

擬似オルソ空間を用いた空撮画像のレジストレーション

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2015-12-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 飯倉, 宏治 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00009280

静岡大学 博士論文

擬似オルソ空間を用いた空撮画像の
レジストレーション

2015 年 6 月

創造科学技術大学院
自然科学系教育部
情報科学専攻

飯倉 宏治

目次

第 1 章	はじめに	9
第 2 章	先行研究	13
2.1	特殊な装置を用いるもの	13
2.2	低空飛行を用いるもの	14
2.3	複数の方向から撮影した鳥瞰画像を活用するもの	14
2.4	人手の介在を必要とするもの	15
2.5	事前に真上から撮影した画像を用いるもの	16
2.6	空撮画像と地図画像等との対応に関するもの	16
第 3 章	擬似オルソ空間と擬似オルソ化画像	17
3.1	擬似オルソ空間の定義	17
3.2	擬似オルソ化画像	21
3.3	鳥瞰画像中の単一線分を用いた消失点推定	26
3.4	擬似オルソ空間の構築と擬似オルソ化画像の生成	28
第 4 章	擬似オルソ化画像を用いた焦点距離推定	35
4.1	消失点と焦点距離の関係	35
4.2	擬似オルソ画像を用いた焦点距離の自動推定	35
第 5 章	幾何学的レジストレーション	43
5.1	注視点の推定および緯度経度空間へのレジストレーション	43
5.2	誤差解析	46
第 6 章	地図情報を用いた幾何学的レジストレーションの誤差補正	65
6.1	レジストレーション先の地図画像生成	65
6.2	地図画像を用いた準オルソ化画像の補正	71
6.3	結果と考察	76

第 7 章	結論	85
参考文献		87
付録 A	運動方向と地表平面法線に関する補足	95
A.1	動きの消失点による運動方向の復元	95
A.2	擬似オルソ空間に関するもの	96
付録 B	レジストレーション結果	97
付録 C	系番号	103
付録 D	GPGPU による適合度計算プログラム	105
謝辞		107

目次

1.1	航空機から撮影された動画像の例	11
3.1	画像座標系とカメラ座標系	18
3.2	カメラ座標系と画像座標系との対応	19
3.3	カメラ空間と正規カメラ空間	20
3.4	オルソ空間の各基底ベクトル	23
3.5	鳥瞰画像中の 4 点を指定した消失点推定	27
3.6	Harris 作用素にて求めた特徴点	31
3.7	信頼できるオプティカルフローと信頼できないオプティカルフロー	32
3.8	航空機の移動によって生じる平行線	33
3.9	擬似オルソ化画像の例	34
4.1	地表平面上にて直角をなすであろうと思われる線分の例	36
4.2	3 点を指定して鳥瞰画像をレジストレーションした例	39
4.3	擬似オルソ化画像では角度が保存されない様子	40
4.4	エッジ角度の分布状況	41
4.5	擬似オルソ化画像を用いて推定された主要な角度方向	42
5.1	準オルソ空間とカメラ空間	44
5.2	注視点推定および幾何学的レジストレーションの様子	59
5.3	正規カメラ空間における航空機の進行方向角度誤差	60
5.4	航空機の進行方向誤差が与える擬似オルソ化画像上での角度誤差	61
5.5	方向ベクトルの地表平面上における誤差角度	62
5.6	消失点と焦点距離の図形的解釈	63
5.7	地表平面上での角度誤差が焦点距離推定に与える誤差	64
6.1	ラスタライズした DM データの一部	71

6.2	外乱となり得る部分の除去	72
6.3	評価対象点の抽出方法	80
6.4	線分の角度情報を埋め込んだ地図画像	81
6.5	レジストレーション誤差が大きい場所	82
6.6	レジストレーション誤差が小さい場所	83
B.1	実験 1 のレジストレーション結果	98
B.2	実験 2 のレジストレーション結果	98
B.3	実験 3 のレジストレーション結果	99
B.4	実験 4 のレジストレーション結果	99
B.5	実験 5 のレジストレーション結果	100
B.6	実験 6 のレジストレーション結果	100
B.7	実験 7 のレジストレーション結果	101
B.8	実験 8 のレジストレーション結果	101
B.9	実験 9 のレジストレーション結果	102
B.10	実験 10 のレジストレーション結果	102

表目次

5.1	各オルソ空間の特性を示した表	45
6.1	DM データを構成するレコードの例	70
6.2	実験結果	77
6.3	レジストレーションパラメータの変化量	77
6.4	得られたレジストレーションパラメータの値	78
6.5	誤差補正に要した時間	79
C.1	系番号と地域	104

第 1 章

はじめに

航空機による地表面の状況把握は、その機動性により ITS (Intelligent Transport System) への活用 [46, 58, 88] や災害時における被災状況の推定 [59, 60, 62, 82, 89] など、我々の生活に関わる情報を効率的に得る方法として期待されている。消防庁および警視庁は、ヘリコプターからの映像を地上に転送するヘリテレ（ヘリコプターテレビシステム）やヘリサット（ヘリコプター衛星通信システム）を用いた情報収集体制の重要性を認めており [94, 97]、GIS(Geographic Information System) と連携するヘリテレも登場してきている [73, 80]。これは空撮画像を地図上に重ね合わせて表示するシステムであり、被撮影領域に関する知識（いわゆる土地勘）を有していなくとも、地図を用いた具体的な場所の状況把握を可能とする。このようなシステムでは空撮画像の注視点推定などを必要とするが、航空機の真下を撮影する場合は注視点と航空機の緯度経度は等しくなるため、比較的容易に空撮画像を地図に重ね合わせることが可能である。しかし、搭乗員が機内から撮影する場合などでは、その画像は航空機の斜め下を撮影した画像（これを鳥瞰画像とよぶ）となり、地図へと重ね合わせるために様々な工夫を要する。

鳥瞰画像と地図など、2 つの画像間に存在する関係性を用いて画像を重ねあわせることをレジストレーションという [6]。先行研究として、既にいくつかの方法が提案されているが、これらは以下の 5 種類に分類される：

- 特殊な装置を用いるもの
- UAV(Unmanned Aerial Vehicle) などを用い、低空飛行を行うもの
- 複数の方向から撮影した画像を用いるもの
- 人手の介入を必要とするもの
- 事前に真上から撮影した画像を用いるもの

ここに挙げた項目は、それぞれの手法における必要な条件であり、言い換えれば、各手法における制約に他ならない。提案手法では、鳥瞰映像と今や一般的となった GPS からの情報を用

いた幾何学的な処理を活用し、

- 大がかりで特殊な装置を用いることなく、
- 法律で定められている飛行高度を飛行する有人航空機より、
- 被撮影領域を一方向からだけ撮影した空撮映像を用い（図 1.1）、
- 人手の介在を必要とせず、
- 事前に真上から撮影した空撮画像も必要とせず、

鳥瞰画像の地図画像へのレジストレーションを可能とする。これは既存の方法に比べて制限が少ない方法であり、このような方法はこれまでに存在していない。もちろん、本方法においてもいくつかの制限は存在するが、これらの制限は航空機の飛行に関するものや撮影方法に関するものがほとんどであり、撮影に要する時間も短時間であるため、現実的かつ弱い条件となっている。災害時においては、情報収集活動よりも救助活動や物資輸送のために航空機が使用されることが多い状況であるが [57]、本方法を用いることにより、救助活動・物資輸送を主目的とした航空機であっても、機内から搭乗員により撮影された鳥瞰画像と地図との連携が期待できる。

提案手法では、鳥瞰画像の地図へのレジストレーションは2段階に分けて処理される。ひとつは、幾何学的に鳥瞰画像の注視点推定ならびに地図へのレジストレーションを行う処理である。これを幾何学的レジストレーションとよぶ。使用するGPSの測定精度等により、この処理だけでは誤差が大きく、そのままでは防災活動等に使用することができない。そのため、2段階目の処理として、地図情報を参照しつつレジストレーション精度を高める処理を行う。これを誤差補正処理とよぶ。

幾何学的レジストレーションにおいては、擬似オルソ空間と名付けた正規直交基底が本質的な働きをする。擬似オルソ空間は本研究にて導入された空間であり、その定義ならびに具体的な構築方法については本論文中にて述べる。この空間は鳥瞰映像から情報を取り出して構築されるが、一般的にレンズにはレンズ歪と呼ばれる歪が存在し、実写画像から情報を取り出す際にはこれらレンズ歪の除去が行われることも多い。本研究でもレンズ歪の除去を行ったのち、擬似オルソ空間構築に必要な情報を取り出すこととする。擬似オルソ空間構築後は、この空間を活用して鳥瞰画像の変形に必要な情報を求め、擬似的に真上から撮影した画像を生成する。この画像を本研究では擬似オルソ化画像とよぶ。鳥瞰画像と擬似オルソ空間・擬似オルソ化画像を連携させることにより、鳥瞰画像中のひとつの線分から、その線分を延長した直線の消失点を得ることが可能となる。また、擬似オルソ化画像では、鳥瞰画像に含まれていた遠近歪が除去されており、地表平面上での平行性も保持されるという特性がある。この性質を利用して焦点距離の推定を行い、幾何学的レジストレーションに活用する。提案手法では、航空機は地表面に対し平行に飛行することを条件として設けているが、この条件を厳密に満たすことは困難である。そのため、実際の飛行において生じる誤差の影響についても考察を行う。



図 1.1 航空機から撮影された動画像の例

誤差補正処理では、適合度を導入して幾何学的レジストレーションに対する鳥瞰画像の変形と地図画像上への配置に関するパラメータを求める。しかし、鳥瞰画像を変形した画像には建物や地形の倒れこみが存在するため、適合度の定義は自明ではない。また、地図上では途切れることのない道路などが、建物の倒れ込みにより遮られ、途切れてしまうなどの状況も発生する。その他、地図には存在するが空撮画像には存在しない建物や、逆に空撮画像には存在するが地図には存在しない建物など、情報の不整合に関する問題もある。このように鳥瞰画像を変形して作られた画像は、ほとんどの場合、地図画像と完全に一致することはない。鳥瞰画像の地図へのレジストレーションは、完全に一致することのない画像同士を意味のある状態で重ね合わせなければならないことに他ならず、加えて、これら 2 つの画像はそれぞれ実写と線画であるため、さらに問題が複雑となる。本研究では適合度を 2 つの画像中に含まれるエッジを用いて定義し、参照する地図情報は幾何学的に情報が格納されている DM データを用いることとする。この地図情報は計算機上で利用可能なデジタルデータであり、地図画像生成の際にはラスタ化という処理が必要となるが、地図中の線分方向などを正確に取得できるという利点がある。また、地方自治体で所有していることも多く、簡単な手続きのみで利用可能な場合も多い。一方、DM データの読取り方法（パージングの方法）についてはまとまった情報を見つけることができなかったため、本論文中にて具体的な読取りプログラム（パーサプログラム）の作成を念頭においた説明も行う。本研究では、入手が容易である一般的な計算機をレジストレーション処理に用いることを念頭においているが、高い適合度が得られるレジストレーションパラメータの探索には多くの計算量を必要とする。そのため、計算量の軽減や処理の並列化は必須であり、これらについても本論文中にて言及する。

幾何学的レジストレーションおよび誤差補正処理を用いて、最終的に本研究が目指すレジストレーションの精度は道路部での誤差 6m 以内とした。これは空撮画像の分解能から決定された値ではなく、災害時の消防防災活動での利用を想定し、画像内の街区と地図内の街区のずれが消防活動用道路の幅員 6m [70, 83] を超えないことを目標としたためである。浜松市ならびに浜松市消防局作成の実データを用いた実験においては、いずれの結果においてもこの目標誤差範囲内に収まっていることが確認できた。冒頭に述べた航空機による情報収集をとりまく状況を鑑みると、制約条件が少なく、かつ、自動的に空撮画像と地図とが連携できる本研究の

意義は十分にあると考える。

第 2 章

先行研究

鳥瞰画像を地図へレジストレーションする方法については、これまでに様々な方法が報告されている。ここでは、これら先行研究を以下の 5 種類に分け、その特徴と本研究との違いについて述べる。

1. 特殊な装置を用いるもの
2. 低空飛行を用いるもの
3. 複数の方向から撮影した鳥瞰画像を用いるもの
4. 人手の介入を必要とするもの
5. 事前に真上から撮影した画像を用いるもの

また、空撮画像の地図画像へのレジストレーションでは、実際の空撮写真を変形し、線画で描かれた地図画像に重ね合わせることに他ならない。これら空撮写真と地図画像との対応付けに関する先行研究と本研究の違いについてもここで述べる。

2.1 特殊な装置を用いるもの

鳥瞰画像を撮影したカメラの光軸が指し示す場所を、鳥瞰画像の注視点と呼ぶこととする。航空機に搭載したカメラの緯度経度および高度ならびに光軸方向が既知であれば注視点の推定は容易に行うことができる [11, 33, 52]。これらの情報に加え、カメラの焦点距離も既知である場合、具体的なカメラの視錐体を求めることも可能となる。この視錐体により切り取られる地表面領域こそが鳥瞰画像をレジストレーションすべき地図画像上の場所に他ならず、その結果、鳥瞰画像の地図へのレジストレーションは容易に行うことができる。

野々山ら [98] は、これらの情報を GPS/IMU(Global Positioning System / Inertial Measurement Unit)[43] を用いて取得し、撮影した鳥瞰画像を実時間で地図上へレジストレーションするシステムを提案している。また、IMU ではなく他の装置を用いることにより、撮影時

のカメラ角度を用いる方法も既に提案されている [28, 37]。

このように、GPS/IMU は非常に有益な情報を提供する装置ではあるが、残念ながらすべての航空機が有している装置ではない。一方、GPS は今や数多くのスマートフォンに搭載される一般的な装置である。本研究では IMU などの特殊な装置を用いることなく、GPS の値と映像のみからレジストレーションに必要な情報を取り出し、活用する。提案手法では、カメラの焦点距離は未知であるとし、事前にカメラの校正は必要としない。しかし、レジストレーションの際には焦点距離の具体的な値が必要となるため、画像処理により焦点距離の推定を行う。本研究は GPS/IMU を搭載しない航空機であっても地表面の状況把握に活用できるような方法を模索するものであり、上で紹介した方法とは目的が異なっている。

2.2 低空飛行を用いるもの

この方法は、建物の垂直方向稜線を用いてレジストレーションを行う方法である。撮影に使用するカメラのおおよその焦点距離は既知であるという条件の下、鳥瞰画像に収められた建物の垂直方向稜線と地籍情報を用いることにより、特殊な装置を必要とせず、かつ、人手による画像間の対応処理も必要とすることなく、被撮影領域の推定が可能であるという利点をもつ [29]。しかし、鳥瞰画像に収められた建物の垂直方向稜線を用いるため、ある程度の大きさで建物が鳥瞰画像に収められている必要がある。もちろん、鳥瞰画像に写る建物の大きさは建物の物理的大きさと撮影高度との関係により変化する。低空飛行を行うことにより、小さな建造物であっても十分に大きく写すことが可能である。そのため、偵察用の UAV など小型無人飛行体を用いれば、この方法は高層建造物が存在しない地域に対しても適用が可能である。しかし我が国では、有人航空機に対し飛行高度の制限が存在し [74, 75]、低空飛行には限度がある。そのため、低層住居地などでは垂直方向に伸びる長い稜線を鳥瞰写真中に含めることができないという状況も発生し得る。本研究では有人航空機を活用する方法を考えており、上で紹介した方法とはそもそもの前提条件が大きく異なっている。またこの方法では、撮影に使用するカメラの焦点距離に関しても事前にある程度の値を知っておく必要があり、これは焦点距離が可変である、いわゆるズームレンズを用いる場合などでは、たとえ撮影中に焦点距離を変化させない状況であっても適用することが難しいという問題を含んでいる。

2.3 複数の方向から撮影した鳥瞰画像を活用するもの

GPS / IMU などの特殊な装置を用いることなく、画像からカメラの姿勢を推定する方法は存在する。特に被写体の 3 次元位置とカメラの姿勢を同時に求める SfM (Structure from Motion) に関しては数多くの研究が行われている状況である [20, 23, 38, 44, 48]。災害などの突発的な事象に対応することを考えた場合、事前のカメラ校正を必要としない、SfM の活用

が望ましい。未校正なカメラを用いての SfM では自校正 [2, 22] による焦点距離推定が重要となるが、これには対象領域を様々な角度から撮影した画像が用いられる。UAV を使用する場合など、低空飛行が可能な場合であれば、異なる位置からの撮影に要する手間はそれほど多くはかからない [7]。しかし、有人航空機での撮影を想定している場合、ある高度以上を飛行しなければならず、様々な方向から同一地域を撮影するためには時間も手間も必要となる。また、安定に飛行する航空機から撮影された映像では、撮影中にカメラを故意に動かさなければ、映像中の各フレームは並進するカメラによる画像となる。このとき、それぞれの画像に関するカメラ光軸は全て平行となる。これは自校正にとって致命的な運動シーケンス (Critical Motion Sequences) として知られており、このような映像からは、自校正により焦点距離を求めることはできない [18]。本研究では、対象の地表面を一度だけ、かつ、できるだけ短時間で撮影し、その映像中のひとコマを地図へとレジストレーションする方法を考えている。そのため、これら SfM の手法をそのまま活用することは困難である。

2.4 人手の介入を必要とするもの

鳥瞰画像の地図へのレジストレーションのために、人手を用いる方法も提案されている。これらは作業員が介入するため、人間が認識できる程度の画質であれば、鳥瞰画像を地図へとレジストレーションできるという利点がある。しかし、人手の介入を必要とせず、自動的に地図へとレジストレーションする方法を本研究では考えているため、これらの方法とはそもそもの目的が異なっている。

鳥瞰画像には遠近歪が存在するため、地図画像上へのレジストレーションでは、この歪を除去する必要がある。射影変換行列 (ホモグラフィ行列) を用いることにより、遠近歪が除去されることはよく知られており [12, 35, 39]、鳥瞰画像中の位置と地図画像中の位置との対応が 4 つあれば、この射影変換行列を具体的に求めることが可能となる [31]。この方法ではカメラの校正 [54, 64] を必要としないため、未校正なカメラでもレジストレーションが可能であるという長所もある。地図上の位置が既知である点 (コントロールポイント) と、鳥瞰画像中の点とを手作業にて対応付けを行う方法も既に提案されている [5, 36, 51]。鳥瞰画像と事前に真上から撮影した画像を、点对応ではなく線分での対応により、レジストレーションに活用する方法も提案されている [8]。この線分間での対応も、本質的には点对応と同値である。人手の介入を必要とする方法では、対応づけを行うのは人間の作業員であるため、オルソ画像の代わりに地図画像を用いることも考えられる。

少し変わった方法では、地図ではなく、DEM (Digital Elevation Model) [41] を活用するものも報告されている [28]。この方法では、DEM を用いて CG (Computer Graphics) にて鳥瞰画像を生成し、この CG 画像と、実際に撮影された鳥瞰画像が同様になるよう、人手にてカメラパラメータを模索する方法である。

2.5 事前に真上から撮影した画像を用いるもの

レジストレーション先の領域に関し、事前に正射画像（以下、オルソ画像と呼ぶ）を作成しておき、このオルソ画像と鳥瞰画像の対応付けを用いる方法である。これは、アフィン変換不変な特徴量 ASIFT[42] などを用いることにより作業者の介入を必要とすることなくレジストレーションを可能とする [26]。本研究は、オルソ画像を経由することなく、直接地図画像へとレジストレーションを行う方法を目指すものであり、これらの研究とも前提条件が異なっている。

2.6 空撮画像と地図画像等との対応に関するもの

地図画像はイラストレーションであり、鳥瞰画像は写真である。提案手法の誤差補正処理では、鳥瞰画像を変形した擬似的なオルソ画像を地図情報を用いて補正し、最終的なレジストレーションに使用する。そのため、写真と地図画像との対応付けに関する先行研究についてもここで紹介しておく。

Dowman ら [14] は、田畑や森林などがそれぞれの領域ごとに異なる濃度にて空撮画像に収められることを利用し、それらを多角形で近似することにより地図画像と対応させる方法を提案している。また、Tian ら [50] は、空撮画像と地図画像から取り出した特徴点の間に距離を定義し、それらを用いてレジストレーションを行う方法を提案している。いずれの方法も真上から撮影された空撮画像を対象としており、空撮画像に平行移動や拡大縮小などを施し、地図へのレジストレーションを行う方法である。

レジストレーションに際し、空撮画像を変形するのではなく、地図に対し変形を行う方法も提案されている。上瀧 [87] らは、ASM(Active Shape Model)[10] を活用して、ベクタで表現された道路ネットワークを空撮画像へ対応させる方法を提案している。これは、空撮画像が正確であり、地図の方に誤差が含まれるという考え方に基づくものである。

本研究は、鳥瞰画像を対象とするものであり、また、地図情報は正確であるという前提のもとに鳥瞰画像を地図へとレジストレーションする方法を提案するものである。鳥瞰画像を取り扱うため、空撮画像中に建物や地形の倒れこみも存在する。鳥瞰画像の変形に際しては、拡大縮小・回転のみならず、せん断変換や射影変換を施す必要もあるため、これらの研究とは多くの点で異なっている。

第 3 章

擬似オルソ空間と擬似オルソ化画像

鳥瞰画像を地図へとレジストレーションするためには、対象の鳥瞰画像に変形処理を施し、真上から眺めたような画像を生成しなければならない。提案手法では、このような画像を擬似オルソ空間を活用し、生成する。本章ではこの擬似オルソ空間ならびに擬似オルソ化画像の定義を行い、次にこれらの具体的な構築や生成の方法について説明する。

ここでは一部、射影幾何学に関する基礎的な知識を用いるが、射影幾何学を活用し、画像から情報を取り出す方法に関しては数多くの書籍が出版されている [21, 24, 31, 63, 66, 72, 84, 85]。また、本論文で用いるものに関しては付録 A に簡単にまとめてあるので、適宜参照されたい。

3.1 擬似オルソ空間の定義

擬似オルソ空間を定義するため、まずカメラ空間（図 3.1）ならびに正規カメラ空間を定義する。

定義 3.1 カメラの視点を原点とし、光軸方向を $+Z$ 、カメラにて撮影される画像の右方向を $+X$ 軸、上方向を $+Y$ とする。このように定められた X, Y, Z 軸からなるユークリッド空間を**カメラ空間**と呼ぶ。

カメラ空間と画像空間の関係であるが、カメラの視点から距離 f だけ離れた位置に投影面があり、この投影面上に画像空間が定義されている（図 3.2）。この f の値を焦点距離と呼ぶ。座標系の定義によっては視線方向を $-Z$ とする座標系も存在するが [4]、本研究では視線方向を $+Z$ とするため、特に断ることなく焦点距離は正の値を用いることとする。提案手法においては、焦点距離値は未知の定数であると考え、事前のカメラ校正は必要としない。しかし、投影面のおかれている場所が未知であるのは少々都合が悪い。そのため、 Z 軸方向を $1/f$ 倍する変換を行い、この空間を正規カメラ空間と呼ぶこととする（図 3.3）。

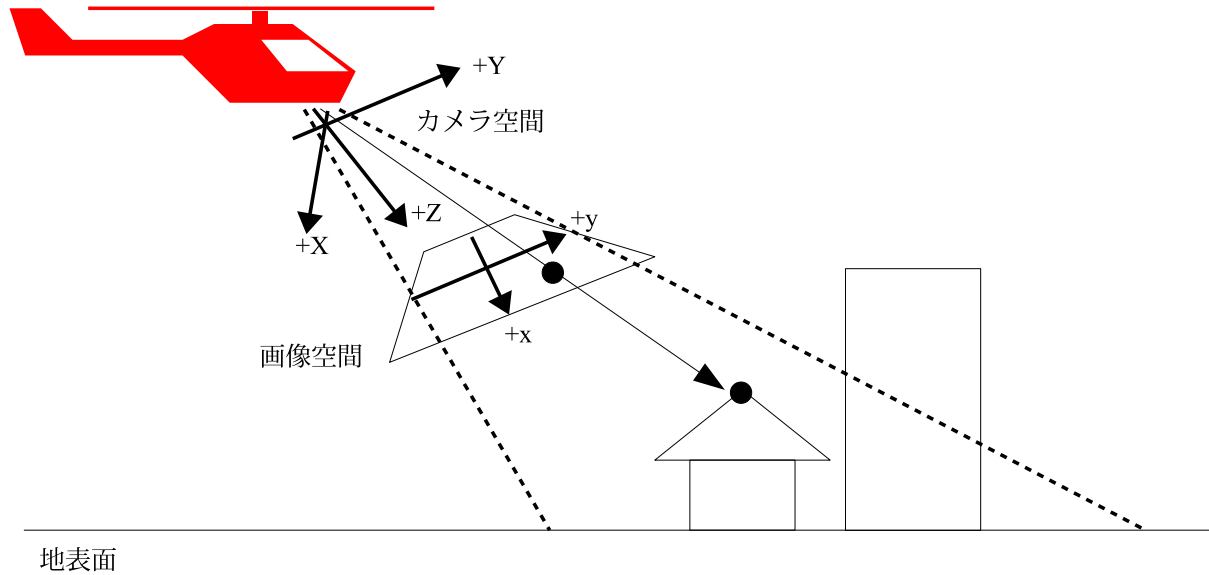


図 3.1 画像座標系とカメラ座標系について：地表面の様子は投影面に投影され、この投影された画像が空撮画像となる。投影面にて上と定義される方向を画像空間の y 軸、右方向を x 軸とする。カメラ空間の X 軸方向および Y 軸方向はこれら x, y 軸と平行とし、 Z 軸はカメラの光軸方向にとるものとする。

定義 3.2 カメラ空間において光軸方向を焦点距離の逆数倍だけ拡大した空間を**正規カメラ空間**と呼ぶ。定義より、カメラ空間から正規カメラ空間への変換は以下の式で表わされる。

$$P' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f \end{pmatrix} P$$

ただし、未知なる定数である焦点距離を f 、 P および P' はそれぞれカメラ空間および正規カメラ空間内の点とする。

本論文においては、地表面は平面で十分に近似できる程度に凹凸がないものと仮定し、議論を進める。

定義 3.3 平面により近似された地表面のことを**地表平面**と呼ぶ。

カメラ空間における地表平面と正規カメラ空間における地表平面を区別するため、正規カメラ空間における地表平面を擬似オルソ地表面と呼ぶこととする。

定義 3.4 正規カメラ空間における地表平面を**擬似オルソ地表面**と呼ぶ。擬似オルソ地表面はその定義より、焦点距離を f として、カメラ空間における地表平面を Z 軸方向に $1/f$ 倍したものと等しい。

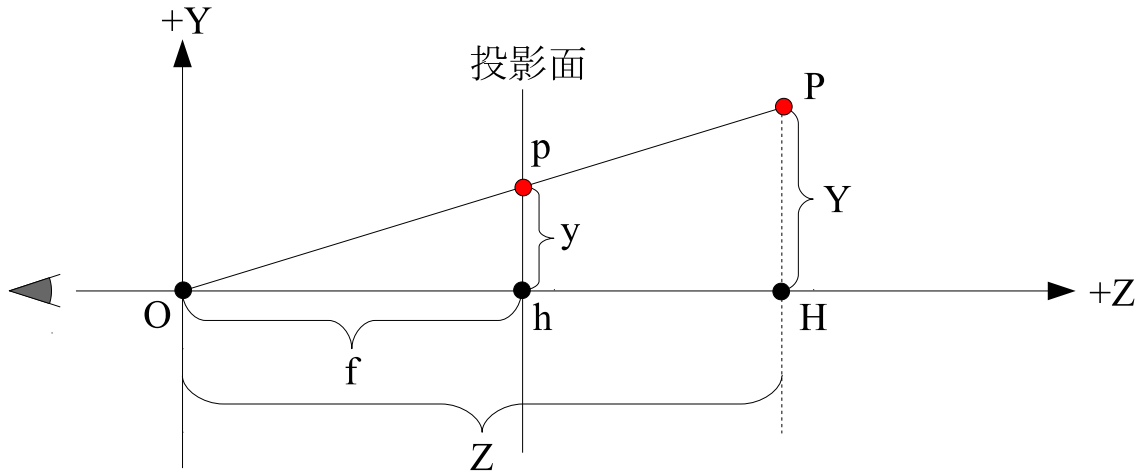


図 3.2 カメラ座標系と投影面上にて定義される画像座標系は上図のような関係をもつ。カメラ空間に存在する点 $P = (X, Y, Z)$ は、焦点距離 f を用いて画像座標系の点 $p = (fX/Z, fY/Z)$ へと投影されるが、これは三角形の相似比を用いて簡単に証明される。

本稿では、カメラ空間内のある点と、その点に対応する正規カメラ空間内の点に関する話題も以下よく出てくる。そのため、これらに関しても名前を与えておく。

定義 3.5 P をカメラ空間内の点 $P = (X, Y, Z)$ とする。この P に対し、焦点距離 f を用いて正規カメラ空間内の点 P' を次のように定義する。

$$P' = \left(X, Y, \frac{Z}{f} \right)$$

この P' を**カメラ空間内の点 P に対応する正規カメラ空間内の点 P'** などと呼ぶ。これはカメラ空間から正規カメラ空間への対応に限らず、各種の空間に対しても適用されるものとする。また、これら対応する点同士で構成される直線などに関しても、同様の表現を行うものとする。

これらの表現を用いれば、擬似オルソ地表面は、カメラ空間における地表平面上にある任意の点 P に対応する正規カメラ空間内の点 P' の集合として定義される平面であるとも言える。カメラ空間における地表平面と擬似オルソ地表面とで、カメラの光軸方向に対するそれぞれの平面の傾きがどの程度変化しているのかを知ることは、後の説明、特に擬似オルソ空間構築においては重要となる。そのため、それぞれの法線の間が存在する関係を以下に示す。

