

曲面上のエピポーラ幾何と未校正カメラによる視覚誘導

佐藤 淳[†] 木下 敬介^{††} ロベルト チポラ^{†††}

Epipolar Geometry on Curved Surfaces and Visual Navigation
from Uncalibrated Cameras

Jun SATO[†], Keisuke KINOSHITA^{††}, and Roberto CIPOLLA^{†††}

あらまし 視覚誘導を行う場合、対象物に対するカメラの相対的な動きを求めることが重要である。カメラが未校正の場合、この動きの情報はエピポーラ幾何として表現され基礎行列の形で求まる。カメラの移動前後の画像において特徴点の対応が十分に得られれば、このエピポーラ幾何を計算できることがこれまでに示されてきた。しかし、宇宙空間における視覚誘導のように曲面体を対象として視覚誘導を行う場合には従来にない難しさを伴う。曲面上に模様がなかったり、惑星上のガス雲のようにその模様が時々刻々と変化する場合、その曲面に関する信頼できる画像特徴は遮へい輪郭のみである。曲面を投影して得られる遮へい輪郭は、視点が異なれば物理的に異なるものの投影像であるから、この場合には複数の画像上で特徴点同士の物理的対応は一般的には得られない。エピポーラ幾何は物理的対応が得られて初めて計算できるものであるから、この場合には従来の方法では計算できないことになる。本論文では、未校正カメラに投影された曲面体の遮へい輪郭からいかにエピポーラ幾何を計算し、そしてこれをいかに視覚誘導に応用するかについて述べる。

キーワード 視覚誘導, 未校正カメラ, エピポーラ幾何, 遮へい輪郭

1. ま え が き

ロボットにカメラを取り付け視覚的に誘導する場合、カメラと対象物間の相対的な位置関係を画像情報からいかにして得るかが課題となる。対象物に対しカメラが相対的に運動した場合、その運動はエピポーラ幾何によって記述されることが知られている [5]。

これまでの研究 [4], [7] から、カメラが未校正でかつカメラの運動（平行移動及び回転）が未知であっても、もしも 2 画像間の対応が 7 点以上見つかったら、いけばエピポーラ幾何が計算できることが示された。このエピポーラ幾何は 3×3 で自由度 7 の基礎行列 (fundamental matrix) によって記述されるため、この基礎行列をより安定に計算する方法も盛んに研究されてきた [6], [12]。

これらの研究では、視点を変えても物理的に同じものが画像上で観測できることを仮定している。すなわち、3 次元空間における対象物の模様、頂点、エッジなど空間中に物理的に存在している点や線が複数の異なる視点から得られる画像に投影されている場合を対象としてきた。この場合には物理的に同じものが画像上で観測できるので、これら複数のカメラ間の関係を記述するエピポーラ幾何を求めることができる。

しかし、曲面を対象とした場合には大分様子が異なる。一般に模様のない曲面体を画像に投影した場合、画像上では遮へい輪郭 (occluding contour または apparent contour) が最も顕著な特徴となる。図 1 に示す通りこの遮へい輪郭は、曲面上の物理的には存在していない仮想的な輪郭生成曲線 (contour generator) の投影像である。視点を動かし異なる視点から同じ曲面体を観測すると、やはり画像上では遮へい輪郭が得られるが、これは曲面上の先とは異なる輪郭生成曲線の投影像である (図 1 参照)。曲面を対象とした場合の難しさは、このように異なる視点においては物理的に全く異なるものが観測される点にある。エピポーラ幾何は物理的に同じものが画像に投影された場合に初めて計算できる幾何であるから、曲面体に関しては、

[†] 名古屋工業大学電気情報工学科, 名古屋市

Department of Electrical and Computer Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††} ATR 人間情報通信研究所, 京都府

ATR Human Information Processing Laboratories, Kyoto-
fu, 619-0288 Japan

^{†††} ケンブリッジ大学工学部, 英国

Department of Engineering, University of Cambridge, Cam-
bridge CB2 1PZ, UK

このままではエピポーラ幾何が求まらない。

この問題に対し, Cipolla ら [2], [3] は Rieger [10] によって示されたフロンティア点 (frontier point) と呼ばれる曲面上の特殊な点を用いることによりエピポーラ幾何が求まることを示した。彼らは, これが高度に非線形な問題となることを指摘し, 繰返し法によりフロンティア点とエピポーラ幾何を同時に計算する方法を提案した。しかしこの方法では残念ながら収束は非常に不安定であり, かなり良い初期値を与えなければ正しい結果が得られないことがわかっている。これに対し佐藤ら [11] は, もしもカメラの動きが平行移動のみ (回転なし) であるならば, 画像上の bi-tangency の性質を使って, 繰返し法を使わずにフロンティア点が安定に求まることを示した。

本論文では, これらの結果を更に拡張し, カメラの動きに回転が含まれる一般運動の場合においても, 繰返し法を使わずにエピポーラ幾何を安定に求めることができることを示す。更に, 宇宙を自動航行する場合などを例に取り, 本手法が視覚誘導を行う上で非常に有用であることを併せて報告する。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では, まず曲面に対するエピポーラ幾何に関するこれまでの研究を振り返る。3. ではカメラの動きを平行移動に限定し, このときには曲面に対するエピポーラ幾何がある特殊な性質を使うことにより安定に求まることを示す。4. では, 画像を幾何学的に正規化することにより, 平行移動のみならず一般運動のもとでもこの特殊な性質が有用であることを示す。更に 5. では, 求めたエピポーラ幾何が視覚誘導を行う上で非常に重要な情報を与えることを示し, 6. における実画像による実験でこれを検証する。

