

画素対応からの任意視点画像上の対応領域予測

夏見 拓明[†] 杉本 晃宏^{††} 剣持 雪子^{†††}

[†] 千葉大学大学院融合科学研究科情報科学専攻

^{††} 国立情報学研究所

^{†††} 仏国立科学研究所

E-mail: [†]hnatsumi@graduate.chiba-u.jp, ^{††}sugimoto@nii.ac.jp, ^{†††}y.kenmochi@esiee.fr

あらまし 異なる 2 視点間の画像の幾何学的な関係を点単位ではなく画素単位で記述するために、離散エピポーラ線が提案された。そして、画像の強校正が事前に行われているという前提で、離散エピポーラ線を求めるアルゴリズムが提案されている。本稿では、画像の校正に関する前提を弱めることで、この手法を発展させる。すなわち、弱校正された離散画像を扱って、離散エピポーラ線を求める手法を提案する。また、弱校正された 2 枚の離散画像上の画素対応が与えられたとき、任意視点の画像上で、その画素対に対応する領域を求める手法を提案する。
キーワード 画素, 弱校正, 視線錐, 離散エピポーラ線, 対応領域。

Predicting Corresponding Region in a Third View using Discrete Epipolar Lines

Hiroaki NATSUMI[†], Akihiro SUGIMOTO^{††}, and Yukiko KENMOCHI^{†††}

[†] Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University, Japan

^{††} National Institute of Informatics, Japan

^{†††} IGM, CNRS/Univ. of Marne-la-Vallée/ESIEE, France

E-mail: [†]hnatsumi@graduate.chiba-u.jp, ^{††}sugimoto@nii.ac.jp, ^{†††}y.kenmochi@esiee.fr

Abstract The discrete epipolar line, a discrete version of the epipolar line, is recently proposed to give geometric relationships between pixels in two different views so that we can directly deal with pixels rather than points in digital images. A method is then proposed to determine the discrete epipolar line providing that fully calibrated images are available. This paper deals with weakly calibrated digital images and proposes a method for determining the discrete epipolar line using only weakly calibrated images. This paper also deepens the work further, presenting a method for identifying the corresponding pixels in two views.

Key words pixels, weakly calibration, pyramidal ray of sight, discrete epipolar line, corresponding region.

1. はじめに

複数の視点からカメラで撮影して得られる画像から特徴を抽出し、それらの画像間の幾何学的な対応関係を解析することは、対応点探索, 3 次元形状復元, カメラキャリブレーション, 物体認識といったコンピュータビジョンにおける主要課題に取り組むための基礎となる [7], [9], [11]. 特に, 異なる 2 視点から得られた画像上の対応点の関係を記述するエピポーラ幾何は, 古くから議論され, その性質は十分に解析されている. また, 1990 年代半ばには, エピポーラ幾何を拡張する形で, 3 視点以上の画像間の対応点を記述する幾何学として多視点幾何が提案され, 1990 年代後半に活発な研究が展開された [1], [2], [5], [7], [8].

trifocal テンソル, quadrifocal テンソルといった概念の導入とともにその性質が整理され, 多視点幾何は既に確立されているといっても過言ではない.

これまで議論されてきた多視点幾何の枠組みでは, 画像内の点が直接扱われていた. すなわち, 2 次元画像を連続な平面であるとし, カメラによる撮影の幾何学を連続な 3 次元空間から連続な 2 次元平面への投影として捉え, その性質が解析されてきた. しかし計算機で扱う画像は, 点ではなく画素を最小単位とした離散画像である. そのため, 画素よりも小さな単位である点を直接取り扱うことはできない. したがって, 例えば, エピポーラ幾何を離散画像に適用した場合, 特徴点がたとえ完全に正確に抽出されていたとしても, エピポーラ線上に対応点が

存在しないという問題が起こり得る．これは画像の離散化に起因し，画素を最小単位として画像を取り扱わない限り，解決できない問題である．

従来より，この離散化による誤差は測定誤差や計算誤差とともに一括して扱われ，その発生に統計モデル等を仮定して，誤差が伝播する範囲を統計的な観点で解析することが多かった [6], [7], [10]．しかし，これらの誤差は本来，性質の異なるものであり，区別して扱われるべきものである．また，仮定している統計モデルの妥当性に関する議論はほとんど行われていないのが実情である．

