論　文

高速追従型2眼能動カメラシステム

大池　洋史[†]　　呉　海元[†]　　華　春生[†]　　和田　俊和[†]

High-Speed Binocular Active Camera System for Capturing Good Image of a Moving Object

Hiroshi OIKE[†], Haiyuan WU[†], Chunsheng HUA[†], and Toshikazu WADA[†]

あらまし　本論文では，独立して動作する2台の能動カメラを用い，高速に運動している物体（150度/秒程度）を追跡し，対象の鮮明な画像を撮影できる高速追従型2眼能動カメラシステムを提案する．本論文では，鮮明な画像を，適切な大きさで撮影された，ぶれやピントずれがない対象の画像と定義する．能動カメラは，FV-PTZ（Fixed Viewpoint Pan-Tilt-Zoom）カメラを使用し，画像内における対象追跡はK-means trackerアルゴリズムを用いる．提案システムでは，追跡対象を注視するために，「人間の両目」のように2台の能動カメラを協調させ，視線を追跡対象上の1点で交わらせるように能動カメラを制御する．これを実現するために，K-means trackerに信頼度の概念を導入し，相対的な信頼度を用いた2台の能動カメラの制御方法を提案する．この信頼度とエピポーラ拘束を利用することにより，それぞれの能動カメラの追従性能を保ったまま，矛盾のないカメラの首振り制御を行い，また，ズーム・フォーカスも同時に制御することにより，より鮮明な対象の画像の撮影し続ける能動追跡システムを実現する．

キーワード　能動追跡，2眼能動カメラ，K-means tracker，鮮明な画像，ズーム・フォーカス制御

1. まえがき

1.1 研究の背景・目的

CVに関する研究では，カメラで撮影された画像内の対象の色やエッジなどの情報が不可欠である．しかし，環境中を高速かつ自由に動く動的物体を対象として撮影した際，撮影方法を工夫しなければ，画像中の対象がぶれてしまい，画像の解析に必要な情報が失われてしまう可能性が高い．このように動的物体を対象とした認識・理解の問題では，画像の解析手法に関する研究以外に，対象の撮影手法に関する研究も重要となる．

この問題を解決するための一つの試みとして，我々は追跡対象の運動に合わせた能動カメラの速度制御方法を提案し，高速かつ自由に運動する非剛体の物体をぶれることなく，かつできるだけ画像の中心付近に撮影し続ける高速追従型単眼能動カメラシステムを構築している[1]．

[†] 和歌山大学システム工学部，和歌山市
Faculty of System Engineering, Wakayama University, 930 Sakaedani, Wakayama-shi, 640–8510 Japan

本論文では，単独でも対象追跡を行うことができる2台の能動カメラの視線を，追跡対象上の1点で交わらせながら，方位，ズーム，フォーカスを制御することにより，追跡対象がカメラに対して奥行方向に運動する場合も高品質，高解像度の画像を撮影し続けることができる高速追従型2眼能動カメラシステムを提案し，その構築方法について述べる．

1.2 従来研究とその問題点

能動追跡に関する研究は多数ある．ビジョンチップを用いたシステム[2], [3]は，世界的に見ても高速な能動追跡システムであると思われる．ただし，センサの構造上画素数が少なく，高速な制御を行うため，画像上における対象追跡の手法が単純なものになってしまい，光環境がコントロールされた屋内での追跡しか行えない．

画像の中央部と周辺部の解像度を変化させる中心窩レンズを用いた両眼能動ビジョンシステムESCHeR[4]では，画像は30 Hzで撮影し，トランスピュータを用いた専用回路でカメラの方位は500 Hzで制御している．しかし，追従性能に関しては具体的な数値ではなく，「人間と同程度」としか示されていない．また，

ターゲットをどれほど安定に追跡し続けることができるかについても，具体的な比較実験等は示されていない．

岡田ら [5] は通常の高速度カメラを用い，ソフトウェア的に感度を向上させて一般環境下で使用できる能動追跡システムを構築しているが，オプティカルフローに基づき対象を追跡しているため，背景に特徴点が多数出現する場合や，対象がカメラに対して奥行方向に移動した場合，対象領域の推定が難しくなり，追跡が不安定になる．

