

離散直線組の対応を利用した第 3 画像上の対応領域予測

夏見拓明[†] 杉本晃宏^{††}

[†] 千葉大学大学院融合科学研究科 (現在: ALSOK 総合警備保障株式会社)

^{††} 国立情報学研究所 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

E-mail: ^{††}sugimoto@nii.ac.jp

あらまし 注目点と 3 視点画像間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重要性が指摘され、注目点の投影像である対応画素対が 2 枚の画像上に与えられたとき、画素対に対応する第 3 画像上の領域を求める手法が提案されている。本稿では、画素を 2 つの離散直線の交わりとして捉えることで、対応画素対に対応する第 3 画像上の領域をより正確に限定する手法を提案する。提案手法では、まず、2 枚の画像上に対応する離散直線対が与えられたとき、離散直線対に対応する第 3 画像上の領域を求める。そして、与えられた対応画素対を交わりとする 2 組の対応離散直線対を考え、それぞれから得られる第 3 画像上の 2 つの領域の積集合を求めることによって画素対に対応する領域を決定する。

キーワード 3 視点幾何, 直線対応, 離散直線, 対応直線領域.

Predicting the Corresponding Region in a Third View from Discrete Line Correspondences in Two Views

Hiroaki NATSUMI[†] and Akihiro SUGIMOTO^{††}

[†] Chiba University 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

^{††} National Institute of Informatics 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda, Tokyo 101-8430, Japan

E-mail: ^{††}sugimoto@nii.ac.jp

Abstract The importance of building up the geometric relationships between pixels in different views has been pointed out in order to directly deal with pixels in digital images. A method was then proposed to identify the corresponding region in a third view from a given pair of corresponding pixels in two views. This paper extends the method, proposing to identify the corresponding region in a third view from a given pair of corresponding discrete lines in two views. We also show that representing a given pixel as the intersection of two discrete lines allows us to identify the corresponding region more precisely.

Key words three-view geometry, line correspondence, discrete line, corresponding line-region.

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野では、3 次元形状復元や物体認識といった主要課題に取り組むための基礎の 1 つとして、複数の視点から得られる画像間の対応関係を幾何学的に解析する研究が進められている [14], [17], [21]. 特に、2 視点画像に対してはエピポーラ幾何が、3 視点画像に対しては 3 視点幾何がそれぞれ知られている [3] ~ [5], [8] ~ [13], [22] ~ [24]. そして、複数の画像間の点同士の対応関係や直線同士の対応関係を利用した 3 次元形状復元などの手法が構築されている。

一方、計算機が扱うことができるのは有限の面積をもつ画素で構成された離散画像 [1], [2], [15], [18] であり、ここでは点を直接扱うことができない。そのため、離散画

像から推定された点の座標や直線の方程式等には画像の離散化に起因する誤差が含まれる。このような離散化誤差の存在を前提とした議論を行うために、濱中らは、離散エピポーラ幾何を提案した [6], [7]. そこでは、エピポーラ幾何を離散の立場から数学的に再定義し、離散化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。また、夏見らは 2 枚の画像上に対応画素対が与えられたとき、画素対に対応する第 3 画像上の領域を求める手法を提案した [19], [20]. 夏見らはこの領域を対応領域と呼び、対応点の座標に含まれる離散化誤差の伝播を対応領域として示した。そして、対応領域の形状や面積が視点の配置やカメラの内部パラメタ等によって変化することを指摘した。しかしながら、夏見らの手法は、点の投影像を画素として従来の点对応 3 視点幾何を離散の立

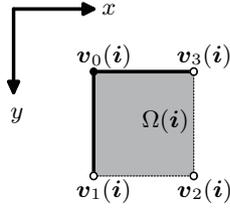


図 1 画素座標 i をもつ画素の 4 頂点 $v_\kappa(i)$ と領域 $\Omega(i)$.

場で数学的に再定義したにすぎず，離散幾何や 3 視点幾何の性質が十分に利用されていない．そのため，対応領域予測の際に用いられる拘束が十分ではなく，また，離散画像を対象とした 3 視点幾何に関する議論が未だ十分に行われていないのが現状である．

本稿では，2 直線の交わりとして点を，2 つの離散直線の交わりとして画素をそれぞれ捉え，第 3 画像上の対応領域を夏見らの手法よりも正確に限定する手法を提案する．離散画像上において，直線が通過する画素の集合をその直線の離散直線とよぶが，離散直線を決定する直線の存在範囲は離散直線を構成する画素の集合が示す領域に包含される．この性質を利用すれば，2 つの離散直線を決定するそれぞれの直線の存在範囲の積集合を考えると，この積集合は 2 つの離散直線の交わりである画素が示す領域よりも正確に 2 直線の交点の存在範囲を限定することができる．そのため，画素を離散直線の交わりとして捉え，2 つの離散直線を決定する直線の存在範囲の積集合を扱うことで，第 3 画像上の対応領域を夏見らの手法よりも正確に限定できる．離散画像を扱う限り，この対応領域以上の精度で対応点の位置を求めることは原理的に不可能であり，この領域は，対応点探索の精度限界を与えるものである．

2. 離散画像上の直線

2.1 画像の離散化

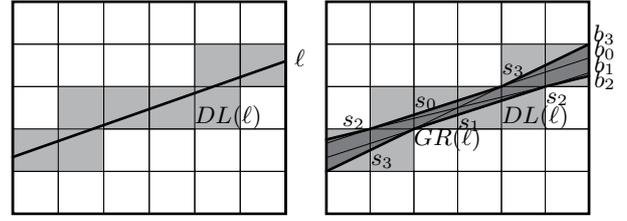
本稿では，画素によって構成される離散画像を対象とする．ここでは，本稿で用いる画像の離散化モデルについて説明する．