一方，濱中ら [3], [4] は，離散画像を扱うことを前提として，エピソード幾何を離散の立場から再定義し，離散エピソード線を提案した．そして，離散化による誤差を他の誤差から切り離して議論することを試みている．しかし，この手法は画像の強校正が事前に行われていることを前提としていて，この手法を利用するためには視点間の幾何学的関係に関する 3 次元的な情報が必要となっている．このため，実用的な面でその利用に問題が残っている．

そこで，本稿では，この問題を解決するために，弱校正された画像を用いて離散エピソード線を決定する手法を提案する．また，離散エピソード線の応用例として，異なる 2 つの画像上に与えられた 1 組の対応画素から第 3 画像上の対応領域を決定する手法を提案する．ここでは，2 つの画像間の基礎行列を活用して，一方の画像上の画素を他方の画像上に移動させて解析を行い，2 次元の計算のみで離散エピソード線の決定や対応領域の決定を実現している．提案手法の有効性を示すために，異なる解像度の画像を用いて画素対応からの対応領域を求め，画像の解像度と対応領域の大きさとの関係を考察する．

2. 画像の離散化

本稿では，画像の最小単位は点ではなく画素であるとする．すなわち，画像は連続ではなく離散化されているとする．そこで，まず校正されていない画像の離散化モデルを説明する．

ある画像 I 上に与えられた点の同次座標を $x = (x, y, 1)^T$ とする．このとき， x を表す画素の座標 (以後，画像座標と呼ぶ) として $i = (i, j)$ を

$$i = \lfloor r_x x + \frac{1}{2} \rfloor, \quad j = \lfloor r_y y + \frac{1}{2} \rfloor. \quad (1)$$

によって定義する．ここで r_x, r_y はそれぞれ x 軸， y 軸方向の解像度である．また， $\lfloor x \rfloor$ は実数 x に対して， x 以下でかつ最大の整数を値にとる関数であり，床関数と呼ばれている．このような離散化を画像 I 上の全ての点に適用することで， I の離散画像 D を得ることができる．

逆に，画素座標が $i = (i, j)^T$ である画素が占める領域は長方形であり，その領域は容易に求めることができる．この領域を決定する 4 頂点を画素 i の端点 $v_\kappa(i) \in I$ ($\kappa = 0, 1, 2, 3$) と呼び，その同次座標を以下のように定義する．

$$v_0(i) = \left(\frac{1}{r_x} \left(i - \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j - \frac{1}{2} \right), 1 \right)^T,$$

$$v_1(i) = \left(\frac{1}{r_x} \left(i - \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + \frac{1}{2} \right), 1 \right)^T,$$

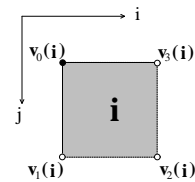


図 1 画素 i が示す領域と画素の 4 端点 $v_\kappa(i)$

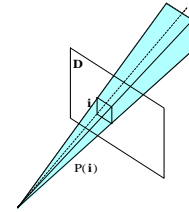


図 2 D 上の画素 i に対する視線錐 $P(i)$

$$v_2(i) = \left(\frac{1}{r_x} \left(i + \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + \frac{1}{2} \right), 1 \right)^T,$$

$$v_3(i) = \left(\frac{1}{r_x} \left(i + \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j - \frac{1}{2} \right), 1 \right)^T.$$

ただし，式 (1) により，図 1 に示すように $v_0(i)$ だけが画素 i が占める領域内に含まれることになる．

3. 離散エピソード線の決定

3.1 離散エピソード線

画素を画像の最小単位として考え，エピソード線に対応する概念として，離散エピソード線が提案されている [3], [4]．離散エピソード線は幾何学的には次のように定義される．校正された画像の視点と，その画像上の画素によって四角錐が空間内に定まる (図 2)．この四角錐は画素に対する視線錐と呼ばれる．この視線錐を，別の視点から得られる校正された画像に投影することにより離散エピソード線が得られる^(注1)．

図 3 に示すように，離散エピソード線の境界は，与えられた画素の 4 端点に対応する 4 本のエピソード線のうちの 2 本によって定まる．離散エピソード線の境界となるエピソード線を境界エピソード線と呼ぶことにする．したがって，離散エピソード線を決定することは，2 本の境界エピソード線を決定し，離散エピソード線が境界エピソード線のどちら側にあるかを決定することと等価となる．なお，2 視点の配置に依存して 4 本のエピソード線のうちどれが境界エピソード線となるかが変われることを注意しておく．

濱中ら [3], [4] は境界エピソード線を求めるために，画素の 4 端点によって定められる 4 つのエピソード平面を考えた．そして，4 つのエピソード平面のうち，視線錐を完全に含む 2 つの平面を投影して得られる直線が境界エピソード線になることに