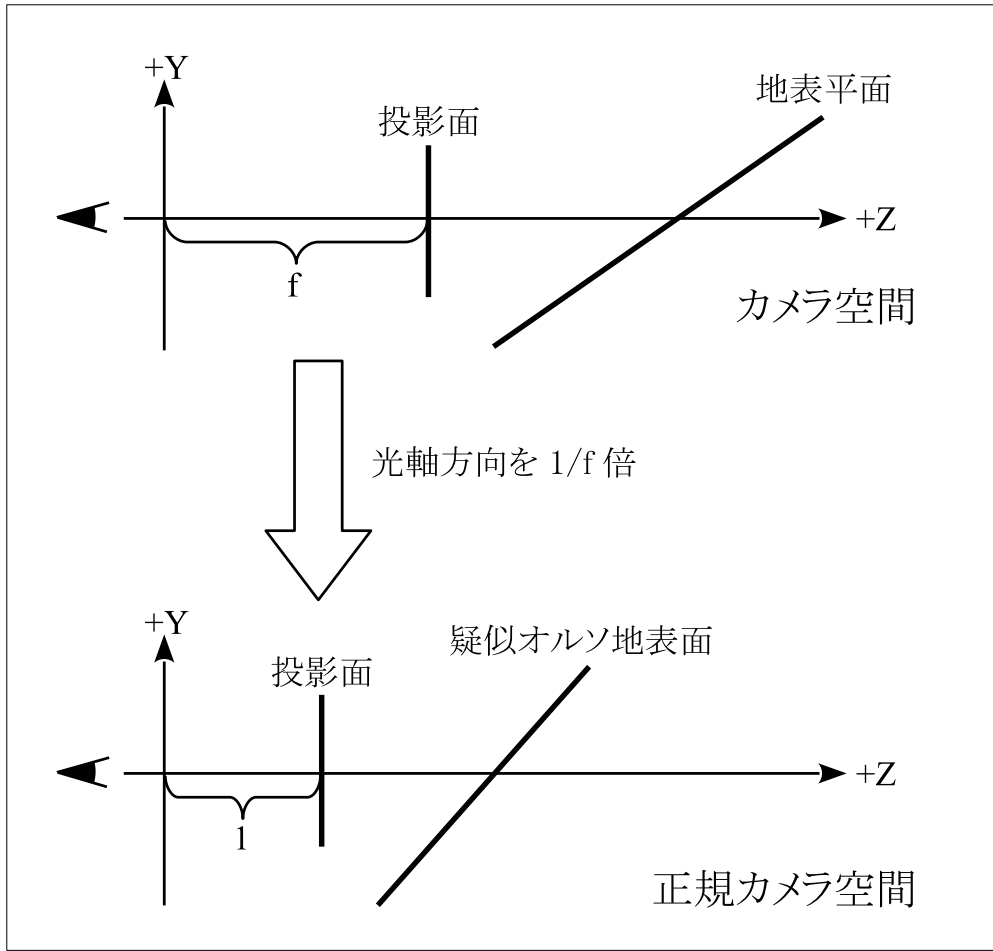


図 3.3 カメラ空間と正規カメラ空間。 f を焦点距離とし、カメラ空間における光軸方向を $1/f$ 倍したものを正規カメラ空間と呼ぶ。カメラ空間における焦点距離 f は未知の定数であるが、正規カメラ空間においては焦点距離はつねに 1 となる。

命題 3.1 カメラ空間における平面 π の法線ベクトルが (N_X, N_Y, N_Z) で表わされるとき、対応する正規カメラ空間の平面 π' の法線ベクトルは (N_X, N_Y, fN_Z) と平行である。ただし、 f は焦点距離を表すものとする。

証明

π 上の任意の点 $P = (X, Y, Z)$ は定義より、 $N_X X + N_Y Y + N_Z Z = C$ を満たす。ここで C は π により定まるある定数とする。 P に対応する正規カメラ空間内の点 P' の座標は定義より、 $P' = (X, Y, Z/f)$ である。少々天下り的ではあるが、 P' とベクトル (N_X, N_Y, fN_Z) の間には、次の関係が成立する。 $N_X X + N_Y Y + (fN_Z)(Z/f) = C$ これは π 上の任意の点 P に対する P' において常に成立する。よって、 π' の法線は (N_X, N_Y, fN_Z) であることが分かる。 ■

これより、航空機の進行方向と地表平面の法線から、正規カメラ空間における正規直交系を構築することが可能となる。

定義 3.6 焦点距離を f で表すとき、カメラ空間における航空機の進行方向を (V_X, V_Y, V_Z) とすると、それに対応する正規カメラ空間における航空機の進行方向は定義より $(V_X, V_Y, V_Z/f)$ で定められる。また、カメラ空間における地表平面の法線ベクトルが (N_X, N_Y, N_Z) で表わされるとき、擬似オルソ地表面の正規カメラ空間内における法線ベクトルは $(N_X \cdot N_Y, f N_Z)$ にて表わされる。

カメラ空間内の航空機の進行に対応する正規カメラ空間内の進行方向ベクトルと平行な単位ベクトルを e'_Y とし、擬似オルソ地表面の単位法線ベクトルを e'_Z とする。航空機が地表平面に対し、平行にかつ直線的に飛行している場合、 $e'_X = e'_Y \times e'_Z$ とすると、 $\{e'_X, e'_Y, e'_Z\}$ は正規カメラ空間内において正規直交基底をなす。この正規直交基底を**擬似オルソ空間**と呼ぶ。

3.2 擬似オルソ化画像

擬似オルソ空間を用いることにより、擬似オルソ地表面をその法線方向から眺めることが可能となる。ここでは擬似オルソ化画像の定義とその性質について述べる。

定義 3.7 擬似オルソ化画像とは、擬似オルソ空間にて、擬似オルソ地表面を法線方向から眺めた画像をいう。

もちろん、真の地表面を奥行方向に縮小し法線方向から眺めることはできない。実際には鳥瞰画像を擬似オルソ地表面に貼り付けたものを法線方向から眺めたものを擬似オルソ化画像と呼ぶ。一般的なオルソ画像とは異なり、擬似オルソ化画像には地形および建物などの倒れこみが存在する。次に擬似オルソ化画像における座標軸を定義する。

定義 3.8 擬似オルソ化画像の x 軸および y 軸は、擬似オルソ空間の Y 軸および X 軸を擬似オルソ化画像に投影した方向と同じ向きにとるものとする。

本稿では、カメラ空間に限らず 3 次元空間に関する座標軸には X, Y, Z などの大文字を用い、2 次元空間に関する座標軸には x, y などの小文字を用いることとする。

鳥瞰画像の地図へのレジストレーションのためには、具体的な擬似オルソ化画像を生成しなければならない。そのため、擬似オルソ空間では擬似オルソ地表面がどのように表現されるのか調べてみる。

命題 3.2 擬似オルソ空間において、擬似オルソ地表面はある定数 C を用いて、 $Z = C$ と表わされる。

証明

擬似オルソ空間の定義より、 V' をカメラ空間内の航空機の運動方向と対応する正規カメラ空間における単位進行方向ベクトルとし、 N' を擬似オルソ地表面の単位法線ベクトルとする。このとき、正規カメラ空間から擬似オルソ空間への変換行列 M は次のように表わされる：

$$M = \begin{pmatrix} V' \times N' \\ V' \\ N' \end{pmatrix}$$

ただし、 V' 、 N' および $V' \times N'$ は 1×3 の横ベクトルで表現されているものとする。正規カメラ空間における擬似オルソ地表面上の任意の点を P' とすると、擬似オルソ空間における P' の座標値 Q' は、

$$Q' = MP' = \begin{pmatrix} (V' \times N') \cdot P' \\ V' \cdot P' \\ N' \cdot P' \end{pmatrix}$$

となり、その Z 座標は $N' \cdot P'$ となる。 N' は擬似オルソ地表面の単位法線ベクトルであり、 P' はこの擬似オルソ地表面上の点であるので、ある定数 C を用いて $N' \cdot P' = C$ が成り立つ。よって、擬似オルソ空間における擬似オルソ地表面は $Z = C$ となる。 ■

擬似オルソ化画像においては、航空機の進行方向は定義より y 軸方向と平行である。しかし、地表平面における進行方向と直角を成す方向ベクトル η については、対応する擬似オルソ化画像上の単位方向ベクトルの座標が $(x, y) = (1, 0)$ になるとは限らない。これは、擬似オルソ空間の X 軸は擬似オルソ空間の Y 軸と Z 軸の外積により求められ、この基準となる Y 軸および Z 軸はオルソ空間の Y, Z 軸と焦点距離による光軸方向の拡大縮小を考慮して計算されるためである。次の命題にて擬似オルソ化画像に含まれる歪について説明するが、これは擬似オルソ化画像と対応するカメラ空間における地表平面画像との関係を述べたものである。命題を示す前に、まずオルソ空間ならびに半オルソ画像について定義を行っておく。

定義 3.9 カメラ空間における航空機の進行方向ベクトルを正規化したものをオルソ空間の Y 軸の基底とし、同様に、原点から地表平面を見下ろす方向の、地表面の単位法線ベクトルを Z 軸の基底とし、 X 軸の基底ベクトルはこれら二つの基底ベクトルの外積により決定されるものとする。ただし、 X 軸に関する基底ベクトルの方向は、オルソ空間が左手系となるように定める（図 3.4）。このように構築された、地表面を見下ろす正規直交基底を**オルソ空間**と呼ぶ。

先に述べたように、擬似オルソ空間を用いて定義される画像が擬似オルソ化画像であった。同様の概念として、オルソ空間に対する画像をここで定義する。オルソ空間に関連する画像ということで、「オルソ画像」という呼び名を与えたいが、オルソ画像 [69, 86, 95, 99] は既に確立された概念であり、今ここで我々が考えているものと少し異なる。それは、擬似オルソ化画像も実際には鳥瞰画像を変形して生成するため、地形や建物の倒れこみや、カメラに近い

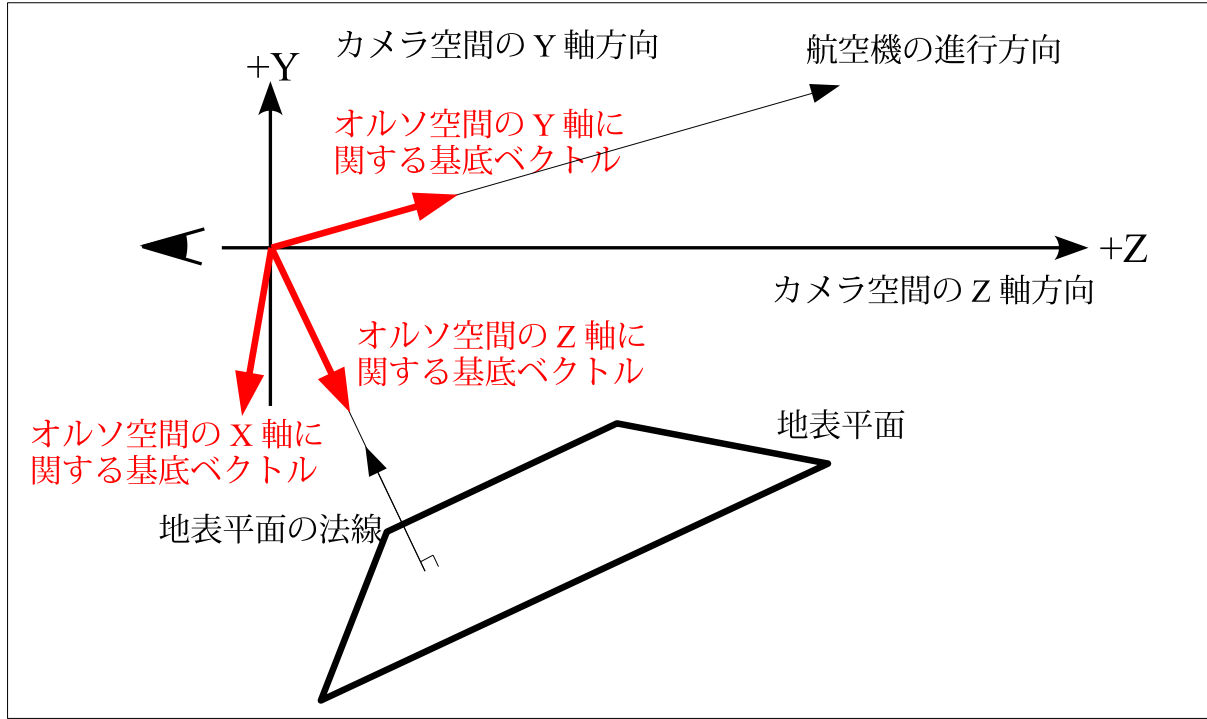


図 3.4 オルソ空間の各基底ベクトル

ものは大きく写るなどカメラと対象物との距離に応じた拡大縮小が存在する。一方、既に一般的となっているオルソ画像が意味するものには、このような現象は含まれない。よって、オルソ空間から眺めた地表平面画像を半オルソ化画像として次のように定義する。

定義 3.10 鳥瞰画像を地表平面に投影し、オルソ空間の Z 軸方向に眺めた画像を**半オルソ化画像**と呼ぶ。

つまり、鳥瞰画像を変形し、カメラ空間にて真上から擬似的に眺めた画像を生成することは半オルソ化画像を生成することに他ならない。擬似オルソ化画像と半オルソ化画像の間に存在する関係が明らかとなれば、擬似オルソ化画像がどのように歪んでいるのか、その詳細が明らかとなる。またこれらを活用することにより、擬似オルソ化画像から半オルソ化画像を生成することも可能となる [90]。

命題 3.3 擬似オルソ化画像から半オルソ画像への変換は、非一様な拡大縮小変換と、せん断変換の合成により表わすことができる。

証明

地表平面における、進行方向と直角を成す方向ベクトルを η とする。今、 η が擬似オルソ化画像上で (u, v) と表されたとすると、基底ベクトルに関する地表平面から擬似オルソ化画像への変換行列 M は以下のように表される：

$$M = \begin{pmatrix} u & 0 \\ v & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$k = (\sqrt{1+v^2})/u$ とすると、ある定数 ξ を用いて

$$\left(\frac{1}{u}, -\frac{v}{u} \right) = (k \cos \xi, k \sin \xi) \quad (3.2)$$

と表されるため、擬似オルソ化画像から半オルソ化画像への基底ベクトルに関する補正変換行列 M^{-1} は

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 \\ \sin \xi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

と分解される。上式右辺において左側の行列はせん断を表し、右側の行列は非一様な拡大縮小を表している。 ■

擬似オルソ化画像では、地表平面上に存在する線分間の角度が保持されないことは上の命題で示した通りである。しかし、平行性は保持されるという性質を有している（これは本研究の焦点距離推定方法において重要な役割を果たすものである）。

命題 3.4 擬似オルソ化画像は地表平面における平行性を保持する。

証明

地表平面上の点 P_1, P_2, Q_1, Q_2 を次のように定義する：

$$P_1 = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} X_1 + \Delta_X \\ Y_1 + \Delta_Y \\ Z_1 + \Delta_Z \end{pmatrix}, Q_1 = \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}, Q_2 = \begin{pmatrix} X_2 + \Delta_X \\ Y_2 + \Delta_Y \\ Z_2 + \Delta_Z \end{pmatrix},$$

このとき、線分 P_1P_2 および Q_1Q_2 は地表平面上で平行な線分となる。

カメラ空間における地表平面の法線ベクトルを (N_X, N_Y, N_Z) とすると、擬似オルソ地表面の法線ベクトルは (N_X, N_Y, fN_Z) となり、これを正規化したものを N とする。カメラ空間における航空機の進行方向と対応する正規カメラ空間内の進行方向ベクトルを正規化したものを E_Y とし、 E_X を $E_X = E_Y \times N$ にて定義する。このとき、正規カメラ空間から擬似オルソ空間への変換行列 M は次のように表わされる：

$$M = \begin{pmatrix} E_X \\ E_Y \\ N \end{pmatrix}$$

ただし、 E_X, E_Y, N はそれぞれ 1×3 の横ベクトルで表わされているものとする。

擬似オルソ空間における線分 P_1P_2 の方向および Q_1Q_2 の方向を D'_1 および D'_2 とすると、これらは、

$$D_1 = M(P'_2 - P'_1), D_2 = M(Q'_2 - Q'_1)$$

で求めることができる。ただし、 P'_1, P'_2, Q'_1, Q'_2 はそれぞれ P_1, P_2, Q_1, Q_2 の正規カメラ空間における位置とする。しかし、定義より、 $P'_2 - P'_1 = Q'_2 - Q'_1 = (\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z/f)$ であるため、 $D_1 = D_2$ が成り立つ。よって、擬似オルソ画像化画像においても線分 $P'_1P'_2$ と $Q'_1Q'_2$ は平行であり、その具体的な方向ベクトル d は、

$$d = (E_X \cdot (\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z/f), E_Y \cdot (\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z/f))$$

にて求めることができる。

以上より、擬似オルソ化画像上の線分 $P'_1P'_2$ および $Q'_1Q'_2$ の方向ベクトルは等しいことが分かり、地表平面上に存在する線分の平行性は擬似オルソ化画像上でも保持される。 ■

上記の証明中では、焦点距離を単一の未知の定数として扱っている。これは、本研究では画素のアスペクト比を 1 としているためであり、また、撮影中に焦点距離は変化しないためである。そのため、考慮すべき焦点距離は未知なる単一の定数として取り扱うことが可能である。

命題 3.2 では、擬似オルソ地表面は擬似オルソ空間の XY 平面と平行になることを示しているが、その平面を具体的に示す定数 C には言及していない。図 3.2 で示すように、焦点距離を f で表すとき、カメラ空間において原点と点 (x_0, y_0, f) を結ぶ直線上の任意の点であれば、鳥瞰画像中の点 $p = (x_0, y_0)$ に投影される。未知なる定数 C が残ったままでは、鳥瞰画像からカメラ空間内における地表平面上の点を求めようとしても、奥行きに関する不確定さが残ってしまうこととなる。しかし、擬似オルソ空間において射影投影を行うことにより、この不確定さを除去することが可能である。以下の命題では、例として平面 $Z = C$ を $Z = 1$ に射影投影することにより、この奥行きに関する不確定さを除去し、擬似オルソ化画像の生成が実現できることを示す。

命題 3.5 鳥瞰画像中の点 $p = (x, y)$ から擬似オルソ地表面上の 3 次元位置を求める場合、奥行き情報に関する不確定さが残るが、擬似オルソ空間にて擬似オルソ地表面を $Z = 1$ に射影投影することにより、この不確定さをなくすることができる。

証明

正規カメラ空間において、鳥瞰画像中の点 p は投影面上の位置 $P_0 = (x, y, 1)$ に投影されていることを意味する。また、 P_0 に投影される正規カメラ空間内の点 P は、任意の $\xi > 0$ を用いて $P' = \xi P_0$ と表わすことができる。この ξ が奥行き情報に関するものであり、命題 3.2 を用いて具体的に擬似オルソ化画像を生成する場合、鳥瞰画像中の各画素に対し、この ξ をそれぞれ求める必要がある。いいかえれば、各画素に対し、この ξ を求めることができないと、奥行き情報に関する不確定さが残り、命題 3.2 を用いて、擬似オルソ化画像を生成することができないことを意味する。

本命題では、擬似オルソ空間における擬似オルソ地表面を $Z = 1$ 、つまり焦点距離を 1 とし、射影投影することにより、この ξ を消去し、具体的な奥行き情報を求めることなく、擬似

オルソ化画像の生成が可能であることを示す。命題 3.2 より、正規カメラ空間から擬似オルソ空間への変換行列を M とすると、擬似オルソ空間における P' の座標 (X', Y', Z') は、

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = MP' = \xi M \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi(V' \times N') \cdot (x, y, 1) \\ \xi V' \cdot (x, y, 1) \\ \xi N' \cdot (x, y, 1) \end{pmatrix}$$

と表わされる。ただし、 V', N' はそれぞれ正規カメラ空間における単位飛行方向ベクトルおよび擬似オルソ地表面の単位法線ベクトルとする。

本研究では実際に撮影された鳥瞰画像のみを扱うため、 $Z' = N' \cdot (x, y, z) \neq 0$ である。よって、点 (X', Y', Z') に関しては、無限遠を扱うことなく平面 $Z = 1$ に射影投影することができ、投影後の位置を (x', y') とすると、

$$\begin{cases} x' = \frac{X'}{Z'} = \frac{(V' \times N') \cdot (x, y, 1)}{N' \cdot (x, y, 1)} \\ y' = \frac{Y'}{Z'} = \frac{V' \cdot (x, y, 1)}{N' \cdot (x, y, 1)} \end{cases}$$

を得る。上式からは奥行きに関する不確定さ ξ が消去されており、また、 x, y, V', N' はそれぞれ具体的な値でもあるため、 x', y' も具体的な値となる。これにより、擬似オルソ地表平面を拡大縮小した具体的な画像の生成が可能となる。 ■

平面 $Z = C$ 上の画像を平面 $Z = 1$ に射影投影することは、元の画像全体を拡大縮小することに他ならない。そのため、上の命題で生成される擬似オルソ化画像は擬似オルソ地表面を拡大縮小したものとなる。射影投影により奥行き情報に関する不確定さは除去できたが、拡大縮小による自由度が残っている。しかし、航空機に搭載されている GPS の変位量を用いれば、進行方向に関してはその縮尺を合わせることが可能である。具体的には、命題 3.5 の方法にて時刻 t_1 における鳥瞰画像より生成された擬似オルソ化画像を I'_1 とする。同様に時刻 t_2 における擬似オルソ化画像を I'_2 とする。これら両方の画像に収められている地表平面上のある点の移動量は、航空機の移動により生じたものに他ならない。この移動量を l' とし、GPS の変化量から求められる航空機の物理的な移動量を l [m]、レジストレーション先の地図の縮尺を S' [画素/m] とすれば、拡大縮小の倍率は $(S'l)/l'$ にて求められる。この倍率を乗じた擬似オルソ化画像では、航空機の進行方向においては、レジストレーション先の地図画像とその縮尺は一致する。もちろん、実際には GPS の測定誤差などがあり、完全に一致することは難しい。この誤差に対する補正処理は 6 章にて述べる。

3.3 鳥瞰画像中の単一線分を用いた消失点推定

一般的に、鳥瞰画像中に存在する、ある線分を含む直線の消失点を得るためには、その線分と平行な線分をみつけ、それらの線分を含む直線の交点として消失点を得なければならない

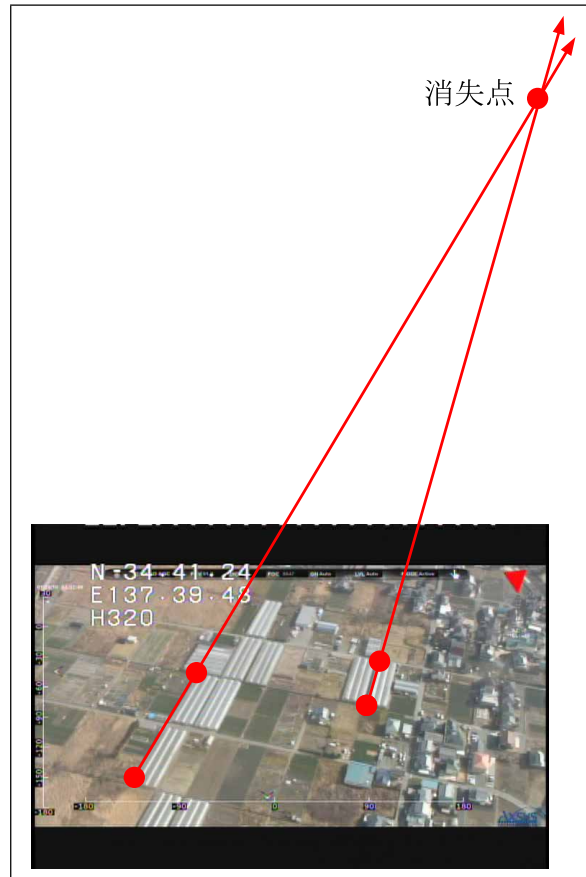


図 3.5 鳥瞰画像中の 4 点を指定した消失点推定

[55, 67, 96] (図 3.5)。この方法では、鳥瞰画像中に地表平面上にて平行な線分が収められていなければ、その線分に関する消失点を求めることはできないこととなる。しかし、鳥瞰画像と擬似オルソ空間ならびに擬似オルソ化画像を連携させることにより、鳥瞰画像上のひとつの線分から消失点の推定が可能であることを以下に示す。

命題 3.5 を用いると、鳥瞰画像中の 2 点を擬似オルソ化画像上の点に投影し、擬似オルソ空間内の方向ベクトルを得ることができる。消失点を求めるためには、正規カメラ空間における線分の方角のみが重要であり、その大きさは 0 でなければ十分である。擬似オルソ空間中の $Z = 1$ に射影投影することは、擬似オルソ地表面を $Z = 1$ と重なるように拡大縮小していることに他ならず、このようにして得られた擬似オルソ化画像上の方向ベクトルは、擬似オルソ空間における方向ベクトルに変換することが可能である。その結果、正規カメラ空間における方向ベクトルに変換することもでき（具体的には、命題 3.5 における M の逆行列にて変換すればよい）、これより正規カメラ空間における消失点を得ることが可能となる。実は、この正規カメラ空間における方向ベクトルによる消失点と、対応するカメラ空間における方向ベクトルによる消失点は等しい。以下にそれを示す。まず、正規カメラ空間内の点と、その点に対応

するカメラ空間内の点に関しては、次の命題が成立する。

命題 3.6 カメラ空間内の点 P と、それに対応する正規カメラ空間内の点 P' で、それぞれの空間で投影される画像上の位置は変化しない。

証明

点 $P = (X, Y, Z)$ に対応する正規カメラ空間内の点は $P' = (X, Y, Z/f)$ であるので、それぞれの点が投影される画像上の位置は、

$$\begin{pmatrix} f \frac{X}{Z} \\ f \frac{Y}{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \frac{X}{f} \\ 1 \frac{Y}{f} \end{pmatrix}$$

となり、その位置は等しいことが分かる。 ■

カメラ空間と正規カメラ空間において、対応する点がそれぞれの投影面に投影される場所が変化しないのであるから、次の系を得る。

系 3.7 カメラ空間における地表平面上の直線 L と、対応する擬似オルソ地表面上の直線 L' において、それぞれの空間における投影面で定まる消失点の座標は同じである。

証明

それぞれの空間において、 L および L' に平行な直線 L_Q および L'_Q を考える。 L 上の異なる 2 点 P_1, P_2 と L_Q 上の異なる 2 点 Q_1, Q_2 が投影される投影面の座標を p_1, p_2, q_1, q_2 とすると、これらは画像空間中の 1 点で交わることが知られており、画像空間内の直線 p_1p_2 と q_1q_2 の交点が L の消失点となる。

一方、定義より、 P_1, P_2, Q_1, Q_2 に対応する正規カメラ空間内の点 P'_1, P'_2, Q'_1, Q'_2 は、それぞれ L' と L'_Q 上の点となる。 P'_1, P'_2, Q'_1, Q'_2 の投影される画像空間内の位置は p_1, p_2, q_1, q_2 と等しく、かつ、直線 p_1p_2 と q_1q_2 の交点が L' の消失点であるため、直線 L と L' のそれぞれの空間における投影面で定まる消失点は等しい。 ■

以上より、鳥瞰画像と擬似オルソ空間ならびに擬似オルソ化画像を連携させることにより、鳥瞰画像中の任意の 2 点を結ぶ線分の消失点を得ることが可能となる。

3.4 擬似オルソ空間の構築と擬似オルソ化画像の生成

ここまで、擬似オルソ化画像生成に使用する定義や命題を示した。それぞれの命題中にて前提とされる条件がいくつかあったが、ここでそれを整理する。また、先に示した命題では、GPS の精度などは考慮していなかった。しかし、実際に擬似オルソ化画像を生成するためにはこれらについても考慮する必要があるため、ここで前提条件としてまとめておく。

本節の後半では、実際の鳥瞰映像から擬似オルソ空間を構築する方法について述べる。擬似オルソ空間は、正規カメラ空間における航空機の進行方向と擬似オルソ地表面の法線方向を得ることができれば、構築することが可能である。本節においては、これらの情報をどのようにして鳥瞰映像から取り出すのか、その具体的な方法について説明を行う。

3.4.1 撮影時の条件

本研究では、焦点距離に関する事前知識は必要としないものとする。焦点距離を除くカメラの内部パラメータに関しては次のような仮定をおく：

- 画像の中心を光軸点とする
- 歪角 は 0 とする
- 画素のアスペクト比は 1 とする

これは、現在一般的に販売されているカメラの精度は十分に高く、このような仮定をおいても問題ないためである。

画像のアスペクト比に関しては 16:9 や 4:3 など、一般的に市販されているカメラで撮影される程度のものとする。本研究では極端に縦長や横長の空撮映像を想定していないため、このような条件をおいている。レンズ歪 [25] に関しては、その影響を除去するものとする（具体的な方法については次節「擬似オルソ空間の構築」にて述べる）。

次に撮影時の条件として、以下の項目が満たされているものとする：

- 条件 1 鳥瞰映像は GPS の値（緯度経度それぞれ秒単位まで）とともに記録されている
- 条件 2 撮影中に焦点距離が変化しない
- 条件 3 レジストレーション処理のための映像撮影に必要な飛行距離（約 350 m）において、航空機は地表平面に平行かつ安定に飛行していると近似できる
- 条件 4 地表平面とカメラ光軸とのなす角度の変動は変化しないとみなせるほどに小さい
- 条件 5 映像に対して手ぶれや航空機の振動による影響がない

条件 1 は GPS に関するものであり GPS / IMU に関するものではない。GPS/IMU とは異なり今や GPS は数多くの撮影機器に搭載されている一般的な装置である。そのため、この条件は特別な条件とはならない。条件 2 はズームレンズの使用を除外するものではなく、あくまでも撮影中に焦点距離を変化させないことを要請するものである。後述するが、長くとも数十秒程度の間だけ焦点距離を変化させなければ十分であり、そのため、この条件も現実離れした条件ではない。条件 3 および 4 に関してであるが、本研究では GPS の精度を緯度経度それぞれ秒単位まで計測できるものとしている。航空機の進行方向は GPS データの変位量から求めるため、緯度方向または経度方向に 1 秒以上の変位を必要とする。もちろん、進行方向