2. 曲面上のエピポーラ幾何

まずこの分野の過去の研究を振り返りながら, 曲面を対象とした場合のエピポーラ幾何を考える。

図 1 に示すように, 曲面 S を画像に投影して得られる遮へい輪郭 C はその曲面上の仮想的な輪郭生成曲線 Σ の投影像である (以下, 遮へい輪郭という場合は曲面の遮へい輪郭を指す)。視点を動かして得られる遮へい輪郭 C' は輪郭生成曲線 Σ' の投影像である。一般に視点が異なればこれら二つの輪郭生成曲線 Σ, Σ' は異なる。このように異なる視点から得られる遮へい輪郭は物理的に異なるものの投影像であるから, 曲面体に関しては, 一見エピポーラ幾何が求まら

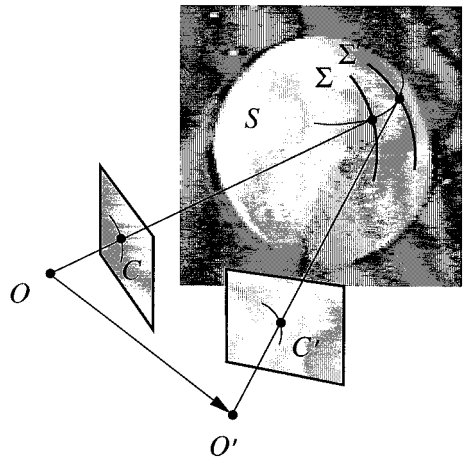


図 1 輪郭生成曲線と遮へい輪郭。視点 O における曲面の像 C は輪郭生成曲線 Σ の投影であり, 視点 O' における像 C' は輪郭生成曲線 Σ' の投影像である。一般に Σ と Σ' は異なる

Fig.1 Contour generators and apparent contours. The apparent contour C is the projection of a contour generator Σ , and the apparent contour C' is the projection of a contour generator Σ' . In general, Σ' is different from Σ .

ないように思える。しかし, ここで曲面上のある特殊な点を考えると, このエピポーラ幾何が求まる可能性が出てくる。そのような特殊な点とは, 図 2 に示すように二つの視点における輪郭生成曲線が交差してできる仮想的な点でありフロンティア点 (Frontier point) と呼ばれる [10]。フロンティア点は二つの輪郭生成曲線上にあるので, 二つの視点から共通に見える点である (それぞれの輪郭生成曲線はそれぞれの視点から見える曲線であることに注意)。そして, 二つの視点から共通に見えるということは, この仮想的な点が多面体の頂点のように物理的に対応がとれる点とみなすことができることを意味する。したがって, このようなフロンティア点が 7 点以上求まれば, 従来と同様にエピポーラ幾何を計算することができる。問題は, いかにしてこれらのフロンティア点を画像中で見つけるかである。

ここで重要となるのはエピポーラ tangency [9] と呼ばれる性質である。まず, 二つの視点 O, O' を結ぶ直線を考え, この直線を軸として回転するような平面 Π を考える。この平面 Π はエピポーラ面であり, それぞれの視点における Π の投影像がエピポーラ線である。この平面 Π を回転させるとあるところで曲面に

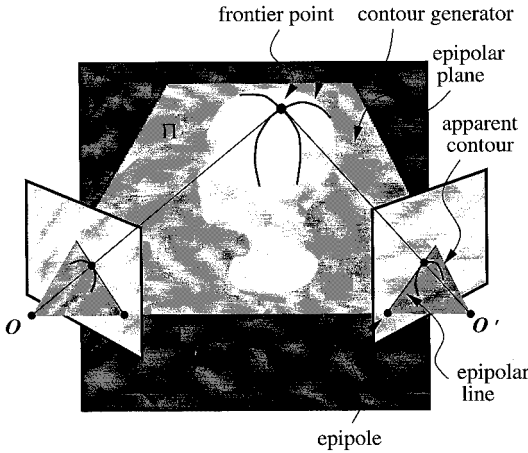


図2 フロンティア点とエピポーラ tangency. 二つの輪廓生成曲線 (contour generator) が交差する点はフロンティア点と呼ばれ, O から O' からも観測できる点である. エピポーラ面はフロンティア点において曲面に接し, エピポーラ線はフロンティア点の投影点において遮へい輪廓に接する

Fig. 2 Frontier points and the epipolar bitangency. The intersection of the two different contour generators is called a frontier point, and is visible from both two view points. The epipolar plane is tangent to the curved surface at a frontier point, and the epipolar lines are tangent to the apparent contours at the projections of a frontier point.

接する. このとき曲面と接する点がフロンティア点である. 次にこれらを画像に投影すると, 画像上ではエピポーラ線が遮へい輪廓と接する点がフロンティア点の投影点 (フロンティア投影点) であることがわかる. このように 3 次元空間ではエピポーラ面がフロンティア点において曲面に接し, 2 次元画像ではエピポーラ線がフロンティア投影点において遮へい輪廓に接する性質をエピポーラ tangency と呼ぶ. したがって, もしもエピポーラ幾何が求まっていれば, エピポールから遮へい輪廓に対する接線を引くことによって, その接点としてフロンティア投影点が求まる. 一方, もしもフロンティア投影点が 7 点以上見つかったら逆にエピポーラ幾何が計算できる. しかし, 実際にはエピポーラ幾何もフロンティア投影点も未知であるからこれは「鶏と卵」の問題となる.

