と安定化されている．対象の速度 q_k がフィードフォワード入力として与えられるならば,

$$\boldsymbol{u}_{2k} \quad = \quad -\boldsymbol{q}_k \tag{4.11}$$

とすると制御目標は達成できる.

STEP 3： 外部入力を推定器によって選定し，フィードフォワード入力を出力フィードバックで実現する(フィードバック実現).
対象の運動モデルを含めた拡大系は,

$$\begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_{k+1} - \boldsymbol{r}_{k+1} \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{O}_3 & \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_k - \boldsymbol{r}_k \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix} \boldsymbol{u}_k$$

$$\xi_k \quad = \quad \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{x}}_k \\ \tilde{\boldsymbol{q}}_k \end{bmatrix}$$

となる．そこで直接観測できない状態 $\tilde{\boldsymbol{x}}_k$，対象の速度 $\tilde{\boldsymbol{q}}_k$ については推定し，その推定値 $\hat{\boldsymbol{x}}_k$, $\hat{\boldsymbol{q}}_k$ をもちいてフィードバック

$$\boldsymbol{u}_k \quad = \quad \boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{r}_{k+1} - \mathrm{A}\boldsymbol{r}_k) - \hat{\boldsymbol{q}}_k \tag{4.12}$$

を実現する.

4.1.5 外乱を考慮した拡大系の構成

外乱を含めた対象の運動モデルを以下のように考える．

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k - T_s \boldsymbol{v}_{qk} \tag{4.13}$$

これより，式 (4.1) は，以下の拡大系が構成できる．

$$\boldsymbol{x}_{pk+1} = \boldsymbol{A}_p \boldsymbol{x}_{pk} + \boldsymbol{B}_p \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{H}_e \boldsymbol{v}_{ek} \tag{4.14}$$

ここで，

$$\boldsymbol{x}_{pk} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ \boldsymbol{q}_k \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{v}_{ek} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_k \\ \boldsymbol{v}_{qk} \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{A}_p = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{O}_3 & \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B}_p = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_p \\ \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{H}_e = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{O}_3 \\ \boldsymbol{O}_3 & T_s \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix}.$$

推定器のパラメータγおよび外乱に対する重み係数を取り入れ，式 (4.14)，(4.8) から以下の拡大系を構成する．

$$\boldsymbol{x}_{pk+1} = \boldsymbol{A}_p \boldsymbol{x}_{pk} + \boldsymbol{B}_p \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{H}_p \boldsymbol{v}_{e0k} \tag{4.15}$$

$$\boldsymbol{y}_{pk} = \boldsymbol{C}_{pk} \boldsymbol{x}_{pk} + \boldsymbol{w}_{0k} \tag{4.16}$$

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{L}_p \boldsymbol{x}_{pk} \tag{4.17}$$

ここで，

$$\boldsymbol{y}_{pk} = \gamma^{-1} \boldsymbol{W}^{-1} \boldsymbol{y}_k,$$
$$\boldsymbol{H}_p = \gamma \boldsymbol{H}_e \boldsymbol{V} v_{e0k},$$
$$\boldsymbol{C}_{pk} = \gamma^{-1} \boldsymbol{W}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_k & \boldsymbol{O}_3 \end{bmatrix}.$$

4.1.6 線形時変フィルタの適用

本研究では，推定のために $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いる．前章における 2 次元視覚サーボと異なっている点は，観測方程式が時変系であることである．したがって，ここで用いるフィルタは，リアルタイムに状態更新するフィルタを用いる必要がある．

時変の $\mathcal{H}_\infty$ フィルタは次の離散時間リカッチ方程式

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}_{k+1} &= \boldsymbol{A}_p \boldsymbol{\Sigma}_k \boldsymbol{A}_p^T + \boldsymbol{H}_p \boldsymbol{H}_p^T, \qquad (4.18) \\ & \quad \boldsymbol{\Sigma}_0 = \boldsymbol{N} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{k+1}^{-1} &= \boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{C}_{pk}^T \boldsymbol{C}_{pk} - \boldsymbol{L}_p^T \boldsymbol{L}_p \qquad (4.19) \end{aligned}$$

の解Σ_kが時間 $[0, \infty)$ で正定である時存在し、$\hat{z}_p$は次の様に与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{z}}_k &= \boldsymbol{L}_p \hat{\boldsymbol{x}}_{pk} \qquad (4.20) \\ \hat{\boldsymbol{x}}_{pk+1} &= \boldsymbol{A}_p \hat{\boldsymbol{x}}_{pk} + \boldsymbol{B}_p \boldsymbol{u}_k + \qquad (4.21) \\ & \quad (\boldsymbol{M}_{k+1}^{-1} + \boldsymbol{C}_{pk}^T \boldsymbol{C}_{pk})^{-1} \boldsymbol{C}_{pk}^T \\ & \quad (\boldsymbol{y}_{pk+1} - \boldsymbol{C}_{pk}(\boldsymbol{A}_p \hat{\boldsymbol{x}}_{pk} + \boldsymbol{B}_p \boldsymbol{u}_k)). \end{aligned}$$

ただし、$\boldsymbol{x}_{p0} = 0$、$\boldsymbol{N}$は初期状態である．設計上の問題点として，フィルタがリアルタイムに状態更新することによってある時点で解が存在しなくなる可能性があることが挙げられる．設計パラメータγの決定をオフラインのシミュレーションを行うことによりこれを回避する．

4.1.7 ステレオ視による視覚サーボ実験

ここまでに述べてきた視覚追従問題のモデリングと推定理論を実際のシステムに用いた実験を行う．実験では，ビジュアルサーボのタスクとして対象上にあるネジに対するドライバーの位置ぎめを行ない，さらに $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの有用性をカルマンフィルタとの比較することによって検証する．また，実験上で起こりえる様々な外乱，特に対象の加速運動に対するロバスト性について検討する．

ステレオ視の視覚サーボシステムの構成

構成として，前章の単眼視 2 次元の視覚サーボとほぼ同等となるため，その違いについて以下に述べる．

アイインハンド システム：

- 産業用 6 軸マニピュレータの手先効果器の向きに対して平行に，2 台の CCD モノクロームカメラを焦点同士の距離が 1.20×10^{-1}m 離してマウントする．

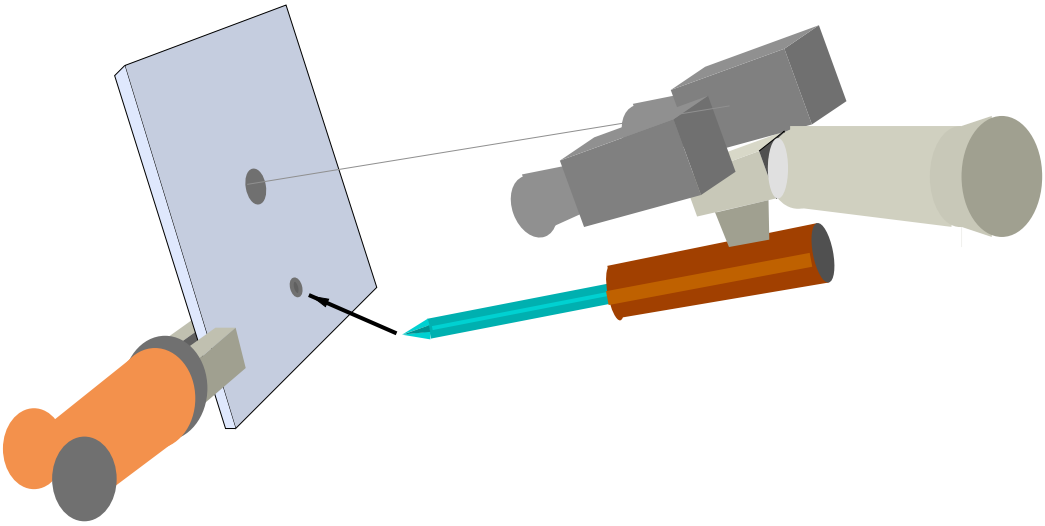


図 4.4: 視覚サーボ実験

- その 2 点間の中心を仮想カメラフレームとすると，制御入力は 3 次元平面上での仮想カメラフレームの並進速度のみとする．カメラの姿勢は維持するように制御を別にもうける．

画像処理：

- 対象は，ティーチング可能なマニピュレータの手先効果器の白色の板に直径 1.00×10^{-2}の特徴点 (黒点) とネジをつける．前述した焦点同士の距離 1.20×10^{-1}m は，カメラと対象の相対距離範囲内において両方のカメラに特徴点が写るように設定したパラメータである．
- 十分な光源 (ハロゲン灯) の元で実験を行った．
- 特徴点取得において，2 値画像の 1 次モーメントをとる際に用いた窓の大きさは，31 ピクセルとした．これは，並列カメラでのステレオ視では，画面の両端に特徴点が写るため，単眼視に比べて小さくなっている．

- 左右のカメラに各 1 点づつ写る特徴点の視差と目標値から計算される出力を画像処理装置の出力となるように構成した.