によっては緯度値のみが変化し、経度の値がなかなか変化しないという状況もある。このような状況下においても GPS データの変位量から得られる航空機の進行方向と真の進行方向との誤差が 5 度以下となるように飛行距離を計算している。北緯 35 度を基準として、緯度 1 秒に対する子午線長は $30.817m$ 、経度 1 秒に対する平行圏弧長は $25.358m$ であるので [81]、 $\max(30.817, 25.358)/\tan(5^\circ) = 352.24$ を得る。航空機において、約 350 m を移動するのに要する時間はそれほど長くはない。そのため意図的に低速飛行をしなければ、長くても数十秒間にて到達できる距離である。よって、条件 3 および 4 も、現実離れした条件ではない。また「安定に飛行している」とは、一定の姿勢および速度を保った状態で飛行している状態を指すものとする。この条件を満たしているかどうかを判断する基準については後ほど説明するが、基本的には、被写体が直線的に移動しているか否かにより判断を行う。条件 5 に関しては、本研究の主題は映像のスタビライズ [19] に関するものでないため、このような前提条件をおいている。

3.4.2 擬似オルソ空間の構築

擬似オルソ空間を構築するためには、正規カメラ空間における航空機の進行方向と、擬似オルソ地表面の法線ベクトルを具体的な値として求める必要がある。まず、鳥瞰映像における動きの消失点より、正規カメラ空間における航空機の進行方向を推定し、次に動きの消失点を求める際に利用した情報を活用し、擬似オルソ地表面に関する消失線を求め、擬似オルソ地表面の法線ベクトルを推定する。一般的にレンズにはレンズ歪と呼ばれる歪が存在するが、ここではレンズ歪が除去されているものと仮定した上で、正規カメラ空間における航空機の具体的な運動方向の求め方について説明する。

命題 3.8 鳥瞰映像における動きの消失点より得られるカメラ空間内の航空機の運動方向を V 、正規カメラ空間における運動方向を V' とする。このとき V' は、 V と平行なベクトルに対応する正規カメラ空間内のベクトルと平行となる。

証明

鳥瞰映像における動きの消失点の座標を (u_0, v_0) とし、焦点距離を f とすると、命題 A.1 より、 V はベクトル (u_0, v_0, f) と平行であり、 V' はベクトル $(u_0, v_0, 1)$ と平行であることが分かる。

カメラ空間内のベクトル (u_0, v_0, f) と正規カメラ空間内のベクトル $(u_0, v_0, 1)$ は、定義より、それぞれの空間で対応するベクトルである。よって V' は、 V と平行なベクトルに対応する正規カメラ空間のベクトルと平行となる。 ■

上の命題は、カメラ空間における航空機の進行方向を求めそれに対応する正規カメラ空間における航空機の運動方向を求めたものと、鳥瞰映像における動きの消失点から正規カメラ空間

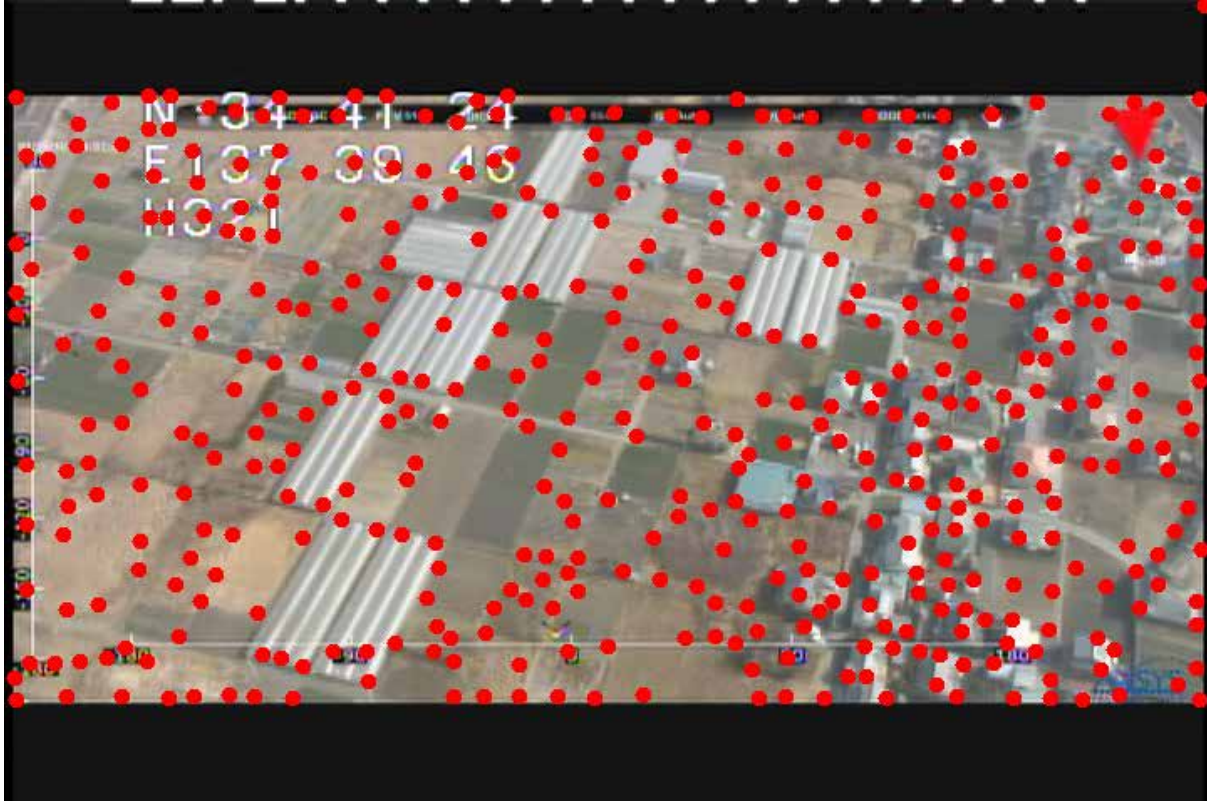


図 3.6 Harris 作用素にて求めた特徴点

における航空機の運動方向を求めたものの方向が等しいことを示すものである。そのため、以下これらを区別することなく、単に正規カメラ空間における航空機の進行方向と呼ぶこととする。

上記命題の証明中にて示しているとおり、擬似オルソ空間の Y 軸に関する基底ベクトルの具体的な値は、鳥瞰映像における動きの消失点の座標が (u_0, v_0) と表わされる場合、ベクトル $(u_0, v_0, 1)$ を正規化したものを用いれば良いことが分かる。

鳥瞰映像における動きの消失点の具体的な座標値は、オプティカルフロー [34, 40] を活用して求める。オプティカルフローは全画素に対して定義できる [3] 概念であるが、本研究では全ての画素に対するオプティカルフローは用いずに、Harris 作用素 [30, 65] にて求められる特徴点 (図 3.6) を KLT 追跡法 [32, 45] にて追跡したものを活用する。

これらのオプティカルフローは全て信頼できるものとは限らない。また、レンズ歪に関するパラメータを得るためにも、信頼できるオプティカルフローを求める必要がある。特徴点の追跡開始時刻を T とし、時刻 $T+j$ における i 番目の特徴点の位置を $p_{i,j}$ で表すこととする。映像の端に写る特徴点においては次のフレームにて画像外に出てしまう可能性もあるため、このような特徴点は信頼できないオプティカルフローとして棄却する。 $\{p_{i,j}\} (j = 0, \dots, T_\varepsilon - 1)$ 全てが映像の端領域に入らず、かつ、線分 $p_{i,j-1}p_{i,j}$ と $p_{i,j}p_{i,j+1}$ との成す角度が θ_ε 以下で

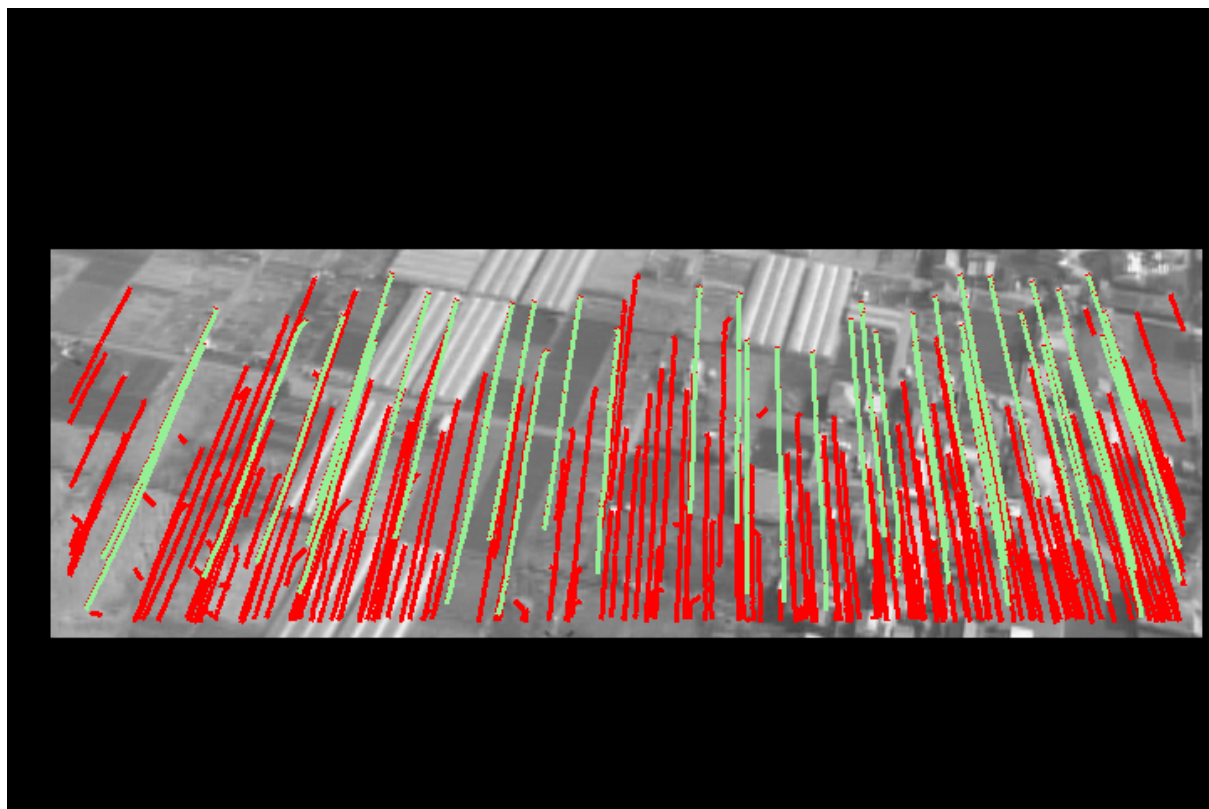


図 3.7 信頼できるオプティカルフローと信頼できないオプティカルフロー。信頼できるオプティカルフローを緑色で示し、信頼できないオプティカルフローを赤色で示している。

あるものを信頼できるオプティカルフローとして定義する（図 3.7）。これら信頼できるオプティカルフローは地表面に固定されているものの軌跡であると仮定すると、レンズ歪が存在しなければ撮影条件よりこれらは直線となる。Strand らの方法 [49] は画像中の直線を利用してレンズの歪パラメータを得ることができるため、本研究では彼らの方法を利用しレンズ歪除去を行う。以下、レンズ歪の影響が取り除かれたオプティカルフローを単にオプティカルフローと呼ぶこととする。

誤差のないオプティカルフローは、理論的には画像空間中の一点にて交わることが知られている [71]。しかし、実際には信頼できるオプティカルフローにも誤差が存在するため、特異値分解 [27] を用いて動きの消失点を求めることとする [31]。

次に、擬似オルソ地表面の法線方向を求めるため、地表平面上に存在するいくつかの平行線から消失点を求め、それらを用いて擬似オルソ地表面に関する消失線を具体的に求める。もちろん地表平面上に都合よく数多くの平行線が存在することは期待できない。しかし、前提条件より、時刻によって地表平面に対するカメラ光軸は変化せず、カメラから見た地表平面の法線およびカメラと地表平面との距離も時刻によって変化しない。つまり、どの時刻においてもカ

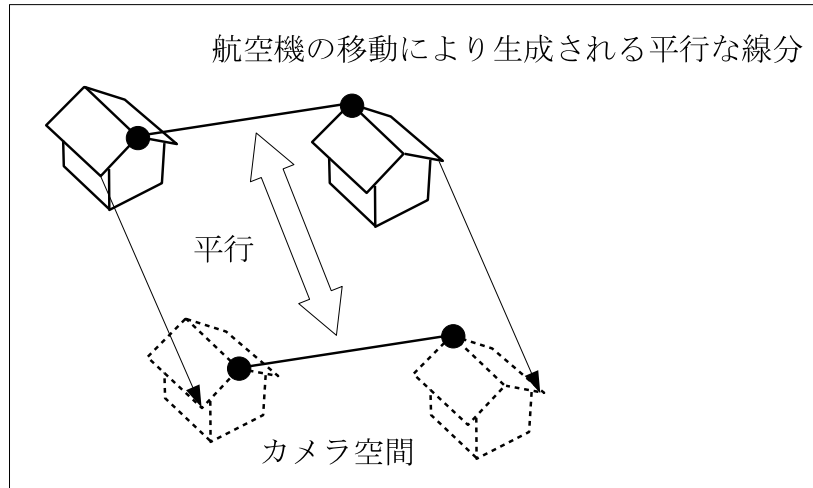


図 3.8 航空機の直線的な移動により、2 つのトラッキング点からなる線分はカメラ空間における地表平面上にて平行なものとなる。

メラ空間における地表平面を表す方程式は変化しないこととなる。そのため、それぞれの時刻における 2 つのトラッキング点の組は、カメラ座標系において平行となる。これらを地表平面上に存在する平行線とみなすことにより、信頼できるオプティカルフローが n 個存在すれば、最大 nC_2 個の地表平面における平行線を得ることができる。これらの平行線はそれぞれひとつの消失点を定めるため、カメラ空間における地表平面の消失線を得ることが可能となる。

ある平面における消失線が画像空間中で $ax + by + c = 0$ と表わされる時、その平面のカメラ空間における法線は $(a, b, c/f)$ として表わされることはよく知られている。したがって、信頼できるオプティカルフローより求められた消失線が $ax + by + c = 0$ として表わされたならば、カメラ空間における地表平面の法線は $(a, b, c/f)$ として得ることができる。この結果に命題 3.1 を適用し、擬似オルソ地表平面の法線ベクトル (a, b, c) を得る。

実際にオプティカルフローの組み合わせにより消失線を求める場合も、それぞれの消失点の計算誤差などにより、全ての消失点が完全に同一の直線上に載ることはない。よって、消失線の推定においても特異値分解を用いて具体的な値を求めることとする。実際に消失点や消失線を数値的に解く場合には、高性能な行列演算ソフトウェア（ライブラリ）が必要となる。本研究では LAPACK[1] を用い数値解を求めている。このようにして得られた擬似オルソ地表面の法線ベクトルを正規化したものを、擬似オルソ空間の Z 軸方向の単位基底ベクトルとして用いることとする。擬似オルソ空間を用いて生成した擬似オルソ化画像の例を図 3.9 に示す。



(a)



(b)

図 3.9 擬似オルソ化画像の例。(a) 生成に用いた鳥瞰画像。(b) 図 3.7 のオプティカルフローと (a) より生成された擬似オルソ化画像。

第 4 章

擬似オルソ化画像を用いた 焦点距離推定

本研究では未校正なカメラを用いるため、焦点距離の値は不明である。しかし、鳥瞰映像より焦点距離を推測することができれば、正規カメラ空間からカメラ空間を復元することが可能となる。また、注視点や視錐体の推定も可能となり、これは鳥瞰画像の地図へのレジストレーションが可能となることを意味する。本章では、一枚の擬似オルソ化画像より焦点距離を推定する方法について説明を行う。

4.1 消失点と焦点距離の関係

カメラ空間で直交する 2 つの方向ベクトルのそれぞれの消失点が、 $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ なる座標値で表わされているとする。このとき、焦点距離は $\sqrt{-(u_1 u_2 + v_1 v_2)}$ にて求められることはよく知られている [31]。そのため、3.3 で示したように、擬似オルソ空間と連携する鳥瞰画像に対し、地表平面で直交するであろう 2 つの線分を指定すれば、焦点距離を推定することが可能となる。例えば、直交するであろう線分を図 4.1 のように 3 点にて指定すれば、具体的な焦点距離値を得ることができる。焦点距離が得られたならば注視点推定も可能となり、5.1 にて述べる方法を用いることにより、地図へのレジストレーションを行うことができる。図 4.2 に地表平面上にて直角をなすであろう 3 点を指定して、注視点推定およびレジストレーションを行なった例を示す。

4.2 擬似オルソ画像を用いた焦点距離の自動推定

前節では人手にて地表平面上で直角に交わるであろう線分を指定し、焦点距離の推定に活用する例を示した。焦点距離推定における線分の役割はあくまでも方向を知るために他ならず、



図 4.1 地表平面上にて直角をなすであろうと思われる線分の例

地表平面上にて直角に交わる方向ベクトルさえ得ることができれば、焦点距離の推定は可能である。本研究では、これらの方向ベクトルを得るために道路や建物などの人工物に着目した。それは、

- 道路や建物などの人工物は直角に交わる線分にて構成される確率が高い
- 建物は道路を考慮して建てられることが多く、建物を構成する線分は道路と平行もしくは直角になる確率が高い
- 道路は他の道路と平行もしくは直角をなす確率が高い

と考えられるためである。命題 3.4 で示したように、擬似オルソ化画像では地表平面上の平行性が保存される。地表平面上での角度は保存されないが（図 4.3）、ある方向と直角をなす方向に関しても平行性は保持されるため、擬似オルソ化画像における道路や建物に関するエッジの方向は、大きく分けるとふたつの方向を向くように分布し、かつ、それらは地表平面で直交するのではないかと期待できる*¹。

*¹ 一方、鳥瞰画像では、地表平面における平行性は保存されない。そのためエッジの方向に関する分布については、このような期待はできない。

4.2.1 焦点距離推定に用いるエッジの抽出

焦点距離を自動推定するためには、地表平面上で直角をなす方向ベクトルを精度よく求める必要がある。しかし、擬似オルソ化画像は鳥瞰画像を変形して生成されるため、建物や地形の倒れこみなどが存在することは既に示したとおりである。その他にも、街路樹や民家における屋根のケラバ（屋根の斜め稜線）など、ノイズとなり得る様々なものが写っている可能性もある。そのため、画像中の全てのエッジを用いるのではなく、できるだけ長い直線に関するエッジを選択的に抽出し活用すること考える。それは、これらのエッジは道路や比較的大きく写っている建物に関するエッジであると期待できるためである。

本研究では、以下の手順にて擬似オルソ化画像から焦点距離推定に用いるエッジを抽出する：

1. 擬似オルソ化画像にガウシアンフィルタ [68] を適用
2. グレースケール化
3. Sobel フィルタ [61] を使い、各画素の縦横方向それぞれのエッジ強さを S_x, S_y に格納
4. エッジ強さを $\sqrt{S_x^2 + S_y^2}$ 、エッジ角度を $\tan^{-1}(S_y/S_x)$ とし、エッジ強さ画像、エッジ角度画像にそれぞれ格納
5. エッジ強さ画像を細線化
6. エッジ強さ画像とエッジ角度画像をもとに、それぞれのエッジに対し得点を付与
7. 高い得点を持つエッジのみを取り出す

手順 5 のエッジ画像の細線化処理に関してであるが、細線化処理 [53, 56, 92] は様々なものが存在する。本研究では以下の方法を用いることとする。該当画素のエッジ方向と垂直方向の隣接画素を調べ、該当画素のエッジ強さが最大である場合はエッジとして残し、そうでない場合はエッジではないとした。エッジの得点付与については、長い直線に関するエッジ程大きな値を返す得点関数を定義し活用する。具体的には、細線化を施したエッジ画像よりエッジを順次取り出し、角度画像よりエッジ角度を取得し、その方向および反対方向に r 画素だけ調査を行い、次式にて定められる得点を付与する：

$$\sum_{k=-r}^{+r} \sqrt{k} \{ \varphi(x_0 + k \cos \theta_0, y_0 + k \sin \theta_0) - \theta_0 \}^2 \quad (4.1)$$

ただし (x_0, y_0) はエッジの画像中の位置、 θ_0 はエッジの方向、 $\varphi(x, y)$ は指定された位置 (x, y) のエッジ角度をバイリニア補間 [61] により計算する関数とする。この得点が高ければ高いほど長い直線に関するエッジであると考え、これは離れた位置にあるにも関わらず同じ方向を向いているものは同一の直線を構成する可能性が高い、としたためである。

ここで用いている方法は、直線検出方法としてよく使われるハフ変換とは異なるものであることを念のため述べておく。ハフ変換 [15] では、点 (x_0, y_0) を通る可能性のある直線をパラメータ表記し、そのパラメータ空間で定義される投票箱に投票を行っていく。一方、本研究では個々のエッジそれぞれに対し式 (4.1) にて得点を与えていく。そのため提案手法では、投票用の空間を必要としない。またハフ変換では直線の方角を示す θ_0 を連続的に変化させつつ投票を行う。一方、提案手法では θ_0 は確定した定数であり、直線の方角を変化させるという処理も行わない。この点に関しても、ハフ変換とは全く異なる方法となっている。

4.2.2 主要な角度方向の推定

高い得点（上位 ζ %）を持つエッジを用いて、その方向と強さを示したものを図 4.4 に示す。これら高い得点を持つエッジの集合を E とし、この E に属するそれぞれのエッジを 4 つのクラスタに分類する。本研究では、クラスタリングの方法として k-means [100] を用いる。クラスタリングに際し、各エッジの角度 θ_0 は $0^\circ \leq \theta_0 < 360^\circ$ の範囲に正規化されているものとする。k-means では初期値として、それぞれのクラスタにおける代表値を与えなければならない。そのため、提案手法では E に属するエッジの最小角度および最大角度を $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ として $\theta_{\min} + i(\theta_{\max} - \theta_{\min})/4$, $i = 0, \dots, 3$ をその初期値として用いることとする。

クラスタリングにより各クラスタの代表値が得られたならば、それら代表値から $\pm \varepsilon_\theta$ の範囲にある角度を有するエッジを、それぞれのクラスタより集め、それらのエッジ方向の中央値を $\{\tilde{\theta}_i\}$, $i = 0, \dots, 3$ とする。各クラスタの代表値をそのまま使用しないのは、擬似オルソ化画像には様々な方向のエッジが含まれているためであり、中央値を用いる理由も外れ値による影響が少ないためである。得られた $\tilde{\theta}_k$ に対し、評価式 $|\cos(\tilde{\theta}_t - \tilde{\theta}_k)|$, $t \neq k$ が最も大きくなるような $\tilde{\theta}_t$ を求め、 $(\tilde{\theta}_k, \tilde{\theta}_t)$ なる組を作る。通常、 $\tilde{\theta}_k$ と $\tilde{\theta}_t$ はほぼ反対方向を向くため、この組の平均方向を $(\tilde{\theta}_k + (-\tilde{\theta}_t))/2$ とし、 $\tilde{\theta}_0, \dots, \tilde{\theta}_3$ から 2 つの方向を決定する。このようにして得られた 2 つの方向を擬似オルソ化画像における主要な方向とし、焦点距離計算に用いる。k-means によるクラスタリングおよび中央値により得られた主要な方向の様子を図 4.5 に示す。



(a)



(b)

図 4.2 地表平面上にて直角をなすであろう鳥瞰画像中の 3 点を指定して、鳥瞰画像を地図へとレジストレーションした例



図 4.3 擬似オルソ化画像では角度が保存されないことを示した図。該当の方向ベクトルは地表平面上では直角をなす。しかし、擬似オルソ化画像上では、その角度は直角になっていないことが確認できる。

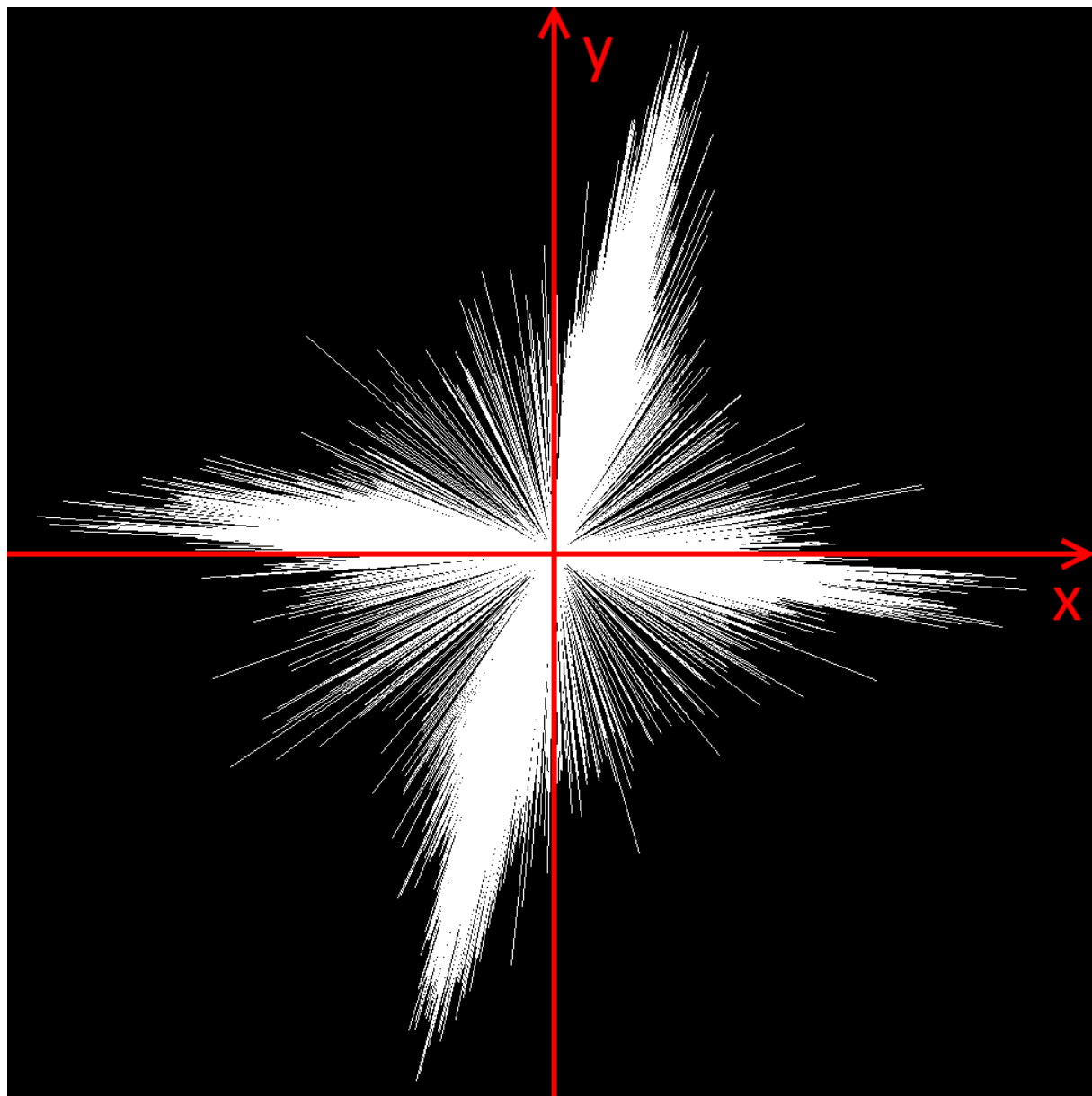


図 4.4 エッジ角度の分布状況を表した図。それぞれの線分は各エッジの向きと強さを表している。各エッジの強さは線分の長さで表現されており、長いものほどエッジの強さが強いものとする。この図で示したとおり、エッジの向きが 4 方向に集まっている様子がみてとれる。



図 4.5 擬似オルソ化画像を用いて推定された主要な角度方向。4 つのクラスタそれぞれの中央値を青色で示し、主要な方向を赤色で示している。

第5章

幾何学的レジストレーション

焦点距離の推定値を用いることにより、鳥瞰画像から擬似的に地表平面を真上から撮影した画像を生成し、それを地図画像へとレジストレーションすることが可能となる。このレジストレーション方法は幾何学的な情報を用いて行うものであり、本研究ではこれを幾何学的レジストレーションと呼ぶこととする。

5.1 注視点の推定および緯度経度空間へのレジストレーション

本稿では鳥瞰画像の中央を注視点と呼ぶ。鳥瞰画像（映像）においては、航空機の緯度経度と注視点の緯度経度は異なるという現象が発生する。これは真下を撮影した画像や映像には発生しない現象であり、注視点推定は鳥瞰画像（映像）に特有の問題である。

提案手法では、注視点推定のために焦点距離を用いて正規カメラ空間からカメラ空間を復元し活用する。もちろん、焦点距離の正確な値が分かれば、正規カメラ空間からカメラ空間を復元することは容易である。しかし、誤差を含まず、正確に焦点距離が推測される保証はない。誤差を含む復元されたカメラ空間と、真のカメラ空間とを区別するため、ほぼカメラ空間と等しいと期待される正規直交系をここで定義する（図 5.1）。

定義 5.1 推測された焦点距離を用いて、正規カメラ空間より復元されたカメラ空間を**準カメラ空間**と呼ぶ。

もちろん、推測された焦点距離が真の焦点距離と等しい場合、準カメラ空間とカメラ空間は等しくなる。関連する項目として準オルソ空間、準オルソ地表面ならびに準オルソ化画像についてもここで定義しておく。