ある画像 I 上に与えられた点の同次座標を $x = (x, y, 1)^\top$ とする．このとき， x を含む画素の座標として $i = (i, j)^\top$ を

$$i = \left[r_x x - c_x + \frac{1}{2} \right], j = \left[r_y y - c_y + \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

によって定義する．以後，これを画素座標と呼ぶ．ここで r_x, r_y はそれぞれ x 軸， y 軸方向の解像度であり， c_x, c_y は画像中心の座標である．また， $[x]$ は床関数で，実数 x に対して， x を超えない最大の整数を値にとる．以上の離散化を画像 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 $i = (i, j)^\top$ である画素が占める領域 $\Omega(i)$ は長方形であり，その領域は容易に求まる．この領



(a) 直線 l から得られる離散直線 $DL(\ell)$.

(b) 離散直線 $DL(\ell)$ の生成領域 $GR(\ell)$ の境界 s_κ と境界直線 b_κ .

図 2 直線 l の離散直線 $DL(\ell)$ と $DL(\ell)$ の生成領域 $GR(\ell)$ の境界 s_κ と境界直線 b_κ .

域を決定する 4 頂点を画素の端点と呼び，その同次座標 $v_\kappa(i) \in I$ ($\kappa = 0, 1, 2, 3$) を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} v_0(i) &= \left(\frac{1}{r_x} \left(i + c_x - \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + c_y - \frac{1}{2} \right), 1 \right)^\top, \\ v_1(i) &= \left(\frac{1}{r_x} \left(i + c_x - \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + c_y + \frac{1}{2} \right), 1 \right)^\top, \\ v_2(i) &= \left(\frac{1}{r_x} \left(i + c_x + \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + c_y + \frac{1}{2} \right), 1 \right)^\top, \\ v_3(i) &= \left(\frac{1}{r_x} \left(i + c_x + \frac{1}{2} \right), \frac{1}{r_y} \left(j + c_y - \frac{1}{2} \right), 1 \right)^\top. \end{aligned}$$

ただし，式 (1) により，図 1 に示すように $v_0(i)$ だけが画素が占める領域 $\Omega(i)$ 内に含まれる．

この離散化モデルにより，画像上の点から一意に画素を決定できる．一方，離散画像上の画素から画像上の点を一意に決定することはできない．そのため，通常は画素の中心の点や画素の端点によって，画像上の点を近似することになる．この近似による誤差は画像の離散化に起因するものであり，離散化誤差と呼ばれる．離散画像の解像度が高いほど離散化誤差は小さくなるが決してゼロにはならない．

2.2 直線と離散直線

本稿で扱う直線 l とは，一次方程式 $ax + by + c = 0$ (ただし $a^2 + b^2 \neq 0$) の係数ベクトル $\ell = (a, b, c)^\top$ によって次のように定義される点の集合とする．

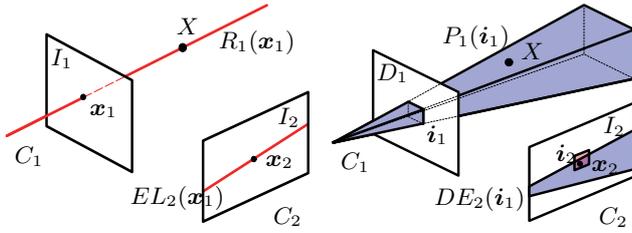
$$l = \{ x \mid \ell^\top x = 0, \forall x \in I \}$$

本稿で扱う離散直線 $DL(\ell)$ は，図 2(a) に示すように，直線 l と交差する画素の集合とする [2]．すなわち，

$$DL(\ell) = \{ i \mid \Omega(i) \cap l \neq \emptyset, \forall i \in D \}.$$

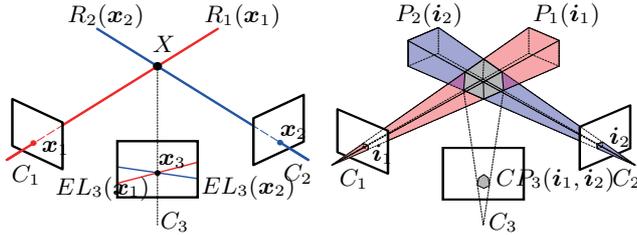
離散直線 $DL(\ell)$ は画像 I 上の直線 l から一意に決定される．

次に，離散直線 $DL(\ell)$ が与えられたとき，それを決定する直線 l を推定することを考える．離散直線 $DL(\ell)$ を決定する直線 l は無限に存在するが，与えられた離散直



(a) 視線 $R_1(x_1)$ とエピポーラ線 $EL_2(x_1)$. (b) 視線錐 $P_1(i_1)$ と離散エピポーラ線 $DE_2(i_1)$.

図 3 注目点 X と 2 視点 C_1, C_2 での対応点 x_1, x_2 のエピポーラ線と離散エピポーラ線.



(a) 視線の交差 $R_1(x_1) \cap R_2(x_2)$ と対応点 x_3 . (b) 視線錐の積集合 $P_1(i_1) \cap P_2(i_2)$ と対応領域 $CP_3(i_1, i_2)$.

図 4 従来の 3 視点幾何と離散画像を対象とした 3 視点幾何.

線 $DL(\ell)$ を決定する直線 ℓ が存在する領域 $GR(\ell)$ は限定される [16]. 本稿では, この領域 $GR(\ell)$ を生成領域と呼ぶことにし, 直線 ℓ を用いて次のように定義する.

$$GR(\ell) = \{x \mid \forall x \in \exists \ell', DL(\ell') = DL(\ell), x \in I\}$$

離散直線 $DL(\ell)$ の生成領域 $GR(\ell)$ の境界は, 図 2(b) に示すように区分線形であり, 境界の各区分は半直線あるいは線分によって表現される. 本稿では, 生成領域の境界の区分 s_κ を表現する線分や半直線を表す直線 b_κ を境界直線と呼ぶことにする.