対象の運動とネジの設置：

- 対象は初期カメラフレームと平行の平面上を半径約 $0.080[m]$，$10.0[s/R]$ の円運動を行なわせた.
- カメラと対象の相対距離が 3.25×10^{-1} のとき，ドライバーはネジに接触する.
- また，ネジの大きさは外径 $1.00 \times 10^{-2}[m]$，内径 $8.00 \times 10^{-3}[m]$ の＋型であり，X，Y 方向のずれが $\pm\ 0.4[cm]$ の範囲内であればネジの溝にドライバーの先端が正しくセットされる (図 4.4).

カメラと対象の相対位置の目標値

- 相対位置の目標値として，

$$
\begin{aligned}
X_{ref} &: \ 0.00[m] \\
Y_{ref} &: \ 0.00[m] \\
Z_{ref} &: \ 5.00 \times 10^{-1}[m] \rightarrow 3.25 \times 10^{-1}[m]
\end{aligned}
\tag{4.22}
$$

- Z_{ref} は 2 つの目標値の間を 3 秒間で変化するように 3 次関数を用いて補間した目標値を計算する.

実験方法

$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの設計は，Xmath(Integrated systems) を用いてシミュレーションをまじえながら行なった．これは，いつでも $\mathcal{H}_\infty$ フィルタが存在するように目標値 Z_{ref} の最大値 (5.00×10^{-1}) の時における最大の γ をフィルタの設計パラメータとした.

実験で使用したその他のパラメータは, 特に明記のない限り表 4.1 とする．このとき W_{vd} は，対象物の最大加速度として半径 $0.100[m]$，10.0[s/R] の円運動の向心加速度を与えた.

実験として，対象を円運動させながら，目標相対位置を変動させたときにカメラが対象に追従し，マニピュレータの手先効果器ツールとしてのドライバーの位置ぎめが視覚サーボで実現できるかについて，エラーを観測し考察する.

表 4.1: 実験で使用したパラメータ

焦点距離 (f)	$1.2 \times 10^{-2}[m]$
画像面のピクセル長 (s_x, s_y)	$2.5 \times 10^{-5}[m]$
左右のカメラの焦点間距離 (b)	$1.2 \times 10^{-1}[m]$
状態フィードバックゲイン (K(X, Y方向))	2.0
状態フィードバックゲイン (K(Z方向))	7.0
位置の初期状態の重み	$1.0 \times 10^{-2}\boldsymbol{I}_3$
速度の初期状態の重み	$1.0 \times 10^{-6}\boldsymbol{I}_3$
離散化による外乱 ($\boldsymbol{V}$)	$9.9 \times 10^{-5}\boldsymbol{I}_3$
対象の加速度の 不確かさによる外乱 ($\boldsymbol{V}_q$)	$4.0 \times 10^{-2}\boldsymbol{I}_3$
画像処理の 不確かさによる外乱 ($\boldsymbol{W}$)	$1.0\boldsymbol{I}_3$

実験結果

実験結果を図 4.5，図 4.6，図 4.7に示す．

それぞれ、カメラフレームの X 軸方向，Y 軸方向，Z軸方向についてのものである．各図はすべて横軸を時間とし，

上：　カメラの初期状態のカメラフレームから見たカメラと対象の位置

中：　現在のカメラフレームから見た対象の位置の推定値

下：　現在のカメラフレームから見た対象の速度の推定値

となっている．対象との相対位置、速度の推定値が指定値に近いほど性能が良いと言える．また，対象の速度を 0.5 倍から 1.5 倍まで+0.2 倍づつ変動させた場合の標本標準偏差を図 4.8に示す．

4.1.8 考察

円運動を行った場合の一定の向心加速度が働いている．仮想的な画像面上の $X-Y$ 平面においては，X,Y それぞれ正弦 (余弦) 波の加速度が現れる．このため，実験結果では，X 軸，Y 軸の相対位置誤差は，対象の停止まで，正弦波形を描いていることがわかる．グラフの各所で定期的に現れるパルスのようなノイズは，対象を運動させているマニピュレータの影響で，対象物の円運動が 1 回転毎に一瞬停止してしまうためである．

また，グラフに示されている例は，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合にマニピュレータのツール (ドライバー) がネジに正確に接触した例である．定常的なエラーは，3.00×10^{-3}[mm] 以下に押えられている．最もエラーの少なくなるようにパラメータを調整した場合の接触の成功率について，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合で 10 回中 8 回，カルマンフィルタを用いた場合では，10 回中 4 回であった．

図 4.8は対象物の加速度をフィルタの設計値に対して変化させて行なった実験であり，横軸に対象の加速度の倍率，縦軸に追従エラーの 2 乗平均をとっている．$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合の結果は実線でカルマンフィルタを用いた場合の結果を点線で示す．対象の加速度をフィルタの設計値よりも大きくすると追従のエラーは増加し，性能は悪化していることがわかる．$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合の特性の改善が前章の 2 次元の場合よりも顕著に現れている．その要因の一つとしては，非線形モデルを線形化したときの観測方程式の行列 $\boldsymbol{C}_k$ が時変となったことが挙げられる．すなわち，2 章の場合，画像装置の出力にかかわる外乱 $\boldsymbol{w}_k$ は，特徴点取得時の正規分布的なノイズが多く含まれている．ステレオ視の場合には特に視線方向の作業の影響まで，観測外乱にのってしまうため，有界な外乱に対して有効な $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの優位点がみられる．