定義 5.2 推測された焦点距離を用いて復元されたオルソ空間を**準オルソ空間**と呼ぶ。

定義 5.3 準カメラ空間における地表平面を**準オルソ地表面**と呼ぶ。

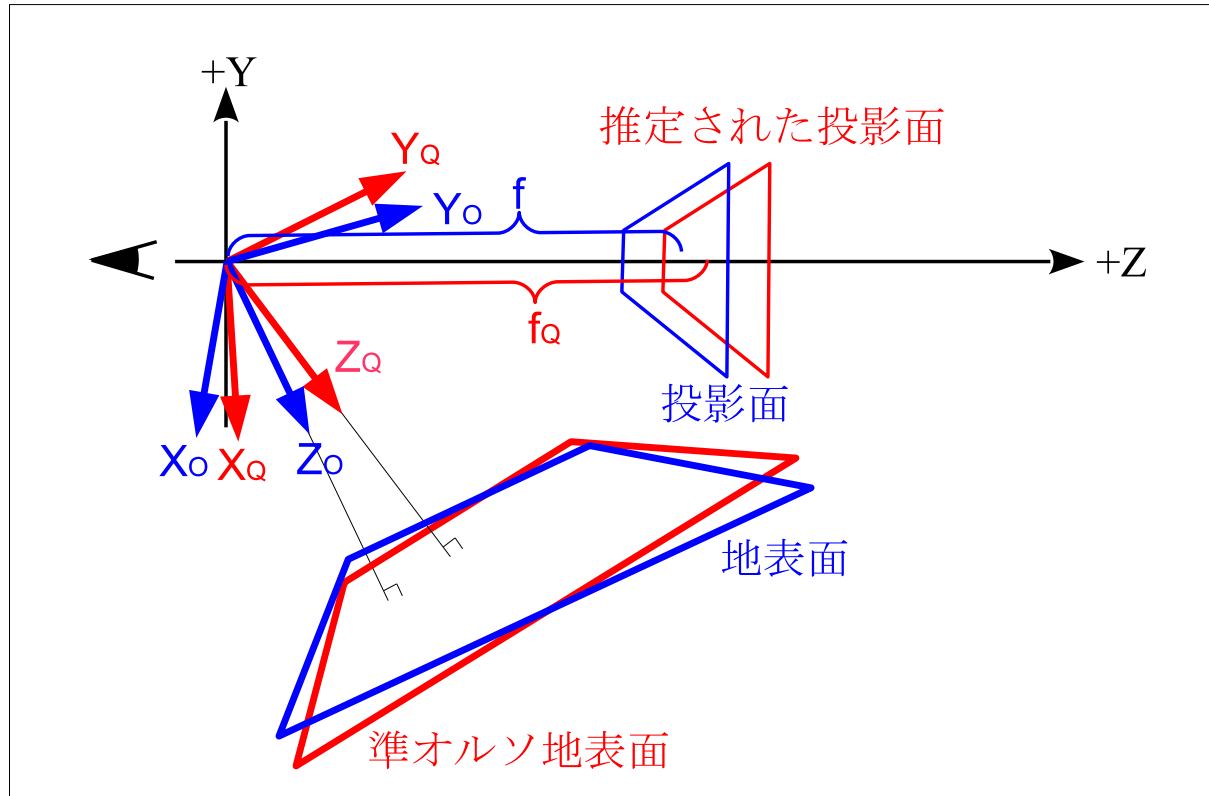


図 5.1 準カメラ空間を示した図。真の焦点距離を f とし、推測した焦点距離を f_Q で表す。 Y_Q, Z_Q をカメラ空間における推定された進行方向単位ベクトルおよび地表面の単位法線ベクトルとし、 X_Q は $X_Q = Y_Q \times Z_Q$ で定義されるものとする。準オルソ空間はこれら X_Q, Y_Q, Z_Q を X, Y, Z 軸方向の基底ベクトルとする正規直交空間である。カメラ空間における真の進行方向単位ベクトルおよび地表面法線ベクトルを Y_O, Z_O とし、 X_O を $X_O = Y_O \times Z_O$ にて定義する。オルソ空間はこれら X_O, Y_O, Z_O を X, Y, Z 軸方向の基底ベクトルとする正規直交空間である。 f_Q が f に十分に近い値である場合は、 X_Q, Y_Q, Z_Q はそれぞれ X_O, Y_O, Z_O に近づき、準オルソ空間はオルソ空間に近づく。

定義 5.4 準オルソ空間にて、準オルソ地表面を法線方向から眺めたものを**準オルソ化画像**と呼ぶ。

表 5.1 にそれぞれの空間の特性をまとめた表を示す。擬似オルソ化画像では、平行性は保持されたが、地表平面上での角度は保持される保証がない。しかし準オルソ化画像では、準オルソ空間がほぼカメラ空間と等しい状況となるため、地表面上の角度はほぼ保持され则认为る。また、それぞれの空間における地表平面の大きさであるが、擬似オルソ空間では、航空機の進行方向に関しては GPS の変化量を考慮し、その大きさは誤差の範囲内で正確であると言える。しかし、 X 軸方向に関しては、その大きさがどの程度正確であるのかは不明である。一

	平行性	角度	大きさ
擬似オルソ空間	◎	×	△
準オルソ空間	◎	○	○
オルソ空間	◎	◎	◎

表 5.1 各オルソ空間の特性を示した表。表中の記号の意味については以下のとおりである。

- ◎…完全に保持される
- …保持される（が、誤差を含んでいる）
- △…進行方向に関しては保持される
- ×…保持されない

方、準オルソ空間においては、 X, Y 軸方向共に、ほぼ地表平面の大きさと等しい状況となる。

誤差なく焦点距離推定できたと仮定すると、準オルソ空間とオルソ空間は一致し、準オルソ化画像は半オルソ化画像と等しくなる。そのため、準オルソ化画像を拡大縮小や回転および平行移動すれば、準オルソ地表面上の任意の点に対応する緯度経度と一致するように平面直角座標系 [76] における XY 平面（以後、緯度経度平面と呼ぶ）上に重ねあわせることが可能である。もちろん、先に述べたとおり、一般的には焦点距離の推定値には誤差が含まれるため、誤差なく緯度経度平面に重ねることは困難であるが、ここでは完全に一致すると仮定した上で、注視点の推定方法について説明する。

準オルソ化画像空間の x, y 軸に関する基底ベクトルは、その定義より緯度経度方向および緯度経度平面における大きさを求めることができる。これは緯度経度平面に重ね合わせるための回転量および拡大縮小の大きさを決定することに他ならない。次に、具体的な平行移動量であるが、準オルソ化画像空間の原点が航空機の GPS 位置に他ならないため、この原点を対応する緯度経度平面上の位置に移動させれば良い。このようにして、準オルソ化画像を緯度経度平面上に配置すれば、鳥瞰画像の中心に対応する準オルソ化画像の緯度経度平面上の位置が注視点の緯度および経度となる。また、準オルソ化画像を緯度経度空間上のしかるべき位置に配置しているため、地図へのレジストレーションも完了することとなる（図 5.2）。

5.2 誤差解析

5.2.1 航空機の進行方向と地表面との角度誤差に関する解析

擬似オルソ空間構築では、航空機は地表平面に平行に飛行しているとした。理想的には、航空機の進行方向と地表平面とがなす角度 λ は 0 度になることが望ましいが、厳密に地表平面と平行に飛行することは難しい。本節では、擬似オルソ化画像経由で求められる地表平面上の方向ベクトルに、 λ がどのような影響を与えるのか調査する。本調査は 3 段階に分けて行う：

1. 正規カメラ空間における航空機の進行方向と擬似オルソ地表面とのなす角度を λ' とし、 λ と λ' との関係を調べる。
2. 正規カメラ空間において、擬似オルソ地表面と航空機の進行方向とが平行である場合と、 λ' の角度をもつ場合とで、擬似オルソ化画像上でどれだけの角度誤差が生じるのかを調べる。
3. 擬似オルソ化画像上での角度誤差が地表平面上でどれだけの角度差になるのかを調べる。

以下に、上記各項目に対応する補題を示す。各補題では、カメラ光軸を軸としてカメラ空間全体を回転させてもそれぞれの証明には影響がないため、地表平面に対する消失線が x 軸と平行になるよう適当に回転しているものとする。

補題 5.1 カメラ空間における航空機の進行方向ベクトル V が地表平面と角度 λ をなすとする。このとき、正規カメラ空間における航空機の進行方向ベクトルと擬似オルソ地表面とがなす角度 $\lambda'_{f,\psi,\lambda,\omega}$ は次式で表される。

$$\lambda'_{f,\psi,\lambda,\omega} = \cos^{-1} \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (5.1)$$

ただし、 f を焦点距離、 V の地表平面上への正射影とカメラ空間の X 軸とのなす角度を ω 、 ψ をカメラ光軸と地表平面とのなす角度（以後これを「撮影角度」と呼ぶ）として、

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\tan^2 \lambda \cos^2 \psi + \frac{1}{f^2} \tan^2 \lambda \sin^2 \psi} \\ b &= \sqrt{\cos^2 \omega + (\sin \omega \sin \psi + \tan \lambda \cos \psi)^2 + \frac{1}{f^2} (\sin \omega \cos \psi - \tan \lambda \sin \psi)^2} \\ c &= \sqrt{\cos^2 \omega + \sin^2 \omega \sin^2 \psi + \frac{1}{f^2} \sin^2 \omega \cos^2 \psi} \end{aligned}$$

とする。

証明

V の地表平面上への正射影（＝地表平面に平行な成分）を V_H とすると、定義より、 $|V_H| = |V| \cos \lambda$ であり、 V_H は ZX 平面を X 軸を中心に ψ だけ回転させた平面上にあるため、 $V_H = |V|(\cos \lambda)(\cos \omega, \sin \omega \sin \psi, \sin \omega \cos \psi)$ と表される。

また、 V は定義より、地表平面の単位法線ベクトル $N = (0, \cos \psi, -\sin \psi)$ を用いて、 $V = V_H + |V_H|(\tan \lambda)N$ と表されるため、

$$V = |V|(\cos \lambda)(\cos \omega, \sin \omega \sin \psi + \tan \lambda \cos \psi, \sin \omega \cos \psi - \tan \lambda \sin \psi)$$

と表現される。

正規カメラ空間における V および V_H を、 V', V'_H とすると、その座標は

$$V' = |V|(\cos \lambda)(\cos \omega, \sin \omega \sin \psi + \tan \lambda \cos \psi, \frac{1}{f}(\sin \omega \cos \psi - \tan \lambda \sin \psi))$$

および

$$V'_H = |V|(\cos \lambda)(\cos \omega, \sin \omega \sin \psi, \frac{1}{f}(\sin \omega \cos \psi))$$

と表される。

V' と V'_H の角度が $\lambda'_{f,\psi,\lambda,\omega}$ であり、これは V' と V'_H により張られる三角形に関する余弦定理より求めることができる。

$$\cos \lambda_{f,\psi,\lambda,\omega} = \frac{|V'|^2 + |V'_H|^2 - |V' - V'_H|^2}{2|V'||V'_H|}$$

を得るが、

$$V' - V'_H = |V|(\cos \lambda)(0, \tan \lambda \cos \psi, -(\tan \lambda \sin \psi)/f)$$

であり、 $|V'|, |V'_H|$ および $|V' - V'_H|$ は共に $|V| \cos \lambda$ の倍数である。よって、 a, b, c を $|V' - V'_H| = |V|(\cos \lambda)a$, $|V'| = |V|(\cos \lambda)b$ および $|V'_H| = |V|(\cos \lambda)c$ を満たす値とすると、

$$\cos \lambda_{f,\psi,\lambda,\omega} = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

を得る。ただし、

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\tan^2 \lambda \cos^2 \psi + \frac{1}{f^2} \tan^2 \lambda \sin^2 \psi} \\ b &= \sqrt{\cos^2 \omega + (\sin \omega \sin \psi + \tan \lambda \cos \psi)^2 + \frac{1}{f^2} (\sin \omega \cos \psi - \tan \lambda \sin \psi)^2} \\ c &= \sqrt{\cos^2 \omega + \sin^2 \omega \sin^2 \psi + \frac{1}{f^2} \sin^2 \omega \cos^2 \psi} \end{aligned}$$

である。 ■

補題 5.2 擬似オルソ地表面の単位法線ベクトルを N' とする。補題 5.1 における V' を正規化したベクトルと N' から構築される擬似オルソ空間を P' とし、同様に補題 5.1 における V'_H を正規化したベクトルと N' から構築される擬似オルソ空間を P'_H とする（本来、擬似オルソ空間は正規カメラ空間における正規直交基底にて構成されるものであるが、 P' においては、 V' を擬似オルソ地表平面と平行なベクトルとみなして擬似オルソ空間の構築を行うものとする）。このとき、 P' および P'_H にて生成される擬似オルソ化画像をそれぞれ I', I'_H で表す。 I'_H 上で x 軸に対し ω' の角度をもつ方向ベクトルを d'_H とし、この方向ベクトルを P'_H 内の方向ベクトルとみなしたものを D'_H とする。 D'_H の P' での表現を D' とし、このベクトルに対応する I' 上のベクトルを d' とする。 I' において、 d' が x 軸となす角度を $\omega' + \rho'$ とする。このとき、 ρ' は ω' と補題 5.1 における λ' を用いて、次のように表される：

$$\rho'_{\lambda', \omega'} = \cos^{-1} \frac{\cos^2 \omega' + \sin^2 \omega' / \cos \lambda'}{\sqrt{\cos^2 \omega' + (\sin \omega' / \cos \lambda')^2}} \quad (5.2)$$

なお、 ρ' における添字 λ', ω' は ρ' に影響を与えるパラメータを表す。

証明

P'_H から P' への変換行列を $M_{\lambda'}$ とする。対応する基底ベクトルに着目すると、次のように表わされることが分かる：

$$M_{\lambda'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda' & 0 \\ 0 & \sin \lambda' & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\cos \lambda' & 0 \\ 0 & -\tan \lambda' & 1 \end{pmatrix}$$

また、 $d'_H = (\cos \omega', \sin \omega', 0)$ であるため、定義より、

$$D' = M_{\lambda'} D'_H = \begin{pmatrix} \cos \omega' \\ \sin \omega' / \cos \lambda' \\ -\tan \lambda' \sin \omega' \end{pmatrix}$$

を得る。 I' においては P' の第 2 基底ベクトルである V' は地表平面と平行であるとみなすため、 D' は擬似オルソ地表面と平行であると解釈する。そのため、 I' 上の方向ベクトル d' の座標値は D' の X 座標値および Y 座標値と等しいと考え、 $d' = (\cos \omega', \sin \omega' / \cos \lambda')$ を得る。 ρ' は d'_H と d' とのなす角度に他ならないので、

$$\rho'_{\lambda', \omega'} = \cos^{-1} d'_H \cdot \frac{d'}{|d'|} = \cos^{-1} \frac{\cos^2 \omega' + \sin^2 \omega' / \cos \lambda'}{\sqrt{\cos^2 \omega' + (\sin \omega' / \cos \lambda')^2}}$$

を得る。 ■

補題 5.3 補題 5.2 における、 d' と d'_H に対応する地表平面上のベクトルを d および d_H とする。このとき、これらのベクトルがなす角度 $\rho_{f, \psi, \omega', \rho'}$ は次式で表される：

$$\rho_{f, \psi, \omega', \rho'} = \tan^{-1} \frac{c_{f, \psi} (1 + \tan^2 \omega') \tan \rho'}{1 - \tan \omega' \tan \rho' + c_{f, \psi}^2 (\tan \omega' + \tan \rho') \tan \omega'} \quad (5.3)$$

ただし、 f は焦点距離、 ψ は撮影角度、 ω' は d'_H が x 軸となす角度、 ρ' は d' と d'_H とがなす角度とし、

$$c_{f,\psi} = \sin \psi \sin (\tan^{-1} (f \tan \psi)) + f \cos \psi \cos (\tan^{-1} (f \tan \psi))$$

とする。

証明

撮影角度が ψ であるので、カメラ空間における地表平面の単位法線ベクトルは $(0, \cos \psi, -\sin \psi)$ と表わされる。命題 3.1 を用いると、正規カメラ空間における擬似オルソ地表面の法線ベクトルは $(0, \cos \psi, -f \sin \psi)$ と平行であることが分かる。これより、擬似オルソ地表面の正規カメラ空間における撮影角度を ψ' とすると、次の関係式を得る：

$$\tan \psi' = \frac{f \sin \psi}{\cos \psi} = f \tan \psi$$

擬似オルソ空間内の単位円周上の点 q' に対し、対応するオルソ空間内の点を q とする。今、 q を媒介変数 t を用いて $q' = (\cos t, 0, \sin t)$ と表す。 q' から q への変換は定義より次の手順により行われる：

1. 擬似オルソ空間から正規カメラ空間へ： X 軸を中心に ψ' だけ回転する。
2. 正規カメラ空間からカメラ空間へ： Z 座標を f 倍する。
3. カメラ空間からオルソ空間へ： X 軸を中心に $-\psi$ だけ回転する。

上記の手順にそって q' に対応する q の座標を計算すると、 $q = (\cos t, 0, c_{f,\psi} \sin t)$ を得る。

次に q' および q が、それぞれの空間の X 軸となす角度を ω' および ω とすると、 q の X, Z 座標値より、

$$\tan \omega = \frac{c_{f,\psi} \sin \omega'}{\cos \omega'} = c_{f,\psi} \tan \omega' \quad (5.4)$$

を得る。上式に対し、擬似オルソ地表面での誤差を ρ' 、この角度誤差により生じる地表平面の誤差を ρ とすると、次式が成り立つ：

$$\tan(\omega + \rho) = c_{f,\psi} \tan(\omega' + \rho')$$

上式を正接の加法定理と式 5.4 を用いて整理し、次式を得る：

$$\rho = \tan^{-1} \frac{c_{f,\psi} (1 + \tan^2 \omega') \tan \rho'}{1 - \tan \omega' \tan \rho' + c_{f,\psi}^2 (\tan \omega' + \tan \rho') \tan \omega'}$$

■

補題 5.1 から 5.3 で得られた式はどれも複雑であり、 λ が ρ に及ぼす影響を解析的に求めることは困難である。ここでは $f = 50/18$ (35 mm フィルム換算で 50mm の標準レンズ。以

下、レンズのミリ数は 35mm フィルム換算におけるものとする)、 $\psi = 30$ 度、 $|\lambda| \leq 10$ 度として、 ρ がどの程度変化するのかグラフを用いて調査する。図 5.3 は式 (5.1) を上記の条件下、 $\lambda = 1, 2, \dots, 10$ 度、 ω を 0 度から 360 度まで変化させたグラフである。 λ' を f, ψ, λ, ω の関数とみると、 $\lambda'(f, \psi, -\lambda, -\omega) = \lambda'(f, \psi, \lambda, \omega)$ であるため、 $\lambda = -1, -2, \dots, -10$ 度の場合グラフは、このグラフを左右反転したものとなる。グラフより、 $|\lambda'|$ は 13 度を超えないことが分かる。次に式 (5.2) のグラフから、 $|\lambda'| \leq 13$ 度における $\rho'_{\lambda', \omega'}$ の変動量を調べる。 $\rho'_{\lambda', \omega'}$ を λ' と ω' の関数とみると、 $\rho'(-\lambda', \omega') = \rho'(\lambda', \omega')$, $\rho'(\lambda', -\omega') = \rho'(\lambda', \omega')$ および $\rho'(\lambda', 90^\circ + \omega') = \rho'(\lambda', 90^\circ - \omega')$ が成り立つため、 $0 \leq \lambda' \leq 13$ 度において、 $0 \leq \omega' \leq 90$ 度のグラフを描けば十分である (図 5.4)。グラフより、 $|\rho'| < 0.8$ 度を得る。最後に、式 (5.3) を用いて、 $\rho_{f, \psi, \omega', \rho'}$ の変化をみる。 ρ を f, ψ, ω', ρ' の関数とみると $\rho(f, \psi, -\omega', -\rho') = -\rho(f, \psi, \omega', \rho')$, $\rho(f, \psi, \omega' + 180^\circ, \rho') = \rho(f, \psi, \omega', \rho')$ が成り立つため、 $0 \leq \omega' \leq 180$ 度の範囲でグラフを描けば十分である (図 5.5)。グラフより、 $|\rho| < 1.4$ 度であることが分かる。以上をまとめると、50mm の標準レンズを用いて撮影角度 30 度で撮影している場合、航空機の進行方向が地表平面に対し -10 度から $+10$ 度の範囲内であれば、提案手法により推定された 2 つの主要方向ベクトルがなす角度の進行方向誤差に起因する最大誤差は 2.8 度 ($= 2 \max(|\rho|)$) を超えないことが分かる。

5.2.2 地表平面上の角度誤差に関する解析

本研究では、地表平面上で 90 度をなすであろう方向ベクトルを求め、注視点の初期値を推定する。しかし、推定した方向ベクトルが必ずしも地表平面で 90 度をなすという保証はない。ここでは、地表平面上の角度誤差が焦点距離ならびに注視点推定に与える影響を調査する。

地表平面上で実際には 90 度をなさない 2 つの方向ベクトルを用いて求められた焦点距離を f_E とし、真の焦点距離を f_0 とする。また、カメラ空間内における地表平面上の方向ベクトルを D_1, D_2 とし、これらのベクトルがなす角度を θ_0 とする。焦点距離 f_E は $\theta_0 \neq 90^\circ$ であるにも関わらず、 $\theta_0 = 90^\circ$ と仮定して D_1, D_2 より求めた焦点距離である。一方、 f_0 は θ_0 の正確な値を基に求めた焦点距離である (もちろん、 $\theta_0 = 90^\circ$ であれば、 $f_E = f_0$ となる)。 θ_0 が注視点推定に与える影響を以下の手順にて調べることにする。

1. f_0 と f_E の関係を求める。
2. 上で求めた関係式には D_1 の消失点と D_2 の消失点との距離が関係しているため、これら 2 つの消失点間距離の解析を行う。
3. f_0 に対する f_E の変動が注視点推定に与える影響を調べる。

以下、上記項目に対応する補題を示す。前節と同様に各補題の証明では、カメラ光軸を軸としてカメラ空間全体を回転させても影響はないため、地表平面に対する消失線が x 軸と平行に

なるよう適当に回転しているものとする。

補題 5.4 カメラ空間における 2 つの方向ベクトルを D_1, D_2 とし、これらのベクトルがなす角度を θ_0 とする。 D_1, D_2 に対する鳥瞰画像上の消失点を p_1, p_2 とし、それらの座標を $p_1 = (u_1, v_1), p_2 = (u_2, v_2)$ とする。 D_1, D_2 が直角をなしているものと仮定し、これら消失点より求めた焦点距離を f_E とする。

真の焦点距離を f_0 とするとき、 f_0 と f_E の間には以下の不等式が成立する。

$$|f_E^2 - f_0^2| \leq \frac{L^2}{2 \tan^2 \theta_0} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0}\right)$$

ただし、 $L = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}$ とし、 p_1, p_2 間の距離を表すものとする。

証明

系 A.2 より、 D_1, D_2 とベクトル (u_1, v_1, f_0) と (u_2, v_2, f_0) は平行である。カメラの視点を Q とし、 Q から投影面に下ろした垂線の足を C とすると、 θ_0 と f_0 の関係は図 5.6(a) のようになる。消失点である p_1, p_2 は定まった値であり、また、視点から投影面に下ろした垂線の足 C も変化することはない。今、 p_1, p_2, C が固定された三角錐 QCp_1p_2 に対し、 QC の長さを f として変化させると、 $\angle p_1 Q p_2$ は f により定まる。 $\angle p_1 Q p_2$ を $\theta(f)$ と表すとき、カメラ空間における 2 つの方向ベクトル D_1, D_2 と、これらがなす角度 θ_0 およびこれらの消失点から真の焦点距離 f_0 を求めるということは、 $\theta(f_0) = \theta_0$ なる f_0 を求めることに他ならない（図 5.6(b)）。一方、 D_1, D_2 がなす本当の角度 θ_0 を考慮することなく、 D_1, D_2 がカメラ空間で直交すると仮定して求める焦点距離 f_E は、 $\theta(f) = 90^\circ$ を満たす f を求めていることに他ならない。

次に $\theta(f)$ を具体的に求めるため、線分 $p_1 p_2$ の長さが 1 になるよう、三角錐 QCp_1p_2 を適当に拡大縮小し、問題を単純化する（最終的には元の大きさに戻して関係式を確定する）。 C から $p_1 p_2$ へ下ろした垂線の足を H とし、線分 CH の長さを h 、線分 $p_1 H$ の長さを k とする（図 5.6(c)）。点 C の定義より、三角形 QCH は直角三角形であるため、線分 QH の長さは $\sqrt{f^2 + h^2}$ となる。また、三垂線の定理より線分 QH と線分 $p_1 p_2$ は垂直となるので次式を得る：

$$\begin{aligned} \theta(f) &= \angle p_1 Q H + \angle p_2 Q H \\ &= \tan^{-1} \frac{k}{\sqrt{f^2 + h^2}} + \tan^{-1} \frac{1 - k}{\sqrt{f^2 + h^2}} \end{aligned}$$

両辺の正接をとり、正接の加法定理を用いて整理し、

$$(f^2 + h^2 - k(1 - k)) \sin \theta(f) = \sqrt{f^2 + h^2} \cos \theta(f) \quad (5.5)$$

を得る。 $\theta(f_E) = 90^\circ$ より、 f_E に関する関係式：

$$f_E^2 + h^2 - k(1 - k) = 0 \quad (5.6)$$

を得る。同様に $\theta(f_0) = \theta_0$ より、 $(f_0^2 + h^2 - k(1 - k)) \sin \theta_0 = \sqrt{f_0^2 + h^2} \cos \theta_0$ を得るが、式 5.6 および $E = f_E^2 - f_0^2$ を用いて式 5.5 を整理して、

$$E^2 \tan^2 \theta_0 + E - k(1 - k) = 0$$

を得る。これを E について解き、

$$E = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4k(1 - k) \tan^2 \theta_0}}{2 \tan^2 \theta_0} \quad (5.7)$$

を得る。 k の定義より、 $0 \leq k \leq 1$ であり、 $0 \leq k(1 - k) \leq 1/4$ が成り立つので、式 5.7 の根号の中は必ず正となり、 E は実数解を持つことが保証される。 k の値による E の変化を調べると、式 5.7 の根号の内部が最大になるときが E の最大値および最小値となることは明らかである。よって、次の不等式を得る。

$$\frac{-1 - \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0}}{2 \tan^2 \theta_0} \leq E \leq \frac{-1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0}}{2 \tan^2 \theta_0}$$

上式の両辺を整理して、

$$-\frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} - \sqrt{\frac{1}{4 \tan^4 \theta_0} + \frac{1}{4 \tan^2 \theta_0}} \leq f_E^2 - f_0^2 \leq -\frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} + \sqrt{\frac{1}{4 \tan^4 \theta_0} + \frac{1}{4 \tan^2 \theta_0}}$$

を得るが、 $f_E^2 - f_0^2$ の変動範囲に興味があるため、上式から $|f_E^2 - f_0^2|$ の変動範囲を求めると、

$$|f_E^2 - f_0^2| \leq \max \left(\left| -\frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} - \sqrt{\frac{1}{4 \tan^4 \theta_0} + \frac{1}{4 \tan^2 \theta_0}} \right|, \left| -\frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} + \sqrt{\frac{1}{4 \tan^4 \theta_0} + \frac{1}{4 \tan^2 \theta_0}} \right| \right)$$

を得る。 $1/(2 \tan^2 \theta_0)$ および $\sqrt{1/(4 \tan^4 \theta_0) + 1/(4 \tan^2 \theta_0)}$ も正であるため、

$$|f_E^2 - f_0^2| \leq \frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} + \sqrt{\frac{1}{4 \tan^4 \theta_0} + \frac{1}{4 \tan^2 \theta_0}} = \frac{1}{2 \tan^2 \theta_0} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0} \right)$$

を得る。

ここまでは証明を簡単にするために線分 $p_1 p_2$ の長さが 1 となるよう三角錐 $QCp_1 p_2$ を適当に拡大縮小していた。上式における f_0, f_E は、この拡大縮小した三角形における値となる。元の大きさにて考えた場合は、線分 $p_1 p_2$ の長さを L とし、上式の右辺を L^2 倍した式が成立する。左辺は f_E, f_0 のみであり、拡大した三角錐における f_E, f_0 であるため、 L^2 倍する必要はない (f_E, f_0 の値は L 倍した三角錐を用いた場合の焦点距離を指すため)。以上より、

$$|f_E^2 - f_0^2| \leq \frac{L^2}{2 \tan^2 \theta_0} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0} \right)$$

が成立する。 ■

次に焦点距離に関する補題を示すが、カメラ空間における地表平面上で、ほぼ直角をなす二つの方向ベクトル D_1, D_2 の焦点距離はいくらでも大きくすることができる。それは、例えば、 $D_1 \cdot D_2 = \varepsilon$ のとき、 $D_1 = (1, 0, 0), D_2 = (\varepsilon, \Delta_{Y_2}, \Delta_{Z_2})$ (ただし、 $\varepsilon^2 + \Delta_{Y_2}^2 + \Delta_{Z_2}^2 = 1, \Delta_{Z_2} \neq 0$) とすれば、 D_1 に関する消失点 p_1 は原点から無限に遠く離れた場所に位置し、 D_2 に関する消失点 p_2 の座標値は有限の値となるため、 p_1, p_2 間の距離 L は無限に大きくなる。このことと補題 5.4 における式 5.7 が示すことは、 D_1, D_2 に対し何も条件を課さない場合は、 f_E と f_0 の誤差はいくらでも大きくなる可能性があることを示している。そのため、以下の議論においては、カメラ空間における方向ベクトル D_1, D_2 と X 軸とはある一定以上の角度 $\omega_{\min}$ をなすものとして議論を進める。

補題 5.5 カメラ空間における方向ベクトルを D_1, D_2 とし、 D_2 は最大 $\rho_{\max}$ の誤差を有して D_1 と直交するものとする。 $\omega_{\min} > 2\rho_{\max}$ として、 D_1 および D_2 が X 軸と $\omega_{\min} - \rho_{\max}$ より大きな角度をなす場合、 D_1, D_2 に関する消失点間距離は、

$$L_{f,\psi}(\omega, \rho) = \frac{f}{\cos \psi} \left| \frac{\tan^2 \omega + 1}{\tan \omega + \tan \rho} \right|$$

として、 $\max(L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}), L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}))$ を超えない。ただし、 f および ψ は、それぞれ焦点距離および撮影角度を表すとする。

証明

D_1 が X 軸となす角度を ω とすると、 $|\rho| \leq \rho_{\max}$ を用いて、 D_2 が X 軸となす角度は $\omega + 90^\circ + \rho$ と表わされる。定義より、撮影角度は ψ であるため、 D_1, D_2 の座標は、

$$\begin{cases} D_1 = (\cos \omega, \sin \psi \sin \omega, \cos \psi \sin \omega), \\ D_2 = (\cos(\omega + 90^\circ + \rho), \sin \psi \sin(\omega + 90^\circ + \rho), \cos \psi \sin(\omega + 90^\circ + \rho)) \end{cases}$$