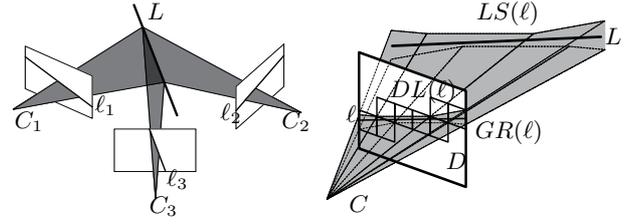
3. 離散直線の対応と対応直線領域

濱中ら [6], [7] は, 視点を頂点とし, 画素を断面にもつ無限の高さを有する錐体を視線錐と定義した. そして, 図 3 のような視線錐の投影像として離散エピポーラ線を提案し, 2 視点の場合の対応点探索の際に含まれる離散化誤差の伝播を議論した. また, 夏見ら [19], [20] は, 2 視点の投影像上に対応画素が与えられたとして, 図 4 に示すように, 2 つの視線錐の積集合の第 3 視点への投影像として対応領域を捉え, 3 視点の場合の対応点決定の際に含まれる離散化誤差の伝播を議論した.

ここでは, 直線を対象として, 3 視点間の直線同士の対応に含まれる離散化誤差の伝播を解析する.

3.1 3 焦点テンソルを用いた直線同士の対応

従来の 3 視点幾何では, 3 視点間の対応直線 l_1, l_2, l_3



(a) 3 次元空間内の直線 L と 3 視点 C_1, C_2, C_3 の対応直線 l_1, l_2, l_3 の対応関係. (b) 3 次元空間内の直線 L と視点 C から得られる離散直線 $DL(\ell)$ の生成領域 $GR(\ell)$ と直線拘束空間 $LS(\ell)$.

図 5 画像上の直線と離散直線による 3 次元空間内の直線 L の拘束.

の関係は 3 視点間の 3 焦点テンソル T_i^{jk} を用いて次式で表される [10].

$$l_{3i} = l_{1j}l_{2k}T_i^{jk}. \quad (2)$$

ここで, l_{3i} は直線 l_3 の方程式の係数ベクトルの第 i 成分である. 式 (2) で表される対応直線 l_1, l_2, l_3 の幾何学的な意味を図 5(a) に示す. 2 視点 C_1, C_2 と対応直線 l_1, l_2 とによって張られる 2 平面の交線として 3 次元空間内の直線 L が定まり, 直線 L の第 3 視点への投影像と対応直線 l_3 とが一致する.

3.2 対応離散直線対の直線拘束空間と第 3 視点の対応直線領域

3 次元空間内の直線 L と視点 C が与えられ, 直線 L が視点 C の画像 I 上の直線 ℓ として投影され, 離散画像 D 上の離散直線 $DL(\ell)$ が得られたとする. 離散直線 $DL(\ell)$ の生成領域を $GR(\ell)$ とすると, 視点 C と生成領域 $GR(\ell)$ によって空間 $LS(\ell)$ が得られる. この空間 $LS(\ell)$ は視点 C と生成領域 $GR(\ell)$ の境界によって張られる面に挟まれた空間である. 本稿では, 視点 C と生成領域 $GR(\ell)$ の境界によって張られる面を境界面と呼び, 境界面に挟まれた空間 $LS(\ell)$ を直線拘束空間と呼ぶことにする. このとき, 3 次元空間内の直線 L は, 図 5(b) に示すように直線拘束空間 $LS(\ell)$ の内部に含まれる.

$$L \subseteq LS(\ell).$$

3 次元空間内に 2 視点 C_1, C_2 が与えられた場合, 各視点から得られる直線拘束空間 $LS_1(l_1), LS_2(l_2)$ と直線 L との間には次の関係が成り立つ.

$$L \subseteq (LS_1(l_1) \cap LS_2(l_2)).$$

これは 2 視点の対応離散直線対によって直線 L の存在する範囲を拘束するものであり, 推定される直線 L に伝播する離散化誤差の影響を表している. ここで, 直線拘束空間の積集合 $LS_1(l_1) \cap LS_2(l_2)$ の第 3 視点 C_3

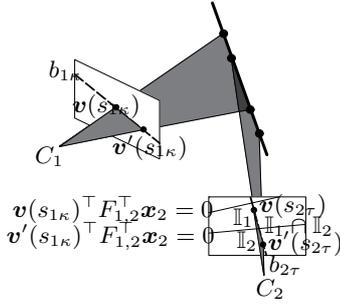


図 6 境界直線 $b_{1\kappa}, b_{2\tau}$ 上の境界の端点 $v(s_{1\kappa}), v'(s_{1\kappa}), v(s_{2\tau}), v'(s_{2\tau})$ によって得られる境界直線 $b_{2\tau}$ 上の区間 $\mathbb{I}_1, \mathbb{I}_2$ による境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の有無の判定。

への投影像 $CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2))$ を本稿では対応直線領域と呼ぶことにする。このとき、直線 L の第 3 視点 C_3 への投影像 l_3 と第 3 視点 C_3 での対応直線領域 $CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2))$ には次の関係が成り立つ。

$$l_3 \subseteq CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2)).$$

これは 2 視点の対応離散直線対によって第 3 視点での対応直線 l_3 の存在する範囲を決定するものである。対応直線 l_3 が一意に求まらないのは、対応離散直線に含まれる離散化誤差の伝播によるためである。