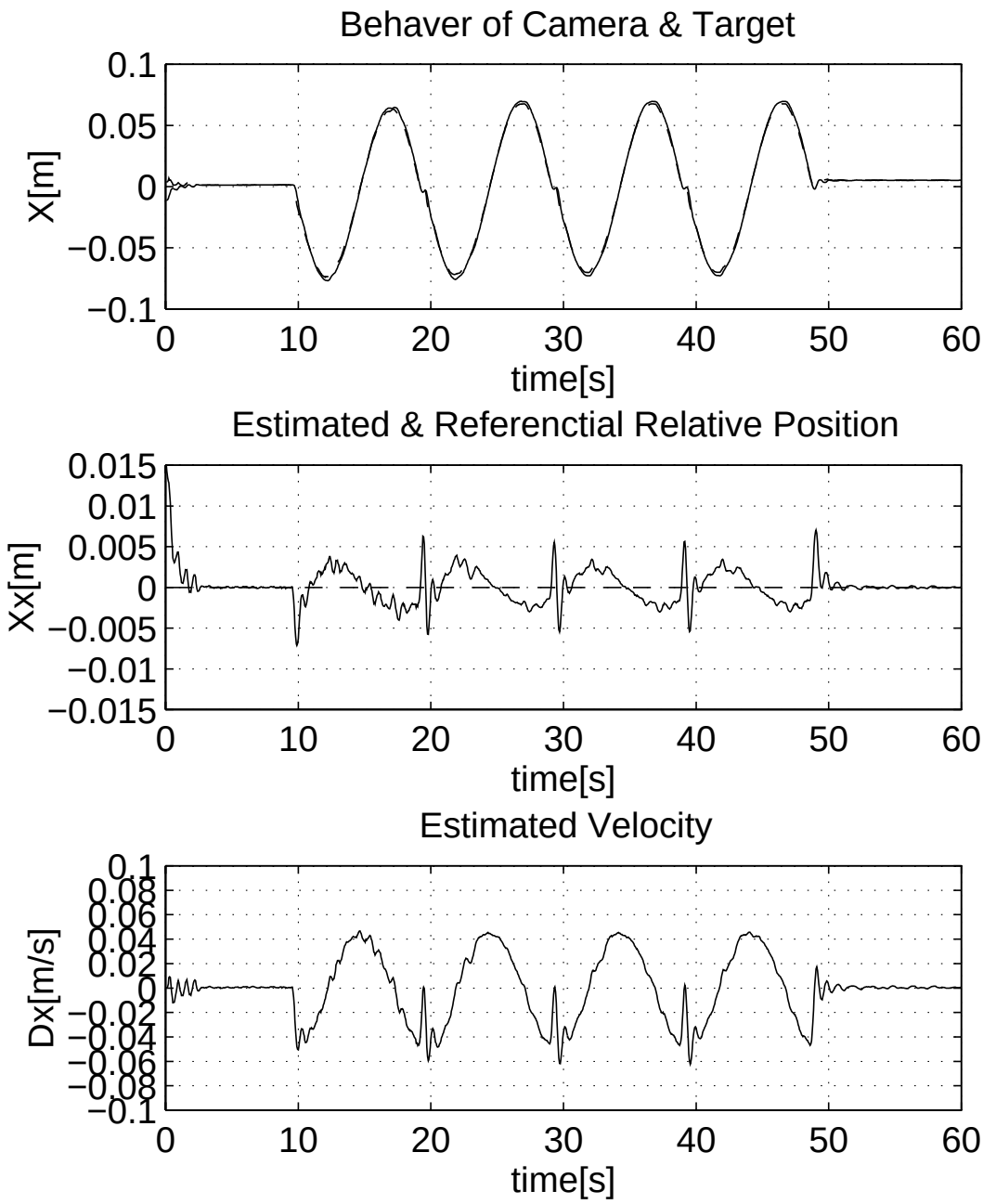


図 4.5: 実験結果 ($\mathcal{H}_\infty$ -filter)X

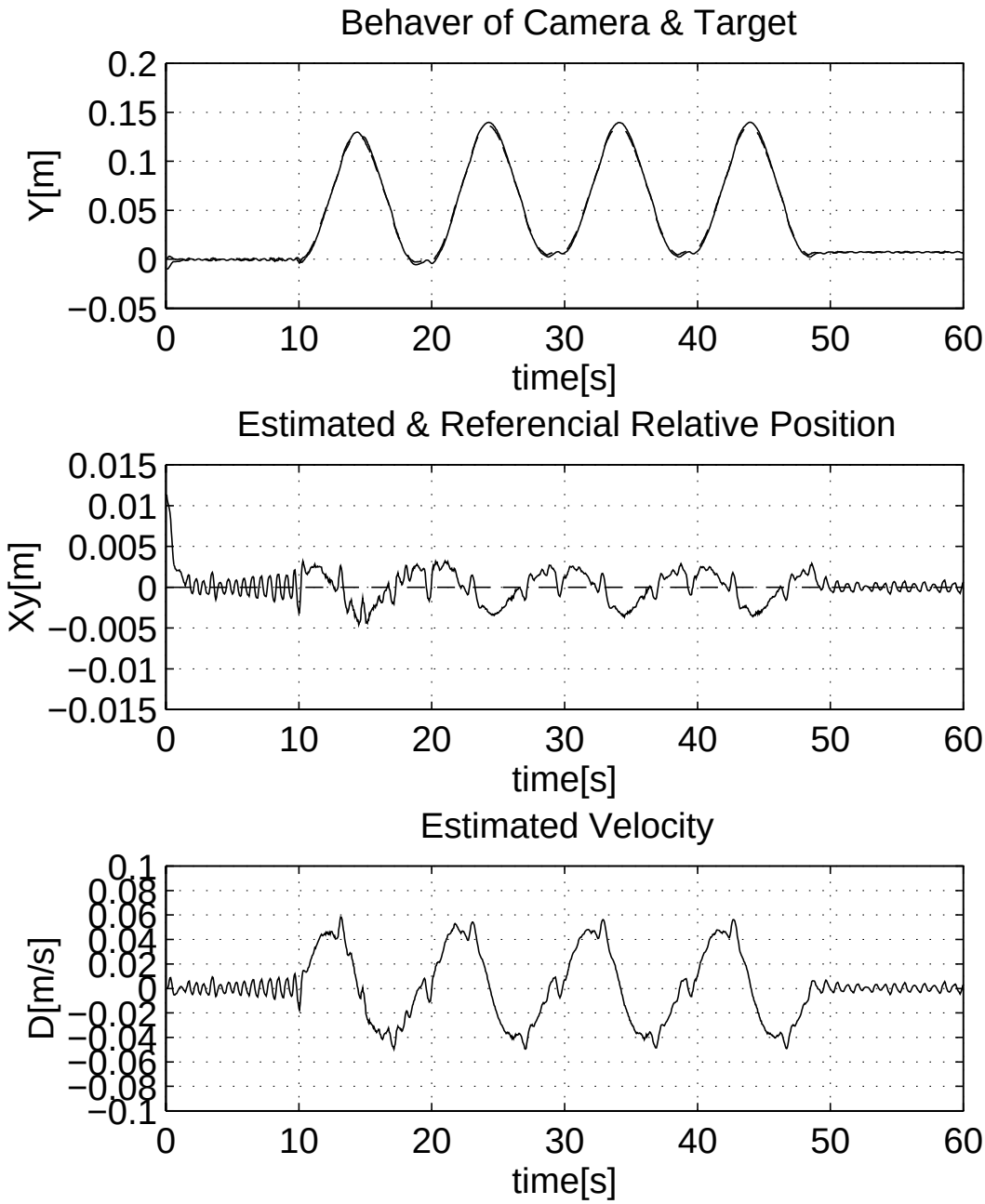


図 4.6: 実験結果 ($\mathcal{H}_\infty$ -filter)Y

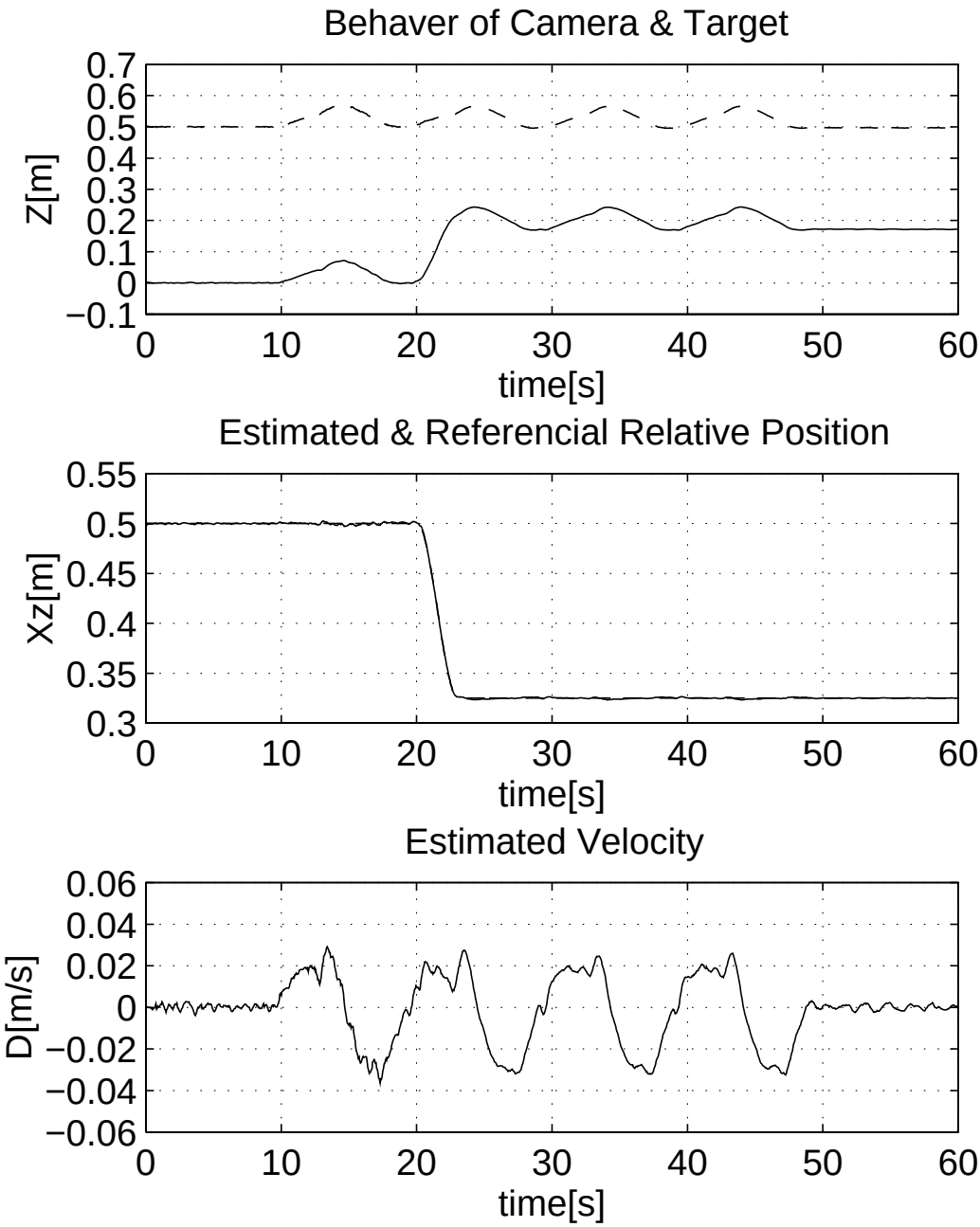


図 4.7: 実験結果 ($\mathcal{H}_\infty$ -filter)Z

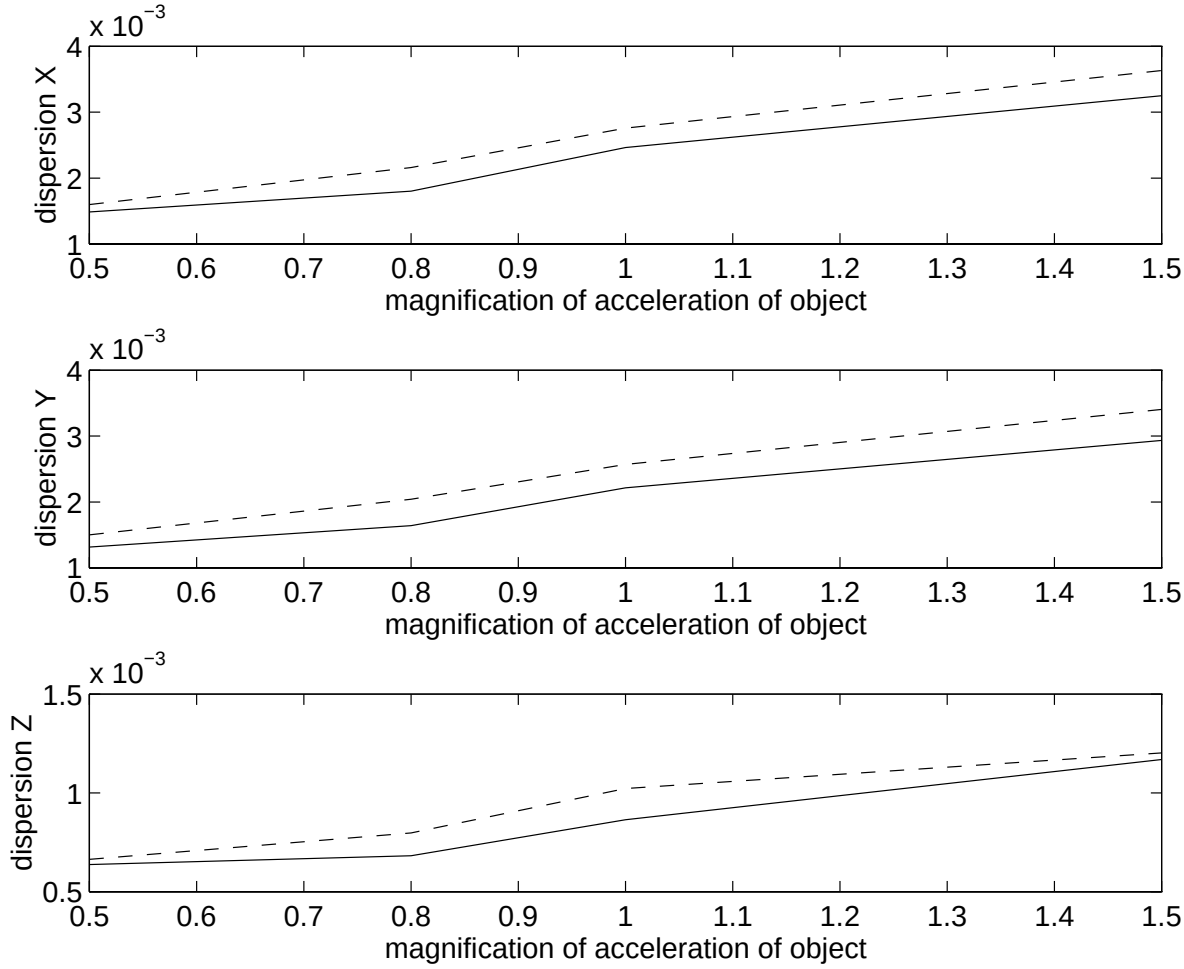

x 10^-3
dispersion X
4
3
2
1
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
magnification of acceleration of object
x 10^-3
dispersion Y
4
3
2
1
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
magnification of acceleration of object
x 10^-3
dispersion Z
1.5
1
0.5
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
magnification of acceleration of object

図 4.8: 実験結果

4.2 単眼視による 3 次元視覚サーボ問題

前節の問題では，観測方程式について，線形化を行うことにより，線形システムに対する出力レギュレーションに離散時間のフィルタを適用してきた．フィルタの利用という立場から考えると，従来，多くの非線形システムに対して拡張カルマンフィルタが用いられてきたように提案された拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアルゴリズムを並進運動のみの単眼視での 3 次元視覚サーボ問題に応用できる．

4.2.1 単眼視 3 次元視覚サーボ

単眼視 3 次元視覚サーボでの仮定は，以下のようになる．

仮定 1　対象はカメラの視線方向に対する運動と，これを垂線とする平面上を運動する．

仮定 2　カメラは，マニピュレータの手先効果器にマウントされ，視線方向と，対象が移動する平面に平行に運動し，その速度をマニピュレータに指令できるように構成されている．

仮定 3　対象上の 2 点の特徴点はすべてカメラの視線方向を垂線とする平面上に位置しており，3 次元平面上では特徴点同士の相対位置は変化せず，その 2 点へのカメラからの作業目標の相対目標位置が既知である．

この仮定のもとでは，カメラと対象 (2 点間の中心:$\boldsymbol{P} = [X, Y, Z]^T$) の運動は，前節のステレオ視によるものと同様の関係式が得られる．したがって，適用する出力レギュレーションの状態空間については，前節で述べたステレオ視の場合と同じモデルを用いる．すなわち，制御入力は，