と表わされる。任意の方向ベクトル $(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z (\neq 0))$ を有する直線の無限遠点 P_∞ は焦点距離が f であるとき、画像空間中の位置 $p_\infty = (f\Delta_X/\Delta_Z, f\Delta_Y/\Delta_Z)$ に投影されることはよく知られており、よって、 D_1, D_2 に関する消失点 p_1, p_2 の座標は、

$$\begin{cases} p_1 = \left(f \frac{\tan \omega}{\cos \omega}, f \tan \psi \right) \\ p_2 = \left(-\frac{f}{\cos \psi \tan(\omega + \rho)}, f \tan \psi \right) \end{cases}$$

と表わされることがわかる。線分 $p_1 p_2$ の長さが D_1, D_2 の消失点間距離であり、これを関数 $L_{f,\psi}(\omega, \rho)$ で表すと、

$$L_{f,\psi}(\omega, \rho) = \frac{f}{\cos \psi} \left| \tan \omega + \frac{1}{\tan(\omega + \rho)} \right|$$

となる。これを正接の加法定理を用いて整理して、

$$L_{f,\psi}(\omega, \rho) = \frac{f}{\cos \psi} \left| \frac{\tan^2 \omega + 1}{\tan \omega + \tan \rho} \right|$$

を得る。この式には絶対値が含まれるため、 $L_{f,\psi}$ ではなく、 $L_{f,\psi}^2$ を調査する。

$$F(t, q) = \left(\frac{t^2 + 1}{t + q} \right)^2$$

とすると、 $L_{f,\psi}^2(\omega, \rho) = (f^2 / \cos^2 \psi) F(\tan \omega, \tan \rho)$ と表すことができる。よって、 f および ψ が定数であるときは、 $L_{f,\psi}$ の挙動は F の定数倍となる。

$L_{f,\psi}$ の最大値を調べるため、 ω の変動範囲について考えてみる。前提条件により、 ω の変動範囲は次の 4 つの場合に分けられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} \\ 90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} \\ -90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -\omega_{\min} + \rho_{\max} \\ -180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} \end{array} \right.$$

$|\rho| < \rho_{\max}$ という条件下では、いずれの場合においても、 $\tan \omega \neq -\tan \rho$ が成り立つ。それは前提条件より $\omega_{\min} > 2\rho_{\max}$ であるため、

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\max} < \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} < 90^\circ - \rho_{\max} \\ 90^\circ + \rho_{\max} < 90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} < 180^\circ - \rho_{\max} \\ -90^\circ + \rho_{\max} < -90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -\omega_{\min} + \rho_{\max} < -\rho_{\max} \\ -180^\circ + \rho_{\max} < -180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max} < -90^\circ - \rho_{\max} \end{array} \right.$$

となるからである。

関数 $F(t, q)$ は、 $t = -q$ にてその値は未定義となる。しかし、 $0 \leq \rho \leq \rho_{\max}$ のとき、および、 $-\rho_{\max} \leq \rho \leq 0$ の場合であっても、決して $\omega = -\rho$ および $\omega = 180^\circ - \rho$ が成立しないため、 $\tan \omega = -\tan \rho$ も成立しない。よって、 $L_{f,\psi}$ の値が未定義となることはない。

ω, ρ の変動に対する関数 F の挙動を調べるため、 ω, ρ の変動範囲を次のように分ける：

$$\begin{aligned} U_1 &= \{(\omega, \rho) \mid \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho \leq |\rho_{\max}|\} \\ U_2 &= \{(\omega, \rho) \mid 90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho \leq |\rho_{\max}|\} \\ U_3 &= \{(\omega, \rho) \mid -90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -\omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho \leq |\rho_{\max}|\} \\ U_4 &= \{(\omega, \rho) \mid -180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho \leq |\rho_{\max}|\} \end{aligned}$$

F の q での偏微分は、

$$\frac{\partial F}{\partial q} = -2 \frac{(t^2 + 1)^2}{(t + q)^3}$$

である。また、 $t = \tan \omega, q = \tan \rho$ とすると、 U_1 上では $-\rho_{\max} \leq \rho \leq \rho_{\max} \leq \omega$ であるため、常に $t + q > 0$ が成立する。よって、 U_1 上では $\partial F / \partial q$ は常に負である。これは ω をあ

る値に固定して関数 F をみると、 ρ に関する単調減少関数に他ならない。よって、 U_1 上では $\rho = -\rho_{\max}$ を満たす U_1 の境界上で F は最大値をとる。このことは、次のように簡単な背理法により示すことができる。もし、ある $\rho_1 \neq -\rho_{\max}$ のとき、 F が最大値をとったとする。そのときの ω の値を ω_1 とすると、 ω を ω_1 で固定したとき、関数 F は ρ に関して単調減少関数であるため、 $-\rho_{\max} < \rho_2 < \omega_1$ なる ρ_2 では、 $F(\tan \omega_1, \tan \rho_2) > F(\tan \omega_1, \tan \rho_1)$ となり U_1 上で $F(\tan \omega_1, \tan \rho_1)$ が最大という前提条件に矛盾してしまう。

U_2 においては、常に $t + q < 0$ が成り立つため、 $\partial F / \partial q > 0$ が成り立つ。よって、 U_2 上では $\rho = \rho_{\max}$ を満たす U_2 の境界線上で F は最大値をとる。 U_3, U_4 においても同様であり、 U_3 では $\rho = \rho_{\max}$ を満たす U_3 の境界線上で、 U_4 では $\rho = -\rho_{\max}$ を満たす U_4 の境界線上で F は最大値をとることが分かる。

以上より、領域 U_i において F が最大値を取りうる領域を V_i とすると、

$$\begin{aligned} V_1 &= \{(\omega, \rho) \mid \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho = -\rho_{\max}\} \\ V_2 &= \{(\omega, \rho) \mid 90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq 180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho = \rho_{\max}\} \\ V_3 &= \{(\omega, \rho) \mid -90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -\omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho = \rho_{\max}\} \\ V_4 &= \{(\omega, \rho) \mid -180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max} \leq \omega \leq -90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \quad \rho = -\rho_{\max}\} \end{aligned}$$

となる。

次に F が最大値をとる境界線上での様子を調べる。 $V_1, \dots, V_4$ 全てにおいて、 ρ は全て定数であるため、 F においてはもはや ρ を変数としてみなす必要はない。

$$F_\rho(t) = \left(\frac{t^2 + 1}{t + \tan \rho} \right)^2$$

とすると、

$$\frac{dF_\rho}{dt} = 2 \left(\frac{t^2 + 1}{t + \tan \rho} \right) \left(\frac{2t(t + \tan \rho) - (t^2 + 1)}{(t + \tan \rho)^2} \right)$$

であり、 $t \neq \tan \rho$ においては、

$$\frac{t^2 + 1}{t + \tan \rho} \neq 0, \quad (t + \tan \rho)^2 > 0$$

であるため、

$$\frac{dF_\rho}{dt} = 0 \iff 2t(t + \tan \rho) - (t^2 + 1) = 0$$

を得る。これより、 $dF_\rho/dt = 0$ の解は $t = -\tan \rho \pm \sqrt{1 + \tan^2 \rho}$ であることが分かる。

V_1 においては、 $\tan \omega > 0$ より、関数 $F_{-\rho_{\max}}$ は

$$\omega = \tan^{-1} \left(\tan \rho_{\max} + \sqrt{1 + \tan^2 \rho_{\max}} \right)$$

にて極値をとる可能性がある。ここで「可能性がある」と表現したのは、この ω の値が U_1 に属するか否かを議論していないためである。関数 $F_{-\rho_{\max}}(t)$ のグラフは $t < -\tan \rho_{\max}$ と $-\tan \rho_{\max} < t$ の二つの部分に分かれる。また、

$$F_{\rho}(t) = \left(\frac{t + 1/t}{1 + (\tan \rho)/t} \right)^2$$

であるため、

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow -\infty} F_{-\rho_{\max}}(t) &= \infty \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} F_{-\rho_{\max}}(t) &= \infty \\ \lim_{t \rightarrow -\tan \rho_{\max}} F_{-\rho_{\max}}(t) &= \infty \end{aligned}$$

となる。これは、 V_1 上で極値を持つ場合は $F_{-\rho_{\max}}(\tan \omega)$ は下に凸であることを示す。この場合、 V_1 上での $F_{-\rho_{\max}}(\tan \omega)$ の最大値は ω の端点でとることとなる。また V_1 上で極値を持たない場合は、 $F_{-\rho_{\max}}(\omega)$ は V_1 上で単調増加もしくは単調減少となる。この場合もやはり $F_{-\rho_{\max}}(\tan \omega)$ の最大値は ω の端点でとることとなる。以上をまとめると、 V_1 上では、 $L_{f,\psi}(\omega, \rho) \leq \max(L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}), L_{f,\psi}(90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, -\rho_{\max}))$ を得る。同様にして、 V_2, V_3, V_4 上では、

$$L_{f,\psi}(\omega, \rho) \leq \begin{cases} \max(L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}), \\ \quad L_{f,\psi}(180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \rho_{\max})), & (\omega, \rho) \in V_2 \\ \max(L_{f,\psi}(-90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}), \\ \quad L_{f,\psi}(-\omega_{\min} + \rho_{\max}, \rho_{\max})), & (\omega, \rho) \in V_3 \\ \max(L_{f,\psi}(-180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}), \\ \quad L_{f,\psi}(-90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, -\rho_{\max})) & (\omega, \rho) \in V_4 \end{cases}$$

を得る。

また、 $L_{f,\psi}(-\omega, -\rho), L_{f,\psi}(\omega - 180^\circ, \rho)$ を実際に計算すると、

$$L_{f,\psi}(-\omega, -\rho) = L_{f,\psi}(\omega - 180^\circ, \rho) = L_{f,\psi}(\omega, \rho)$$

であることが分かる。よって、

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{f,\psi}(90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, -\rho_{\max}) = L_{f,\psi}((90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}) - 180^\circ, -\rho_{\max}) \\ \quad = L_{f,\psi}(-90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, -\rho_{\max}) \\ \quad = L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}) \\ L_{f,\psi}(180^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, \rho_{\max}) = \cdots = L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}) \\ L_{f,\psi}(-90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}) = \cdots = L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}) \\ \quad L_{f,\psi}(-\omega_{\min} + \rho_{\max}, \rho_{\max}) = L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}) \\ L_{f,\psi}(-180^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}) = \cdots = L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}) \\ \quad L_{f,\psi}(-90^\circ - \omega_{\min} + \rho_{\max}, -\rho_{\max}) = L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}) \end{array} \right.$$

であるため、結局、 D_1, D_2 の消失点間距離 $L_{f,\psi}(\omega, \rho)$ に対し、

$$L_{f,\psi}(\omega, \rho) \leq \max(L_{f,\psi}(\omega_{\min} - \rho_{\max}, -\rho_{\max}), L_{f,\psi}(90^\circ + \omega_{\min} - \rho_{\max}, \rho_{\max}))$$

を得る。 ■

補題 5.6 真の焦点距離を f_0 とし、誤差を含んだ焦点距離を f_E とする。カメラ空間において、視点より地表平面上に下ろした垂線の足を G とし、真の注視点を T_0 とする。 f_E を用いて推定した注視点を T_E とすると、

$$\frac{R_E}{R_0} = \frac{f_E}{f_0}$$

が成立する。ただし、 R_0 は線分 GT_0 の長さを表し、 R_E は線分 GT_E の長さを表すものとする。

証明

正規カメラ空間における撮影角度を ψ' とすると、擬似オルソ地表面の単位法線ベクトル N' は、 $N' = (0, \cos \psi', -\sin \psi')$ と表すことができる。 f_0 を用いて N' から求めた真の地表平面の法線ベクトルを N_0 とし、 N' と N_0 の Y 座標は変化しないことに着目すると、

$$\tan \psi' = f_0 \tan \psi_0 \quad (5.8)$$

を得る。但し、 ψ_0 はカメラ空間における真の撮影角度を表すものとする。同様に、 f_E を用いて、 N' から推定した誤差を含んだ地表平面の法線ベクトルを N_E とし、 N_E を用いて推定した、誤差を含んだカメラ空間における撮影角度を ψ_E とすると、

$$\tan \psi' = f_E \tan \psi_E \quad (5.9)$$

を得る。式 5.8, 5.9 より、

$$\frac{f_E}{f_0} = \frac{\tan \psi_0}{\tan \psi_E}$$

を得る。

航空機の地表平面からの高度を H_0 とすると、カメラ空間の原点を O として、三角形 OGT_0 は $\angle OGT_0$ を直角とする直角三角形であり、 $\angle OT_0G = \psi_0$ であるため、 $\tan \psi_0 = H_0/R_0$ が成り立つ。同様に、 $\tan \psi_E = H_0/R_E$ が成り立つため、

$$\begin{aligned} \frac{f_E}{f_0} &= \frac{\tan \psi_0}{\tan \psi_E} = \frac{\frac{H_0}{R_0}}{\frac{H_0}{R_E}} \\ &= \frac{R_E}{R_0} \end{aligned}$$

を得る。 ■

以上を用いて、50 mm の標準レンズ、撮影角度 30 度、地表平面上で最大 3 度の誤差を持つ方向ベクトルを用いた場合の、注視点推定誤差を求めてみる。ただし、それぞれの方向ベクトルはカメラ空間の X 軸とは 27 度 ($= 30^\circ - 3^\circ$) 以上の角度をなすものとする。条件より、 $f_0 = 50/18, \psi = 30^\circ, \omega_{\min} = 30^\circ, \rho_{\max} = 3^\circ$ であるため、補題 5.5 より

$$L_{f_0, \psi}(\omega, \rho) \leq \max(L_{f_0, \psi}(27^\circ, -3^\circ), L_{f_0, \psi}(117^\circ, 3^\circ)) = L_{f_0, \psi}(27^\circ, -3^\circ) = 8.8384 \dots$$

を得る。よって、補題 5.4 より誤差を含んだ消失点 f_E において f_E^2 と f_0^2 の絶対誤差は

$$|f_E^2 - f_0^2| \leq \frac{L_{f_0, \psi}^2(27^\circ, -3^\circ)}{2 \tan^2 \theta_0} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0}\right)$$

で得られ、 $87^\circ \leq \theta_0 \leq 93^\circ$ として描いた上式右辺のグラフが図 5.7 である。上式右辺は $\theta_0 = 90^\circ$ で未定義となるが、次のように変形することができるため、グラフではその極限值 0 を用いている。

$$\begin{aligned} |f_E^2 - f_0^2| &\leq \frac{L_{f_0, \psi}^2(27^\circ, -3^\circ)}{2 \tan^2 \theta_0} \left(1 + \sqrt{1 + \tan^2 \theta_0}\right) \\ &= \frac{L_{f_0, \psi}^2(27^\circ, -3^\circ)}{2} \left(\frac{1}{\tan^2 \theta} + \sqrt{\frac{1}{\tan^4 \theta} + \frac{1}{\tan^2 \theta}}\right) \end{aligned}$$

グラフより $|f_E^2 - f_0^2| < 2.16$ であり、 f_E の f_0 に対する比を s とすれば $f_E = sf_0$ として表すことができ、 $|s^2 - 1| < 2.16/f_0^2$ を得る。今 $f_0 = 50/18$ であるので、 s の範囲を具体的に求めることができ、 s は $0.84 < s < 1.14$ の範囲に収まることが分かる。一方、補題 5.6 より $R_E/R_0 = f_E/f_0 = s$ であるため、想定した条件下においては、注視点推定にて最大 16% 程度の誤差が含まれることとなる。

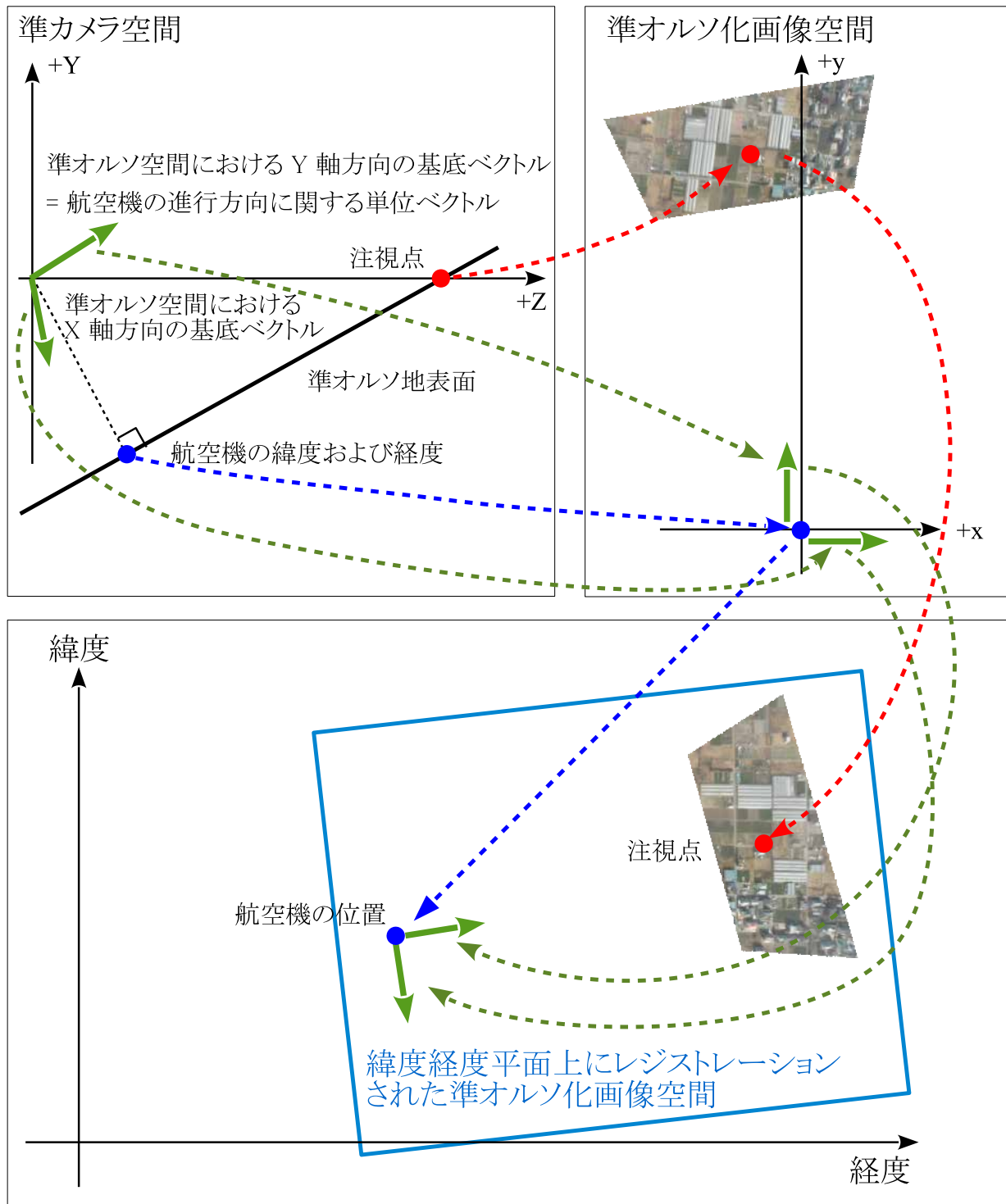


図 5.2 注視点推定および幾何学的レジストレーションの様子。

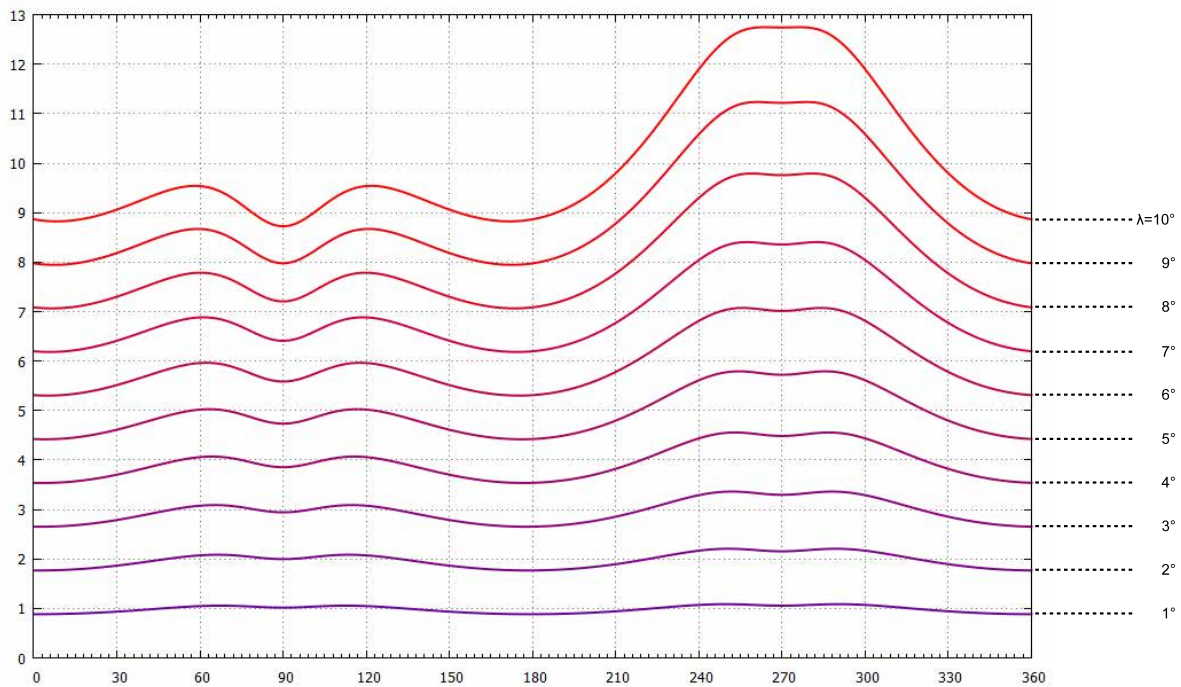


図 5.3 $f = 50/18$, $\psi = 30^\circ$, $\lambda = 1, 2, \dots, 10$, $0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$ として描いたグラフ。横軸は ω (航空機の進行方向がカメラ空間の X 軸となす角度)、縦軸は λ' (正規カメラ空間において擬似オルソ地表面と航空機の進行方向がなす角度)。縦軸横軸共に単位は度である。

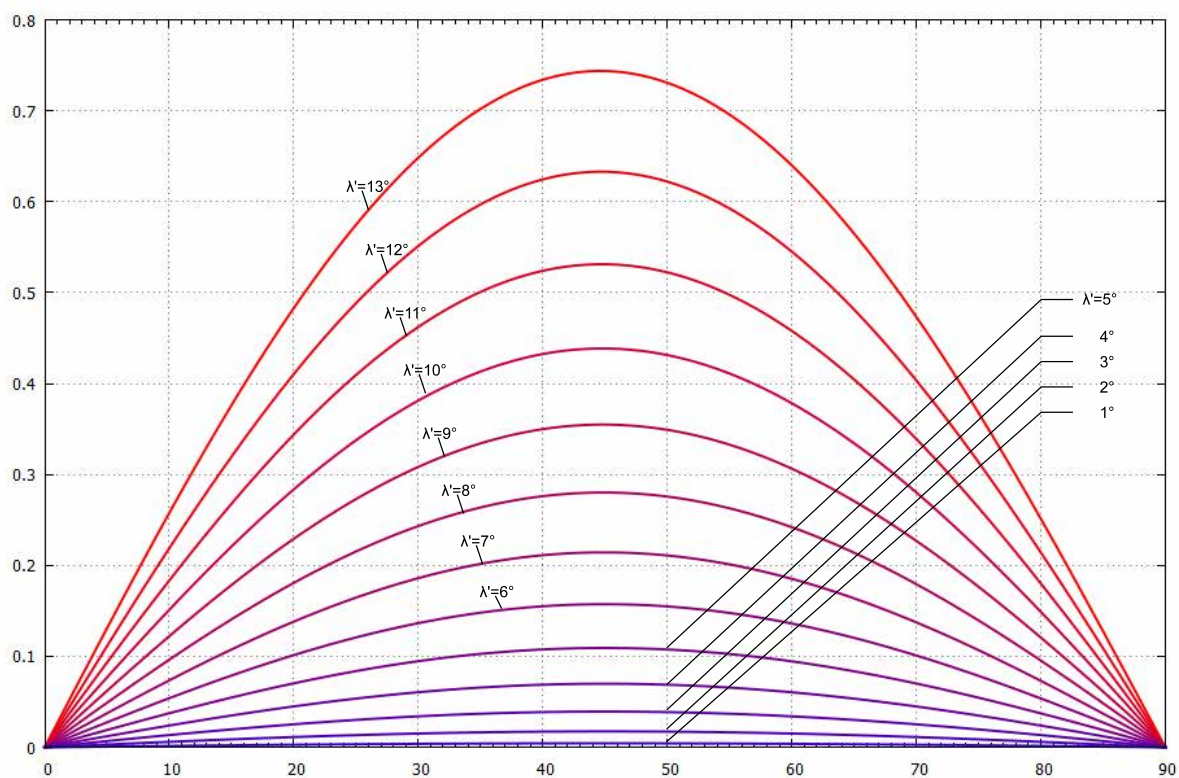


図 5.4 $\lambda' = 1^\circ, 2^\circ, \dots, 13^\circ$ として描いたグラフ。横軸は ω' (擬似オルソ化画像上で x 軸となす角度)、縦軸は ρ' (地表平面と平行に飛行した場合との誤差角度)。縦軸横軸共に単位は度である。

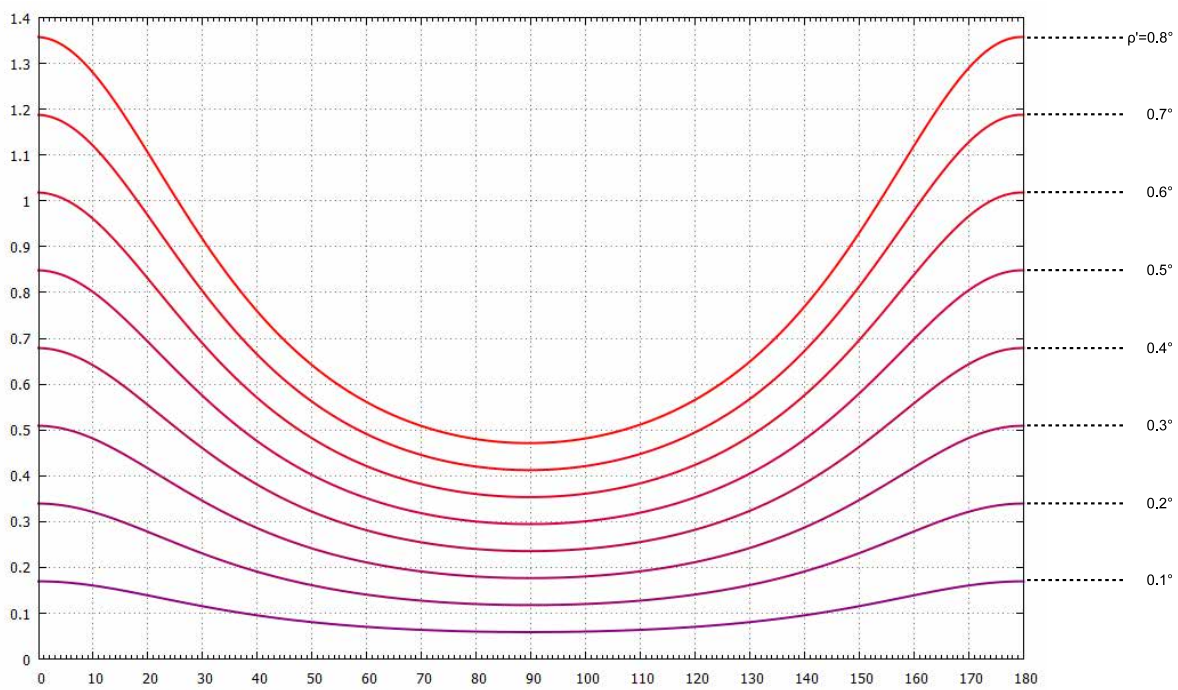


図 5.5 $f = 50/18$, $\psi = 30^\circ$, $\rho' = 0.1^\circ, 0.2^\circ, \dots, 0.8^\circ$ として描いた ρ (対応する方向ベクトルの地表平面上での誤差角度) のグラフ。横軸は ω' (擬似オルソ化画像上で方向ベクトルが x 軸となす角度)。縦軸横軸共に単位は度である。

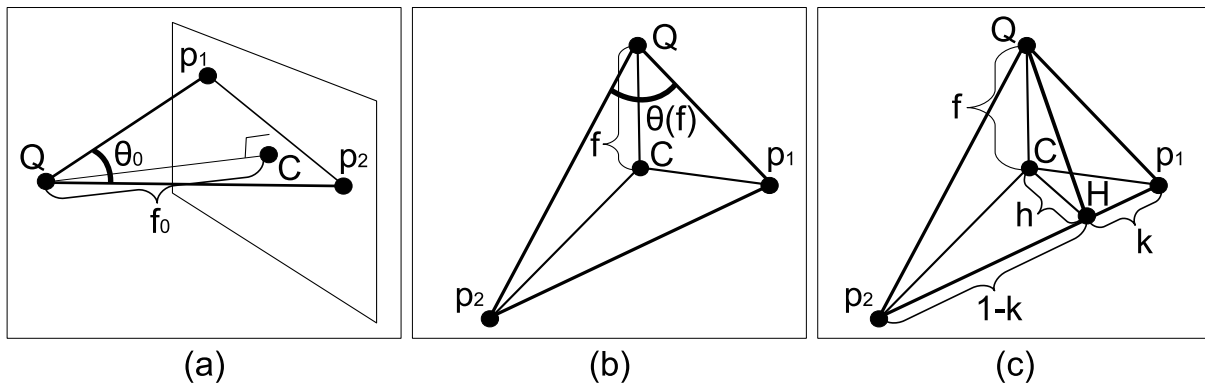


図 5.6 二つの方向ベクトルに関する消失点と焦点距離の関係を示した図。(a) 方向ベクトルがカメラ空間でなす角度が θ_0 であるとき、二つの消失点 p_1, p_2 から焦点距離を推測することは、即ち、 $\angle p_1 Q p_2 = \theta_0$ となるように、 QC 間の距離を調節することに他ならない。このときの QC 間の距離こそが真の焦点距離 f_0 となる。(b) 焦点距離と二つの方向ベクトルがなす角度を示した図。消失点が決まっているという条件の下では、焦点距離を变化されることは $\angle p_1 Q p_2$ を变化させることと同値である。 $\angle p_1 Q p_2$ を θ で表せば、 θ は引数 f をとる関数とみなすことができる。(c) $\theta(f)$ は $\theta(f) = \angle p_1 Q H + \angle p_2 Q H$ と二つの部分に分解することができる。