(注1): 厳密には，濱中ら [3], [4] において，視線錐を投影した領域をさらに離散化することで得られる画素集合を離散エピソード線と定義している．しかし，本稿では視線錐の投影像を離散エピソード線と呼ぶこととする．これにより，離散エピソード線を 2 つの不等式で定めることができる．なお，この定義の違いにより，以後の議論に差異が生じることはない．

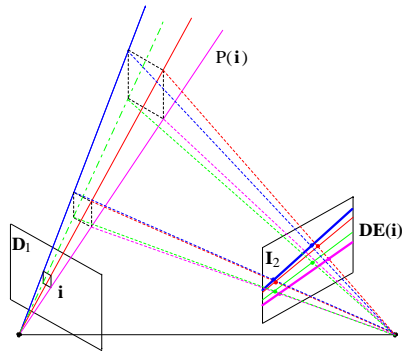


図3 視線錐 $P(i)$ と離散エピポーラ線 DE の境界エピポーラ線

着目した．このように，境界エピポーラ線を求めるためには，視線錐を完全に挟む2つのエピポーラ平面を求めればよいというアイデアに基づいて，離散エピポーラ線を決定する手法を提案した．

この手法では強校正されている画像を用いることを前提としていて，離散エピポーラ線を決定するためには内部カメラパラメタと外部カメラパラメタが必要となる．しかしながら，強校正はまだまだ困難な問題として残っており，正確なカメラパラメタを事前に得ておくことは容易ではない．このため，この手法は残念ながら実用的であるとは言い難い．

3.2 基礎行列を用いた境界エピポーラ線の決定

校正されていない2つの画像上に1組の対応点 x_1, x_2 が与えられたとき，対応点の関係はエピポーラ方程式と呼ばれる次の方程式で記述されることが知られている [7], [9], [11]．

$$x_2^T F_{1,2} x_1 = 0. \quad (2)$$

ここで， $F_{1,2}$ は 3×3 の行列で，2つの視点間の基礎行列を表す．カメラパラメタに関する全ての情報は $F_{1,2}$ に集約されている．式 (2) から， $F_{1,2}$ が既知であるならば，第1画像上の点 x_1 が与えられたとき，対応する第2画像上のエピポーラ線 $x_1^T F_{1,2} x' = 0$ を得ることができる．ここで， x' は第2画像上の点の同次座標である．以後，画像は弱校正されている，すなわち，異なる2つの視点間の基礎行列は既知であるとする．

さて，エピポーラ線 $x_1^T F_{1,2} x' = 0$ によって1枚の画像は2つの領域に分割される．ここで，境界エピポーラ線によって画像が分割された場合，離散エピポーラ線は2つの領域のどちらか一方にのみ存在する．一方，境界エピポーラ線以外のエピポーラ線によって画像が分割された場合，離散エピポーラ線は分割された2つの領域の両方にまたがる．この性質を利用することで，画素の4端点に対応する4本のエピポーラ線を境界エピポーラ線とそうでないエピポーラ線とに分けることができる．ここでは，第2画像上ではなく第1画像上でこの性質を利用した解析を進める．なぜなら，与えられた画素は視線錐を第1画像上に投影したものに他ならないからである．

I_1, I_2 を与えられた2つの画像とし， I_1 を離散化したものを D_1 とする． D_1 上に与えられた画素を i とすると，図4に示すように i の4端点の座標 $v_\kappa(i) \in I_1$ ($\kappa = 0, 1, 2, 3$) が得られ，さらに4端点 $v_\kappa(i)$ に対応する I_2 上の4本のエピポーラ線 $\ell_2(v_\kappa(i))$ が得られる．ここで， $\ell_2(v_\kappa(i))$ 上の任意の点 $y_\kappa (\in I_2)$ を選ぶと， y_κ と $F_{1,2}$ によって， I_1 上のエピポーラ線 $y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ が得られる (ここで， $x \in I_1$ である)．なお， $y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ は， $v_\kappa(i)$ と $\ell_2(v_\kappa(i))$ とによって決まるエピポーラ平面上に常に存在しているため， $y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ は y_κ の選び方に依存しない．