この問題に対し, Cipolla ら [3] は基礎行列の適当な初期値をあらかじめ与えておき, エピポーラ tangency の条件が満たされるよう徐々にこの基礎行列を修正していく非線形最適化法によって正しい基礎行列とフロ

ンティア点を両方同時に求める方法を示した. しかし, その後の実験から, この方法ではあらかじめ与える基礎行列の初期値が相当良いものでないと正しい値には収束しないことがわかっている.

これに対し, 佐藤ら [11] は, もしもカメラの動きが平行移動に限定されるならば, 画像上の bi-tangency の性質を使って, 繰返し法を使わずに安定にフロンティア点とエピポーラ幾何が求まることを示した. このときに重要となる性質, エピポーラ bi-tangency について次に考える.

3. エピポーラ Bi-Tangency

3.1 一般運動のエピポーラ幾何

まず, 一般運動 (平行移動 + 回転) を行うカメラにおけるエピポーラ幾何を考える. 3 次元空間中の点 $X = [X, Y, Z]^t$ が二つの異なる視点の画像上にそれぞれ $m = [u, v]^t$, $m' = [u', v']^t$ と投影されたとする. これら 2 台のカメラの内部パラメータをそれぞれ 3×3 の上三角行列 A, A' で表し, また 2 台のカメラ間の回転及び平行移動をそれぞれ 3×3 の 3 次元回転行列 R と 3 次元ベクトル T で表すと, 透視投影における基礎行列 F は

$$F = A'^{-t} [T]_{\times} R A^{-1}$$

と表せるのであった [7]. ここで, $-t$ は逆行列の転置を表し, また $[T]_{\times}$ は任意の 3 次元ベクトル V に対しその外積が $T \times V = [T]_{\times} V$ なる 3×3 行列である. 二つの画像上で対応する点同士は F を使った次の関係を満たす [7].

$$\tilde{m}^t F \tilde{m} = 0 \quad (1)$$

ここで, (\sim) は齊次座標を表し, $\tilde{m} = [m^t \ 1]^t$, $\tilde{m}' = [m'^t \ 1]^t$ である.

基礎行列は 3×3 で九つの要素をもつが, 基礎行列の行列式は 0 であること, 及び基礎行列には定数倍の不定性があることからその自由度は 7 である. この 7 自由度の物理的意味は二つのエピポールが 4 自由度, エピポーラ線がつくるペンシルの開き具合を決めるエピポーラホモグラフィが 3 自由度である. 次に見るように, 平行運動下では基礎行列の自由度が 7 から 2 に減少する.

3.2 平行移動のエピポーラ幾何

もしも 2 台別々のカメラではなく, 同じカメラが平行移動のみ行った (回転なし) とすると, $A = A'$ かつ $R = I$ である. したがって, この場合の基礎行列は

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^{-t} [\mathbf{T}]_{\times} \mathbf{A}^{-1} \quad (2)$$

となる． \mathbf{A} は上三角行列で $[\mathbf{T}]_{\times}$ はひずみ対象行列であるから式 (2) の右辺を開くと \mathbf{F} は次のようなひずみ対象行列であることがわかる．

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & f_3 & -f_2 \\ -f_3 & 0 & f_1 \\ f_2 & -f_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 f_1, f_2, f_3 は \mathbf{A}, \mathbf{T} の各要素からなる．基礎行列には定数倍の不定性があるので、式 (3) で表される基礎行列 \mathbf{F} の自由度は 2 である．これはエピボールが一つでエピポーラホモグラフィの自由度が 0 であることを意味する．したがって、同一カメラが平行移動して得られる 2 枚の画像においては、エピボールとエピポーラ線が一致する．このような性質を自己エピポーラ (auto epipolar) と呼ぶ [8]．

f_1, f_2, f_3 には定数倍の不定性があるので $f_3 = 1$ とおくことにする．すると、基礎行列 \mathbf{F} とエピボール $\mathbf{e} = [e_u, e_v]^t$ との間には $\mathbf{F}\tilde{\mathbf{e}} = 0$ なる関係があることから、 $f_1 = e_u, f_2 = e_v$ であることがわかる．したがって、式 (3) はエピボールを使えば

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -e_v \\ -1 & 0 & e_u \\ e_v & -e_u & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

と表せる．すなわちこの場合には、エピポーラ幾何がエピボールのみによって決まる．

3.3 エピポーラ Bi-Tangency

さて、この自己エピポーラの性質は曲面を投影して得られる遮へい輪郭においても全く同様に成り立つ．遮へい輪郭はフロンティア投影点においてエピポーラ線に接するのであった．一つのカメラが平行移動する場合、自己エピポーラによりエピポーラ線はカメラの移動前後で等しい．したがって、図 3 に示すとおり、移動前後の 2 枚の画像を重ね合わせると、一つのエピポーラ線 l が移動前後両方の遮へい輪郭 C, C' に接する．すなわちこの場合には二つの遮へい輪郭に接する bi-tangent がエピポーラ線と一致し、この bi-tangent の二つの接点がフロンティア投影点となる [11]．bi-tangent が二つ以上有れば、それらの交点がエピボールである．エピボールが求まれば (4) により基礎行列 \mathbf{F} も計算できる．このように、エピポーラ幾何が bi-tangency によって特徴づけられるような性質をエピポーラ bi-tangency と呼ぶことにする．同