4. 対応直線領域の決定

ここでは、対応直線領域 $CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2))$ を決定する手法について説明する。提案手法では、直線拘束空間の積集合 $LS_1(l_1) \cap LS_2(l_2)$ の境界、すなわち、2 視点 C_1, C_2 から張られる境界面 $BP_{1\kappa}, BP_{2\tau}$ の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の第 3 視点での投影像を求める。この投影像は対応直線領域 $CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2))$ の境界であるため、求めた第 3 視点での投影像に挟まれた領域として、対応直線領域 $CL_3(DL_1(l_1), DL_2(l_2))$ が求められる。まず、境界面の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の有無を判定する方法について説明し、続いて境界面の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の第 3 視点での投影像を求める方法について説明する。

4.1 境界面同士の交線の有無の判定

まず、境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在するかどうかを考える。境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在するか否かの判定は、2 視点 C_1, C_2 上の境界直線を利用することで可能となる。以下では境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在するか否かの判定を第 2 視点 C_2 上で行う方法について説明するが、第 1 視点 C_1 と第 2 視点 C_2 の役割を換えても同様の判定が可能である。なお、ここでは 2 視点 C_1, C_2 間の基礎行列 $F_{1,2}$ は既知であるとする。

最初に第 1 視点 C_1 での境界直線 $b_{1\kappa}$ で定められる境界 $s_{1\kappa}$ の端点の同次座標 $v(s_{1\kappa})$ を求める。端点 $v(s_{1\kappa})$ は $b_{1\kappa}$ と交わる境界直線 $b_{1\kappa}'$ との交点であるため、境界直

線 $b_{1\kappa}, b_{1\kappa}'$ を連立させることで境界 $s_{1\kappa}$ の端点 $v(s_{1\kappa})$ を求めることができる。境界 $s_{1\kappa}$ が線分である場合には他方の端点 $v'(s_{1\kappa})$ を求め、半直線である場合には $s_{1\kappa}$ 上の任意の点 $v'(s_{1\kappa}) \neq v(s_{1\kappa})$ を求める。同様にして、第 2 視点 C_2 での境界直線 $b_{2\tau}$ で定められる境界 $s_{2\tau}$ 上の 2 点 $v(s_{2\tau}), v'(s_{2\tau})$ を求める。

次に、境界面 $BP_{1\kappa}, BP_{2\tau}$ を第 2 視点に投影することで得られる境界直線 $b_{2\tau}$ 上のそれぞれの区間 $\mathbb{I}_1, \mathbb{I}_2$ を求める。まず境界 $s_{1\kappa}$ 上の 2 点 $v(s_{1\kappa}), v'(s_{1\kappa})$ に対応する第 2 視点 C_2 へのエピポーラ線 $v(s_{1\kappa})^\top F_{1,2}^\top x_2 = 0, v'(s_{1\kappa})^\top F_{1,2}^\top x_2 = 0$ と境界直線 $b_{2\tau}$ との交点 $v_2(\kappa, \tau), v_2'(\kappa, \tau)$ を求める。境界 $s_{1\kappa}$ が線分の場合には、境界直線 $b_{2\tau}$ 上の交点 $v_2(\kappa, \tau), v_2'(\kappa, \tau)$ によって得られる線分が区間 \mathbb{I}_1 となる。境界 $s_{1\kappa}$ が半直線の場合には、 $v_2(\kappa, \tau)$ を端点とし、境界直線 $b_{2\tau}$ 上の $v_2'(\kappa, \tau)$ が存在する方の半直線が区間 \mathbb{I}_1 となる。一方、境界 $s_{2\tau}$ の 2 点 $v(s_{2\tau}), v'(s_{2\tau})$ によって、境界直線 $b_{2\tau}$ によって定められる境界 $s_{2\tau}$ を示す区間 \mathbb{I}_2 が得られる。

得られた 2 つの区間の積集合 $\mathbb{I}_1 \cap \mathbb{I}_2$ は境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の第 2 視点 C_2 への投影像となる。そのため、境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在するか否かを判定するためには、 $\mathbb{I}_1 \cap \mathbb{I}_2$ が空集合であるか否かを判定すればよい。この判定法の模式図を図 6 に示す。

4.2 境界面同士の交線の第 3 視点への投影

ここでは境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在する場合の $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の第 3 視点 C_3 への投影について説明する。

2 視点 C_1, C_2 の境界直線 $b_{1\kappa}, b_{2\tau}$ の方程式の係数ベクトルの第 j 成分を $b_{1\kappa j}, b_{2\tau j}$ と表し、式 (2) に境界直線 $b_{1\kappa}, b_{2\tau}$ を適用すると、

$$l'_{3i}(\kappa, \tau) = b_{1\kappa j} b_{2\tau k} T_i^{jk} \quad (3)$$

で表される第 3 視点 C_3 の画像 I_3 上の直線 $l'_{3i}(\kappa, \tau)$ が求まる。ここで、 $l'_{3i}(\kappa, \tau)$ は直線 $l'_{3i}(\kappa, \tau)$ の方程式の係数ベクトルの第 i 成分である。式 (3) で求まる直線 $l'_{3i}(\kappa, \tau)$ は、2 視点 C_1, C_2 の境界直線 $b_{1\kappa}, b_{2\tau}$ によって生成されるそれぞれの平面 $\Pi_{1\kappa}, \Pi_{2\tau}$ の交線 $L'(\kappa, \tau) = \Pi_{1\kappa} \cap \Pi_{2\tau}$ を第 3 視点に投影したものである。

視点 C_1 の対応離散直線 $DL_1(l_1)$ の生成領域 $GR_1(l_1)$ の境界 $s_{1\kappa}$ はそれぞれの境界直線 $b_{1\kappa}$ に含まれる線分と半直線 $s_{1\kappa}$ であり、図 2(b) にあるように

$$s_{1\kappa} \subseteq b_{1\kappa}$$

が成り立つ。そのため、視点 C_1 と境界 $s_{1\kappa}$ によって張られる境界面 $BP_{1\kappa}$ は、視点 C_1 と境界直線 $b_{1\kappa}$ によって張られる平面 $\Pi_{1\kappa}$ に含まれる。すなわち、

$$BP_{1\kappa} \subseteq \Pi_{1\kappa}$$

が成り立つ。このことから、境界面の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$

表 1 3 視点 C_1, C_2, C_3 の位置の極座標表示 .