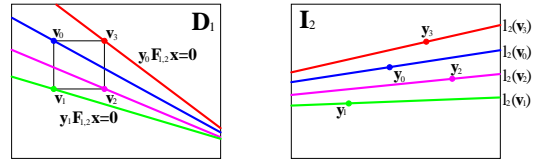


図4 与えられた画素とその4端点のエピポーラ線

$y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ が得られれば，画素 i が占める領域と， $y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ によって分割される I_1 の2つの領域との間の幾何学的関係を容易に調べることができる．すなわち， $y_\kappa^T F_{1,2} x = 0$ は端点 v_κ を必ず通るので，他の3つの端点 $v_\mu(i)$ ($\mu = 0, 1, 2, 3; \mu \neq \kappa$) が分割された領域の一方に存在するかどうかを調べればよい．そのためには $y_\kappa^T F_{1,2} v_\mu(i)$ の値の正負判定をすれば十分である．

以上の手法によって，弱校正された画像を用いて離散エピポーラ線を決定することが可能となる．与えられた画素に対応する離散エピポーラ線を決定するアルゴリズムを以下に示す．

Input: 第1画像上の画素 i と2視点間の基礎行列 F
 Output: i に対応する第2画像上の離散エピポーラ線 DE

- Step1 不等式集合 $L := \emptyset$, $DE := \emptyset$ とする．
 Step2 $\kappa = 0, 1, 2, 3$ に対し，端点 $v_\kappa(i)$ とエピポーラ線 $\ell_2(v_\kappa(i)) : x^T F v_\kappa(i) = 0$ ($x \in I_2$) を計算する．
 Step3 $\kappa = 0, 1, 2, 3$ に対し，以下の処理を行う．
 (i) $W := \{0, 1, 2, 3\} - \{\kappa\}$
 (ii) $\ell_2(v_\kappa(i))$ 上の任意の点 y_κ を選ぶ．
 (iii) 全ての $\mu \in W$ に対し， $y_\kappa^T F v_\mu(i) \geq 0$ ならば，
 (1) $\kappa = 0$ ならば $x^T F v_\kappa(i) \geq 0$ を L に加える．
 (2) $\kappa \neq 0$ ならば $x^T F v_\kappa(i) > 0$ を L に加える．
 (iv) 全ての $\mu \in W$ に対し， $y_\kappa^T F v_\mu(i) \leq 0$ ならば，
 (1) $\kappa = 0$ ならば $x^T F v_\kappa(i) \leq 0$ を L に加える．
 (2) $\kappa \neq 0$ ならば $x^T F v_\kappa(i) < 0$ を L に加える．
 (v) L 内の不等式を全て満たす I_2 上の点集合を DE とする．

4. 第3画像上の対応領域の予測

ここでは，異なる2枚の画像上に1組の対応画素が与えられたとき，第3画像上における対応画素の位置を決定する問題について考える．

点を画像の最小単位として考えた場合，異なる2枚の画像上に1組の対応点が与えられたとき，第3画像上の対応点の位置を予測することは容易である．すなわち，1組の対応点から対応する2本のエピポーラ線を第3画像上に求めると，この2本のエピポーラ線の交点として第3画像上の対応点を決定するこ

とができる．しかもこの交点は常に一意に決まる．このような3視点間の対応点同士の関係は代数的に解析されており，3視点幾何と呼ばれている．そして，この3視点幾何から得られる拘束は trifocal テンソルと呼ばれている [5], [7]．

これに対して，画像の最小単位は画素であると考えたと，従来の3視点幾何に基づいて第3画像上の対応点を得ることはできず，この問題の解析的な解決は難しくなる．ここでは，この問題を計算手続きによって解決する．

4.1 2視点間の画素対応と第3画像

異なる2枚の画像上に1組の対応画素 i_1, i_2 を与えることで，空間内に2つの視線錐 $P(i_1), P(i_2)$ が定まる．このとき，この2つの視線錐は空間内で交差する．この交差領域を $P(i_1) \cap P(i_2)$ で表すことにする．ここで，第3の視点を用意すると，空間内の交差領域 $P(i_1) \cap P(i_2)$ は第3の画像に領域として投影される．この領域を $R_3(i_1, i_2)$ と表すこととし，画素 i_1, i_2 に対する第3画像上の対応領域と呼ぶこととする．

対応領域 $R_3(i_1, i_2)$ は点ではなく最大8つの辺を持つ凸多角形が定める領域として決定される．その理由を以下に述べる．視線錐の定義より $P(i_1), P(i_2)$ はそれぞれ4つの面を持つ凸錐であるため，視線錐の交差領域 $P(i_1) \cap P(i_2)$ は最大で8つの面をもつ凸多面体となる．透視投影では凸性が失われないため，この凸多面体を投影した対応領域は最大で8つの辺をもつ凸多角形となる．

