

## 内部パラメータが変化する 未校正カメラによる衝突時間計算

杉山 洋暁 佐藤 淳

名古屋工業大学 情報工学専攻  
〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町  
sugiyama@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

あらまし：コンピュータとカメラによりロボットを誘導する視覚誘導においては、衝突の危険性をカメラ画像より推定することが重要である。このような衝突の危険性を知るためには、カメラが現在と同じ運動を続けた場合にあと何フレーム後に対象物に衝突するかという衝突時間が非常に有用である。この衝突時間の安定な計算には、対象物体が十分な大きさに映っている画像を用いることが望ましく、そのような画像を得るためにはカメラの移動前後でカメラのズーム等を調整する必要がある。そこで、本稿では、回転運動しながら等速直線運動するカメラの多視点幾何を解析することにより、カメラの内部パラメータが未知であり、かつカメラの移動中にカメラの内部パラメータが変化する未校正のカメラにおいて移動前後3時刻の画像から衝突時間を求める手法を提案する。

キーワード：多視点幾何, trifocal tensor, 等速直線運動, 衝突時間

## Computing Time-to-Contact from Uncalibrated Cameras with Variable Internal Parameters

Hiroaki Sugiyama Jun Sato

Nagoya Institute of Technology  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN  
sugiyama@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract : In visual navigation, it is very important to avoid collision with obstacles from camera images. For measuring the possibility of collision with obstacles, time-to-contact is very useful. For computing time-to-contact accurately and reliably, we should use images in which the object is projected largely by changing the zoom of camera. In this paper, we analyze the multiple view geometry of linear motions with rotations, and propose a method for computing the time-to-contact from 3 frame images of an uncalibrated camera, whose internal parameters change during camera motions.

Keywords : multiple view geometry, trifocal tensor, linear motion, time-to-contact.

### 1 はじめに

コンピュータとカメラを用いた視覚誘導は移動ロボットを安全に誘導する方法として期待されている [6, 7]. このような視覚誘導においては、前方に存在する物体の3次元位置情報を取得することが重要となる。特に、前方物体への衝突を回避するためには物体までの奥行き情報を得る必要がある。

奥行き情報を取得するには、複数の視点のカメラ画像から3次元環境を復元するのが一般的である。一方、視覚誘導などにおいて対象物との衝突

危険性を判定するだけであれば、必ずしも3次元環境を完全に復元する必要はない。本稿では、現在のカメラ運動を繰り返した場合にあと何フレーム後に対象物に衝突するかという衝突時間を計算する方法について考える。

衝突時間の推定はカメラ画像中の対象物の見かけの変化から衝突の危険性を直接計算可能な方法として広く研究が行われてきた。オプティカルフローから画像中の発散成分を計算して衝突時間を求める方法 [1] はその代表的なものであるが、オブ

ディカルフロー自身の計算安定度が一般に高くないために衝突時間の計算安定性が低いことが知られている。これに対して、画像の大局的な特徴である画像モーメントの変化から画像の発散成分を求めることにより、より安定に衝突時間を計算する方法が提案された [2]。しかし、画像モーメントは大局的な特徴量であることから、オクルージョンが発生した場合にはこの方法では計算不能となる問題があった。

一方、Lourakis ら [3] は空間中の平面を用いることにより、移動前後の対応点よりカメラの衝突時間を計算する方法を提案した。この方法ではカメラの内部パラメータが既知であり、かつ、カメラの移動前後で内部パラメータが変化しないことが前提となっていた。しかし、カメラの内部パラメータを厳密に求めることは非常に手間がかかることであり、また、画角の調整のためにカメラの移動前後で内部パラメータを変更することができない。そのため、常に対象物体が十分な大きさで映る画像を得ることができず、その結果、衝突時間の計算が不可能、または不安定になってしまうことが起こり得る。そこで本稿では、常に対象物体が画像中で十分な大きさに映るよう移動中にカメラの焦点距離を変化させる場合を考え、このように移動前後で内部パラメータが異なるカメラからでも衝突時間が計算可能な方法を考える。カメラの移動前後で内部パラメータを変えられる方法としては無限遠平面の像を用いる方法が提案されている [4]。しかし、無限遠平面の像は常に取得できるとは限らないため、この方法では限られた場合にしか衝突時間が計算できなかった。

そこで本稿では、無限遠平面の像が投影されているような特殊な状況でなくとも、カメラの内部パラメータが未知であり、かつ、カメラの移動中に内部パラメータが変化するようなカメラから得られる画像から衝突時間が計算可能な方法を提案する。

従来手法 [3, 4] においては、投影画像から復元される空間が実空間に対して 3 次元アフィン変換の不定性をもつ。そのため、移動前後 2 時刻の画像から衝突時間が計算可能であった。しかし、今回考えているカメラの内部パラメータは未知であり、かつ、移動中にカメラの内部パラメータが変化するため、画像から復元される空間は実空間に対して 3 次元射影変換の不定性を持つ。そのため、従来手法と違い移動前後 2 時刻の画像から衝突時間を計算することはできない。

