

電子透かし向け 空間同期ずれ補正の研究

片 山 淳

博士（情報学）

総合研究大学院大学
複合科学研究科
情報学専攻

平成 21 年度
(2009)

電子透かし向け 空間同期ずれ補正の研究

片 山 淳

博士（情報学）

総合研究大学院大学
複合科学研究科
情報学専攻

平成 21 年度
(2009)

2009 年 9 月

本論文は総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻に
博士（情報学）授与の要件として提出した博士論文である。

審査委員：

主査	曽根原 登 教授	国立情報学研究所 / 総合研究大学院大学
	越前 功 准教授	国立情報学研究所 / 総合研究大学院大学
	計 宇生 准教授	国立情報学研究所 / 総合研究大学院大学
	佐藤 真一 教授	国立情報学研究所 / 総合研究大学院大学
	東倉 洋一 副所長	国立情報学研究所 / 総合研究大学院大学
	安田 浩 教授	東京電機大学

（主査以外はアルファベット順）

A Study for Spatial Synchronous Difference Revision Technology for the Digital Watermark Detection

Atsushi Katayama

DOCTOR OF
PHILOSOPHY

Department of Informatics
School of Multidisciplinary Sciences
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

September 2009

A dissertation submitted to
the Department of Informatics,
School of Multidisciplinary Sciences,
The Graduated University for Advanced Studies (SOKENDAI)
in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Advisory Committee:

Prof. Noboru Sonehara (Chair)	National Institute of Informatics/ The Graduated University for Advanced Studies
Assoc.Prof. Isao Echizen	National Institute of Informatics/ The Graduated University for Advanced Studies
Assoc.Prof. Ji Yusheng	National Institute of Informatics/ The Graduated University for Advanced Studies
Prof. Shinichi Sato	National Institute of Informatics/ The Graduated University for Advanced Studies
Prof. Yoichi Tokura	National Institute of Informatics/ The Graduated University for Advanced Studies
Prof. Hiroshi Yasuda	Tokyo Denki University

(Alphabet order of last name except chair)

要旨

本研究では電子透かし検出のための空間同期ずれ補正技術のカメラ付携帯電話機上での実現を目的とする。電子透かしは信号キャリアとなるホスト画像に肉眼では感知できないように信号（電子透かし信号）を埋め込み、またホスト画像から埋め込んだ信号を検出する技術である。電子透かしは著作権保護や、アナログメディアとデジタルメディアとの仲介のために用いられることが多く、デジタルホスト画像からだけではなく、アナログホスト画像、すなわち印刷物やディスプレイからの検出を要求される。またアナログメディアとデジタルメディアの仲介として用いる場合は、普及しているパーソナルカメラ端末、すなわちカメラ付携帯電話機上で動作することが、利便性の点から望ましい。アナログホスト画像からの電子透かし検出では、埋め込み時と検出時との間の画像で空間同期ずれが生じるため、検出前にいかに空間同期ずれを補正できるかが重要となる。

既存の電子透かしのための空間同期ずれ補正研究はその補正の難易度により2種に分けられる。1つめは拡大縮小と回転についてのみ補正するもので、本論文ではこれをアフィン変換補正と呼ぶ。2つめは、ホスト画像平面法線と検出カメラレンズの中心軸が平行でない場合を補正するもので、本論文ではこの状態からの補正を平面射影変換補正と呼ぶ。定義から、平面射影変換補正はアフィン変換補正を包含する。アフィン変換補正の既存研究では、電子透かし繰り返しパターンの自己相関を用いる方法とホスト画像の周波数空間にマーカを付与して補正する方法がある。これらはマーカが肉眼では感知できない利点を持つが、アフィン変換補正のみに対応するため、ホスト画像の正面からカメラ撮影しなくてはならないという制約を持つ。一方平面射影変換補正については、ホスト画像の外側にマーカを付与して補正する方法がある。これはホスト画像を正面以外からカメラ撮影してもよいが、マーカが肉眼で見えるため、ホスト画像に見えないように信号を埋め込むという電子透かしの本来の趣旨を損ねている。いずれの方法とも共通しているのは、ホスト画像の内容を利用していない点である。電子透かしの場合はホスト画像の内容を検出側が事前を知ることは困難であるから、ホスト画像の内容を空間同期ずれ補正に利用することは難しい。この点はパターン認識などの他の画像処理とは大きく異なる部分であり、電子透かし特有の制約と言える。電子透かしの用途および既存研究の動向から解決すべき課題は以下のように整理できる。

- 肉眼で感知できるマーカを使用せず、
- ホスト画像の内容を事前に関ることなく、
- カメラ付携帯電話機でリアルタイムに、
- 平面射影変換補正を行う。

本研究ではこれら4つの課題を解決するためにまず”SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)を用いた対応点マッチング補正法”を検討した。検討の結果、SIFTを用いた方法はリアルタイム性に問題があったため、それを解決するために”STA(Side Trace Algorithm)を用いた対応点マッチング補正法”を提案した。

提案した”STA を用いた対応点マッチング補正法”は4つの課題を解決することに成功した。また、2007年に特許として登録され、2009年の現在においてもカメラ付携帯電話機でホスト画像領域をマーカ無しでリアルタイムに検出する世界で唯一の方法である。実用面では以下の用途に採用された。

1. NTT データ株式会社のパッとびサービス
2. NTT コミュニケーションズ株式会社ビルの応接室入退室用認証装置（本装置は2008年度 NTT コミュニケーションズ社長表彰を受賞）
3. NTT R&D フォーラム (2007, 2008) の来場者受付装置

また、以下の研究のためのツールとして利用・引用された。

1. カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式
2. リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし
3. SFPSS 法に基づくリアルタイム検出可能な映像向けモバイル電子透かし
4. カメラ付携帯端末での撮影画像を対象とした劣化耐性のある静止画像識別方式
5. 実書籍に対する仮想情報付加による学習支援の提案
6. 特開 2008-84014, 画像領域検出方法, 富士通

以下、本論文の構成とその概要について示す。

第1章では、本研究の背景を述べ、アナログメディアからの電子透かし検出が、アナログメディアとデジタルメディアとの仲介として有効な手段であることを示す。アナログメディアからの電子透かし検出では、埋め込み時と検出時との間にホスト画像の空間同期ずれが生じ、それを補正することの必要性を示す。空間同期ずれの補正法の従来研究について述べ、従来研究の課題を整理し、本研究が解決すべき4つの課題を導き出す。課題解決のために本論文では2つの提案方法を検討することを示す。

第2章では、本研究が想定する電子透かしアプリケーションの条件について述べ、そこから導き出される目標性能を定める。同時に、ターゲット端末を既存のカメラ付き端末の中で最も処理性能の低いカメラ付き携帯電話機と定める。最も処理性能の低い端末を選ぶ理由は、その端末上で目標処理性能を達成すれば、他のどのような端末でも目標を達成できると言えるからである。次にカメラ付き携帯電話機の処理性能についてベンチマークテストを行い、性能上のボトルネックは画像メモリのアクセスコストであることを示す。ボトルネックの議論は第4章以降で詳細を述べることになる。

第3章では、第1の提案方法である SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) を用いた対応点マッチング補正法（以下 SIFT 法と呼ぶ）について述べる。SIFT を採用するに至った着眼点を述べ、SIFT により4つの課題の内3つが解決可能なことを示す。SIFT 法で解決できない残り1つの課題はリアルタイム性であり、これについてはプロセッサの処理性能の向上を待たねばならないことを述べる。

第4章では、第2の提案方法である STA(Side Trace Algorithm) を用いた対応点マッチング補正法（以下基本 STA 法と呼ぶ）について述べる。基本 STA 法の着眼点が、人が電子透かし検出のためにホスト画像を撮影する場合はカメラフレーム中央にホスト画像を配置する習性であることを述べ、それを利用する

ことにより画像メモリ探索経路を大幅に短縮できることを示す。画像メモリ探索経路の短縮により処理のリアルタイム性が実現可能となり、基本 STA 法は4つの課題が全て解決可能であることを示す。ただし、基本 STA 法は宿主画像の外周エッジのコントラストがはっきりしている場合にのみ性能を発揮できることが示唆される。

第5章では、枠付与型 STA 法について述べる。本方法は基本 STA 法の弱点である宿主画像外周エッジのコントラストがはっきりしていない場合を救済するために、宿主画像外周に枠を付与するものである。枠を付与したことにより、基本 STA 法に比べ処理時間が約1割増加する代わりに、基本 STA 法の弱点が克服できることを実験結果により示す。また、枠付与は、どのようなマーカ付与に比べても処理コストが小さいことを定量的に示す。

第6章では、枠を付与することなしに、枠付与型 STA 法と同等の性能を出せるロバスト型 STA 法について述べる。前章では、基本 STA 法では認識が難しい外周エッジのはっきりしない宿主画像領域の検出に枠を付加することで対応した。枠を付加する事は宿主画像の内容・用途によっては宿主画像の美観を損ねる場合がある。そのため、外周エッジのはっきりしない画像に対しても外周エッジによって画像領域を検出できることが実用上は望ましい。本章では基本 STA 法に改良を加え、エッジ検出閾値を非常に小さくすることでコントラストの小さい外周エッジも漏れなく検出し、検出後に正しい外周エッジを選出する方針により、外周エッジのはっきりしない画像に対しても正しく宿主画像領域を検出するロバスト型 STA 法について述べる。ロバスト型 STA 法は枠付与型 STA 法に匹敵する特徴点検出成功率を実現できることを示す。また実験により、本方法は SIFT、ハフ変換よりも高い特徴点検出精度であることを示す。

第7章では、ロバスト型 STA 法の動画像への適用について述べる。動画像では、動画像表示装置の筐体外周が四辺形のため、筐体外周の四辺形を宿主画像外周の四辺形と誤認識する問題があることを述べる。この問題を宿主画像外周の四辺形を時間軸方向で同定する追跡により解決できることを示す。追跡に用いる画像特徴量には何が良いかについて検討し、四辺比と周囲長を用いることを述べる。実験によりこれらの画像特徴量が動画像内の四辺形追跡に有効であることを示す。

第8章では、基本 STA 法の円形状への適用について述べる。基本 STA 法の外周エッジを探索するという基本動作は、容易に円形状検出に応用できることを述べ、円形状を検出するハフ変換に比べ、円形状用 STA が1万倍高速であることを示す。

第9章では基本 STA 法、枠付与型 STA 法、ロバスト型 STA 法、および動画像対応 STA 法が実用サービスに用いられていることを紹介する。また、学術面では電子透かし論文からだけでなく、画像識別論文からも引用・利用されていることを紹介する。

最後に第10章で本論文の成果をまとめた。提案した STA 法は、画像を全てアクセスすることなく処理を完了する画像処理の新たなパラダイムを用いて、空間同期ずれ補正技術の4課題「肉眼で感知できるマーカを使用せず、宿主画像の内容を事前に知ることなく、携帯にてリアルタイムに、平面射影変換補正を行う」の同時解決を可能としたことが本論文の成果である。

Abstract

In this research, it has a purpose of the realization on the handheld unit of the spatial synchronous difference revision technology for the digital watermark detection. The digital watermark is the technology by which a signal (The digital watermark signal) is embedded so as not for the host image which becomes a signal carrier to be able to sense at the naked eye. Also, it is the technology which detects a signal in the embedded host image.

The digital watermark is being often used for the copyright protection and the agency of the analog media and the digital media and its sometimes requiring detection in the analog host image, i.e. printed matter and the display. The digital watermark detection from the analog host image, because a spatial synchronous difference is caused by the image between the time of the embedding and the time of the detection, how it is possible to revise a spatial synchronous difference before detection becomes important.

A spatial synchronous difference revision research for existing digital watermark is divided into two kinds by the degree of difficulty of the revision. The first revises only about the scaling and the rotation and in this paper, this is called affine-transformation revision. The second revises the case which the host image plane normal and the center axis of the detection camera lens aren't parallel to and in this paper, revision from this condition is called plane projective-transformation revision. The plane projective-transformation revision includes affine-transformation revision from the definition. There are a way of using the auto-correlation of the digital watermark repeat pattern and a way of revising a marker by giving it to the frequency space of the host image in the existence research of the affine-transformation revision. Because the marker can not be sensed at the naked eye but supports only affine-transformation revision, these have the agreement that the camera must be taken from the front of the host image the photograph. On the other hand, there is a way of revising a marker by giving it outside the host image therefore to revise a plane projective-transformation. Because it is permitted to take a host image the photograph with the camera from the thing except the front but the marker can be seen by the naked eye, this ruins the original point of the digital watermark that a signal is embedded so as not to seem a host image. It is to the point which isn't using the contents of the host image that which way is common together. Because it is difficult to know the contents of the host image when the side of the detection is preliminary in case of the digital watermark, it is difficult to use the contents of the host image for the spatial synchronous difference revision. At this point, it is the part which is different from the other image processing such as the pattern recognition roughly and it is possible to say the constraint which is peculiar to the digital watermark. The problem which it should solve from the trend of the existence research can be organized as follows:

- It doesn't use the marker which can be sensed with the naked eye.
- Without knowing the contents of the host image beforehand
- It is real-time.
- It revises a plane projective-transformation.

In this research, it reviewed to have used "SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) to solve congruent points matching correction method to solve these four problems". As for the way of using SIFT, because there was a problem in the real-time, it proposed to have used "STA (Side Trace Algorithm) to solve congruent points matching correction method".

To have used proposed "STA congruent points matching technique" were subscribed as the patent in 2007. In the present in 2009, because it was the only way in the world to detect the host image with the cell phone terminal, not being in the marker and being real-time, it was used for the following use:

1. It services "Pattobi" in NTT Data Inc..
2. The authentication equipment for the reception office entrance and exit at NTT communications Inc. building (This equipment wins NTT communications president awarding in 2008).
3. The visitor reception equipment of NTT R&D forum (2007, 2008).

Hereinafter, it is shown about the composition and the overview of the this paper.

In the first chapter, it describes the background of this research and shows that digital watermark detection in the analog media is used as the agency of the analog media and the digital media. In the digital watermark detection in the analog media, the spatial synchronous difference of the host image occurs between the time of the embedding and the time of the detection and shows the necessity of revising it. Some researches in the past of the correction method of the spatial synchronous difference are described, it organizes problems of researches in the past and the derivation of four problems which this research should solve. It shows two proposal ways to solve these problems.

In the second chapter, it shows the digital watermark application which this research assumes and specifies the goal performance of this research with derivation from there. At the same time, it specifies that the target terminal is a camera-equipped mobile phone with the lowest performance in existing terminal with the camera. It is possible to say that what other terminal can achieve goal performance when the lowest performance terminal achieved goal performance. Next, it did a bench-mark-test about the performance of the camera-equipped mobile phone and it shows that the bottleneck in case of performance is the access cost of the image memory. As for the discussion of the bottleneck, details are described of chapter 4 since then.

In the third chapter, it described congruent matching correction method using SIFT. The viewpoint which resulted to adopt SIFT is described and it is possible to solve out three of four problems with

SIFT. By the SIFT, the problem of one piece of the remainder which can not be solved is real time, and the improvement of the performance of the processor must be waited for.

In the fourth chapter, it described that it used STA which is the proposal way congruent matching correction method. The viewpoint of the basic STA is described and four problems show the thing where all can be solved by the basic STA. But, by the experiment, when the contrast of the peripheral edge of the host image isn't being cleared, the basic STA shows that the performance doesn't resemble sufficiently out.

In the fifth chapter, a frame use type STA is described. This way gives a frame to the host image periphery to relieve the case where the contrast of the host image periphery edge which is the defect of the basic STA isn't being cleared. It shows that the defect of the basic STA can be conquered instead of that the operation time compared with the basic STA increases by about 10 percent by giving a frame by the experimental result. Also, a thing with small processing cost is quantitatively shown to whatever marker assignment it compares a frame assignment.

In the sixth chapter, the robust type STA which can let out the performance which is equal to the frame use type STA without giving a frame is described. In the preceding chapter, it supported in recognition's adding a frame to the detection of the host image area with the difficult peripheral edge which isn't cleared in the basic STA. To add a frame sometimes damages the beauty of the host image depending on the contents and the use of the host image. Therefore, in case of practical use, it is desirable that the image area can be detected by the peripheral edge to the image of the peripheral edge which isn't cleared, too. In this chapter, it adds improvement to the basic STA and the robust type STA which detects a host image area right to the image of the peripheral edge which isn't cleared, too, is described. By the experiment, this way shows to have the detection performance which is equal to the frame use type STA.

In the seventh chapter, an application to the movie of the robust type STA. At the movie, because the box periphery of the movie display is a quadrangle, it describes that there are a quadrangle of the host image periphery and a problem to falsely recognize in the quadrangle of the box periphery. The thing which the chase to identify a quadrangle in the movie in the direction of the temporal axes can solve is shown in this problem. It describes that it reviews what is good for the image characteristics quantity to use for the chase and that it uses an all sides ratio and a length around. This image characteristics quantity shows a valid thing by the experiment to chase a quadrangle in the movie.

In the eighth chapter, an application to the circularity of the basic STA is described. As for the basic STA, it describes that it is possible to use for circular detection easily and STA for being circular shows a high-speed thing in ten thousand times compared with Haugh transform which detects circularity by the experiment.

In the ninth chapter, it introduces that a basic STA, a frame assignment type STA, a robust type STA and a movie compatible STA are used for the practical use service. Also, it introduces to be quoted from the image identifying paper, too, in addition to the digital watermark paper, being academic.

