

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	頑健で効率的な航空画像照合のための方向符号ピラミッド生成と照合方式に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石丸光宏
Author(English)	Mitsuhiro Ishimaru
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9548号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐藤 誠,熊澤 逸夫,長橋 宏,中村 健太郎,山口 雅浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9548号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

頑健で効率的な航空画像照合のための方向符号
ピラミッド生成と照合方式に関する研究

指導教官 佐藤 誠 教授

東京工業大学 総合理工学研究科

物理情報システム専攻

石丸 光宏

目次

目次.....	1
図目次.....	3
表目次.....	5
第1章 序論.....	6
1.1 研究背景.....	6
1.2 本研究の目的・特徴.....	8
1.3 本論文の構成.....	9
第2章 方向符号による航空画像照合.....	11
2.1 方向符号照合.....	11
2.2 航空画像照合への適用性.....	12
2.2.1 遮へいに対する頑健性.....	12
2.2.2 HOCによる頑健性の向上.....	14
2.2.3 回転・スケール変化への対応.....	15
2.2.4 基本照合実験.....	15
2.2.5 ピラミッド探索の適用と課題.....	20
2.3 まとめ.....	22
第3章 方向符号ピラミッド画像の適応的選択による航空画像照合.....	23
3.1 シーンに応じたピラミッド画像生成.....	23
3.1.1 人工物主体シーン.....	23
3.1.2 自然物主体シーン.....	25
3.2 方向符号ピラミッドの適応的選択.....	26
3.2.1 最上位レベルの照合結果による選択.....	26
3.2.2 照合信頼度の算出.....	26
3.2.3 提案手法の手順.....	27
3.3 評価実験.....	30
3.3.1 実験に使用した画像.....	30
3.3.2 実験概要.....	30
3.4 実験結果と考察.....	30
3.4.1 照合率.....	31
3.4.2 照合信頼度による方向符号ピラミッド選択.....	34
3.4.3 処理時間.....	34
3.5 まとめ.....	35

第4章	画像特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理.....	36
4.1	方向符号に基づく領域分割.....	36
4.1.1	QOCによる人工物判別.....	36
4.1.2	QOCのベクトル表現.....	39
4.2	提案手法の処理フロー.....	42
4.3	評価実験.....	44
4.3.1	実験概要.....	44
4.3.2	実験結果：QOベクトルノルムによる領域分割.....	46
4.3.3	実験結果：照合率.....	46
4.3.4	実験結果：処理速度.....	47
4.3.5	考察.....	48
4.4	まとめ.....	49
第5章	方向符号照合のための適応的ピラミッド生成と評価方法.....	50
5.1	上位ピラミッドレベルにおけるゴーストエッジ問題.....	50
5.2	ゴーストエッジの影響を低減する評価関数の導入.....	52
5.3	提案手法の処理フロー.....	53
5.4	評価実験（混在シーン）.....	54
5.4.1	実験概要.....	54
5.4.2	実験結果と考察.....	55
5.5	評価実験（人工物主体シーンと自然物主体シーン）.....	56
5.5.1	実験概要.....	56
5.5.2	実験結果と考察.....	56
5.6	まとめ.....	57
第6章	結論.....	58
謝辞		60
発表文献リスト		61
参考文献		62

図目次

図 1.1	航空用途への応用イメージ.....	6
図 1.2	本論文の構成概要.....	10
図 2.1	こう配算出オペレータと方向符号の定義.....	11
図 2.2	遮へいの有無による相違度のプロファイル（下段）の比較例.....	13
図 2.3	OC と HOC による照合結果比較例.....	14
図 2.4	参照画像（上段）と入力画像生成用画像（下段）のペア.....	17
図 2.5	参照画像（上段）と入力画像生成用画像（下段）のペア.....	18
図 2.6	SSD, NCC, OCM による照合率比較.....	19
図 2.7	ガウシアンピラミッドからの方向符号ピラミッド生成.....	20
図 2.8	ピラミッドレベルの上昇による照合率の変化.....	21
図 3.1	上位レベルの方向符号抽出のためのマスクパターン.....	24
図 3.2	市街地画像から生成した方向符号の例.....	24
図 3.3	提案手法の処理フロー.....	29
図 3.4	実験結果（人工物主体シーンの照合率）.....	32
図 3.5	実験結果（自然物主体シーンの照合率）.....	33
図 3.6	選択された HOC ピラミッドの構成比.....	34
図 4.1	OC, HOC, QOC の概念図（ $\Delta \theta = \pi/180$ ）.....	37
図 4.2	差分スコアによる画素選択方法.....	37
図 4.3	OC, HOC, QOC のヒストグラム比較.....	38
図 4.4	QO ベクトル表現.....	39
図 4.5	市街地と山間部画像の QO ベクトルノルムの比較例.....	41
図 4.6	QO ベクトルのノルムによる人工物らしさ判定.....	41
図 4.7	提案手法の処理フロー.....	43
図 4.8	実験に使用した参照画像（上）と入力画像生成用画像（中）のペアと入力画像の DAS マップ（下）.....	45
図 4.9	各方式のシーン別照合率（ピラミッドレベル 4）.....	46
図 4.10	全シーンの平均照合率.....	47
図 5.1	ゴーストエッジ問題の発生メカニズム.....	50
図 5.2	正解位置における方向符号の残差絶対値の分布.....	51
図 5.3	領域特徴別の評価関数.....	52
図 5.4	提案手法の処理フロー.....	53
図 5.5	実験に使用したシーン.....	54

図 5.7	入力画像とその DAS マップの例	55
図 5.7	各方式の照合率比較（ピラミッドレベル 4）	55
図 5.8	入力画像サイズによる照合率の変化	57

表目次

表 3.1 人工物主体シーンと自然物主体シーンの比較.....	25
---------------------------------	----

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、自律移動ロボットや無人航空機のナビゲーション等に画像情報を利用する研究 [1] [2] が盛んに行われ、そのひとつにビューベーストアプローチ [3], もしくはアピランスベーストアプローチ等と呼ばれる方法がある。これらは人間の記憶に相当する過去の画像データベースと現在の画像を照合することで自己位置を算出する処理である。航空用途への応用では、位置情報を有する過去の航空画像データベースと、航空機から撮影した下方画像を照合することで、容易に撮影地点の絶対位置を算出することができる (図 1.1)。従来、測位技術として GPS (Global Positioning System) が航空用途においても広く利用されているが、妨害電波への脆弱性等の技術課題もあり [4], 画像を用いたナビゲーション技術は GPS 等の他の航法機器が使用不能時の補完技術として期待される。

このようなビューベーストアプローチによるナビゲーションを実現するためには、撮影時期の異なる画像同士を頑健に照合する必要があり、環境条件を限定することが可能な工場等の屋内環境と異なり、屋外環境では様々な見え方の変化が課題となる [5]。

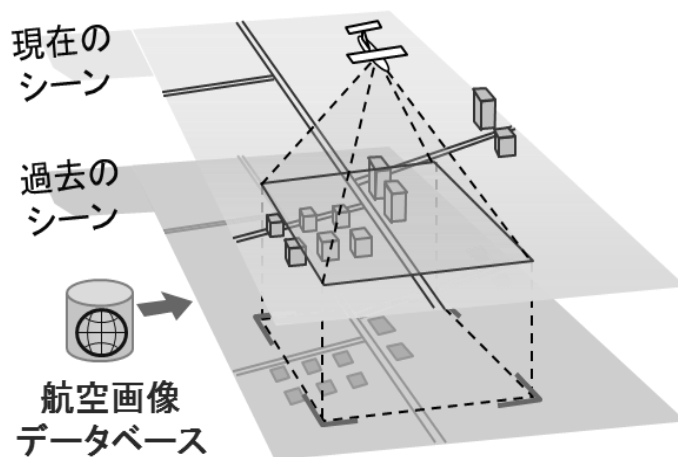


図 1.1 航空用途への応用イメージ

例えば、天候、時間による明るさや影の方向の変化、季節の違いによる植生の変化、障害物による遮へい、地形や建造物等の物理的な変化等、多くの外乱要因が存在する。航空画像の場合、過去に蓄積された航空画像データを有効活用することが可能であるが、そのためにはこのような見え方の変化に影響されない形で頑健に照合できる方式でなければならない。

画像の照合方式は大きく、特徴ベースの方式と領域ベースの方式に分類することができる [6]。それぞれ長所短所があり、目的によって使い分けが必要である。例えば、SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [7]やその高速化手法である SURF (Speeded-Up Robust Features) [8]等の特徴点ベースの方式は、画像の回転やスケール変化にも頑健な手法であり、屋外環境においても標識の検出 [9]や都市部での位置同定 [10]等に優れた成果を残している。しかし、明瞭な特徴が少ない画像や、逆に複雑過ぎる画像では適切な特徴点の抽出が困難であり、樹木等の自然物が多く含まれるシーンや、市街地の航空画像等を扱うには必ずしも適しているとは言えない。

別のアプローチとして、画像全体の情報を使用する領域ベースのマッチング方式があり、SSD (Sum of Squared Differences) [11]や SAD (Sum of Absolute Differences)、正規化相互相関によるテンプレートマッチング等 [12] [13] [14]がよく使用されている。そのままでは画像の大きな変形や回転には対応できないが、他のセンサ情報等により探索範囲をある程度限定可能な場合には有効な手法である。

しかし、時間的な照明条件の変動等が大きい屋外環境では、明度に基づく従来手法だけでは照合が困難な場合も多い。そこで最近では、明度情報そのものではなく隣接画素間の明度の増減 [15]や、画素近傍の明度勾配に着目した照合手法が提案されており、その一つに方向符号照合 [16] [17]がある。屋外環境で問題となる局所的な照明変化や遮へい等の不良条件に対しても高いロバスト性を有している。

このような領域ベースの方式は密な探索が可能な反面、計算コストが高く、従来から計算量低減の手法が研究されてきた [18]。その一つにピラミッド探索処理 [19]がある。これは元画像から多重解像度の画像を生成し、低解像度画像での照合結果を高解像度画像に順次伝搬することで計算量を低減する手法である。ただ、ピラミッドの生成過程で照合のための特徴も失われるため、シーンとピラミッド生成方式の組み合わせによっては上位レベルでの方向符号照合の結果が大きく変わり、期待した照合性能

が得られない場合がある [20]. シーン中の主体となる特徴に着目したピラミッド生成を行えば良いが, 航空画像では市街地, 山間部, 耕作地帯等の特徴が異なるシーンが混在しており, 画一的な最適化は困難である.

1.2 本研究の目的・特徴

本研究では, 航空画像を用いたナビゲーションを実現するために, これまでに述べた航空画像特有の技術課題に対処可能な, 頑健で効率的な画像照合方式に関する技術的検討及び提案を行う. 本研究で扱う技術課題は大きく次のように整理される.

1. 撮影時期による見え方の変化への対応
2. 計算量の低減
3. ピラミッド生成過程での情報消失による照合率低下への対応
4. 航空画像のシーンの多様性への対応

本研究では, 技術課題 1 に対して, 基本照合方式としてロバスト画像照合の手法のひとつである方向符号照合を適用することで照合の頑健性を実現する. さらに, ピラミッド探索処理を適用することで処理を効率化し, 技術課題 2 に対処する. しかしすでに述べたように, シーンとピラミッド生成方式の組合せによっては大きく照合率低下が生じるという技術課題 3 が存在する. そこで本研究では, まず航空画像のシーンをその特性により大きく分類し, 適切な方向符号ピラミッドの生成方式を検討する. その上で, 多様なシーンが混在するため画一的な最適化が困難であるという技術課題 4 に対処するため, ピラミッド生成方式をシーンによって適応的に選択する方式や, さらに細かく領域特徴ごとにピラミッド生成方式を選択する方式等, 従来提案されていなかった新しいピラミッド生成のアプローチを提案することで, 頑健性と効率化を両立した航空画像照合技術を実現する.

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

第 2 章では, 本研究の基本照合方式である方向符号照合の定義と特性について説明し, 撮影時期の異なる航空画像照合への適用性について述べる. また, ピラミッド探索処理の適用による処理の効率化と, 上位ピラミッドレベルにおける照合率低下の問題について, 航空画像を用いた実験結果を基に示す.

第 3 章では, 第 2 章で示した上位ピラミッドレベルでの照合率低下を抑制するための, 方向符号ピラミッド画像の適応的選択方式について述べる. 航空画像のシーンを大きく人工物主体シーンと自然物主体シーンに分類し, それぞれに適した生成方式で 2 種類の方向符号ピラミッド画像を生成し, そのうちのひとつを適応的に選択することで, シーンによる照合率の低下を防止する. 撮影時期の異なる航空画像間の照合実験を行い, 提案手法の有効性を示す.

第 4 章では, 第 3 章のシーンごとにピラミッドの生成方式を選択する方式が適用困難な, 画像内に異なる特徴が混在する場合でも対処可能な, 細かく画像の領域特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理について述べる. 局所領域内の方向符号の分布に基づく人工物らしさの尺度を用いて, 入力画像を人工物領域とそれ以外の自然領域等到大別し, それぞれ異なるピラミッド生成方式を割り当てる. 人工物と自然物が混在する航空画像を用いた照合実験を行い, 提案手法の有効性を示す.

第 5 章では, 第 4 章の方式を基本として, ゴーストエッジ問題による照合率低下に対処するための, マッチングの評価関数を適応的に選択する方式について述べる. ゴーストエッジ問題とは, 入力画像内の直交するエッジ特徴において, いずれかのエッジがピラミッド生成の過程で消失する場合に, 入力画像と参照画像の消失パターンの組合せによって照合結果が変化する問題である. 人工物主体領域を想定した評価関数を用意し, ピラミッド生成方式の使い分けに加え, 評価関数も適応的に使い分けることで, ゴーストエッジ問題を回避する.

最後に, 第 6 章で, 本論文の結論と今後の課題について述べる.

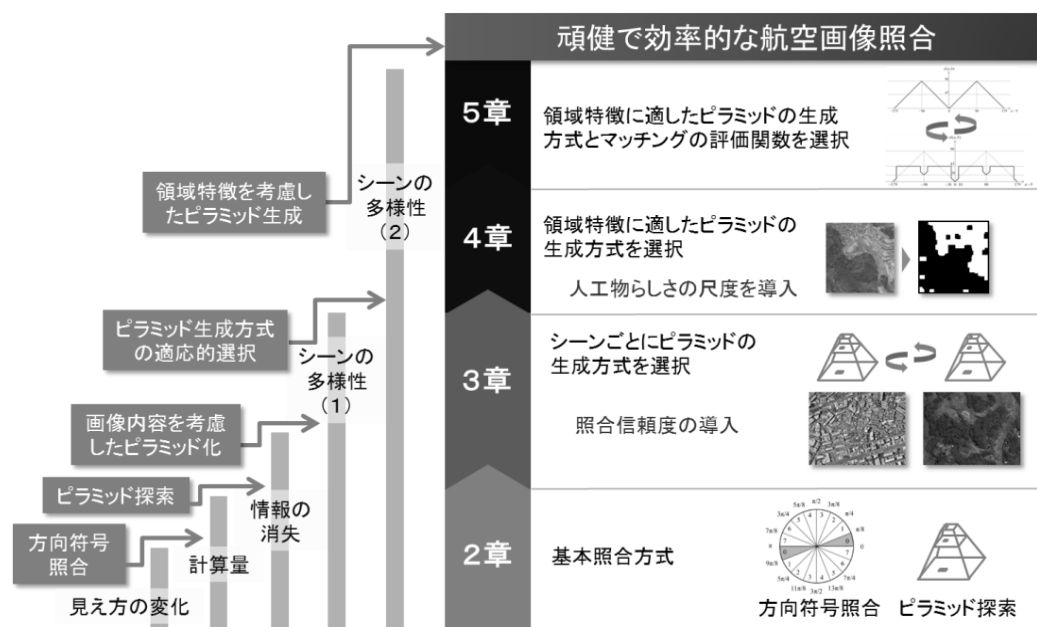


図 1.2 本論文の構成概要

第2章 方向符号による航空画像照合

本章では，基本方式である方向符号照合の定義を示し，見え方の変化を多く含む航空画像照合への適用性について述べる．また，ピラミッド探索の適用による処理の効率化について述べ，シーンとピラミッド生成方式の組合せによる上位ピラミッドレベルでの照合率の低下について，航空画像を用いた実験結果を基に示す．

2.1 方向符号照合

方向符号照合では各画素近傍の明度のこう配方向を，ある量子化角度で符号化して照合を行う [16]．本研究では，可視－赤外線画像間の照合等も考慮し，白黒反転したような場合の照合にも対応できるように 180 度異なる方向には同じ符号を付与している．ここでは一般的な Orientation Code (以下, OC) と区別し，Half Orientation Code (以下, HOC) と呼ぶことにする．

ここでは等方性オペレータ (図 2.1 (a)) により x 方向と y 方向のこう配強度 ∇I_x ， ∇I_y を求め，各画素におけるこう配角度 $\theta_{i,j}$ を算出する．量子化角度を $\Delta\theta$ とすると，HOC

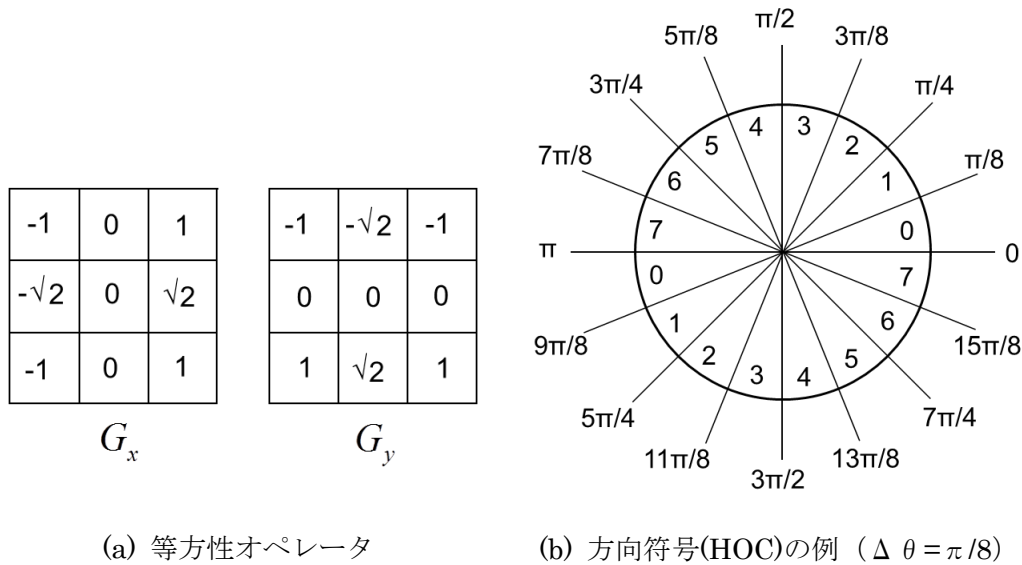


図 2.1 こう配算出オペレータと方向符号の定義

の $N (= \pi/\Delta\theta)$ 個の有効符号 ($0 \sim N-1$) と、1 個の無効符号 (N) は次式(2.1)のように定義される.

$$C_{i,j} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta_{i,j}}{\Delta\theta} \right\rfloor & (0 \leq \theta_{i,j} < \pi) \\ \left\lfloor \frac{\theta_{i,j} - \pi}{\Delta\theta} \right\rfloor & (\pi \leq \theta_{i,j} < 2\pi) \\ N & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq T \quad (2.1)$$

ここで T は事前に設定するよう配強度のしきい値で、コントラストの低い画素を区別し無効符号を付与するために用いる. 図 2.1 (b) に $\Delta\theta = \pi/8$ とした時の HOC の例を示す.