視点	r	θ	ϕ
C_1	2	$\pi/2 - i\pi/12$ ($i = 1, \dots, 5$)	0
C_2	2	$\pi/2 + i\pi/12$ ($i = 1, \dots, 5$)	0
C_3	2	$j\pi/12$ ($j = 1, \dots, 6$)	$k\pi/12$ ($k = 0, \dots, 12$)

表 2 直線 L, L' の単位方向ベクトル L, L' の極座標表示 .

直線	r	θ	ϕ
L	1	$\pi/2 - \theta_0$ ($\theta_0 = \pi/12, \pi/6, \pi/4$)	$\pi/2$
L'	1	$\pi/2 + \theta_0$ ($\theta_0 = \pi/12, \pi/6, \pi/4$)	$\pi/2$

は $L'(\kappa, \tau) = \Pi_{1\kappa} \cap \Pi_{2\tau}$ に含まれることがわかる . すなわち ,

$$(BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}) \subseteq L'(\kappa, \tau)$$

が成り立つ . よって , 境界面の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ の第 3 視点 C_3 の画像 I_3 への投影像は $L'(\kappa, \tau)$ の I_3 への投影像に含まれる . $L'(\kappa, \tau)$ の I_3 への投影像は式 (3) で得られる $\ell'_3(\kappa, \tau)$ に他ならないので , 対応直線領域 $CL_3(DL_1(\ell_1), DL_2(\ell_2))$ の境界は , 直線 $\ell'_3(\kappa, \tau)$ に含まれている . そのため , 式 (3) から得られる直線 $\ell'_3(\kappa, \tau)$ に挟まれた領域として対応直線領域 $CL_3(DL_1(\ell_1), DL_2(\ell_2))$ を決定することができる .

なお , 境界面 $BP_{1\kappa}, BP_{2\tau}$ はそれぞれ境界直線 $b_{1\kappa}, b_{2\tau}$ 上の線分や半直線である境界 $s_{1\kappa}, s_{2\tau}$ によって定義されるため , $L'(\kappa, \tau) = \Pi_{1\kappa} \cap \Pi_{2\tau}$ が存在しても , 境界面 $BP_{1\kappa}$ と $BP_{2\tau}$ が交わらない可能性がある . この場合 , 境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ は存在しないため , 直線 $\ell'_3(\kappa, \tau)$ を考慮する必要がなくなる . そのため , 境界面同士の交線 $BP_{1\kappa} \cap BP_{2\tau}$ が存在する場合のみ直線 $\ell'_3(\kappa, \tau)$ を計算することで対応直線領域 $CL_3(DL_1(\ell_1), DL_2(\ell_2))$ が求められる .

5. 対応直線領域を利用した対応点の予測実験

本稿で提案した手法の有効性を確認するため , 対応直線領域を利用した第 3 画像上の対応点存在領域の予測を行った . 3 次元空間内で交わる 2 つの直線とその交点を注目する対象とし , 第 3 画像上に得られる 2 つの対応直線領域の積集合によって対応点の存在範囲を限定する実験を行った . そして , 夏見らの手法 [19], [20] によって得られる対応領域との比較を行い , 提案手法の有効性を確認した .

5.1 実験環境

3 次元空間内の原点 X を通る直線 L, L' の単位方向ベクトルを L, L' とし , 2 直線とその交点 X を注目する対象とする . 第 3 視点 C_3 での対応直線 ℓ_3, ℓ'_3 の存在範囲を限定する対応直線領域 CL, CL' を計算し , $CL \cap CL'$ を求める . そして , 夏見らの手法 [19], [20] によって求まる対応領域 CP との比較を行う .

表 3 3 視点 C_1, C_2, C_3 の内部カメラパラメータ .

内部カメラパラメータ	C_1	C_2	C_3
r_x	360	360	360
r_y	360	360	360
f	1	1	1
c_x	180	180	180
c_y	180	180	180

実験では , 原点を中心とする半径 2 の球面上に 3 視点 C_1, C_2, C_3 を配置し , 視点配置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応点領域 CP の面積変化を調べる . 3 視点 C_1, C_2, C_3 の位置を極座標表示で表 1 に示す . 2 視点 C_1, C_2 の緯度を対称に変化させ , 第 3 視点 C_3 の緯度と経度を変化させることで 3 視点 C_1, C_2, C_3 を配置を変化させることとする . なお , 3 視点 C_1, C_2, C_3 の光軸は常にそれぞれの視点から原点 X に向かっているとす .

また , 2 直線 L, L' のなす角度の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化を調べる . 2 直線 L, L' の単位方向ベクトル L, L' を極座標表示で表 2 に示す . 実験では , それぞれの直線 L, L' の傾き ϕ_0 を対称に変化させ , 2 直線 L, L' のなす角度を $\pi/12, \pi/6, \pi/4$ とする . そして ϕ_0 毎に 3 視点 C_1, C_2, C_3 の配置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化を調べ , 比較する .