It organizes about the problem to have gathered the result of this research last in chapter 10 and to have been left and it makes the summary of this paper.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	関連研究	1
1.3	解決すべき課題と解決方法	2
第 2 章	目標性能	4
2.1	想定アプリケーションと目標処理時間	4
2.2	ターゲット端末	4
2.3	カメラ付携帯電話機の計算性能	4
2.4	目標精度	5
第 3 章	SIFT を用いた対応点マッチング補正法	6
3.1	着眼点 (アイディア)	6
3.2	SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) とは [12]	6
3.3	SIFT を用いた対応点抽出	6
3.4	変換行列の推定	8
3.5	変換行列から平面の傾きの推定	9
3.6	ホスト画像の傾き補正	10
3.7	SIFT を用いた補正法の考察	10
3.7.1	プロセッサパワーとムーアの法則の考察	11
3.8	本章のまとめ	12
第 4 章	STA を用いた対応点マッチング補正法	13
4.1	着眼点 (アイディア)	13
4.2	従来手法によるコーナ点検出	13
4.3	画像メモリアクセスコストの検討	14
4.4	画像メモリアクセス間引きと探索精度のトレードオフ	15
4.5	基本 STA 法	16
4.5.1	基本 STA 法の着眼点	16
4.5.2	辺検出	18
4.5.3	処理量	19
4.5.4	辺閾値動的推定	19
4.5.5	高速化のための粗探索	20

4.5.6	高速化のための方向制約	20
4.5.7	ノイズ排除	21
4.5.8	実験と結果	22
4.5.9	平面射影変換パラメータ推定	23
4.5.10	逆射影変換	24
4.6	本章のまとめ	25
第5章	枠利用型 STA 法	26
5.1	枠導入の必要性	26
5.2	枠利用型 STA 法の処理量	27
5.3	枠幅推定	27
5.4	閾値動的推定	29
5.5	高速化とノイズ排除	29
5.6	パターンマッチング(マーカ探索)との比較	29
5.6.1	マーカ探索の処理量	29
5.6.2	枠利用型 STA 法とマーカ探索との処理量比較	30
5.7	実験と結果	30
5.7.1	探索成功率	30
5.7.2	処理時間	30
5.7.3	コーナ検出失敗の考察	32
5.8	枠付与の是非	32
5.9	本章のまとめ	33
第6章	ロバスト型 STA 法	34
6.1	基本 STA 法の弱点克服の必要性	34
6.2	辺検出失敗の特徴	34
6.3	改良方針	35
6.4	評価項目	35
6.4.1	端点位置評価	35
6.4.2	辺接続関係評価	35
6.4.3	コーナ形状評価	35
6.4.4	面積評価	36
6.4.5	総合評価関数	36
6.5	実験と結果	37
6.6	精度	38
6.6.1	従来方式との精度比較実験と結果	38
6.6.2	画像の違いによる精度への影響	39
6.6.3	平面射影変換パラメータの違いによる精度への影響	39

6.7 本章のまとめ	40
第 7 章 ロバスト型 STA 法の動画への適用	41
7.1 動画適用上の問題点	41
7.2 最初の 1 フレーム内からのホスト画像領域検出	41
7.3 次フレーム以降のホスト画像領域検出	42
7.4 実験と評価	43
7.4.1 実験条件	43
7.4.2 処理時間と参照画素数	43
7.4.3 四辺形検出の精度	45
7.4.4 四辺形追跡性能	45
7.5 本章のまとめ	47
第 8 章 基本 STA 法の円形状への応用	48
第 9 章 STA の実用サービス, 学術研究への貢献	50
9.1 実用サービスへの貢献	50
9.2 将来の応用可能性	51
9.3 学術研究への貢献	51
第 10 章 結論	54
謝辞	56
参考文献	57
著者発表論文	59

目次

1.1	アナログメディアとデジタルメディアの仲介例	1
1.2	電子透かし検出前処理としての空間同期ずれ補正	2
3.1	SIFT を用いた特徴点検出例 1	7
3.2	SIFT を用いた特徴点検出例 2	7
3.3	SIFT を用いた対応点抽出例	8
4.1	新たな画像処理パラダイム	15
4.2	間引きアクセス	16
4.3	間引き幅 $T/2$ の間引きアクセス	17
4.4	二等分線	17
4.5	辺探索経路	18
4.6	フィルタオペレータ行列	19
4.7	元画像 (左) と辺探索結果 (右)	20
4.8	元画像 (左) と辺探索結果 (右)	22
4.9	実験撮影画像サンプル	23
5.1	枠デザイン	26
5.2	元画像 (左) と枠探索結果 (右)	28
5.3	枠幅推定	28
5.4	実験用サンプル画像	31
5.5	検出失敗画像	32
6.1	辺検出失敗画像	34
6.2	端点位置評価	35
6.3	辺接続関係評価	36
6.4	コーナ形状評価	36
6.5	面積評価	36
6.6	辺候補検出例	37
6.7	辺検出フィルタの縮小	37
6.8	元画像 (左) 平面射影変換画像 (右)	38
6.9	STA と従来方式の性能比較	39
6.10	lena, cameraman, airplane	39

7.1	辺探索経路（上左） 検出した辺候補（上右） 辺組み合わせによる四辺形評価値（下）	42
7.2	想定されるカメラの動き	43
7.3	アクセス画素数と STA の線分検出時間	44
7.4	PC 画面上のメディアプレイヤー（左） プラズマディスプレイ（右）	44
7.5	検出座標ずれ量の平均値と標準偏差	45
7.6	撮影サンプル（左） 4 辺比の変化（右上） 周囲長の変化（右下）	46
8.1	円形状検出の例	48
8.2	円形状探索経路	49
9.1	カメラ付携帯電話機によるディスプレイ表示領域探索の例	50
9.2	認証カード読み取り装置	51
9.3	景観中看板文字認識，外国語翻訳 1	52
9.4	景観中看板文字認識，外国語翻訳 2	52
9.5	カメラ付携帯と街頭ディスプレイを用いたアンケート調査	52
10.1	STA と従来方式の性能比較	54

表 目 次

2.1	計算性能ベンチマーク	4
4.1	従来手法の処理速度	13
4.2	画像メモリアクセス数と処理時間の関係	14
4.3	処理速度比較	21
4.4	コーナ検出成功率	23
4.5	処理時間比較	23
4.6	近似方法比較	24
5.1	枠利用型 STA 法とマーカ探索の処理量比較	30
5.2	枠利用型 STA 法とマーカ探索の処理量正規化後比較	30
5.3	探索成功率	31
5.4	処理時間	31
5.5	インタビュー結果	33
6.1	ロバスト型 STA 法と基本 STA 法のコーナ検出成功率比較	37
6.2	特徴点検出精度	38
6.3	異なる画像の平均誤差	40
6.4	異なる射影変換パラメータでの平均誤差	40

第1章 序論

1.1 研究の背景

本論文での電子透かしは画像電子透かしを対象とする．電子透かしは信号キャリアとなるホスト画像に肉眼では感知できないように信号（電子透かし信号）を埋め込み，その後ホスト画像から埋め込んだ信号を検出する技術である．電子透かしは著作権保護や，アナログメディアとデジタルメディアとの仲介 [1] のため（図 1.1）に用いられることが多く，デジタルのホスト画像からだけではなく，アナログのホスト画像，すなわち印刷物やディスプレイからの検出を要求される場合がある．



図 1.1: アナログメディアとデジタルメディアの仲介例

アナログのホスト画像からの電子透かし検出では，埋め込み時と検出時との間の画像で空間同期ずれが生じるため，検出前にいかに空間同期ずれを補正できるかが重要となる（図 1.2）．本論文では電子透かし検出のための空間同期ずれ補正技術について述べる．

1.2 関連研究

電子透かしのための空間同期ずれ補正はその補正の難易度により 2 種類に分けられる．1 つめは拡大縮小と回転についてのみ補正するもので，本論文ではこれをアフィン変換補正と呼ぶ．画像の切り取り（cropping）への対応についてはアフィン変換補正に含めることとする．2 つめは，ホスト画像平面の法線と検出カメラ

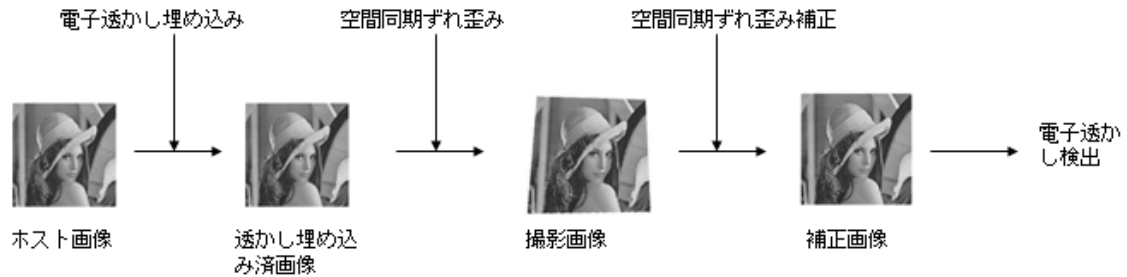


図 1.2: 電子透かし検出前処理としての空間同期ずれ補正

レンズの中心軸が平行でない場合を補正するもので、本論文ではこの状態からの補正を平面射影変換補正と呼ぶ。定義から、平面射影変換補正はアフィン変換補正を包含する。

アフィン変換補正については、電子透かし繰り返しパターンの自己相関を用いて補正する方法 [2] と、ホスト画像の周波数空間のマーカを使って補正する方法 [3] が既存研究として存在する。平面射影変換補正については、ホスト画像の外側のマーカを使って補正する方法 [4] が存在する。アフィン変換補正の 2 つの方法は補正のためのマーカが肉眼では感知できないため、電子透かしの本来の趣旨を損なわないが、ホスト画像の正面からカメラ撮影しなければならないという制約が生じる。平面射影変換補正の方法は、ホスト画像を正面以外からカメラ撮影しても良いが、ホスト画像の外側に肉眼で感知できるマーカを配置しなければならない、見えないように信号を埋め込むという電子透かしの本来の趣旨を損ねている。

既存の 3 つの方法に共通しているのは、ホスト画像の内容を全く利用していない点である。電子透かしの場合はホスト画像の内容を検出側が事前に知ることは困難であるから、ホスト画像の内容を空間同期ずれ補正に利用することは難しい。この点はパターン認識などの他の画像処理とは大きく異なる部分であり、電子透かし特有の制約と言える。

既存研究の [3][4] の方法は、発表当初は小型 PC 上でのみ動作可能であったが、その後一部のカメラ付き携帯電話機にてリアルタイム動作可能のように改良された。電子透かしをアナログメディアとデジタルメディアとの仲介とするサービスは、一般個人向けサービスであるから、カメラ付き端末として最も普及しているカメラ付き携帯電話機での動作が求められている。

1.3 解決すべき課題と解決方法

電子透かしの用途および関連研究の動向から、解決すべき課題は以下のように整理できる。

- 肉眼で検知できるマーカを使用せず、
- ホスト画像の内容を事前に知ることなく、
- カメラ付携帯電話機にてリアルタイムに、
- 平面射影変換補正を行う。

本論文ではこの問題を解決するための2つの方法”SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)を用いた対応点マッチング補正法”および”STA(Side Trace Algorithm)を用いた対応点マッチング補正法”についての検討を述べる。

第2章 目標性能

2.1 想定アプリケーションと目標処理時間

本論文での想定アプリケーションは、電子透かしの埋め込まれた印刷物コンテンツ（書籍やチラシ）や電子透かしの埋め込まれた動画コンテンツ（TV セットや街頭ディスプレイの動画）から、手持ちのカメラ端末にて電子透かしを検出し、コンテンツに関連した情報を手持ち端末へ表示するサービス [1][5] である。

ユーザがトリガとなる操作（電子透かしの場合は撮影操作）を行ってから、結果を得るまでの許容時間は過去の研究 [6] から 2 秒以下（ただし、待ち時間中の表示の工夫により許容時間は増減する）が指標としてあげられている。空間同期ずれ歪みが補正された画像から電子透かしを検出する時間は 1 秒以下 [7] であることから、撮影してから補正手法が画像を補正するまでの目標時間は 1 秒以下とする。

2.2 ターゲット端末

カメラ端末としてはコンパクトデジタルカメラ、カメラ付き携帯電話機、およびカメラ付き PDA (Personal Digital Assistant) を想定する。これらの中から、最も計算能力の小さいカメラ付き携帯電話機の i アプリ処理系 [11] を実装ターゲットとした。最も遅いカメラ付き携帯電話機の i アプリ処理系への実装を成功させれば、自動的にコンパクトデジタルカメラにも、カメラ付き PDA にも実装が可能と言える。

2.3 カメラ付携帯電話機の計算性能

カメラ付き携帯電話機の i アプリ処理系の計算性能ベンチマーク結果を表 2.1 に示す。PC に比べて画像メモリのアクセスコストと除算コストが相対的に大きいことが i アプリ処理系の特徴である。

表 2.1: 計算性能ベンチマーク

端末	A	B	C	P4 2.4GHz PC
画像メモリアクセス	227ns	233ns	783ns	4.7ns
整数加減算	31ns	34ns	85ns	3ns
整数乗算	55ns	57ns	135ns	6ns
整数除算	805ns	753ns	937ns	6ns
整数シフト	43ns	44ns	63ns	6ns
条件分岐	50ns	49ns	87ns	2ns

それ以外の特徴としては、主記憶が小さい(数百KB)が、画像メモリは大きい(1MB超)ため、撮影後の画像メモリ上にある画像データを主記憶に全て転送することはできないことが挙げられる。画像メモリが大きい理由はメーカー間のカメラ解像度競争によるものであり、カメラ付携帯電話機特有の性質である。

2.4 目標精度

補正のための検出特徴点の目標位置精度は、用いる電子透かしの方式およびカメラ撮影による撮影像の拡大縮小に依存する。電子透かし信号の最小埋め込み単位を元ホスト画像のスケールで $A \times A$ 画素と仮定する。これがカメラ撮影により撮影像上のスケールで $B \times B$ 画素になったとする。この場合、空間同期ずれ歪み誤差が $B/2$ 画素を超えると電子透かし検出が困難となることが理論的にも実験的にも知られている [10]。現在全てのカメラ付携帯電話機で唯一動作する静止画向け電子透かし検出システム [7] を用いた場合の $B/2$ の値は約 6 画素である [10]。したがって、目標精度はカメラ座標系にて誤差が 6 画素以下となる。

第3章 SIFTを用いた対応点マッチング補正法

3.1 着眼点 (アイデア)

電子透かしを手持ちカメラ付き携帯電話機で検出しようとする場合、撮影時にカメラを静止させておくことは難しい。カメラを持つ手は無意識に動いてしまう。本補正法はこの動きを有効に利用しようとするものである。原理の概要は以下の通りである。

- 動きが生じている間も撮影を続け、異なる方向から撮影された2枚の撮影ホスト画像を得る。
- SIFT (後述) を用いて2枚の撮影ホスト画像間で対応する特徴点の組を複数個得る。
- 特徴点の座標値を用いて撮影ホスト画像のカメラレンズ軸に対する傾きを推定する。
- 撮影ホスト画像の傾きを補正し、正面から撮影した結果に相当する画像を得る。

3.2 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) とは [12]

Lowe はスケール空間を用いることで、画像のスケール変化や回転に不変な特徴量を記述する Scale-Invariant Feature Transform(SIFT) を提案した [13]。SIFT は、回転・スケール変化等に不変な特徴量を記述できる。SIFT の特徴点は人が与えるのではなく、SIFT を計算するプログラムが自動的に特徴点を抽出する。

3.3 SIFT を用いた対応点抽出

SIFT を用いて画像から特徴点を検出した例を示す。SIFT はひとつの特徴点につき次の値を出力する。

- X,Y 座標
- スケール
- ディレクション
- 128 次元ベクトル

検出した特徴点を画像中に矢印として図示したものを図 3.1 に示す。

同じ画像を別の方向から撮影した画像から検出した特徴点を図 3.2 に示す。

各特徴点の性質は 128 次元ベクトルにて表されている。2枚の画像から対応する、すなわち同じ箇所を表している点の組を見つけるには特徴点の 128 次元ベクトルが似ている 1 組の点を抽出すれば良い。本論文



図 3.1: SIFT を用いた特徴点検出例 1

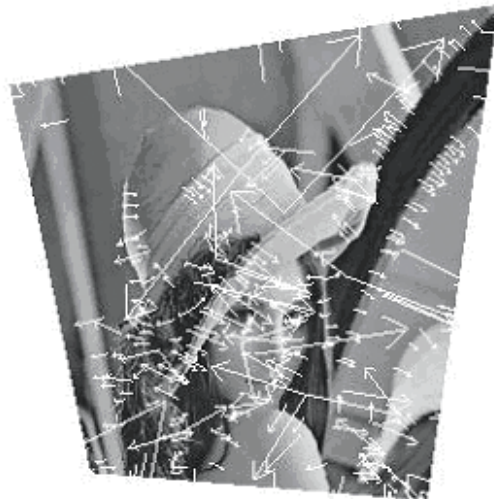


図 3.2: SIFT を用いた特徴点検出例 2

では 128 次元ベクトルを単位ベクトルへ正規化し, 2 つのベクトルの差のノルムが最小となる 2 点を対応する点とした. 対応する点同士を線で結んだものを図 3.3 に示す

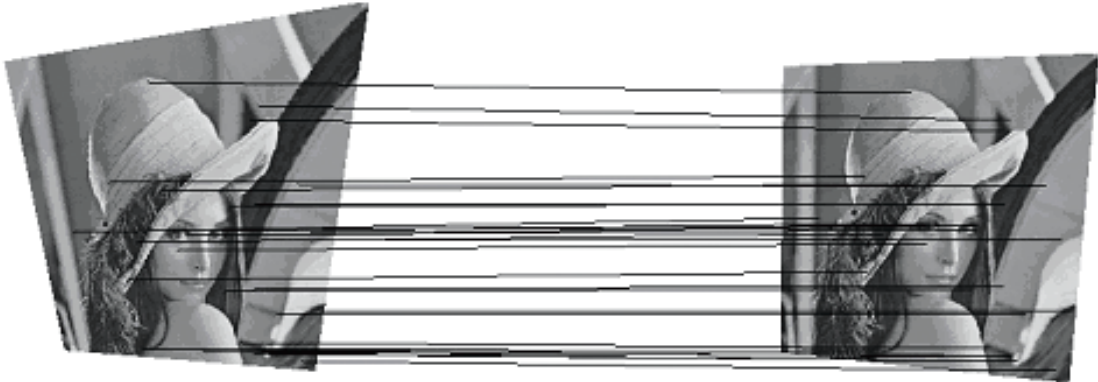


図 3.3: SIFT を用いた対応点抽出例

図 3.3 から対応点が正しく抽出されていることが分かる. SIFT 特徴量は画像のスケール変化と回転に不変であることがその性質であり, 平面射影変換に対しての不変性は必ずしも高くないが, 図 3.3 の 2 枚の画像のように射影変換がカメラを持つ手の動きに由来する程度の微量であればそれらはスケール変化と回転に近似でき, SIFT により対応点を抽出することが可能である.

3.4 変換行列の推定

前節の 2 枚の画像は射影変換の関係にあり, その 3×3 変換行列 T_{ij} は以下の方法で推定できる [14].

変換行列 T_{ij} は実質的には 8 個の未知数からなるから, 原理的には 4 組の点の対応関係から一意に定まる. 以下では L 組 ($L \geq 4$) の対応 $(x_a, y_a), (x'_a, y'_a), a = 1, \dots, L$ が与えられたとき, 変換行列 T_{ij} を計算する方法を考える. 以下では N ベクトル [15] による定式化を考える. 問題は以下のように定義できる.

「単位ベクトルの組 $\{m_a\}, \{m'_a\}, a = 1, \dots, L (L \geq 4)$ が与えられたとき

$$m'_a = N[T^T m_a], a = 1, \dots, L \quad (3.1)$$

なる変換行列 T を求めよ」.

変換行列 T の全ての要素を定数倍しても式 (3.1) は変化しないので,

$$Tr[TT^T] = 3 \quad (3.2)$$

としても一般性を失わない.

式 (3.1) はベクトル $T^T m_a$ が m'_a そのものに近づくことを要求しているのではなく, $T^T m_a$ の方向が m'_a の方向に近づくことを要求している. そこで, その接近の尺度として, $T^T m_a$ の終点から m'_a の定める直線への距離 h_a の 2 乗を考えると,

$$h_a^2 = \|T^T m_a\|^2 - (m'_a, T^T m_a)^2 \quad (3.3)$$

である．そこで式 (3.2) の条件のもとで

$$\sum [\|T^T m_a\|^2 - (m'_a, T^T m_a)^2] \rightarrow \min \quad (3.4)$$

となる変換行列 $T = (T_{ij}), i, j = 1, 2, 3$ を求める．これは次のように計算できる．

(i) 点 $\{(x_a, y_a)\}, \{(x'_a, y'_a)\}, a = 1, \dots, L$ が互に対応しているとき, それらの N ベクトルを $\{m_a\}, \{m'_a\}, a = 1, \dots, L$ とする．

(ii) $m_a = (m_a(1)m_a(2)m_a(3))^T, m'_a = (m'_a(1)m'_a(2)m'_a(3))^T$ とするとき, 2 次のモーメントおよび 4 次の相関

$$M_{ij} = \sum m_a(i)m_a(j) \quad (3.5)$$

$$O_{ijkl} = \sum m_a(i)m'_a(j)m_a(k)m'_a(l) \quad (3.6)$$

を計算し

$$A_{ijkl} = M_{ik}\delta_{jl} - O_{ijkl} \quad (3.7)$$

とおく (δ はクロネッカのデルタ)

(iii) 次のような変換行列 $\{T_{ij}\}$ を求める．式 (3.8) と式 (3.9) はそれぞれ式 (3.4) と式 (3.2) を書き直したものである．

$$\sum A_{ijkl}T_{ij}T_{kl} \rightarrow \min \quad (3.8)$$

$$\sum (T_{ij})^2 = 3 \quad (3.9)$$

手順 (iii) の計算

二つの添字の組 (11), (12), ..., (33) に通し番号 $1, \dots, 9$ をつけ, 変換行列の要素からなる 9 次元ベクトル $\tilde{T} = (\tilde{T}_\kappa), \kappa = 1, \dots, 9$ を $\tilde{T}_1 = T_{11}, \tilde{T}_2 = T_{12}, \dots, \tilde{T}_9 = T_{33}$ のように定義する． A_{ijkl} の添字 $(ij), (kl)$ にも同様に通し番号をつけ, 9 次元行列 $\tilde{A} = (\tilde{A}_{\kappa\lambda}), \kappa, \lambda = 1, \dots, 9$ を定義する．すると式 (3.8) と式 (3.9) はそれぞれ

$$(\tilde{T}, \tilde{A}\tilde{T}) \rightarrow \min, \|\tilde{T}\|^2 = 3 \quad (3.10)$$

と書ける．ゆえに, 解 \tilde{T} は 9 次元行列 \tilde{A} の, 最小固有値に対するノルム $\sqrt{3}$ の固有ベクトルにより与えられる [14]．