これに対し、近年のコンピュータビジョンの研究により、運動前後の複数の視点のカメラ画像間の幾何学的な関係は multifocal tensor によって表せることが明らかになった [5]。本稿では、視点周りの回転を伴う等速直線運動を行うカメラの多視点幾何を詳しく解析することにより、移動前後 3 時

刻の画像を用いることで、カメラの内部パラメータが未知であり、かつ移動中に変化する場合においても、衝突時間が計算可能な手法を提案する。特に、本稿では衝突時間の計算方法として、対応点 7 点を用いて対象物体を射影復元して衝突時間を求める方法、平面上の 4 点と非平面の 2 点を用いて復元を介さずに衝突時間を求める方法の 2 通りの方法を示し、それぞれの手法の特性について考察する。

## 2 3 視点幾何

### 2.1 3 台のカメラ間の多視点幾何

一般に、複数のカメラ間の相対的な位置や姿勢の情報は多視点幾何によって記述できることが知られている [5]。いま、図 1 に示すように 3 次元空間中の点  $\mathbf{X}$  が 3 台のカメラの視点  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{C}'$ ,  $\mathbf{C}''$  に投影されているとし、投影された点の斉次座標をそれぞれ  $\mathbf{m} = [m^1, m^2, m^3]^\top$ ,  $\mathbf{m}' = [m'^1, m'^2, m'^3]^\top$ ,  $\mathbf{m}'' = [m''^1, m''^2, m''^3]^\top$  とする。すると、これらの投影像は次式で示すような trilinear 拘束と呼ばれる関係を満たす (本稿ではテンソル表記 [5] を用いる)。

$$m^i m'^j m''^k \epsilon_{jqu} \epsilon_{krv} T_i^{qr} = 0_{uv} \quad (1)$$

ここで、上式で用いられている  $\epsilon_{jqu}$  ( $j, q, u = 1, 2, 3$ ) は  $j, q, u$  が 1, 2, 3 に対して偶置換である場合は 1, 奇置換である場合は  $-1$ , それ以外である場合は 0 となるテンソルである。また、 $T_i^{qr}$  は trifocal tensor と呼ばれる 3 階のテンソルである [5]。3 台のカメラが存在する場合、これら 3 台のカメラ間の相対的な位置や姿勢の情報は trifocal tensor により記述される。

このような trifocal tensor を計算する方法としていくつかの線形計算法や非線形計算法が提案されている。ここでは、従来の線形計算法について説明する [5]。いま、式 (1) の  $T_i^{qr}$  の要素を並べたベクトルを  $\mathbf{t} = [T_1^{11} \dots T_3^{33}]^\top$  とおくと式 (1) は以下のような線形方程式となる。

$$\mathbf{M}\mathbf{t} = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}$  は  $9 \times 27$  の行列であり、式 (2) から 9 個の線形方程式が得られるが、このうち独立な式は 4 個しかない。trifocal tensor は未知数が 27 個であり、定数倍の不定性があるため最低 26 個の拘束が得られれば線形に trifocal tensor を計算することができる。ここで、式 (2) より独立な拘束が 4 つ得られるので、最低 7 組の対応点があれば  $4 \times 7 = 28 > 26$  となり、trifocal tensor が線形に計算できる。

この trifocal tensor は未知数が 27 個であるが、3 視点幾何には 18 自由度しか存在しない。この 18 自由度は 3 つの画像中の 6 つのエピポール  $\mathbf{e}_{12}$ ,  $\mathbf{e}_{13}$ ,  $\mathbf{e}_{21}$ ,  $\mathbf{e}_{23}$ ,  $\mathbf{e}_{31}$ ,  $\mathbf{e}_{32}$  が持つ 12 自由度と 2 つ

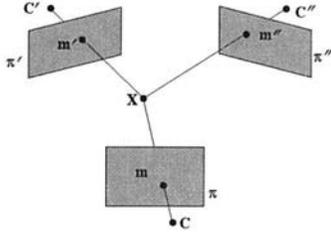


図 1: 3 視点幾何

のエピポーラホモグラフィーが持つ 6 自由度より成る。但し、 $e_{ij}$  は第  $i$  画像中における第  $j$  カメラに関するエピポールである。

次にこのような 3 視点幾何が最低何組の対応点から決定されるかを考える。いま、3 次元空間中の点が  $N$  点存在し、3 台のカメラに投影されているとする。このとき、3 次元空間中で幾何情報を決定するためには  $18 + 3N$  の情報が必要である。一方、3 台のカメラ画像から得られる  $N$  個の点の情報は  $6N$  である。そのため、画像から 3 視点幾何を決定するためには以下の式を満たす必要がある。