提案システムと同じく，視点固定型能動カメラを用いたシステム [6] では，背景差分ベースで対象を追跡しているため，撮影するときは，カメラを静止させる必要があり，動いている対象を撮影すれば，画像がぶれてしまう可能性が高い．また追跡性能は数十度/秒程度である．

喜多らの手法 [7] では，撮像された画像を水平方向にシフトし，視差がなくなる点を求めることで近似したホロプタを求め，対象の奥行方向の移動にも対応している．この手法では両画像で垂直エッジを対応づける簡便な処理で対象を追跡できるが，エッジが多数出現する複雑な背景などがある場合，追跡が難しくなる．

手法 [8], [9] は KTH head-eye system [10] に搭載された，距離情報を用いた対象追跡手法である．このシステムは高速に動作し，カメラから対象までの距離が背景のものと異なるときは安定に動作するが，対象の周辺に似た距離の物体がある場合や，基線長に対して遠方の対象を追跡する際，挙動が不安定になる問題がある．このような問題を回避するために，オプティカルフローと距離情報を統合して用いる方法 [11] が提案されているが，フローを求める際, [5] と同様の問題が発生する可能性がある．

1.3 提案システムの特徴

前節で述べた，従来研究には，特殊なセンサや，実環境に適さない前提条件などが必要である．また，撮影される対象の画像の質については議論されていない．提案システムでは，市販のカラービデオカメラ，パン・チルトユニット，計算機を使用し，30 Hz で対象追跡と能動カメラの制御を行いながら，鮮明な画像を撮影する．

これまでに，高速に運動する物体（150 度/秒程度）でも追跡することができる高速追従型単眼能動カメラが構築されている [1]．このシステムでは，能動カメラは，対象が運動している限りカメラの動作を停止させることなく，対象の運動角速度に合わせて滑らかに制御される．したがって，対象とカメラ間の距離が著しく変化しなければ，対象が運動していても，背景はぶれ，対象は鮮明に，かつ画像の中心に撮影することができる．しかし，対象とカメラ間の距離変化が大きい場合，撮影された画像は図 1 の左側に示すように，対象が望ましいサイズではない，フォーカスがずれるなどの問題が発生することがある．

提案システムでは，この高速追従型能動カメラを 2 台使用する．2 台以上の能動カメラを用いることにより，以下のメリットを得ることができる．

(1) 高速追従型単眼能動カメラに比べ，より高画質な対象の画像を撮影し続けることができる（図 1 右側）．これは，本システムでは追跡対象の二次元の画面上の位置だけでなく三次元の位置も推定でき，これに基づくズーム・フォーカス制御を行うことで実現できる．

(2) 片方のカメラが追跡失敗した際に修正が可能になり，システムの安定性が向上できる．これはカメラ間の幾何関係による拘束条件や，2 台のカメラの画像上の対象の見えの共通性を利用することにより実現できる．

1.4 解決すべき問題と解決のアイデア

これら二つのメリットを実現するために，2 台のカメラから追跡対象を見失わないことと，対象の三次元位置を可能な限り正確に推定することが要求される．追跡対象を見失わないようにするために，対象が画面中心に撮影されるように能動カメラを制御することが必要である．また，光学レンズの性能上，画面中心部

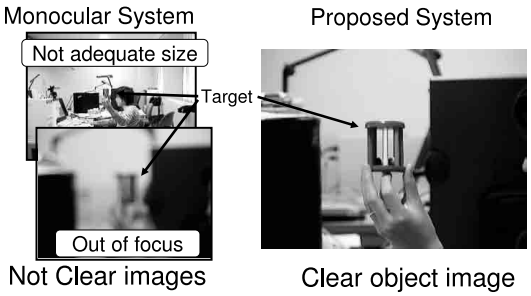

図 1 対象が奥行方向に動いたとき，単眼カメラシステムで撮影される対象画像（左）と提案システムで撮影される画像（右）

Fig. 1 The target image was taken by a monocular camera (left), and a clear target image can be obtained by the proposed method (right) when the target moves along depth axis.