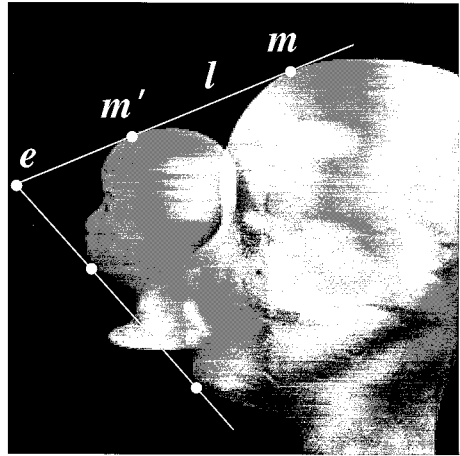


図 3 エピポーラ bi-tangency . 平行移動カメラから得られた 2 時刻の遮へい輪郭に対し bi-tangent を引くとその接点 m, m' は物理的に同じ点 (フロンティア点) の投影点となる．したがって、この場合の bi-tangent はエピポーラ線 l と一致し、二つの bi-tangent の交点はエピボール e と一致する

Fig. 3 Epipolar bi-tangency. If the camera motions are pure translations, a bi-tangent line to the two apparent contours viewed from two different viewpoints coincides with an epipolar line, and bi-tangent points coincide with frontier points. Thus, an intersection point of two or more bi-tangent lines is an epipole.

一のカメラが平行移動する場合には、このエピポーラ bi-tangency の性質を使うことによって、安定にしかも簡単にエピポーラ幾何を計算することができる．

4. Rectification

同一のカメラが平行移動する場合には、曲面上のエピポーラ幾何がエピポーラ bi-tangency の性質によって安定に求まることがわかった．ここでは、移動前後でカメラの内部パラメータが異なり、しかもカメラの動きが平行移動のみでなく回転が含まれる場合にも、エピポーラ bi-tangency により安定に曲面上のエピポーラ幾何が求まることを示す．

このように一般の動きをする異なるカメラ間ではエピポーラ bi-tangency は成り立たない．しかし、もしも移動後の画像にある変換を行って、移動前のカメラと同じ向きでしかも同じ内部パラメータをもつカメラから撮像した画像をつくることができれば、同一カメラが平行移動した場合に得られる画像と等価となる．このように画像を変形することをここでは rectification

と呼ぶ。

第1のカメラのカメラ座標をワールド座標とすると、空間中の無限遠でない点 X は二つのカメラに次のように投影される。

$$\lambda \tilde{m} = A [I \quad 0] \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\lambda' \tilde{m}' = A' [R \quad RT] \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 I は 3×3 の単位行列を、また 0 は3次元のゼロベクトルを表す。 λ や λ' はスケールファクタである。もしも、第2のカメラが第1のカメラと同じ向きでしかも同じ内部パラメータであったとすると、点 X は第2のカメラに次のように投影される。

$$\lambda'' \tilde{m}'' = A [I \quad T] \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Rectification とは、 m' からこのような m'' を求めることである。式 (6) 及び (7) より m' と m'' の関係は

$$\lambda''' \tilde{m}'' = H \tilde{m}' \quad (8)$$

となる。ここで、 H は

$$H = AR^{-1}A'^{-1} \quad (9)$$

であり、自由度8の平面から平面へのホモグラフィである。 H による第2画像の変換は、第2カメラの姿勢と内部パラメータを仮想的に第1カメラのそれへ変更することに等しい。したがって、このような H が求まれば式 (8) により m' から m'' を計算でき rectification が行える。しかし、カメラは未校正でその動きもわからないから、式 (9) の右辺の A, A', R はともに未知である。

一般に、未校正カメラから得られた画像のみから H を決定することはできない。しかし、以下に示すように、ある条件を付け加えることによりこれを計算することが可能となる。

4.1 無限遠点を使った Rectification

ここでは、無限遠点の投影像が画像上で得られると仮定し、この投影像を使って H を計算し rectification を行う方法を考える。

無限遠点は齊次座標を使って $[X^t \quad 0]^t$ と表せる。これを (5) 及び (6) の $[X^t \quad 1]^t$ の代わりに代入して整理すると、この無限遠点は画像中で次のように m_0

及び m'_0 に投影されることがわかる。

$$\lambda_0 \tilde{m}_0 = AX$$

$$\lambda'_0 \tilde{m}'_0 = A'RX$$

これらより、 m_0 と m'_0 の関係は以下となる。

$$\lambda''_0 \tilde{m}_0 = H \tilde{m}'_0 \quad (10)$$

ここで重要なことは、 H が (9) に示すものと全く同じだということである。したがって、もしも無限遠点の投影像が画像上で得られれば (10) より H に関する二つの拘束が得られる。 H の自由度は8であるから、四つの無限遠点の投影像が与えられれば、 H を決定することができる。そして、ひとたび H が計算できれば、式 (8) により rectification が完了する。

4.2 平行線を使った Rectification

無限遠点は、後の実験で示すように直接得られる場合もあるが、必ずしも直接得られるわけではない。ここでは、平行線の組を使って rectification を行う方法を考える。よく知られているように、空間中の平行な直線同士はこれを無限に延ばせば透視投影のもとでは一つの消失点に収束する。この点は無限遠点の投影像である。したがって、もしも平行線の組が4組見つければ、無限遠点の投影像が四つ得られ H が計算でき rectification が行える。

このような平行線は陽に得られている必要はない。例えば、面对称であることがわかっているような物体においては、対称な点同士を結ぶ直線はどれも平行である。したがって、画像中においてこれらの対称点を結ぶ直線から消失点が求まる。

4.3 直線上の3点を使った Rectification

点の間の距離の比があらかじめわかっているような（例えば等間隔な）一直線上の3点が画像に投影された場合、空間における距離の比と画像における距離の比から無限遠点の投影像が計算できる。