$$\boldsymbol{u}_k \;=\; \boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}_k + \boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{r}_{k+1} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_k) - \hat{\boldsymbol{q}}_k \tag{4.23}$$

を用いる．観測量から$\boldsymbol{x}_k$と$\boldsymbol{q}_k$の推定を行うため単眼視による 3 次元の視覚サーボの非線形モデルに対して提案した拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアルゴリズムを適用する．フィルタを適用するための非線形のシステムを示す．

状態方程式

各特徴点のカメラフレームにおける位置を $P_m = [X\ Y\ Z]^T (m = 1, 2)$ とすると以下の関係式が得られる．

$$\frac{d}{dt}X_m = T_{TX} - T_{cX} (m = 1, 2) \tag{4.24}$$

$$\frac{d}{dt}Y_m = T_{TY} - T_{cY} (m = 1, 2) \tag{4.25}$$

$$\frac{d}{dt}Z_m = T_{TZ} - T_{cZ} (m = 1, 2) \tag{4.26}$$

ここで，視線方向の距離の逆数を考え，$d_Z := 1/Z_1 = 1/Z_2$とすると，

$$\frac{d}{dt}\frac{1}{d_Z} = T_{TZ} - T_{cZ}. \tag{4.27}$$

式 (4.27) の左辺を$\frac{d}{dt}\frac{1}{d_Z} = (-1/d_Z^2)\frac{d}{dt}d_Z$ として変形すると，

$$\frac{d}{dt}d_Z = -d_Z^2 T_{TZ} + d_Z^2 T_{cZ} \tag{4.28}$$

となる．ディジタル制御のサンプリング時間をT_sとし，時刻$kTs(k = 0, 1, 2, ...)$ における変数, ベクトル，行列についてkをつけて示す．ここで $P_m(m = 1, 2)$ の中心を $P_g = [X\ Y\ Z]$ とし，式 (4.24)(4.25)(4.28) より，離散化してまとめると，

$$X_{k+1} = X_k + T_s T_{TXk} - T_s T_{cXk} + v_{Xk} \tag{4.29}$$

$$Y_{k+1} = Y_k + T_s T_{TYk} - T_s T_{cYk} + v_{Yk} \tag{4.30}$$

$$d_{Zk+1} = d_{Zk} - T_s d_{Zk}^2 T_{TZk} + T_s d_{Zk}^2 T_{cZk} + v_{dZk} \tag{4.31}$$

ここで v_{Xk}, v_{Yk}, v_{dk}は加速度に依存する外乱とする．

対象の運動モデルをいままで同様以下のように考える．

$$\boldsymbol{q}_{k+1} = \boldsymbol{q}_k + T_s \boldsymbol{v}_{qk} \tag{4.32}$$

ここで, 対象の速度$q_k = [T_{TXk}\ T_{TYk}\ T_{TZk}]^T$, 対象の加速度に依存する外乱$v_{qk} = [v_{qXk}\ v_{qYk}\ v_{qZk}]^T$ とする．式 (4.29)(4.30)(4.31)(4.32) について拡大系を構成すると，