なお , 本実験で用いる視点の内部カメラパラメータ , すなわち , 解像度 r_x, r_y , 焦点距離 f , 画像中心 $(c_x, c_y)^T$ の値をそれぞれ表 3 に示す .

以上の値を用いて , 倍精度での数値計算を行う .

5.2 実験結果

2 直線 L, L' のなす角度の変化および 3 視点 C_1, C_2, C_3 の配置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP のそれぞれの面積の変化の様子を図 7, 8, 9 に示す . 図 7, 8, 9 は , 第 3 視点 C_3 の経度 $\phi_3 = k\pi/12$ ($k = 0, \dots, 12$) を横軸に , 対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積を縦軸にしたグラフであり , 第 3 視点 C_3 の緯度 $\theta_3 = j\pi/12$ ($j = 1, \dots, 6$) 毎に色を変えてプロットしている . 図 7 は , $\theta_0 = \pi/12$ のとき , すなわち , 2 直線 L, L' のなす角度が $\pi/6$ のときの対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積を , 2 視点 C_1, C_2 のそれぞれの緯度 $\theta_1 = \pi/2 - i\pi/12, \theta_2 = \pi/2 + i\pi/12$ ($i = 1, \dots, 5$) 毎にプロットしたものである . 図 7(a), 7(b) はそれぞれ $i = 1$ のときの対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積の変化を表す . 図 7(c) ~ 7(j) はそれぞれ $i = 2, \dots, 5$ のときの対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化を表す . 同様に , 図 8, 9 はそれぞれ $\theta_0 = \pi/6, \pi/4$ のとき , すなわち , 2 直線 L, L' のなす角度が $\pi/4, \pi/2$ のときのグラフである .

また、対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP による対応点予測の一例を図 10 に示す。図 10(a), 10(c), 10(e) は第 3 視点 C_3 の画像の一部であり、2 直線 L, L' の投影像 ℓ, ℓ' の交点、すなわち対応点近辺の対応直線領域 CL, CL' と対応領域 CP の境界を示している。図 10 の縦軸と横軸はそれぞれ画像の縦方向の座標と横方向の座標を表しており、縦横それぞれ 10 倍ずつ拡大した図も併せて示す。

5.3 考察

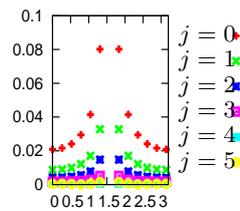
図 7, 8, 9 から、特殊な視点配置に無い限り対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ の面積が対応領域 CP の面積よりも小さくなる事が確認できる。ここで、 $\phi_3 = \pi/2$ の場合に対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ の面積が発散していることが確認できるが、これは、第 3 視点 C_3 と 2 直線 L, L' が同一平面上に存在する場合であり、2 直線 L, L' が重なって第 3 画像上に投影される。そのため、第 3 画像上の対応直線領域 CL, CL' が包含されるように重なってしまい、対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ の面積が無限大に発散すると考えられる。

図 10 から、対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP のそれぞれの内部に対応点を拘束していること、さらに、 $CP \supseteq (CL \cap CL')$ となっていることが確認できる。そのため、対応直線領域を用いることで対応領域よりも正確に対応点存在領域を限定できているといえる。これは以下の理由で説明できる。視点 C_1 では、1 つの画素で交わる 2 つの離散直線 $DL_1(\ell_1), DL_1(\ell'_1)$ の生成領域 $GR(\ell_1), GR(\ell'_1)$ の積集合によって、対応画素が示す領域 $\Omega(i_1)$ よりも正確に視点 C_1 での対応点の存在範囲を限定している。視点 C_2 でも同様に対応点の存在範囲を限定している。そのため、1 つの画素で交わる対応離散直線組を利用することで、対応画素から得られる第 3 視点 C_3 上の対応領域よりも正確に対応点の存在範囲を限定できることになる。

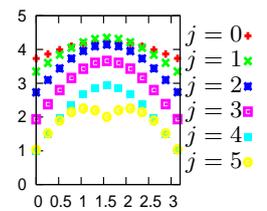
また、図 10 から、同一の視点配置であっても、2 直線 L, L' の傾きの変化によって第 3 画像上の対応直線領域 CL, CL' の広さが変化していることが確認できる。これは、2 直線 L, L' の傾きの変化によって 2 視点 C_1, C_2 に得られる離散直線が変化し、離散直線の生成領域の広さが変化したためであると考えられる。生成領域が広くなれば、直線拘束空間が広がるため、対応直線領域も広がる。そのため、2 直線 L, L' の傾きの変化によって対応直線領域 CL, CL' の広さが変化し、視点配置が変化しなくても対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ の面積が変化すると考えられる。

6. おわりに

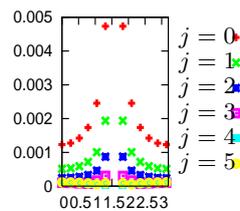
本稿では、2 枚の画像に与えられた対応離散直線対から第 3 画像上の対応直線領域を得る手法を提案した。これにより、従来の 3 視点幾何の直線予測の際の離散化誤



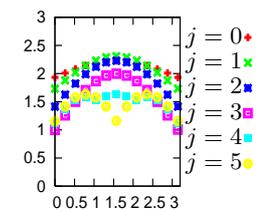
(a) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化。



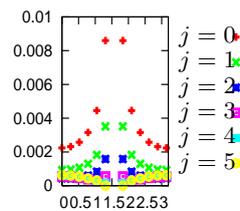
(b) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化。



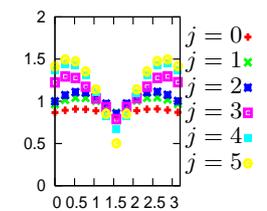
(c) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化。