方向符号 a と b の残差絶対値 $d(a,b)$ は, 方向符号が巡回性を有することに留意すると, 式(2.2)のようになる. 照合のための相違度は, この残差絶対値の総和で表す. 参照画像とテンプレート画像を方向符号化したものをそれぞれ C_D , C_T とすると, 参照画像中の座標 (m,n) における相違度 $D_{m,n}$ の算出は式(2.3)で定義される.

$$d(a,b) = \begin{cases} \min\{|a-b|, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$D_{m,n} = \sum_{(i,j) \in C_T} d\{C_D(m+i, n+j), C_T(i,j)\} \quad (2.3)$$

2.2 航空画像照合への適用性

2.2.1 遮へいに対する頑健性

撮像時期の異なる航空画像は, 太陽光による影の変化, 町並みの変化, 季節による植生の変化, 自然災害による地形変化等の画像内容の部分的な変化領域を多く含んでいる. 航空画像照合では, そのような変化領域に影響されず頑健に照合できる手法が必要である. 方向符号照合は明度画像を, 巡回性を有する N 個の符号に変換することで, 画素間の差分を限定された小さな範囲内 ($0 \sim N/2$) の分布に抑圧しており, 無相関領

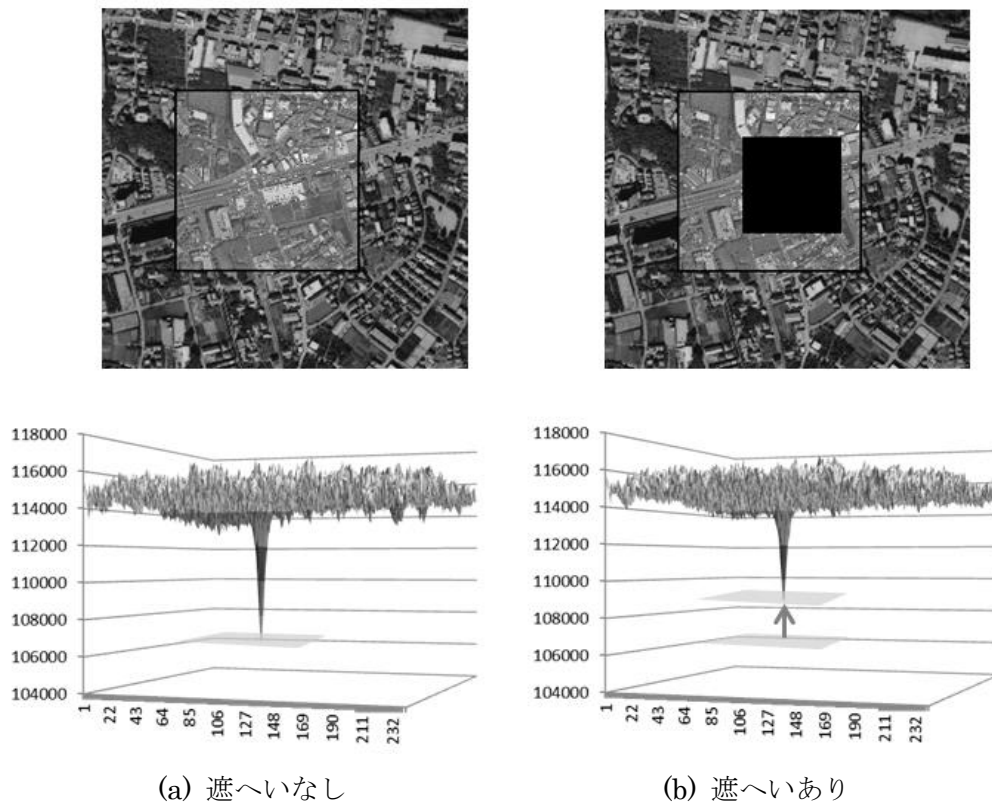


図 2.2 遮へいの有無による相違度のプロファイル（下段）の比較例

域ではその期待値は $N/4$ で一定と見なせる [16]. これにより, 正しい照合位置の画像に遮蔽や部分的な画像内容の変化等の影響を含む場合でも, 影響を受けていないその他の領域によって正しく照合することができる.

図 2.2 は, 遮へいの有無による照合結果への影響を相違度のプロファイルによって比較した例である. 上段の画像中, 黒枠で囲われた領域が入力画像であり, 撮影年度の異なるその周辺の画像上での照合位置に表示されている. 図 2.2 (b)では(a)に示した入力画像中の約 25%の領域を黒く塗りつぶし, 遮へいを模擬した入力画像を使用している.

照合結果はどちらの入力画像でも同一の正しい位置を算出している. 相違度のプロファイルでは, 遮へい領域がある(b)の場合でも最小値が多少増加しているが, (a)と同様に尖鋭なピークが出現し, 全体として照合結果に影響を及ぼしていないことが分かる. このような方向符号照合の性質は, 航空画像照合における技術課題に対して適用

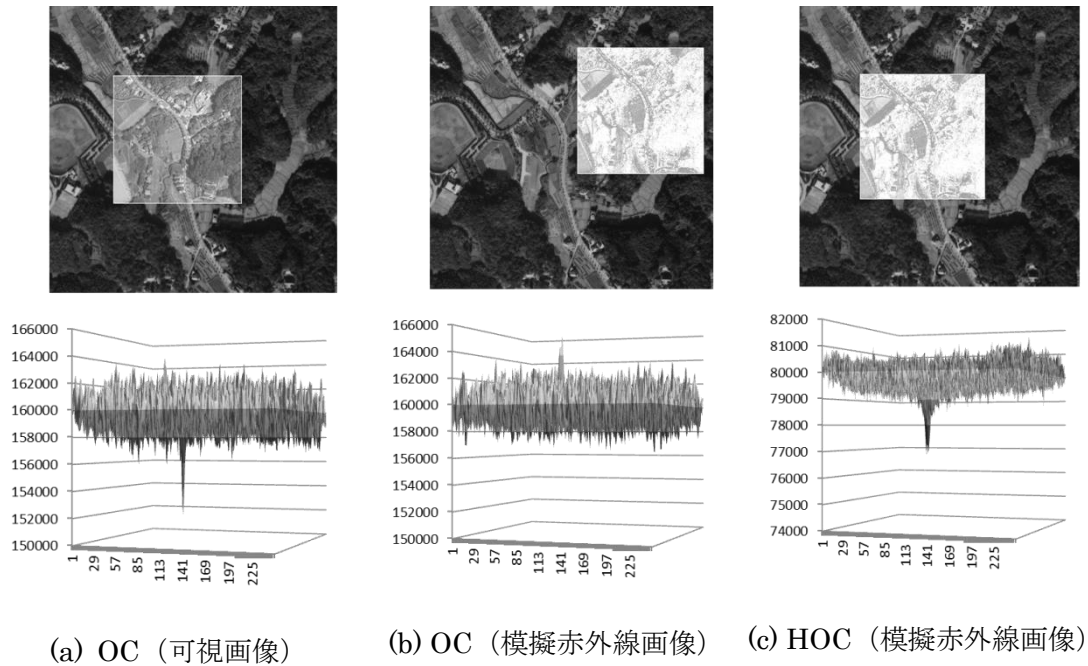


図 2.3 OC と HOC による照合結果比較例

性が高いと言える。

2.2.2 HOC による頑健性の向上

次に、航空画像照合では、データベース画像と入力画像の撮像センサが同一であるとは限らないため、可視画像-赤外線画像間の照合のように、異種画像間の照合にも対応できることが望ましい。一般的な OC では、隣接領域の明度関係が参照画像と入力画像で反転しているような場合、明度こう配の方向が逆になるため照合が難しい場合がある。このような場合を考慮し、2.1 で述べたように本研究では HOC を使用している。

ここでは HOC の効果を確認するため、赤外線模擬画像を使用した照合実験を行った。図 2.3 の(a)は撮影時期の異なる航空画像間の照合を OC で行った場合の照合結果と相違度のプロファイルである。開発による地形変化等を含んでいたが問題なく照合できていることが分かる。(b)は同じ入力画像から模擬赤外線画像を生成し、OC で照合を行った場合の結果と相違度のプロファイルである。(a)と比較すると、正解位置に相違度のピークが出現しておらず、照合位置を誤っていることが分かる。一方、(c)は(b)と

同じ模擬赤外線画像を使用して、HOC による照合を行った結果であるが、照合に失敗した OC の場合と異なり、(a)と同じ位置に正しく照合できていることが分かる。

2.2.3 回転・スケール変化への対応

航空機等からの撮影は常に一定の姿勢で行えるものではないため、過去の画像と照合を行うためには回転やスケール変化への対応も考慮する必要があるが、方向符号照合では画像内の全画素を照合に使用するため、単純に回転やスケール変化まで含む探索を行うと計算量が増加するという課題がある。しかし、航空機には通常、高度、磁気方位、姿勢角等の計測機器が搭載されており、それらの情報をもとに記録画像から照合用の画像データを生成すれば、探索範囲を限定することが可能であり、実用上問題ない範囲に計算量を抑制することができる。本論文では、以下、回転やスケールの変化を考慮しないことを前提として、単純な画像間の照合に焦点を絞る。

2.2.4 基本照合実験

ここでは実応用を想定し、実際にどの程度頑健に航空画像照合が可能か評価するため、撮影時期の異なる航空画像を用いて、方向符号照合と従来の照合方式である SSD(Sum of Squared Differences)、正規化相互相関(NCC: Normalized Cross-Correlation)との照合率の比較を行う。

実験には国土地理院の電子国土 Web システム [21]から配信された縮尺 9000 分の 1 の空中写真データベースを使用した。東京都内の市街地画像を人工物主体シーン、関東近郊の山間部の画像を自然物主体シーンとして、それぞれ 5 シーンずつ選択し、各シーンについて 2010 年頃撮影の画像と 1988~1990 年撮影の画像 (1920×960 画素)を、参照画像と入力画像生成用のペアとして用意した。図 2.4, 図 2.5 に全体 1920×960 画素から一部 640×480 を切り出した実験用画像のペアを示す。各ペアの撮影範囲は同一であり、入力画像生成用画像から画像サイズ 320×320 画素の画像を、左上の座標を指定して 228 枚切り出し、入力画像のセットとして使用した。この時指定した座標を入力画像に対する正解位置座標とする。同一地点の画像であっても多少の歪みが存在するため、照合位置座標が正解位置座標から 5 画素以内の場合を照合成功とし