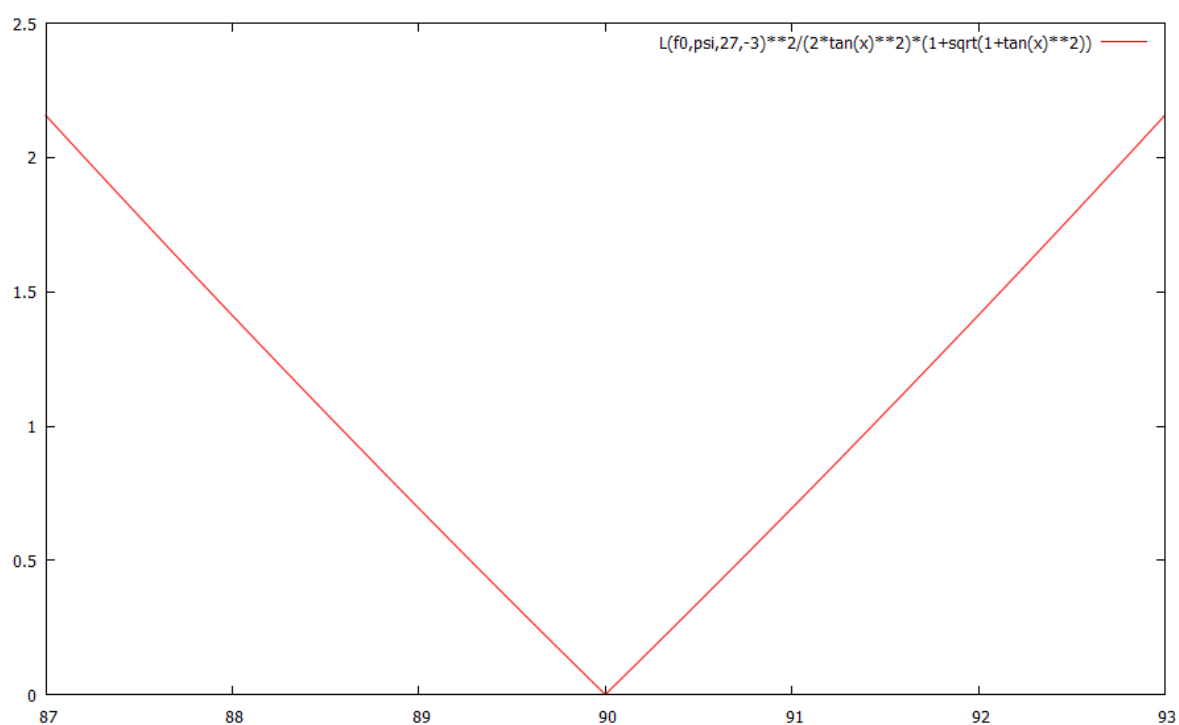


図 5.7 $f = 50/18$, $\psi = 30^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $\omega_{\min} = 30^\circ$, $\rho_{\max} = 3^\circ$ における $|f_E^2 - f_0^2|$ の上限値を表すグラフ。横軸は地表平面上での角度を表す θ_0 (単位は度)。

第 6 章

地図情報を用いた幾何学的 レジストレーションの誤差補正

一般的に、幾何学的レジストレーションには誤差が含まれる。この誤差は大きく、そのままでは防災活動等への活用は困難である。そのため、本研究では地図画像との対応を考慮した補正処理を行ったものを最終的なレジストレーション結果とする。この補正処理は幾何学的レジストレーションの結果に対して行うものであるため、本稿では、幾何学的レジストレーションを初期レジストレーションと呼ぶ場合もある。ここでは、まず、地図情報である DM データ [77, 78] から、レジストレーション先となる地図画像を生成する方法について述べる。これは DM データに含まれている情報を正確に読み取る方法に他ならず、これにより補正処理に必要な情報を地図画像中に埋めこむことも可能となる。次に、これらの情報を用いて準オルソ化画像の変形補正や注視点位置補正を行う方法について述べる。

6.1 レジストレーション先の地図画像生成

DM データは国土交通省によりその書式が定められているデータフォーマットであり、具体的なファイルフォーマットについては、文献 [79] の「数値地形図データファイル仕様」に定められている（以下、この文献を単に「仕様書」と呼ぶ）。本節では、データファイルをソフトウェアで解釈（パース）するための基本事項を以下にまとめる。それは、本研究を行うにあたり関連する資料を探したが、DM データを直接取り扱うソフトウェアを作成するための手頃な資料を寡黙にして見つけることができなかったためである。以下、DM データの取り扱いについて、ソフトウェア実装を考慮しつつ手短にまとめる。

6.1.1 DM データの構造

仕様書によると、DM データはつぎのような構造を持つとある。

- レコード長は 84 バイトの固定長（仕様書第 96 条）
- 各レコードの区切りには CR(0x0D)、LF(0x0A) が記されている（仕様書第 96 条の 2）
- 文字コードは Shift-JIS とする（仕様書第 99 条）

つまり、DM データを収めたファイルはいわゆるテキストファイルであり、その文字コードならびに改行コードは、Microsoft 社の OS である Windows にてごく普通に読み書きできる形式を採用していることが分かる。よって、解釈プログラムを作成する場合は、84 バイトずつ（もしくは 1 行ずつ）読み込みを行ない、それぞれのレコードを解釈するよう実装すればよい。

仕様書によれば、それぞれのレコードは先頭の 2 バイトにて格納されている情報の種類が確認できるようになっている。DM データでは、この識別子をレコードタイプと呼んでいる。レコードタイプによっては、そのレコードに続くいくつかのレコードから構成されるものもあり、必要に応じて複数のレコードを読み込む必要がある。そして、これらのレコードの先頭 2 バイトにはレコードタイプが付与されていないため、ファイルの解釈は先頭から 1 レコードずつ読み込み、解釈を行う必要がある。各レコードの解釈に関しては、仕様書の「公共測量標準図式 数値地形図データファイル仕様」にあり（これは先に挙げた「数値地形図データファイル仕様」とは異なる章であるため要注意である）、それに基づいて格納されている情報を読み取れば良い。

6.1.2 格納領域に関するおおまかな情報（レコードタイプ I）

DM データでは、どの領域の地図を収めたものかをインデックスレコード（レコードタイプは "I"）と呼ばれるレコードに格納している。このインデックスレコードの 3 文字目からの 2 文字は平面直角座標系の系番号 [76] を示すものであり、この系番号にておよその地域が識別できるようになっている（表 C.1）。

6.1.3 格納されている地図領域に対するより細かな情報（レコードタイプ M）

各 DM データは表 C.1 により定められる座標系原点をもつ平面直角座標系が用いられる [76, 79]。該当の DM データファイルに収められている地域は、図郭レコード（レコードタイプ "M"）に平面直角座標を用いて収められており、該当 DM データファイルが注視点を中心とした矩形領域に関係するものであるか否かを判断することができる。

しかし本研究では、注視点の値は GPS データを基に算出されるため、その単位は緯度経度

である。よって、該当 DM ファイルが対象領域の地図データを有しているのかを確認するため、緯度経度から平面直角座標系への変換を行わなければならない。緯度経度から平面直角座標系への変換方法の大部分は文献 [78] にあるが、この文献の 1.1 および 1.2、2.9.2、2.10 に記載されている計算式を使わねばならず、また、計算自体も複雑かつソフトウェア実装を考慮した形で整理されていないため、以下に簡単にまとめておく：

1. 入出力の関係を定義する：

入力： φ =緯度、 λ =経度

出力： x, y = 平面直角座標系における対応する座標

2. 使用する定数の定義：

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 6,378,137 \\ F = 298.257222101 \\ m_0 = 0.9999 \\ \varphi_0, \lambda_0 = \text{使用する平面直角座標系原点の緯度および経度} \end{array} \right.$$

3. n の計算： $n = 1/(2F - 1)$

4. $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ の計算：

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{1}{2}n - \frac{2}{3}n^2 + \frac{5}{16}n^3 + \frac{41}{180}n^4 - \frac{127}{288}n^5 \\ \alpha_2 = \frac{13}{48}n^2 - \frac{3}{5}n^3 + \frac{557}{1440}n^4 + \frac{281}{630}n^5 \\ \alpha_3 = \frac{61}{240}n^3 - \frac{103}{140}n^4 + \frac{15061}{26880}n^5 \\ \alpha_4 = \frac{49561}{161280}n^4 - \frac{179}{168}n^5 \\ \alpha_5 = \frac{34729}{80640}n^5 \end{array} \right.$$

5. A_0 の計算： $A_0 = 1 + n^2/4 + n^4/64$

6. $\bar{A}$ の計算： $\bar{A} = m_0 a A_0 / (1 + n)$

7. t の計算：

$$t = \sinh \left(\tanh^{-1} \sin \varphi - \frac{2\sqrt{n}}{1+n} \tanh^{-1} \left(\frac{2\sqrt{n}}{1+n} \sin \varphi \right) \right)$$

8. λ_c の計算： $\lambda_c = \cos(\lambda - \lambda_0)$

9. ξ' の計算： $\xi' = \tan^{-1}(t/\lambda_c)$

10. λ_s の計算： $\lambda_s = \sin(\lambda - \lambda_0)$

11. $\bar{t}$ の計算： $\bar{t} = \sqrt{1 + t^2}$

12. η' の計算： $\eta' = \tanh^{-1}(\lambda_s/\bar{t})$

13. $\bar{S}_{\varphi_0}$ の計算 : $\bar{S}_{\varphi_0} = m_0 \cdot \text{merid}(\pi\varphi/90)$

14. x, y の計算

$$\begin{cases} x = \bar{A} \left(\xi' + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \sin 2j\xi' \cosh 2j\eta' \right) - \bar{S}_{\varphi_0} \\ y = \bar{A} \left(\eta' + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \cos 2j\xi' \sinh 2j\eta' \right) \end{cases}$$

上記にて $\bar{S}_{\varphi_0}$ を求める部分であるが ρ'' の定義が文献 [78] には記載されていないため、国土地理院の河瀬の計算方法 [93] を用いることとした。具体的な計算式はソフトウェアでの実装（記述言語は JavaScript）という形で提示されている。しかし、本研究ではレジストレーション実験を Windows 上にて行っており、実験プログラムは C#[16, 91] で記述している。ここでは該当プログラムを C# に移植したものを以下に示しておく。

```

static double merid(double inPhi2) {
    double dc=2.0*Math.Cos(inPhi2);

    const int jt=5;
    const int jt2=2*jt;
    double[] s=new double[11+1];
    double[] t=new double[10+1];
    s[1]=Math.Sin(inPhi2);
    for(int i=1; i<=jt2; i++) {
        s[i+1]=dc*s[i]-s[i-1];
        t[i]=(1.0/i-4.0*i)*s[i];
    }

    const double F=298.257222101;
    const double n=1/(2*F-1);
    double n15=1.5*n;
    double[] e=new double[5+1+10];
    double ep=1.0;
    for(int k=1; k<=jt; k++) {
        e[k]=n15/k-n;
        ep*=e[k];
        e[k+jt]=n15/(k+jt)-n;
    }

    const double a=6378137;
    double anh=0.5*a/(1+n);
    double sum=0.0;
    double c1=ep ;
    int j=jt;
    while(j>0) {
        double c2=inPhi2;
        double c3=2.0;
        int l=j;
        int m=0;
        while(l>0) {
            c2+=(c3/=e[l--])*t[++m]+(c3*=e[2*j-1])*t[++m];
        }
        sum+=c1*c1*c2;
        c1/=e[j--];
    }
    return anh*(sum+inPhi2);
}

```

6.1.4 ラスタ化（レコードタイプ H および Ex）

DM データは地図上で線分として表現されるものを幾何学的に保持している。これらはベクトルデータと一般的には呼ばれており、ベクトルデータを可視化（画像化）することをラス

レコード名称	レコードタイプ	含まれる情報
⋮	⋮	⋮
グループヘッダ 1	"H "	以下に続く要素レコードの数
要素レコード 1-1	"E2"	以下に続く 2 次元座標レコードの数
2 次元座標レコード 1-1-1	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
2 次元座標レコード 1-1-2	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
⋮	⋮	⋮
2 次元座標レコード 1-1- N_1	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
要素レコード 1-2	"E2"	以下に続く 2 次元座標レコードの数
2 次元座標レコード 1-2-1	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
2 次元座標レコード 1-2-2	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
⋮	⋮	⋮
2 次元座標レコード 1-2- N_2	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
⋮	⋮	⋮
グループヘッダ 2	"H "	以下に続く要素レコードの数
要素レコード 2-1	"E2"	以下に続く 2 次元座標レコードの数
2 次元座標レコード 2-1-1	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
2 次元座標レコード 2-1-2	(なし)	2 次元座標データ (最大 6 個)
⋮	⋮	⋮

表 6.1 DM データを構成するレコードの例

タ化もしくはラスタライズと呼ぶ。以下に、DM データのラスタ化に関して説明を行う。

本研究では線分にて描かれた地図を DM データより生成し、レジストレーションに活用するが、これら線分データはグループヘッダと呼ばれるレコード (レコードタイプ H) にてとりまとめられている。線分の具体的な座標値などのデータは要素レコードと呼ばれるレコード (レコードタイプ E1~E8) に格納されている。レコードの格納順序を示すと表 6.1 のようになる。線分データはレコードタイプ "E2" として定義されているため、このレコードに続く 2 次元座標データを読み取り、線分を描画することによりラスタ化は完了する。平面直角座標系では北方向を $+x$ 方向とし東方向を $+y$ としており、数学の座標系とは各軸の方向が異なっているため注意が必要である。このようにして DM データより線分情報を取り出し、描画したものを図 6.1 に示す。



図 6.1 ラスタライズした DM データの一部

6.2 地図画像を用いた準オルソ化画像の補正

6.2.1 前処理

地図画像との対応に関しては次節以降にて述べるが、準オルソ化画像の変形に関する補正パラメータは、準オルソ化画像上のエッジ情報と、地図画像に含まれる線分の位置および角度により推定される。準オルソ化画像から抽出するエッジは、画像中の直線に関わるものが抽出されるようにするが、太陽光の反射領域などではその境界部分が道路や建物と関係なく長い



図 6.2 準オルソ化画像からエッジを取り出す前に外乱となり得る部分を取り除く。左：処理前の画像 右：処理後の画像。高輝度の部分および彩度が高い部分が除去されていることが分かる。

エッジとして検出されてしまう場合がある。そのため、エッジ抽出処理に先立ち、準オルソ化画像の各画素の RGB 値を HSV - 色相、彩度、明度に変換し [47]、次の処理を行う：

- 1) 明るい画素の除去
- 2) 彩度の高い画素の除去

これは、一般的に道路部は明るくは写らないことと彩度が低く写ることが多いため、このような前処理を行い、道路部以外の外乱となり得る部分を少しでも取り除くためである（図 6.2）。

6.2.2 評価対象点の抽出

幾何学的レジストレーションの誤差補正では、準オルソ化画像を半オルソ化画像に近づけるように補正し、その補正した画像を地図中の適切な位置に配置することを目的とする。命題

3.3 で示したように、擬似オルソ化画像と半オルソ化画像の間には、非一様な拡大縮小変換とせん断変換の合成により示される関係が存在する。全く同じ論法で、準オルソ化画像と半オルソ化画像の間においても、同様の関係を示すことができる。以下に命題 3.3 の系を示す。

系 6.1 準オルソ化画像から半オルソ化画像への変換は、非一様な拡大縮小変換とせん断変換の合成により表わされる。

提案手法では、この変換を定義するパラメータを少しずつ変化させ、変形を施した準オルソ化画像に対し、地図画像との適合の様子を調べる。このとき、準オルソ化画像の全ての画素に対し調査を行うと大量の計算が必要となり、並列計算などを活用したとしても、現実的な時間内に補正処理が完了しないという問題が発生する。そのため、準オルソ化画像より、適合度の計算に使用する画素を調査対象点として選び、その集合上にて適合度計算を行うこととする。

以下に、調査対象点の抽出方法を示す。まず、準オルソ画像に対しいくつかの処理を行うが、これは焦点距離推定のために擬似オルソ化画像中の主要な方向を求めるために施した処理とほとんど同じである。異なる部分は長い直線であるか否かの判断部分であり、これは準オルソ化画像全体からまんべんなくエッジを抽出する必要があるためである（強いエッジのみを対象としてしまうと、抽出されたエッジが画像中のある部分にのみ集中してしまうなどの可能性があるため）。

1. 準オルソ化画像にガウシアンフィルタを適用
2. グレースケール化
3. Sobel フィルタを用い、各画素の縦横方向のエッジの強さを S_x, S_y に格納
4. エッジ強さを $\sqrt{S_x^2 + S_y^2}$ 、エッジ角度を $\tan^{-1}(S_y/S_x)$ として、それぞれをエッジ強さ画像、エッジ角度画像に格納
5. エッジ強さ画像を細線化
6. エッジ強さ画像とエッジ角度画像をもとに、長い直線に関するエッジと思われるものを抽出

長い直線に関すると思われるエッジか否かの判断は、次のように行う。調査対象画素の位置を x_0, y_0 とし、エッジ角度を φ_0 とする。位置 (x_0, y_0) を中心に $\pm\varphi_0$ 方向に l 点、エッジ角度画像をサンプリングする。これを (x_0, y_0) の近傍画素と呼び N_{x_0, y_0} で表す。それぞれのサンプリング点におけるエッジ方向を $\{\varphi_i\}, i = -l, \dots, -1, 1, \dots, l$ とする。角度の許容誤差を ε_θ として、 $|\varphi_i - \varphi_0| < \varepsilon_\theta$ を満たす N_{x_0, y_0} の個数を数え、その個数が ν より多い場合は長い直線に関するエッジとする（なお、閾値 ν は予め与えられるものとする）。このようにして得られたエッジは個数が多いため、そのまま活用するには少々都合が悪い。準オルソ化画像を格子状に区切り、得られたエッジをその位置を用いて各格子に分配する。各格子において、最も強いエッジ強さを持つものをその格子の代表エッジとし、この代表エッジのみを集めたもの

を誤差補正に用いるエッジとして抽出する。このような処理を行うのは、レジストレーションの誤差補正においては、変形した準オルソ化画像の一部のみが地図と一致しても意味がなく、補正された準オルソ化画像全体として、地図とできるだけ一致する必要があるからである。以上の処理をまとめたものを図 6.3 に示す。

6.2.3 誤差補正パラメータ

航空機の進行方向ならびに航空機の移動量について、全く誤差なく GPS データを用いて計測されるのであれば、系 6.1 より、せん断方向変換を定義するパラメータ ξ と、非一様な拡大縮小変換を定義するパラメータ k のみにて、準オルソ化画像のレジストレーションのための変形は表現できる。加えて、注視点推定も誤差なく行われる場合は、当たりまえであるが、変形した準オルソ化画像を誤差補正のために平行移動させる必要もない。

しかし、現実には GPS の測定精度や更新頻度により、航空機の進行方向や移動量に関しても誤差が含まれる。また、注視点推定も誤差なく行われる保証もないため、補正変形した準オルソ化画像を地図画像上のしかるべき場所に平行移動させる必要もある。これらを考慮し、次の命題を示す。

命題 6.2 準オルソ化画像を変形・移動し誤差補正するための変換式は次式で表わされる：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & 0 \\ \sin \xi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sk & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

ただし、 x_q, y_q は準オルソ化画像上の位置を表し、 x, y は地図上にレジストレーションされた準オルソ化画像上の位置を表すものとする。 Δ_x, Δ_y は注視点推定誤差補正のための平行移動量を、 θ は GPS データの誤差による航空機の進行方向誤差補正のための回転角度を、 s は GPS データの誤差による航空機の移動量誤差補正のための拡大縮小量を、 ξ および k はせん断および非一様な拡大縮小を表しているものとする。

証明

系 6.1 における変換に対し、拡大縮小誤差修正および平行移動修正を行なった場合、次の式で表現される：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & 0 \\ \sin \xi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{pmatrix}$$

上式を変形し、次式を得る：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & 0 \\ \sin \xi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sk & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{pmatrix}$$



以上より、誤差補正のためのパラメータは、

- 平行移動に関する補正量 Δ_x, Δ_y
- 航空機の移動距離に関する補正倍率 s
- 航空機の進行方向に関する補正角度 θ
- 準オルソ化画像の半オルソ化画像に対する、せん断変換に関する k, ξ

となる。以下これらをレジストレーションパラメータと呼ぶこととする。

6.2.4 地図との適合度

レジストレーションパラメータの具体的な値は、評価対象点上で定義される適合度により求める。各パラメータを少しずつ変化させ、最も高い適合度を示すパラメータを用いて最終的なレジストレーションを行う。

適合度を表す関数は、以下のものを用いることとする。

$$f(\theta, s, \xi, k, T) = \sum_{e \in E} I(\varphi_{\theta, s, \xi, k, T}(e)) \sigma(e) \{ \cos^8 \Delta_{\theta, s, \xi, k, T}(e) - \sin^8 \Delta_{\theta, s, \xi, k, T}(e) \} \quad (6.2)$$

ただし、 T は Δ_x, Δ_y により定められる平行移動を表すものとする。

この関数では、評価対象点における得点が必要となるが、これは評価対象点を選ぶときに用いたものではなく、式 4.1 にて定められるものである。また、エッジ角度も必要となるため、補正作業に先立ち、これらの各エッジに対して得点とエッジ角度（エッジの方向）を割り当てる作業を行なっておく。

式 6.2 における E は評価対象点の集合を表し、それぞれのエッジは式 4.1 で定められる得点とエッジ方向およびエッジの位置という属性値を持つものとする。 $\varphi_{\theta, s, \xi, k, T}(e)$ はパラメータ θ, s, ξ, k, T を用いて、式 6.1 にて変形したエッジ e の位置を返す関数とする。 $I(p)$ は位置 p の近傍における地図画像のエッジの有無を表し、地図画像上にエッジがあれば 1、なければ 0 を返す関数とする。関数 $\sigma(e)$ はエッジ e の得点を返すものとし、 $\Delta_{\theta, s, \xi, k, T}(e)$ は次のように定義される関数であるとする。

$$\Delta_{\theta, s, \xi, k, T}(e) = \left| \delta_{\theta, s, \xi, k}(e) - \mu(\varphi_{\theta, s, \xi, k, T}(e)) \right| \quad (6.3)$$

$\delta_{\theta, s, \xi, k}(e)$ はパラメータ θ, s, ξ, k にて変形されたエッジ e のエッジ方向を返す関数であり、 $\mu(p)$ は地図画像の位置 p の近傍にあるエッジの方向を返す関数とする。つまり関数 $\Delta_{\theta, s, \xi, k, T}(e)$ はパラメータ θ, s, ξ, k, T にて変形したエッジの方向と、変形後の位置にある地図画像上のエッジとのエッジ角度の差の絶対値を返す関数に他ならない。なお、式 (6.2) に

おける各三角関数のべき乗 8 は、経験により定められた値である。

6.2.5 計算量のさらなる削減

関数 I および μ は、引数として与えられたエッジの近傍に存在する、地図画像における線分の有無および角度を返すものである。その都度、引数で指定された場所の近傍を探索し、その近傍内に含まれるエッジを返すという素朴な実装では計算負荷が高い。そのため、これらの関数に関して、計算量の軽減を考える。

まず、DM データから生成される地図画像に対し、それぞれの線分要素を太線化し地図画像内に格納しておく。このとき線分の有無や方向についても地図画像中にその情報を埋め込んでおき、関数 I および μ はこの埋め込まれたエッジ情報を参照し、この値をそれぞれの関数値とする。具体的には、地図画像上の各線分要素に対し、それぞれの線分角度 0 度から 360 度までを 0 から 65535 の値に変換し、符号なしの 16 ビットにて表現する。上位 8 ビットを赤色のチャンネルに、下位 8 ビットを緑色のチャンネルに埋めこんでおく。この情報を関数 I および μ の計算量軽減に活用する。この方法では指定された位置に埋め込まれている情報を返すだけであり、引数として与えられたエッジの近傍探索は不要となる。これにより、計算量を大幅に軽減することが可能となる。

また、パラメータの探索方法に関しても工夫し、計算量の軽減を行う。最初はおおまかに探索し、その探索で得られた最適なパラメータを中心にその付近をより詳細に探索を行うこととする。

6.3 結果と考察

浜松市消防局撮影の鳥瞰映像中より 10 シーンを取り出し、提案手法を用いて鳥瞰映像中の 1 フレームを地図画像へとレジストレーションする実験を行った。レジストレーション先の地図画像は浜松市作成の DM データ (1/10,000) を用いて生成した (承認番号: 浜都計第 53 号)。

6.3.1 注視点の推定

擬似オルソ化画像上の主要な方向を求めるために $r = 10$ として、式 (4.1) を用いて各エッジに得点付けを行った。次に $\zeta = 20$ として上位 20% のエッジ集合を E とし、主要な方向推定を行った。各実験における E の要素数と推定された主要な方向および焦点距離を表 6.2 に示す。

実験番号	E の要素数	第 1 主要角度	第 2 主要角度	焦点距離
1	3,686	68.09	171.48	2.89
2	2,974	72.58	171.84	1.87
3	3,012	75.83	168.70	1.23
4	3,586	73.77	171.96	2.05
5	1,971	86.26	160.46	2.77
6	4,203	61.77	149.30	1.66
7	2,207	83.86	154.12	3.40
8	2,926	75.28	170.02	1.56
9	3,317	71.09	171.05	2.24
10	1,812	78.80	154.18	2.70

表 6.2 E の要素数と主要な角度（単位は度）および焦点距離の表。 r よび ζ には、それぞれ $r = 10, \zeta = 20$ を用いている。

	Δ_θ	Δ_s	Δ_ξ	Δ_k
First step	5.000	0.050	5.000	0.050
Second step	2.500	0.025	2.500	0.025
Last step	1.000	0.010	1.000	0.010

表 6.3 レジストレーションパラメータの変化量。 Δ_θ と Δ_ξ の単位は度で表している。

6.3.2 レジストレーションパラメータの決定

$n = 5$ として、 5×5 画素の格子をエッジ数削減に用いた。補正パラメータの探索に関しては θ および ξ は ± 10 度、 s は $0.75 \sim 1.25$ 、 k は $0.7 \sim 1.3$ の範囲にて行った。これらパラメータの探索は 3 回に分けて行い、 θ, s, ξ, k の変化量 $\Delta_\theta, \Delta_s, \Delta_\xi, \Delta_k$ はそれぞれ表 6.3 のように変化させた。最初の探索においては全ての範囲を探索対象とし、2 回目および 3 回目は直前の探索において最も適合度が高かったパラメータを中心に、直前の探索における変化量の 2 倍の範囲を探索した。パラメータ T に関しては、全ての探索において、変形した準オルソ化画像が対象領域よりはみ出ない範囲を 1 画素単位で全て探索した。

式 (6.2) および式 (6.3) で使用する関数 I および μ のための太線化処理については、最初の探索は 20 画素、2 回目は 24 画素、最後は 30 画素として行った。探索範囲とその変化量を考えると、徐々に太線化の度を減らしていくことが自然であるが、そのようにすると前段

実験番号	道路部における最大誤差	注視点推定の誤差	θ	s	ξ	k
1	6	46	-5.0	1.230	3.5	0.850
2	5	75	-2.5	0.900	1.5	1.085
3	6	165	-2.5	0.815	2.5	1.215
4	5	24	0.0	0.915	-1.0	1.035
5	4	52	-8.0	0.985	10.0	1.015
6	4	97	-7.0	0.865	5.0	1.170
7	6	124	-10.0	1.150	10.0	0.850
8	5	110	-5.0	0.835	4.0	1.215
9	5	34	0.0	0.985	0.5	1.000
10	4	47	0.0	0.985	-1.5	1.035

表 6.4 得られたレジストレーションパラメータの値。表中の値の単位であるが、道路部と注視点の誤差の単位はメートル、 θ と ξ の単位は度を用いている。

の探索結果から逃れることが難しくなる。前段における探索結果が間違っていた場合でも、可能な限り間違った推測から逃れることができるよう、後段になるほど太線化の量を増加させている。

実験で使用した地図画像の縮尺は 1m/画素とした。DM データはベクトルデータであるため任意の縮尺にてラスタ化を行うことが可能である。しかし、縮尺を大きくすればするほどレジストレーション先の地図画像の画素数は増加し、レジストレーションに要する時間も増加する。今回位の実験では、処理時間ならびにレジストレーション誤差を考慮して使用する縮尺を経験的に決定した。表 6.4 にそれぞれの実験における道路部の最大誤差、注視点の推定誤差および補正パラメータの値を示す。

それぞれの実験における地図へのレジストレーション結果画像を付録の図 B.1～B.10 に示す。注視点の推測に誤差がなければ、補正された準オルソ化画像はレジストレーション先の地図画像中央に配置される。逆にいえば、補正された準オルソ化画像における注視点と、地図画像中央との距離が注視点推定誤差を示していることとなる。

6.3.3 実験結果の考察

実験結果より、道路部における最大誤差は主に建物の倒れこみにより発生していることが見てとれる（図 6.5）。準オルソ化画像における建物の倒れこみは、建物上部と道路部分において地図とは異なる位置関係を生み出す。また、建物に関するエッジとして検出される部分は建物上部を含むため、式 (6.1) による変換では準オルソ化画像内のエッジと地図画像におけるエッ

実験番号	処理時間
1	4 min 13 s
2	8 min 27 s
3	6 min 43 s
4	8 min 23 s
5	3 min 52 s
6	4 min 36 s
7	2 min 12 s
8	7 min 26 s
9	7 min 58 s
10	7 min 19 s