さて， i_1, i_2 の位置だけでなく，視点の配置にも依存して $P(i_1) \cap P(i_2)$ の面の数は変化する．よって，対応領域 $R_3(i_1, i_2)$ の形状も視点配置に対しても無関係ではないことが容易にわかる．このような画素の位置や視点配置による対応領域の形状の変化は，点を画像の最小単位として捉えた枠組みでは生じなかったことである．一方，透視投影では凸性は失われないため，画素の位置や視点配置をどのように取ったとしても，対応領域の凸性が失われることはなく，対応領域の境界は必ず凸多角形によって表される．

第3画像上の対応領域について，上で得られた幾何学的な性質をまとめる．

- 対応領域は，点ではなく凸多角形となり，この凸性は対応画素対の位置や視点配置に依存しない．
- 対応領域は最大で8つの辺をもち，この辺の数は与えられた画素の位置や視点配置に依存する．

4.2 対応領域の決定

1組の対応画素から第3画像上に離散エピポーラ線を引き，その交差領域を考えても，それは，その対応画素対の対応領域とは一致しない．なぜなら，離散エピポーラ線の交差を考慮することによって得られる領域は最大4つの辺をもつ凸多角形であり，先に述べた性質に反するからである．よって，離散エピポーラ線の交差領域は対応領域とは一致しない．

事実，与えられた対応画素対により得られる2つの視線錐は，互いに他を削るように交差するため，実際に得られる対応領域は離散エピポーラ線の交差領域よりも小さくなる．異なる2つの画像上に与えられた1組の対応画素をそれぞれ i_1, i_2 とし， i_1, i_2 から得られる第3画像上の離散工

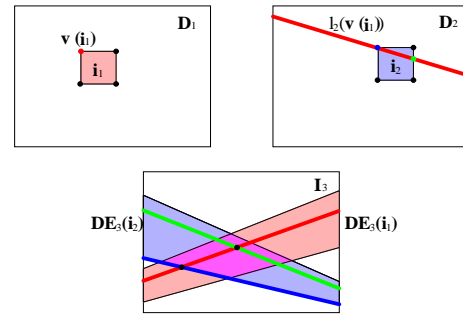


図5 3つの画像に投影された視線錐の交差領域の頂点

ピポーラ線をそれぞれ $DE_3(i_1), DE_3(i_2)$ とする．このとき， $R_3(i_1, i_2) \subseteq (DE_3(i_1) \cap DE_3(i_2))$ である．

さて，2つの視線錐がどのように互いを削るのかをみるために，一方の視線錐の稜線が他方の視線錐の側面にどのように交差するかを調べることにする．これにより，視線錐の交差領域 $P(i_1) \cap P(i_2)$ の全頂点を求めることができる．空間内での交差を考えると複雑になるが，各画像上に投影して考えることにより，この解析は容易になる．したがって，各画像上で議論することにする．

まず，端点 $v_{\kappa}(i_1)$ と視線錐 $P(i_2)$ に着目する． $v_{\kappa}(i_1)$ に対応する第2画像上のエピポーラ線 $l_2(v_{\kappa}(i_1))$ は，第1視点と $v_{\kappa}(i_1)$ とを結ぶ視線，すなわち視線錐 $P(i_1)$ の稜線の1つ，を第2画像上に投影したものである．そして，この視線と視線錐 $P(i_2)$ とが交差することは， $l_2(v_{\kappa}(i_1))$ が画素 i_2 と交差することを意味する．さらに，空間内でこの視線と視線錐 $P(i_2)$ とが交点を持つとき，その交点を第2画像に投影した点と， $l_2(v_{\kappa}(i_1))$ と i_2 との交点は一致する．この性質により，3次元情報を直接扱うことなく空間内の交点を第2画像上に投影することができる．

以上のようにして第2画像上に投影された交点が得られれば，それを利用して，第3画像上の対応点の位置を予測することが可能となる(図5参照)．すなわち，第1画像と第3画像，第2画像と第3画像の2つの基礎行列を利用することで， $v_{\kappa}(i_1)$ に対応する第3画像上のエピポーラ線と，第2画像上に得られた交点に対応する第3画像上のエピポーラ線が得られる．そして，その2本のエピポーラ線の交点として第3画像上で対応する点が得られる．

この手順を画素 i_1 の4端点 $v_{\kappa}(i_1)$ ($\kappa = 0, 1, 2, 3$) に対して繰り返す，さらに第1画像と第2画像の役割を交代して同様の手順を繰り返す．これにより，視線錐の交差領域 $P(i_1) \cap P(i_2)$ の全交点を第3画像上に投影した点の集合が得られる．こうして得られた点の集合に対して凸包を求めることで，第3画像上の対応領域 $R_3(i_1, i_2)$ を決定することができる．