て照合率を算出する（以降の実験結果の照合率も同様とする）。なお，全て 8bit の濃淡画像である。

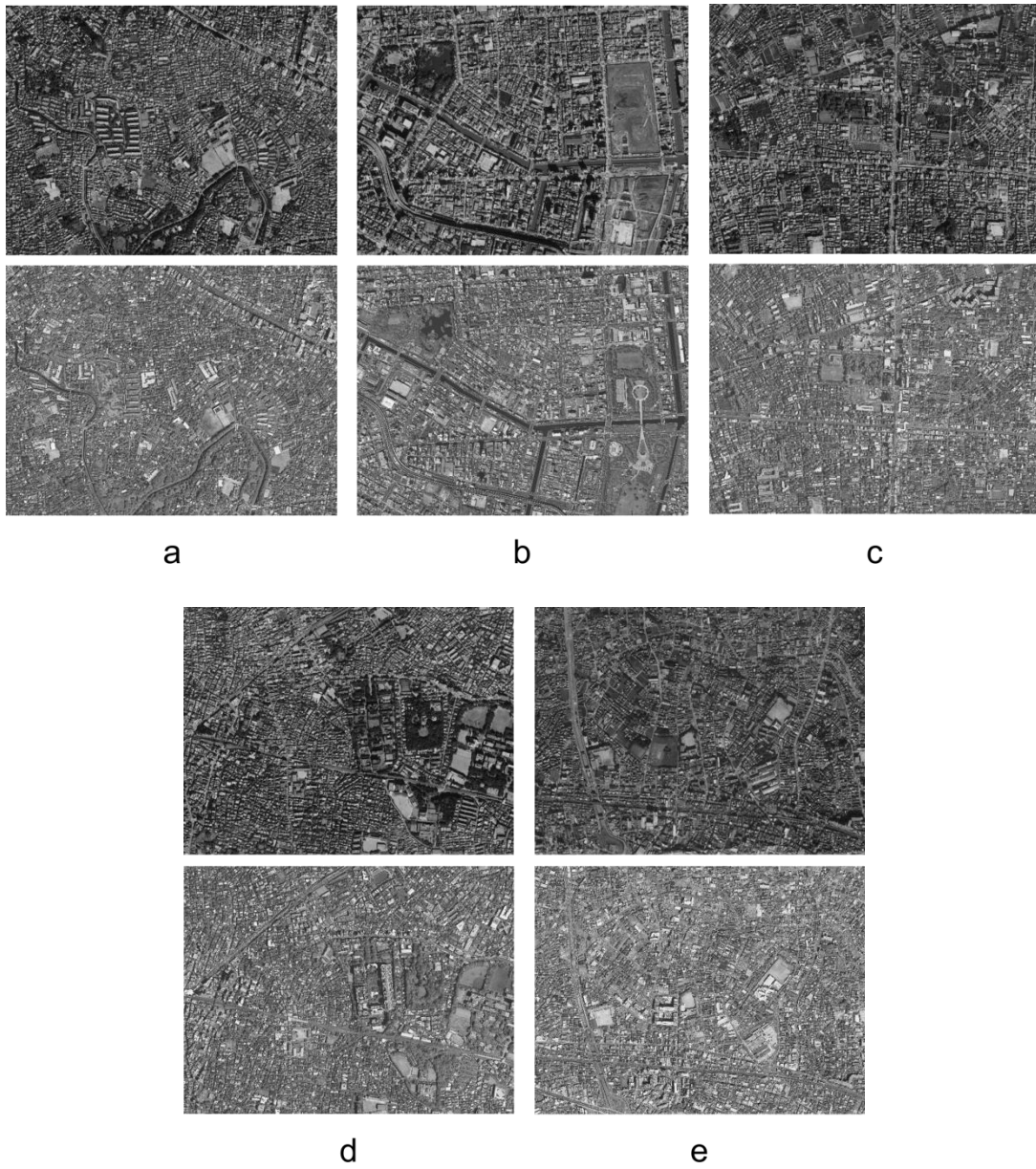


図 2.4 参照画像（上段）と入力画像生成用画像（下段）のペア
（人工物主体シーン）

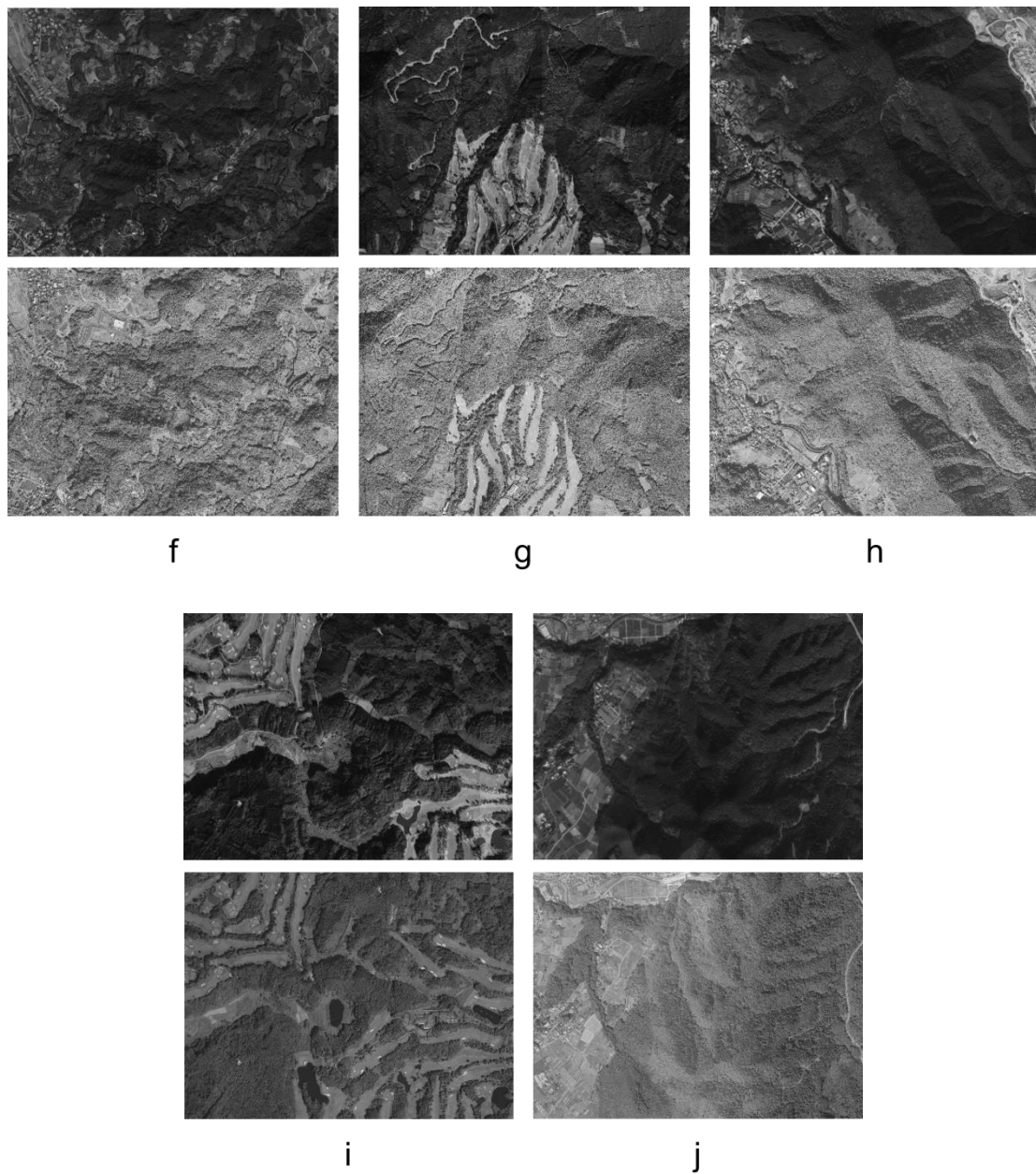
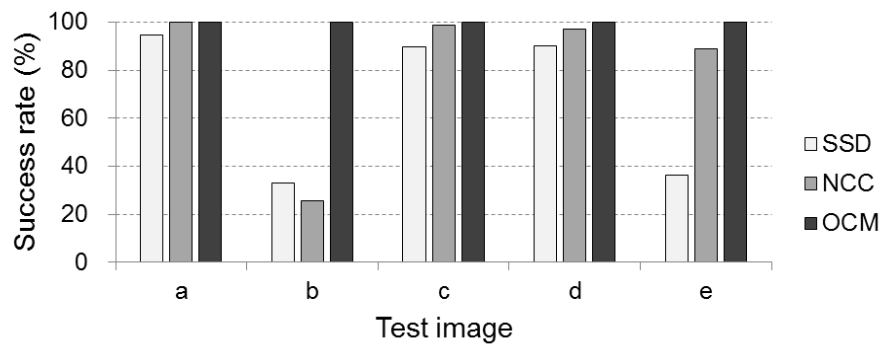
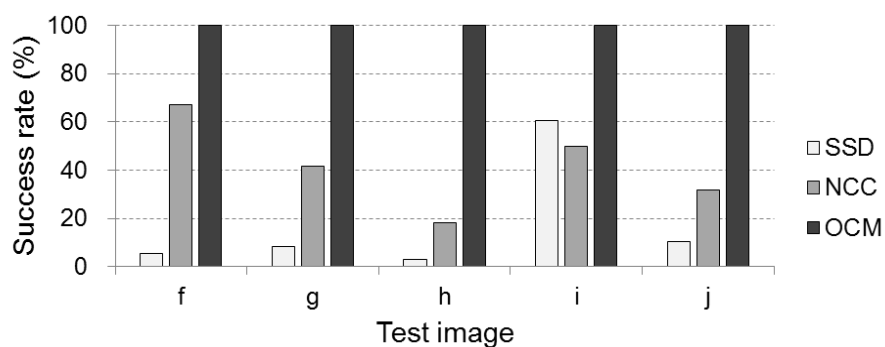


図 2.5 参照画像（上段）と入力画像生成用画像（下段）のペア
（自然物主体シーン）

SSD, 正規化相互相関 (NCC), 及び方向符合照合 (OCM) の各方式の照合率は図 2.6 のような結果となった. 全画像において方向符合照合の照合率は 100%と安定しているのに対し, SSD と正規化相互相関の照合率は画像によって大きく低下している. 各画像撮影時の正確な気象条件や明るさ, 太陽の位置等は不明であるが, 図 2.4、図 2.5 を見れば分かるように, 撮影時期の古い画像と新しい画像では, 建物の影の方向や全体の明るさ等が異なり, 街並みや地形の変化も一部で確認できる. 正規化相互相関では全体的な画像間の明度変化等には対応できるが, 部分的な変化領域を多く含む画像では照合が困難であることがこの結果からもわかる.



(a) 各方式の照合率比較 (人工物主体シーン)



(b) 各方式の照合率比較 (自然物主体シーン)

図 2.6 SSD, NCC, OCM による照合率比較

2.2.5 ピラミッド探索の適用と課題

従来方式と比べ、航空画像照合への適用性が高い方向符号照合であるが、高解像度で広範囲の航空画像を対象とした処理では計算コストが問題となる。テンプレートマッチングの高速化については従来多くの研究が行われており、類似度計算を途中で打ち切ることによって高速化を行う残差逐次検定法 (SSDA) [22]や、探索の過程で可能性の低い領域を自動的に求め類似度マップの作成を省略するアクティブ探索法 [23]、構造物等のエッジ情報に基づいたマッチングを行う Chamfer Matching [24]、元画像から多重解像度の画像を生成し、低解像度画像での照合結果を高解像度画像に順次伝搬することで計算量を低減するピラミッド探索処理 [19]等がある。

ピラミッド探索処理ではピラミッドレベル（多重解像度画像の階層）を調整することで、希望する画像サイズに落とし込むことが可能であり、実装も比較的容易である。将来的な回転やスケール変化への対応も考慮すると、高解像度の画像を扱う航空画像照合への適用性は高い。しかしピラミッド生成の過程で照合のための情報も消失するため、照合の頑健性と計算量の低減がトレードオフの関係となり、上位ピラミッドレベルにおいても図 2.6 で示したような方向符号照合の頑健性を維持できるかが課題となる。

ここでは図 2.7 に示すように単純に明度画像からガウシアンピラミッドを生成した後、それらの画像をそれぞれ方向符号化することで方向符号ピラミッドを生成し、ピラミッドレベルの上昇による照合率への影響を確認する。実験に使用する画像、実験条件は 2.2.4 と同様とする。元の画像サイズをピラミッドレベル 0 とし、ピラミッ

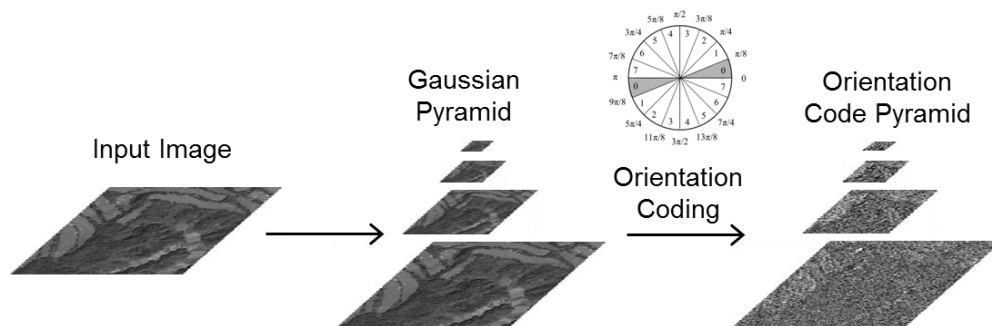
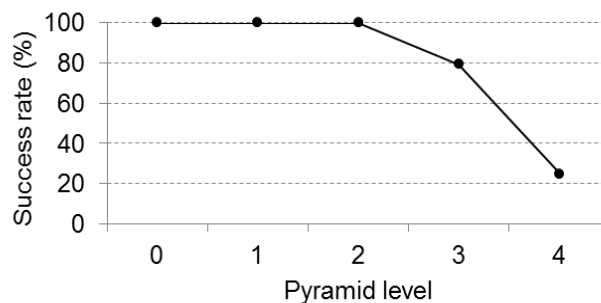


図 2.7 ガウシアンピラミッドからの方向符号ピラミッド生成

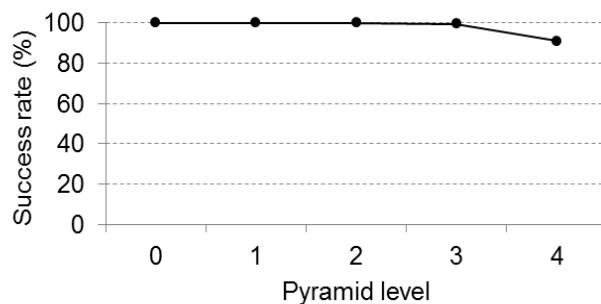
ドレベル 1, 2, 3, 4 (元画像サイズの 1/4, 1/16, 1/64, 1/256) の各レベルにおいて照合率を算出した。

図 2.8 に人工物主体シーンと自然物主体シーンの各 5 シーンの平均照合率を示す。縦軸が照合率、横軸がピラミッドレベルを表す。人工物主体シーンでは、ピラミッドレベル 3 から照合率が低下し、ピラミッドレベル 4 では約 25%まで低下しており、方向符号照合の頑健性が維持できていないことが分かる。一方の自然物主体シーン（図 2.8 (b)）ではピラミッドレベル 4 においても 90%以上の照合率を実現しており、高い頑健性を保っていることが分かる。

この結果が示すように、同一方式によって方向符号ピラミッドを生成しても、シーンの特徴によって上位レベルにおける照合の頑健性が大きく異なる。多様なシーンが混在する航空画像照合では、適切なシーンの分類と、各シーン種類に適した方向符号ピラミッド生成方式の適用が、上位ピラミッドレベルにおける照合の頑健性を維持するための課題となる。



(a) 人工物主体シーン



(b) 自然物主体シーン

図 2.8 ピラミッドレベルの上昇による照合率の変化

2.3 まとめ

本章では，基本方式である方向符号照合の定義を示し，部分的な見え方の変化を多く含む航空画像照合への適用性を示した．実際に撮影時期の異なる広域の航空画像を用いた基本照合実験により，正規化相互相関等の従来方式と比較して，方向符号照合の頑健性が高いことを示した．次に，ピラミッド探索の適用による処理の効率化について説明し，入力画像からガウシアンピラミッド画像を生成後に方向符号化する方式のみでは，シーンの種類によっては上位ピラミッドレベルでの照合率が大きく低下することを示した．

以降の章では，本章で述べた上位ピラミッドレベルでの照合率低下を回避するため，シーンの特徴を考慮した方向符号ピラミッドの生成を行うための新しい方式を提案する．

第3章 方向符号ピラミッド画像の適応的選択による航空画像照合

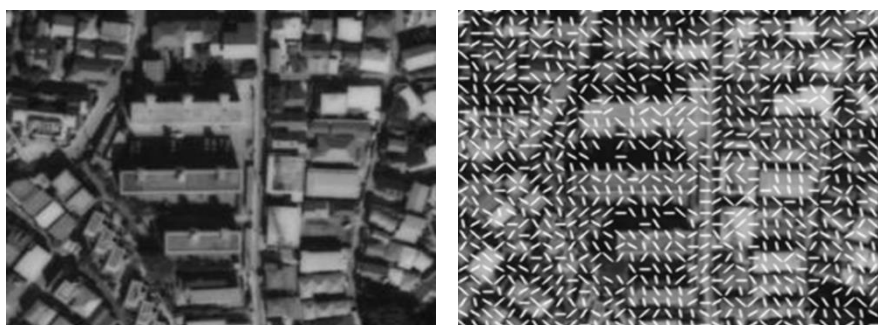
2章で述べたように、方向符号照合に単純にピラミッド探索処理を適用しただけでは、シーンによっては上位ピラミッドレベルでの照合が困難な場合があり、多様なシーンが混在する航空画像照合においては大きな課題となる。そこで本章では、航空画像のシーンが大きく人工物主体と自然物主体に分類されることに着目し、それぞれのシーンに適した生成方式による2種類の方向符号ピラミッドのうちの一つを適応的に選択することで、上位のピラミッドレベルにおける照合率の低下を回避する方式を提案する。

以下、3.1でシーンに応じた方向符号ピラミッド生成についての考え方を説明し、3.2で提案手法である方向符号ピラミッドの適応的選択処理の詳細について述べる。3.3、3.4にて市街地、山間部の航空画像を用いた評価実験とその結果について述べ、提案手法の有効性を示す。

3.1 シーンに応じたピラミッド画像生成

3.1.1 人工物主体シーン

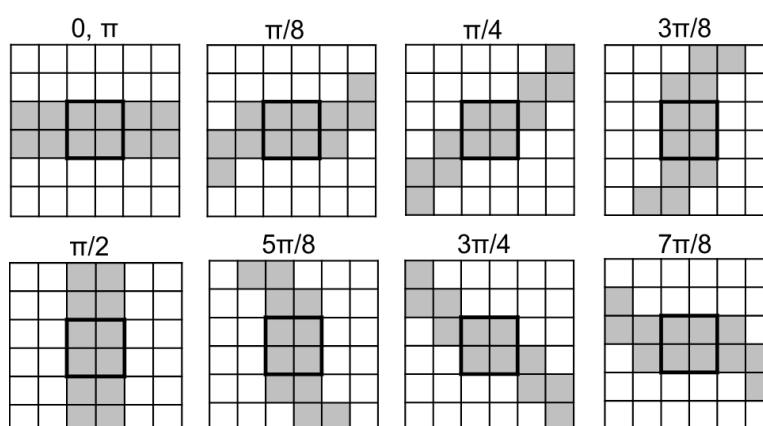
ビルや家屋等の人工物の直線構造情報に着目したピラミッド生成方式を説明する。文献 [20]では、サブサンプリング対象の4画素を中心とした周辺領域内で方向符号の分布を観察し、出現頻度の高い符号を優先するピラミッド生成方式を提案している。これは、人工物の構造情報の多くが局所的には直線情報となり、同一の方向符号の分布に置き換えられる特性を利用したものである。図 3.2 (b)に市街地の航空画像（図 3.2 (a)）から生成した方向符号を可視化した例を示す。



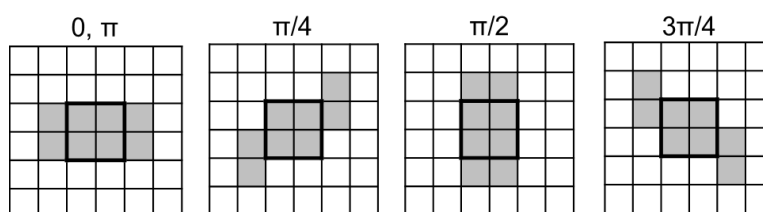
(a) 入力画像

(b) 方向符号を重畳表示した画像

図 3.2 市街地画像から生成した方向符号の例



(a) 詳細マスク (Fine MASK)



(b) 簡易マスク (Coarse MASK)

図 3.1 上位レベルの方向符号抽出のためのマスクパターン

本研究ではこの特性をさらに積極的に利用し，局所領域の設定に 8 方向，または 4 方向のエッジ方向に対応したマスクパターンを使用する．高解像度な画像では図 3.1 (a) のようなマスクパターンを，低解像度な画像では図 3.1 (b) のように簡略化したマスクパターンを使用する．このように直線構造情報を保存する方向符号ピラミッド

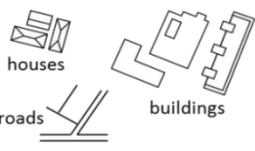
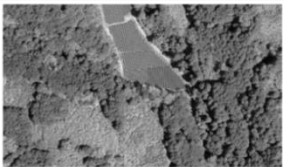
の生成方式を以下, Linear-Structure-Preserving (以下, LSP) 方式, LSP 方式で生成した HOC のピラミッドを LSP HOC ピラミッドと呼ぶことにする.