3.5 変換行列から平面の傾きの推定

1 枚目のホスト画像平面を表す式を $Z = pX + qY + r$ とおく． X, Y, Z は 1 枚目の画像を撮影したカメラのレンズ中心軸を Z とおいたときに右手系となるように定める．1 枚目のホスト画像から 2 枚目のホスト画像へ画像を平面射影変換する変換行列を T とすると, p, q は次のように計算できる [15]．

(i) 対称行列 TT^T の固有値を $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ とし, 対応する固有ベクトル u_1, u_2, u_3 を互いに直交する単位ベクトルにとる．ただし固有値は $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ の順に並べる．

(ii) 面の勾配 $\{p, q\}$ は次のように定まる .

$$p = \frac{-p'}{l'}, q = \frac{-q'}{l'} \quad (3.11)$$

$$(p'q'l')^T = \pm \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}u_1 + \sqrt{(\sigma_2^2 - \sigma_3^2)}u_3 \quad (3.12)$$

3.6 ホスト画像の傾き補正

前節より, 1 枚目のホスト画像平面の勾配 $\{p, q\}$ が求まった . これを用いてホスト画像平面がカメラに正対するように補正する回転行列 R と並進成分 A, B, C を求める . ホスト画像平面の式は $Z = pX + qY + r$ であるから, ホスト画像平面の法線ベクトルは $(p \ q \ -1)$ である . この法線ベクトルを単位ベクトル a に正規化すると

$$a = \frac{(p \ q \ -1)}{\|(p \ q \ -1)\|} \quad (3.13)$$

となる . 問題は単位法線ベクトル a をカメラレンズに正対する法線ベクトル $b = (0 \ 0 \ -1)$ へ写像する回転行列 R と並進 A, B, C を求めることである . 回転行列 R は a と b の外積 $l = (l_1 \ l_2 \ l_3)$ を軸として, 右ねじの方向へ $\Omega = -\cos^{-1}(a, b)$ だけ回転させるものである . ロドリゲスの公式 [16] より $R = (R_{ij})$ は以下のように得られる .

$$\begin{aligned} R_{11} &= \cos \Omega + l_1^2(1 - \cos \Omega) \\ R_{12} &= l_1 l_2(1 - \cos \Omega) - l_3 \sin \Omega \\ R_{13} &= l_1 l_3(1 - \cos \Omega) + l_2 \sin \Omega \\ R_{21} &= l_2 l_1(1 - \cos \Omega) + l_3 \sin \Omega \\ R_{22} &= \cos \Omega + l_2^2(1 - \cos \Omega) \\ R_{23} &= l_2 l_3(1 - \cos \Omega) - l_1 \sin \Omega \\ R_{31} &= l_3 l_1(1 - \cos \Omega) - l_2 \sin \Omega \\ R_{32} &= l_3 l_2(1 - \cos \Omega) + l_1 \sin \Omega \\ R_{33} &= \cos \Omega + l_3^2(1 - \cos \Omega) \end{aligned} \quad (3.14)$$

並進 A, B, C はホスト画像平面とレンズとの最短距離点が, 補正後のレンズ軸上に位置するように調整すると,

$$(A \ B \ C) = \frac{(p \ q \ -1)}{\|(p \ q \ -1)\|} \quad (3.15)$$

となる .

3.7 SIFT を用いた補正法の考察

提案した SIFT を用いた補正法は第 1 章の 4 つの課題の内, 「肉眼で検知できるマーカを使用せず」, 「ホスト画像の内容を事前に知ることなく」, 「平面射影変換補正を行う」の 3 点をエレガントに解決しており,

残った課題のリアルタイム性を備えることができれば完成された補正法と言える。ところが、リアルタイム性については問題を残している。

SIFT の計算量は大きく、例えば 512×512 画素の画像の SIFT を計算するのに、DUAL Opteron 2.2GHz のワークステーションを使って約 1.5 秒の時間がかかる。2 枚の画像を処理するには 2 倍の約 3 秒の時間がかかり、これはカメラ付き携帯電話機搭載の組み込み機器用プロセッサを使うと 300 秒超の時間（表 2.1 を用いて換算）がかかることを示唆している。電子透かしの応用では、電子透かしを手持ちのカメラ端末単独で検出処理することが望ましいが、SIFT を用いた補正法ではそれは難しい。時間が経てばプロセッサの性能が向上して自動的に計算量の問題が解決できるかと問うと、以下のプロセッサパワーの議論からそれも難しいことが分かる。

3.7.1 プロセッサパワーとムーアの法則の考察

1980 年代以降ムーアの法則（プロセッサの性能は 18ヶ月で 2 倍になる）が一般的になると、画像処理高速化技術は以前よりは重要視されなくなった。プロセッサの進歩を待っていれば、どのような画像処理アルゴリズムもいずれは高速動作するようになるからである。ところが 2000 年代にムーアの法則が綻び始めてから状況が変わった。ムーアの法則は、プロセッサの製造プロセスの微細化による配線距離の縮小と動作電圧の低減という原則に由来していた。配線距離が小さくなれば信号伝達時間が小さくなるから、クロックを上げることができる。クロックを上げるとそれに比例して消費電力が増えるが、動作電圧の低減による消費電力低減がそれを相殺するため問題にはならない。製造プロセスの微細化による性能向上は Pentium4 の 0.09 ミクロンプロセスまでは法則通りに進んできた。ところが、0.09 ミクロンの次世代である 0.065 ミクロンプロセスで問題が生じた。0.065 ミクロンプロセスではプロセッサコア内の配線間の漏れ電流が無視できなくなったのである。漏れ電流のため、0.065 ミクロンプロセスのプロセッサを従来と同じ手法で製造すると配線間距離は小さくなるが消費電力は小さくならなくなった。プロセッサの消費電力は全て熱に変換されるから、同じ消費電力のプロセッサコアであれば、小さいものほど体積当たりの発熱が大きく冷却面で不利になる。プロセッサの冷却は空冷にせよ液冷にせよプロセッサコアとそれに接触する放熱素材との熱伝導効率で規定され、これは放熱素材の物理的性質で決まるので際限なく冷却性能をあげることはできない。

結局、この熱問題によりプロセッサコア単体での性能向上は頭打ちになってしまい、Pentium4 1.4GHz が出現した 2000 年当時は Pentium4 は 6GHz までクロックをあげるというロードマップが発表されていたが、2006 年までに 3.8GHz までしかクロックを上げることはできず、Pentium4 プロセッサの開発は中止された。プロセッサコア単体での劇的な性能向上はもはや望めないため、今後はコア数を増やすことで性能を上げる方向にプロセッサ開発はシフトしている。ところがマルチコア技術によりプロセッサの性能を上げるのは効率的に不利である。コア数が 2 倍になれば消費電力は 2 倍になるが、性能が 2 倍になるとは限らないからである。並列処理のオーバーヘッドがゼロに近い筋の良いアプリケーションであればコア数に比例した性能向上が期待できるが、そのような場合は特殊である。通常のアプリケーションであればオーバーヘッドは無視できないため、コア数に比例した性能向上は期待できない。オフィスソフトやゲームソフトなどはマルチコア対応が遅れているため、これらのソフトを使っている場合はマルチコアを使ってもシングルコア比べて性能は変わらずただ消費電力だけが無駄に増えたという場合が多い。

2009 年現在ではインテルや AMD は漏れ電流問題を歪みシリコンにより物理的に、Sleep Transistor で

論理的に改善し、0.045 ミクロンプロセスでのプロセッサ製造に成功している。しかし、ムーア自身が2007年のIntel Developer Forumにて「今から10年後、15年後に、われわれは極めて根本的な問題に直面する」「絶縁層を1分子層以上に薄くすることは不可能であり、5分子層以上に薄くすることも実際（事実上）不可能だ」と述べた。既に現状での絶縁層は5分子層相当の薄さなのである。将来も引き続きプロセスルールの小型化の恩恵を受けてプロセッサの性能が向上すると信じるのは楽観的に過ぎるだろう。

これまでの議論はPC用プロセッサの場合であったが、携帯端末用プロセッサはさらに状況が厳しい。PCプロセッサと同様に製造プロセス微細化による性能向上が望めないだけでなく、電池の持続時間の問題からも性能の制約を受ける。性能の良いプロセッサは、性能が良い分だけ電力を消費するから、電力を供給する電池は大容量化を要求される。しかし、電池のエネルギー密度には限界があるので、大容量化は電池の大型化と同義であり、携帯端末の携帯性を損ねてしまう。燃料電池などの技術で電池問題が解決したと仮定しても、PCより厳しい放熱の問題が浮上してくる。外部空気との熱交換でしか冷却できない携帯端末の場合、プロセッサの消費電力が増大したら、素手では触れないほど端末が熱くなってしまう可能性がある。

以上述べたように、今後はただ待っていてもプロセッサ速度は上がらなくなったため、SIFTによる補正法がここ数年の内に携帯端末で実用に使われることは期待できない。携帯端末で処理するのではなく、携帯端末に高速ネットワークで繋がったワークステーションを用いれば、リアルタイム性の実現可能性はある。なぜなら、現在のワークステーションであれば2枚の画像のSIFTは3秒程度で計算できるので、この計算時間を1秒以下にするワークステーション用高速プロセッサは近い将来実現するかもしれないからである。しかし、チラシや街頭ディスプレイのようなアナログメディア情報をデジタルメディアへ仲介するような大衆向けサービスでは数万のユーザからの検出要求がワークステーションに集中するため、スケーラビリティの点から携帯端末とネットワーク接続されたワークステーションとを用いる方法では実用サービス提供は難しい。

3.8 本章のまとめ

撮影時の手の動きと、SIFTとを利用して平面射影変換補正を行う手法を検討した。本手法は可視マーカを利用することなく、ホスト画像の内容を知ることなく、平面射影変換補正を行えるが、処理量が大きいため、携帯端末内でリアルタイムに処理することができない。本手法が実用に使えるようになるためには、携帯端末用プロセッサ高速化のブレイクスルーと、携帯端末用電池高密度化のブレイクスルーを待たなくてはならない。あるいはSIFTアルゴリズムそのものを高速化する工夫が必要である。

第4章 STA を用いた対応点マッチング補正法

4.1 着眼点 (アイデア)

本章では、現存するカメラ付携帯電話機で電子透かしを検出するための、STA (Side Trace Algorithm) [8] を用いた補正方法 (以下基本 STA 法と呼ぶ) を述べる。基本 STA 法の着眼点は以下の2点である。

- ホスト画像をカメラ撮影して電子透かしを検出しようとするユーザは、ホスト画像が撮影フレームの中央に位置するように撮ることが自然である。
- ホスト画像は連続したエッジで囲まれた四辺形と仮定できる。

基本 STA 法を用いた平面射影変換補正の手順は以下の通りである。

- (1) 手持ちカメラにて1枚のホスト画像を撮影する。
- (2) STA を用いて撮影画像中のホスト画像領域 (四辺形) のコーナ点4点を得る。
- (3) コーナ点の座標値を用いて四辺形をカメラに正対する状態に補正する変換行列を推定する。
- (4) ホスト画像を変換行列により補正し、正面から撮影したことに対応する補正画像を得る。

基本 STA 法の詳細を述べる前に、なぜ従来手法では第1章の課題を解決できなかったかを検討し、そこから得られた知見により基本 STA 法が導き出された過程を以下に述べる。

4.2 従来手法によるコーナ点検出

ハフ変換 [17] により画像外周の直線を見つける処理と、高速パターンマッチングアルゴリズム Sequential Similarity Detection Algorithm (SSDA) [18] によりコーナを見つける処理とを2.3節で述べた実装ターゲットである i アプリ処理系3機種と PC 上で実行した場合の処理時間を表 4.1 に示す。

表 4.1: 従来手法の処理速度

端末	携帯電話 A	携帯電話 B	携帯電話 C	P4 1.5GHz PC
ハフ変換	27sec.	24sec.	28sec.	0.55sec.
SSDA 高速パターンマッチング	740sec.	1215sec.	1602sec.	0.01.sec

表 4.1 で興味深いのは、PC では SSDA が圧倒的に速いのに対し、i アプリ処理系では逆にハフ変換の方が速くなっている点である。この点が i アプリ処理系の特徴を端的に表している。第2章で述べたように、i ア

プリ処理系では画像メモリのアクセスコストが演算処理に対して相対的に大きいという特徴がある。SSDA はハフ変換に比べ、画像メモリアクセス回数が数十～数百倍のオーダーとなるため、i アプリ処理系では遅くなってしまうのである。

i アプリ処理系にて、コーナ点4点の検出を目標時間の1秒以内に処理するためには、画像メモリアクセスを減らすアイデアが必要となる。このアイデアを示現したのが基本STA法である。

4.3 画像メモリアクセスコストの検討

ここでハフ変換、SSDA、およびSIFT演算の画像メモリアクセス回数と携帯電話機での処理時間の関係を表4.2に示す。

表 4.2: 画像メモリアクセス数と処理時間の関係

	ハフ変換 (分解能 100×100)	SSDA (パターンサイズ=10)	SIFT ($=10$)
P4 1.5GHz PC 処理時間	0.55 秒	0.01 秒	4.6 秒
携帯電話機処理時間	27 秒	740 秒	主メモリ不足により実装不可能
演算量 (N =全画素数)	大 ($100 \cdot 100 \cdot 4 + 200 \cdot N$)	小 ($10 \cdot 10 \cdot 2 \cdot N$)	膨大 (省略)
画像メモリ アクセス回数 (N =全画素数)	小 (N)	大 ($100 \cdot N$)	膨大 ($100 \cdot 100 \cdot 4 \cdot 26$) $\cdot N$

表 4.2 から、携帯電話機での処理時間は画像メモリアクセス回数に依存していることが読み取れる。これは表 4.1 から得られた知見とも一致している。ここで特筆すべきは、ハフ変換のように画像メモリの各画素を1回だけアクセスする場合においても20秒以上の処理時間がかかる点である。既存の画像処理アルゴリズムは画像メモリの各画素を最低でも1回はアクセスするが、それを行うとリアルタイム処理はできなくなるということである。リアルタイム処理を行うには既存の画像処理のパラダイムを変える必要がある。期待される画像処理のパラダイムは「全画素をアクセスすることなく画像処理を完了する」(図 4.1)である。

全画素アクセスの欠点をイメージするのに適しているのはレーダー作戦ゲーム(タカラTM)である。このゲームを知らない人のために説明しておく、ゲームは2プレイヤーで行う。ゲームの舞台は将棋盤のようなマス目で区切られた有限の大きさの四辺形の海域である。各プレイヤー専用の海域が存在する。各プレイヤーは航空母艦(5)、戦艦(4)、巡洋艦(3)、潜水艦(3)、駆逐艦(2)を各1隻擁している。艦種の後の括弧内の数値はその艦艇の大きさを表しており、その艦艇を海に浮かべると数値と同じ数の海上のマス目を占める。各プレイヤーの艦隊がどのように海域に配置されているかは互いに秘密であり、互いに敵艦艇を視認することができないものとする。また、艦艇はゲーム開始後は動けないものとする。さてゲーム開始である。各プレイヤーは敵艦隊のいる海域の任意のマス目に向けて正確に命中させることができる精度の高いミサイルを保有している。各プレイヤーはミサイルを撃ち込む座標を宣言しながら交互にミサイルを撃ち

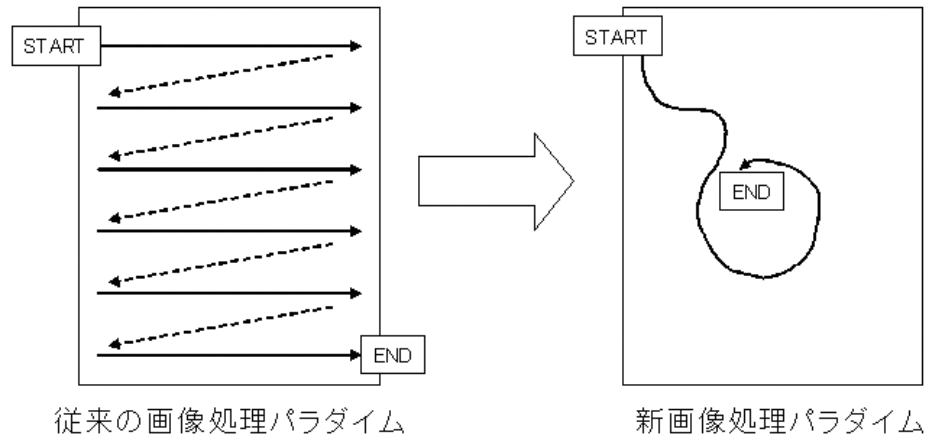


図 4.1: 新たな画像処理パラダイム

合う。ミサイルを撃ち込まれたプレイヤーは、そのミサイルが海に落ちた場合は「はずれ」と、自艦艇に当たった場合は「当たり」と宣言しなければならない。艦艇は自らが占めているマス目全てにミサイルが命中したら沈没する。沈没した場合はその旨を宣言しなくてはならない。同じ座標に向けて複数のミサイルを撃ち込んでも無意味であり、1発の命中として扱われる。先に敵の艦艇全てを撃沈したプレイヤーが勝者となる。以上がこのゲームのルールであるが、画像処理と共通する部分がある。ゲームの舞台となるマス目で区切られた四辺形の海域はモノクロビットマップ画像に相当する。そこに存在する艦艇は画像内のオブジェクトに相当する。艦艇が存在するマス目が黒、存在しないマス目が白に相当する。このゲームは画像処理で言うところのオブジェクト探索の速度競争を行っていることになる。このゲームを子供に行わせると、必ず1回は次の戦略を試す。左上のマス目から1マスずつずらしながらラスタースキャン方式でミサイルを撃ち込む戦略である。右下のマス目までミサイルを打ち込み終わるまでには必ず敵を全艦撃沈させられるとの目論みである。しかしながらゲームを繰り返す内に、この戦略はランダムな位置にミサイルを撃ち込む戦略には速度で勝つことができないことに子供は気付く。そして子供はこの戦略を捨てることになる。現在の数多ある画像処理アルゴリズムを吟味してみると、この子供が捨て去った戦略をほとんどのアルゴリズムが採用していることが分かる。

4.4 画像メモリアクセス間引きと探索精度のトレードオフ

全画素アクセスをしないで画像全体を処理するためには、画像中にアクセスしない画素が存在する必要がある。すなわちアクセス画素を間引きしなくてはならない。間引き以外でアクセス画素を減じる手段はない。画素アクセス回数の低減方法としては画像を縮小してから処理するアイデアもあるが、画像縮小のためのダウンサンプリングは、画像の間引きと等価な処理であり、結局画素を間引きしていることになる。

間引き間隔と探索精度にはトレードオフがある。間引き間隔より小さいサイズのオブジェクトは探索の網から漏れる可能性がある。例えば 2×2 画素のオブジェクトを探る際に、5 画素おきにスキャンした場合は、25 倍の高速化の代償としてオブジェクトを見逃す確率は 84% になる。見逃さなかった残り 16% の場合

であっても、 2×2 画素のオブジェクトの1画素しか見ないのであるから、これが探しているオブジェクトであるかどうかの判断は難しい。

したがって間引きが有効な場合は、探索オブジェクトサイズが間引き間隔に比べて大きいという条件の場合に限られる。このとき間引きの間隔を C 画素とすると、アクセスが必要な画像メモリは全画素数の $1/C^2$ まで減じることができる (図 4.2)。

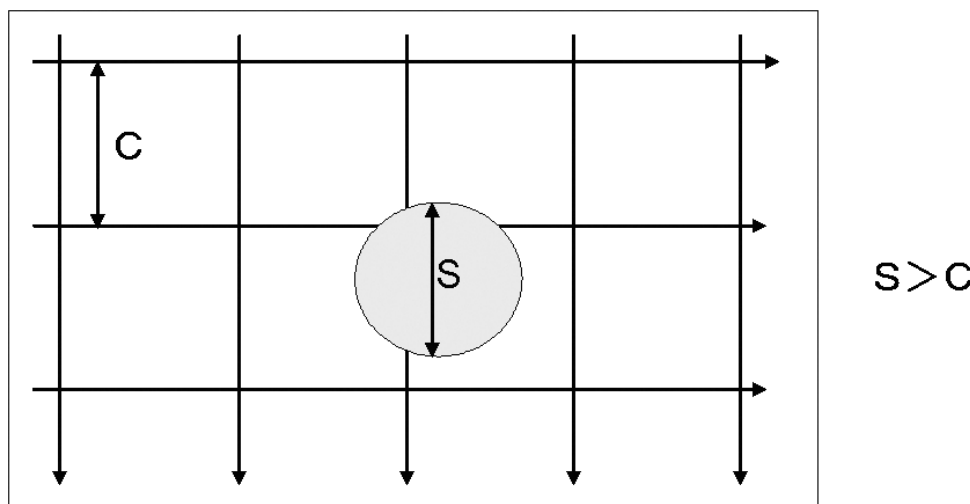


図 4.2: 間引きアクセス

4.5 基本 STA 法

4.5.1 基本 STA 法の着眼点

基本 STA 法において我々が着目したのは、4.1 節で述べたユーザは写真を撮るときに注目オブジェクト (四辺形) を撮影フレームの中央に置こうとする習性があることである。このとき、オブジェクトのサイズに依らず、間引き幅が $T/2$ の間引き探索にてオブジェクトの探索が可能となる。 T は撮影フレームのサイズである (図 4.3)