表 6.5 誤差補正に要した時間

ジとを完全に対応付けすることができない。そのため、建物上部のレジストレーション誤差が小さくなれば道路部の誤差が大きくなり、逆に道路部の誤差が小さくなれば建物上部の誤差が大きくなるという現象が発生する。結果として、倒れこみが少ない低層住宅地域などでは建物上部および道路部に関してもレジストレーション誤差は小さくなり（図 6.6）、先に挙げた図 6.5 のように建物の倒れ込みが大きな場合は、道路部のレジストレーション誤差が大きくなる。

レジストレーションに要する時間については、トラッキングおよび準オルソ化画像生成、注視点推定処理および注視点を中心とする地図画像生成にかかる時間はそれぞれの実験例で大きな変化はなく、全て合わせても 2 分程度であった。しかし補正パラメータの探索は実験により変動し、かつ、レジストレーション処理全体において大きな割合を占めた（表 6.5）。この実験においては、補正パラメータの探索に GPGPU[13, 17] を用いて高速化を行っている。使用した CPU と GPU の構成は CPU: Core i7-3930K（動作クロック 3.2GHz）、GPU: GeForce GTX780（CUDA Core 2304、GPU メモリ 3GB、動作クロック 862 MHz）である。

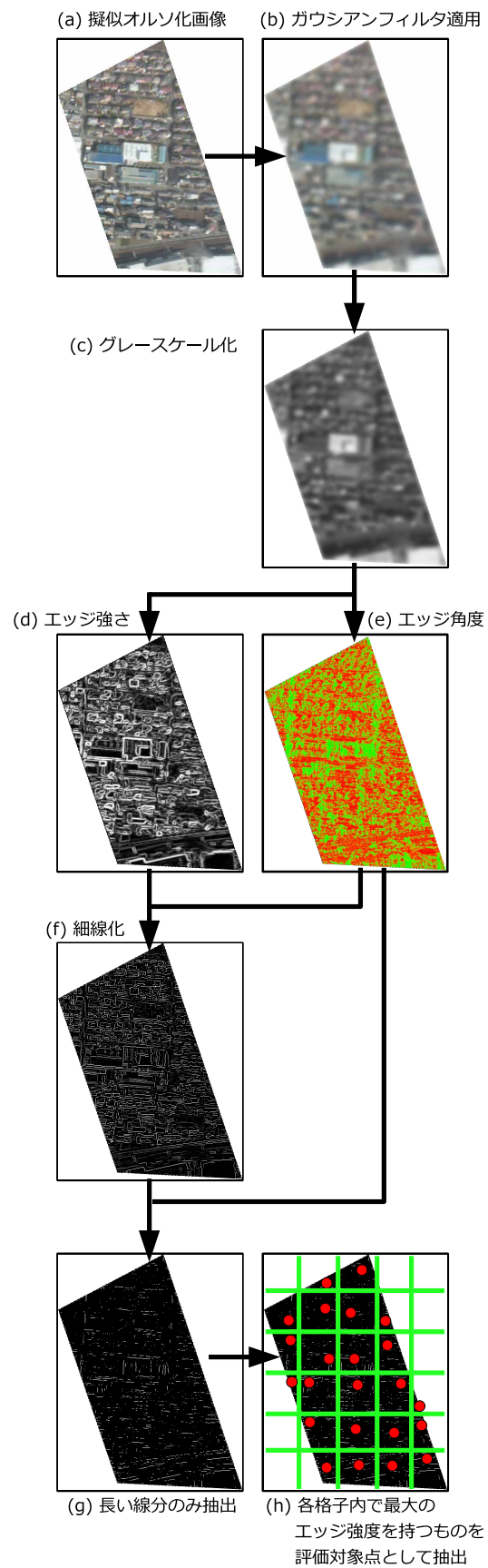


図 6.3 評価対象点の抽出方法

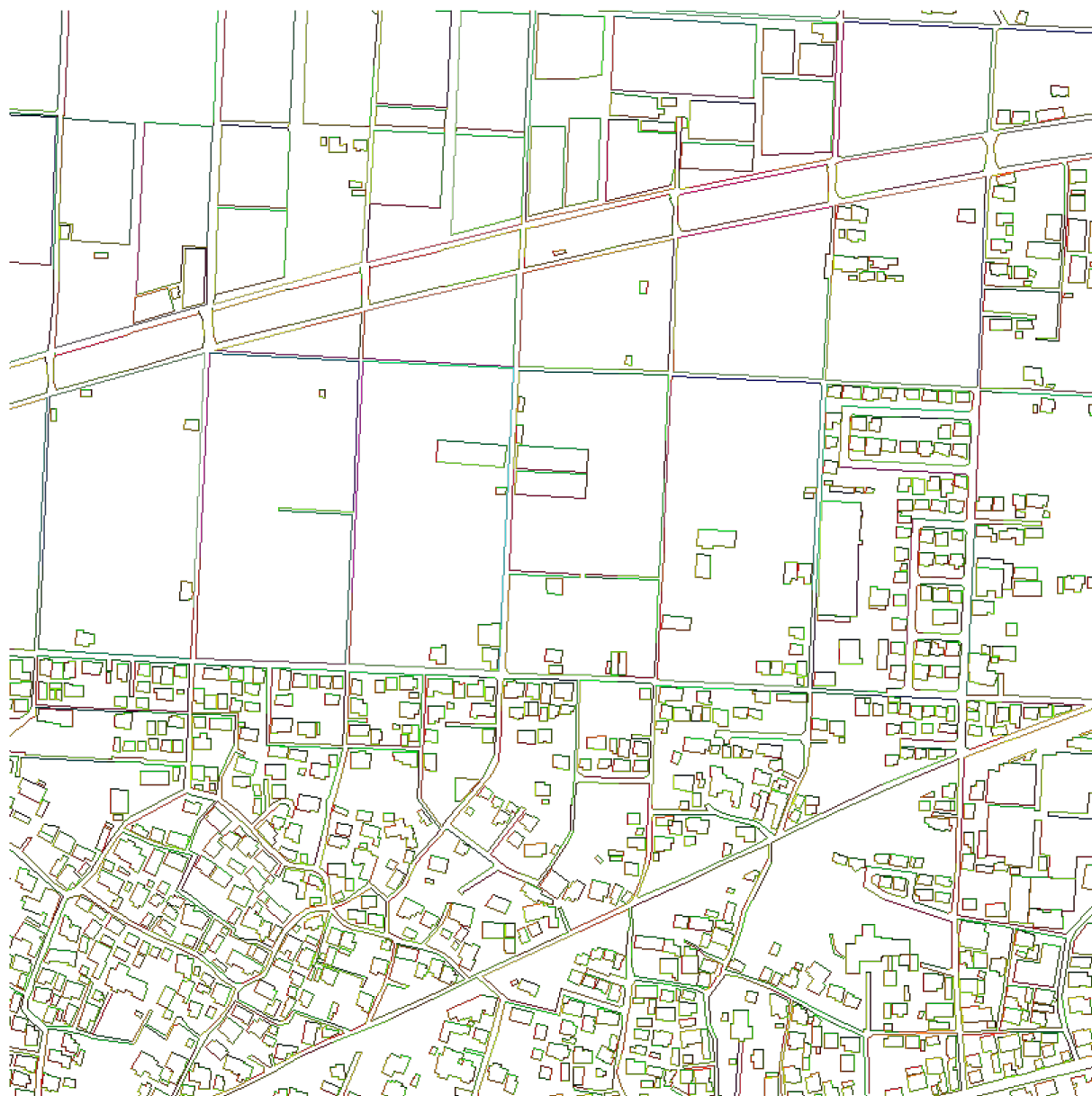


図 6.4 線分の角度情報を埋め込んだ地図画像 (800m × 800m, 1m/pixel)。



図 6.5 レジストレーション誤差が最大であった実験のひとつ。拡大部分をみると、交差点部分におけるレジストレーション誤差が特に大きいことが分かる。交差点付近の建物においては、建物上部の稜線が地図画像上の線分に近い場所にレジストレーションされていることが分かる。



図 6.6 レジストレーション誤差が少ないものの例。拡大部分より、道路や交差点などはかなり正確にレジストレーションされているのが分かる。建物の倒れ込みも少ない。

第 7 章

結論

本論文では IMU を用いることなく、GPS の情報とともに記録されている鳥瞰映像中の 1 フレームを、地図へとレジストレーションする方法を示した。実験では当初の目的どおり、道路部での最大レジストレーション誤差を 6m 以内に収め、災害対策などに必要な結果を得ることができた。

本研究では地図画像と鳥瞰写真との対応付けを取り扱っており、この問題はいわばイラストレーションである地図画像と実写画像である鳥瞰写真との対応付けを取り扱う問題に他ならない。地図と鳥瞰写真との間には、それぞれの作成時期や地図の作成意図により必ずしも完全に一対一対応とならない場合がある。鳥瞰写真には収められているが地図には描かれていないものが存在し、逆に地図には存在するが鳥瞰写真には存在しないものもある。このような地図画像と実写画像との差異が、レジストレーションの精度に与える影響の定量的な調査については今後の課題である。

提案手法では準オルソ化画像中のエッジと地図画像中のエッジを用いて適合度を計算し、最終的な画像の補正およびレジストレーションを行った。しかし、準オルソ化画像に存在する建物の倒れこみが道路部のレジストレーション結果に影響を与えており、さらに精度の高いレジストレーションを行うためには、建物上部のエッジを完全に排除する方法などが必要となる。この点に関しては SfM の技法が活用できると考えている。また、SfM を用いると対象領域の三次元的な情報を推定することができるため DEM やオルソ画像の生成も可能となる。そのため、レジストレーションの精度向上に大きく役立つと期待される。しかし、建物側面が数画素程度の大きさとして撮影される状況下では、SfM によりどこまで正確に三次元情報を推定することができるのか等、様々な検証が必要である。特に、建物上部を排除するためには屋根や屋上部分に関連する特徴点を精度よく、かつ、数多くトラッキングしなければならない。既存のアルゴリズムでどこまで対応できるのか、注意深く実験を繰り返す必要がある。その他、倒れこみに関しては、式 (6.2) の関数 I および式 (6.3) の関数 μ における近傍内であれば、各式の定義より、得点に与える影響は吸収される。しかし今回の実験では、近傍とする領域を大き

くすると正しくレジストレーションが行われないという現象が見られた。そのため、近傍領域を如何にして決定するのかについても、実験を行う必要がある。

提案手法においては、レジストレーション結果を得るために約 10 分程度の時間を要している。しかし、実用化を考えた場合、処理時間の短縮は必要不可欠である。そのためには注視点の推定精度を向上させることが重要であり、これは即ち、高い精度にて焦点距離推定を行うことが極めて重要であることに他ならない。精度の高い焦点距離の推定値は、特に処理時間を要している最終的なレジストレーションパラメータの探索に関しても良い影響を与える。また、準オルソ化画像のオルソ化が可能となれば、倒れ込みの問題は解決される。オルソ画像生成については、ステレオ視によるオルソ化などの手法が役立つのではないかと期待している。

本稿で提案した手法では、焦点距離推定のために稜線が直角に交わることの多い人工的な建造物が存在する領域を対象とした。これは、例えば森林に覆われている山間部や雪に覆われた氷雪地帯などでは、本稿の手法を用いることができないことを意味する。この制限は災害時における地表面の状況把握において憂慮されるべき問題であり、特に、山間部や氷雪地域における小規模な集落においては、集落に繋がる全ての道路が被災してしまうと孤立状態となる場合もある。そのため、これらの地域における道路部の被災状況把握は重要であり、提案手法を様々な地域に適用できるよう改善しなければならない。これらについても今後の課題である。

今回の実験例では航空機に備え付けられたカメラを用いたため、手ぶれや振動などの問題は考慮しなかった。しかし、実際にスマートフォン等で撮影する状況を考えると、これらに対する考慮は必要不可欠である。手ぶれのレジストレーション誤差への影響などについても、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] E. Anderson, Z. Bai, C. Bischof, S. Blackford, J. Demmel, J. Dongarra, J. Du Croz, A. Greenbaum, S. Hammarling, A. McKenney, and D. Sorensen. *LAPACK Users' Guide*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, third edition, 1999.
- [2] Martin Armstrong, Andrew Zisserman, and Paul Beardsley. Euclidean structure from uncalibrated images. In *Proceedings of the Conference on British Machine Vision (Vol. 2)*, pages 509–518, 1994.
- [3] Michael J. Black and P. Anandan. The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fields. *Comput. Vis. Image Underst.*, 63(1):75–104, 1996.
- [4] OpenGL Architecture Review Board, Dave Shreiner, Mason Woo, Jackie Neider, and Tom Davis. *OpenGL(R) Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL(R), Version 2.1*. Addison-Wesley Professional, 6th edition, 2007.
- [5] C. Bozzini, M. Conedera, and P. Krebs. A new monoplottting tool to extract geo-referenced vector data and orthorectified raster data from oblique non-metric photographs. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3):500–518, 2012.
- [6] Lisa Gottesfeld Brown. A survey of image registration techniques. *ACM Comput. Surv.*, 24(4):325–376, 1992.
- [7] Richard Chang, Yue Wang, and Karianto Leman. Robust unmanned aerial vehicle camera self-calibration for surveillance applications. In *Sensor Signal Processing for Defence (SSPD 2012)*, pages 1–5, 2012.
- [8] Robert Collins. Projective reconstruction of approximately planar scenes. In *Interdisciplinary Computer Vision: An Exploration of Diverse Applications*, number 1838, pages 174–185, 1992.
- [9] Shane Cook. *CUDA Programming: A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1st edition, 2013.

- [10] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, and J. Graham. Active shape models—their training and application. *Comput. Vis. Image Underst.*, 61(1):38–59, 1995.
- [11] Michael Cramer. Performance of GPS/Inertial solution in photogrammetry. In *Photogrammetric Week 2001*, pages 49–62, 2001.
- [12] Antonio Criminisi and Andrew Zisserman. Shape from texture: homogeneity revisited. In *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC)*, pages 82–91, 2000.
- [13] Tor Dokken, Trond R. Hagen, and Jon M. Hjelmervik. The gpu as a high performance computational resource. In *Proceedings of the 21st Spring Conference on Computer Graphics, SCCG '05*, pages 21–26. ACM, 2005.
- [14] I. J. Dowman, A. Morgado, and V. Vohra. Automatic registration of images with maps using polygonal features. In *IAPRS*, volume 31, pages 139–145, 1996.
- [15] Richard O. Duda and Peter E. Hart. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. ACM*, 15(1):11–15, 1972.
- [16] ECMA. C# language specification (4th edition), 2006.
- [17] Luebke et al. *GPGPU: General Purpose Computation on Graphics Hardware*. SIGGRAPH '04. ACM, 2004.
- [18] Bocquillon et al. On constant focal length self-calibration from multiple views. In *CVPR*, pages 1–8, 2007.
- [19] Matsushita et al. Full-frame video stabilization with motion inpainting. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 28(7):1150–1163, 2006.
- [20] Pollefeys et al. Detailed real-time urban 3d reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision*, 78(2-3):143–167, 2008.
- [21] Olivier Faugeras. *Three-Dimensional Computer Vision*. The MIT Press, 1993.
- [22] Olivier D. Faugeras, Quang-Tuan Luong, and Stephen J. Maybank. Camera self-calibration: Theory and experiments. In *Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision, ECCV '92*, pages 321–334, 1992.
- [23] A. W. Fitzgibbon and A. Zisserman. Automatic 3D model acquisition and generation of new images from video sequences. In *European Signal Processing Conference*, pages 1261–1269, 1998.
- [24] David A. Forsyth and Jean Ponce. *Computer Vision A Modern Approach*. Prentice Hall, 2003.
- [25] John G. Fryer. Lens distortion for close range photogrammetry. In *Int. Arch. Photo.*, pages 30–37, 1986.
- [26] Amanda M. Geniviva, Jason W. Faulring, and Carl Salvaggio. Automatic georefer-

- encing of imagery from high-resolution, low-altitude, low-cost aerial platforms. In *Proceedings of SPIE, Defense + Security, Geospatial InfoFusion and Video Analytics IV, Geospatial Data Processing, Exploitation, and Visualization I*, volume 9089. SPIE, 2014.
- [27] Gene H. Golub and Charles F. Van Loan. *Matrix Computations (3rd Ed.)*. Johns Hopkins University Press, 1996.
- [28] Peter L. Guth and Tom Craven. Using dems to register oblique photographs and web cameras. *ASPRS 2006 Annual Conference*, pages on CD-ROM, 2006.
- [29] Martin Habbecke and Leif Kobbelt. Automatic registration of oblique aerial images with cadastral maps. In *Proceedings of the 11th European Conference on Trends and Topics in Computer Vision - Volume Part II, ECCV'10*, pages 253–266, 2012.
- [30] C. G. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. *4th Alvey Vision Conference*, pages 147–151, 1988.
- [31] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry (second edition)*. Cambridge University Press, 2003.
- [32] Johan Hedborg, Johan Skoglund, and Michael Felsberg. KLT tracking implementation on the GPU. In *Proceedings SSBA 2007*, 2007.
- [33] Joachim Höhle. Photogrammetric measurements in oblique aerial images. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (1):7–14, 2008.
- [34] Berthold K.P. Horn and Brian G. Schunck. Determining optical flow. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, 1980.
- [35] L Jagannathan and CV Jawahar. Perspective correction methods for camera based document analysis. In *Proc. First Int. Workshop on Camera-based Document Analysis and Recognition*, pages 148–154, 2005.
- [36] Minhe Ji and John R. Jensen. Continuous piecewise geometric rectification for airborne multispectral scanner imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(2):163–172, 2000.
- [37] N. Kerle and R. Stekelenburg. Advanced structural disaster damage assessment based on aerial oblique video imagery and integrated auxillary data sources. In *proceedings of the XXth ISPRS congress : Geo-imagery bridging continents*, pages 580–585, 2004.
- [38] Georg Klein and David Murray. Parallel tracking and mapping for small ar workspaces. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '07*, pages 1–10, 2007.
- [39] Shijian Lu and Chew Lim Tan. Camera document restoration for OCR. In *Pro-*

- ceedings of First International Workshop on Camera-Based Document Analysis and Recognition (CBDAR '05)*, 2005.
- [40] Bruce D. Lucas and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, IJCAI'81, pages 674–679. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981.
- [41] C. L. Miller and R. A. Laflamme. The digital terrain model - theory & application. *Photogrammetric Engineering*, pages 433–442, 1958.
- [42] Jean-Michel Morel and Guoshen Yu. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM J. Img. Sci.*, 2(2):438–469, 2009.
- [43] Mohamed Mostafa, Joe Hutton, and Blake Reid. GPS/IMU products - the Applanix approach. In *Photogrammetric Week 2001*, pages 63–83, 2001.
- [44] Mark Pupilli and Andrew Calway. Real-time camera tracking using a particle filter. In *In Proc. British Machine Vision Conference*, pages 519–528, 2005.
- [45] Jianbo Shi and Carlo Tomasi. Good features to track. In *1994 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, pages 593 – 600, 1994.
- [46] Dong-Gyu Sim, Sang-Yong Jeong, Doh-Hyeong Lee, Rae-Hong Park, Rin-Chul Kim, Sang Uk Lee, and In Chul Kim. Hybrid estimation of navigation parameters from aerial image sequence. *Trans. Img. Proc.*, 8(3):429–435, 1999.
- [47] Alvy Ray Smith. Color gamut transform pairs. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 12(3):12–19, 1978.
- [48] Noah Snavely, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):835–846, 2006.
- [49] R. Strand and E. Hayman. Correcting radial distortion by circle fitting. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, pages 9.1–9.10. BMVA Press, 2005.
- [50] Li Tian, Sei ichiro Kamata, Yoshifumi Ueshige, and Yoshimitsu Kuroki. An automatic image-map registration algorithm using modified partial hausdorff distance. In *IGARSS*, pages 3534–3537, 2005.
- [51] Geert Verhoeven and B De Vliegheer. Oblique aerial photography in a gis environment for geo-archaeological research: a case study: the potenza valley survey. In *REMOTE SENSING IN TRANSITION*, pages 427–434. Millpress Science Publishers, 2004.
- [52] Lu Wang and Ulrich Neumann. A robust approach for automatic registration of aerial images with untextured aerial lidar data. In *CVPR*, pages 2623–2630, 2009.

-
- [53] T. Y. Zhang and C. Y. Suen. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. *Commun. ACM*, 27(3):236–239, 1984.
- [54] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [55] 皆川 明洋 ほか. 混在直線からの消失点・消失線と直線の同時推定. **情報処理学会研究報告**. *CVIM*, 99(3):65–72, 1999.
- [56] 糸永 航 ほか. 地図画像からの道路ネットワークの自動抽出. **電子情報通信学会論文誌**. *D-II, 情報・システム, II-パターン処理*, 82(11):1990–1999, 1999.
- [57] 荒谷 太郎 ほか. 東日本大震災時の航空機活動と空港運用の実態分析- いわて花巻・山形・福島空港を対象として -. **土木学会論文集 D3**, 69(5):229–249, 2013.
- [58] 西村 孝 ほか. 道路状況把握のための空撮画像を用いた物体移動方向の可視化. **精密工学会誌**, 75(2):300–306, 2009.
- [59] 長谷川 弘忠 ほか. 空撮ハイビジョン映像及び航空写真による兵庫県南部地震の建物被害判読精度. **地域安全学会論文報告集**, (8):72–77, 1998.
- [60] 青木 久 ほか. 空撮映像を用いた画像解析による地震被害建物分布の抽出. **地域安全学会梗概集**, (9):80–83, 1999.
- [61] デジタル画像処理編集委員会. **デジタル画像処理**. CG-ARTS 協会, 2011.
- [62] 佐藤正樹、中條渉. 即応性に重点をおいた災害対策用ヘリコプター衛生通信システム. **電子情報通信学会誌**, 89(9):806–810, 2006.
- [63] 佐藤淳. **コンピュータビジョン - 視覚の幾何学** -. コロナ社, 1999.
- [64] 金谷 健一、森 昭延、菅谷 保之. 自己校正法の最新レシピ. **情報処理学会研究報告**. *CVIM*, 2006(25):199–206, 2006.
- [65] 金澤 靖、金谷 健一. コンピュータビジョンのための画像の特徴点の抽出. **電子情報通信学会誌**, 87(12):1043–1048, 2004.
- [66] 金谷 健一. **画像理解**. 森北出版, 1990.
- [67] 金谷 健一. コンピュータビジョンのためのくりこみ法. **情報処理学会論文誌**, 35(2):201–209, 1994.
- [68] 奥田 浩人、出口 光一郎. ガウシアンフィルタによる濃淡エッジの振舞いとエッジ抽出. **情報処理学会論文誌**, 36(10):2244–2252, 1995.
- [69] 山後 公二. 電子国土基本図（オルソ画像）について. **国土地理院時報**, (118):57–60, 2009.
- [70] 内閣府政策統括官（防災担当）. S.K.Y. 広域圏における広域的な防災対策に関する調査報告書, 2005.
- [71] 出口光一郎. **画像と空間**. 昭晃堂, 1991.
- [72] 出口光一郎. **ロボットビジョンの基礎**. コロナ社, 2000.
- [73] 仲谷 善雄. 大規模災害に対する減災情報システム（後編）. **情報処理**, 45(12):1255–1265,

- 2004.
- [74] 国土交通省. 航空法 第 174 条.
 - [75] 国土交通省. 航空法 第 81 条.
 - [76] 国土交通省. 平面直角座標系 (平成 14 年国土交通省告示第 9 号) 最終改定 平成 22 年 3 月 31 日 国土交通省告示第 289 号, 2010.
 - [77] 国土交通省. 公共測量標準図式 数値地形図データファイル仕様, 2011.
 - [78] 国土交通省. 測量法第 34 条で定める作業規定の準則 (付録 6 計算式集) (平成 25 年 3 月 29 日一部改定), 2013.
 - [79] 国土交通省. 測量法第 34 条で定める作業規定の準則 (付録 7 公共測量標準図式) (平成 25 年 3 月 29 日一部改定), 2013.
 - [80] 国土交通省. 電子防災情報システムの整備. 平成 26 年度国土地理院関係予算及び平成 25 年度補正予算案について (参考資料 5), 2013.
 - [81] 国立天文台編. **理科年表**. 丸善出版, 2014.
 - [82] 石井 真人、杉山 岳弘、阿部 圭一. 色情報とエッジ情報を利用した航空写真からの大局的な地震被害の把握. **情報処理学会研究報告**. *CVIM*, 2001(36):171–176, 2001.
 - [83] 建設省. 平成 8 年建設省告示第 1029 号, 1996.
 - [84] 徐剛. **写真から作る 3 次元 CG**. 近代科学社, 2001.
 - [85] 徐剛、辻三郎. **3 次元ビジョン**. 共立出版, 1998.
 - [86] 板谷 明美、山崎 忠久. 簡易システムによるデジタルオルソフォトの作成. **森林利用学会誌**, 14(2):95–100, 1999.
 - [87] 上瀧 剛、内村 圭一、胡 振程. ネットワーク型 active shape models による道路地図の位置精度の向上. **情報処理学会論文誌**, 47(12):3079–3089, 2006.
 - [88] 曾我 基、寺井 佑、佐治 斉. 時系列航空画像からの道路交通情報の解析. **情報処理学会研究報告**. *ITS*, [高度交通システム], 2001(47):49–54, 2001.
 - [89] 浦部 和哉、佐治 斉. 航空画像を用いた災害後の道路閉塞解析. **電子情報通信学会技術研究報告**. *ITS*, 106(438):7–12, 2006.
 - [90] 飯倉 宏治、佐治 斉. 撮影位置と画像情報に基づく空撮映像の地図へのレジストレーション. **画像電子学会誌**, 43(3):383–391, 2014.
 - [91] 日本工業規格. プログラム言語 C #, 2005.
 - [92] 飯田 征、大西 昇、杉江 昇. 文字認識のためのストロークに基づく細線化アルゴリズム. **電子情報通信学会技術研究報告**. *IE*, 画像工学, 93(518):57–64, 1994.
 - [93] 河瀬和重. Gauss-krüger 投影における緯度経度座標及び平面直角座標相互間の座標変換についてのより簡明な計算方法. **国土地理院時報**, (121):109–124, 2011.
 - [94] 消防庁. 平成 25 年版 消防白書, 2014.
 - [95] 田崎昭男、田村栄一、笹嶋英季、桶屋敏行. 基盤地図情報 (標高・オルソ) 作成につい

- て. **国土地理院時報**, (115):39–43, 2008.
- [96] 数井 誠人、長谷山 美紀、北島 秀夫. 複比を用いた自動走行システムのための消失点推定. **電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理**, 84(7):1319–1327, 2001.
- [97] 警察庁生活安全局長. 警察庁丙地発第 83 号, 2011.
- [98] 野々山泰匡、井尻昌男、前田佳子. ヘリコプター位置映像表示システム. **三菱電機技報**, 78(5):367–371, 2004.
- [99] 小清水 寛、佐藤 壮紀、首藤 隆夫. 電子国土 Web システムにおけるオルソ画像の配信. **国土地理院時報**, (121):125–133, 2011.
- [100] 高村大也. **言語処理のための機械学習入門**. コロナ社, 2010.