3.1.2 自然物主体シーン

自然物に対応したピラミッド生成方式について説明する. 山間部の航空画像等における森林領域等では, 人工物領域と比べて時間的不変性の高い明瞭な特徴が少なく, 多くは照合に寄与しない特徴となる. そのため, このような画像の照合では, 森林や河川等の輪郭情報のように, より大局的な特徴に注目した方が良い. そこで, 元の明度画像からガウシアンピラミッドを生成し, その画像に対して方向符号化を行う. ガウシアンフィルタが一種のローパスフィルタとして働くため, 大局的な輪郭情報は保ちながら, 細かい特徴を低減した上位ピラミッドへの圧縮を行うことができる.

このように自然物の輪郭情報等を抽出するため, ガウシアンフィルタを使用して方向符号ピラミッドを生成する方式を, 本論文では以下, ガウシアン方式と呼ぶことにする. また, ガウシアン方式で生成した HOC のピラミッドをガウシアン HOC ピラミッドと呼ぶことにする. ガウシアン方式では, 市街地の航空画像のように細かい直線構造情報が主体のシーンでは, 照合に必要な特徴がピラミッドの生成過程で消失し伝

表 3.1 人工物主体シーンと自然物主体シーンの比較

	Scenes predominated by artificial objects	Scenes predominated by natural features
Feature	Local linear features 	Gradual and complex contours 
Example		
Appropriate OC image pyramid	LSP HOC Pyramid	Gaussian HOC Pyramid

搬しないため、上位レベルでは照合できないことが多い [20] [25].

表 3.1 に人工物主体シーンと自然物主体シーンの特徴をまとめる.

3.2 方向符号ピラミッドの適応的選択

3.2.1 最上位レベルの照合結果による選択

撮影地点に関する事前情報がない場合、処理の開始時点で適切な方向符号ピラミッドを選択することは難しい. 機械学習等により入力画像をシーン分類する方法も考えられるが、計算量等の観点からも効率的でない.

提案手法では、LSP HOC ピラミッドとガウシアン HOC ピラミッドは生成方式が異なるが、どちらも方向符号という同じ情報に正規化されている点に着目した. 通常、異なる方式による画像照合結果について、その信頼度を同列に比較することは難しいが、方向符号照合という同じ枠組みの中であれば比較することが可能である. そこで、2種類の HOC ピラミッドを生成し、互いの最上位レベルにおける照合結果を比較することで信頼度を判定する手法を検討した.

3.2.2 照合信頼度の算出

ここで注意しなければならないのは、LSP HOC ピラミッドは局所的な直線情報を優先した方向符号の選択により生成されるため、階層を重ねるにつれ方向符号の分布に偏りが生じる点である. そのため明度画像から直接方向符号化されたガウシアン HOC ピラミッドとの間で、単純に相違度の最小値を比べるだけでは、上位レベルでの比較が正しくできるとは限らない.

そこで相違度の集合を平均0, 分散1に標準化した上で比較することとする. さらに、相違度の最小値が正しい照合位置を示したもののなか、バラツキによって偶然生じているのかを加味することで判断の精度を向上させる. 具体的には、極小値が N 点存在する時、最小相違度を $(N+1)$ 倍し、そこから N 点全ての極小値を順次引いていく. こうすることで、最小相違度と他の極小値との差が大きい場合、つまり急峻なピークが存在する場合に値が大きくなる.

以上を考慮し，最小相違度を D_{min} ，相違度の平均と標準偏差を $\bar{D}$ と S ，極小値を P_i ($1 \leq i \leq N$) とし，照合信頼度 E を次式で定義する．この値が大きいほど，照合が安定で信頼度が高い．

$$E = \frac{1}{NS} \left\{ \bar{D} + \sum_{i=1}^N P_i - (N+1)D_{min} \right\} \quad (3.1)$$

常に 2 種類の HOC ピラミッドを生成する必要があるが，方式判定のための冗長な探索処理は，データサイズが小さい最上位ピラミッドに限定されるため処理時間への影響は小さい．

3.2.3 提案手法の手順

提案手法の処理フローを図 3.3 に示し，以下，手順について説明する．

(a)LSP HOC ピラミッド生成

[Step 1: 方向符号化]

参照画像を F ，入力画像を T とする．2.1 で説明した方向符号化の手順により，参照画像と入力画像の方向符号画像 $C_F^{L_0}$ ， $C_T^{L_0}$ （右上の添字はピラミッド画像の種類（L: LSP HOC ピラミッド，G: ガウシアン HOC ピラミッド）と，ピラミッドレベルを表す）を生成する．

[Step 2: 方向符号ピラミッドの生成]

方向符号画像 $C_F^{L_0}$ ， $C_T^{L_0}$ を最下位のピラミッドレベルとし，3.1.1 で説明した画素選択の手法により， 2×2 の 4 画素から 1 画素を選択する間引きを繰り返し，上位レベルの画像 $C_F^{L_p}$ ， $C_T^{L_p}$ ($0 \leq p \leq h$) を順に生成する．3.3 で説明する今回の評価実験ではピラミッドの最上位レベル $h=4$ とし，ピラミッドレベル 0 では図 3.1 (a) の詳細マスク，ピラミッドレベル 1～3 では図 3.1 (b) の簡易マスクを，上位レベルの方向符号抽出のために使用した．

[Step 3: 方向符号照合（最上位レベル）]

最上位の方向符号画像 $C_F^{L_h}$ と $C_T^{L_h}$ の間で全探索の方向符号照合を行い，照合位置座標

X^{L_h} と最小相違度 $D_{min}^{L_h}$ を算出する．同時に照合信頼度算出のため，全相違度の平均値 $\overline{D^{L_h}}$ と標準偏差 S^{L_h} ，全極小値 $P_i^{L_h}(1 \leq i \leq N^{L_h})$ も算出する．極小値点の判断は8近傍との比較により行う．

[Step 4:照合信頼度の算出]

(3.1) 式により，照合信頼度 E^{L_h} を算出する．

(b)ガウシアン HOC ピラミッド生成

[Step 1:ガウシアンピラミッドの生成]

参照画像 F，入力画像 T を入力とし，レベル 0 から h までのガウシアンピラミッド画像を生成する．

[Step 2:方向符号ピラミッドの生成]

Step1 で生成したガウシアンピラミッド画像から，各レベルの画像ごとにマスク方式の Step1 と同様に方向符号化を行い，HOC ピラミッド $C_F^{G_p}, C_T^{G_p}(0 \leq p \leq h)$ を生成する．

[Step 3]，[Step 4]

LSP HOC ピラミッドと同様に，最上位レベルでの方向符号照合結果により，照合位置座標 X^{G_h} ，最小相違度 $D_{min}^{G_h}$ ，全相違度の平均値 $\overline{D^{G_h}}$ ，標準偏差 S^{G_h} ，全極小値 $P_i^{G_h}(1 \leq i \leq N^{G_h})$ を算出し，照合信頼度 E^{G_h} を算出する．

(c)適応的選択処理とピラミッド探索

[Step5:OC ピラミッド選択判定]

E^{L_h} と E^{G_h} を比較し，値の大きい方の HOC ピラミッドを選択する．

[Step6:ピラミッド探索]

例えば， E^{L_h} の方が大きい場合，HOC ピラミッド $C_F^{L_p}, C_T^{L_p}$ においてピラミッド探索を行う．最上位で算出した照合位置座標 X^{M_h} を一つ下位のレベルにおける位置座標に変換し，範囲を限定（本実験では ± 5 画素）して探索を行い，その照合位置座標を元に同様の探索を最下位の画像まで繰り返し，最終的な照合位置座標とする．

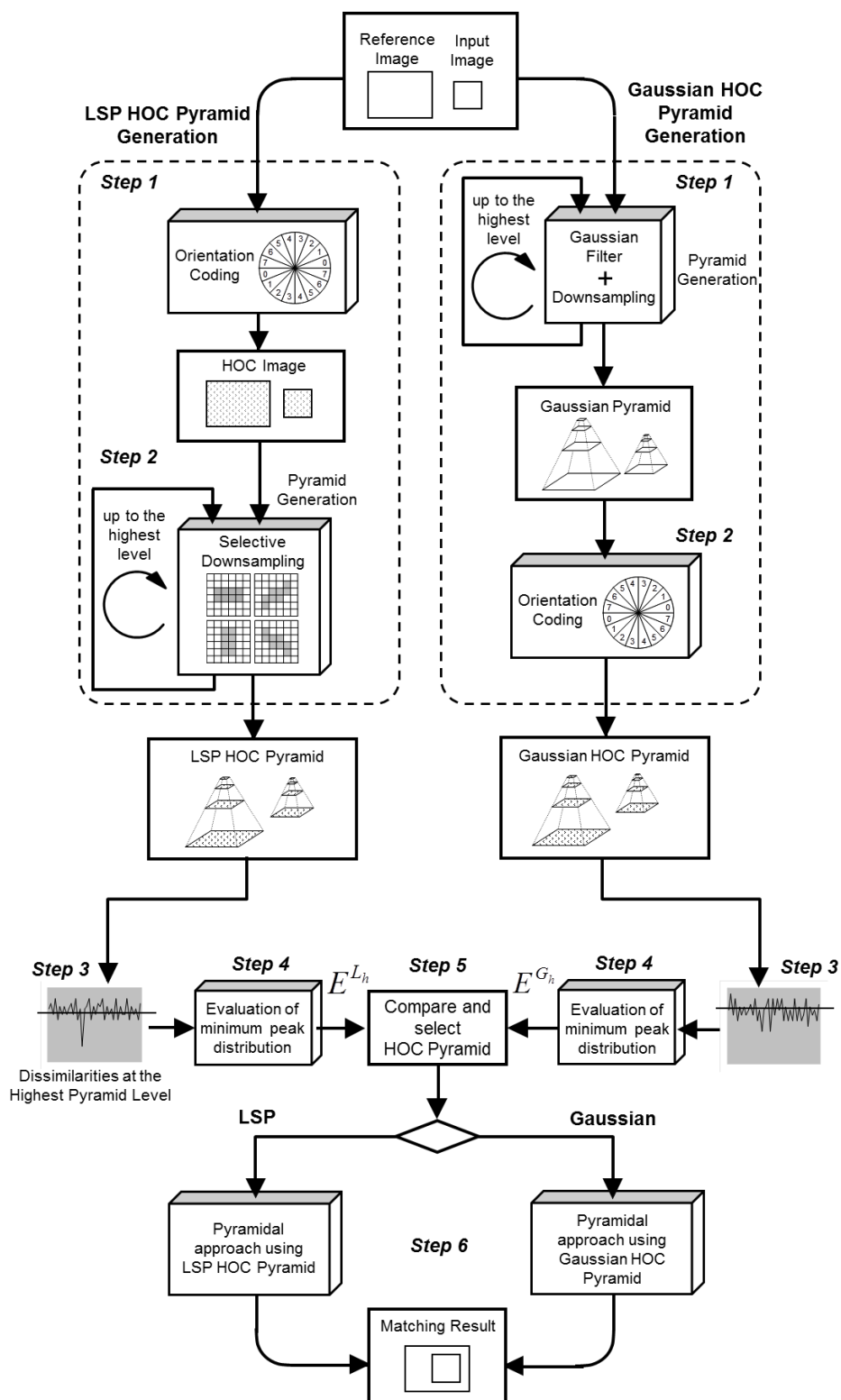


図 3.3 提案手法の処理フロー

3.3 評価実験

ここでは提案手法の有効性を評価するために行った実験とその結果及び考察を示す。

3.3.1 実験に使用した画像

実験には2.2.4で使用した画像と同じ、国土地理院の縮尺 9000 分の 1 の空中写真データベースを使用し、人工物主体シーンとして東京都内の市街地画像を、自然物主体シーンとして関東近郊の山間部の画像をそれぞれ 5 シーンずつ使用した。各シーンについて 2010 年頃撮影の画像と 1988～1990 年撮影の画像を取得し、異なる撮影時期のペアとした。画像サイズは 1920×960 である。(図 2.4, 図 2.5)

入力画像についても2.2.4と同様に、入力画像生成用画像から画像サイズ 320×320 画素の画像を、左上の座標を指定して 228 枚切り出し、使用した。この時指定した座標を入力画像に対する正解位置座標とし、照合位置座標が正解位置座標から 5 画素以内の場合を照合成功として照合率を算出する点も同様である。

3.3.2 実験概要

本実験は、提案手法により方向符合照合の頑健性を維持しつつ、ピラミッド探索の階層を深くし効率的な照合が可能かどうかを検証する実験となる。各シーンについて、LSP HOC ピラミッド単独、ガウシアン HOC ピラミッド単独、提案手法である適応的選択処理の 3 種類で、ピラミッドレベルを 0 から 4 まで変化させた場合の照合率の変化を比較した。

3.4 実験結果と考察

照合率と処理時間それぞれの観点から実験結果と考察を述べる。処理時間計測に使用した PC は、OS が Windows7(64bit)、CPU が Intel Core i7 950 (3.07GHz)、搭載メモリが 6GB である。

3.4.1 照合率

図 3.4 に人工物主体 5 シーンの照合率, 図 3.5 に自然物主体 5 シーンの照合率を示す. この結果から分かるように, 人工物主体シーンでは LSP HOC ピラミッドに比べガウシアン HOC ピラミッドの照合率がピラミッドレベル 3 以降で大きく低下している. LSP HOC ピラミッドと提案手法ではピラミッドレベル 3 まではほぼ 100% の照合率を維持し, ピラミッドレベル 4 での照合率低下も, ガウシアン HOC ピラミッドと比べ, かなり小さく抑えられている.

自然物主体シーンでは逆に, LSP HOC ピラミッドの照合率がピラミッドレベルが深くなるにつれて大きく低下しているが, ガウシアン HOC ピラミッドと提案手法ではピラミッドレベル 3 まではほぼ 100% の照合率を維持し, ピラミッドレベル 4 でも, 画像 f, g, h ではほとんど照合率低下が見られないなど, 高い照合率を維持している.

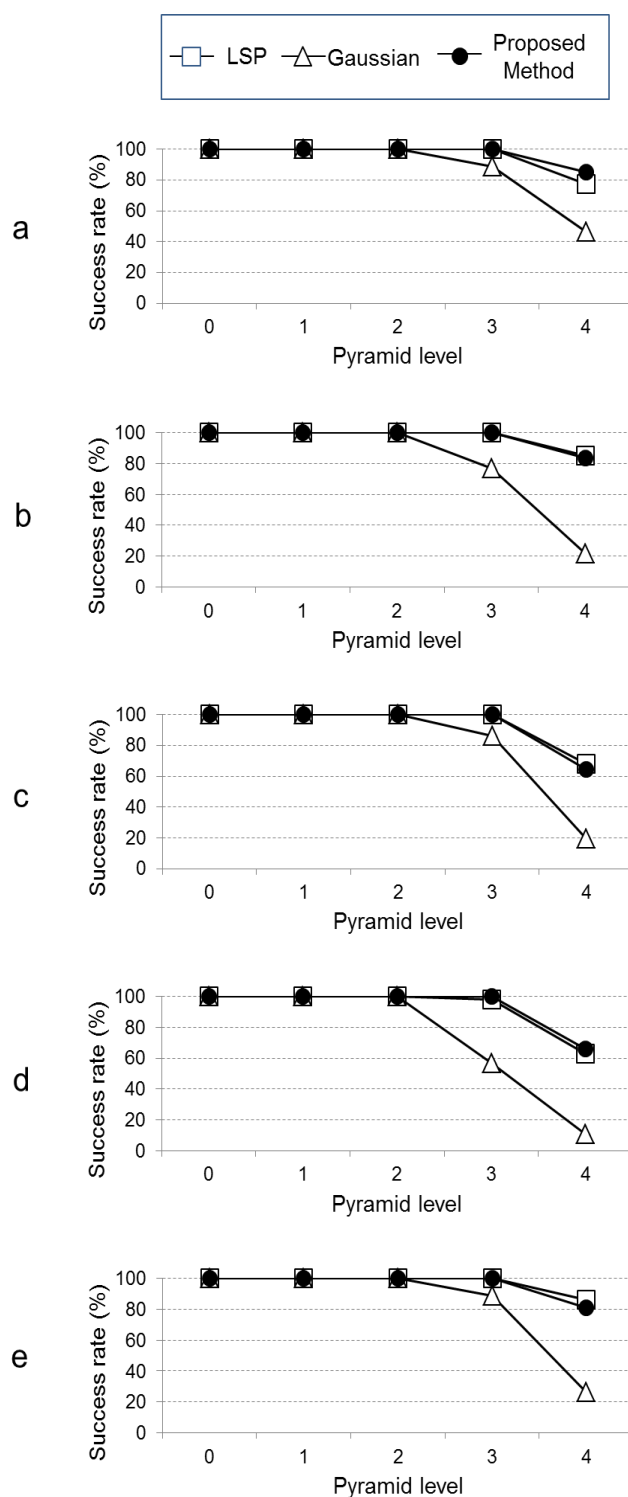


図 3.4 実験結果 (人工物主体シーンの照合率)