異なる2枚の画像上に1組の対応画素が与えられたとき，第3画像上の対応領域を求めるアルゴリズムを以下に示す．

Input: 第1, 第2画像上の対応画素 i_1, i_2 と3視点のうち2視点の間の基礎行列 $F_{1,2}, F_{1,3}, F_{2,3}$

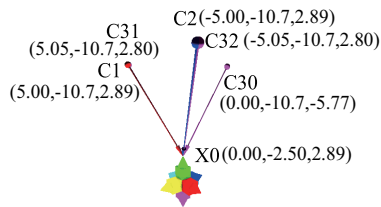


図 6 注目点 X_0 と視点配置

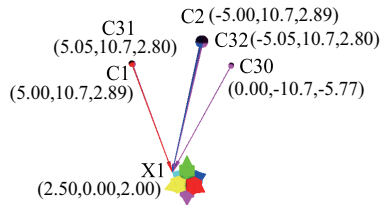


図 7 注目点 X_1 と視点配置

Output: 第 3 画像上の対応領域 $R_3(i_1, i_2)$

Step1 $F_{2,1} := F_{1,2}^T, G := \emptyset$ とする .

Step2 $(\alpha, \beta) \in \{(1, 2), (2, 1)\}$ に対し, 次の処理を行う .

(I) $\kappa = 0, 1, 2, 3$ に対し次の処理を行う .

(i) $\tau = 0, 1, 2, 3$ に対し次の処理を行う .

(1) $L_{\tau, \tau+1}^\beta$ を $v_\tau(i_\beta)$ と $v_{\tau+1}(i_\beta)$ を結ぶ線分とする .

(2) 画像 β において, 線分 $L_{\tau, \tau+1}^\beta$ とエピソード線 $v_\kappa(i_\alpha)^T F_{\beta, \alpha}^T x = 0$ の交点を求め, それを t とおく .

(3) 第 3 画像上の 2 本のエピソード線 $v_\kappa(i_\alpha)^T F_{\alpha, 3} x = 0$ と $t^T F_{\beta, 3} x = 0$ の交点を求め, G に加える .

Step3 G の凸包を求め, 得られた凸包の内部領域を対応領域 $R_3(i_1, i_2)$ とする .

上記アルゴリズムで必要となるのは, エピソード線と画素との交点を求める計算だけである . そのため, 画像間の基礎行列が既知であれば, すなわち, 弱校正されている画像を用いれば, 2次元画像上の計算のみで対応領域を決定することができる .

5. 実験と考察

提案手法の有効性を確認するため, 異なる解像度の弱校正された画像を用いて, 対応領域を予測する実験を行った .

実験状況は以下に示す通りである . まず, 空間内から任意に選んだ注目点に対し, 任意の 2 視点を選び, カメラパラメータを用いて画像を得る . 次に, 第 3 視点を空間内に配置し, 各視点間の基礎行列を得る . 第 1, 第 2 画像の離散化の後, 提案手法を用いて, 第 3 画像に対応領域を決定する . 本実験では, 第 1, 第 2 視点の位置を固定し, 第 3 視点は 3 通りの位置を, 注目点は 2 通りの位置をそれぞれ与えた . そして, 第 1 画像の解像度は固定し, 第 2 画像の解像度を变化させることで, 第 3 画像上に得られる対応領域がどのように変わるかを評価した . 初期配置として, 空間内での対称性を考慮し, 3 つの視点と注目点とが正四面体の頂点に一致するようにこれらの点を選んだ . さらに, 対応領域の第 3 視点位置への依存性を見るために第 3 視点の位置を第 1 視点位置の近傍と第 2 視点位置の近傍に配置して実験を行った . また, 注目点の位置をずらして対称性を崩し

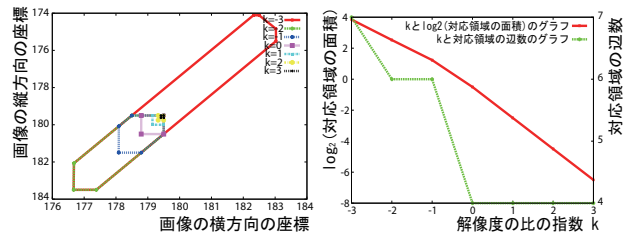


図 8 C_1, C_2, C_{30} を視点配置としたときの X_0 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