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\xi}_k) + \boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{\xi}_k)\boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{g}_b \boldsymbol{v}_k \tag{4.33}$$

ここで

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\xi}_k) &= \begin{bmatrix} X_k + T_s T_{TXk} \\ Y_k + T_s T_{TYk} \\ d_k - T_s d_{Zk}^2 T_{TZk} \\ T_{TXk} \\ T_{TYk} \\ T_{TZk} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{\xi}_k = \begin{bmatrix} X_{gk} \\ Y_{gk} \\ d_{Zk} \\ T_{TXk} \\ T_{TYk} \\ T_{TZk} \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{\xi}_k) &= \begin{bmatrix} -T_s & 0 & 0 \\ 0 & -T_s & 0 \\ 0 & 0 & T_s d_{Zk}^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{v}_k = \begin{bmatrix} v_{Xgk} \\ v_{Ygk} \\ v_{dZk} \\ v_{qXk} \\ v_{qYk} \\ v_{qZk} \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{u}_k &= \boldsymbol{T}_{ck}, \quad \boldsymbol{g}_b = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{O}_3 \\ \boldsymbol{O}_3 & T_s \boldsymbol{I}_3 \end{bmatrix}
\end{aligned}
$$

観測方程式

ピンホールカメラモデルを考えると，時刻 kTs において，対象の特徴点${}^c\boldsymbol{P}_{mk}(m=1,2)$ は画像面上の点$\boldsymbol{p}_{mk} = [x_m,\ y_m]^T$ に以下の関係に従って，投影される．

$$
\boldsymbol{p}_{mk} = \boldsymbol{h}_m(\boldsymbol{\xi}_k) = \begin{bmatrix} \dfrac{f}{s_x} X_{mk} d_{Zk} \\ \dfrac{f}{s_y} Y_{mk} d_{Zk} \end{bmatrix}
$$

ここで，カメラと対象の各特徴点の相対位置についての目標値$\boldsymbol{P}_{mref} := [X_{mref}, Y_{mref}, Z_{mref}]^T$, $(m=1,2)$ とする．画像面で抽出された特徴点$\boldsymbol{p}_{mk} := [x_{mk}, y_{mk}]^T \ \ (m=1,\ 2)$ と目標値を用いて計算された

$$
x = \frac{x_{1k} + x_{2k}}{2} \tag{4.34}
$$

$$
y = \frac{y_{1k} + y_{2k}}{2} \tag{4.35}
$$

$$
d_{Ik} = \frac{[1,1](\boldsymbol{p}_{1k} - \boldsymbol{p}_{2k})}{[1,1,0](\boldsymbol{P}_{1ref} - \boldsymbol{P}_{2ref})} \tag{4.36}
$$

を観測量とすると観測方程式は以下のように書ける．

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\xi}_k) + \boldsymbol{w}_k \tag{4.37}$$

ここで，

$$\boldsymbol{y}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ d_k \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\xi}_k) = \frac{f}{s}\begin{bmatrix} X_k d_{Zk} \\ Y_k d_{Zk} \\ d_{Zk} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{w}_k = \begin{bmatrix} w_{gxk} \\ w_{gyk} \\ w_{dzk} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{w}_k$は，特徴量抽出における外乱である．

4.2.2 拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの適用

式 (4.33)(4.37) について外乱$\boldsymbol{v}_k$, $\boldsymbol{w}_k$を大きさ 1 に正規化された外生信号

$$\boldsymbol{v}_{0k} := \begin{bmatrix} v_{0Xk} \\ v_{0Yk} \\ v_{0dZk} \\ v_{0Txk} \\ v_{0Tyk} \\ v_{0Tzk} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{w}_{0k} := \begin{bmatrix} w_{0gxk} \\ w_{0gyk} \\ w_{0dzk} \end{bmatrix}$$

を用いて以下のように表す．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}_k &= \boldsymbol{V}\boldsymbol{v}_{0k} \\ \boldsymbol{w}_k &= \boldsymbol{W}\boldsymbol{w}_{0k} \end{aligned}$$

ここで，$\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{W}$は以下のような対角行列の重み行列とする．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{V} &:= \mathrm{diag}(V_X,\ V_Y,\ V_{dZ}, V_{qx}, V_{qy}, V_{qz}) \\ \boldsymbol{W} &:= \mathrm{diag}(W_x,\ W_y, W_{dz}). \end{aligned}$$

この重み行列を取り入れ，以下の拡大系を構成する．

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\xi}_k) + \boldsymbol{g}_a(\boldsymbol{\xi}_k)\boldsymbol{u}_k + \tilde{\boldsymbol{g}}_b(\boldsymbol{\xi}_k)\boldsymbol{v}_{0k} \tag{4.38}$$

$$\tilde{\boldsymbol{y}}_k = \tilde{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{\xi}_k) + \boldsymbol{w}_{0k} \tag{4.39}$$

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{L}_k\boldsymbol{\xi}_k \tag{4.40}$$

ここで$\tilde{\boldsymbol{g}}_b(\boldsymbol{\xi}_k) = \boldsymbol{V}_k \boldsymbol{g}_b(\boldsymbol{\xi}_k)$, $\tilde{\boldsymbol{y}}_k = \boldsymbol{W}_k^{-1}\boldsymbol{y}_k$, $\tilde{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{\xi}_k) = \boldsymbol{W}_k^{-1}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{\xi}_k)$ である．この拡大系 (4.38), (4.39), (4.40) について拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを適用する．

実際に時間更新アルゴリズムで用いるベクトルは

$$\boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{\xi}}_k) \leftarrow \tilde{\boldsymbol{h}}(\hat{\boldsymbol{\xi}}_k) \tag{4.41}$$

$$\boldsymbol{y}_k \leftarrow \tilde{\boldsymbol{y}}_k \tag{4.42}$$

として変換をほどこし，行列については以下のように求められる．

$$\boldsymbol{F}_k = \left.\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\xi}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}_k}\right|_{\boldsymbol{\xi}_k=\hat{\boldsymbol{\xi}}_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 1-2T_s\hat{d}_{Zk} & 0 & 0 & T_s\hat{d}_{Zk}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}_{ak} = \boldsymbol{g}_a(\hat{\boldsymbol{\xi}}_k) \begin{bmatrix} -T_s & 0 & 0 \\ 0 & -T_s & 0 \\ 0 & 0 & T_s\hat{d}_{Zk}^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}_{bk} = \tilde{\boldsymbol{g}}_b = \boldsymbol{g}_b \boldsymbol{V}_k$$

$$\boldsymbol{H}_k = \left.\frac{\partial \boldsymbol{h}(\boldsymbol{\xi}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}_k}\right|_{\boldsymbol{\xi}_k=\hat{\boldsymbol{\xi}}_{k-1}} = \frac{f}{s}\begin{bmatrix} \hat{d}_{Zk-1} & 0 & \hat{X}_{k-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{d}_{Zk-1} & \hat{Y}_{k-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

この適用によって推定される推定値は，$\hat{X}_k$, $\hat{Y}_k$,$\hat{d}_{Zk}$,$\hat{T}_{oXk}$,$\hat{T}_{oXk}$,$\hat{T}_{oZk}$ である．制御入力 (4.23) における$\hat{x}_k$，$\hat{q}_k$, r_kについては，

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k = \begin{bmatrix} \hat{X}_k \\ \hat{Y}_k \\ \frac{1}{\hat{q}_k} \end{bmatrix}, \quad \hat{\boldsymbol{q}}_k = \begin{bmatrix} \hat{T}_{oXk} \\ \hat{T}_{oYk} \\ \hat{T}_{oZk} \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

$$\boldsymbol{r}_k = \frac{\boldsymbol{P}_{1ref} + \boldsymbol{P}_{2ref}}{2} \tag{4.44}$$

とすることによってフィードバックを実現する．

4.2.3 単眼視による視覚サーボシミュレーション

フィルタの設計パラメータの決定

シミュレーションで使用するパラメータについては実際のカメラのパラメータを用いて決定した．重み行列$\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{W}$, $\boldsymbol{N}$については，カメラと対象の加速度に起因する外乱と画像観測による外乱から考慮して以下のように定めた．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{V} &= \mathrm{diag}(2.5\times10^{-3},\ 2.5\times10^{-3},\ 2.5\times10^{-3},\ 5.0\times10^{-3},\ 5.0\times10^{-2},\ 5.0\times10^{-3}) \\
\boldsymbol{W} &= \mathrm{diag}(0.2,\ 0.2,\ 0.4) \\
\boldsymbol{N} &= \mathrm{diag}(1.0,\ 1.0,\ 1.0,\ 0.1,\ 0.1,\ 0.1).
\end{aligned}
$$