具体的には撮影フレームを上下に二等分する直線は探索オブジェクトである四辺形の左辺と右辺を横切り (図 4.4)、直線上のみのエッジ探索により左辺と右辺が見つかる。基本 STA 法はこの性質を利用して、以下の探索手順でコーナを検出する。手順は図 4.5 にも示した。本手順にはバリエーションがあり、撮影フレームを上下でなく左右に二等分する直線を探索する方法、および外から中心へではなく中心から外へと探索する方法もある。いずれの方法でも目的は達成できるが、撮影フレームが縦長の長方形であり、かつホスト画像が撮影フレームの大部分を占める大きさで撮影されている場合、図 4.5 の手順は最短経路での探索となる。すなわち、本手順が最適と言える。

Step1 画像の左端の中点から右へ進みながら四辺形の左辺を探す。

Step2 左辺が見つかった位置から上に辺を辿っていき、辺が途切れた点を左上コーナとする。辺を辿る場合、辺の傾きを考慮して、現在の辺位置の真上だけでなく、左右に1画素ずれた位置も探索する。

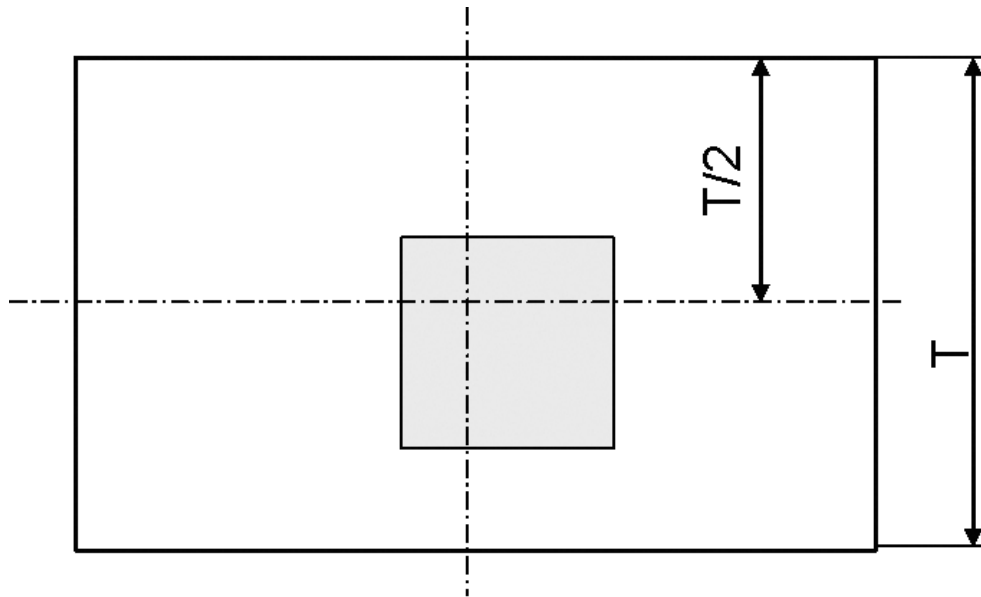
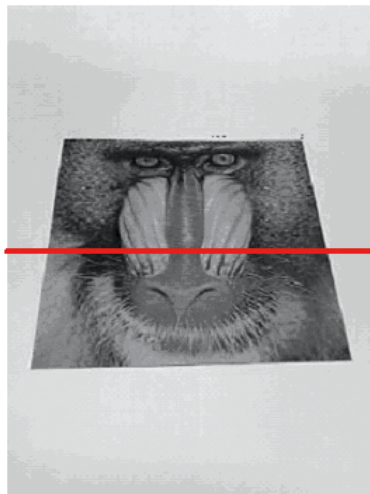
図 4.3: 間引き幅 $T/2$ の間引きアクセス

図 4.4: 二等分線

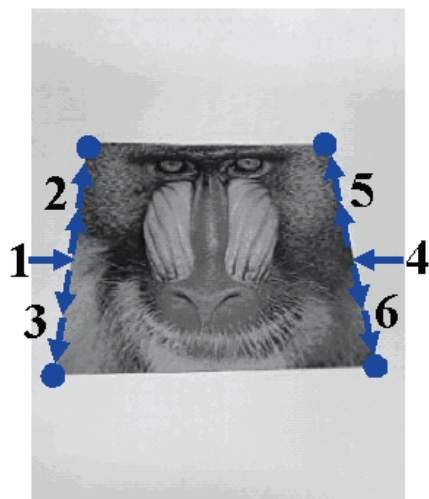


図 4.5: 辺探索経路

Step3 最初に左辺が見つかった位置から下に Step2 と同じ方法で辺を辿っていき、辺が途切れた点を左下コーナとする。

Step4 画像の右端から反対向きに Step1,2,3 と同じことを行い右上コーナと右下コーナを得る。

Step5 終了。

基本 STA 法では、撮影フレームの二等分線が四辺形を横切らない場合、すなわち四辺形が小さくかつ撮影フレームの上下に偏在している場合は期待した動作をしないが、その場合は電子透かし検出を失敗する可能性が高いため救済を考慮する必要性が小さい。電子透かしはホスト画像画素の輝度に対し、人間の目には分からない範囲の微小な変調を加えることで、透かし情報をホスト画像に埋め込む。撮影画像サイズが小さ過ぎる場合は、ホスト画像上ではそれぞれ別の輝度変調を加えた複数画素が 1 画素に縮退してしまう。そのため輝度変調成分の復元が困難になり、電子透かし検出を失敗する可能性が高くなる。したがって、二等分線が四辺形を横切らなかった場合は、その時点で検出エラーとして処理を中断しても大きな弊害はない。この処理中断は、電子透かし検出処理を試行することなく検出失敗可能性を予測していることに相当することから、実質的にはエラー時のレスポンスタイムが向上したことになり、好都合とも言える。

4.5.2 辺検出

ある注目点が辺かどうかを判定する関数は、注目点を中心とした 3×3 画素分の輝度行列 I_{xy} に対して、 3×3 の辺検出フィルタオペレータ行列 F_{xy} による convolution 演算式 (4.1) を施し、その結果が辺閾値より大きい場合に辺と判断する。

$$\left. \begin{aligned} EdgeValue &= \sum_{i=1\dots 3, j=1\dots 3} I_{ij} F_{ij} \\ Edge &: EdgeValue \geq Threshold \\ NotEdge &: EdgeValue < Threshold \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

フィルタオペレータ行列の構成例 (Sobel フィルタ) を図 4.6 に示す。図 4.6 のものは左辺用であり、右辺用は左辺用を左右反転したものとなる。オペレータ行列は本例以外のものを利用することも可能である。例えば後述する 6 章では 1×3 のオペレータ行列を用いている。

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

図 4.6: フィルタオペレータ行列

4.5.3 処理量

基本 STA 法の処理量を見積もってみる。画像メモリアクセス回数 $MA1$, 加減算回数 $ADD1$, 乗算回数 $MUL1$, 比較条件分岐回数 $CB1$ とする。画像左端中点から辺までの距離を m 画素, 辺の長さを l 画素とし, 簡単のために右半分も同じと仮定する。フィルタオペレータ行列として図 4.6 のものを仮定すると, 各処理の回数は式 (4.2) となる。

$$\left. \begin{aligned} MA1 &= 6p \\ ADD1 &= 5p \\ MUL1 &= 6p \\ CB1 &= 6p \\ \text{ただし } p &= 2(m + 3l) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

i アプリにおいては乗算と加算とシフト演算のコストは同じオーダー (表 2.1) なので, 式 (4.2) では乗算を加算やシフト演算に展開してはいないが, convolution 演算部の乗算は容易に加算やシフト演算に変換できるので, 乗算コストが大きい処理系では全て加算やシフト演算で処理することも可能である。本アルゴリズムにより辺探索を行う対象である図 4.7 左の画像から実測した m, l の値を式 (4.2) の $MA1$ 式へ代入すると,

$$MA1 = 6 \cdot 2 \cdot (38 + (174 \cdot 3)) = 6720 \quad (4.3)$$

となる。この結果の数値 6720 は全撮影画素数の 7%弱であり, 全画素をアクセスすることなく 4 コーナを見つけられたことになる。

4.5.4 辺閾値動的推定

撮影環境, レンズ性能, 印刷品質の影響により画像の輝度と背景の輝度は変動するため, 辺探索に用いる閾値を動的に調整しなければならない。閾値 $Threshold$ は, 背景部輝度 I_b と辺部輝度 I_f の一次式 (4.4) で

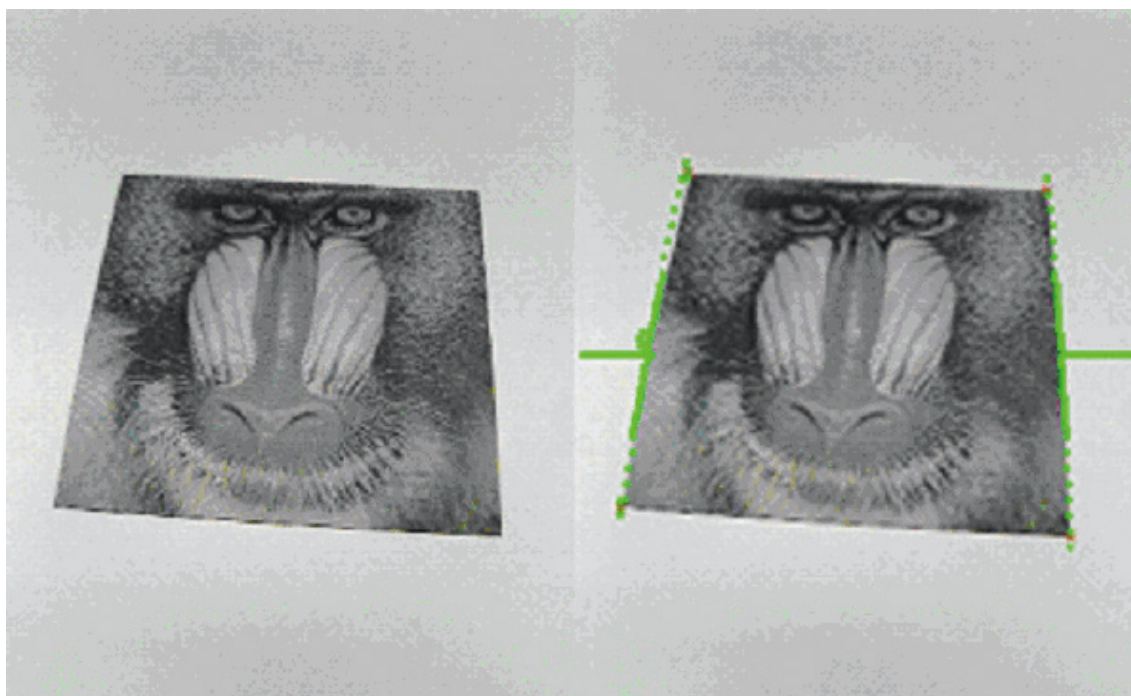


図 4.7: 元画像 (左) と辺探索結果 (右)

表現できる．式 (4.4) 中の α, β, γ はフィルタオペレータの構成に依存する係数であり，実験的・経験的に定める．

$$Threshold = \alpha I_b + \beta I_f + \gamma \quad (4.4)$$

閾値は，同一撮影画像内でも撮影条件によって増減する．したがって，辺を辿る際に定期的に閾値推定を行う．辺の位置が既知であれば，背景輝度部と画像輝度部の位置は自明なので，輝度サンプリングと閾値の計算は容易に行える．閾値推定を行うことによる処理の増加はコーナ探索処理全体の1%以下であり，処理時間の議論では無視できる．

4.5.5 高速化のための粗探索

基本 STA 法は十分に高速であるが，さらなる高速化の余地がある．辺を上下に辿る場合に，1画素ずつ辿るのではなく h 画素ずつ飛び飛びに辿ること（粗探索）により，画像メモリアクセス回数と演算量はさらに少なくなる．この場合，辺が途切れた点の位置誤差が最大 h 画素になってしまうため，途切れた位置から一旦途切れる前の位置まで戻り，その位置から1画素ずつ辿り直すことにより誤差の増加を防ぐ．

4.5.6 高速化のための方向制約

辺に沿った追跡を行う際に方向制約を導入する．すなわち辺追跡開始時に定まった辺方向を記憶し，その方向以外への追跡を排除する．方向が定まるまでは h 画素ずつスキップした際に左右に $\pm t$ 画素ずれた範囲

も探索するが、方向が定まった後は左右の探索範囲を ± 1 画素に狭める。 t の値は、辺の許容傾きを θ とした場合に $\tan\theta = t/h$ によって定まる。

方向制約を導入した場合の探索手順を以下に示す。 f は方向が決まるまでのスキップ数である。

Step1 辺追跡開始点の x (水平方向) 座標を記憶する。

Step2 スキップ回数 f になるまで h 画素ずつ垂直方向へ進みながら辺を辿る。 h 画素進んだときに辺を探す水平方向範囲は $\pm t$ 画素とする。

Step3 現在の x 座標と辺追跡開始点の x 座標の差を f で割った値 $grade$ を方向として記憶する

Step4 辺を見失うまで h 画素ずつ垂直方向へ進みながら辺を辿る。 h 画素進んだときに辺を探す水平方向範囲は $x + grade \pm 1$ 画素とする

Step5 辺を見失った位置から最後に辺を見つけた点まで戻る。

Step6 再び辺を見失うまで 1 画素ずつ垂直方向へ進みながら辺を辿る。 辺を探す水平方向範囲は ± 1 画素とする。

Step7 辺を見失った位置のひとつ前の辺位置をコーナとして終了。

粗探索と方向制約を導入して辺探索を行った結果を図 4.7(右) に示す。付加ドットが探索のために辿った経路である。本アルゴリズムの処理量 $MA2, ADD2, MUL2, CB2$ を見積もったものを式 (4.5) に示す。 m, l の意味は 4.5.3 項と同じである。

$$\left. \begin{aligned} MA2 &= 6p' \\ ADD2 &= 5p' \\ MUL2 &= 6p' \\ CB2 &= 6p' \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

ただし $p' = 2(m + f(2t + 1) + 3(l/h - f) + 3h)$

比較のため、 $t = 6, h = 10, f = 5, m, l$ は図 4.7(左) から取得した実測値を式 (4.2) と式 (4.5) へ代入した結果に対して表 2.1 を用いて加算コストに換算し、さらに高速化をしていない場合の基本 STA 法の値を 1 として正規化した結果を表 4.3 に示す。処理量は高速化をしない場合の 1/3 以下に減っている。

表 4.3: 処理速度比較

	基本 STA 法	高速化を加えた基本 STA 法
正規化処理量	1	0.3

4.5.7 ノイズ排除

辺周辺に文字や別の直線等のノイズがある場合は、それらを辺と誤認識してしまう場合がある。誤認識を防ぐためには見つけた辺に対してラベリング処理を行い、最長連続画素を真の辺とするのが一般的だが、

ラベリング処理は処理量が大きいため採用できない．そこで，ノイズの特徴を利用したヒューリスティックアルゴリズム導入により，効率的に周辺ノイズの排除を行う．ヒューリスティックアルゴリズムでは文字の線分は長く続かないことを利用し，ある閾値長以下で辺追跡が失敗した場合は正しい辺としない．しかし，このアルゴリズムは4.5.5節で述べた粗探索と相容れない．そこで，粗探索の最初の部分のみ追跡を1画素ずつ行うように変更することにより，粗探索と文字線分排除を両立させる．

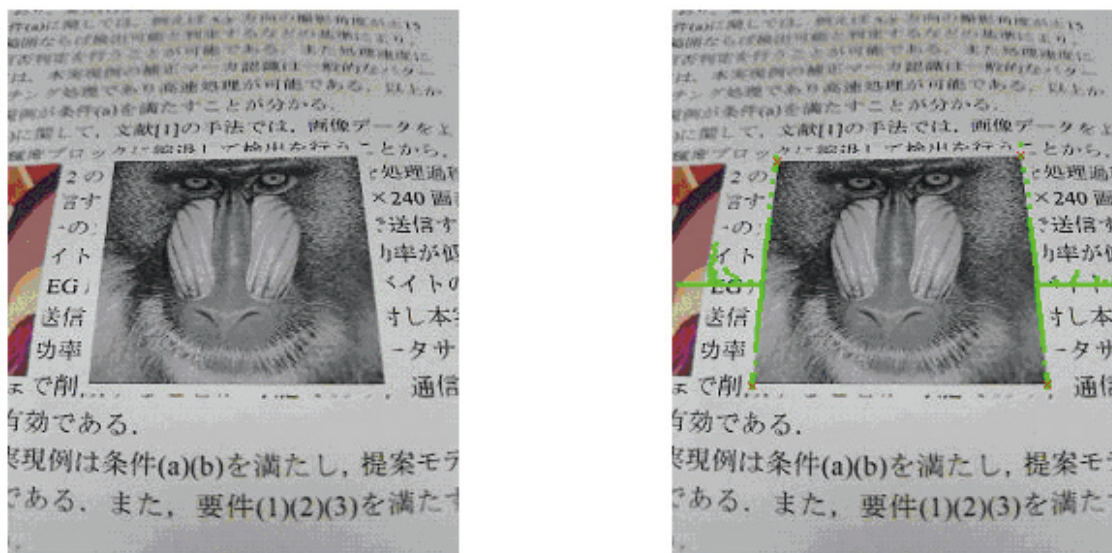


図 4.8: 元画像（左）と辺探索結果（右）

図 4.8(右) にノイズ対策を施した辺検出結果を示す．左右端の midpoint から伸びている点群が探索のために辿った経路である．ノイズ対策の結果，演算量とメモリアクセスが増加するが，増加量は撮影フレームの二等分線すなわち探索パス上を横切るノイズ要素の画素数に比例する．探索パス上を横切る文字の画素数合計を n_c ，正しい辺の画素数合計を s_l とすると，ノイズがない場合に対する演算量とメモリアクセス回数の増加比率は共に式 (4.6) となる．

$$\frac{n_c}{s_l} \quad (4.6)$$

探索パス上にないノイズは処理量に影響を与えないので，図 4.8 のように周りに文字がちりばめられている場合でも，処理速度に影響を与える文字はごくわずかである．ノイズが無い場合は式 (4.6) の分子はゼロとなるため，ノイズ無しの場合のオーバーヘッドはゼロである．

4.5.8 実験と結果

実験はコーナ点探索成功率と処理時間との2つの観点から行う．評価画像は携帯電話機 A で複数の撮影者が蛍光灯，太陽光の2種の照明条件の下で撮影した750枚強の画像を用いた．撮影画像は全てはっきりした辺があるものとした．撮影した画像の一部を図 4.9 に示す．画像内に付加した黒ブロックはコーナ探索精度の測定指標であり，コーナ探索には無関係である．コーナ探索成功率評価においては，2.4節で目標と

した 6 画素以下の誤差でコーナ座標を検出した場合を正解とした．この誤差は電子透かし検出のためには十分に小さい [10]．処理時間は 4 つのコーナを見つけるまでの時間を測定した．表 4.4 に成功率の測定結果を示す．ノイズ付きの画像に対しても 90%以上の探索成功率が得られていることが分かる．



図 4.9: 実験撮影画像サンプル

表 4.4: コーナ検出成功率

対象画像	四角形単独	周辺に文字	周辺に他の四角形	合計
試行回数	251	241	272	764
コーナ検出成功回数	250	221	254	725
成功率	100 %	92 %	93 %	95 %