分の分解能が高く，ひずみも少ないことから，対象が画像中心に現れるとき，2 眼ステレオ視による対象の三次元情報の推定は最も精度が高いと考えられる．

これと同時に，滑らかな能動カメラ制御を実現した高速追従型単眼能動カメラシステムの特徴を保持しながら，追跡対象とカメラ間の距離が著しく変化しても同じ高品質・高解像度の画像を撮影できるように，提案システムでは，ズーム・フォーカスも調整できる 2 台の能動カメラをそれぞれ独立に PAN，TILT の制御を行う．これに伴い，両カメラの視線方向に矛盾が生じないような制御が必要になる．

以上の理由から，本論文では，能動カメラに対して注視制御を行い，2 台のカメラの光軸が三次元空間中で追跡対象の中心に交差する状態を保持させるような 2 眼能動カメラの制御法について議論する．

1. 4. 1 問　題　点

鮮明な画像を撮影するという目的を達成するために，高速追従型 2 眼能動カメラシステムでは，

(1)　独立に制御される 2 台の能動カメラの視線方向に矛盾が生じないように，三次元空間中の 1 点で交わるように制御すること

(2)　ズーム制御を行う際，望遠倍率を上げるほど画角が狭くなるため，追跡対象を画像の中心で撮影し続けること

を同時に実現することが求められる．

(1) を実現するためには，理論上，一方のカメラの追跡処理により推定された対象位置からエピポーラ線を推定し，もう一方のカメラで撮影された画像上での対象位置を拘束すればよい．これにより，画像上での対象位置に基づいて制御される能動カメラを矛盾なく動作させることができる．

(2) の「追跡対象を画像の中心で撮影し続けること」は単眼高速追従型能動カメラで実現されているため，ズーム制御を行う際，追従性能を落とさず (1) を実現すればよい．

しかし実際には，画像解析における対象追跡の推定誤差や，カメラ方位の誤差などの原因により「絶対に正しいエピポーラ線」を推定することは難しい．もし，間違ったエピポーラ線に基づき能動カメラを制御してしまうと，逆に追跡が不安定になってしまい，制御の滑らかさが失われる可能性が高い．制御の滑らかさが失われると，入力画像中の追跡したい対象の画像がぶれてしまい，画像上での対象追跡精度が悪くなる．その結果，能動カメラの制御も更に不安定になる，という悪循環が生じる．

1. 4. 2　ア イ デ ア

撮影された画像系列から安定に対象を追跡するために，K-means tracker [13], [14] を追跡アルゴリズムとして採用する．そして，K-menas tracker から出力された特徴空間における距離情報に基づいて，各カメラの追跡状況を評価する信頼度を提案する．これにより，2 台の追跡システム間の相対的な信頼度を算出し，その値を重みとしてカメラの動作の拘束量を調節することにより，対象をうまく追跡できているときはあまり制御ループに干渉せず，逆の場合は視線方向の矛盾を防ぐため積極的にずれを補正するような制御を行う．

また，提案システムが正常に動作している状況では，対象は画像の中心付近に撮影され続けていることと，2 台のカメラが水平に配置されていることにより，エピポーラ線も水平になることが多いため，能動カメラの制御パラメータ数を可能な限り減らすために，y 方向のみカメラの動作を拘束する．

このような手法で，能動カメラの動作の滑らかさをできる限り損なうことなく，2 台のカメラの視線が三次元空間中の 1 点で交わるような制御を行うことを実現する．

2.　高速追従型 2 眼能動カメラシステムの構成

提案システムでは，高速追従型単眼能動カメラを 2 台用いることにより，高速追従型 2 眼能動カメラシステムを構築する（図 2）．それぞれの能動カメラは独立に制御することができる．2 台の計算機はネットワークケーブルで接続されており，互いに通信し，情報を共有することができる．

提案システムでは FV-PTZ（Fixed Viewpoint Pan-Tilt-Zoom）カメラ [12] を能動カメラとして使用する．この理由は PAN，TILT を変化させてもそれぞれのカ

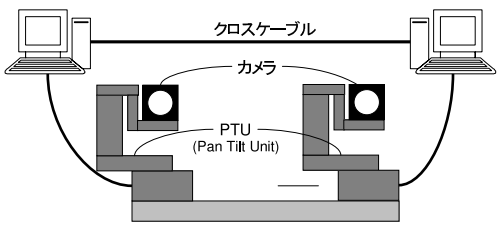

図 2　高速追従型 2 眼能動カメラの構成
Fig. 2　The configuration of the high-speed binocular active camera system.