今、図4に示すように空間中の直線 L 上の無限遠点 X_∞ と L 上で無限遠点ではない3点 X_1, X_2, X_3 が画像 G 上でそれぞれ m_0, m_1, m_2, m_3 に投影されているとする。透視投影のもとでは直線は特殊な場合を除けば必ず直線に投影されるから、 m_0, m_1, m_2, m_3 も直線上にある。このような直線上の4点から計算される複比は透視投影下では不変であることがわかっている [1]。すなわち

$$\frac{|m_0 - m_2| |m_1 - m_3|}{|m_0 - m_3| |m_1 - m_2|} = \frac{|X_\infty - X_2| |X_1 - X_3|}{|X_\infty - X_3| |X_1 - X_2|} \quad (11)$$

X_∞ は無限に遠い点であるから $\frac{|X_\infty - X_2|}{|X_\infty - X_3|} = 1$ である。したがって式 (11) は簡単化でき、

$$\frac{|m_0 - m_2||m_1 - m_3|}{|m_0 - m_3||m_1 - m_2|} = \frac{|X_1 - X_3|}{|X_1 - X_2|} \quad (12)$$

すなわち、距離の比 $\frac{|X_1 - X_3|}{|X_1 - X_2|}$ が既知であれば、 m_1 , m_2 , m_3 より消失点 m_0 を計算することができる。

このように、長さの比が既知な直線上の3点や平行線の投影像などから合わせて四つ以上の無限遠点の投影像が得られれば、 H が計算でき rectification を行うことができる。

4.4 一般運動カメラの基礎行列

ひとたび平行移動カメラの画像への rectification が行えれば、エビポーラ bitangency の性質により、エビポールが求まり、式 (4) により基礎行列が計算できるのであった。ここでは、rectification を行って求めた基礎行列 F' から、もとの一般運動カメラの基礎行列 F を求める方法を考える。

今、 m と m' を rectification した m'' との間で上述した方法により F' を求めたとすると、これらの間には次のエビポーラ方程式が成り立つ。

$$\tilde{m}''^t F' \tilde{m} = 0 \quad (13)$$

式 (13) の両辺に λ''' を掛け式 (8) を代入すると

$$\tilde{m}''^t H^t F' \tilde{m} = 0 \quad (14)$$

となる。したがって、(1) 及び (14) より、 F と F' との間には次の関係が成り立つことがわかる。

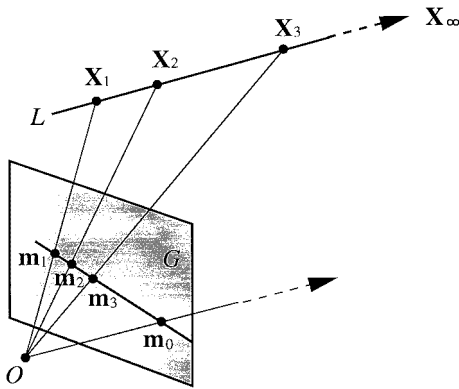


図4 複比による消失点の計算 (詳しくは本文参照)
Fig. 4 Computation of vanishing points from cross ratios.

$$F = H^t F' \quad (15)$$

すなわち、rectification を行って求めた基礎行列 F' とホモグラフィ H から、もとの一般運動カメラの基礎行列 F を計算することができるのである。

5. 曲面に対する衝突時間

このようにして求めたエビポーラ幾何とフロンティア投影点から衝突時間、すなわち、あと何フレーム後にカメラが対象物 (ここでは曲面体) に至るかを計算する方法を考える。

平行移動カメラから得られる画像は、逆にカメラを固定し対象物を平行移動して得た画像と等価である。図5に示すように、この平行移動でフロンティア点の位置が X_1 から X_2 へ変化したとする。この2点は画像上 m_1 , m_2 に投影される。このとき、直線 $X_1 X_2$ 上の無限遠点 X_∞ の投影像がエビポール e である。また、視点 O を通り画像面 G に平行な平面を Ω とすると、平面 Ω と直線 $X_1 X_2$ との交点がカメラと対象物との衝突点 X_0 である。したがって、衝突時間 t_c は

$$t_c = \frac{|X_0 - X_1|}{|X_2 - X_1|}$$

と表せる。また、 X_0 の投影像は画像面上の無限遠点 m_∞ である。空間における直線上の4点 X_0 , X_1 , X_2 , X_∞ と、これらの投影像である画像直線上の4

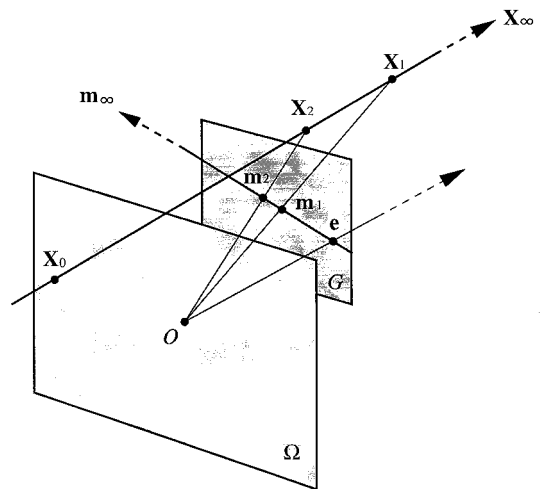


図5 衝突時間の計算 (詳しくは本文参照)
Fig. 5 Computation of time-to-contact.