表 4.5 に処理時間の実端末上での測定結果を示す．最も遅い携帯電話機 C にてノイズ処理付き基本 STA 法の処理時間が 0.16 秒であった．これは 2.1 節で定めた上限値の 1 秒より十分に小さい．また，従来方式のハフ変換に比べ 100 倍以上の高速化を達成している．

表 4.5: 処理時間比較

端末	携帯電話機 A	携帯電話機 B	携帯電話機 C	P4 1.5GHz PC
基本 STA 法	0.07sec.	0.06sec.	0.16sec.	0.002sec.
ハフ変換	27sec.	24sec.	28sec.	0.55sec.
処理速度比	386	400	175	275

4.5.9 平面射影変換パラメータ推定

前節までの処理により得られたコーナ座標 (x, y) の組 4 個と，元画像のコーナ座標 (x', y') の組 4 個から射影変換パラメータ $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$ を推定する．これら 8 パラメータは射影変換式 (4.7) の定数項である．

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{a_1x + b_1y + c_1}{a_0x + b_0y + 1} \\ y' &= \frac{a_2x + b_2y + c_2}{a_0x + b_0y + 1} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

x', y' : original picture position

x, y : camera picture position

(4.7) 式を変形した (4.8) 式に 4 つのコーナの対応座標の組 $\{(x, y), (x', y')\}$ を代入すると式が 8 個得られ、この 8 元連立一次方程式を解いて 8 パラメータを得る。

$$\left. \begin{aligned} xx'a_0 - xa_1 + 0a_2 + yx'b_0 - yb_1 + 0b_2 - c_1 + 0c_2 &= -x' \\ xy'a_0 - 0a_1 - xa_2 + yy'b_0 + 0b_1 - yb_2 + 0c_1 - c_2 &= -y' \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

i アプリ環境搭載機では小数点演算ができない機種があるため、適切な定数 K を乗じてガウスジョルダン法を適用する。方程式行列係数の範囲は、元画像を 160x160 画素、カメラ解像度を 288x352 画素と仮定すると、最大絶対値は $yy' = 352 \cdot 160 = 56320 \sim o(10^4)$ 、最小絶対値は 1 である。最大絶対値をピボットとして、他の係数を割ることから、最小係数 1 が桁落ちしないためには、乗ずる定数 K として $K \geq o(10^4)$ である必要がある。また、前進消去時に大きい値の係数同士の乗算時に 32bit int が桁溢れしないために、 $o(10^4)K < 2^{31} \sim o(10^9)$ である必要がある。したがって最終条件式は、

$$o(10^4) \leq K < o(10^5) \quad (4.9)$$

となり

$$K = 2^{16} \sim o(10^4) \quad (4.10)$$

を適切な定数として選んだ。 K を乗じた後の 8 元連立一次方程式を解くのに必要な時間は携帯電話機 A にて 1 ミリ秒以下であり、無視できる。

4.5.10 逆射影変換

逆射影変換は式 (4.7) により行う。変換結果の座標値は整数ではないため、適切な方法で整数近似する必要がある。近似法には最近傍法、バイリニア法、バイキュービック法があり、後者ほど処理時間がかかり、近似精度が良い。それぞれを携帯電話機 A に実装して処理時間を評価した結果を表 4.6 に示す。近似精度は、見た目の自然さよりも電子透かしを正しく検出できるかどうかが問題となるので、評価は電子透かし検出性能で行った。処理時間と近似精度のバランスからバイリニア法が最適であることが分かる。

表 4.6: 近似方法比較

近似方法	最近傍	バイリニア	バイキュービック
携帯電話機 A での処理時間	0.20sec.	0.55sec.	2.16sec.
電子透かし検出成功率	85 %	90 %	90 %

4.6 本章のまとめ

本章では基本 STA 法について、その着眼点と導出と効果について述べた。基本 STA 法の着眼点が、人が電子透かし検出のためにホスト画像を撮影する場合はカメラフレーム中央にホスト画像を配置する習性であることを述べ、それを利用することにより画像メモリ探索経路を大幅に短縮できることを示した。画像メモリ探索経路の短縮により処理のリアルタイム性が実現可能となり、基本 STA 法は第1章で述べた4つの課題全てを解決可能である。ただし、基本 STA 法が適用できるのはホスト画像の外周にはっきりした辺がある場合に限定されるため、そうでない場合については次章以降で述べる改良が必要となる。

第5章 枠利用型STA法

5.1 枠導入の必要性

コーナ位置を見つけるために辺を辿る基本STA法は、辺の位置で背景と画像の区別がつかない画像（白い紙に青空と白雲が印刷されている画像等）に対しては辺を見つけれないため、原理的に適用できない。そのため、4.5.8項の実験では辺の明確な画像のみを選んで行った。任意画像への適用を可能にするため、辺の外側に枠を付与し辺ではなく枠を辿ることを考える。枠デザインを図5.1に示す。

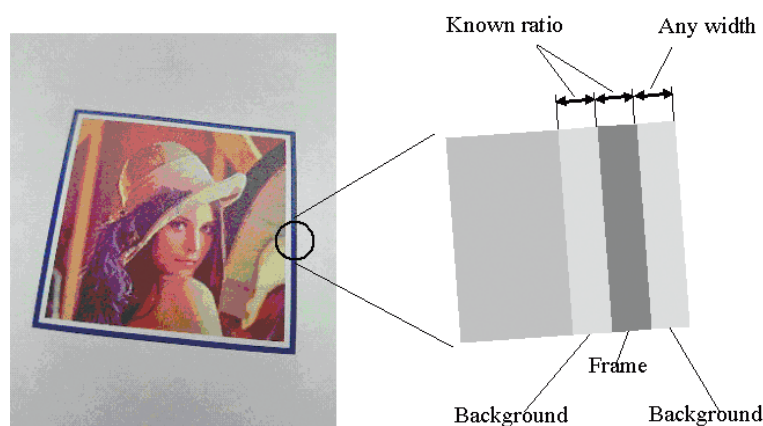


図 5.1: 枠デザイン

付加する枠の条件を以下に列挙する。

- 枠の両側にはベルト状の背景部を配置する。背景部は枠と対象画像の色が同じ場合、あるいは枠と紙の色が同じ場合にも枠を認識するために必要である。
- 枠幅と外側背景部幅はそれぞれ任意とする。
- 内側背景部幅と枠幅はその比率を定めておく。画像を切り出す際に枠から画像までの距離を枠幅を元を知るためである。
- 背景部色は任意とする。印刷紙の色と同じでも良い。
- 枠の色は、用いるカメラで背景部との輝度差が観測できる程度に背景部より輝度が小さければ色は任意である。

ある注目点が枠かどうかを判定する関数は、注目点を中心とした $3 \times n$ 画素分 (n は枠の幅より 2 画素大きい値) の輝度行列 I_{xy} に対して、 $3 \times n$ の枠検出フィルタオペレータ行列 F_{xy} による convolution 演算

を施し，その結果が枠閾値より大きい場合に枠と判断する(式(5.1))．フィルタオペレータ行列の構成例としては，両端に $n-2$ の値を配置し，それ以外は -2 を配置するものが挙げられる．

$$\left. \begin{aligned} \text{FrameValue} &= \sum_{i=1\dots3, j=1\dots n} I_{ij} F_{ij} \\ \text{Frame} : \text{EdgeValue} &\geq \text{Threshold} \\ \text{NotFrame} : \text{EdgeValue} &< \text{Threshold} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

5.2 枠利用型 STA 法の処理量

枠利用型 STA 法の処理量を見積もってみる．画像メモリアクセス $MA3$, 加減算 $ADD3$, 乗算 $MUL3$, 比較条件岐 $CB3$ とする．画像左端中点から枠までの距離を m 画素，枠の長さを l 画素とし，簡単のために右半分も同じと仮定する．各処理量は以下のようになる．

$$\left. \begin{aligned} MA3 &= 3np \\ ADD3 &= 6(n-1)p \\ MUL3 &= 6p \\ CB3 &= 3np \\ \text{ただし } p &= 2(m+3l) \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

i アプリにおいては乗算と加算とシフト演算のコストはほぼ同じ(表 2.1)なので，式(5.2)では乗算を加算やシフト演算に展開してはいないが，convolution 演算部の乗算は容易に加算やシフト演算に変換できるので，乗算コストが大きい処理系では全て加算やシフト演算で処理することも可能である．枠利用アルゴリズムによる枠探索のターゲットである図 5.2(左)の画像から実測した m, l, n の値を式(5.2)の $MA3$ 式へ代入すると

$$MA3 = 3 \cdot 6 \cdot (13 + (250 \cdot 3)) = 27468 \quad (5.3)$$

となる．これは全撮影画素数の 30%であり，基本 STA 法の 7%よりは大きくなるが，全画素をアクセスすることなく 4 コーナを見つけることに成功している．

5.3 枠幅推定

枠利用型 STA 法は枠検出のために $3 \times n$ のフィルタオペレータ行列を用いている． n の値は枠幅依存であり，枠幅は事前に知ることができないので，フィルタオペレータ行列の構成には枠幅推定が必要となる．推定のためには枠を横切る方向に画素の輝度を微分し，微分の最大値と最小値を得た位置の差を枠幅とする(図 5.3)．ノイズが微分に影響を与えるのを避けるため，微分前にノイズフィルタをかけるが，通常のローパスフィルタをこのために使うとメモリアクセス量と演算量が大きいため，微分のための差分を取る際にある閾値より小さい差分は 0 と見なす条件判断文のみでノイズフィルタを実現する．



図 5.2: 元画像 (左) と枠探索結果 (右)

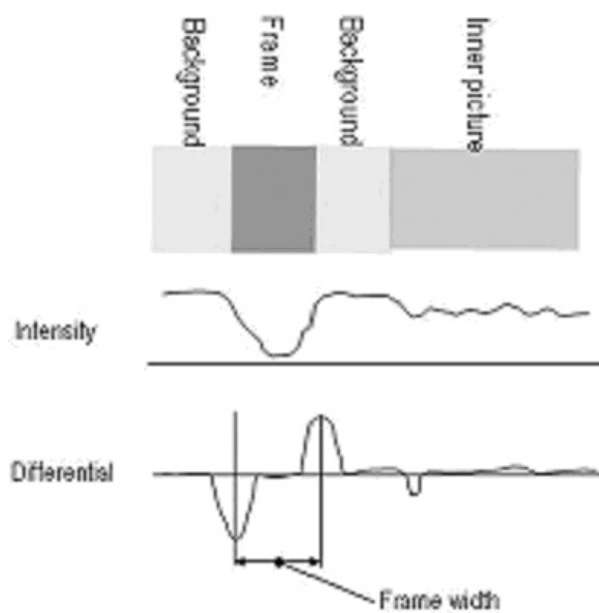


図 5.3: 枠幅推定

5.4 閾値動的推定

撮影環境，レンズ性能，印刷品質の影響により撮影画像の枠の輝度と背景の輝度は変動するため，枠探索に用いる閾値を動的に調整しなければならない．閾値 $Threshold$ は，背景部輝度 I_b と枠部輝度 I_f の一次式 (5.4) で表現できる．式 (5.4) 中の α, β, γ はフィルタオペレータの構成に依存する係数であり，実験的・経験的に定める．

$$Threshold = \alpha I_b + \beta I_f + \gamma \quad (5.4)$$

枠幅が既知であれば，背景部輝度と枠部輝度のサンプリング位置特定は容易なので，輝度サンプリングと閾値の計算は前節の枠幅推定に引き続き，得られた枠幅を用いて行う．枠幅と閾値の推定を行うことによる処理の増加は枠探索処理全体の1%以下であり，処理時間は無視できる．

5.5 高速化とノイズ排除

枠利用型 STA 法の高速化とノイズ排除は基本 STA 法と同じ考え方で実現できる (4.5.5 項～4.5.7 項)．高速化を行った場合の加速の度合いは基本 STA 法と同じく3倍であった．

5.6 パターンマッチング (マーカ探索) との比較

枠利用型 STA 法においては，結局は枠という一種の付加マーカを使うことになったが，自由にデザインした付加マーカ (例：参考文献 [4] の十字型マーカ等) を使う場合に比べてメリットがあるだろうか．

5.6.1 マーカ探索の処理量

参考文献 [4] のようにホスト画像外にマーカを配置したときの処理量を検討する．マーカ探索のパターンマッチング手法は SSDA を用いることとする．SSDA はパターンの比較を整数の加減算のみで行えると共に，探索途中の計算打ち切りが可能のため，i アプリ上のパターンマッチング手法の中では最も高速である．SSDA は画像のスケーリングや回転には対応できないため，その対応のための探索は別途必要となる．SSDA によるメモリアクセス，加減算，乗算，比較条件分岐の回数をそれぞれ $MA4, ADD4, MULA, CB4$ として見積もってみる．撮影フレーム内全画素数 A ，探索途中打ち切りによる処理削減率期待値が $1/2$ ，パターンが見つかるまでの探索面積と全面積の比率の期待値が $1/2$ ，スケーリングと回転に対応するためスケーリングを s 種類，回転を r 種類探索すると仮定すると，以下の式 (5.5) となる．

$$\left. \begin{aligned} MA4 &= q^2 Asr/4 \\ ADD4 &= q^2 Asr/2 \\ MULA &= 0 \\ CB4 &= q^2 Asr/2 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

5.6.2 枠利用型 STA 法とマーカ探索との処理量比較

処理量比較のため、(5.2)(5.5) 式に対して $q = 16, s = 3, q = 3, A, m, l, n$ は図 5.2 から取得した実測値を代入した結果を表 5.1 に示す。表 5.1 を $STA=1$ として正規化し、マーカサイズ q によりパラメータ化した結果を表 5.2 に示す。

表 5.1: 枠利用型 STA 法とマーカ探索の処理量比較

	枠利用型 STA 法	マーカ探索 SSDA
画像メモリアクセス	27468	58392576
加減算	45780	116785152
乗算	9156	0
条件分岐	1526	116785152

表 5.2: 枠利用型 STA 法とマーカ探索の処理量正規化後比較

	枠利用型 STA 法	マーカ探索 SSDA
正規化処理量	1	$2759 \cdot q \cdot q$

表 5.1, 5.2 からマーカ探索は枠利用型 STA 法に比べて大幅に処理量が多いことが分かる。マーカの処理量はマーカサイズ q の二乗に比例するが q を最小値の 1 まで減らしても枠利用型 STA の処理量を下回ることはない。以上の議論から、マーカを自由にデザインできると仮定しても、枠利用型 STA 法を用いることが処理速度上は有利であることが明らかになった。

5.7 実験と結果

実験はコーナ探索成功率と処理時間との 2 つの観点から行う。評価画像は携帯電話機 A で複数の撮影者が蛍光灯、太陽光の 2 種の照明条件の下で撮影した 200 枚の画像を用いた。撮影した画像の一部を図 5.4 に示す。コーナ探索成功率評価においては、2.4 節で目標とした 6 画素以下の誤差でコーナ座標を検出した場合を成功とした。処理時間は 4 コーナを見つけるまでの時間を測定した。

5.7.1 探索成功率

表 5.3 に探索成功率の測定結果を示す。ノイズ付きの画像に対しても十分な枠の探索成功率が得られていることが分かる。

5.7.2 処理時間

表 5.4 に基本 STA 法と枠利用型 STA 法の処理時間の測定結果を示す。



図 5.4: 実験用サンプル画像

表 5.3: 探索成功率

対象画像	四辺形単独	周辺に文字	周辺に他の四辺形
試行回数	400	300	300
コーナ検出成功回数	388	275	284
成功率	97.0 %	91.7 %	94.7 %

表 5.4: 処理時間

端末	携帯電話機 A	携帯電話機 B	携帯電話機 C
基本 STA 法	0.07sec.	0.06sec.	0.16sec.
枠利用型 STA 法	0.10sec.	0.10sec.	0.21sec.

枠利用型 STA 法は基本 STA 法に比べて 3 割程度処理時間は大きくなっているが、第 2 章で述べた上限値 1 秒よりは十分小さいことが分かる。

5.7.3 コーナ検出失敗の考察

コーナ検出に失敗した画像の例を図 5.5 に示す。失敗の原因を調べると枠の右辺部分と背景部分の輝度差が小さすぎたため右辺側の枠を誤検出したためであった。輝度差が小さいのは撮影時の照明不足に起因している。コーナ検出が失敗するほど照明が不足する場合は、電子透かしを埋め込んだ画像部分の輝度取得においても十分なダイナミックレンジが取れないため、たとえコーナ検出に成功したとしても、電子透かしの検出は難しい。したがって、コーナ検出失敗は電子透かし検出システム上は電子透かし検出エラーとして処理しても問題はない。このことを確かめるために、コーナ検出に失敗した画像に対して肉眼によるコーナ検出を行い、それを元にして射影変換補正した画像からの電子透かし検出成功率を測定した。コーナ検出に失敗した画像は電子透かし検出も必ず失敗しており、コーナ検出性能が電子透かし検出に対して十分であることが分かる。



図 5.5: 検出失敗画像

5.8 枠付与の是非

本章ではホスト画像に枠を付与したが、枠の付与が美観の面で容認されない場合がある。枠付与の是非について TV 番組の制作者とデザイナーにインタビューした結果を表 5.5 に示す。

インタビューの結果によると枠の付与が求められる場合もあった。書籍に複数の画像が掲載されており、それらの一部にだけ電子透かしが埋め込まれている場合は、枠を電子透かしが埋め込まれている目印にしたいという意見があった。このような場合は積極的に枠を使うべきであろう。

表 5.5: インタビュー結果

コンテンツ種類	枠付与是非
TV ドラマ	不可
TV コマーシャル	絵柄によっては可
デジタル放送	データ表示中ならば既に枠付きなので可
書籍・チラシ	絵柄によっては可
アート作品	不可

5.9 本章のまとめ

本章では枠利用型 STA 法について述べた。ホスト画像の外周に枠を付与することにより、基本 STA 法では検出の難しい外周エッジのはっきりしない場合でも高い成功率でホスト画像のコーナを検出することに成功した。枠付与の場合とマーカ付与の場合の処理量を定量的に算出して、どのようなマーカよりも枠付与の方が検出計算量が小さいことを示した。

ただし、枠の付与が許容されないホスト画像が存在し、その場合は次章以降で述べる改良が必要となる。

第6章 ロバスト型STA法

6.1 基本STA法の弱点克服の必要性

前章では、基本STA法では認識が難しい辺のはっきりしないホスト画像領域の検出に枠を付与することに対応した。枠を付与する事はホスト画像の内容・用途によってはホスト画像の美観を損ねる場合がある。そのため、辺のはっきりしない画像に対しても辺によって画像領域を検出することができれば実用上は望ましい。本章では基本STA法に改良を加え、辺のはっきりしない画像に対しても正しくホスト画像領域を検出するロバスト型STA法について述べる。

6.2 辺検出失敗の特徴

図6.1に基本STA法による辺検出の失敗例を示す。本基本STA法では左右方向だけでなく上下方向からも辺検出を行っているが、その理由はコーナ位置検出を、辺が途切れた位置ではなく、2辺の交点から求めるための変更である。図6.1から分かる辺検出が失敗する位置（図中の×印で表示）の特徴は、ホスト画像領域と背景領域のコントラストが大きい辺から小さい辺に変化していることである。最初からコントラストが小さい場合（図20の上辺および下辺）は失敗していない。これはSTAの動的閾値推定の影響である。動的閾値推定では、探索中の過去の画素輝度値に従い閾値を設定するため、コントラストの大きい辺を検出すると閾値が高く設定されてしまう。そのため、辺の検出途中でコントラストが小さくなると検出漏れとなってしまう。



図 6.1: 辺検出失敗画像

6.3 改良方針

基本STA法の辺検出漏れを抑制するため、辺検出の際の閾値を小さい値に固定する。また辺検出は左右方向からだけでなく、上下方向から行う。その場合、辺の検出漏れは抑制されるが、副作用としてホスト画像領域を正しく示していない辺も多数検出してしまふ。そこで、多数検出した辺を全て辺候補として記憶し、辺候補の組み合わせから構成可能な全ての四辺形について、辺とコーナの幾何学的特徴から評価をし、評価値最大の四辺形を構成する辺を選択することとする。