フィードバックゲインは，$\boldsymbol{K} = \mathrm{diag}(4.0,\ 4.0,\ 4.0)$ とした．また初期状態としてカメラと対象の相対位置を$\boldsymbol{P}_1 = [0.05, 0.05, 0.50]^T$，$\boldsymbol{P}_2 = [-0.05, -0.05, 0.50]^T$，初期相対速度はすべて 0 とした．シミュレーションにおける対象の速度として

$$
\begin{aligned}
T_{TXk} &= 0.5\ (1.0 \le kT_s < 1.5)\ ,\ = 0.0\ (\mathrm{otherwise}) \\
T_{TYk} &= 0.5\ (1.4 \le kT_s < 1.9)\ ,\ = 0.0\ (\mathrm{otherwise}) \\
T_{TZk} &= 0.5\ (1.8 \le kT_s < 2.3)\ ,\ = 0.0\ (\mathrm{otherwise})
\end{aligned}
$$

のように定めて運動させる．

実験結果

X軸方向 (図 4.9)，Y軸方向 (図 4.10)，Z軸方向 (図 4.11) の相対位置の推定誤差 (左) と対象速度の推定誤差 (右) を実線で示す．参考として拡張カルマンフィルタを使用した場合を点線で表す．

4.2.4 シミュレーションの考察

ここまでにおこなった 2 次元の場合やステレオ視の実験結果同様，対象の加速度が，最大になる時刻において，位置と速度の推定誤差が大きく現われている．また，対象の速度がある区間においても，良好な性能が示せた．拡張フィルタ同士の比較において，加速度