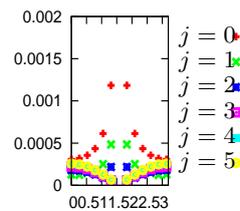
(d) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化。



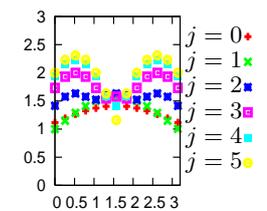
(e) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化。



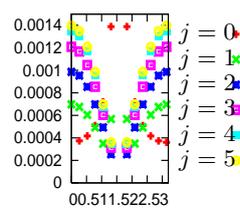
(f) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化。



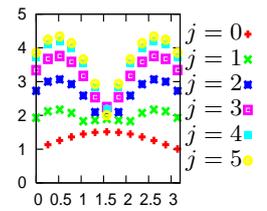
(g) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化。



(h) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化。

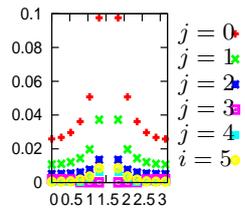


(i) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化。

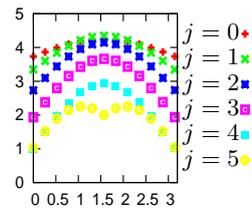


(j) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化。

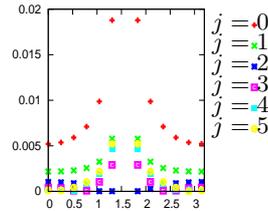
図 7 $\theta_0 = \pi/12$ での第 3 視点 C_3 の位置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化。



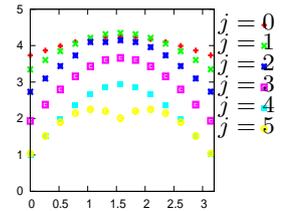
(a) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



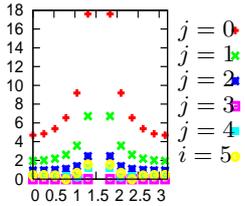
(b) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



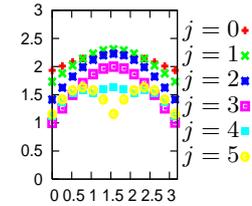
(a) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



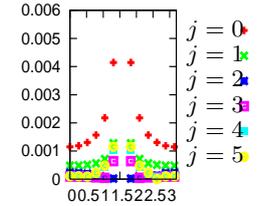
(b) $i = 1$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



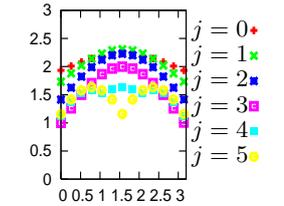
(c) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



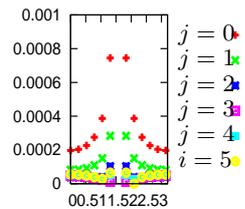
(d) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



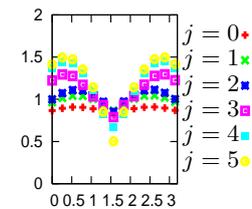
(c) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



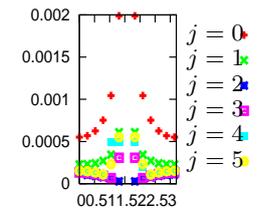
(d) $i = 2$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



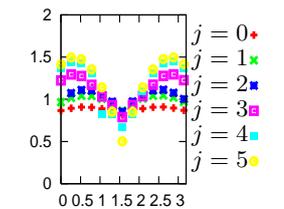
(e) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



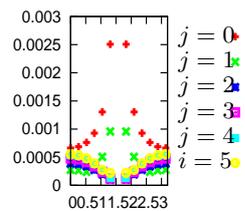
(f) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



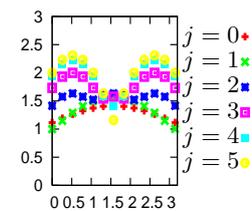
(e) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



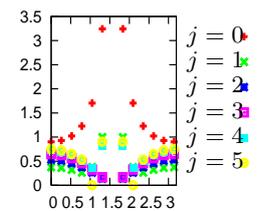
(f) $i = 3$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



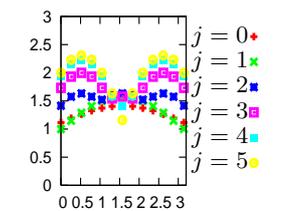
(g) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



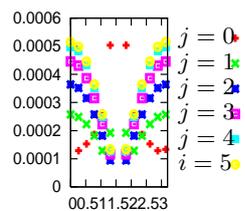
(h) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



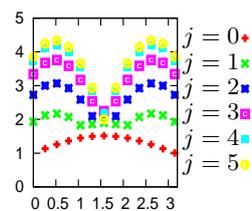
(g) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



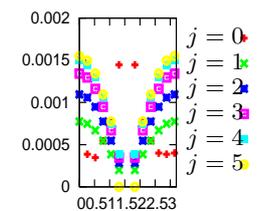
(h) $i = 4$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



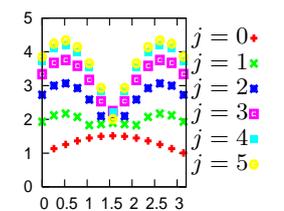
(i) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



(j) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .



(i) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う $CL \cap CL'$ の面積変化 .



(j) $i = 5$ での ϕ_3 の変化に伴う CP の面積変化 .

図 8 $\theta_0 = \pi/6$ での第 3 視点 C_3 の位置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化 .