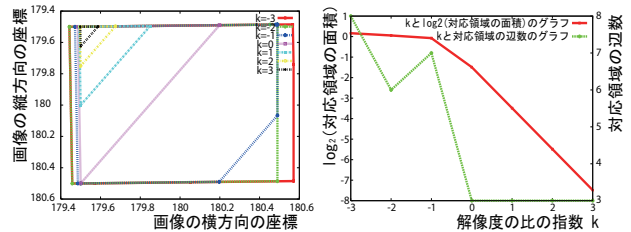


図 9 C_1, C_2, C_{31} を視点配置としたときの X_0 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

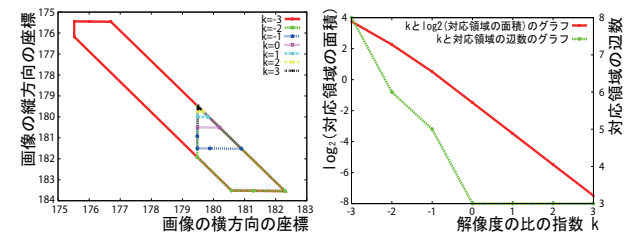


図 10 C_1, C_2, C_{32} を視点配置としたときの X_0 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

た場合に, 第 3 画像の対応領域にどのような変化が見られるかを調べた . 第 1 画像の解像度に対する第 2 画像の解像度比は $\{2^k; k = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ として実験を行った . 視点と注目点の配置を図 6, 7 に示す .

本実験では, 第 3 画像上の対応領域の形状と対応領域の面積, および辺数を求めた . その結果を図 8 ~ 13 に示す . ただし, 対応領域の形状変化のグラフは横軸に画像の横方向の座標, 縦軸に画像の縦方向の座標をとり, 面積変化のグラフは横軸に k , 縦軸に 2 を底とする面積の対数と辺数をとっている .

図 8 ~ 13 から, 解像度が高くなるにつれて, 対応領域の形状と面積が単調減少しており, 形状はある 1 点に, 面積は 0 にそれぞれ収束していくことが推測される . さらに, 対応領域の形状がある決まった方向から急激に小さくなっていることもわかる . また, 第 3 視点の位置と注目点の位置が同じでも, k の値によって対応領域の形状が異なることがわかる . これらは, 解像度変化によって視線錐の交わり方が変わることに起因していると考えられる .

また, 図 8, 10 と図 11, 13 から, 視点配置が異なるにも関わらず面積変化のグラフの形状はほとんど変化していないことが見て取れる . 図 9, 12 のようにある解像度まではあまり面積が変化せず, ある解像度のときに傾きが大きく変化する傾向も見られる . 特に, 第 1 視点の近傍に第 3 視点を配置した場合に

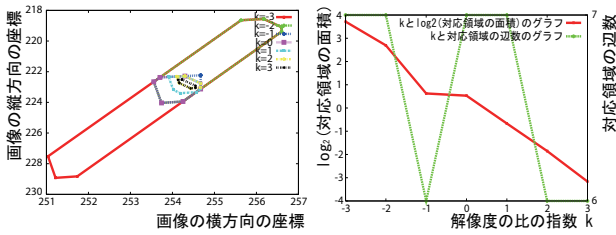


図 11 C_1, C_2, C_{30} を視点配置としたときの X_1 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

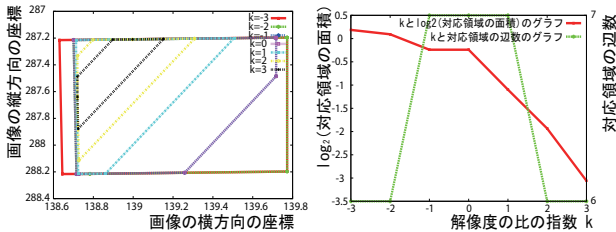


図 12 C_1, C_2, C_{31} を視点配置としたときの X_1 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

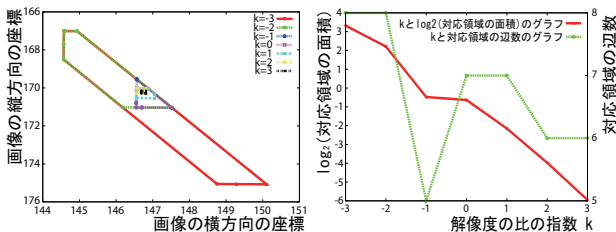


図 13 C_1, C_2, C_{32} を視点配置としたときの X_1 に関する対応領域の形状変化 (左) と各解像度における面積と辺数の変化 (右) .