$$6N \geq 18 + 3N \Rightarrow N \geq 6 \quad (3)$$

従って、最低 6 組の対応点を得られれば 3 視点幾何を決定することが可能である。

## 2.2 等速直線運動における 3 台のカメラ間の多視点幾何

次に、カメラが等速直線運動する場合における多視点幾何について考える。いま、図 2 のようにカメラが視点  $C$  から  $C'$ 、 $C''$  に等速直線運動したとする。但し、この等速直線運動中にカメラは視点回りに自由に回転運動を行うものとする。このカメラには先ほどと同様に点  $X$  が  $m$ 、 $m'$ 、 $m''$  として投影されているとする。すると、これらの点の間には先ほどと同様に式 (1) の関係が成り立つ。さらに、このように 3 つの視点が直線上に並ぶ状態においては  $e_{12} = e_{13}$ 、 $e_{21} = e_{23}$ 、 $e_{31} = e_{32}$  が成り立つ。また、カメラは等速運動しているため、3 台のカメラ間の相対的な距離は決定している。従って、カメラが等速に直線運動する場合においては 3 つのエピポールと 2 つのホモグラフィーを持つ合計 12 自由度によって 3 視点幾何が決まる。そのため、この場合の trifocal tensor  $T_i^{gr}$  は 12 自由度しか持たない。

次に、このような 3 視点幾何が決まる最低何組の対応点から決定されるかを考える。今、3 次元空間中の点が  $N$  点存在し、これらが 3 台のカメラに投影されているとする。このとき、3 次元空間中の  $N$  個の点と 3 つのカメラの全ての幾何情報を決定するためには  $12 + 3N$  の情報が必要である。一方、3 台のカメラ画像から得られる  $N$  組の対応点の情報は  $6N$  なので 3 視点幾何を計算するには以下の式

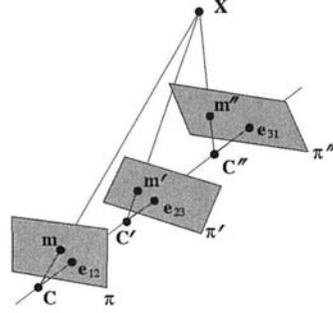


図 2: 回転運動を含む等速直線運動における多視点幾何

を満たす必要がある。

$$6N \geq 12 + 3N \Rightarrow N \geq 4 \quad (4)$$

従って、4 点以上の対応点画像中において得られれば、再投影誤差を最小化するバンドルアジャストメントによってエピポール 3 個とエピポーラホモグラフィー 2 個を求め、3 視点幾何を求めることができる。

しかし、このような非線形最適化では、何らかの方法により優良な初期値を与える必要があり、また常に局所解に陥る危険性があるため、常に正しい解が得られるとは限らない。そこで、次節では空間中の平面の像から求められる平面射影変換を用いることにより、3 視点幾何を線形に求める方法を述べる。

## 3 平面射影変換が既知の場合の 3 視点幾何

### 3.1 平面射影変換による擬似的な並進カメラ画像の生成

いま、3 次元空間中の平面  $\Pi$  上の点  $X_p$  が視点  $C$ 、 $C'$  の画像面  $\pi$ 、 $\pi'$  に投影されているとし、投影された点の齊次座標をそれぞれ  $m_p$ 、 $m'_p$  とする。このとき、これら 2 点間には、以下の平面射影変換の関係が成り立つ。

$$m'_p \sim H m_p \quad (5)$$

ここで、式 (5) 中の  $\sim$  は両辺が同値関係にあることを表している。 $H$  は  $3 \times 3$  の平面射影変換行列である。よく知られているように、この平面射影変換  $H$  は画像中の対応点が 4 組以上得られていれば線形に計算することができる。また、この平面射影変換はカメラの回転運動の情報を持っている。そこで、次に、この平面射影変換を用いてカメラの回転成分を取り除き擬似的に並進カメラから得られる画像を生成する。

いま、図 3 のようにカメラが視点  $C$  から  $C'$ 、 $C''$  に回転を伴い等速直線運動したとする。このとき、平面  $\Pi$  上の点の投影像から求めた視点  $C$ 、 $C'$  の