メラの投影中心は移動せず，画像系列より追跡された対象の重心より簡単に対象運動の角速度を推定できるからである．今回，図 2 のように両方とも台の上に固定しているので，カメラを回転させてもカメラ間の距離は常に一定である．したがって，能動カメラの外部変数である並進ベクトルは固定となり，回転行列のみ変化する．

以下，高速追従型 2 眼能動カメラの後方から見て左側のカメラを「左カメラ」，右側のカメラを「右カメラ」と呼ぶ．

3. 物体追跡アルゴリズム

物体追跡に関してこれまでも様々な研究が行われている．代表的なアルゴリズムとして，Condensation [15]，Mean Shift 法 [16]，K-means tracker [13], [14] などが挙げられる．

Condensation [15] は対象の位置に関する多義性を許容する非常にロバストなアルゴリズムである．しかし，その多義性のゆえに推定された対象の位置にあいまい性が残り，能動カメラの方位制御に要求される正確な対象位置が得られない．したがって，能動追跡システムでは，K-means tracker や Mean Shift 法のように多義性をもたないアルゴリズムとの相性が良いと考えられる．

Mean Shift 法 [16] は対象の形状，色分布，大きさの変化に対応できるアルゴリズムとされているが，実験により大きさの変化が追従できるように拡張を施すと，追跡が非常に不安定になってしまうことが確認された．また，色ヒストグラムの重なりで定義される類似度の最大化により追跡を行うために，鋭い形状の色ヒストグラムになるような単色物体を追跡する場合，わずかな照明の変化でも簡単に追跡を失敗してしまうという欠点がある．

K-means tracker は，追跡対象に関する正事例の情報だけでなく，対象の周囲を取り囲む負事例の情報も利用し，K-means クラスタリングによって対象追跡を行う方法である．この方法では RGB の色空間と，画像上の位置 X，Y を併せた五次元の空間で各画素の特徴を表現し，ターゲットと非ターゲットへのクラスタリングを行う．したがって，対象の位置だけでなく，色空間中で色の変化に応じて色の追従も同時に行うことができる．よって，カメラの方位が変化することによるカメラの視野内の光環境の変化にも対応でき，能動追跡システムにおいて効果的に動作する．また，長軸，短軸，傾きを自由に変化させることができる可変楕円モデルを使用することにより，入力画像中の運動物体の大きさや形状の変化に合わせた安定な追従ができるという特長も有している．

以上，理論上の分析と実験による追跡性能の評価結果から，K-means tracker は本提案システムに最も適合していると考え，画像解析（物体追跡）のアルゴリズムとして採用する．

3.1 K-means tracker [13], [14] の概要

K-means tracker は我々の研究グループが提案しているビデオレートで非剛体のターゲットを安定に追跡できるアルゴリズムである．この手法は，画像上の追跡対象と非追跡対象に対して複数のクラスタ中心を割り当て，K-means クラスタリングによってサーチエリア内の各画素をターゲットと非ターゲットに分けながら追跡を行う．そのため，追跡対象の領域に混入した背景画素を効果的に排除ながら追跡を継続できるという頑健性をもっている．

3.1.1 色と空間的配置による特徴表現

追跡対象を構成する画素の色の類似性と空間的近接性を同時に表現するために，各画素の特徴を三次元色属性（例えば：$\mathbf{k} = [Y, U, V]^{\mathrm{T}}$）と二次元空間配置属性（$\mathbf{p} = [x, y]^{\mathrm{T}}$）からなる五次元ベクトル（$\mathbf{f} = [\mathbf{k}, \mathbf{p}]^{\mathrm{T}}$）として扱う．