付録 A

運動方向と地表平面法線に関する補足

ここでは、本文中で使用している射影幾何学における各種の命題を記す。いずれも射影幾何学に関する基礎的な知識より導かれるものである。

A.1 動きの消失点による運動方向の復元

命題 A.1 0 でない焦点距離 f のもと、動きの消失点の座標が (u, v) であるとき、この運動の方向はカメラ空間においてベクトル (u, v, f) と平行である。

証明

運動の方向ベクトルを $(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z)$ とすると、動きの消失点に関するよく知られた関係より、以下の式が成立する。

$$\begin{cases} \frac{u}{f} = \frac{\Delta_X}{\Delta_Z} \\ \frac{v}{f} = \frac{\Delta_Y}{\Delta_Z} \end{cases}$$

これは $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$ が満たさなければならない必要条件である。上式の分子分母の対応に注目し $(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z) = (u, v, f)$ とすると、この必要条件を満たす。また、平行な運動の動きの消失点は同一となることもよく知られており、実際、0 でない任意の定数 k を用いて、 $(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z) = k(u, v, f)$ としても、この必要条件を満足する。逆に、上記より得られた運動方向ベクトルから動きの消失点を計算しても座標 (u, v) が得られることは容易に確かめられる。よって、運動方向はベクトル (u, v, f) と平行であることが分かる。 ■

上の議論はカメラが静止していて、対象点がある直線上を移動していると考えても成立する。よって、次の系もただちに成立する。

系 A.2 ある直線の消失点が (u, v) であるならば、その直線の方法ベクトルは (u, v, f) と平行である。ただし、 f は焦点距離を表すものとする。

A.2 擬似オルソ空間に関するもの

カメラ空間における地表平面および対応する擬似オルソ地表面上での任意の直線に関して、それぞれの空間における投影面で定まる消失点は等しい。このことと消失線の定義より、次の系を得る。

系 A.3 カメラ空間における地表平面と擬似オルソ地表面に対し、それぞれの空間における投影面で定まる消失線は等しい。

次に、擬似オルソ地表面の法線と、カメラ空間における地表平面の消失線との間にも、密接な関係があることを以下に示す。

命題 A.4 正規カメラ空間における擬似オルソ地表面の消失線が $ax + by + c = 0$ と表わされるとき、擬似オルソ地表面の法線は正規カメラ空間内において方向 (a, b, c) と平行である。

証明

擬似オルソ地表面上に存在する、任意の直線に対する正規カメラ空間内における方向ベクトルを $(\Delta'_X, \Delta'_Y, \Delta'_Z)$ とすると、消失点の座標は $(\Delta'_X/\Delta'_Z, \Delta'_Y/\Delta'_Z)$ となる。消失線の定義より、 $a\Delta'_X/\Delta'_Z + b\Delta'_Y/\Delta'_Z + c = 0$ が成り立つが、これは次のように変形できる：

$$\begin{aligned} a \frac{\Delta'_X}{\Delta'_Z} + b \frac{\Delta'_Y}{\Delta'_Z} + c &= 0 \\ \iff a\Delta'_X + b\Delta'_Y + c\Delta'_Z &= 0 \\ \iff (a, b, c) \cdot (\Delta'_X, \Delta'_Y, \Delta'_Z) &= 0 \end{aligned}$$

これは、擬似オルソ地表面上の任意の方向ベクトルと (a, b, c) とが垂直になることを示している。 ■

カメラ空間における地表平面の消失線と擬似オルソ地表面の消失線とは等しいため、次の系が成り立つ。

系 A.5 焦点距離を f で表すとする。このとき、擬似オルソ地表面の正規カメラ空間内における法線が (N'_X, N'_Y, N'_Z) と平行であることと、カメラ空間における地表平面の法線が $(N'_X, N'_Y, N'_Z/f)$ と平行であることは同値である。

付録 B

レジストレーション結果

以下に実験 1 ～ 10 に関するレジストレーション結果を示す。それぞれの図中における (a) ～(c) の意味であるが、(a) は該当の鳥瞰写真、(b) はレジストレーション結果 (推測した注視点を中心とする 800m 四方)、(c) はレジストレーション結果の拡大図 (500m 四方) を示すものとする。

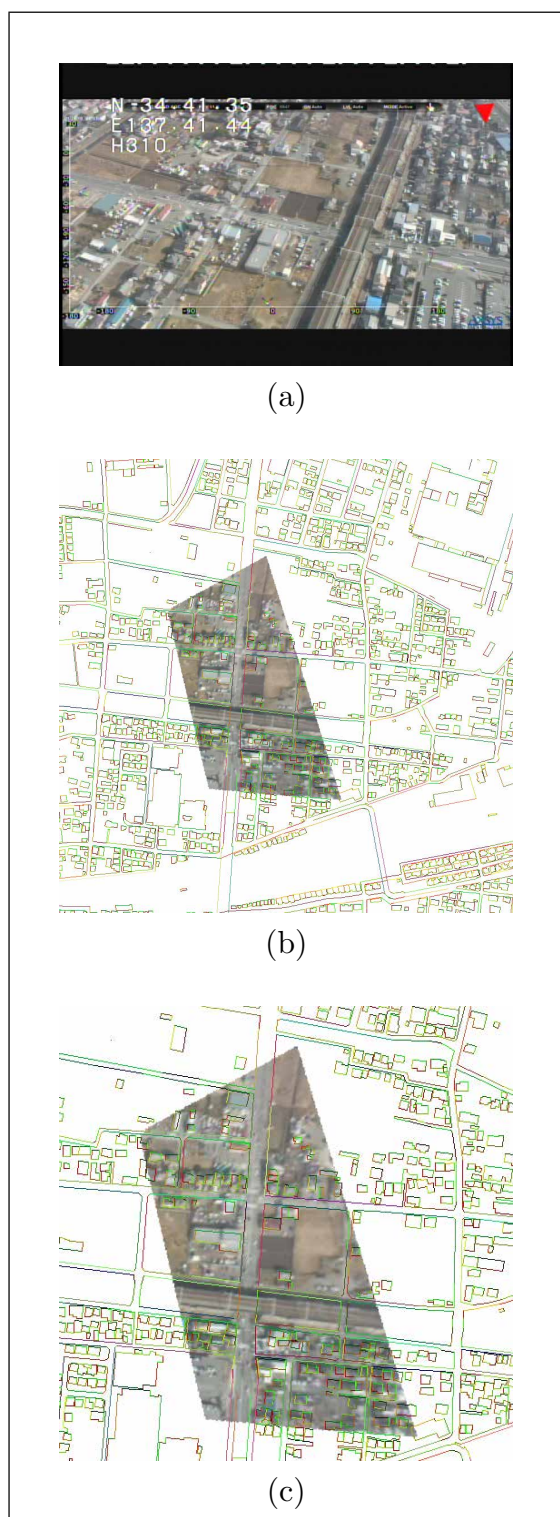


図 B.1 実験 1 のレジストレーション結果。長い道路と線路が交差する領域に対し、レジストレーションを行った。



図 B.2 実験 2 のレジストレーション結果。長い道路が交差する領域に対し、レジストレーションを行った。

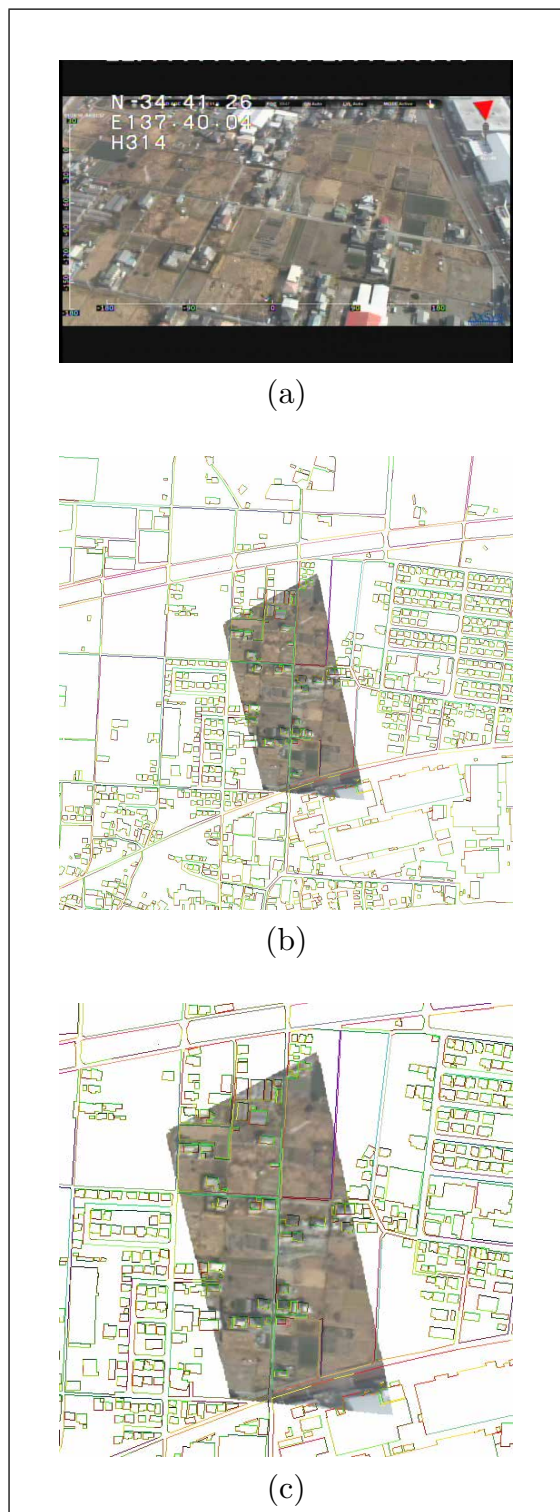


図 B.3 実験 3 のレジストレーション結果。幅員が狭い長い道路とその交差点が含まれる領域についてレジストレーションを行った。

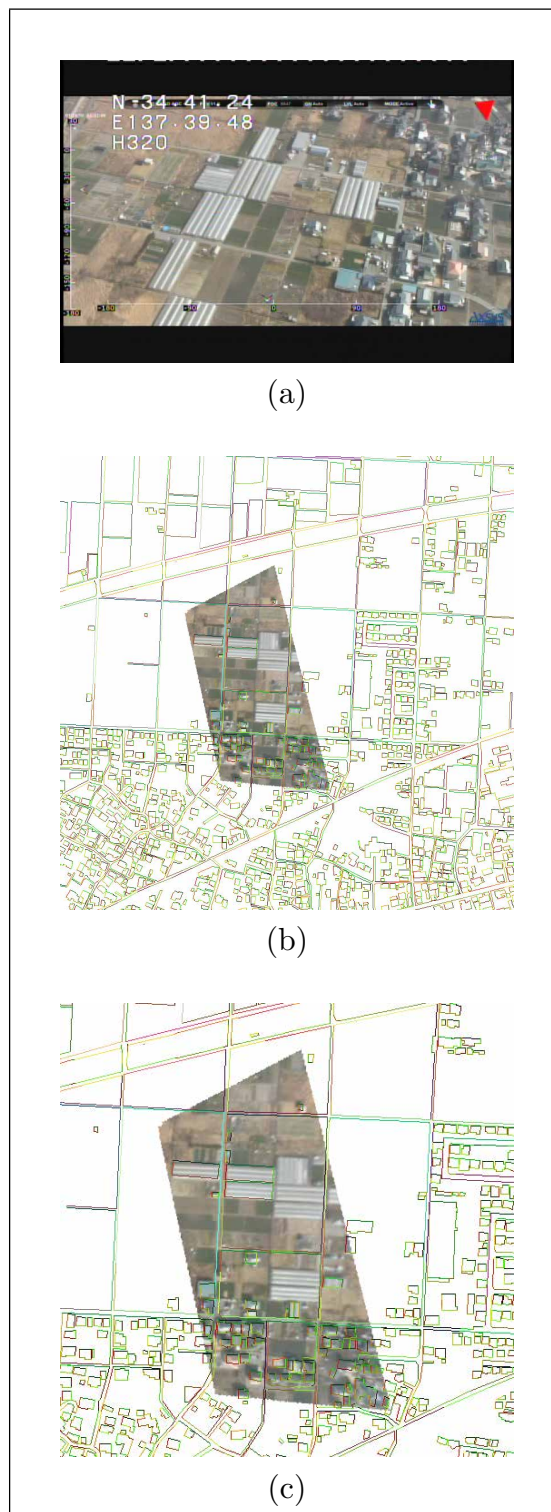


図 B.4 実験 4 のレジストレーション結果。幅員が狭く長い道路および交差点と建物が含まれる領域に対し、レジストレーションを行った。

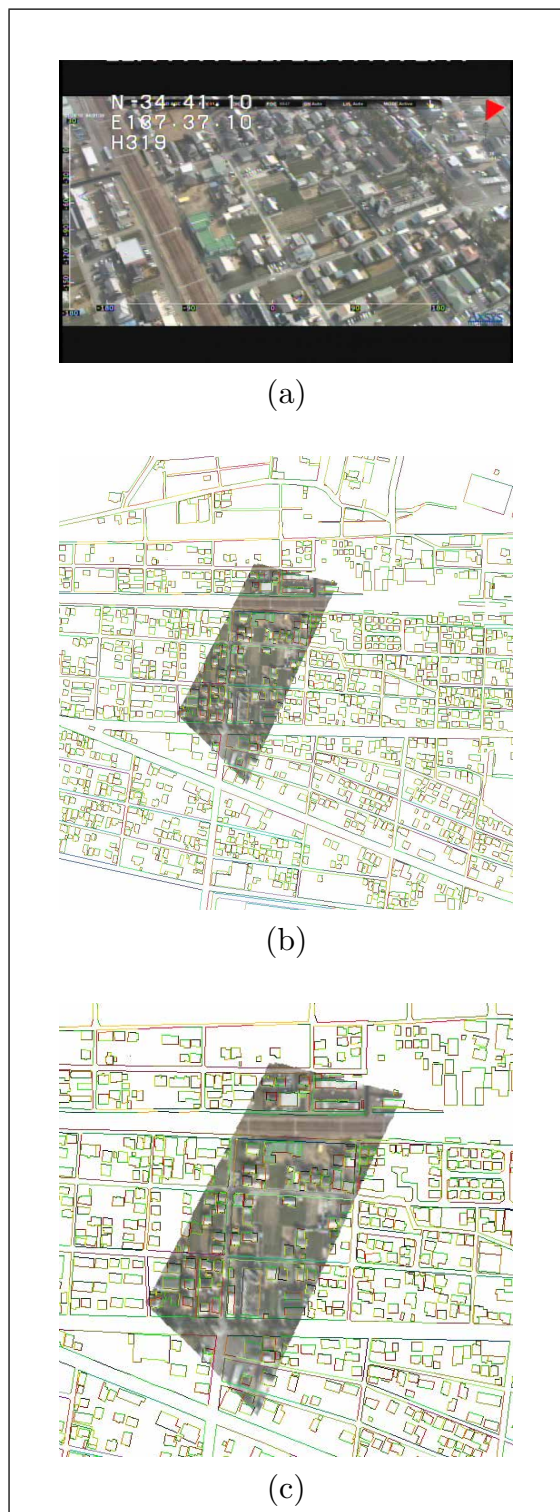


図 B.5 実験 5 のレジストレーション結果。密集する建物地域と線路を含む領域に対し、レジストレーションを行った。

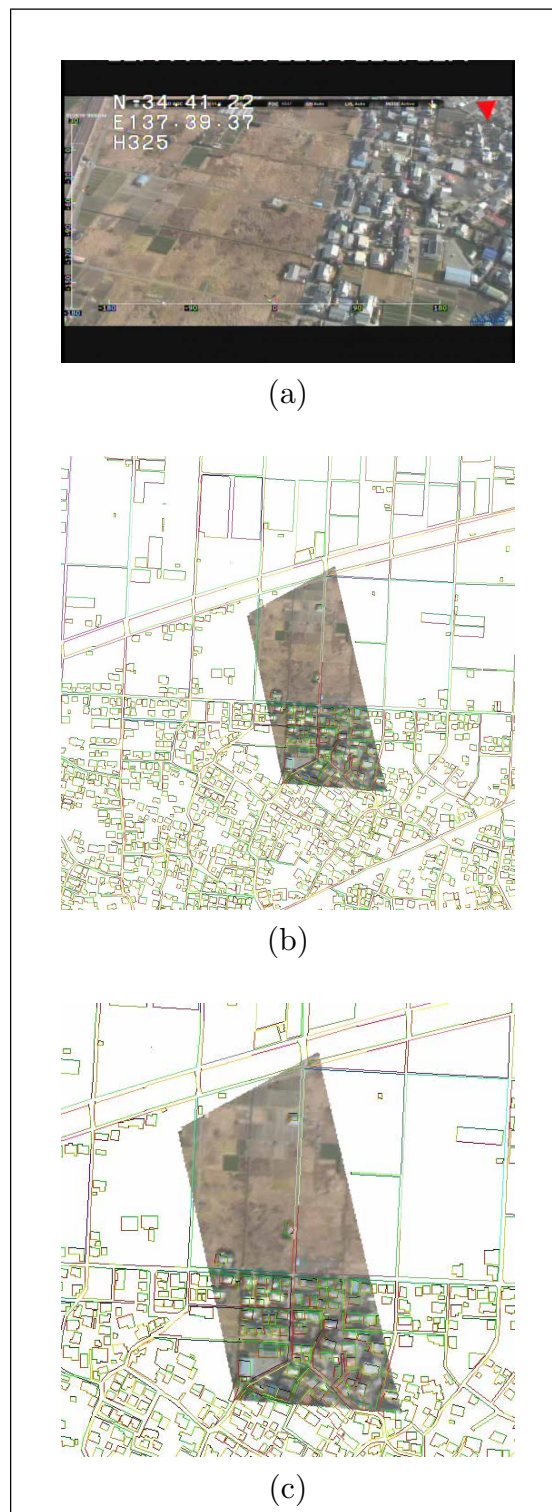


図 B.6 実験 6 のレジストレーション結果。幅員の狭い道路とその交差点および一部密集する建物がある領域に対しレジストレーションを行った。

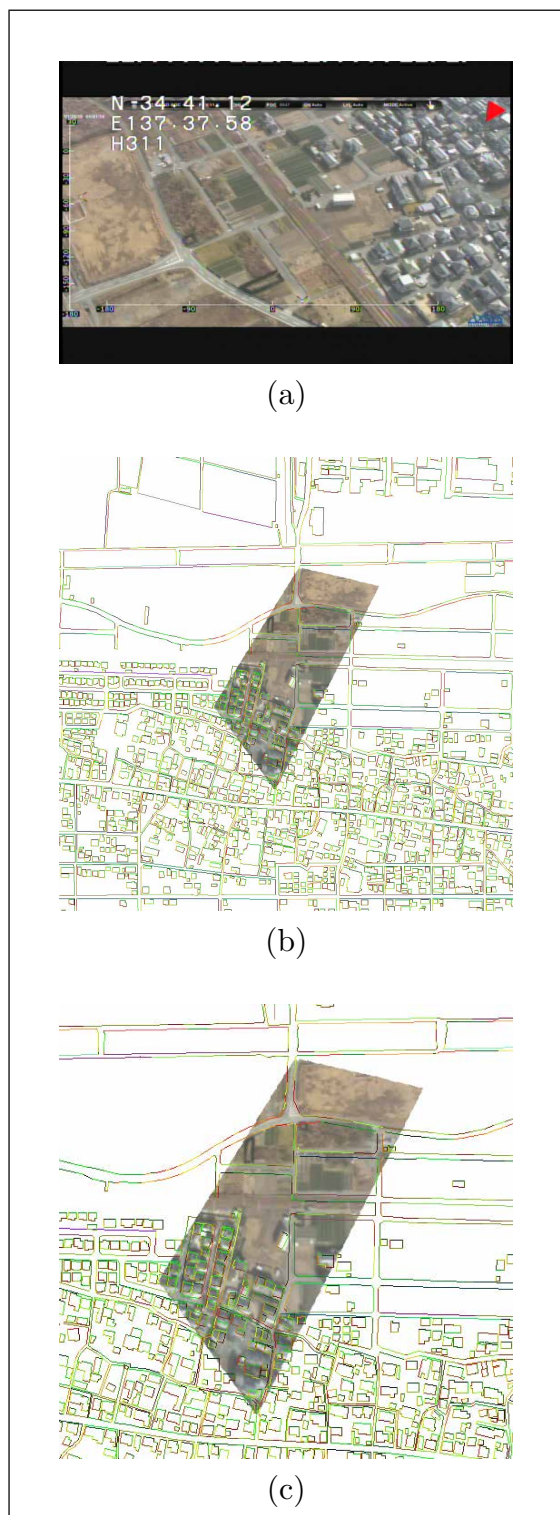


図 B.7 実験 7 のレジストレーション結果。曲がった道路と密集する建物が存在する領域に対しレジストレーションを行った。

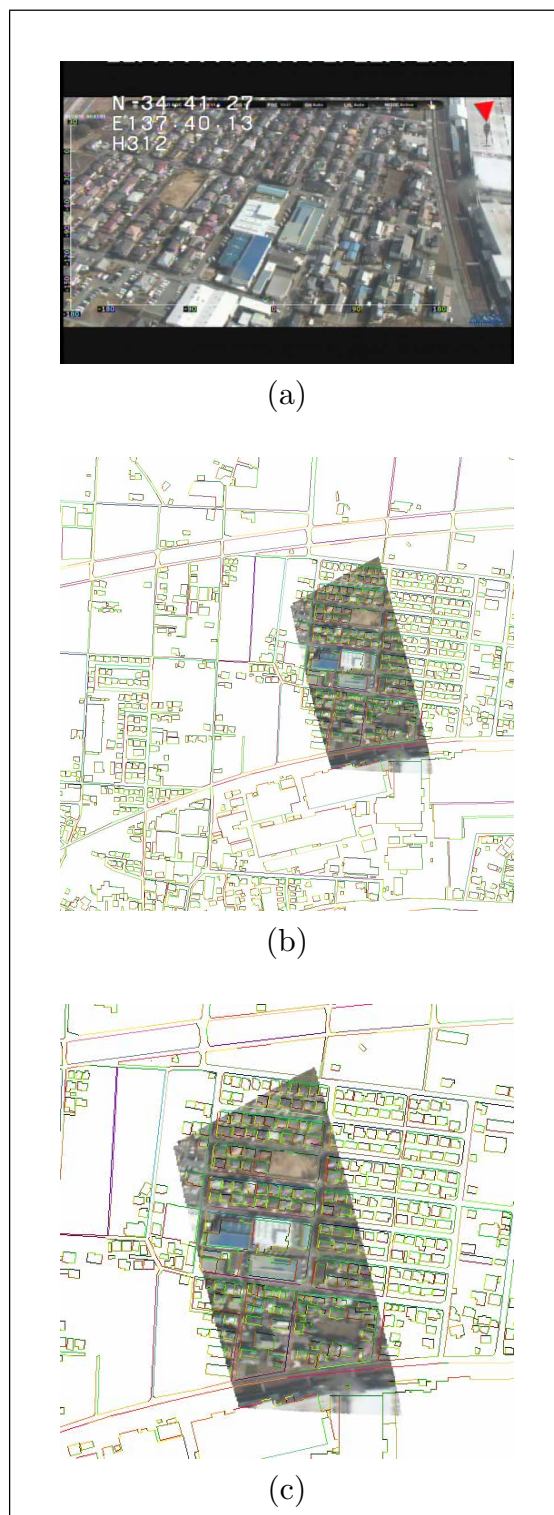


図 B.8 実験 8 のレジストレーション結果。密集する建物地域に対しレジストレーションを行った。



図 B.9 実験 9 のレジストレーション結果。大きな建物を含む建物密集領域に対しレジストレーションを行った。

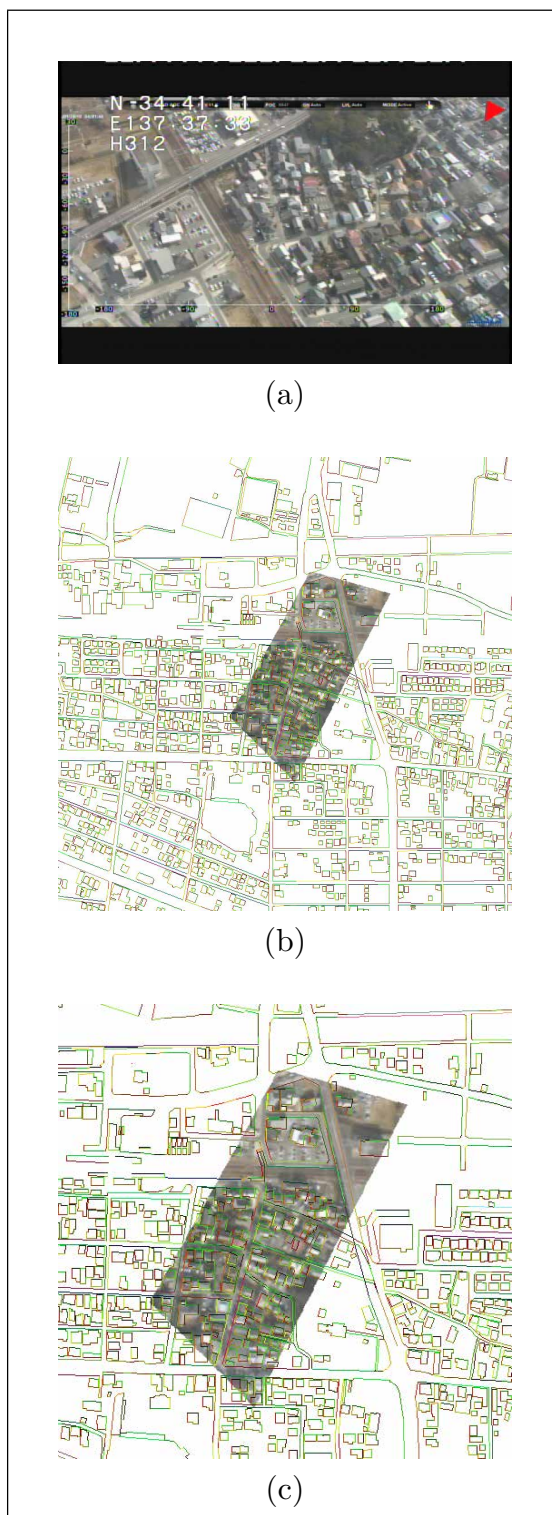


図 B.10 実験 10 のレジストレーション結果。直角に交差しない交差点を含んだ領域に対しレジストレーションを行った。

付録 C

系番号

系番号	座標系原点の緯度経度		適用区域
	経度（東経）	緯度（北緯）	
1	129 度 30 分 0 秒	33 度 0 分 0 秒	長崎、県鹿児島県のうち北方北緯 32 度南方北緯 27 度西方東経 128 度 18 分東方東経 130 度を境界線とする区域内（奄美群島は東経 130 度 13 分までを含む。）にあるすべての島、小島、環礁及び岩礁
2	131 度 0 分 0 秒	33 度 0 分 0 秒	福岡県、佐賀県、熊本県、大分県、宮崎県、鹿児島県（1 系に規定する区域を除く。）
3	132 度 10 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	山口県、島根県、広島県
4	133 度 30 分 0 秒	33 度 0 分 0 秒	香川県、愛媛県、徳島県、高知県
5	134 度 20 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	兵庫県、鳥取県、岡山県
6	136 度 0 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	京都府、大阪府、福井県、滋賀県、三重県、奈良県、和歌山県
7	137 度 10 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	石川県、富山県、岐阜県、愛知県
8	138 度 30 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	新潟県、長野県、山梨県、静岡県
9	139 度 50 分 0 秒	36 度 0 分 0 秒	東京都（14 系、18 系及び 19 系に規定する区域を除く。）福島県、栃木県、茨城県、埼玉県、千葉県、群馬県、神奈川県
10	140 度 50 分 0 秒	40 度 0 分 0 秒	青森県、秋田県、山形県、岩手県、宮城県

11	140 度 15 分 0 秒	44 度 0 分 0 秒	小樽市、函館市、伊達市、北斗市、北海道後志総合振興局の所管区域、北海道胆振総合振興局の所管区域のうち豊浦町、壮瞥町及び洞爺湖町、北海道渡島総合振興局の所管区域、北海道檜山振興局の所管区域
12	142 度 15 分 0 秒	44 度 0 分 0 秒	北海道（11 系及び 13 系に規定する区域を除く。）
13	144 度 15 分 0 秒	44 度 0 分 0 秒	北見市、帯広市、釧路市、網走市、根室市、北海道オホーツク総合振興局の所管区域のうち美幌町、津別町、斜里町、清里町、小清水町、訓子府町、置戸町、佐呂間町及び大空町、北海道十勝総合振興局の所管区域、北海道釧路総合振興局の所管区域、北海道根室振興局の所管区域
14	142 度 0 分 0 秒	26 度 0 分 0 秒	東京都のうち北緯 28 度から南であり、かつ東経 140 度 30 分から東であり東経 143 度から西である区域
15	127 度 30 分 0 秒	26 度 0 分 0 秒	沖縄県のうち東経 126 度から東であり、かつ東経 130 度から西である区域
16	124 度 0 分 0 秒	26 度 0 分 0 秒	沖縄県のうち東経 126 度から西である区域
17	131 度 0 分 0 秒	26 度 0 分 0 秒	沖縄県のうち東経 130 度から東である区域
18	136 度 0 分 0 秒	20 度 0 分 0 秒	東京都のうち北緯 28 度から南であり、かつ東経 140 度 30 分から西である区域
19	154 度 0 分 0 秒	26 度 0 分 0 秒	東京都のうち北緯 28 度から南であり、かつ東経 143 度から東である区域

表 C.1 系番号と地域 [76]


```

int offsetX=blockIdx.x*blockDim.x+threadIdx.x;
int offsetY=blockIdx.y*blockDim.y+threadIdx.y;

const float E=0.05f;
const float Z=1.96f;
const float P=0.5f;
float numThreshold=kNumOfTargetListElements
    /(float)(
        pow(E/Z,2)*(kNumOfTargetListElements-1)/(P*(1-P))+1
    );

int index=offsetY*(gridDim.x*blockDim.x)+offsetX;

if(offsetX>=kEndOffsetX || offsetY>=kEndOffsetY) {
    outScore[index]=-index;
    return;
}

outOffsetX[index]=offsetX;
outOffsetY[index]=offsetY;

float score=0;
for(int i=0; i<kNumOfTargetListElements; i++) {
    float x=inTargetListBuffer[i*4]+offsetX;
    float y=inTargetListBuffer[i*4+1]+offsetY;
    if(x<0 || x>=kMapImageWidth || y<0 || y>=kMapImageHeight) {
        continue;
    }
    float scoreWeight=inTargetListBuffer[i*4+2];
    float theta=inTargetListBuffer[i*4+3];
    float flagWeight=tex2D(gFlagTexture,x,y);
    float mapCosTheta=tex2D(gAngleTextureX,x,y);
    float mapSinTheta=tex2D(gAngleTextureY,x,y);
    float mapAngle=atan2(mapSinTheta,mapCosTheta);
    float dTheta=theta-mapAngle;
    float absDot=abs(cos(dTheta));
    float penalty=abs(sin(dTheta));
    if(flagWeight>0) {
        score+=scoreWeight*(pow(absDot,8)-pow(penalty,8)); // m=8
    }
}
outScore[index]=score;
if(score>kCurrentHighScore) {
    outUpdatedFlag[0]=1;
}
}
}

```

謝辞

本論文は、静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻後期博士課程在学中に、同大学院創造科学技術研究部佐治齊教授の指導のもと行ったものである。佐治先生には入学当初より手厚い指導を行なって頂き、本研究をこのような形でまとめることができたのも、ひとえに佐治先生のご指導おかげである。私にとってここまでの道のりは決して平坦なものではなく、特に、具体的な研究対象をどのようにするかについて大いに悩み迷っていた。このような時、研究方針の明確化につながるご助言を佐治先生から頂いたときのことは今でも鮮明に記憶している。先生の深い洞察に基づく適切な助言をなしにして本論文は成立しなかった。ここで改めて、佐治先生へ心からの感謝を申し上げたく思う。

浜松市からは DM データを貸与していただいた。このデータがなければ、本テーマにおける研究の進展はなかったと思う。厚く御礼申し上げる。また、浜松市消防局からは鳥瞰映像データを貸与していただいた。この映像データは、まさに本論文の中心となるものであり、深く感謝する。

本研究は筆者の勤務先である静岡理工科大学の理解なしには成し遂げることはできなかった。外山浩介理事長、野口博学長、荒木信幸学事顧問（前学長）、秋山憲治総合情報学部長、菅沼義昇前総合情報学部長には、社会人として静岡大学大学院に通うことを快諾していただいた。特に荒木先生においては、進学に係る様々な事柄について相談にのっていただいた。また、下田修事務局長、久留島康仁総務部部長兼社会連携課課長には、地図データ入手のため、近隣の自治体に問い合わせなどを行なっていただいた。ここで改めて感謝する。

最後に、精神的な支えになってくれた妻の由紀子ならびに新鮮な気持ちへ切り替えるきっかけをいつも提供してくれる娘の詩子にも感謝する。