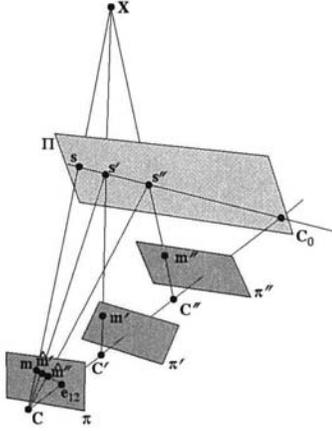


図 3: 平面射影変換による擬似的な並進カメラ画像の生成

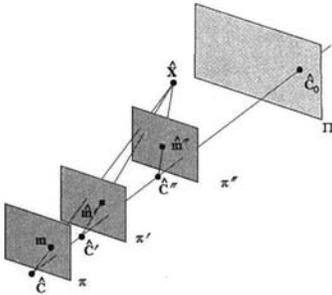


図 4: 平面射影変換によって生成された擬似的な並進カメラ画像

画像面  $\pi, \pi'$  の間の平面射影変換行列を  $H_{12}$ 、視点  $C, C''$  の画像面  $\pi, \pi''$  の間の平面射影変換行列を  $H_{13}$  とする。また、平面  $\Pi$  上にのっていない点  $X$  が視点  $C, C', C''$  の画像面  $\pi, \pi', \pi''$  に点  $m, m', m''$  として投影されているとする。ここで、 $H_{12}, H_{13}$  の逆行列をそれぞれ  $m', m''$  にかける。すると、 $m, \hat{m} \sim H_{12}^{-1} m', \hat{m}'' \sim H_{13}^{-1} m''$  は図 4 のようにカメラが視点  $\hat{C}$  から  $\hat{C}', \hat{C}''$  に内部パラメータを変えずに並進運動した際にそれぞれの視点に投影される点となる。ただし、視点  $\hat{C}, \hat{C}', \hat{C}''$  は射影的に歪み、もはやこれらは等間隔ではなくなる点に注意が必要である。

### 3.2 生成された並進カメラ画像における 3 視点幾何

前節で述べたように、平面射影変換を用いると内部パラメータを変えずに並進運動するカメラに投影される画像を得ることができる。本節では、そのようにして得られた図 4 のようなカメラ画像間の幾何について考える。

カメラが内部パラメータを変えずに並進運動した場合には、得られた画像は自己エピポーラとい

う性質を持つ。この自己エピポーラとは移動前後で得られた 2 枚の画像上のエピポールとエピポーラ線が等しくなるという性質である。今回は 3 台のカメラが同一直線上にのっているため、得られた 3 枚の画像上のエピポールとエピポーラ線が全て一致する。そのため、エピポールと視点間の相対的な距離が得られれば、この場合の幾何が決定される。本稿では、実際の空間のカメラは等間隔であると仮定しているため、視点間の間隔はすでに決定しているように思える。しかし、平面射影変換を用いることで得られた空間は実際の空間に対して射影的に歪んでいるため、もはや 3 つのカメラ視点は等間隔ではない。従って、幾何を決定するためには、エピポールと視点間の相対的な距離合計 3 自由度を求める必要がある。

次に、このような 3 視点幾何が最低何組の対応点で決定されるかを考える。いま、3 次元空間中の点が  $N$  点存在し、3 台のカメラに投影されるとする。このとき、3 次元空間中で幾何情報を決定するためには  $3 + 3N$  の情報が必要である。一方、 $N$  点について 3 台のカメラから得られる情報は  $5N$  である。  $6N$  ではなく、  $5N$  であるのは 3 台のカメラから得られる点が同一直線上に並ぶという拘束のため 1 点につき 1 自由度減少するためである。従って、画像から 3 視点幾何を計算するには以下の式を満たす必要がある。

$$5N \geq 3 + 3N \Rightarrow N \geq \frac{3}{2} \quad (6)$$

従って、最低 2 組の対応点が得られれば 3 視点幾何を決定することができる。

次に、このような幾何を線形に計算する方法について述べる。いま、図 4 のようにカメラが視点  $\hat{C}$  から  $\hat{C}', \hat{C}''$  に並進運動したとし、3 次元空間中の点  $\hat{X} = [X^1, X^2, X^3, X^4]^T$  が視点  $\hat{C}, \hat{C}', \hat{C}''$  の画像面  $\pi, \pi', \pi''$  に点  $\hat{m} = [m^1, m^2, m^3]^T$ 、 $\hat{m}' = [m'^1, m'^2, m'^3]^T$ 、 $\hat{m}'' = [m''^1, m''^2, m''^3]^T$  として投影されているとする。ここで、 $\|\hat{C} - \hat{C}'\| : \|\hat{C} - \hat{C}''\| = \alpha : \beta$  とすると、視点  $\hat{C}$  のカメラ行列を基準とした視点  $\hat{C}, \hat{C}', \hat{C}''$  のカメラ行列  $P, P', P''$  は次式のように表すことができる。

$$P = [I|0] \quad P' = [I|\alpha e_{12}] \quad P'' = [I|\beta e_{13}] \quad (7)$$

このとき  $e_{12} = e_{13}$  であり、定数倍の不定性があるためエピポールの自由度は 2 である。また、係数  $\alpha$  と  $\beta$  も定数倍の不定性があるため視点間の相対的な距離の自由度は 1 である。従って、カメラ行列の合計の自由度は 3 となり、幾何の自由度と一致していることが分かる。しかし、式 (7) に示すように、未知であるエピポールに未知である視点の距離の比がかけられているため、これらを線形な 3 自由度問題として解くことができない。そこで、エピポールを先に求めておいて、その結果を用いて距離の比を求める。

まず、エピポールを線形計算により求める。カメラが並進運動する場合には先ほど説明した通り自己エピポーラが成り立つので、エピポーラ線  $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3]^T$  は移動前後の対応点を結んだ直線になる。そのため、以下の式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}^T \\ \hat{\mathbf{m}}'^T \\ \hat{\mathbf{m}}''^T \end{bmatrix} \mathbf{l} = 0 \quad (8)$$