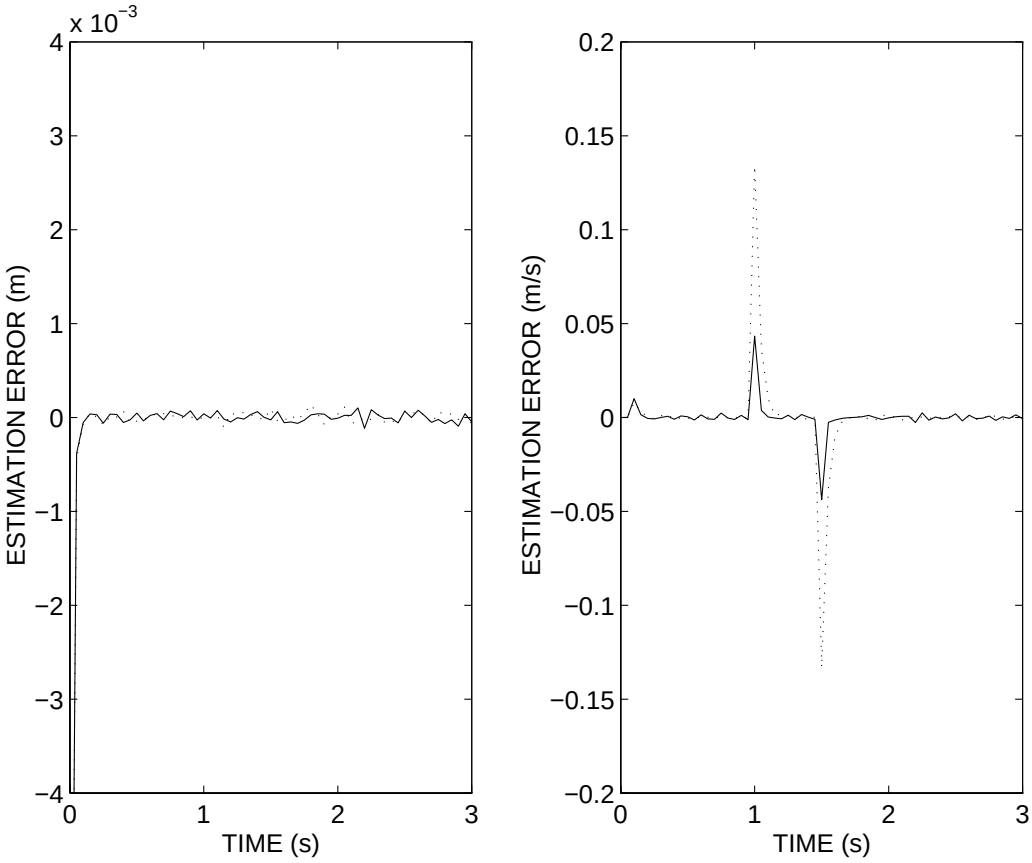


図 4.9: X 軸方向の相対位置/速度の推定誤差

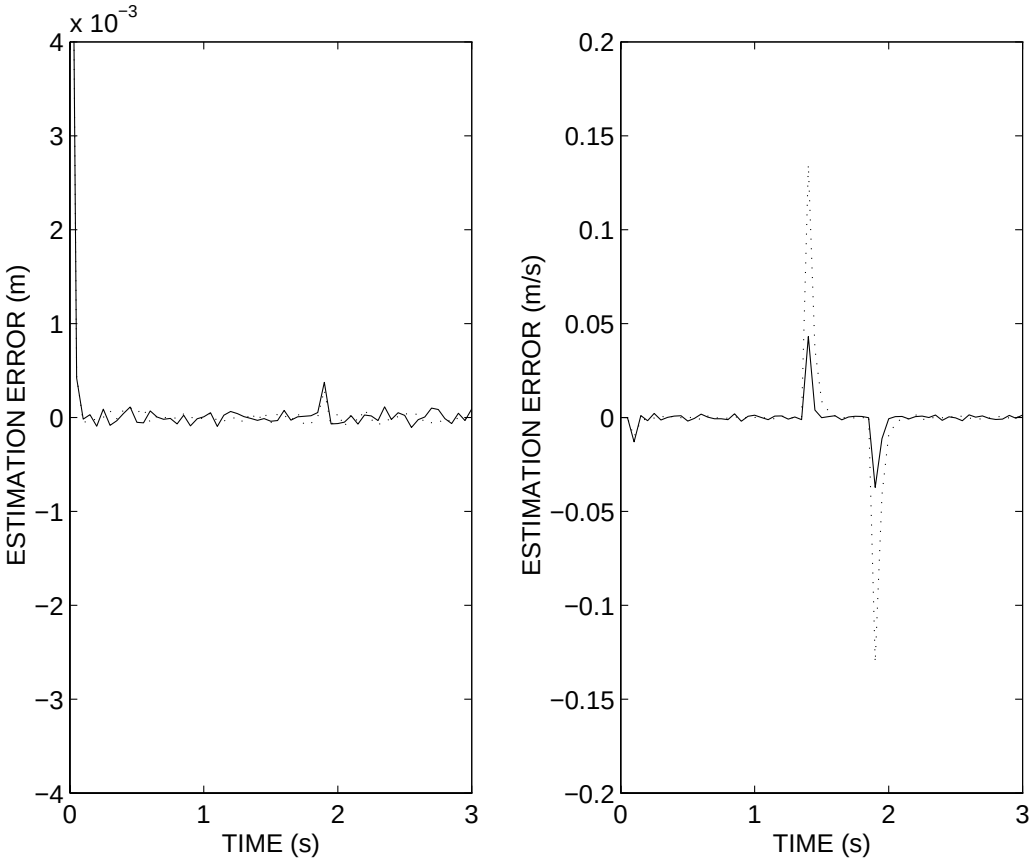


図 4.10: Y 軸方向の相対位置/速度の推定誤差

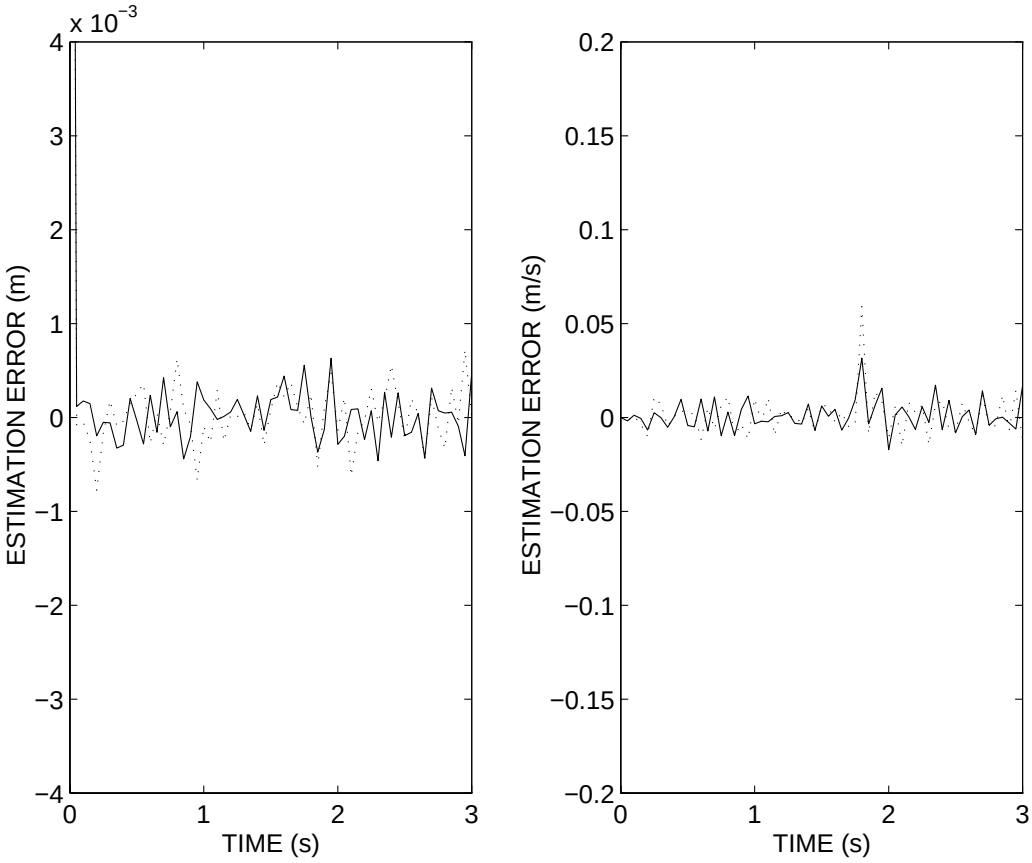


図 4.11: Z 軸方向の相対位置/速度の推定誤差

の無い場合には，誤差は収束しており，対象が大きく加速度をもつ時点では，拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いた場合の方が誤差の最大値が小さくなっている．この結果からも，拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの有用性が考察できる．

ステレオ視の場合にも述べたが，この拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタが，線形時変のフィルタを基盤にしていることからもわかるように，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの存在性の問題が挙げられる．設計パラメータ $gamma$ をある程度，フィルタが存在するように設定したが，このシミュレーションに加えられた疑似的な外乱の影響や状態の変化によって，推定値が発散してしまう現象がおきた．設計時に注意すべき問題点であり，今後の拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの実用的研究としては，実験前のシミュレーションや解析によるγの良い設定方法が望まれる．

4.3 考察

この章では，ステレオ視による視覚サーボにおいて，カメラ視線方向の制御を考えた．ここでは，従来マニピュレータを用いた作業に必要とされる手先の相対位置制御について考え，目標相対位置を含む形での出力レギュレーションを適用した．さらに，時変システムとしてモデルが表現されることから，時変システムに対するフィルタを適用し，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いる手法の有用性について考察した，対象の運動を等速円運動として，加速度を見積もり，このときのエラーを観測した．結果として，外乱に対してロバストなフィルタを用いた場合の有用性が，対象の運動変化に対して確認された．ただし，前章の定常の場合に比べ，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタの実システムの適用には，フィルタの設計パラメータγの決定に問題点が挙げられた．

また，単眼視の 3 次元視覚サーボについて，非線形モデルに対するフィルタの適用を考えた．ここでは提案された拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用い，シミュレーションの結果を得た．従来までに多くのアプリケーションに用いられてきた拡張カルマンフィルタに変わりうる可能性は示せたが，時変フィルタを用いた場合と同様，γについての問題点がうかがえる．拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いる場合は，特に状態が次のフィルタの存在性にかかわるために，問題となった．フィルタが存在しなくなった場合には，不安定になる場合があることが確認されており，実験では，実験中の時間内で必ず存在するようにする必要がある[1]．

時変や拡張カルマンフィルタが応用されている実例として，宇宙システム応用や地震波

[1] γを 0 近づけると，アルゴリズム上ではカルマンフィルタに近くなる．

データ処理，画像処理や大気環境システムなどが挙げられる．したがって，この提案による今後の応用への期待ができる．開ループ的に用いる場合には，大きな問題は起こらないが，本論文のように閉ループ系内にフィルタを適用し，リアルタイムな処理を行う場合にはこのフィルタの存在性は問題となり，今後の研究課題として挙げられる．

第 5 章

結論

本論文では，観測時における外乱や対象の運動の変化に対してロバストな視覚サーボシステムの設計について論じた．作業の実現と言う立場から位置ベース法に基づく視覚サーボシステムのモデル化をおこない，この中で重要とされている推定問題に着目した．従来，モデルの外乱に白色外乱を仮定して適用されていたカルマンフィルタに対して，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いることによって視覚サーボのロバスト化の実現を試みた．

以下に本研究で得られた結果を総括する．

(1) 移動対象追従のための視覚サーボにおいて，最も基本的な視覚サーボに対するこの手法の有用性を考察した．すなわち，アインハンド構造の視覚サーボシステムにおける平面上を動く対象におけるカメラの追従問題を考えた．このモデルは，線形の時不変なシステムとして記述でき，出力レギュレーションの推定器として定常 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを適用した．実験においては，設計で重要とされる外乱をいかに見積もるかが性能を決定する要素となった．また，対象の動きの変動は，視覚サーボシステムにおいて未知であり，これが大きく変化する場合において，精度の悪化がみられるため，この変動に対する設計と実験が行われた．その結果として，カメラと対象の相対位置精度を観測し，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタとカルマンフィルタとの比較において，移動する対象の速度変化に対する性能の改善を確認した．

(2) 3 次元ロバスト視覚サーボの設計では，たとえばベルトコンベア上で移動する作業対象に対する位置決めタスクのようにリアルタイムに指令された相対位置に対してツールやカメラをコントロールすることを考えた．このモデルでは対象に接近すること

を可能とするため，第 3 章で行った視覚サーボに対して 3 次元の運動への拡張をおこなった．カメラ視線方向の観測では，ステレオ視を用いたが，非線形となるモデルを 1 次近似した時変システムとしてモデリングした．時変システムのモデルに出力レギュレーションを適用し，時変の $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いて設計した．この性能の考察においても，対象の運動の変化について着目し，ロバストな推定則を用いた場合の手法での有用性が示された．

(3) 第 2 章で提案された非線形システムに対する拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの応用として，単眼視での 3 次元視覚サーボのモデルに適用し，シミュレーションを行った．拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを用いる手法での性能改善と，拡張カルマンフィルタを利用した多くのアプリケーションへ適用できる可能性を示した．

(4) フィルタの適用に関する利点と問題点として以下にまとめる．

- 外乱を過大に見積もった場合，微小振動が現れており，モデルの正確さと設計パラメータの決定に留意しなければならないことが浮き彫りになった．本論文の視覚サーボのモデルでは，相対速度の変化，対象の速度の変化，画像処理装置の観測時におけるノイズが外乱として選ばれている．外乱に物理的な意味をもたせてモデル化することによって，設計をある程度，解析的にすすめることができる．実システムへの応用において，ロバストな推定器を適用する場合,「どのような精度を欲するのか」に対して「どのように外乱を見積もるか」が重要な鍵となる．
- $\mathcal{H}_\infty$ フィルタのアルゴリズムは，カルマンフィルタのアルゴリズムに酷似しており，従来カルマンフィルタを用いてきた様々なシステムに対して，$\mathcal{H}_\infty$ フィルタが適用できる．外乱に対するロバストなシステムを構築設計する場合，有効となる．
- 本研究でのフィルタは，出力レギュレーションの状態の推定器として利用されている．このようにフィードバック中にフィルタを用いられる場合，オフラインや信号処理では生じない問題点が挙げられた．定常フィルタを用いる場合では，オフラインでフィルタゲインを計算して実行できるので，この問題は回避できる．しかし，時変や拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタは，時間更新となり，リカッチ方程式の解が正定で無くなる場合，存在しなくなる．実システムではこの情報をフィード

バックすることはできず，停止を余儀なくされる．実験における視覚サーボにおいては動き範囲や設計パラメータγのシミュレーションによる決定によってこの問題を解決した．このことは，様々なアプリケーションに時変や拡張 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタを応用する際に，注意すべき点であるといえる．

(5) 本論文では，推定器を，外乱に対してロバスト化することによって，視覚サーボの性能の向上がみられることを示した．この手法では，対象の位置，姿勢，速度が推定されることから，この情報を利用した視覚サーボのより複雑なタスクの達成が期待できる．

謝辞

本研究を終えるにあたり、2 年間に渡って暖かい御指導と御支援を賜わりました藤田政之助教授に深く感謝の意を表します．本研究を遂行していく上で参考になる御意見、御指導、御支援を賜わりました主指導教官の示村悦二郎教授厚く感謝の意を表します．また，審査会にご出席頂き，有益な御意見，御教示を頂きました松澤照男教授に深く感謝申し上げます．審査会にご出席頂き，有益な御意見、御支援を賜わりました早稲田大学理工学部の内田健康教授に厚く感謝の意を表します．サブテーマにおいて御指導を賜わり，審査会にご出席頂き，有益な御意見を頂きました阿部亨助教授に深く感謝申し上げます．

さらに、本研究室におきまして、研究を行なう上でも、日常生活におきましてもいろいろとお世話になりました増淵泉助手，金沢大学の滑川徹助手，本学 D3 の望山洋氏，そして，本研究のフィルタ理論について貴重な御意見を頂きました丸山章氏，また，示村藤田研究室の皆様方に深く感謝の気持ちを表したいと思います．

参考文献

[1] Y. Shirai and H. Inoue : "Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks ",*Pattern Recognition* , vol. 5, pp. 99–108, (1973).