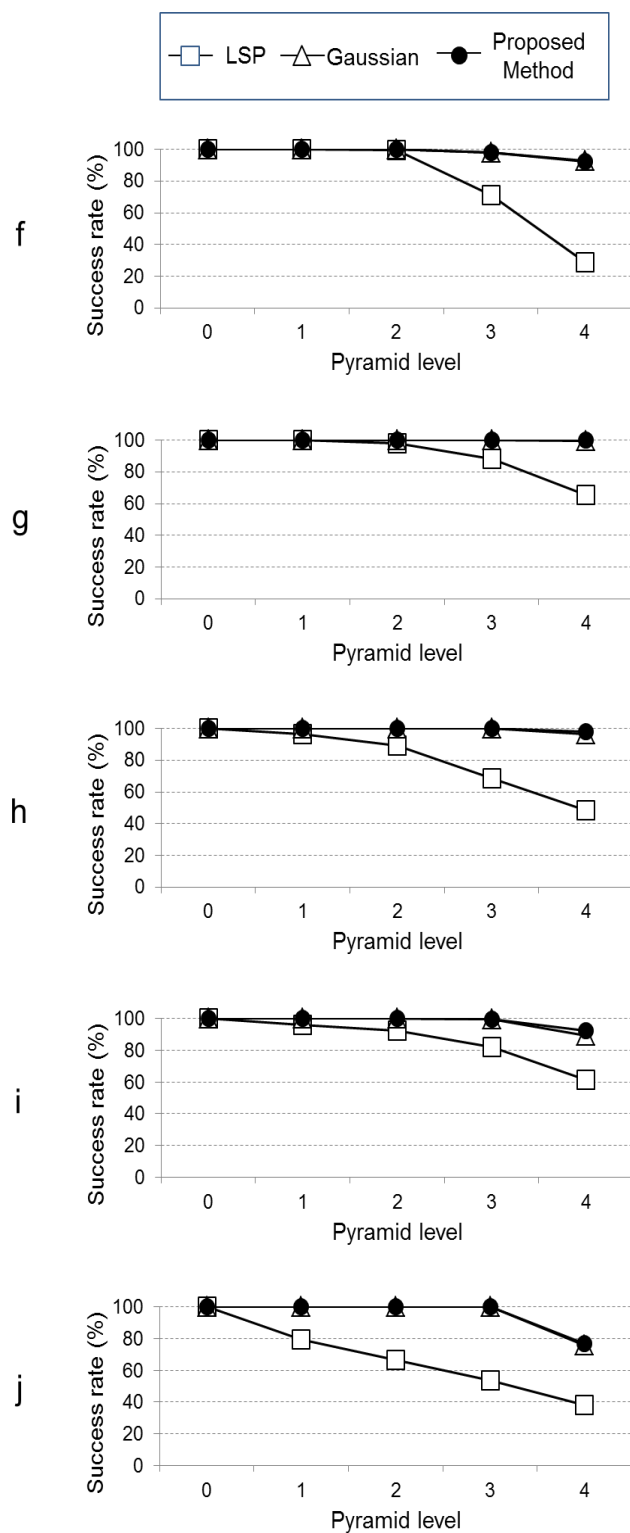


図 3.5 実験結果（自然物主体シーンの照合率）

3.4.2 照合信頼度による方向符号ピラミッド選択

図 3.6 に、提案手法で選択された HOC ピラミッドの構成比を示す。シーン間のばらつきはあるものの、人工物主体シーンでは高い割合で LSP HOC ピラミッドが選択され、一方の自然物主体シーンでは全ての画像においてガウシアン HOC ピラミッドが高い割合で選択されていることが分かる。

以上の実験の結果から、最上位ピラミッドレベルにおける方向符号照合結果に基づいた照合信頼度の比較により、方向符号ピラミッドの適応的選択処理が有効に機能することが分かる。またその結果、シーンによる上位ピラミッドレベルでの照合率低下を効果的に防いでいることが確認できる。

3.4.3 処理時間

元の画像サイズ（ピラミッドレベル 0）で方向符合照合を行うと、1 枚の入力画像に対して、入力画像の読み込みから探索結果の表示まで 900 秒以上を要する。一方、レベル 4 までのピラミッド探索処理を適用した場合、LSP HOC ピラミッド単独では約 1.23 秒(最適化未実施)、ガウシアン HOC ピラミッド単独では約 0.51 秒(OpenCV [26] で最適化済み)、提案手法では約 1.59 秒と、大幅に処理時間が短縮できている。提案手法では、2 種類のピラミッド画像生成と、相違度による方向符号ピラミッド選択処理の

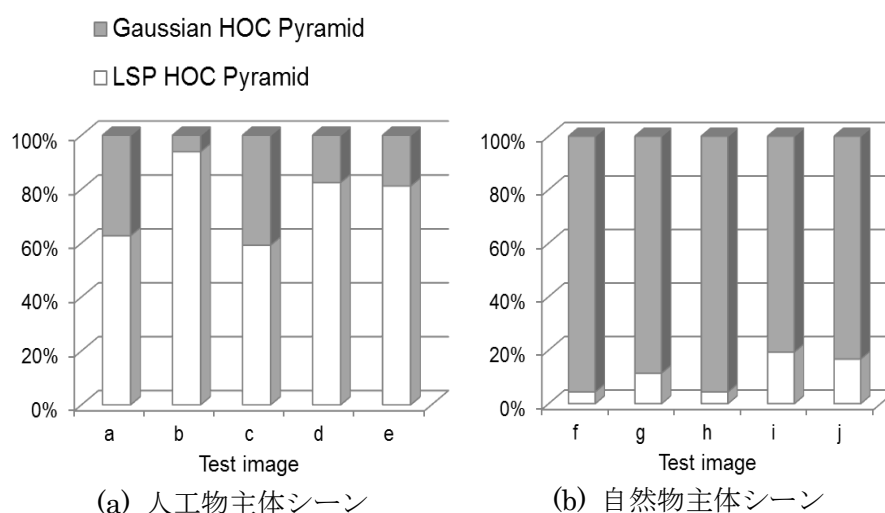


図 3.6 選択された HOC ピラミッドの構成比

時間を余分に要するが，探索処理に比べてピラミッド生成に要する時間は実測値としてかなり小さい．ピラミッドの階層が増えるにつれ，最上位レベルにおける探索時間は大幅に減少するため，提案手法の処理時間は実用上問題ない程度に抑えることができる．

3.5 まとめ

本章では，頑健で効率的な航空画像照合の手法として，人工物主体と自然物主体の各シーンを想定した 2 種類の方向符号ピラミッドからシーンごとに一方を選択してピラミッド探索を行う手法を提案した．提案手法の特徴は，各方向符号ピラミッドの最上位レベルでの方向符号照合結果に基づいて照合信頼度を算出し，適応的に選択する点にある．単独の方向符号ピラミッドでは避けられなかったシーンによる照合率の極端な低下を，提案手法により改善できることを，市街地と山間部の航空画像を用いた実験により示した．

第4章 画像特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理

第3章では、入力画像のシーンに合わせて2種類の方向符号ピラミッドから一方を選択し、ピラミッド探索を行う手法を提案した。しかし異なる特徴が複雑に混在する実環境のシーンでは入力画像単位での切り分けが困難である場合も多く、理想的には画素ごとに適した方式を割り当てることが望ましい。

そこで本章では、方向符号照合の照合率を低下させずにピラミッドを生成するために、局所領域内の方向符号の分布に基づく人工物らしさの尺度を用いて、入力画像を人工物領域とそれ以外の自然物領域等到大別し、それぞれ異なるピラミッド生成方式を割り当てる適応型の方式を提案する。

以下、4.2において方向符号に基づく領域分割の方法について説明し、4.3で提案手法である画像特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理の実装方法について述べる。4.4にて航空画像を用いた評価実験とその結果について述べ、提案手法の有効性を示す。

4.1 方向符号に基づく領域分割

4.1.1 QOCによる人工物判別

本論文で扱う方向符号の定義については2.1で説明したとおりである。本章では、後述する人工物らしさの尺度生成のためと、将来的な回転探索等への拡張性を持たせるため、量子化幅 $\Delta\theta = \pi/180$ と高分解能な符号化を行う。その場合のOCとHOCの概念図を図4.1(a), (b)に示す。またこの場合のLSP方式の画素選択方法は、図4.2に示すように、対象4画素それぞれについて他の画素の符号との差分値を、全マスクパターンについてスコア化し、合計スコアが最も小さい符号を選択することで行う。

3.1.1で述べたとおり、局所領域内の方向符号の出現頻度に偏りが生じる場合、直

線構造情報が含まれている可能性が高いと判断できる．しかし，画像内の構造物の大きさは様々であるため，特に，市街地の航空画像のように，構造物が密集する複雑な画像では適切な局所領域のサイズ設定は難しい．

そこで多くの人工物が矩形情報で構成される点に着目した．当然，視点と対象物の位置関係によって画像上での見え方は変化するが，航空画像は基本的に地平面に対して鉛直方向に撮影され，画像上のビルや家屋等の人工物は矩形情報となる．そのような画像において，同一矩形の各辺を同じ情報として扱うことで，局所領域内に含まれる構造情報が矩形の一部であるか全体であるかに関わらず，ヒストグラム上の同一点付近にピークを出現させることができる．これは HOC の定義において 90 度の位相差を持つ符号同士を同一と見なすことに等しい．符号の定義範囲が 0 度から 90 度と OC の 4 分の 1 となることから，これを，Quarter Orientation Code (以下，QOC) (図 4.1 (c))と呼ぶ．

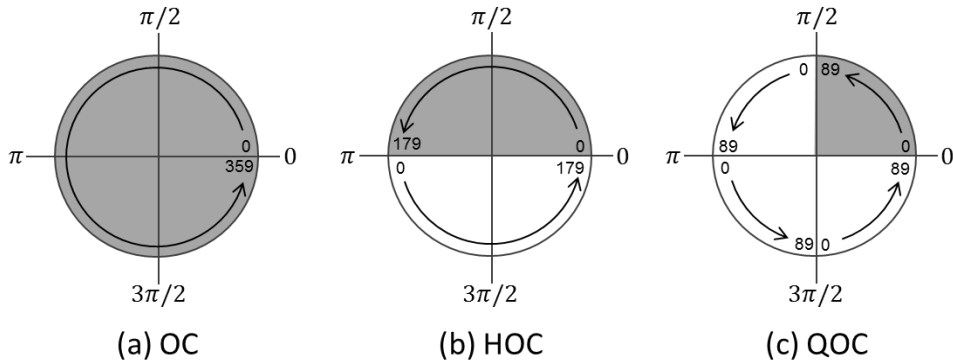


図 4.1 OC, HOC, QOC の概念図 ($\Delta \theta = \pi/180$)

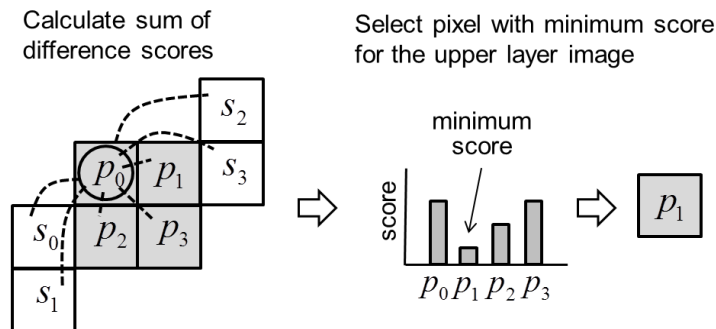


図 4.2 差分スコアによる画素選択方法

図 4.3 を用いて具体的な例を示す. 画像中のシーン一帯が同じ方向に沿って整備された市街地の航空画像 (240×240 画素) (図 4.3 (a)) 中の同一サイズ (32×32 画素) の局所領域 A, B, C について, 図 4.3 (b) に OC, HOC, QOC のヒストグラムをそれぞれ示す. ヒストグラムは無効符号を除き有効符号数で正規化してある. 領域 A 内にはビルの一辺が含まれており, OC, HOC, QOC 共にヒストグラム上では該当する方向に一つのピークが出現している. しかし, 領域 B 内にはビル全体が, 領域 C 内にはより小さな家屋が複数含まれているため, OC, HOC のヒストグラムには複数のピークが現れている. 同じ市街地領域の中で場所ごとにこのような差異が現れることは, 人工物らしさを判断する上で望ましくない. 一方, QOC のヒストグラムは領域 A, B, C のいずれのヒストグラムでも同一点付近に同程度のピークが一つ出現しているため, 領域分割のための特徴として扱いやすい. このように, 人工物らしさの尺度として QOC が, OC, HOC より有効であることが分かる.

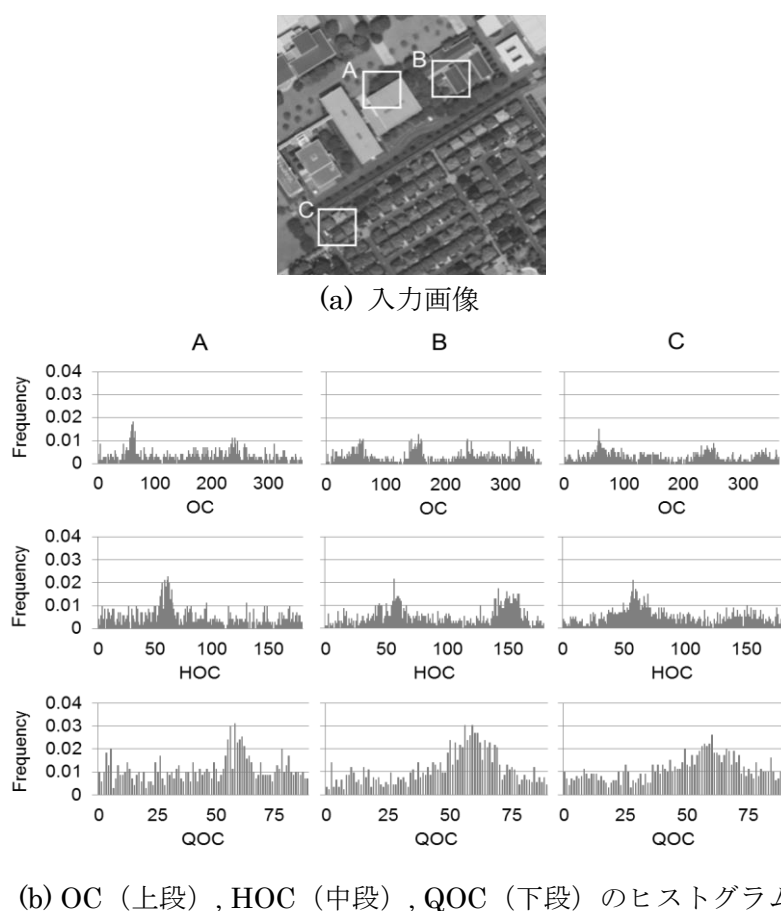


図 4.3 OC, HOC, QOC のヒストグラム比較

4.1.2 QOC のベクトル表現

QOC ヒストグラムにより人工物らしさを判定できることを前項で述べた．しかし画像の全領域に対し局所領域サイズ内の方向符号ヒストグラムを逐一生成するのは計算量の点から効率的とは言えない．ここでは人工物らしさを定量的な尺度として算出するため QOC をベクトル表現に変換し，その積算ベクトルのノルムによる判定方法を提案する．

QOC をベクトル化したものを QO ベクトル $\mathbf{q}$ とし，原点 o を中心とした半径 r の円周上の点の位置ベクトルとして定義する．QOC を $k(k=0,1,\dots,89)$ とすると，QOC が巡回性を有する符号であることを考慮し， k を 4 倍した値を x 軸からの角度として円周上の位置を定める（図 4.4）．このベクトルを指定の領域内で積算し，そのノルムの値から方向符号の分布の偏りを判断する．積算ベクトルのノルムの計算は，QO ベクトルを x 成分 q_x ， y 成分 q_y に分割して扱うことで，Integral Image [27]を用いた高速な演算を行うことが可能である．ただ，無効符号は有効符号と同列に扱うことができないため，QO ベクトルを次式のように三次元に拡張し， z 成分の値として表現する．

具体的には，QOC が有効符号である場合は q_z を 0，無効符号である場合は， q_x と q_y を 0 とし， q_z には人工物らしさの判定に使用するノルムのしきい値を割り当てる．

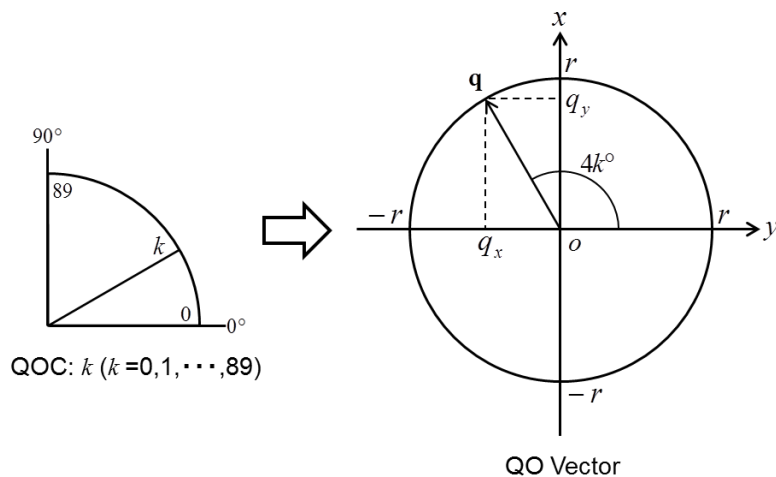


図 4.4 QO ベクトル表現

局所領域 R のサイズを $M \times M$ 画素とすると、人工物らしさの尺度 A は次式で算出される。

$$A = \frac{1}{M^2} \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2}$$

$$\text{ただし, } Q_x = \sum_{(i,j) \in R} q_x(i,j),$$

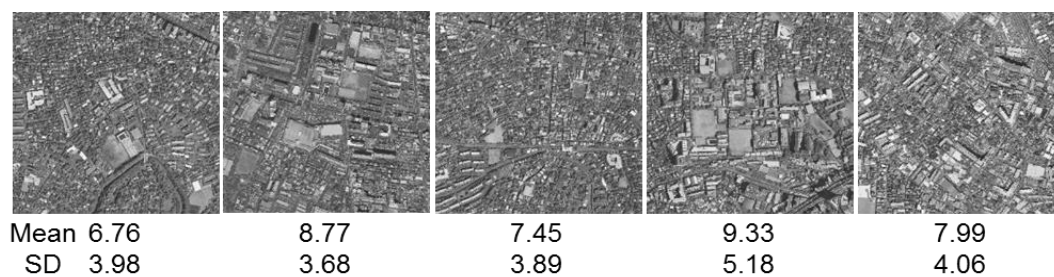
$$Q_y = \sum_{(i,j) \in R} q_y(i,j),$$

$$Q_z = \sum_{(i,j) \in R} q_z(i,j)$$
(4.1)