従って、式 (8) を解くことで、1組の対応点から1本のエピポーラ線が求まる。また、エピポールは各エピポーラ線の交点であるため、2本以上のエピポーラ線  $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_n$  が得られれば、次式を解くことでエピポールが求まる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_1^T \\ \mathbf{l}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{l}_n^T \end{bmatrix} \mathbf{e}_{12} = 0 \quad (9)$$

次に、求めたエピポールを用いて視点間の距離の比である  $\alpha$  と  $\beta$  を線形に計算する方法を説明する。いま、trifocal tensor はカメラ行列を用いると次式のように表すことができる。

$$T_i^{qr} = \frac{1}{2} \epsilon_{ilm} \det \begin{bmatrix} \mathbf{p}^l \\ \mathbf{p}^m \\ \mathbf{p}^q \\ \mathbf{p}^{r'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{p}^l, \mathbf{p}^m, \mathbf{p}^q, \mathbf{p}^{r'}$  はそれぞれカメラ行列  $\mathbf{P}, \mathbf{P}', \mathbf{P}''$  の  $l, m, q, r$  行の行ベクトルである。上式に式 (7) を代入し、 $T_i^{qr}$  の要素を並べたベクトル  $\mathbf{t} = [T_1^{11} \dots T_3^{33}]^T$  を用いると以下のような式で表せる。

$$\mathbf{t} = \mathbf{M}' \begin{bmatrix} \alpha \mathbf{e}_{12} \\ \beta \mathbf{e}_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{M}'$  は各カメラ行列の左の  $3 \times 3$  の単位行列からなる  $27 \times 6$  の行列である。さらに、式 (2) に式 (11) を代入し整理すると以下の線形方程式が得られる。

$$\mathbf{M} \mathbf{M}' \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{12} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{e}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (12)$$

ここで、 $[\alpha \ \beta]^T$  には定数倍の不定性があるため、その自由度は1であり、式 (12) から独立な式が1つ得られるため最低1組の対応点から  $[\alpha \ \beta]^T$  が求まる。このとき、視点間の距離の比を求めるために用いる対応点と、エピポールを求めるために用いる対応点は同じ対応点でもよい。従って、本手法では最低2組の対応点から線形に3視点幾何が決定できる。

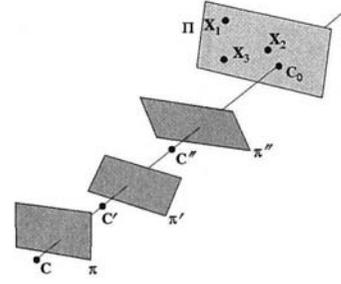


図5: 対象物体とカメラ配置

## 4 内部パラメータ可変カメラによる衝突時間計算

### 4.1 射影復元に基づく衝突時間計算法

図5に示すように、実際の空間において、任意の3点  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$  から定義される平面を  $\Pi$  とおく。本節では、この平面  $\Pi$  に衝突するまでの衝突時間を計算する方法について述べる。

いま、式 (1) の trilinear 拘束を用い、7組以上の対応点から射影的不定性を残してカメラを校正したとする。すると、3次元点  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$  は各画像から図6に示すように点  $\hat{\mathbf{X}}_1, \hat{\mathbf{X}}_2, \hat{\mathbf{X}}_3$  として復元できる。このとき、点  $\hat{\mathbf{X}}_1, \hat{\mathbf{X}}_2, \hat{\mathbf{X}}_3$  から定義される平面を  $\hat{\Pi}$  とすると、視点  $\hat{\mathbf{C}}, \hat{\mathbf{C}}', \hat{\mathbf{C}}''$  を通る直線と平面  $\hat{\Pi}$  との交点  $\hat{\mathbf{C}}_0$  がカメラが平面  $\hat{\Pi}$  に衝突する位置となる。同様に、図5に示すように、実際の空間においてカメラが平面  $\Pi$  に衝突する位置を  $\mathbf{C}_0$  とする。ここで、復元された空間の視点  $\hat{\mathbf{C}}, \hat{\mathbf{C}}', \hat{\mathbf{C}}''$  と実際の空間中の視点  $\mathbf{C}, \mathbf{C}', \mathbf{C}''$  とは射影的に等しいため、これらから計算される射影不変量は以下の通り等しい。

$$\frac{\|\mathbf{C} - \mathbf{C}'\| \|\mathbf{C}'' - \mathbf{C}_0\|}{\|\mathbf{C}'' - \mathbf{C}'\| \|\mathbf{C} - \mathbf{C}_0\|} = \frac{\|\hat{\mathbf{C}} - \hat{\mathbf{C}}'\| \|\hat{\mathbf{C}}'' - \hat{\mathbf{C}}_0\|}{\|\hat{\mathbf{C}}'' - \hat{\mathbf{C}}'\| \|\hat{\mathbf{C}} - \hat{\mathbf{C}}_0\|} \quad (13)$$