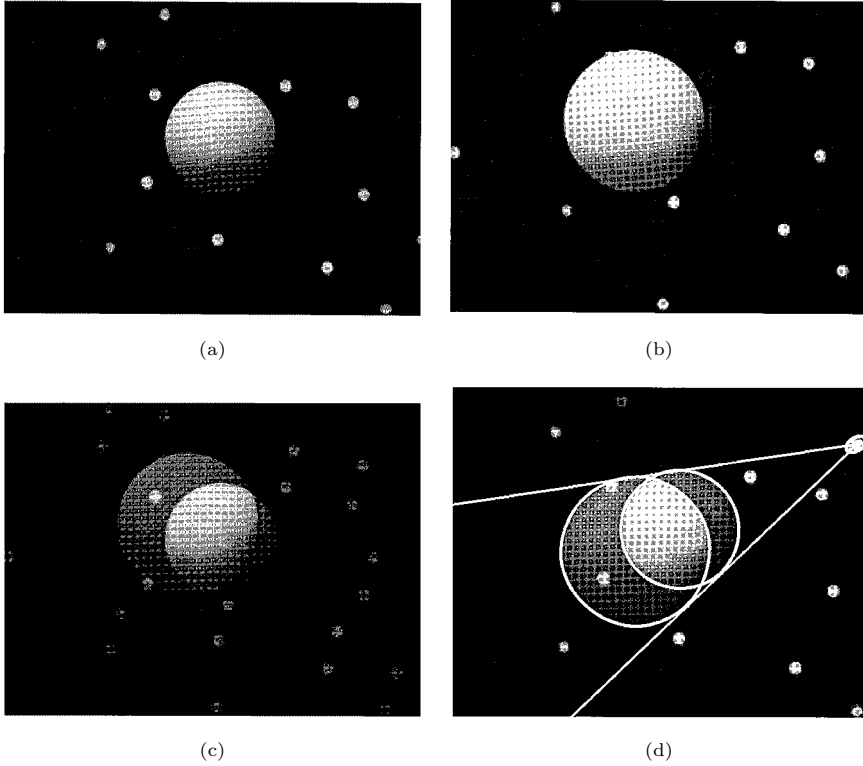


図6 エピポーラ幾何の計算。(a),(b)は,ある星に向かって航行中の宇宙船から観測される連続画像を擬似的に作成したものである。これら2枚の画像を単純に重ね合わせたものを(c)に示す。恒星を無限遠点と考えて rectification を行った結果を(d)に示す。この画像に対し, bi-tangent を引いたものが(d)の直線である。bi-tangent の接点はフロンティア投影点, bi-tangent の交点はエピボールである。標準偏差1画像のノイズを加えた場合のエピボールのばらつきを点で示し,その不確定領域(3σ)をだ円で示す

Fig.6 Results of experiments. (d) shows the epipolar geometry extracted from the proposed method.

点 m_∞, m_1, m_2, e の複比は等しいから

$$\frac{|X_0 - X_1||X_2 - X_\infty|}{|X_2 - X_1||X_0 - X_\infty|} = \frac{|m_\infty - m_1||m_2 - e|}{|m_2 - m_1||m_\infty - e|} \quad (16)$$

ここで, $\frac{|X_2 - X_\infty|}{|X_0 - X_\infty|} = 1$ であるから式(16)の左辺は t_c に等しい。また, $\frac{|m_\infty - m_1|}{|m_\infty - e|} = 1$ であるから式(16)の右辺は簡単化でき, 結局衝突時間 t_c はフロンティア投影点 m_1, m_2 とエピボール e から次のように計算できる。

$$t_c = \frac{|m_2 - e|}{|m_2 - m_1|}$$

また, エピボールよりカメラの移動方向もわかるから, 衝突時間と合わせて視覚誘導を行う上で重要な情報が得られたことになる。

6. 実 験

提案した手法を使って, 一般運動(回転 + 平行移動)する未校正カメラから得られる曲面の遮へい輪郭から, エピポーラ幾何を計算し, その曲面に対する衝突時間を計測する実験を行う。

図6(a),(b)は, ある星に向かって航行中の宇宙船から観測される連続画像である。これらの画像は擬似的に作成されているが, 背景の恒星が無限遠点となるように巧みに作られている。

図6(c)はこれら2枚の画像を単純に重ね合わせたものであるが, 背景の恒星が二つの画像間で一致していないことから, この場合のカメラの動きは平行移動のみでなく回転を伴っていることがわかる。この

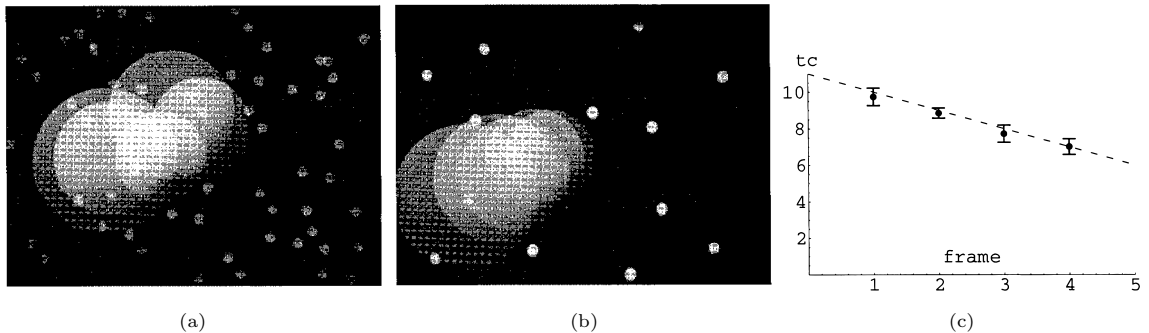


図7 衝突時間計測の実験。(a)は一般運動カメラから得られる連続する5時刻の画像を重ね合わせて表示したものである。(b)はこれらに対し rectification を行い平行移動カメラの画像に変換した結果である(内部パラメータも同一化される)。背景の恒星が各画像において一致していることに注意。各時刻において衝突時間を計算した結果を(c)に黒丸で示す。縦軸は衝突時間、横軸は時刻を示す。また、黒丸の上下に($\sigma = 1$)の画像ノイズを加えたときの衝突時間の変動を示す。破線は正しい衝突時間である

Fig. 7 Results of experiments. (c) shows the time-to-contact computed from the proposed method.