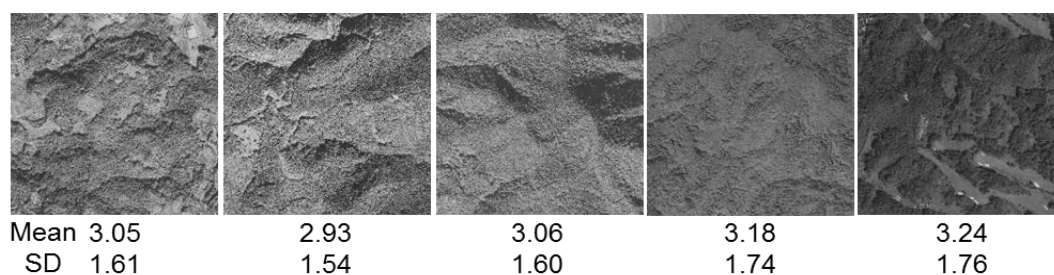
このようにして算出した人工物らしさの尺度をしきい値処理により 2 値化し、人工物らしさのマッパ (Degree of Artificial Structure Map) として使用する。これを本論文では以下、DAS マッパと呼ぶ。

画像サイズ 320×320 画素の市街地と山間部のサンプル画像を用いて、 QO ベクトルを定義する図 4.4 の円周の半径 $r=100$ 、局所領域のサイズを $M=32$ とした場合の人工物らしさ A の平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) を図 4.5 示す。図 4.5 (b) の山間部の画像では平均値が 3.0 近傍に集中しているのに対し、図 4.5 (a) の市街地画像ではより大きい平均値となっている。

実際に住宅や道路等の人工物領域と森林の混在する航空画像を用いた領域分割の例を図 4.6 に示す。しきい値 (=5.0) 処理により 2 値化すると、大きく人工物領域と自然物領域に分割されることが分かる。



(a) 市街地エリアの航空画像



(b) 山間部エリアの航空画像

図 4.5 市街地と山間部画像の QO ベクトルノルムの比較例
(平均値と標準偏差)

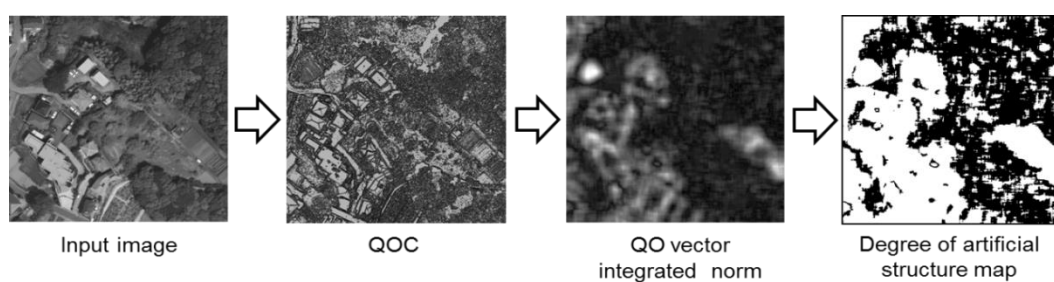


図 4.6 QO ベクトルのノルムによる人工物らしさ判定

4.2 提案手法の処理フロー

提案手法である適応型方向符号ピラミッド探索処理の流れを図 4.7 を用いて説明する。ここでは、航空機等から撮影した画像（以下、入力画像）について、その付近の過去画像（以下、参照画像）上での照合位置を探索する処理を想定している。照合位置の探索は入力画像を参照画像上で走査させ、参照画像の各位置における相違度を算出し、最小の相違度となる位置を求めることで行う。参照画像中には入力画像と同じ領域が必ず含まれ、画像のスケール、方位は同一とする。

はじめに、入力画像、参照画像それぞれについて目的のピラミッドレベルまで LSP HOC ピラミッドとガウシアン HOC ピラミッドの 2 種類の方向符号ピラミッドを生成する。同時に、4.1.2 で説明した方法で、入力画像の QOC から QO ベクトルの積算ノルムを算出し、目的のレベルまでガウシアンピラミッドを生成する。それをしきい値処理により 2 値化することで DAS マップピラミッドを生成する。

次に、生成した各ピラミッドを用いて、最上位レベルの画像から順に照合位置の探索を開始する。まず各ピラミッドから処理対象レベルの画像を選択する。次に、入力画像に対し、DAS マップを制御信号として、人工物判定領域には LSP HOC ピラミッドの画像を、それ以外の領域にはガウシアン HOC ピラミッドの画像を割り当て、混合 HOC 画像を生成する。参照画像の LSP HOC ピラミッドの画像、ガウシアン HOC ピラミッドの画像からは、入力画像走査時の各位置における比較対象領域を部分画像として切り出し、入力画像と同様に DAS マップを制御信号として、混合 HOC 画像を生成する。

このように生成した入力画像と参照画像（部分画像）の混合 HOC 画像間の相違度を式(2.2)、(2.3)によって算出し、相違度が最小となる参照画像上の位置をそのピラミッドレベルにおける照合位置とする。

最上位レベルのみ参照画像の全領域を探索するが、次レベル以降では、算出した照合位置を 1 段下位のピラミッドレベルの座標に変換し、その周辺（本論文の実験では ± 3 画素）に探索範囲を限定することができる。これをレベル 0（元画像）まで繰り返す、最終的な照合位置を決定する。

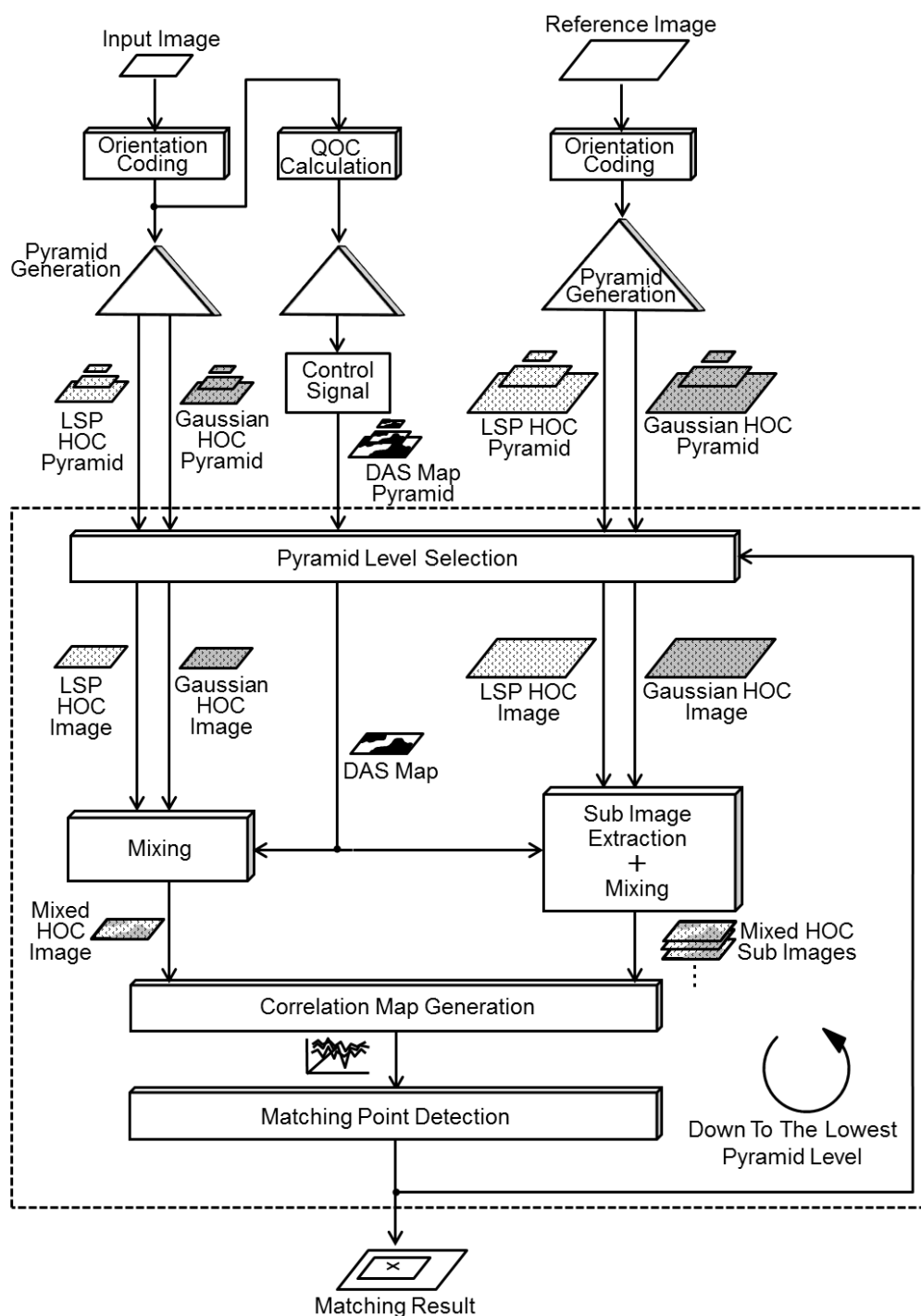


図 4.7 提案手法の処理フロー

4.3 評価実験

ここでは提案手法の有効性を評価するために行った航空画像照合の実験とその結果、及び考察を示す。

4.3.1 実験概要

実験には国土地理院の電子国土 Web システム [21]から配信された縮尺 9000 分の 1 の空中写真データベースを使用した。住宅、ゴルフ場、耕作地等の人工物領域と森林や河川等の自然物領域が混在する四つのシーンを選び、各シーンについて 2010 年頃撮影の画像と 1988～1990 年撮影の画像（ 1920×960 画素）を、参照画像と入力画像生成用画像のペアとして用意した。図 4.8 上段と中段に示すとおり、各ペアの撮影範囲は同一である。入力画像生成用画像から画像サイズ 320×320 画素の画像を、左上の座標を指定して 200 枚切り出し、入力画像として使用した。この時指定した座標を各入力画像に対する正解位置座標とする。図 4.8 (a) 中段画像中に白枠で入力画像サイズを示す。なお、全て 8bit の濃淡画像である。

LSP HOC ピラミッド単独、ガウシアン HOC ピラミッド単独、提案方式である適応型 HOC ピラミッドの 3 種類の方向符号ピラミッド探索と、明度情報に基づく従来手法としてガウシアンピラミッドを用いた正規化相互相関 (ZNCC) によるピラミッド探索の四種類の比較を行った。ピラミッドレベルは 0 から 4 まで変化させ、参照画像上での入力画像の照合位置を求め、その左上座標と正解位置座標のユークリッド距離が 5 画素以内の場合を照合成功として照合率を算出した。本実験では提案手法で使用する局所領域のサイズを 32×32 画素とした。DAS マップ生成時のしきい値は、実験用画像の一部をサンプルとして照合率を算出し、照合率が最大となった 6.0 を使用した。

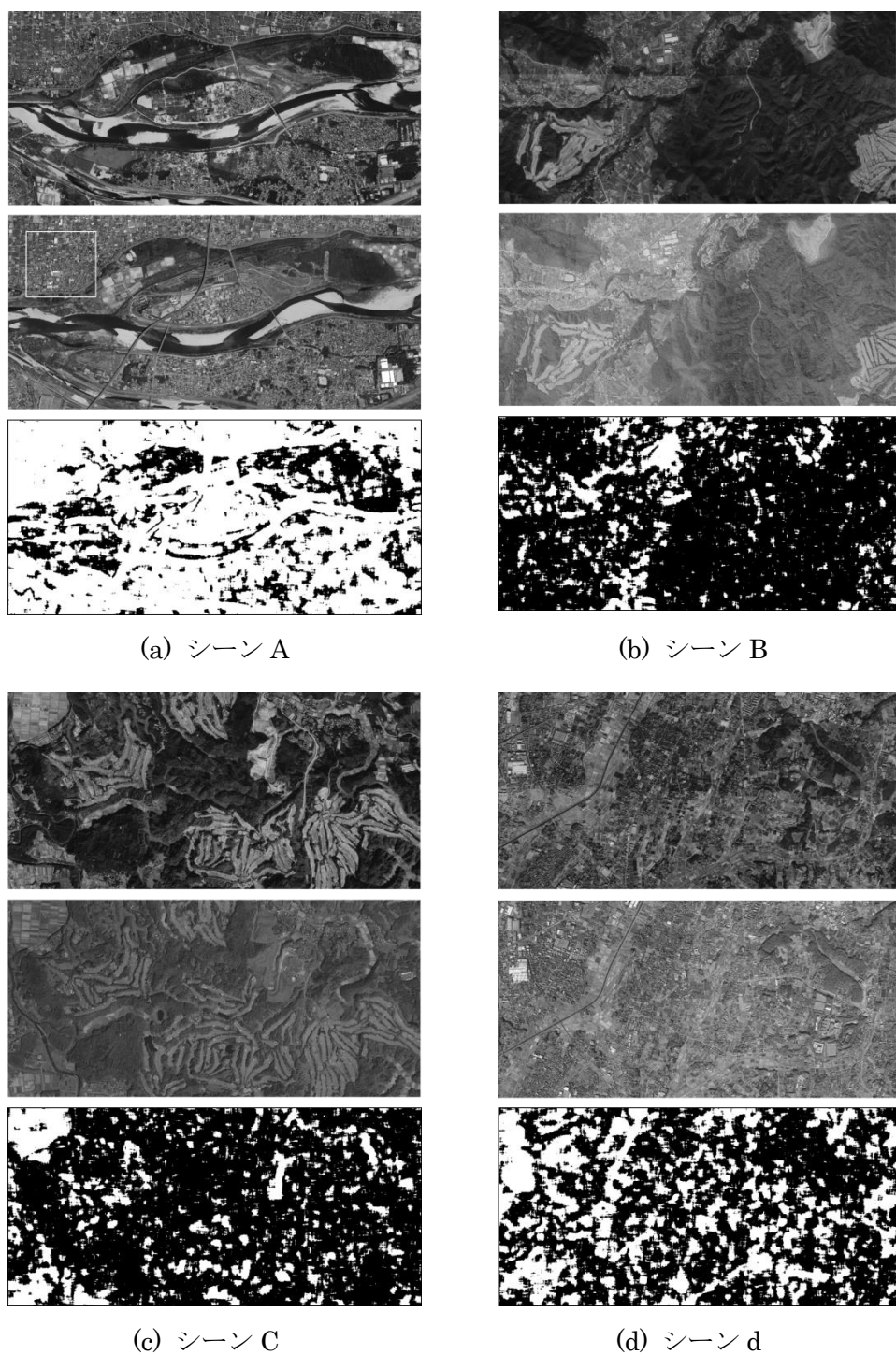


図 4.8 実験に使用した参照画像（上）と入力画像生成用画像（中）のペアと入力画像の DAS マップ（下）

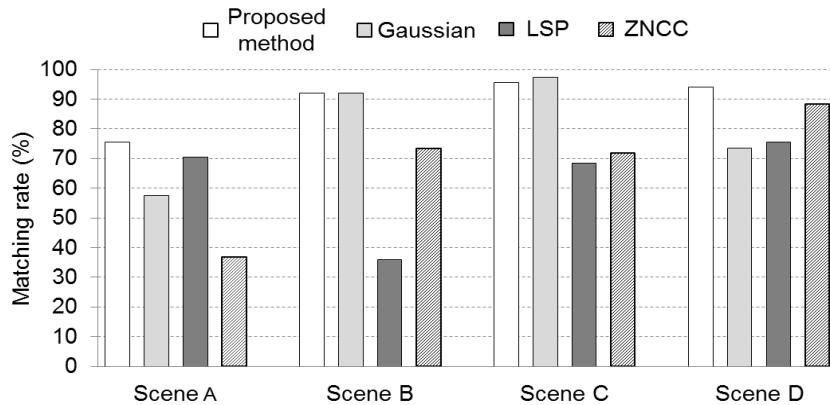


図 4.9 各方式のシーン別照合率（ピラミッドレベル 4）

4.3.2 実験結果：QO ベクトルノルムによる領域分割

図 4.8 下段に、QO ベクトルのノルムをしきい値処理することにより生成した入力画像全体の DAS マップを示す。シーン A は河川沿いの市街地領域であり、人工物判定領域（白く表示された領域）の占有率は約 76.3%と 4 シーン中で最も高くなった。山間部主体のシーン B と C では、人工物判定領域の占有率はそれぞれ約 16.7%, 約 20.5%と低くなっている。耕作地帯のシーン D では人工物判定領域の占有率は約 39.5%となり、画像全体に白と黒の領域が入り交じって分布している。これは、住宅や道路だけでなく、整備された田畑の区画も直線構造情報と判定されているためと考えられる。