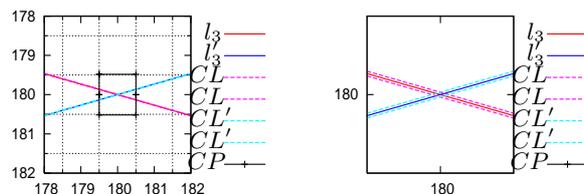
図 9 $\theta_0 = \pi/4$ での第 3 視点 C_3 の位置の変化に伴う対応直線領域の積集合 $CL \cap CL'$ と対応領域 CP の面積変化 .

差の伝播を厳密に計算することができる。また、実験によって、視点の位置による対応直線領域の変化や、直線の傾きによる対応直線領域の大きさの変化が確認された。さらに、交差する2直線とその交点を注目する対象とした場合に、対応直線領域を利用することで、夏見らの手法 [19], [20] よりも厳密に第3画像の対応点の存在範囲を限定できることが確認された。

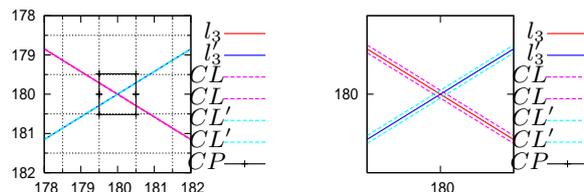
今後の課題として、対応直線領域の解析に加え、対応直線領域を利用した対応点の拘束の解析が挙げられる。また、本研究では既知として扱った3焦点テンソルの推定、離散画像を用いた4視点の場合の拘束の解析、なども挙げられる。

文 献

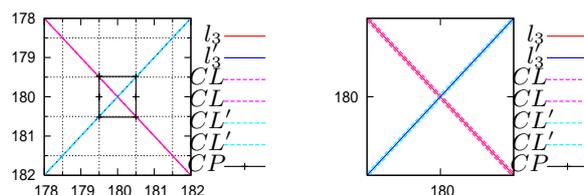
- [1] Andres, E.: Discrete linear objects in dimension n : the standard model, *Graphical Models*, Vol. 65 (2003), 92–111.
- [2] Andres, E., Nehlig, P., and Francon, J.: Supercover of straight lines, planes and triangles, *LNCS*, Vol. 1347 (1997), 243–254.
- [3] Faugeras, O. and B. Mourrain, B.: On the geometry and algebra of the point and line correspondences between N images, *In Proc. 5th International Conference on Computer Vision*, (1995), 951–956.
- [4] Faugeras, O. and Mourrain, B.: About the correspondences of points between N images, *In Proc. IEEE Workshop on Representation of Visual Scenes, 1995. (In Conjunction with ICCV'95)*, (1995), 37–44.
- [5] 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.
- [6] 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. I (2004), 757–762.
- [7] Hamanaka, M., Kenmochi, Y., and Sugimoto, A.: Discrete epipolar geometry, *In Proc. 12th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, (2005), 323–334.
- [8] Hartley, R.: Lines and points in three views - an integrated approach, *In Proc. Image Understanding Workshop*, (1994), 1009–1016.
- [9] Hartley, R.: Lines and points in three views and the trifocal tensor, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 22 (1997), 125–140.
- [10] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [11] Heyden, A.: Reconstruction and prediction from three images of uncalibrated cameras, *In Proc. 9th Scandinavian Conference on Image Analysis, Ed. Gunnilla Borgefors, Uppsala, Sweden*, (1995), 57–66.
- [12] Heyden, A.: A common framework for multiple view tensors, *In Proc. 5th European Conference on Computer Vision*, Vol. 1 (1998), 3–19.
- [13] Heyden, A.: Tensorial properties of multiple view constraints, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, Vol. 23 (2000), 169–202.
- [14] 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- [15] Klette, R. and Rosenfeld, A.: *Digital geometry*, Morgan Kaufman Publishers Boston, 2004.
- [16] Linh, T. K.: 離散物体のユークリッド復元に関する研究, 千葉大学大学院自然科学研究科, 修士論文, (2003).
- [17] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン: 技



(a) $\phi_0 = \pi/12$ での $CL \cap CL'$ と CP . (b) $\phi_0 = \pi/12$ での拡大図.



(c) $\phi_0 = \pi/6$ での $CL \cap CL'$ と CP . (d) $\phi_0 = \pi/6$ での拡大図.



(e) $\phi_0 = \pi/4$ での $CL \cap CL'$ と CP . (f) $\phi_0 = \pi/4$ での拡大図.

図 10 $i = 1, j = 6, k = 0$ での 2 直線の交点 $l_3 \cap l'_3$ の予測.

- 術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [18] Montanari, G.: On limit properties in digitization schemes, *Journal of the ACM (JACM)*, Vol. 17 (1970), 348–360.
 - [19] Natsumi, H., Sugimoto, A., and Kenmochi, Y.: Predicting corresponding region in a third view using discrete epipolar lines, *In Proc. 14th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery*, Vol. 1 (2008), 470–481.
 - [20] 夏見拓明, 杉本晃宏, 剣持雪子: 画素対応からの任意視点画像上の対応領域予測, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), Vol. I (2007), 1366–1371.
 - [21] 佐藤淳: コンピュータビジョン: 視覚の幾何学, コロナ社, 1999.
 - [22] 佐藤淳, 杉本晃宏, 木下敬介: エピポーラ幾何の進展, 情報処理学会研究報告. CVIM, Vol. 2005 (2005), 27–40.
 - [23] Shashua, A.: Trilinear tensor: the fundamental construct of multiple-view geometry and its applications, *In Proc. Algebraic Frames for the Perception-Action Cycle: International Workshop*, (1997).
 - [24] Shashua, A. and Werman, M.: Trilinearity of three perspective views and its associated tensor, *In Proc. 5th International Conference on Computer Vision*, (1995), 920–925.