ような宇宙の映像では、背景に見える恒星を無限遠点の投影像と考えることができる。これらの恒星を使って(b)の画像を rectification した結果を(a)の画像と重ね合わせて図6(d)に示す。今度は2時刻の画像間でどの恒星も止まっており、平行移動カメラからの画像となっていることがわかる。図6(d)の直線はこのように rectification された2時刻の遮へい輪郭に対し bi-tangent を引いた結果である。これら二つの bi-tangent がエピポーラ線であり、接点がフロンティア投影点である。また二つの bi-tangent の交点としてエピポールも求まる。Rectification 前の画像におけるエピポーラ幾何を求めたい場合には計算結果を式(15)により変換すればよい。

次にエピポーラ幾何計算の信頼性をみるため、rectification に使用した恒星の画素位置に標準偏差1画素($\sigma = 1$)のランダムノイズを加え、計算されるエピポールの変動を計測した。図6(d)の点は、ノイズを加えたことによるエピポールの位置変動を表し、楕円はこれらより計算した 3σ の不確定領域を示す。これらより、rectification 時に加わるノイズに対してもエピポーラ幾何が安定に求まることがわかる。

次に衝突時間計測の実験結果を示す。図7(a)は連続する5時刻の画像を重ね合わせて表示したものである。これらに対し rectification を行い平行移動カメラの画像に変換した結果が図7(b)である。これらよりエピポーラ幾何とフロンティア投影点を求め衝突時間

を計測した結果を図7(c)に黒丸で示す。ただし、衝突時間は上側のフロンティア点より計算した。先と同様に標準偏差1画像のノイズを加え衝突時間の変動を計算した結果が黒丸に加えて示してある。また、破線はこの実験の設定条件より計算した理論的に正しい衝突時間である。これらより、衝突時間が良い精度で求まっていることがわかる。

図8に屋外シーンの例を示す。この場合には無限遠点は陽には得られないが、4.2に示すとおり平行線を4組使うことにより無限遠点の投影像を求めることができる(図8(a),(b)参照)。これらを使って rectification した結果を図8(d)に重ね合わせて表示する。先と同様に bi-tangent を引いて衝突時間を計算した結果を表1に示す。

7. む す び

本論文では、曲面を対象とした場合のエピポーラ幾何の計算方法を述べた。

まず、平行移動カメラによる画像では曲面に対するエピポーラ幾何がエピポーラ bi-tangency の性質を使って安定にしかも簡単に求められることを示した。一般運動をするカメラの画像ではこの性質は成り立たないが、無限遠点の投影像を使った rectification により、一般運動カメラの画像から平行移動カメラの画像へと変換することができる。この rectification により、一般運動カメラの画像においてもエピポーラ

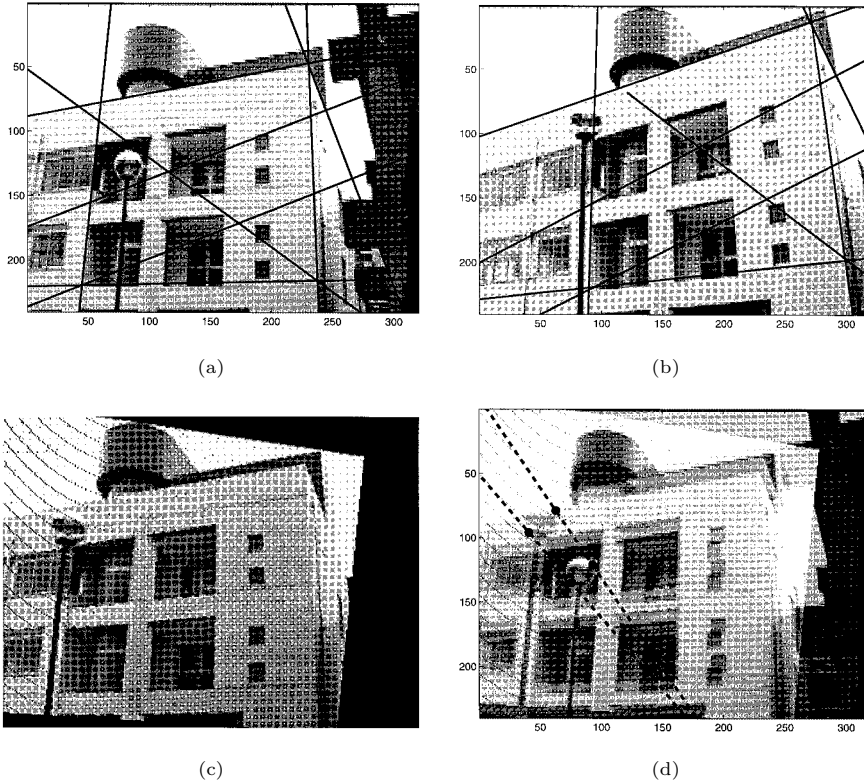


図 8 衝突時間計測の実験．屋外シーンの連続画像を (a), (b) に示す．それぞれの画像における実線は 4 組の平行線を表す．これら 4 組の平行線を使って (b) に対して rectification を行った結果を (c) に示す．(b) と比較し (c) では回転成分が除去されていることがわかる (実際には内部パラメータの違いも校正されている)．(d) は (a) と (c) を重ね合わせたものである．これに対し, bi-tangent を引いたものが (d) の破線である．これらから衝突時間を計算した結果を表 1 に示す

Fig. 8 Results of experiments. (d) shows the epipolar geometry extracted from the proposed method.