ここで、実際の空間ではカメラは等速直線運動しているとして、 $\|\mathbf{C} - \mathbf{C}'\| = \|\mathbf{C}' - \mathbf{C}''\| = a$  とする。また、射影復元を行うことで得られる式 (13) の右辺を  $k$  とし、式 (13) を整理すると以下のように衝突時間  $t$  が求まる。

$$t = \frac{\|\mathbf{C}'' - \mathbf{C}_0\|}{a} = \frac{2k}{1-k} \quad (14)$$

ただし、

$$k = \frac{\|\hat{\mathbf{C}} - \hat{\mathbf{C}}'\| \|\hat{\mathbf{C}}'' - \hat{\mathbf{C}}_0\|}{\|\hat{\mathbf{C}}'' - \hat{\mathbf{C}}'\| \|\hat{\mathbf{C}} - \hat{\mathbf{C}}_0\|} \quad (15)$$

である。 $k$  は既知であることから式 (14) より衝突時間  $t$  が求まる。

### 4.2 平面射影変換に基づく衝突時間計算法

次に、3次元空間の復元を介さずに衝突時間を計算する方法について説明する。いま、図3に示

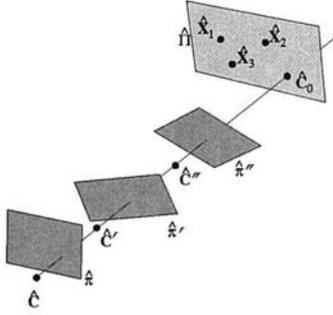


図 6: 射影復元された対象物体とカメラ配置

すように、実際の空間において、平面  $\Pi$  上の 4 点以上の投影像から各画像平面間の平面射影変換行列が求められ、擬似的に並進カメラの画像が得られたとする。本節では、この平面  $\Pi$  に衝突するまでの衝突時間を計算する方法について述べる。

いま、3.2 節で説明した方法により、エピソード  $e_{12}$  が計算されたとする。また、先ほどと同様に、実際の空間においてカメラが平面に衝突する位置を  $C_0$  とする。ここで、図 3 に示すように、点  $m$ ,  $\hat{m}'$ ,  $\hat{m}''$ ,  $e_{12}$  と点  $s$ ,  $s'$ ,  $s''$ ,  $C_0$  は射影的に等しい。また、点  $s$ ,  $s'$ ,  $s''$ ,  $C_0$  と視点  $C$ ,  $C'$ ,  $C''$ ,  $C_0$  も射影的に等しい。従って、点  $m$ ,  $\hat{m}'$ ,  $\hat{m}''$ ,  $e_{12}$  と視点  $C$ ,  $C'$ ,  $C''$ ,  $C_0$  は射影的に等しいため、これらから計算される射影不変量は以下の通り等しい。

$$\frac{\|C - C'\| \|C'' - C_0\|}{\|C'' - C'\| \|C - C_0\|} = \frac{\|m - \hat{m}'\| \|\hat{m}'' - e_{12}\|}{\|\hat{m}'' - \hat{m}'\| \|m - e_{12}\|} \quad (16)$$

ここで、先ほどと同様に  $\|C - C'\| = \|C' - C''\| = a$  とする。また、計算から得られる式 (16) の右辺を  $k$  とし、式 (16) を整理すると以下のように衝突時間  $t$  が求まる。

$$t = \frac{\|C'' - C_0\|}{a} = \frac{2k}{1-k} \quad (17)$$

ここで、

$$k = \frac{\|m - \hat{m}'\| \|\hat{m}'' - e_{12}\|}{\|\hat{m}'' - \hat{m}'\| \|m - e_{12}\|} \quad (18)$$

であり、これは画像より計測可能な量である。以上より、平面射影変換を用いる方法では 3 次元復元を介さず衝突時間が求まる。

## 5 実験

### 5.1 焦点距離と衝突時間計算の安定性

本節では、シミュレーション実験により焦点距離を可変とすることで、衝突時間の安定性がどの程度変わるかを示す。いま、図 7 のようにカメラを対象平面  $\Pi$  に向けて回転を伴いながら等速に直進させた。白丸は対象平面  $\Pi$  上にない点である。今

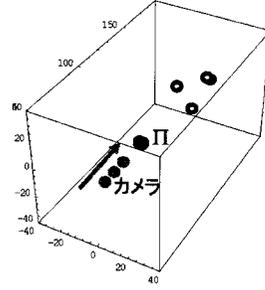


図 7: 対象物体とカメラ配置

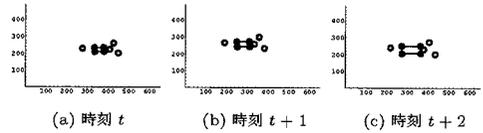


図 8: 投影画像 (焦点距離 1.0)

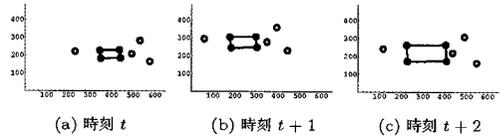


図 9: 投影画像 (焦点距離 2.0)