6.4 評価項目

6.4.1 端点位置評価

基本STA法では各辺候補は端点を持つ線分として得られる。これを利用し、組み合わせる2辺の端点座標と2辺から求まる交点座標の位置関係について評価する。求める四辺形を成す2辺の組であれば、端点の座標と交点の座標は一致もしくは近くなるはずなので、端点座標とコーナ座標の距離が近ければ評価値を高く、遠ければ評価値を低く設定する(図6.2)。



図 6.2: 端点位置評価

6.4.2 辺接続関係評価

求める四辺形を成す2辺であれば、2辺の交差形状はL字型になるはずであり、T字や十字で交差していれば、正しい四辺形を成す2辺でないことが予想できる。そこで、2辺がL字で交われば評価値を高く、T字や十字であれば評価値を低く設定する(図6.3)。

6.4.3 コーナ形状評価

コーナ形状評価では、組み合わせる2辺の交点を、求める四辺形のコーナ位置と考え、交点周辺の画像がコーナ形状をしているかを評価する。具体的には、交点座標を始点とし、その近傍で辺検出をした場合に、四辺形のコーナ位置に応じた方向へのみ辺検出が可能であれば(左上コーナなら右方向と下方向へ辺検出可能等)、高い評価値を与えることとする(図6.4)。

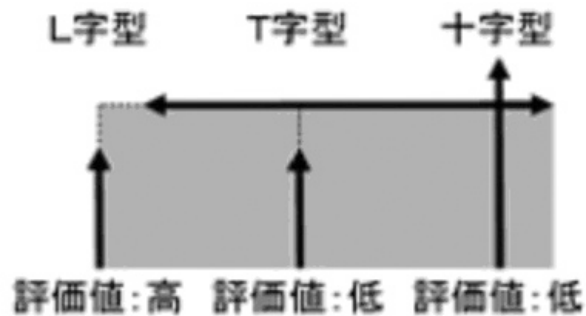


図 6.3: 辺接続関係評価

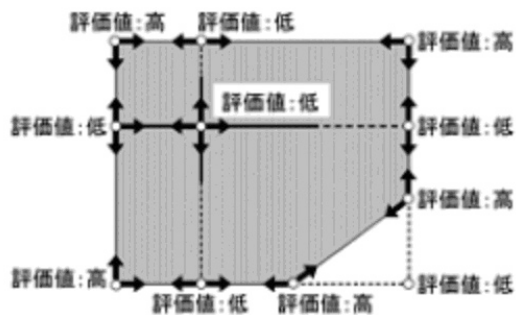


図 6.4: コーナ形状評価

6.4.4 面積評価

四辺形を構成する4辺の組み合わせについて、それらの成す四辺形の面積を求め、面積が大きいほど高い評価値を与える。また、電子透かし検出のためには最低限必要な画素数があるため、その限度を下回る面積であれば評価値を0とする(図6.5)。

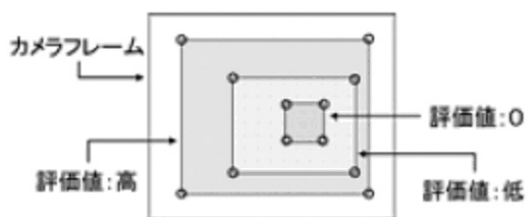


図 6.5: 面積評価

6.4.5 総合評価関数

4つの評価項目値を合計した値が最も高くなる4辺の組み合わせを、求める四辺形を成す辺とする。

6.5 実験と結果

ロバスト型 STA 法を用いることで、基本 STA 法では難しかった辺のコントラストが途中で小さくなるホスト画像においてもホスト画像の正しい辺候補の検出が可能となった(図 6.6)。辺の不明瞭なホスト画像を含むサンプルに対して、ロバスト型 STA 法と基本 STA 法のコーナ検出実験を行った結果を表 6.1 に示した。ロバスト型 STA 法は基本 STA 法に比べ 1.5 倍の高いコーナ検出成功率であった。



図 6.6: 辺候補検出例

表 6.1: ロバスト型 STA 法と基本 STA 法のコーナ検出成功率比較

	ロバスト型 STA 法	基本 STA 法
試行回数	72	216
成功回数	67	132
成功率	93.1 %	61.1 %

本手法では辺候補を多数検出するので(図 6.6)、画像アクセスが増大し、処理時間が増大してしまう恐れがあった。そこで、高速化のために基本 STA 法では辺検出に 3×3 フィルタを用いていたのを 1×3 フィルタで代用した(図 6.7)。これにより辺検出時の画像メモリアクセス回数を $1/3$ に減らすことに成功した。実計測によると表 4.4 の端末 A にて 0.076 秒であり、基本 STA 法の 0.07 秒に比べて大差ないこと、枠利用型 STA 法の 0.10 秒に比べて小さいことが確認できた。

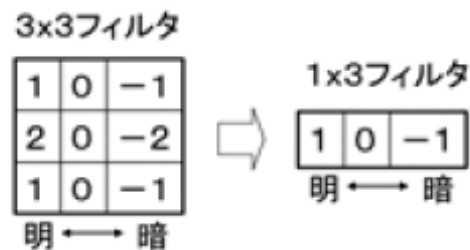


図 6.7: 辺検出フィルタの縮小

6.6 精度

6.6.1 従来方式との精度比較実験と結果



図 6.8: 元画像 (左) 平面射影変換画像 (右)

ロバスト型 STA 法と、SIFT、ハフ変換、SSDA の特徴点検出精度比較を行った。ランダムに定めた平面射影変換パラメータを 100 個用意し、このパラメータにより図 6.8 左の画像に平面射影変換を施した (図 6.8 右)。変換後の 100 枚の画像に対し、各方式で特徴点を検出した。特徴点はロバスト型 STA 法とハフ変換ではコーナ点、SIFT では SIFT が自動的に選んだ点、SSDA では 4 個の十字形の中心点とした。検出した特徴点位置と、元画像と平面射影変換パラメータから計算できる正しい特徴点位置との差を計測して誤差とした。誤差平均と標準偏差を表 6.2 に示す。誤差平均と標準偏差および処理時間をプロットしたグラフを図 6.9 に示す。精度の良い順に SSDA、ロバスト型 STA 法、ハフ変換、SIFT となる。SIFT の精度が悪いのは、SIFT は拡大縮小と回転に不変であるが、平面射影変換には不変ではない性質が影響していると考えられる。

表 6.2: 特徴点検出精度

	ロバスト型 STA 法	ハフ変換	SSDA	SIFT
誤差平均	1.03	2.03	0.80	6.55
誤差標準偏差	0.46	0.74	0.23	3.56

(単位: 画素)

これらの方式の精度が十分であるかどうかは、2.4 節で述べた目標精度との比較で判定できる。2.4 節での目標精度は誤差 6 画素以内であった。したがって、SIFT 以外の 3 方式は電子透かし検出のための十分な精度を持つ。

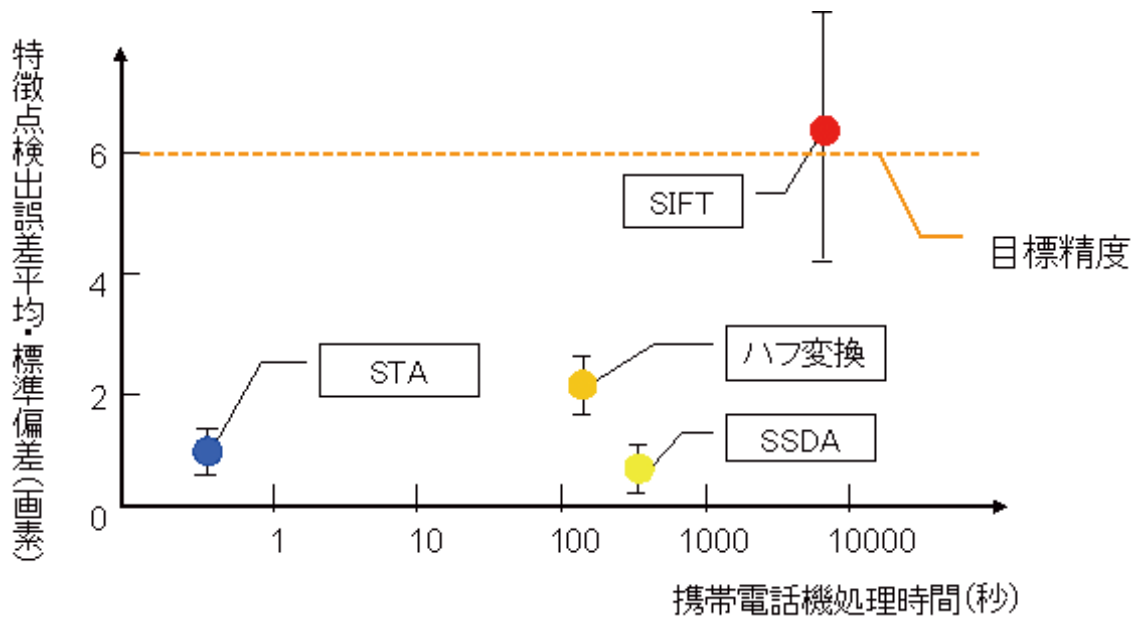


図 6.9: STA と従来方式の性能比較

6.6.2 画像の違いによる精度への影響

画像の違いによる特徴点検出精度をみるために、lena, cameraman, airplane (図 6.10) に対して前項と同じ評価を行った。結果を表 6.3 に示す。lena, cameraman, airplane の順にホスト画像と背景の境界が不明瞭になるが、特徴点検出精度については有意な差は見られなかった。



図 6.10: lena, cameraman, airplane

6.6.3 平面射影変換パラメータの違いによる精度への影響

平面射影変換パラメータの違いによる特徴点検出精度をみるために、平面射影変換の 3 軸の回転角度を 0 ~ 8.25 度の 100 種類、0 ~ 16.5 度の 100 種類、0 ~ 24.75 度の 100 種類用意して、6.6.1 節と同じ評価を行った。結果を表 6.4 に示す。平面射影変換の度合いを変えても有意な差はみられなかった。

表 6.3: 異なる画像の平均誤差

画像	ロバスト型 STA 法	ハフ変換	SSDA	SIFT
lena	1.03	2.03	0.80	6.55
cameraman	0.92	1.79	0.80	6.72
airplane	1.23	2.04	0.80	6.65

(単位: 画素)

表 6.4: 異なる射影変換パラメータでの平均誤差

回転範囲	ロバスト型 STA 法	ハフ変換	SSDA	SIFT
0~8.25 度	1.03	2.03	0.80	6.55
0~16.5 度	1.18	2.02	0.80	7.21
0~24.75 度	1.11	2.05	0.78	6.74

(単位: 画素)

6.7 本章のまとめ

基本 STA 法の弱点であった辺のはっきりしないホスト画像のコーナ検出を、枠を付与することなく可能とするロバスト型 STA 法について述べた。ロバスト型 STA 法は、辺候補を漏れなく検出し、その後正しい四辺形を構成する辺を選択する手順によってホスト画像のコーナ検出を行う。ロバスト型 STA 法は枠利用型 STA 法に匹敵するコーナ検出成功率を持ち、かつ枠利用型 STA 法よりも処理時間が小さいことを実験により確かめた。ロバスト型 STA 法の完成により、第 1 章で述べた 4 つの課題を画像種類に依らず全て解決したと言える。

ロバスト型 STA 法と SIFT、ハフ変換、SSDA との特徴点検出精度比較を行った結果、ロバスト型 STA 法はハフ変換および SIFT より精度が優れているが、SSDA にはやや劣ることが分かった。SSDA にはやや劣るものの、ロバスト型 STA 法の特徴点検出精度は電子透かし検出のためには十分であることが分かった。また、画像の種類や平面射影変換パラメータの値の違いに関わらず、特徴点検出精度は変わらないことを確認できた。

ロバスト型 STA 法の辺候補から正しい四辺形を構成する辺を選択する戦略は、ハフ変換を用いて四辺形の外周を探索する戦略と類似している。しかしながら、ロバスト型 STA 法は直線ではなく線分を辺候補として見つけるため、四辺形を構成する辺を選ぶ場合に、線分ならではの評価基準、端点位置評価、辺接続関係評価、コーナ形状評価を利用できる。ハフ変換は直線を辺候補として見つけるため、四辺形を構成する辺を選ぶ際には直線を構成する画素に対するラベリング処理が必要となり、ロバスト型 STA 法に比べ処理量が増大してしまう。以上述べたように辺候補を探索し、正しい辺を選択する戦略を用いる場合は、処理速度の面においてロバスト型 STA 法はハフ変換より優れている。

第7章 ロバスト型STA法の動画への適用

7.1 動画像適用上の問題点

電子透かし技術には、ホスト画像が動画であるものが存在する [20] [21]。この場合は動画からホスト画像領域を検出する必要がある。動画からのホスト画像領域検出のためには、撮影フレームレートよりも高速にホスト画像領域を検出する必要があるが、これまで述べたいずれのSTA法も十分に高速なためこの点については特に問題はない。動画で問題になるのは動画を表示するディスプレイの形状が四辺形であることである。現在普及している動画表示装置（液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイ、LEDディスプレイ）は一般的に筐体の形状が四辺形である。そのため、単純にロバスト型STA法を動画に適用すると、ホスト画像領域でなく、ディスプレイ筐体の四辺形を検出してしまうことがある。また、マルチウインドウOSが管理しているディスプレイ上で動画を再生した場合は、動画再生ウインドウではなく、別のウインドウを検出してしまうこともある。そこで、本章では動画内のホスト画像領域を正しく検出するためのアイデアについて述べる。本章でベースとするSTA法は枠を付与する必要がなく、高いコーナ検出成功率を持つロバスト型STA法である。

7.2 最初の1フレーム内からのホスト画像領域検出

前章のロバスト型STA法では四辺形選択の評価基準として、端点位置、辺接続関係、コーナ形状、および面積を使用した。動画対応では処理の高速化をさらに押し進めるため、評価式を以下のような簡便なものに変えた。

- A = 四辺形の外周を構成する辺長の和
- B = 四辺形の外側へはみ出す辺長の和
- C = 四辺形の周囲長
- 四辺形候補の評価値 = $(A - B) / C$

辺候補端点同士が近いほど評価値は高くなり、辺候補端点が離れていたり、四辺形の外に飛び出していたりする場合は評価値は低くなる。実際に辺検出した場合の四辺形評価値の例を図7.1に示す。まず撮影画像中心から上下左右への4方向へ辺探索を行う。図7.1の場合は、上辺候補と左辺候補を各2本ずつ、下辺候補と右辺候補を各1本ずつ得る。次に辺組み合わせの評価値を総当たりで求めると、各評価値は図7.1下に示す様に、43, 34, 39, 99となる。これから評価値99の四辺形が求めるホスト画像であると判定する。評価値99の四辺形は、メディアプレイヤーの外周を構成しており、ホスト画像領域として正しい。ただし、本方法では動画表示装置の筐体外周全てが撮影画像に写っている場合は、ホスト画像ではなく動画表示装置の

筐体外周を検出する可能性がある．この問題に関しては，いずれが正解かの判定アルゴリズム実現が極めて困難なため，ユーザの選択動作で対応することとする．具体的には，誤った四辺形を選択した場合にはユーザに予め定めた切り替えボタンを押してもらい，切り替えボタンが押される度に検出四辺形を切り替えて行く．評価値の高い四辺形は高々数個なので，正しい四辺形を選択するまでにユーザのボタンを押す回数は高々数回で済む．

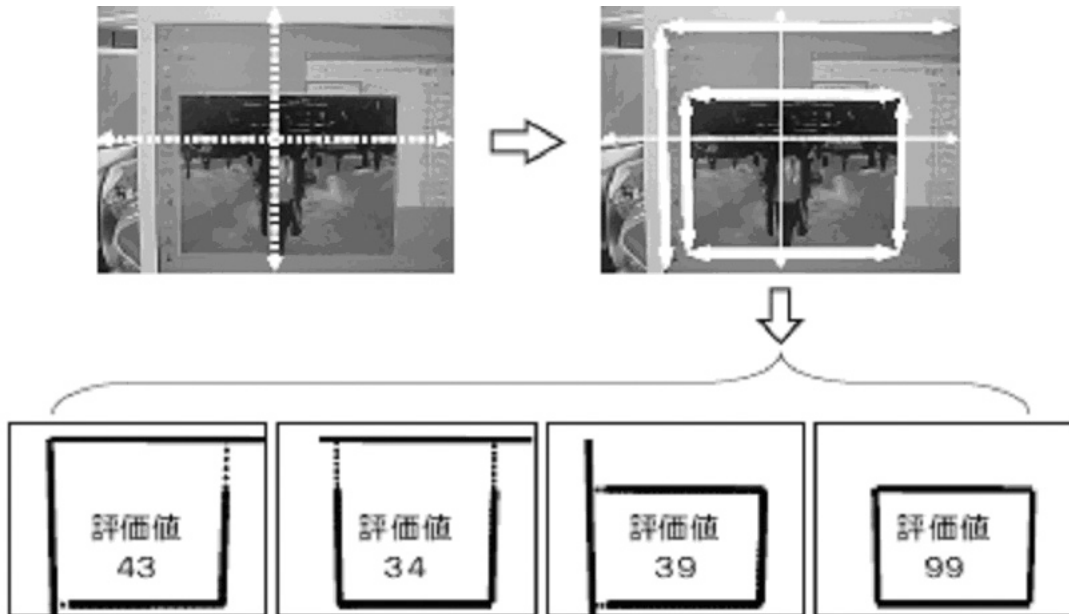


図 7.1: 辺探索経路 (上左) 検出した辺候補 (上右) 辺組み合わせによる四辺形評価値 (下)

7.3 次フレーム以降のホスト画像領域検出

次フレーム以降のホスト画像領域検出では，直前の正しい四辺形検出結果の知識があるため，ユーザの切り替え操作無しに正しい四辺形を検出可能である．直前の四辺形検出結果を用いて四辺形検出を行うことを本論文では「追跡」と呼ぶ．追跡では，直前の正しい四辺形の特徴量を記憶しておき，現フレーム中の候補四辺形の特徴量を求め，これら 2 特徴量が最も類似する候補四辺形を正しい四辺形とする．特徴量としてはフレーム間で殆ど変化しないことと，特徴量を算出するのに処理時間が小さいことが要求される．これらの条件を満たす特徴量について検討する．

始めにカメラの動きによる撮影画像への影響について考える．カメラは手持ちであることから，(1) 手ぶれや撮影者の移動によるシフト，(2) 手首の回転によるレンズ軸を中心とした回転，(3) 手首の回転によるヨー，ピッチ回転，(4) ズームの 4 つの動作がある．それぞれを図 7.2 に示す．(1) シフトと (2) 回転では四辺形の 4 コーナの絶対座標は変動するが，形状そのものは不変である．撮影対象とカメラは一定の距離が離れていることから，(3) のヨー，ピッチ回転はシフトと回転で近似できる．(4) ズームによって四辺形の大きさは変化するが，形状は不変である．したがって，4 つのカメラの動きにより，四辺形的位置は変化するが，形状の変化は小さいと考えられる．すると，四辺形追跡のための条件としては四辺形の相似条件を

チェックすれば良いことになる．四辺形の相似条件は「4個の角度が等しいこと」であるが，4個の角度を求める計算は，処理量的に大きくなってしまいうため，ここでは「4辺の長さの比が等しいこと」という条件を用いる．4辺の長さの比が等しくても，異なる形状の四辺形（正方形と菱形等）は存在するが，想定する撮影条件においては動画表示領域が菱形になるよう撮影することはないため，この条件で近似することとする．また，同一形状の四辺形が複数存在する可能性があるため，四辺形の大きさを表す特徴量として周囲長を合わせて比較することとする．

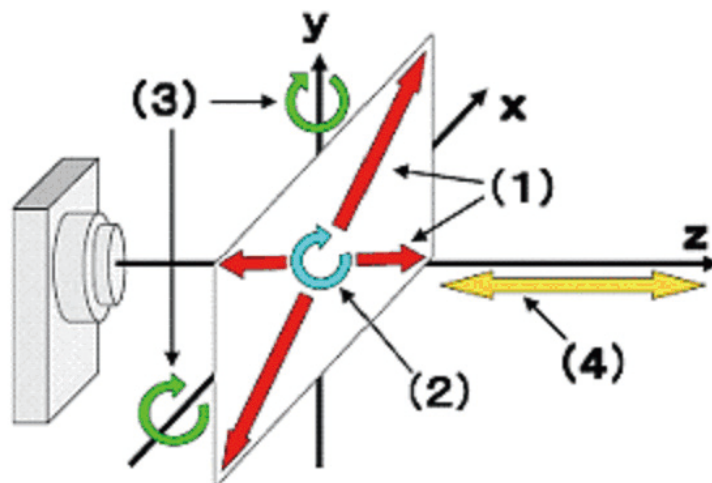


図 7.2: 想定されるカメラの動き

以上により，四辺形追跡のための特徴量として四辺形の4辺比と周囲長を用いて，直前フレームの正しい四辺形と，現フレームでの四辺形候補の特徴量比較を行い，それらの特徴量の差が最も小さい四辺形候補を現フレームでの正しいホスト画像として選択するという動画対応手法が設計できた．