クラスタリングの際に必要となる二つの画素 a，b の特徴ベクトル $\mathbf{f}_a$，$\mathbf{f}_b$ 間の距離は，色属性間の距離と空間配置間の距離を重み α を用いて線形結合して計算する．

$$d(\mathbf{f}_a, \mathbf{f}_b) = \|\mathbf{k}_{\mathbf{f}_a} - \mathbf{k}_{\mathbf{f}_b}\|^2 + \alpha \|\mathbf{p}_{\mathbf{f}_a} - \mathbf{p}_{\mathbf{f}_b}\|^2 \quad (1)$$

ただし，$0 < \alpha < 0.5$ である．

3.1.2 ターゲットと非ターゲット

従来の追跡アルゴリズムでは，ターゲットのみモデル化し，ある領域をターゲットに属するか否かを判断するためにはしきい値が必要である．このような方法では様々な環境で安定に動作できるしきい値の設定は一般的に困難である．一方，K-means tracker では，ターゲットと非ターゲットの両方を使用し，対象を初期化する．入力画素を五次元特徴空間内でターゲットクラスタ中心，非ターゲットクラスタ中心のどちらに近いか判定することによって属するクラスタを決定するため，しきい値を設ける必要がない．

3.1.3 サーチエリアと非ターゲットの更新

ターゲットの大きさや形状が変化しても安定かつ高

速に追跡を行うために，可変楕円モデルを使用する．楕円はターゲットの全画素を含むように配置されるため，楕円内部をサーチエリアとして追跡範囲を限定でき，楕円の輪郭上の画素は非ターゲットクラスタ中心として利用可能である．

追跡中，入力画像のサーチエリア内から検出された追跡対象の大きさや形状に合わせ，可変楕円のパラメータを毎フレーム更新する．

現フレームにおける可変楕円内のターゲット点の集合を S，可変楕円内のターゲット点の数を e，ターゲット点を $\mathbf{y} = [y_x, y_y]^{\mathrm{T}}$，とすると，次フレームにおける可変楕円モデルの中心座標 $\mathbf{c}$ は以下の式で求められる．

$$\mathbf{c} = \frac{1}{e}\sum_{\mathbf{y}\in S}\mathbf{y} \tag{2}$$

また，検出されたターゲット点の分布を正規分布であるとすると，ターゲット点の分布のマハラノビス距離より可変楕円を以下の式で求めることができる．

$$[\mathbf{y}-\mathbf{c}]^{\mathrm{T}}\overline{\Sigma}^{-1}[\mathbf{y}-\mathbf{c}] = J \tag{3}$$

ここで，

$$J = -2\ln(1-P) \tag{4}$$

$$\overline{\Sigma} = \frac{1}{e}\sum_{\mathbf{y}\in S}[\mathbf{y}-\mathbf{c}][\mathbf{y}-\mathbf{c}]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

ただし，$P = 0.95$ である．これは，ターゲットに属する画素がターゲットの重心（楕円の中心）から標準偏差の 2 倍の範囲内に存在する確率である．

また，非ターゲットクラスタ中心は求められた楕円の輪郭上から中心角が等しくなるように $m-1$ 個サンプリングされ，もう一つには楕円中心からクラスタリングされる注目画素の方向へ伸ばした半直線と，楕円の輪郭の交点をサンプリングする．なお，m はあらかじめ定められた非ターゲットクラスタ中心の数であり，実験的に 9 点採用されている．

3.1.4 K-means tracker の処理手順

Step 1：初期フレーム（$t = 0$）において，追跡対象の色の数に合わせた数個（n）のターゲットクラスタ中心点を手動で画像上に指定し，背景上の 1 点 $\mathbf{b}$ を指定する．指定されたターゲットクラスタ中心の重心 $\mathbf{c}$ を中心とし，$\|\mathbf{c}-\mathbf{b}\|$ を半径とした円を初期フレームにおける可変楕円として追跡を開始する．