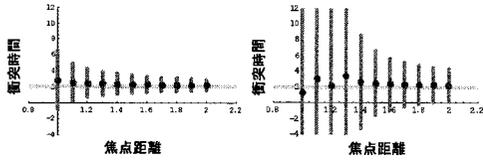
回はカメラの内部パラメータの中で焦点距離のみを変化させた。このようにして得られた各カメラの投影像の例を図 8, 図 9 に示す。図 8 はカメラの焦点距離が 1.0 のとき、図 9 はカメラの焦点距離が 2.0 のときに得られる投影像である。図中の黒丸は対象平面  $\Pi$  の四隅の投影点であり、白丸は対象平面上にない点の投影点である。このようにして得られた画像に標準偏差 0.5pixel の画像ノイズを印加し提案した 2 通りの方法で衝突時間を 50 回計算した。同様の実験を焦点距離を 1.0~2.0 まで変化させて行った結果を図 10 に示す。

図 10 の横軸は焦点距離、縦軸が衝突時間であり、縦に延びた直線、黒点、横に延びた直線はそれぞれ計算した衝突時間の  $3\sigma$  の不確定領域、平均、衝突時間の真値を表している。

図 10 より、どちらの方法を用いても焦点距離を変えることで衝突時間の計算が安定になることが分かる。

### 5.2 実画像実験による安定性評価

次に、実画像実験によりカメラの内部パラメータを意図的に変化させた場合と、変化させない場合の衝突時間の安定性の違いを比較し、内部パラメータが可変であることの有用性を示す。いま、図 11 に示すようにカメラの内部パラメータを変えずにカメラを 20 cm ずつ等速に直進させた。本実験ではカメラを回転させてはいない。このように



(a) 射影復元に基づく方法 (b) 平面射影変換に基づく方法

図 10: 衝突時間 (焦点距離可変)

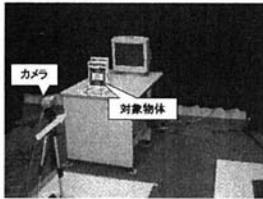
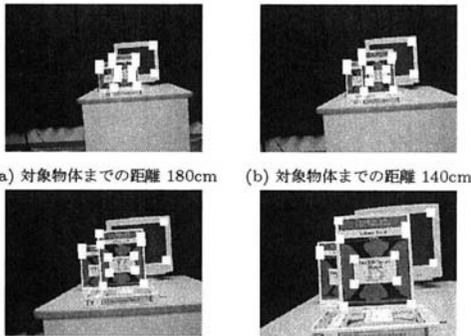


図 11: 対象物体とカメラ配置

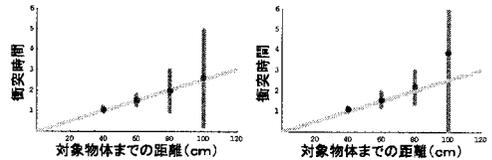


(a) 対象物体までの距離 180cm (b) 対象物体までの距離 140cm  
(c) 対象物体までの距離 100cm (d) 対象物体までの距離 60cm

図 12: 投影画像 (焦点距離固定)

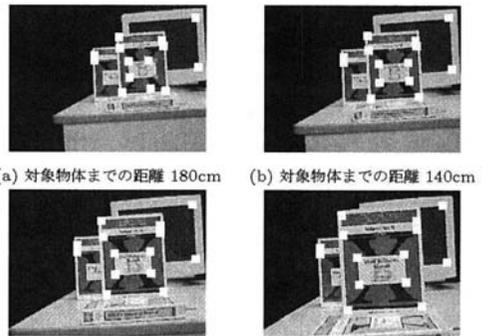
して撮影された画像の例を図 12 に示す。画像中の白点は計算に用いた特徴点である。これらの点は Harris のコーナー検出器を用いて取得し、テンプレートマッチングによりトラッキングした。このような画像のうち 40 cm 間隔の 3 枚の画像から提案した 2 通りの手法を用いて対象物体までの衝突時間を計算した。同様の実験を 10 回行った結果を図 13 に示す。図の横軸は焦点距離、縦軸が衝突時間であり、縦に延びた直線、黒点、斜めに延びた直線はそれぞれ計算した衝突時間の  $3\sigma$  の不確定領域、平均、衝突時間の真値を表している。

次に、全く同じカメラ運動からの衝突時間計算をカメラの移動前後でカメラのズームを変化させて行った。このとき、撮影された画像を図 14 に示す。図 12 と図 14 より、カメラの内部パラメータが変化している様子が見える。このような画像から先ほどと同様に対象物体までの衝突時間を計算した結果を図 15 に示す。図 13 と図 15 の不確定領域の大きさの違いより、カメラの移動の前後でカメ



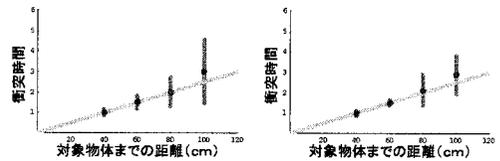
(a) 射影復元に基づく方法 (b) 平面射影変換に基づく方法

図 13: 衝突時間 (焦点距離固定)