は、第 2 画像がある解像度に達するまで対応領域の面積に大きな変化は起こらず、ある解像度に達した後は、グラフに見られるようにほぼ一定の傾きで減少している。このように変化する理由は次のように考えられる。第 2 画像の解像度が第 1 画像に比べて低い間は、空間内の視線錐の交差領域は第 1 視点からの視線錐によって概ね決定される。第 1 視点からの視線錐は第 1 画像には画素として投影されるので、第 1 視点近傍での対応領域はほぼ 1 画素分の形状として得られる。第 2 画像の解像度が高くなるにつれて、第 1 視点からの視線錐が第 2 視点からの視線錐に強く制約されるようにして視線錐の交差領域が決定される。そのため、第 1 視点近傍での対応領域は、1 画素分の形状が第 2 視点からの離散エピポーラ線で切り取られるようにして得られる。これにより、図 9, 12 のようになると考えられる。

一方、図 8, 9, 10 では、解像度の比の対数が -1 のときに傾きが変化し、図 11, 12, 13 では、解像度の比の対数が -2 から -1 にかけて大きく値が変化していることがわかる。これらから、第 3 視点の配置によらずに対応領域の面積に急激な変化が生じていることがわかる。また、同時に対応領域の辺数が変化していることもわかる。これらは、第 1 視点と第 2 視点の配置によって得られる変化であり、2 つの視線錐の交差領域には解像度変化によって段階的に形状変化が起こるだけでなく、ある解像度のときに 2 つの視線錐の交わり方が変化し、その結果、

対応領域の形状と面積に大きな変化が生じていると考えられる。

これらは、画素を画像の最小単位として扱うことで初めて現れる現象であり、点を画像の最小単位とした枠組みでは、気づくことはできなかった現象である。

6. おわりに

本稿では、弱校正された画像を用いて、画像の最小単位は画素であるということに重点をおいた議論を展開した。そして、2 つの手法を提案した。1 つ目は、第 1 画像上に画素が与えられたときに、その画素に対応する第 2 画像上の離散エピポーラ線を決定する手法である。2 つ目は、異なる 2 つの画像上に 1 組の対応画素が与えられたときに第 3 画像上の対応領域を決定する手法である。強校正された画像を扱うためにはユークリッド空間における 3 次元情報が必要となるが、弱校正された画像を扱うためには 3 次元情報を必要としない。本稿で提案した手法は全て 2 次元上での計算だけを必要としている。実際に、本稿で提案した手法が必要とされている計算は、2 次元画像上の点と線の交差を求めることだけである。そのため、離散エピポーラ線をより実用的なものにすることができたと考えられる。

実験によって、解像度や視点配置の変化によって対応領域の形状や面積が変化するという性質が得られた。これまでは、離散化誤差と観測誤差とを区別することなく、すべてノイズとして捉えられ、その振る舞いは統計的な立場でのみ議論されていた。しかし、提案手法により、離散化誤差のみによって影響される対応領域の範囲を正確に決定することができている。この範囲が一般的な状況でどのような性質を持つかを詳細に検討することは今後の課題として残されている。

文 献

- [1] Faugeras, O. and B. Mourrain, B.: On the geometry and algebra of the point and line correspondences between N images, *In Proc. International Conference on Computer Vision*, (1995), 951–956.
- [2] Faugeras, O. and Robert, L.: What can two images tell us about a third one?, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 18 (1996), 5–19.
- [3] 濱中雅俊, 剣持雪子, 杉本晃宏: 離散エピポーラ幾何とそれを用いた 3 次元復元, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), Vol. Vol. I (2004), 757–762.
- [4] Hamanaka, M., Kenmochi, Y. and Sugimoto, A.: Discrete epipolar geometry, *Proc. of The 12th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, (2005), 323–334.
- [5] Hartley, R.: Lines and points in three views and the trifocal tensor, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 22 (1997), 125–140.
- [6] Hartley, R. and Sturm, P.: Triangulation, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 68 (1997), 146–157.
- [7] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [8] Heyden, A.: A common framework for multiple view tensors, *Proc. ECCV'98*, 3–19.
- [9] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [10] Stewenius, H., Schaffalitzky, F. and Nister, D.: How hard is 3-view triangulation really?, *Proc. of The 10th International Conference on Computer Vision (ICCV2005)*, Vol. 1 (2005), 686–693.
- [11] 佐藤淳: コンピュータビジョン: 視覚の幾何学, コロナ社, 1999.