4.3.3 実験結果：照合率

図 4.9 に各シーン別のピラミッドレベル 4 における各方式の照合率を示す。全シーンを通じて、4 方式の中で提案手法が最も安定して高い照合率を示していることが分かる。山間部主体のシーン B, シーン C では LSP 方式の照合率の悪化が顕著である一方、ガウシアン方式は高い照合率を残している。市街地主体のシーン A では LSP 方式が良好な結果となっており、耕作地帯のシーン D では LSP 方式、ガウシアン方式共に、提案手法より低い同程度の照合率となっている。従来方式である ZNCC では、シーン D で比較的良好な結果が出ているが、シーンによる照合率のばらつきが大きく、安定性の面で提案手法には及ばない。

図 4.10 にピラミッドレベル 0 から 4 までの全シーンの照合率の平均値を示す。いずれの方式もピラミッドレベルが上位になるにつれて照合率は低下するが、その中で提案方式が全体として良好な結果を保っていることが分かる。

4.3.4 実験結果：処理速度

本研究で作成した実験用のプログラムでは、ピラミッドレベルを 4 とした場合の LSP OC ピラミッド、ガウシアン OC ピラミッド単独での処理時間はそれぞれ約 0.81 秒と約 0.62 秒であった。それに対し、提案手法である適応型ピラミッドでは約 1.48 秒と、DAS ピラミッドの生成処理がオーバーヘッドとなり、やや処理時間が長くなっている（処理速度は 5 回の計測値の平均値である）。しかし、元画像サイズ（ピラミッドレベル 0）での方向符号照合には 690 秒以上を要し、それを考慮すると、頑健性をできるだけ維持しながら、実用的な処理速度の範囲まで計算量を削減できていると言える。処理速度の計測に使用した PC は、Intel Core i5 2.50GHz、搭載メモリ 4GB である。

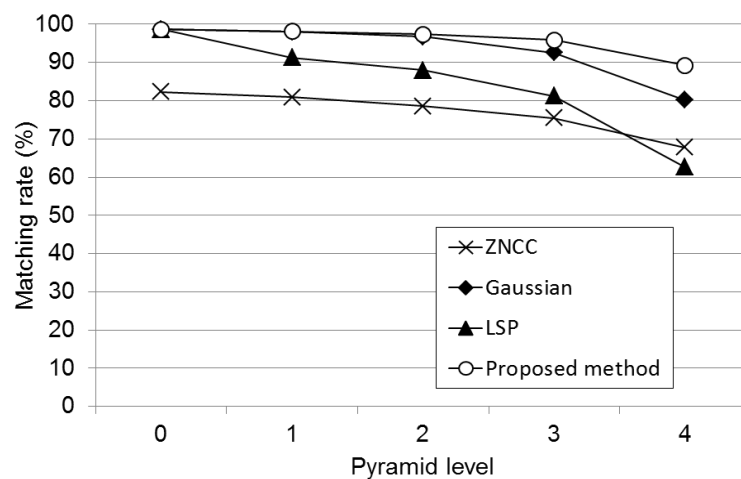


図 4.10 全シーンの平均照合率

4.3.5 考察

図 4.10 に示す全シーンの平均照合率のグラフにおいて、元画像（ピラミッドレベル 0）での結果を比較すると、明度情報に基づいた従来手法である ZNCC では約 81% と低くなっているのに対し、方向符号照合（ZNCC 以外の 3 手法）ではほぼ 100% の照合率となっている。これは実験に使用した航空画像のペアは、日照条件の違い等に加え、撮影間隔が 20 年以上開いており、ZNCC では対応が困難な地形や街の区画、植生等の変化を多く含んでいるためと考えられる。また、同グラフからピラミッドレベルが上位になった場合に、この方向符号照合の頑健性を最も維持できているのが提案手法であることが分かる。

提案手法との比較対象である LSP 方式単独とガウシアン方式単独について、DAS マップ（図 4.8 下段）とピラミッドレベル 4 におけるシーン別の照合率（図 4.9）の結果から、シーン種類と方向符号ピラミッド生成方式の組み合わせによる照合結果の違いが確認できる。人工物判定領域の占有率が高い画像（シーン A）では、直線構造情報を優先する LSP 方式がガウシアン方式よりも照合率が高く、逆に人工物が少ない画像（シーン B, C）ではガウシアン方式が高い照合率を記録している。このように領域特徴の傾向が明確なシーンでは、入力画像単位で生成方式を切り替える方法も有効である。しかし、人工物とそれ以外の領域がまだらに混在している画像（シーン D）では、どちらの方式も性能を発揮できておらず、ガウシアンピラミッドと ZNCC の組み合わせよりも悪い結果となっている。このシーン D のような画像は、提案手法が有効に働く典型的な例であり、最も良好な照合結果が得られている。

本研究で導入した QO ベクトルノルムによる人工物らしさの判定は、直線構造情報の有無のみに着目した簡易な方法である。方向符号照合の過程で生成する方向符号画像を利用し、Integral Image による効率的な計算を行うことで、余分な処理を極力追加せずに、効率化と頑健性の両立を実現している。

4.4 まとめ

本章では多様な特徴が複雑に混在する実環境の画像を対象として、方向符号照合のロバスト性を保ちつつ計算量を低減するための適応型ピラミッド探索処理を提案した。提案手法では、方向符号に基づく人工物らしさの尺度を定義し、画像領域を人工物とそれ以外の領域に分割することで、それぞれに適したピラミッドの生成方式を割り当てることを可能にした。撮影時期の異なる航空画像を用いた実験により、単独のピラミッド生成方式を用いた場合と比較して、提案手法を用いることで上位レベルでの照合率が全体として向上することを示し、従来提案されていなかった画像特徴に応じて複数のピラミッド生成方式を使い分けるというアプローチの有効性を確認した。

第5章 方向符号照合のための適応的ピラミッド生成と評価方法

第4章では、多様な特徴が混在する実環境の画像を対象として、領域特徴に合わせて画素ごとに方向符号ピラミッドの生成方式を選択する適応型ピラミッド探索処理を提案し、上位レベルでの照合率を向上できることを示した。しかし、市街地等の人工物領域を含む画像において、照合のための特徴が明瞭な場合においても上位レベルでの照合に失敗する場合が存在し、改善が必要とされていた。

本章では、照合率低下の要因の一つであるゴーストエッジ問題について説明し、その影響を回避するための相違度の算出に用いる評価関数を定義する。第4章で提案した適応型方向符号ピラミッド探索処理を基本として、評価関数も適応的に選択する方式を導入することで照合率を改善可能なことを示す。

5.1 上位ピラミッドレベルにおけるゴーストエッジ問題

前章までで述べたとおり、人工物主体シーンでは直線構造情報を優先的に選択するLSP方式により方向符号ピラミッドの生成を行っているが、直交点のように二つのエッジが近傍に存在する場合、ピラミッドの生成過程で一方のエッジが消失する場合がある。図5.1に示すように、どちらのエッジが消失するかは画像に依存するため、参

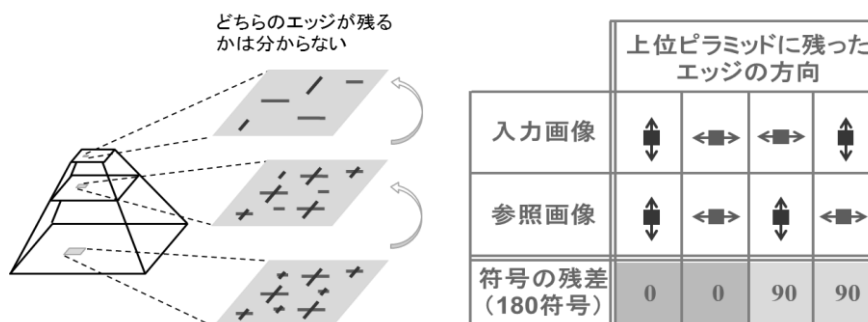


図 5.1 ゴーストエッジ問題の発生メカニズム

照画像と入力画像では同領域においても上位ピラミッドレベルに残される情報が異なる場合がある。この場合、照合正解位置にもかかわらず、相違度の評価値が逆の結果となり（図 5.1）、このような現象を本研究ではゴーストエッジ問題と呼ぶ。

図 5.2 は、照合正解位置における方向符号の差分の分布を表したヒストグラムである。図 2.4 の人工物主体シーンの実験用画像のペアを使用し、5 シーンの各ペアについて入力画像生成用画像から 320×320 画素の 18 枚の入力画像を生成して使用した。方向符号は 180 符号の HOC とし、各入力画像の照合正解位置において各画素間の方向符号の差分値を集計している。上から順にピラミッドレベル 2, 3, 4 における結果を示している。ピラミッド生成は LSP 方式により行っている。180 符号の HOC の場合、式(2.2)より残差絶対値の範囲は $0 \sim 90$ となり、0 の場合は対象符号同士が同一であり、90 の場合は直交していることを意味する。

ピラミッドレベル下位のレベル 2（上段）では、データ区間 $0 \sim 10$ に照合位置であることを示すピークが出現しているが、レベル 3（中段）、レベル 4（下段）とピラミッドレベルが上位になるにつれて、データ区間 $81 \sim 90$ にもう一つ別のピークが出現して

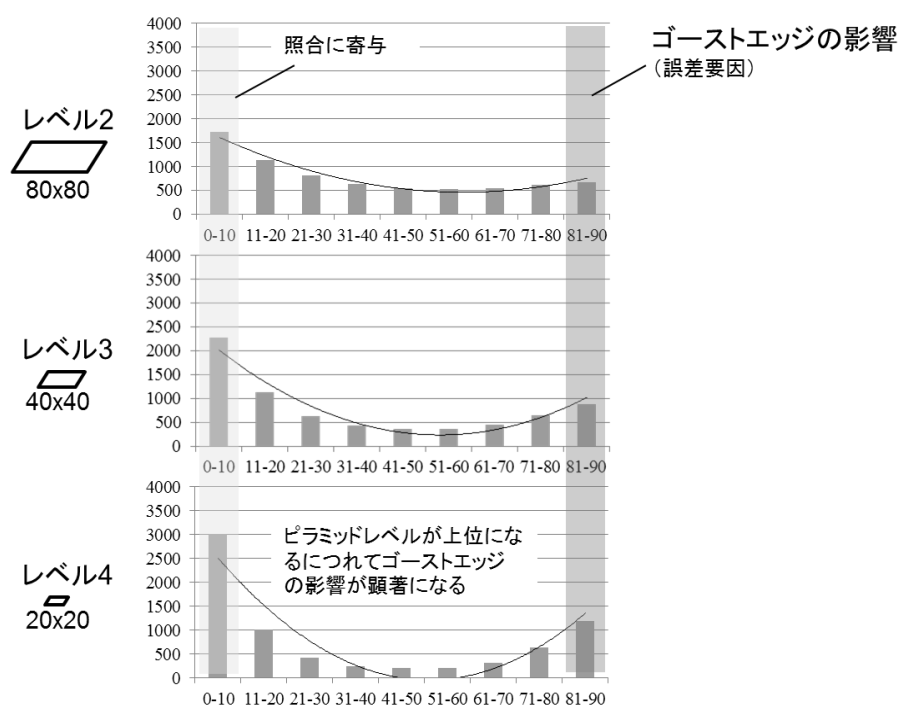
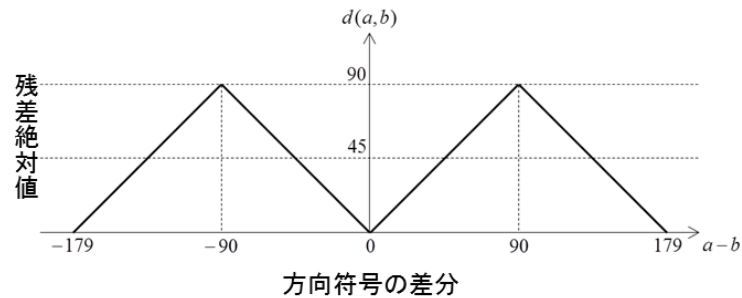


図 5.2 正解位置における方向符号の残差絶対値の分布

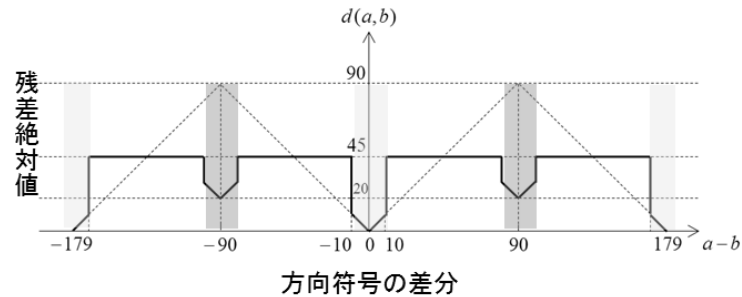
いることが分かる．これらは，ゴーストエッジ問題により評価値が逆になる割合が LSP ピラミッドの生成過程で増加していることを示している．なお図 2.5 の自然物主体シーンをを用いて，ガウシアン方式によるピラミッド生成で同様の実験を行ったところ，このようなゴーストエッジの発生は確認されなかった．

5.2 ゴーストエッジの影響を低減する評価関数の導入

図 5.3 (a)に，180 符号 HOC の相違度を算出する従来の評価関数のグラフを示す．このような従来の評価関数では，ゴーストエッジが多数発生した場合，入力画像全体の相違度が増大し，照合を誤る可能性が大きくなる．そこで図 5.3 (b)のような評価関数を定義する．基本的に，方向符号間の残差絶対値が 0～10 の類似性が高い（相違度が小さい）部分のみを積極的に評価し，それ以外は固定値を付与することでゴーストエッジの影響を排除する．ただ，ゴーストエッジの影響が現れる範囲には，正しく



(a) 自然物を想定した評価関数



(b) 人工物を想定した評価関数

図 5.3 領域特徴別の評価関数

評価された直交エッジも含まれる可能性を考慮し，評価関数を反転させ，残差絶対値 20 をペナルティとして付与する．それ以上の残差絶対値 11～80 の部分には固定値 45（期待値）を付与する．

5.3 提案手法の処理フロー

提案手法は4章での領域特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理（図 4.7）を基本とし，入力画像，参照画像共に LSP HOC ピラミッドとガウシアン HOC ピラミッドの混合 HOC 画像を生成する段階までは同一の処理フローとする．次に，図 5.4 に示すように人工物判定領域では人工物を想定した評価関数（図 5.3 (b)）により方向符号の残差絶対値を算出し，それ以外の領域では自然物を想定した評価関数（図 5.3 (a)）により算出する．最終的に画像全体の残差絶対値の総和を算出し，相違度の評価値とする．

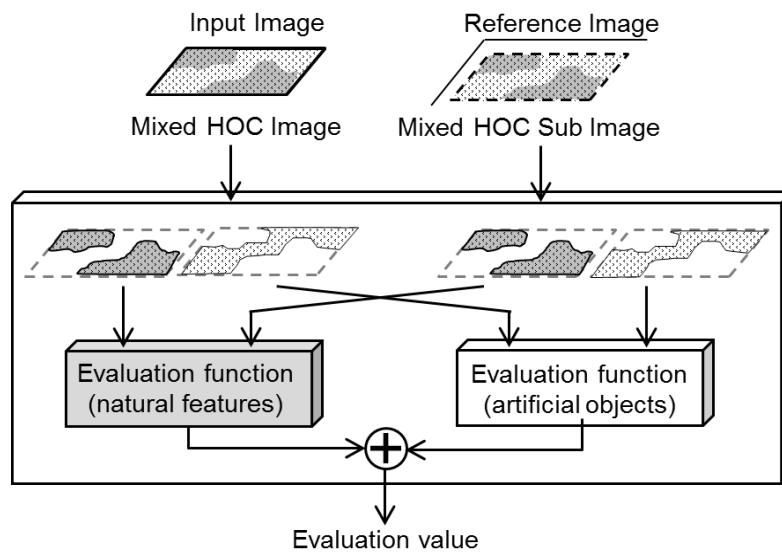


図 5.4 提案手法の処理フロー

5.4 評価実験（混在シーン）

ここでは提案手法の有効性を評価するために行った混在シーンを用いた航空画像照合の実験とその結果、及び考察を示す。

5.4.1 実験概要

実験には前章までと同様に国土地理院の電子国土 Web システム [18]から配信された縮尺 9000 分の 1 の空中写真データベースを使用した。人工物と自然物の混合領域での評価を行うため、図 5.5 に示す 2 シーンを選び、これも前章までと同様に各シーンについて 2010 年頃撮影の画像と 1988～1990 年撮影の画像（1920×960 画素）を、参照画像と入力画像生成用画像のペアとして用意した。ここから混合領域を含むように画像サイズ 320×320 画素の画像を切り出し、50 枚の実験用入力画像を生成した。

ゴーストエッジ問題の影響を評価するため、ガウシアン方式単独、LSP 方式単独、4 章の適応型方向符号ピラミッド探索処理、本章の提案手法である適応的ピラミッド生成と評価方法の四つの方式について、ピラミッドレベル 4 での照合率を算出した。