(a) 対象物体までの距離 180cm (b) 対象物体までの距離 140cm  
(c) 対象物体までの距離 100cm (d) 対象物体までの距離 60cm

図 14: 投影画像 (焦点距離可変)



(a) 射影復元に基づく方法 (b) 平面射影変換に基づく方法

図 15: 衝突時間 (焦点距離可変)

ラの内部パラメータを変化させたほうがより安定に衝突時間が計算可能であることが分かる。

### 5.3 車載カメラによる衝突時間計算

次に、本研究の応用例として車載カメラから衝突時間の計算を行った結果について示す。車の中に 2 台のカメラを載せ、図 16 のように建物に向けて車を移動させ、それぞれのカメラの画像から建物の入口に到達するまでの時間を衝突時間として計算した。このとき、2 台のカメラのうちの 1 台は常に特徴点が画像中で大きく映るよう移動の前後でカメラのズームを変えた。このようにして得られた画像の例を図 17、図 18 に示す。図 17 は移動の前後でカメラのズームを変えていないカメラで撮影された画像であり、図 18 は移動の前後でズームを変えたカメラで撮影された画像である。ここで、画像中の白点は計算に用いた特徴点である。本実験では最初に特徴点を手で取得し、その後テンプレートマッチングにより特徴点のトラッキングを行った。得られた画像から提案手法を用いて衝突時間を計算した結果を図 19 に示す。



図 16: 実験環境

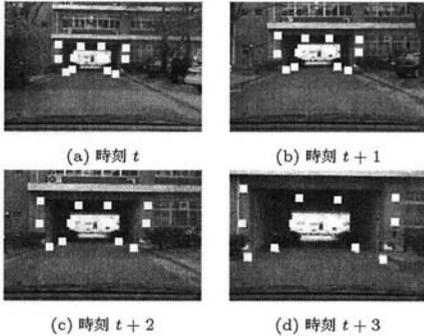


図 17: 投影画像 (焦点距離固定)

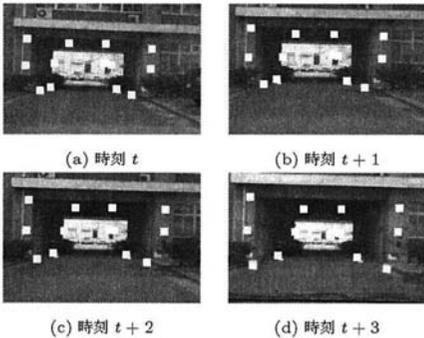
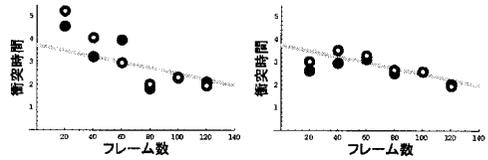


図 18: 投影画像 (焦点距離可変)

図 19(a) はカメラのズームを変えなかった場合の結果であり、図 19(b) はカメラのズームを変えた場合の結果である。また、図の横軸はフレーム数、縦軸は衝突時間を表し、白丸は射影復元に基づく方法を用いて計算された衝突時間、黒丸は平面射影変換に基づく方法を用いて計算された衝突時間を表す。また、直線は真値を表す。図 19 より、焦点距離固定の場合には衝突時間の計算が不安定であるのに対して、焦点距離可変の提案法では、より安定に衝突時間が求まることが分かる。

## 6 まとめ

本稿では、視点周りの回転運動を伴いながら等速直線運動するカメラから得られる移動前後 3 枚の画像間の幾何を解析することで、カメラの内部パラメータが未知であり、かつカメラの移動中にカメラの内部パラメータが変化するカメラ画像か



(a) 焦点距離固定 (b) 焦点距離可変

図 19: 衝突時間

ら衝突時間を計算する方法を 2 通り提案した。また、実験によりカメラの移動の前後でズームを自由に変えることで、常に対象物体が大きく映る画像を得ることが可能となり、その結果衝突時間の計算をより安定化できることを示した。

## 参考文献

- [1] M. Subbarao, Bounds on time-to-collision and rotational component from first order derivatives of image flow, CVGIP, vol.36, No.2, pp.208-228, 1990.
- [2] R. Cipolla and A. Blake, Surface orientation and time to contact from image divergence and deformation, Proc. European Conference on Computer Vision, pp.465-474, 1992.
- [3] M.I.A. Lourakis and S.C. Orphanoudakis, Using Planar Parallax to Estimate the Time-to-Contact, Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.640-645, 1999.
- [4] 佐藤 淳, 木下敬介, ロベルト・チボラ, 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 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.9, pp.1401-1410, 1999.
- [5] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2000.
- [6] A. Blake, J.M. Brady, R. Cipolla, Z. Xie, and A. Zisserman, Visual navigation around curved obstacles, In Proc. IEEE international Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2490-2495, 1991.
- [7] K. Deguchi and T. Noguchi, Visual Servoing Using Eigenspace Method and Dynamic Calculation of Interaction Matrices, Proc 13th International Conference on Pattern Recognition, vol.1, pp. 302-306, Vienna, August 1996.