指定されたターゲットクラスタ中心点と非ターゲットクラスタ中心点の画素における位置 (x, y) と色 (Y, U, V) 情報から各クラスタの初期特徴ベクトルを構成する．

Step 2：t フレームにおけるサーチエリア（可変楕円）内のある画素 $\mathbf{f}_u$ に対して，五次元特徴空間内にてターゲットクラス中心 $\mathbf{f}^*_{T_i}; (i = 1 \sim \mathrm{n})$ との最短距離，

$$D_{\mathrm{T}}(\mathbf{f}_u) = \min_{i=1\sim \mathrm{n}}\{d(\mathbf{f}_u, \mathbf{f}^*_{T_i})\} \tag{6}$$

と非ターゲットクラスタ中心 $\mathbf{f}^*_{N_j}; (j = 1 \sim \mathrm{m})$ との最短距離

$$D_{\mathrm{N}}(\mathbf{f}_u) = \min_{j=1\sim \mathrm{m}}\{d(\mathbf{f}_u, \mathbf{f}^*_{N_j})\} \tag{7}$$

をそれぞれ計算する．もし $D_{\mathrm{T}}(\mathbf{f}_u) < D_{\mathrm{N}}(\mathbf{f}_u)$ であれば，その画素はターゲット点とし，そうでなければ非ターゲット点とすることによってクラスタリングを行う．サーチエリア内のすべての画素に対してこの処理を行う．この際，非ターゲットクラスタ中心の更新を行わず，ターゲットクラスタ中心のみを更新する．ターゲットクラスタ i にクラスタリングされた画素を $\mathbf{f}_{t_i}$，その画素の集合を $\mathbf{F}_{T_i}$，$\mathbf{f}_{t_i}$ の総数を N_i とし，以下の式で $\mathbf{f}^*_{T_i} = [\mathbf{k}^*_{T_i}, \mathbf{p}^*_{T_i}]^{\mathrm{T}}$ を更新する．

$$\mathbf{p}^*_{T_i} = \frac{1}{N_i}\sum_{\mathbf{f}_{T_i}\in\mathbf{F}_{T_i}}\mathbf{p}_{T_i} \tag{8}$$

$$\mathbf{k}^*_{T_i} = \beta\frac{1}{N_i}\sum_{\mathbf{f}_{T_i}\in\mathbf{F}_{T_i}}\mathbf{k}_{T_i} + (1-\beta)\mathbf{k}^{*t-1}_{T_i} \tag{9}$$

ここで，$\mathbf{k}^{*t-1}_{T_i}$ は 1 フレーム前のターゲットクラスタ中心の色，β は一次遅れ系でターゲットクラスタ中心の色を更新するための係数である（$0 \le \beta \le 1$）．

Step 3：検出されたターゲット点の分布に合わせて楕円のパラメータを決定する．次フレームにおける可変楕円を更新する際，サーチエリアの中にターゲットをすべて含むように，求められた楕円の長軸，短軸をそれぞれ 1.25 倍拡大する．また，楕円の中心座標は式 (2) より求める．

Step 4：更新された可変楕円の輪郭上の画素から m 等分の点を選んで新しい非ターゲットクラスタ中心とする．更新後の非ターゲットクラスタ中心点の画素における位置 (x, y) と色 (Y, U, V) より各非ターゲットクラスタ中心の特徴ベクトルを更新する．$t = t+1$ として，**Step 2** に進む．

4. 信頼度を用いた能動カメラの動作拘束

K-means tracker では，ターゲットか非ターゲット

という 2 値の判定よりターゲットを追跡している．本手法ではそれに加え，どれだけターゲットらしいものを追跡しているか，という判断基準である「信頼度」を導入する．この信頼度から，どちらのカメラがより正確に対象を追跡できているかを判定する．提案システムでは，信頼度の高いカメラを基準にもう片方のカメラの動作を拘束するときの拘束量は，求められたカメラ間の相対的な信頼度を使用し調整する．