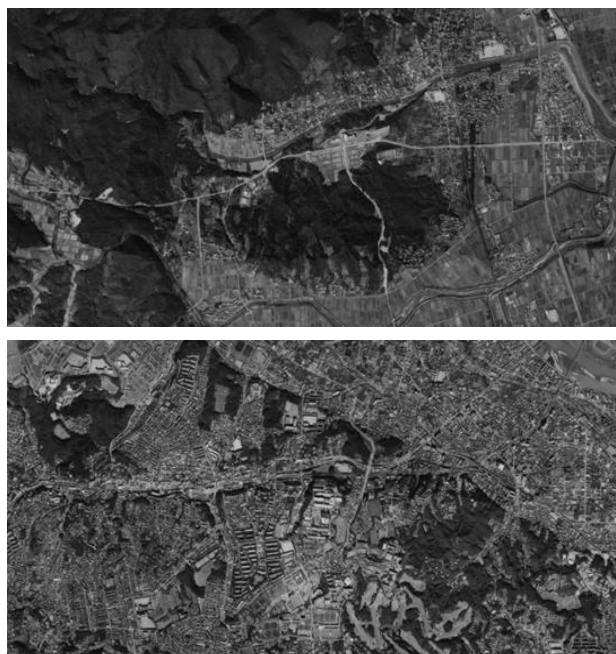


図 5.5 実験に使用したシーン

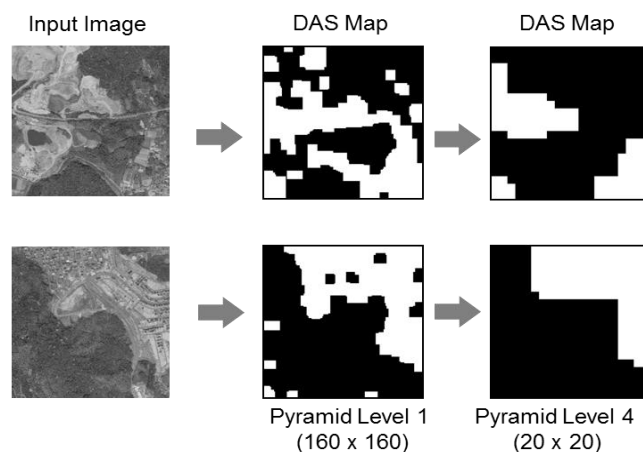


図 5.7 入力画像とその DAS マップの例

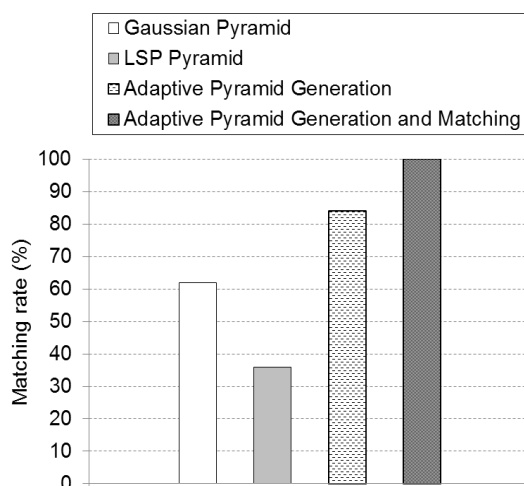


図 5.7 各方式の照合率比較（ピラミッドレベル 4）

5.4.2 実験結果と考察

図 5.7 に各方式による照合率の結果を示す．ガウシアン方式単独では照合率 62%，LSP 方式単独では 36%となっているのに対し，適応型方向符号ピラミッド探索処理では 84%と大きく照合率が向上している．これは今回実験に使用した入力画像が，図 5.7 に示すような混合領域に特化しているため，領域特徴に応じて適応的にピラミッド生成方式を切り替える方式の効果が大きく現れているためである．評価関数の切り替えも追加した本章の提案手法では照合率がさらに向上し 100%の結果となった．この結

果から、新しく導入した人工物を想定した評価関数（図 5.3 (b)）が有効に機能し、ゴーストエッジ問題の影響により照合を誤っていた画像を正しく照合できたことが分かる。

5.5 評価実験（人工物主体シーンと自然物主体シーン）

5.4 では混在シーンを入力画像として提案手法の有効性を示した。ここではより一般的な評価を行うため、第2章及び第3章で評価実験に使用した人工物主体の5シーンと自然物主体の5シーンの評価用画像を用いて実験を行う。

5.5.1 実験概要

まずこれまでの実験と同様に、入力画像生成用画像から画像サイズ 320×320 画素の画像を、左上の座標を指定して 200 枚切り出し、入力画像とした。この時指定した座標を入力画像に対する正解位置座標とし、照合位置座標が正解位置座標から 5 画素以内の場合を照合成功として照合率を算出するのも同様である。

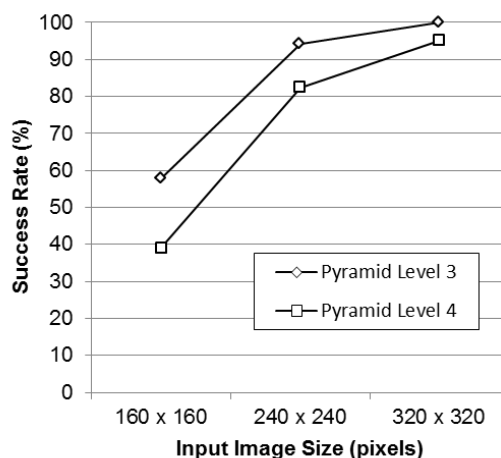
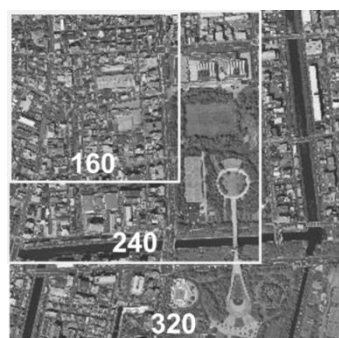
次に、航空機の高度や撮影に使用するカメラの画角等の条件によって、入力画像の撮影範囲は変化することを考慮し、模擬的に画像サイズを変化させて照合率への影響を評価した。同じ入力画像生成用画像から 240×240 画素、 160×160 画素の画像を 200 枚ずつ同様に切り出し、入力画像とした。

各サイズの入力画像について、提案手法によるピラミッドレベル 3 と 4 での照合率を算出し、比較を行った。

5.5.2 実験結果と考察

図 5.8 に実験に使用した入力画像サイズと、それぞれの画像サイズに対する照合率の平均を示す。 320×320 画素での結果を見ると、ピラミッドレベル 3 では 100%の照合率、ピラミッドレベル 4 でも約 95%と高い照合率を維持している。

一方、入力画像サイズが小さくなり撮影範囲が縮小した場合は照合率の低下が見られ、 160×160 画素では 320×320 画素の場合の半分程度まで大きく低下している。 160



(a) 実験に使用した入力画像サイズ

(b) 照合率

図 5.8 入力画像サイズによる照合率の変化

×160 画素のピラミッドレベル 3 と 320×320 画素のピラミッドレベル 4 では、最上位レベルにおける画像サイズはどちらも 20×20 画素で同一であるが、照合率は後者の方が高く、大きく差が現れている。これは提案手法の効果によるものであり、計算コストを低減する目的で撮影範囲を絞るよりも、十分な撮影範囲を確保した上でピラミッドレベルの階層を深くした方が最終的な照合の頑健性は保たれることが分かる。

5.6 まとめ

本章では LSP 方式によるピラミッド生成の過程で生じるゴーストエッジ問題の発生メカニズムと、その照合結果への影響について説明した。ゴーストエッジ問題を回避するため、人工物主体シーンを想定した評価関数を新しく定義し、自然物と人工物それぞれについて異なる評価関数を使い分けるアプローチを、第 4 章で提案した適応型方向符号ピラミッド探索処理に追加した。提案手法により、上位ピラミッドレベルにおける照合率を改善できることを、撮影時期の異なる航空画像を用いた実験により示した。

第6章 結論

本論文では航空画像を用いたナビゲーションの実現を目的として、撮影時期の異なる航空画像照合を行うため達成すべき技術課題を整理し、課題解決へのアプローチについて研究成果をまとめた。大きく、

- ロバスト画像照合の手法のひとつである方向符号照合の航空画像照合への適用
- シーンの多様性に対処可能な新しいピラミッド生成のアプローチを導入

の二つを軸とし、頑健で効率的な航空画像照合方式について模索した。

第2章では、基本方式である方向符号照合の定義を示し、部分的な見え方の変化を多く含む航空画像照合への適用性を示した。実際に撮影時期の異なる広域の航空画像を用いた照合実験により、正規化相互相関等の従来方式と比較して、方向符号照合の頑健性が高いことを示した。しかし計算の効率化を目的としたピラミッド探索の適用では、シーンの種類によって上位ピラミッドレベルでの照合率が大きく低下する問題があることを示し、新しいピラミッド生成のアプローチの必要性を確認した。

第3章では、シーンの多様性に対処するため、航空画像を人工物主体シーンと自然物主体シーンに大きく分類できる点に着目し、各シーンを想定した2種類の方向符号ピラミッドからシーンごとに一方を選択してピラミッド探索を行う手法を提案した。提案手法は、各方向符号ピラミッドの最上位レベルでの方向符号照合結果に基づいて照合信頼度を算出し、適応的に選択する点を特徴とし、単独の方向符号ピラミッドでは避けられなかったシーンによる照合率の極端な低下を、提案手法により改善できることを、市街地と山間部の航空画像を用いた実験により示した。

第4章では、領域特徴に応じて画素ごとにピラミッド生成方式を切り替える、適応型ピラミッド探索処理を提案した。提案手法では、方向符号（QOC）に基づく人工物らしさの尺度を定義し、画像領域を人工物とそれ以外の領域に分割することで、それぞれに適したピラミッドの生成方式を割り当てることを可能にした。異なる領域特徴が複雑に混在する航空画像を用いた実験により、提案手法を用いることで上位レベルでの照合率が全体として向上することを示した。このように、画像特徴に応じて複数のピラミッド生成方式を使い分けるというアプローチは従来提案されておらず、本論

文で有効性を確認できたことは大きな成果と言える。

第5章では、LSP方式によるピラミッド生成の過程で生じるゴーストエッジ問題の照合結果に影響を及ぼすことについて説明し、その影響を回避するための方策を検討した。ここでは、相違度を算出する評価関数の使い分けるアプローチを採用し、ゴーストエッジを考慮した新しい評価関数を定義した。第4章で提案した適応型方向符号ピラミッド探索処理を基本として、評価関数を適応的に選択する方式を追加する形で拡張した。撮影時期の異なる混在シーンの航空画像を用いた実験により、提案手法を用いることで上位レベルでの照合率が向上することを示した。

以上、述べたように本論文では大きく、撮影時期による見え方の変化への対応、計算量の低減、ピラミッド生成過程での情報消失による照合率低下への対応、航空画像のシーンの多様性への対応の各技術課題について各章で解決策を示し、シーンの多様性を考慮した新しいピラミッド生成のアプローチと照合方式を提案した。本研究成果により従来困難であった頑健で効率的な航空画像照合を実現し、ビューベースストアプローチによる航空画像を用いたナビゲーションを実現するための基本技術として確立することができた。当然、実応用にあたっては、航空機の高度や飛行速度、撮像センサの性能等、様々な事項について十分検討することが必要であり、今後、実環境での評価実験等も含めて研究を発展させていきたいと考えている。無人航空機の活用がいっそう盛んになると予想されるこれからの社会において、本研究成果がひとつの解決策として寄与できれば幸いである。

謝辞

指導教官である佐藤誠教授には、社会人ドクターとして私を快く受け入れて頂き、また学会への論文投稿や本論文の執筆にあたり丁寧なご指導を賜りました。心より感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり審査の場で有益なご助言を頂いた長橋宏教授、熊澤逸夫教授、中村健太郎教授、山口雅浩教授に深く感謝いたします。また、赤羽助教はじめ佐藤研究室の皆様には大変お世話になりました。お礼申し上げます。

今回の研修の機会を与えてくださった防衛省の皆様方に感謝申し上げます。木村茂特別研究官には本論文の研究内容全般にわたり適切な助言を多く頂きました。深くお礼を申し上げます。

3年間に渡る博士課程の学生生活では多忙な時期もあり、家族に不自由な思いをさせることもありました。そんな中でも明るく励ましてくれた妻と、課程1年目に誕生した長女、3年目に誕生した長男には精神的に支えられました。深く感謝します。

最後に、父母に深く感謝します。

発表文献リスト

学会誌論文

1. 石丸光宏, 佐藤誠, “画像特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理”, 画像電子学会誌, Vol. 43, No. 1, pp. 13-20, 2014
2. M. Ishimaru, M. Sato, "Aerial Image Matching using Adaptive Selection of Orientation Code Image Pyramids", ITE Trans. on Media Technology and Applications, Vol. 1, No. 2, pp. 148-156, 2013
3. 石丸光宏, 木村茂, “方向符号による航空画像照合のためのピラミッド探索”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J94-D, No. 3, pp. 628-631, 2011

参考文献

- [1] 松本吉央, 稲葉雅幸, and 井上博允, "ビューベーストアプローチに基づく移動ロボットナビゲーション," *日本ロボット学会誌*, vol. 20, no. 5, pp. 506-514, 2002.
- [2] G. Conte and P. Doherty, "An Integrated UAV Navigation System Based on Aerial Image Matching," *2008 IEEE Aerospace Conference, Montana, USA*, 2008.
- [3] Y. Matsumoto, M. Inaba, and H. Inoue, "Visual Navigation Using View Sequenced Route Representation," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 83-88, 1996.
- [4] 笹尾昭, "GPS 関連防衛技術の動向," *電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス*, vol. 102(293), pp. 25-30, 2002.
- [5] 金子俊一, "ロバスト画像照合の基礎と実産業応用," *電子情報通信学会技術報告. IE, 画像工学*, vol. 106, no. 537, pp. 29-34, 2007.
- [6] 伊藤康一, 高橋徹, and 青木孝文, "高精度な画像マッチング手法の検討," *第25回信号処理シンポジウム*, no. C5-1, pp. 547-552, 2010.
- [7] D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Proc. International Journal of Computer Vision (IJCV)*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [8] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "SURF: Speeded-up robust features," *Proc. ECCV*, 2006.
- [9] 高木雅成 and 藤吉弘亘, "SIFT 特徴量を用いた交通道路標識認識," *電気学会論文誌 C*, vol. 129-C, no. 5, pp. 824-831, 2009.
- [10] N. Yazawa, H. Uchiyama, H. Saito, M. Servi res, and G. Moreau, "Image Based View Localization System Retrieving from a Panorama Database by SURF," *11th IAPR Conference on Machine Vision Applications*, pp. 118-121, 2009.
- [11] J.K. Aggarwal, L.S. Davis, and W.N. Martin, "Correspondence process in dynamic scene analysis," *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 5, pp. 562-572, 1981.
- [12] R.L. Lillestrand, "Techniques for change detection," *IEEE Trans. Computer*, vol. c-21, no. 7, pp. 654-659, 1972.
- [13] 奥富正敏 (編), "デジタル画像処理," *CG-ARTS 協会*, 2004.
- [14] W.M. Silver, "Normalized correlation search in alignment, gauging, and inspection," *SPIE*, vol. 755, pp. 23-34, 1987.

- [15] 村瀬一郎, 金子俊一, and 五十嵐悟, "増分符号相関によるロバスト画像照合," *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol. 83-D-II, no. 5, pp. 1323-1331, 2000.
- [16] F. Ullah, S. Kaneko, and S. Igarashi, "Orientation code matching for robust object search," *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, vol. E84-D, no. 8, pp. 999-1006, 2001.
- [17] 中原和哉, 金子俊一, 田中孝之, 清水将志, and 宮下行雄, "ロバスト画像照合に基づく農作業機用速度センサの開発," *ViEW 2005*, pp. 234-239, 2005.
- [18] 橋本学, "テンプレートマッチングの魅力," *台19回画像センシングシンポジウムチュートリアル講演会*, 2013.
- [19] E. H. Adelson, C. H. Anderson, J. R. Bergen, P. J. Burt, and J. M. Ogden, "Pyramid methods in image processing," *RCA Engineer*, vol. 29, no. 6, pp. 33-41, 1984.
- [20] 石丸光宏 and 木村茂, "方向符号による航空画像照合のためのピラミッド探索," *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J94-D, no. 3, pp. 628-631, 2011.
- [21] 国土地理院. 電子国土ポータル.
[Online]. <http://portal.cyberjapan.jp/testd/index.html>
- [22] D.I. Barnea and H.F. Silverman, "A class of algorithms for fast digital image registration," *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-21, no. 2, pp. 179-186, 1972.
- [23] 村瀬洋 and V.V. Vinod, "局所色情報を用いた高速物体探索-アクティブ探索法-," *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol. J81-D-II, no. 9, pp. 2035-2042, 1998.
- [24] H. Barrow, J. Tenenbaum, R. Bolles, and H. Wolf, "Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching," *Int'l Joint Conf. of Artif. Intel.*, pp. 659-663, 1977.
- [25] M. Ishimaru and M. Sato, "Aerial Image Matching using Adaptive Selection of Orientation Code Image Pyramids," *ITE Trans. on Media Technology and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 148-156, 2013.
- [26] OpenCV. [Online]. <http://opencv.org/>
- [27] P. Viola and M. Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 1, pp. 511-518, 2001.