[2] K. Hashimoto, Ed.: *Visual Servoing*, World Scientific, (1993)

[3] S. Huctchinson, G. D. Hager and P. I. Corke : "A Tutorial on Visual Servo Control ", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no.5, pp. 651–670, (1996)

[4] W. J. Wilson, C. C. W. Hulls and G. S. Bell, "Relative End-Effector Control Using Cartesian Position Based Visual Servoing", *Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, No.5, pp. 684–696, (1996)

[5] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine and H. Kimura, "Manipulator Control with Image-Based Visual Servo", *Proc. of Conf. on Robotics and Automation*, pp.2267–2272, (1991)

[6] 細田, 浅田 : 構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, pp. 313–319, (1996)

[7] B. J. Nelson, N. P. Papanikoropoulos and P. K. Khosla, "Robotic Visual Servoing and Robotic Assembly Tasks", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 3, No. 2, pp 23–31, (1996).

[8] 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, pp. 659–665, (1994)

[9] 辻 三郎 : 専門講座:ロボットと画像処理 (I)–ロボットの行動と観測, 電気学会論文集 C, Vol. 114-C, pp. 1232–1237, (1994)

[10] 辻 三郎 : 専門講座:ロボットと画像処理 (II)–3 次元ビジョン, 電気学会論文集 C, Vol. 115-C, pp. 940–946, (1995)

[11] 辻 三郎 : 専門講座:ロボットと画像処理 (III)–視覚制御, 電気学会論文集 C, Vol. 116-C, pp. 133–139, (1996)

[12] P. I. Corke : *Visual Control of Robots – high-perfomance visual servoing*, Research Studies Press, (1996)

[13] R. Kelly : "Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no.5, pp. 759–766, (1996)

[14] H. Michel and P. River, "Singularities in the Determination of the Situation of a Robot Efferctor from the Persptive View 3 Point", *INRIA Techinal Report N-1850*, (1993)

[15] K. Hashimoto, A. Aoki and T. Noritsugu, "Visual Servoing with Redundant Features", *Conf. on Decision and Control*, pp. 2482–2483, (1996)

[16] K. Hashimoto and T. Noritsugu, "Modeling and Control of Robotic Yoyo with Visual Feedback", *Proc. of Conf. on Robotics and Automation*, pp.2650–2655, (1996)

[17] 橋本, 井上, 木村 : ビジュアルサーボイング– 非線形制御アプローチ –, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, pp. 263–269, (1995)

[18] 橋本, 海老根, 木村 : ビジュアルサーボイング– 非線形オブザーバアプローチ –, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, pp. 986–993, (1995)

[19] P. K. Allen and B, Yoshimi : "Automated Tracking and Grasping of a Moving Object with a Robotic Hand-Eye System", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no.2, pp. 152–165, (1993)

[20] A. Blake and A. Yuille, Eds. : *Active Vision*, MIT Press, (1993)

[21] O. D. Faugeras and M. Hebert : "The Representation, Recognition, and Locating of 3–D Objects", *Int. J. of Robotics Research*, vol. 5, no. 3, pp. 27–52, (1986)

[22] L. Matthies, T. Kanade and R.Szelski : "Kalman Filter-Based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences", *Int. J. of Computer Vision*, vol. 3, pp 209–236, (1989)

[23] 有本 卓 : カルマンフィルタ, 産業図書, (1977)

[24] B. D. O. Anderson and J. B. Moore : *Optimal Filtering* , pp. 193–222, (1979)

[25] 片山 徹 : 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, (1983)

[26] H. W. Sorenson ed. : *Kalman Filtering : Theory and Application*, IEEE Press, (1985)

[27] 砂原善文 編 : 確率システム理論 III 応用編, 朝倉出版, (1992)

[28] K. M. Nagpal and P. P. Khargonekar, "Filtering and Smoothing in an H^∞ Setting", *Trans. on Automatic Control*, vol. 34, No.2, pp. 152–166, (1991)

[29] O. A. Sebakhy and W.M. Wonham : "A Design Procedure for Multivariable Regulators", *J. Automatica*, vol. 12, pp. 467–478, (1976)

[30] U. Shaked and Y. Theoder : "H_∞-Optimal Estimation : A Tutorial", *Proc. of the 31st IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 2278–2286, (1992)

[31] M. Fujita, A. Maruyama, and T. Taniguchi and K. Uchida, "Finite Horizon Discreate-Time $\mathcal{H}_\infty$ Filter with Apprication to an Active Vision System", *Proc. of the 31st Conf. on Decision and Control*, pp. 2194–2196, (1993)

[32] N. P. Papanikolopolus, P. K. Khosla and T. K. Kanade : "Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounted on a Robot: A Combination of Control and Vision", *Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, No.1, pp. 14–35, (1993).

[33] 松村, 藤田, 畠 : 「動的出力フィードバックによる磁気軸受システムの出力レギュレーション」, 電学論 D, 112, 10, pp. 977–983, (1992)

[34] A. Kawabata, A. Maruyama and M. Fujita : "Robotic Visual Tracking Based on $\mathcal{H}_\infty$ Filtering Theory", *Proc. First Asian Control Conference*, vol. 1, pp. 285–288, (1994).

[35] 藤田, 丸山, 川端, 内田 : 離散時間線形時変システムに対する H_∞ フィルタとその視覚追従システムへの応用, 計測自動制御学会論文集, vol. 31, no. 8, pp. 1047–1053, (1995)

[36] J.J.Craig : *Introduction to Robotics*, Addisons Wesley, (1986)

[37] 金谷 健一 : 画像理解, 森北出版, pp.116–122, (1990)

[38] B. K. P. Horn : *Robot Vision*, McGraw-Hill, (1986)

本研究に関する発表論文

1. 川端昭弘，藤田政之：$\mathcal{H}_\infty$フィルタを用いた内部安定な出力レギュレーション制御– 視覚サーボシステムによる実験的考察 –, 電気学会論文集 C, Vol 117-C, pp. 1879–1886, 1997.

2. 藤田政之，丸山章，川端昭弘，内田健康：離散時間 $\mathcal{H}_\infty$ フィルタの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.

3. A. Kawabata and M. Fujita : Design of $\mathcal{H}_\infty$ Filter Based Robust Visual Servoing System, *Control Engineering Practice* (accepted).

国際会議

4. A. Kawabata, A. Maruyama and M. Fujita : Robotic Visual Tracking Based on $\mathcal{H}_\infty$ Filtering Theory, *Proc. of 1st Asian Control Conference*, pp. 285–288, Tokyo, Japan, 1994.

5. M. Fujita, A. Kawabata，E. Shimemura and G. Schmidt：Experimental Verification of $\mathcal{H}_\infty$ Filter for Robust Visual Tracking, *Proc. of 13th World Congress International Federation of Automatic Control*, pp. 191–196, San Fransisco, USA, 1996.

国内発表

6. 藤田政之，川端昭弘，丸山章：アクティブビジョンにおける$\mathcal{H}_\infty$フィルタの応用，計測自動制御学会 第 19 回システムシンポジウム/ 第 18 回知能システムシンポジウム合同シンポジウム講演論文集, pp. 301–304, 1993.

7. 川端昭弘，藤田政之：$\mathcal{H}_\infty$フィルタを用いたビジュアルサーボのモデル化と実験的検証，第 12 回 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 339–340, 1994.

8. 藤田政之，石河浩一，川端昭弘：両眼立体視を用いた 3-D ビジュアルサーボにおける実験的検証，第 5 回ロボットシンポジウム予稿集，pp. 195–199, 1995.

9. 川端昭弘，藤田政之：拡張$\mathcal{H}_\infty$フィルタのアルゴリズムとその視覚追従問題への応用，第 1 回ロボティクスシンポジア予稿集，pp. 69–74, 1996.