また，提案手法では，能動カメラの制御パラメータ数を可能な限り減らすために，x 方向のカメラ動作は拘束せず，y 方向のみのカメラ動作の拘束を行う．x 方向のカメラ動作の拘束を考えない理由は，提案システムが正常に動作している状況では，対象は画像の中心付近に撮影され続けていることと，2 台のカメラが水平に配置されている本システムの機構上，エピポーラ線もほぼ水平になることが多く，x 方向に推定対象位置がずれている場合，その矛盾を検出することが困難である場面が多いからである．

4.1 提案システムの処理の流れ

信頼度を用いた能動カメラの動作拘束のフローチャートを図 3 に示す．ここで，左右それぞれのカメラにおける信頼度を R_l，R_r とする．

まず，左右両カメラによって撮影された画像上で，K-means tracker を用いて対象を追跡し，それぞれの画像上の楕円の位置（対象の重心）を求める．そして，左右それぞれのカメラ座標系の原点から見た対象の方位，信頼度を求める．次に，信頼度の高いカメラの追跡結果を信頼し，信頼度の低いカメラにおけるエピポーラ線を求め，楕円位置を拘束する．能動カメラは，楕円の位置から算出される追跡対象の運動角速度に基づき制御されるため，エピポーラ線上に楕円位置を拘束することにより，能動カメラの動作を拘束することができる．しかし，画像解析より得られた拘束量は誤差を含んでいることがあるため，そのまま楕円の位置をフレームごとにエピポーラ線上に拘束すると，能動カメラの挙動が不安定になる可能性が高い．

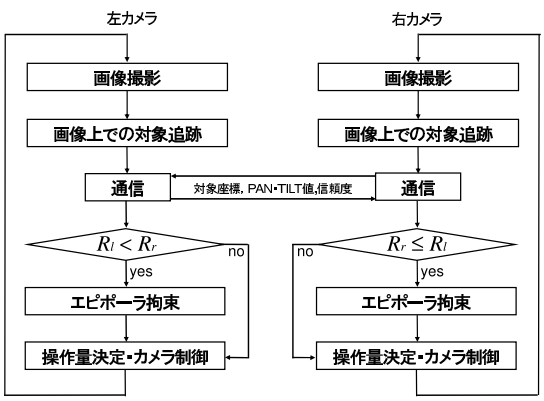

図 3 提案システムにおけるフローチャート
Fig. 3 The flowchart of our system.

この問題を解決するために，本手法では楕円位置を完全にエピポーラ線上に拘束するのではなく，信頼度の高い方のカメラの情報をどの程度信頼するかという値で重み付けを行うことによって拘束量を決定する．これにより，互いの制御ループを阻害しあうことなく，追跡対象の運動速度に合わせた能動カメラ制御を続けることができる．

以下，信頼度が高い方のカメラを高信頼度カメラ，低い方のカメラを低信頼度カメラと呼ぶ．

4.2 信頼度の算出

左右のカメラにおける追跡結果の信頼度は，それぞれ K-means tracker における五次元特徴空間内の距離計算の結果に基づいて求める．

まずは K-means tracker によって求められた追跡対象を囲む楕円内の画素 u における信頼度 $r(\mathbf{f}_u)$ を以下の式で計算する．

$$r(\mathbf{f}_u) = \begin{cases} \frac{D_{\mathrm{N}}(\mathbf{f}_u)}{D_{\mathrm{N}}(\mathbf{f}_u)+D_{\mathrm{T}}(\mathbf{f}_u)} & (D_{\mathrm{T}}(\mathbf{f}_u) < D_{\mathrm{N}}(\mathbf{f}_u)) \\ 0 & (\text{otherwize}) \end{cases} \tag{10}$$

これは，ターゲット点としてクラスタリングされた画素におけるターゲットらしさを表す．そして，そのカメラで撮影された画像から対象の追跡結果の信頼度 R は以下の式で求める．

$$R = \frac{1}{e}\sum_{u=1}^{C} r(\mathbf{f}_u) \tag{11}$$

ただし，C は楕円内の画素数，e はターゲット点の数である．両カメラ間で，楕円のサイズや，ターゲット点の数の違いを是正するために，e で除することで正規化を行っている．