7.4 実験と評価

7.4.1 実験条件

提案方法を市販のカメラ付き携帯電話機へ実装し，性能評価を行った．撮影画像サイズは240x320で，撮影環境は光量が一定で明るい室内（約800ルクス）である．

7.4.2 処理時間と参照画素数

まず処理時間を検証した．提案手法でのホスト画像領域検出にはロバスト型STA法を用いるため，撮影映像内に存在する線分の長さが処理時間へ影響を与える．そこで，撮影画像内に配置する四辺形の数と大きさを変化させることによりロバスト型STA法のアクセス画素数を変化させ，そのときの辺候補検出にかかる処理時間を計測した結果を図7.3に示す．図7.3に示すようにアクセス画素数が増えるほど処理時間が増大することが分かる．しかし，実際の図7.4左のようなPC画面内のメディアプレイヤーや図7.4右のようなTV画面を撮影する場合は長い線分は多くはない．図7.4左の場合はアクセス画素数が全画素数に対

し平均 9.9 %，処理時間が平均 5.5 ミリ秒，図 7.4 右の場合はアクセス画素数が全画素数に対し平均 8.6 %，処理時間が平均 4.8 ミリ秒であった．今回実験に用いた携帯端末の動画撮影フレームレートは 7.5fps であり，1 フレーム当たりの処理可能時間は約 130 ミリ秒である．この 130 ミリ秒の間に，ホスト画像領域検出，空間同期ずれ補正，電子透かし検出，キャプチャ画像の端末上への表示を全て行わなければならない．文献 [19] によると空間同期ずれ補正に 10 ミリ秒，電子透かし検出に 10 ミリ秒を要する．キャプチャ画像の端末上での表示処理は 70 ミリ秒である．したがって，ホスト画像領域検出処理に許される時間は 40 ミリ秒であるが，本実験で得られた平均 5.5 ミリ秒および平均 4.8 ミリ秒は，許容される 40 ミリ秒を十分に下回る結果となった．

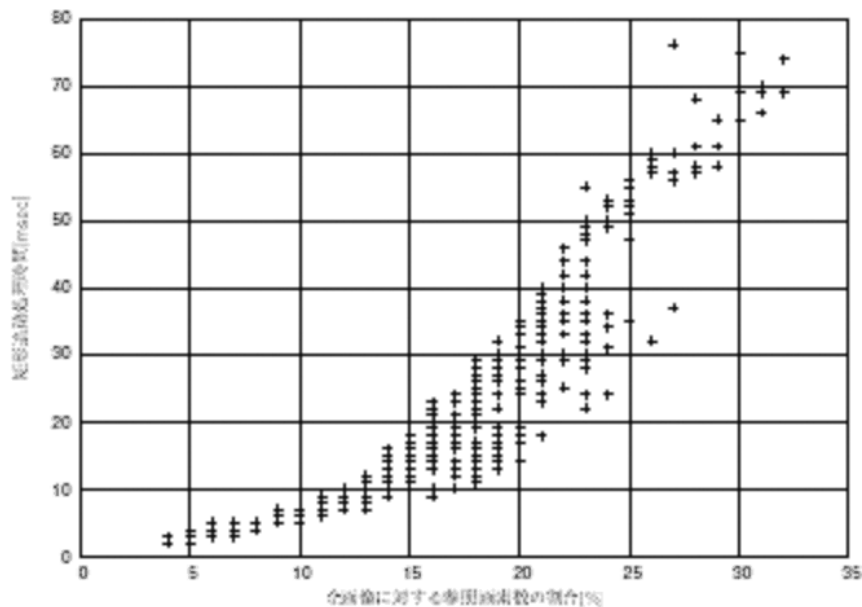


図 7.3: アクセス画素数と STA の線分検出時間

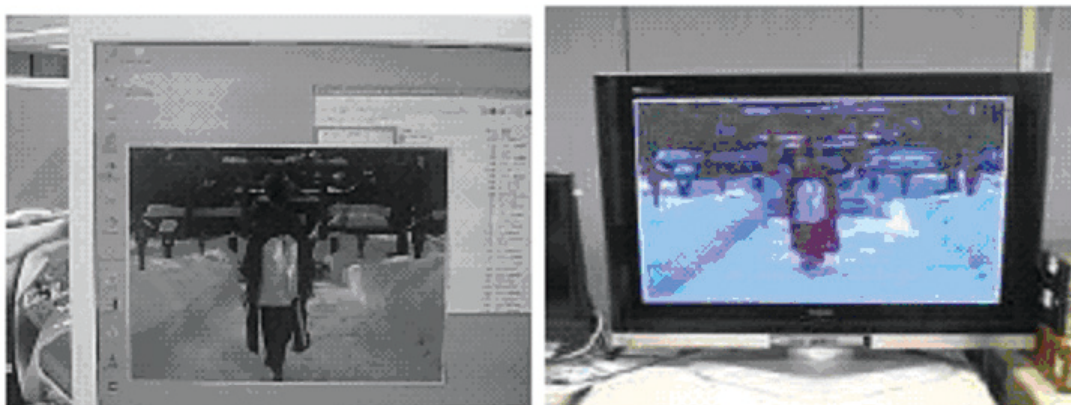


図 7.4: PC 画面上のメディアプレイヤー (左) プラズマディスプレイ (右)

7.4.3 四辺形検出の精度

動画対応手法により検出した四辺形の位置精度について確認する実験を行った．動画対応手法により検出した四辺形の4コーナー座標と，キャプチャ画像中の四辺形の真の4コーナー座標位置とを比較した．真の4コーナー座標の位置を求めるため，評価用テンプレートとして撮影対象サンプル画像の4コーナーの内側に市松模様のマーカを設置し，検出したマーカ位置を基準に真の4コーナー座標の位置を計算した．

試行は端末を固定した場合と手持ちの場合の2通りと，キャプチャ画像内での撮影対象四辺形の大きさを2通り変化させて行った．以上 2×2 の4通りの条件について100フレームキャプチャを1試行として，各3回ずつ試行した．デジタルズームは最大に固定した．検出位置誤差は，サンプル画像の辺長に対する座標ずれ量の割合として計測した．

実験結果を図7.5に示す．端末を固定した場合と動かした場合の誤差はほぼ同じであった．四辺形の大きさを小さく撮影した場合の方が誤差は小さかった．検出座標と正解座標の誤差は四辺形辺長に対し高々0.5%（約2画素）であり，文献[21]に記載の電子透かし検出が正しく行える精度を確保している．

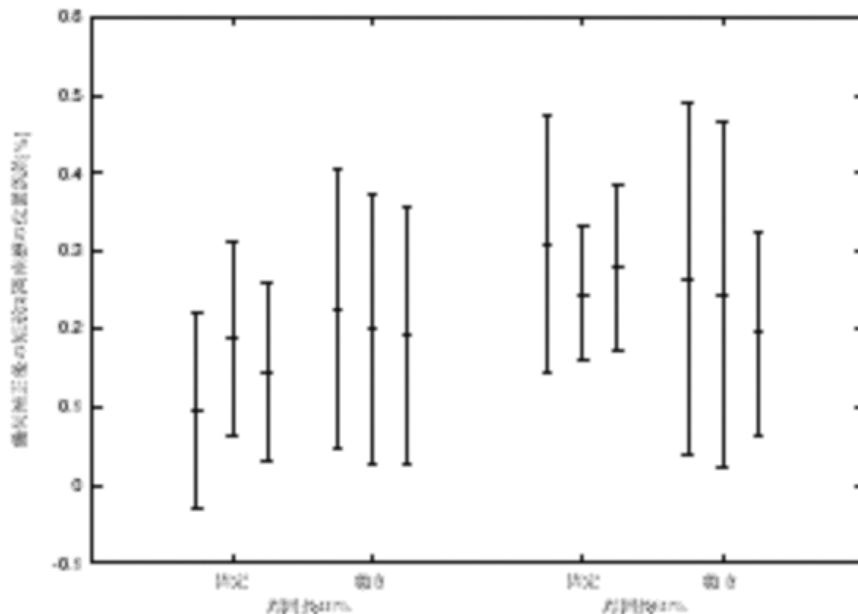


図 7.5: 検出座標ずれ量の平均値と標準偏差

7.4.4 四辺形追跡性能

複数の四辺形がキャプチャ画像に含まれる場合に，提案した4辺比と周囲長の特徴量で，どの程度の追跡性能があるかを評価した．実験用の撮影サンプルとして図7.6左の画像を用いた．撮影時間は300フレーム（約40秒）とし，サンプルの四辺形が撮影フレームから外れない範囲でカメラを自由に動かした（シフト，ロール回転，ヨー・ピッチ回転）．また，撮影の後半（図7.6右の中で縦線の表示してあるタイミング，横軸：198, 227, 248, 262）にはデジタルズーム操作を行った．図7.6右上図は4辺比の変化である．4つ

の四辺形の4辺比はカメラの動きとデジタルズームによる影響はなく、ほぼ一定の値を示している。四辺形A, B, Cは4辺比が互いに分離可能な値となっており、識別可能である。しかし、AとDは形状が似ていることから4辺比では分離が難しく、誤る可能性がある。一方、図7.6右下図は四辺形の周囲長の変化である。カメラ移動時(左側)では移動に応じて連続的に周囲長が変化している。デジタルズーム時(右側)ではズーム倍率に応じた周囲長変化が生じている。カメラ移動時は、周囲長を参照することで4つの四辺形は分離・追跡可能である。しかしデジタルズームにより周囲長が不連続になる部分では、誤る可能性がある。例えば198フレーム目の四辺形AとBでは最初はAを追跡していたのが、ズーム後にはBの追跡に変わり、誤追跡となってしまふ。したがって4辺比と周囲長の両方の特徴量を使うことで、互いの苦手な部分を補完し、四辺形の精度の高い追跡が可能になることがわかる。

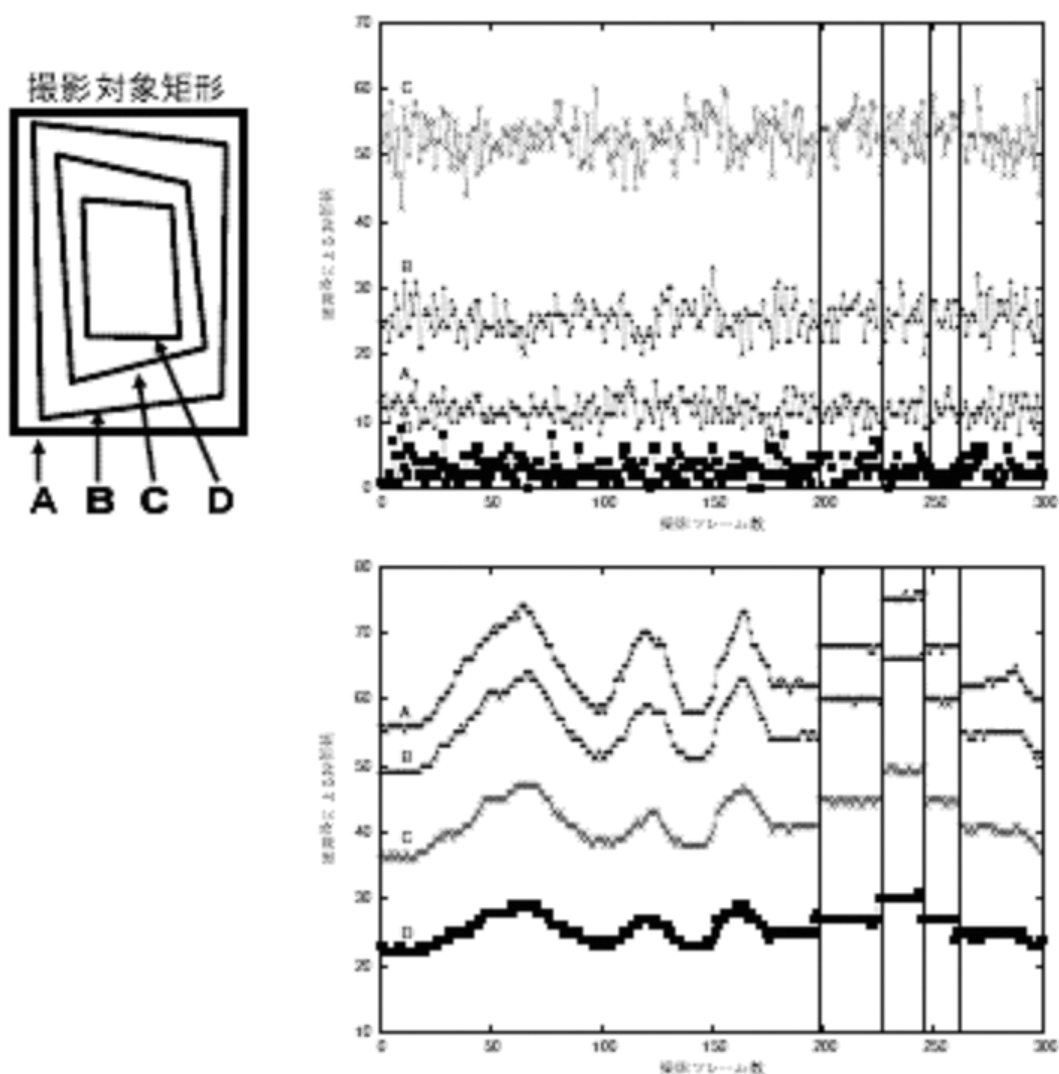


図 7.6: 撮影サンプル(左) 4辺比の変化(右上) 周囲長の変化(右下)

7.5 本章のまとめ

ロバスト型 STA 法を用いて動画内のホスト画像領域を検出する方法を検討した。動画では動画表示装置の筐体外周が四辺形をしているため、ホスト画像領域の四辺形ではなく表示装置の筐体外周の四辺形を誤って検出してしまうことが問題となる。この問題に対しては、第 1 フレームめは操作者によるマニュアル選択により正しい四辺形を選択し、以降のフレームでは直前のフレームで正しい四辺形とされた四辺形と相似となる四辺形を選択することで対応した。本動画対応方法は、撮影カメラが動いていても、ズーム操作を行っても正しい四辺形を選択し続けられることが実験により確認できた。

第8章 基本STA法の円形状への応用

本章で扱う問題は、撮影画像から円形の標識、マーカ、瓶のキャップ等を探す問題である。円や楕円形状を検出する方法としてハフ変換があるが、直線を探索するハフ変換に比べ非常に処理量が大きく、当然ながら携帯電話機でリアルタイムに処理することはできなかった。それに対して基本STA法は、探索オブジェクトがエッジで囲まれてさえいれば、その形状に関わらず検出することが可能なため、探索経路を以下のようによれば容易に円形状へも適用可能である（図8.1）。



図 8.1: 円形状検出の例

オブジェクト探索出発位置は画像の左端の中点を選び出発点とし（図8.2）、ゴール位置は撮影画像の右端の中点とする。寄り道は探索経路の曲率が連続するような制約を設けて隣接画素探索を枝切りし効率化する。可能な寄り道は全て行い、寄り道で見つけた全ての閉曲線を探索オブジェクトの候補とする。候補から最も確からしい探索オブジェクトを選ぶ基準は、面積最大/最小/エッジの曲率変化などを用途に応じて用いる。本応用は引用文献 [22] で採用されている。引用文献によると、ハフ変換にくらべ1万倍高速に円探索可能である。撮影画像は平面射影変換を受けており、元が真円であっても撮影画像中では歪んだ円になる。ハフ変換では歪んだ円を検出することは難しいため、この点でも本応用は優れている。

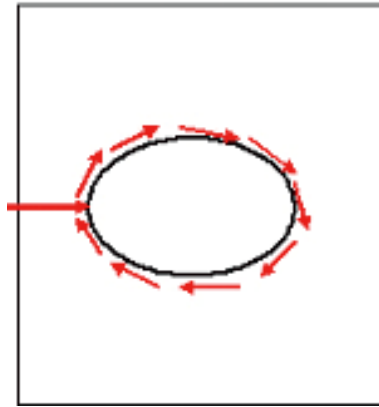


図 8.2: 円形状探索経路

第9章 STAの実用サービス，学術研究への貢献

9.1 実用サービスへの貢献

STAはその進歩性と高い効果から，2007年に登録特許 [26] として査定され，様々な実用サービスに供されている．

基本 STA 法は引用文献 [7] で利用されている．引用文献 [7] のサービスはNTT データ株式会社「パッとび」の名称でチラシや冊子に印刷されたホスト画像から，インターネットサイトへユーザを誘導することに用いられた．

ロボスト型 STA 法の動画対応版は，引用文献 [21] で利用されている．引用文献 [21] ではカメラ付き携帯電話機で動画を撮影しながら，動画中の四辺形領域すなわちホスト画像領域をリアルタイムに追跡することに成功している（図 9.1）．



図 9.1: カメラ付携帯電話機によるディスプレイ表示領域探索の例

また，枠利用型 STA 法は認証カードから顔写真領域を検出する用途で実用に供されている．本アルゴリ

ズムの高速性を利用して組み込み機器(図9.2)用のプロセッサにて認証カード撮影画像から顔写真領域をリアルタイムに抽出している。この装置はNTTコミュニケーションズ株式会社の汐留ビルに採用されており, 応接室の入退室管理に利用されている。本認証カードシステムに関しては2008年度のNTTコミュニケーションズ社の社長表彰を受賞した。また, 2007年度と2008年度のNTT R&Dフォーラムの受付端末としても採用され, 数千名の来場者の入場カードの処理を行った。



図 9.2: 認証カード読み取り装置

9.2 将来の応用可能性

STAの将来の応用可能性としては, カメラ付携帯電話による景観中の看板文字認識や, それを用いた外国語翻訳(図9.3, 図9.4)がある。また, カメラ付携帯電話と街頭ディスプレイを用いたアンケート調査(図9.5)などにも用いることができる。

9.3 学術研究への貢献

以下の電子透かし, 画像識別等に関する研究に利用されている。

- (1) 中村高雄, 片山淳, 山室雅司, 曾根原登, ”カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式,” 信学会論文誌, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2145-2155, Dec. 2004.



図 9.3: 景観中看板文字認識, 外国語翻訳 1

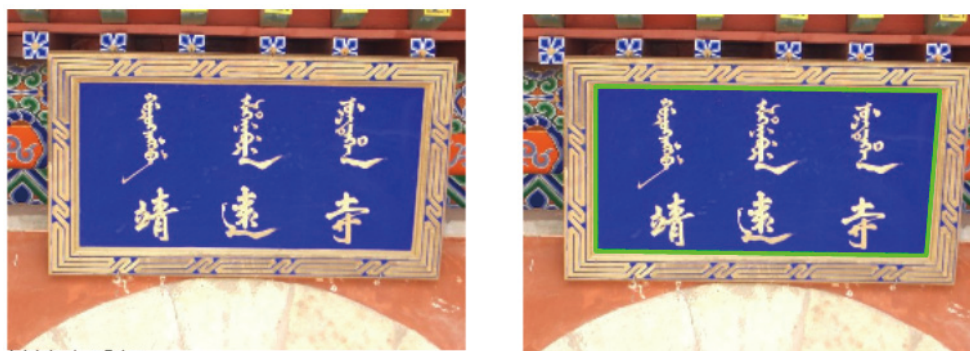


図 9.4: 景観中看板文字認識, 外国語翻訳 2

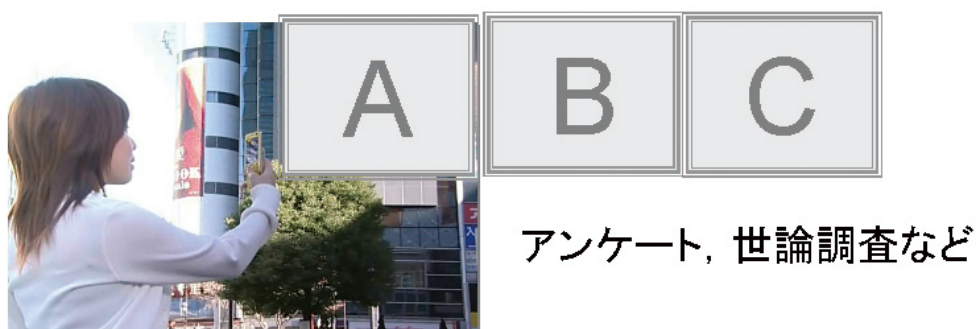


図 9.5: カメラ付携帯と街頭ディスプレイを用いたアンケート調査

- (2) 中村, 山本, 北原, 宮武, 片山, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし," 第13回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.161-166, 2005.
- (3) 相樂 恭宏, 高井 那美, 高井 昌彰, "実書籍に対する仮想情報付加による学習支援の提案," 情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告, 2005(123), pp.85-89.
- (4) 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, 安野貴之, 曾根原登, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし," 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp.426-434, Jul. 2007.
- (5) 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 片山淳, 安野貴之, 小池秀樹, 曾根原登, "SFPSS法に基づくリアルタイム検出可能な映像向けモバイル電子透かし," 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6, pp.1885-1895, Jun. 2008.
- (6) 阿部, 高田, 川村, 藤井, 小池, 曾根原, "カメラ付き携帯端末での撮影画像を対象とした劣化耐性のある静止画像識別方式," 情報処理学会論文誌, Vol.2, No.1, pp.10-21, Mar. 2009.