表 1 曲面体に対する衝突時間の計算．図 8 で求めたエピボラ幾何をもとに, 曲面上のフロンティア点に達するまでの時間を計算した結果を示す．図 8 (d) の上下それぞれのフロンティア点に対し求めた

Table 1 Time-to-contact computed from Fig. 8 (d).

	衝突時間 (frame)
上フロンティア点	4.84
下フロンティア点	4.78

bi-tangency の性質を使って遮へい輪郭からエピボラ幾何を安定にしかも簡単に求めることが可能であることを示した．宇宙空間や屋外シーンの実画像を使った実験により, 提案した方法の有効性を確かめた．曲面に対するエピボラ幾何に関しては非線形最適化により求める方法 [2], [3] が知られているが, 繰返し演算

を必要とする非線形最適化と比較し, 閉じた形でエピボラ幾何が求まる提案手法は, 計算の安定度が高く, また計算時間もはるかに少なくすむ．

本論文では, 主に曲面体を対象として話を進めてきたが, 多面体のように物理的な対応が直接得られる場合にも勿論提案した方法がそのまま使える．また本論文では, 移動前後の二つの遮へい輪郭が互いに包含関係にない場合を扱った．一方の遮へい輪郭が他方を包含するような場合の性質を明らかにすることが今後の課題である．

謝辞 本研究に対しいろいろと御助言下さった東北大学の出口光一郎教授, 群馬大学の金谷健一教授に対し謝意を表します．なお, 本研究は英国 EPSRC グラント (GR/K84202) によった．

文 献

- [1] 出口光一郎, 画像と空間—コンピュータビジョンの幾何学, 昭晃堂, 1991.
 - [2] K. Astrom, R. Cipolla, and P.J. Giblin, "Generalised epipolar constraints," in eds. B.F. Buxton and R. Cipolla, Proc. 4th European Conference on Computer Vision, volume 2, (LNCS 1065), pp.97-108, Cambridge, Springer-Verlag, April 1996.
 - [3] R. Cipolla, K. Astrom, and P.J. Giblin, "Motion from the frontier of curved surfaces," in Proc. 5th International Conference on Computer Vision, pp.269-275, Cambridge, Massachusetts, 1995.
 - [4] O.D. Faugeras, "What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?" in ed. G. Sandini, Proc. 2nd European Conference on Computer Vision, pp.563-578, Santa Margherita, Italy, Springer-Verlag, 1992.
 - [5] O.D. Faugeras and T. Papadopoulos, "A theory of the motion fields of curves," International Journal of Computer Vision, vol.10, no.2, pp.125-156, 1993.
 - [6] R.I. Hartley, "In defense of the eight-point algorithm," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.19, no.6, pp.580-593, 1997.
 - [7] Q.T. Luong and O.D. Faugeras, "The fundamental matrix: Theory, algorithm and stability analysis," International Journal of Computer Vision, vol.17, no.1, pp.43-76, 1996.
 - [8] J.L. Mundy and A. Zisserman, "Repeated structures: Image correspondence constraints and 3D structure recovery," in eds. J.L. Mundy, A. Zisserman, and D.A. Forsyth, Applications of Invariance in Computer Vision, pp.89-106, (LNCS 825), Springer-Verlag, 1994.
 - [9] J. Porrill and S.B. Pollard, "Curve matching and stereo calibration," Image and Vision Computing, vol.9, no.1, pp.45-50, 1991.
 - [10] J.H. Rieger, "Three dimensional motion from fixed points of a deforming profile curve," Optics Letters, vol.11, pp.123-125, 1986.
 - [11] J. Sato and R. Cipolla, "Affine reconstruction of curved surfaces from uncalibrated views of apparent contours," Proc. 6th International Conference on Computer Vision, pp.715-720, Bombay, India, Jan. 1998.
 - [12] Z. Zhang, "Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review," International Journal of Computer Vision, vol.27, no.2, pp.161-195, 1998.
- (平成10年7月21日受付, 11年2月10日再受付)



佐藤 淳 (正員)

昭59 名工大・工卒。同年アイシン精機(株)入社。平8ケンブリッジ大大学院博士課程了。同年ケンブリッジ大・工・助手。平10 名工大・工・助教授。この間に、平9~10 ATR 人間情報通信研究所客員研究員。コンピュータビジョン, 視覚誘導, 視覚的ユーザーインターフェイスの研究に従事。博士(Ph.D.)。著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学—」(コロナ社)など。BMVC '94 最優秀科学論文賞, BMVC '97 最優秀科学論文賞など受賞。情報処理学会, British Machine Vision Association 各会員。



木下 敬介 (正員)

1989 東大・工・計数卒。1994 同大大学院博士課程(情報工学)了。工博。日本学術振興会特別研究員を経て, 1995 より ATR 人間情報通信研究所研究員。コンピュータビジョン, 能動視覚, 視覚サーボの研究に従事。計測自動制御学会, 情報処理学会各会員。



ロベルト チボラ

1984 ケンブリッジ大・工卒。1985 ペンシルバニア大大学院修士課程了。1988 電気通信大大学院修士課程了。1991 オックスフォード大大学院博士課程了。1991~92 東芝フェロー。1992 ケンブリッジ大・工・助教授。コンピュータビジョンの研究に従事。博士(Ph.D.)。ECCV94 最優秀論文賞など受賞。British Machine Vision Association 委員。