第10章 結論

本論文では、アナログ媒体からの電子透かし検出前処理としての空間同期ずれ補正技術の4つの課題を導き出した。そして課題を解決する方法を2種類、提案・検討した。1つめのSIFTを用いた対応点マッチング補正法はホスト画像にマーカを付加するなどの制約がなく、事前にホスト画像内容を知る必要がなく、四辺形以外の画像にも適用できる汎用性を持つことが特徴である。しかしながら処理時間が大きいという欠点があり、課題の1つである既存のカメラ付き携帯端末によるリアルタイム処理はできなかった。また、SIFTには平面射影変換を受けた画像では特徴点の検出精度が電子透かし検出には十分でないという問題もあった。それに対して2つめのSTAを用いた対応点マッチング補正法は、画像を全てアクセスすることなく処理を完了するという画像処理の新たなパラダイムを用いて、従来技術の100倍以上の高速画像処理を実現し(図10.1)、4つの課題を解決した。また、特徴点の検出精度では電子透かし検出に十分な高精度を実現した。

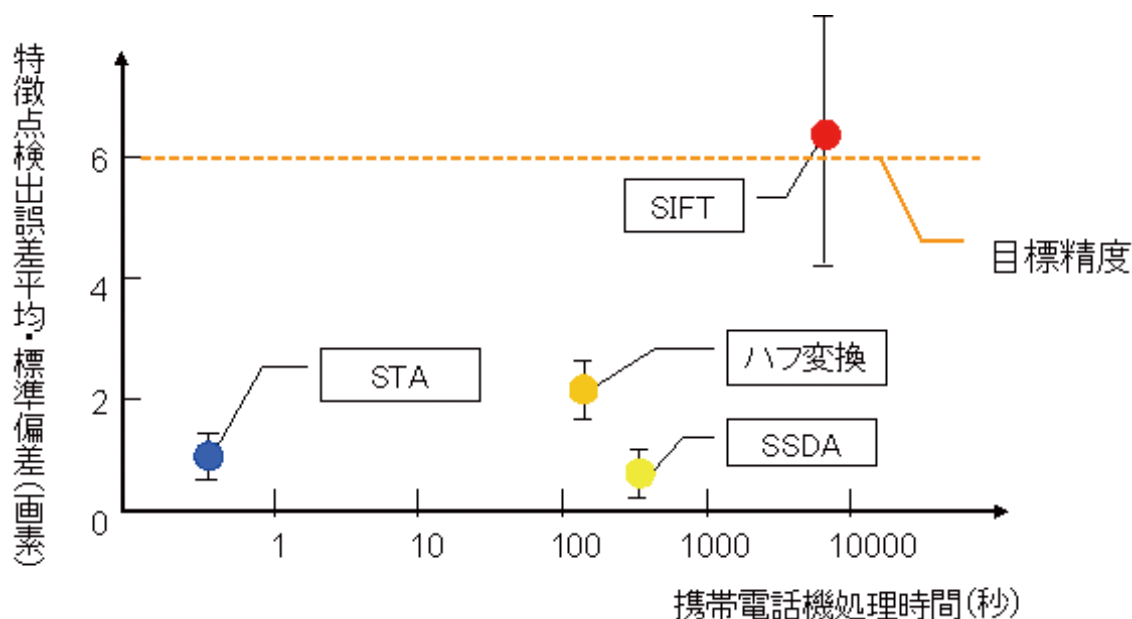


図 10.1: STA と従来方式の性能比較

STAの最終形であるロバスト型STA法によるホスト画像四辺形の検出は、辺候補を全て見つけた後に四辺形を構成する辺を評価・選択するという、ハフ変換を用いた四辺形探索と同じ戦略を取る。ハフ変換と比べるとロバスト型STA法は、処理が100倍以上速いだけでなく、辺を線分として見つけるという特徴を利用して正しい辺の評価・選択が高速かつ精度良く行える点で優れている。STAを用いた補正法は、既存の携帯電話機や組み込み機器のプロセッサ上でリアルタイムに動作することから、様々な用途に用いら

れている。ハフ変換，パターンマッチングおよび SIFT などの一般的な画像処理が組み込み機器のプロセッサでリアルタイムに処理できる見通しが立っていない現状を考慮すると，この先しばらくは STA のような新しいパラダイムに基づく画像処理が実用に使われ続けると期待している。

残された課題は，1 つめに検討した SIFT を用いた対応点マッチング補正法を実用レベルに引き上げることである。現在は処理速度と精度の問題から実用に使えないが，SIFT を用いる方法はホスト画像がエッジに囲まれていなくても利用可能であり，利便性において優れる。実用に使えない原因のひとつはプロセッサの処理能力に由来するものであるが，将来のプロセッサの処理能力向上を待つだけでなく，SIFT と同様の性質を持ちながら，処理量が小さい特徴量を考案することができれば実用レベルへの到達がさらに加速されるであろう。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なるご指導をいただいた、国立情報学研究所 情報社会相関研究系 曽根原登 教授に深謝いたします。

また、本研究の機会を与えてくれた国立情報学研究所 東倉洋一 副所長，ならびにNTTサイバーソリューション研究所 一之瀬進 元所長，ならびに本研究の応用についてアドバイスをいただいた東京電気大学 安田浩 教授，国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系 計宇生 准教授，ならびに画像処理についてアドバイスをいただいた国立情報学研究所 コンテンツ科学研究系 佐藤真一 教授，ならびに電子透かしについてアドバイスをいただいた国立情報学研究所 コンテンツ科学研究系 越前功 准教授，ならびに枠探索オペレータの有効性について示唆してくれたNTT サイバースペース研究所の高橋裕子さん，動画対応版を設計・実装してくれたNTT サイバースペース研究所の北原亮さんに感謝します。

また，研究仲間として議論し，アイデアの創出に大きく貢献してくれた，NTTサイバースペース研究所の中村高雄さんに感謝します。

参考文献

- [1] 片山淳, 外波雅史, 木村司, 山下博之, "コンテンツを起点に電子商取引に誘導するサービス仲介ゲートウェイ," NTT技術ジャーナル, Vol.14, NO.10, pp.24-27, 2002.
- [2] 日本特許, コーニンクレッカ フィリップス エレクトロニクス エヌ ヴィ, 透かし検出方法及び装置, 特表 2003-510931, 2003-3-18.
- [3] 日本特許, デジマーク コーポレイション, ステガノグラフィシステム, 特許第 3949679号, 2007-4-27.
- [4] 富士通, FPCode, <http://jp.fujitsu.com/solutions/fpcode/>
- [5] Toshiaki Iso, Shoji Kurakake, Toshiaki Sugimura, "Visual-Tag Reader: Image Capture by Cell Phone Camera," 2003 International Conference on Image Processing (ICIP2003), ProceedingsIII pp.557-560, Sep. 2003.
- [6] Ben Shneiderman, "Designing the user interface 3rd edition," ISBN:0-201-69497-2, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 1998.
- [7] 中村高雄, 片山淳, 山室雅司, 曾根原登, "カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式," 信学会論文誌, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2145-2155, Dec. 2004.
- [8] 片山淳, 中村高雄, 山室雅司, 曾根原登, "電子透かし読み取りのための i アプリ高速コーナ検出アルゴリズム," 信学会論文誌, Vol.J88-D-II, No.6, pp.1035-1046, Jun. 2005.
- [9] Takao Nakamura, Atsushi Katayama, Masashi Yamamuro, and Noboru Sonehara, "Fast Watermark Detection Scheme for Camera-equipped Cellular Phone," Proc. Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.101-108, College Park, Meryland, Oct. 2004.
- [10] Atsushi Katayama, Takao Nakamura, Masashi Yamamuro, and Noboru Sonehara, "New High-speed Frame Detection Method: Side Trace Algorithm(STA) for i-appli on Cellular Phones to Detect Watermarks," Proc. Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.109-116, College Park, Meryland, Oct. 2004.
- [11] NTT ドコモ, i モード, <http://www.nttdocomo.co.jp/english/service/imode/content/index.html>
- [12] 藤吉弘亘, "Gradient ベースの特徴抽出 - SIFT と HOG - ," 情報処理学会 研究報告 CVIM 160, pp. 211-224, 2007.
- [13] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale invariant features," Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.1150-1157, 1999.

- [14] 金谷健一, "3次元剛体運動の画像解析," 画像理解, 第1版第3刷, 森北出版, 1999, pp.79-114, ISBN:4-627-82140-9.
- [15] 金谷健一, "透視変換と射影幾何学," 画像理解, 第1版第3刷, 森北出版, 1999, pp.1-27, ISBN:4-627-82140-9.
- [16] 金谷健一, "カメラ回転と画像解析," 画像理解, 第1版第3刷, 森北出版, 1999, pp.40-78, ISBN:4-627-82140-9.
- [17] Richard O. Duda, Peter E. Hart, "Use of The Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures," Comm. ACM, Vol. 15, pp. 11-15, Jan. 1972.
- [18] D.I. Barnea and H.F. Silverman, "A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration," IEEE Trans. On Computers, Vol C-21, No. 2. Feb. 1972.
- [19] 北原亮, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "携帯端末上における幾何補正のためのリアルタイム四辺形追跡手法," 信学技報 Vol.106, No.351, ISEC2006-88, pp.1-6, Nov. 2006.
- [20] 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, 安野貴之, 曾根原登, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし," 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp.426-434, Jul. 2007.
- [21] 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 片山淳, 安野貴之, 小池秀樹, 曾根原登, "SFPSS法に基づくリアルタイム検出可能な映像向けモバイル電子透かし," 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6, pp.1885-1895, Jun. 2008.
- [22] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "iアプリ用高速四辺形検出アルゴリズム Side Trace Algorithm(STA)の円形状検出応用," 2008年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-15-13, May 2008.
- [23] 中村, 山本, 北原, 宮武, 片山, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし," 第13回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.161-166, 2005.
- [24] 阿部, 高田, 川村, 藤井, 小池, 曾根原, "カメラ付き携帯端末での撮影画像を対象とした劣化耐性のある静止画像識別方式," 情報処理学会論文誌, Vol.2, No.1, pp.10-21, Mar. 2009.
- [25] 日本特許, 富士通, 画像領域検出方法, 特開 2008-84014, 2006-9-27.
- [26] 日本特許, NTT, "縁検出方法及び装置及びプログラム及び記憶媒体及び枠検出方法及び装置及びプログラム及び記憶媒体," 登録第 4020093号, 2007.

著者発表論文

1. 学術論文

【総研大学入学以後の主著】

- [1-1] 片山淳, 中村高雄, 山室雅司, 曾根原登, ”電子透かし読み取りのためのiアプリ高速コーナ検出アルゴリズム,” 信学会論文誌, Vol.J88-D-II, No.6, pp.1035-1046, Jun. 2005.

【上記以外】

- [1-2] 中村高雄, 片山淳, 山室雅司, 曾根原登, ”カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式,” 信学会論文誌, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2145-2155, Dec. 2004.
- [1-3] T. Nakamura, A. Katayama, M. Yamamuro, and N. Sonehara, ”Fast Watermark Detection Scheme from Camera-captured Images on Mobile Phones,” International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (IJPRAI), Vol.20, No.4, pp.543-564, 2006.
- [1-4] 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, 安野貴之, 曾根原登, ”リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし,” 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp.426-434, Jul. 2007.
- [1-5] 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, ”単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし,” 信学会論文誌, Vol.J90-D-II, No.7, pp.1755-1764, Jul. 2007.
- [1-6] 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 片山淳, 安野貴之, 小池秀樹, 曾根原登, ”SFPSS法に基づくリアルタイム検出可能な映像向けモバイル電子透かし,” 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6, pp.1885-1895, Jun. 2008.
- [1-7] 片山淳, 外波雅史, 木村司, 山下博之, ”コンテンツを起点に電子商取引に誘導するサービス仲介ゲートウェイ,” NTT技術ジャーナル, Vol.14, pp.10, 2002.
- [1-8] 奥平雅士, 目黒眞一, 武藤伸洋, 片山淳, ”溶接作業ロボットシステムの開発,” NTT R&D 特集論文, Vol.47, No.7, pp.819, 1998.
- [1-9] 石井明, 金子透, 片山淳, 望月研二, ”アーク溶接ロボット用レーザ視覚センサ,” 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.96, 1998.

2. 国際会議論文・査読付レター

【総研大学入学以後の主著】

- [2-1] Atsushi Katayama, Takao Nakamura, Masashi Yamamuro, and Noboru Sonehara, "New High-speed Frame Detection Method: Side Trace Algorithm(STA) for i-appli on Cellular Phones to Detect Watermarks," Proc. Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.109-116, College Park, Meryland, Oct. 2004.
- [2-2] Atsushi Katayama, Ryo Kitahara, Harumi Kawamura, and Hideki Koike, "A Fragile Watermark for JPEG Pictures on Cell Phones Equipped with Cameras," The First International Workshop on Mobile Multimedia Processing (WMMP2008), Tampa, Dec. 2008.
- [2-3] Atsushi Katayama, Ryo Kitahara, Harumi Kawamura, and Hideki Koike, "A Photo Verification Technique Using Embedded GPS Data for Mounting in Programmable Portable Phone Terminal," IEEE International Conference on consumer Electronics (ICCE2009), pp.313-314, Las Vegas, Jan. 2009.

【上記以外】

- [2-4] Takao Nakamura, Atsushi Katayama, Masashi Yamamuro, and Noboru Sonehara, "Fast Watermark Detection Scheme for Camera-equipped Cellular Phone," Proc. Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.101-108, College Park, Meryland, Oct. 2004.
- [2-5] Takao Nakamura, Susumu Yamamoto, Ryo Kitahara, Atsushi Katayama, Takayuki Yasuno and Noboru Sonehara, "A Fast, Robust Watermark Detection Scheme for Captured Videos on Camera Phones," Proc. IEEE ICME2007, pp.316-319, Beijing, China, Jul. 2007.
- [2-6] Akira Ishii, Toru Kaneko, Atsushi Katayama, "A Laser Vision Sensor for an Arc-Welding Robot," 3rd France-Japan Congress & 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.166, 1996.
- [2-7] 片山淳, 宮地寿人, 木村司, 山下博之, "不統一対象属性を利用する協調フィルタリング推薦方式の検討," 情報科学技術フォーラム情報技術レターズ, Vol.2. pp.379, 2003.

3. 発表・シンポジウム・研究会など

【総研大学入学以後の主著】

- [3-1] 片山淳, 曾根原登, 東倉洋一, "カメラ付携帯電話機向け画像平面射影補正の検討," 画像電子学会 第33回年次大会予稿集, pp.171-172, Jun. 2005.
- [3-2] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "i アプリ用高速四辺形検出アルゴリズム Side Trace Algorithm(STA) の円形状検出応用," 2008年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-15-13, May 2008.
- [3-3] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "カメラ付き携帯電話機用フラジャイル電子透かし," 信学会第4回マルチメディアハイディング研究会, 23rd Jul. 2008.

- [3-4] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "JPEG 直接埋め込みに対応したカメラ付き携帯電話機用フラジャイル電子透かし," The Proceedings of the 13th Image Media Processing Symposium (IMPS2008), pp.61-62, 伊豆市, Oct. 2008.
- [3-5] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "アルゴリズム公開型フラジャイル電子透かし," ITE Technical Report Vol.33 No.8, pp.9-12, 東京, Feb. 2009.
- [3-6] 片山淳, 北原亮, 川村春美, 小池秀樹, "アルゴリズム公開型フラジャイル電子透かし," Proceedings of the 2009 IEICE General Conference, DS-3-1 マルチメディア情報ハイディングシンポジウム, 松山, Mar. 2009.
- 【上記以外】
- [3-7] 片山淳, 中山丈二, "自動露光調整機構を持つレーザレンジセンサ," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'01 講演会, 1P1-M1, 2001.
- [3-8] 北原亮, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "携帯端末上における幾何補正のためのリアルタイム四辺形追跡手法," 信学技報 Vol.106, No.351, ISEC2006-88, pp.1-6, Nov. 2006.
- [3-9] 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし," 情報科学技術フォーラム, LJ-009,2006.
- [3-10] 石井明, 金子透, 片山淳, "アーク溶接ロボット用レーザ視覚センサ," 第1回非破壊検査画像処理特別研究委員会オープンセミナー, 1996.
- [3-11] 清原裕次, 久貝克弥, 井澤明, 目黒眞一, 片山淳, 毛利忠, "ロボット溶接における, レーザ光を使用した溶接線做いシステムの開発," 溶接学会溶接法研究委員会報告第156回, No.SW-96, 1996.
- [3-12] 中山丈二, 片山淳, "多重反射に適用可能なレーザレンジセンサのための信号処理方法," 第4回画像センシングシンポジウム, 1998.
- [3-13] 荒川賢一, 望月研二, 片山淳, 柿崎隆夫, 大名新治, "シーリングロボットシステムのための作業目標点検出法," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'98), II-345, 1998.
- [3-14] 中村高雄, 片山淳 他, "カメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システムのための電子透かし検出方式," 情報科学技術フォーラム, N-20, 2003.
- [3-15] 松村季樹, 山田正紀, 片山淳, 山下博之, "シナリオ制御コンテンツ連携視聴/再生に関する一考察," 情報科学技術フォーラム, LO-005,2003.
- [3-16] 山田正紀, 松村季樹, 片山淳, 山下博之, "シナリオを用いた情報通知システムの実装と考察," 情報科学技術フォーラム, O-016,2003.
- [3-17] 宮地寿人, 片山淳, 木村司, 山下博之, "アフィリエイト型バイラルマーケティング制御方式," 情報科学技術フォーラム, O-022,2003.
- [3-18] 木村司, 宮地寿人, 片山淳, 山下博之, "関連サービス紹介システムにおけるメタデータを用いたサービス自動登録方法," 情報科学技術フォーラム, O-041,2003.

4. 特許

- [4-1] 登録第 2989593 号, "距離測定装置," 1998.
- [4-2] 登録第 3020485 号, "距離測定方法, 距離測定装置及び距離測定プログラムを記録した記録媒体," 1998.
- [4-3] 登録第 3668588 号, "3次元曲線記述方法 / 装置 / プログラム記録媒体," 1997.
- [4-4] 登録第 3938543 号, "接写機能付き携帯端末," 2002.
- [4-5] 登録第 3888549 号, "電子透かし検出システム," 2003.
- [4-6] 登録第 3999159 号, "コンテンツ関連情報提供システム, コンテンツ関連情報提供方法," 2003.
- [4-7] 登録第 4020093 号, "縁検出方法及び装置及びプログラム及び記憶媒体及び枠検出方法及び装置及びプログラム及び記憶媒体," 2007.
- [4-8] 登録第 3985903 号, "画像圧縮方法およびそれを利用した電子透かし埋め込み方法, 並びにプログラム," 2007.

その他, 出願多数.