4.3 相対的な信頼度による重みを用いたエピポーラ線への楕円位置拘束

本論文では，低信頼度カメラのみが，高信頼度カメラの追跡結果から求められたエピポーラ線への楕円位置拘束を行う．これにより，低信頼度カメラのみ，カメラの動作を拘束する．

左右のカメラ間の相対的な信頼度 w は以下のよう

に定義する．

$$w = \frac{R_b}{R_l + R_r} \quad (R_b = \max\{R_l, R_r\}) \tag{12}$$

w のもつ意味は，低信頼度カメラの追跡結果に対する，高信頼度カメラの相対的な信頼度である．左右カメラ間の信頼度の差が大きい場合，w の値は 1 付近となり，高信頼度カメラより推定されたエピポーラ線の位置を信用し，低信頼度カメラに対する拘束量を大きくする．逆に，左右カメラ間の信頼度の差が小さい場合，w の値は 0.5 付近となり，互いの制御ループにできる限り干渉しないように低信頼度カメラに対する拘束量が小さくなる．すなわち，w は，前者の場合は，低信頼度カメラにおける追跡は失敗している可能性が高いと判断し，高信頼度カメラの追跡結果を信頼し楕円位置を強く拘束し，後者の場合には拘束する必要性が低いため，弱く拘束する，という効果をもたらす．

提案システムでは，2 台のカメラはキャリブレーション済みなため，エピポーラ線を求めるために必要なカメラ内部パラメータ行列，カメラ間の並進ベクトルは既知である．また，動作中の能動カメラの PAN, TILT の角度はオンラインで取得することができるため，回転行列も既知として扱える．

本手法では，画像の y 軸方向のみ楕円の位置をエピポーラ線に拘束する（図 4）．対象を含む楕円中心 $\mathbf{c} = (c_x, c_y)$ から，エピポーラ線までの y 軸方向の距離 y_d は，エピポーラ線の方程式 $y_e(x)$ を用い，以下の式で求める．

$$y_d = y_e(c_x) - c_y \tag{13}$$

能動カメラの挙動が不安定にならないよう，相対的な信頼度による重み w をかけた値がエピポーラ線に近づかせるための拘束量 Δy，t フレームにおける拘束後の楕円中心 $\mathbf{c}_t$ は以下の式で求める．

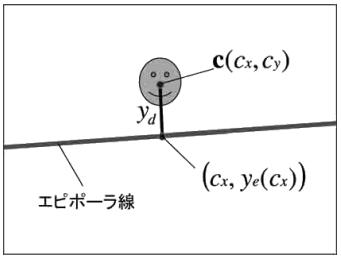

図 4　エピポーラ線への y 軸方向の楕円位置の拘束
Fig. 4　Ellipse position constraint on the epipolar line along the vertical direction.

$$\Delta y = w y_d \tag{14}$$

$$\mathbf{c}_t = \begin{cases} \mathbf{c}_t & \text{(if the camera with higher reliability)} \\ \mathbf{c}_t + \Delta\mathbf{y} & \text{(else)} \end{cases} \tag{15}$$

ここで，$\Delta\mathbf{y} = [0\ \Delta y]^T$ である．

5. 能動カメラの制御

5.1 PAN，TILT の速度制御 [1]

それぞれの能動カメラにおいて，追跡対象の運動角速度に合わせた PTU（Pan Tilt Unit）の制御を行う．PTU の制御に，PID 制御を採用し，制御量は角速度として与える．この理由は，対象の角速度を P 成分，位置を I 成分，そして対象の予測運動を D 成分に対応づけることにより，対象の運動予測を行いながら，カメラの回転速度を対象の速度に合わせると同時に，対象を画像の中心でとらえるというカメラ制御が実現できるからである．

以下に P，I，D 各成分の算出方法について述べる．

5.1.1 追跡対象の角速度の推定

時刻 t における追跡対象の角速度 $\mathbf{v}_{\mathrm{obj}t}$ は次のように表される．

$$\mathbf{v}_{\mathrm{obj}t} = \mathbf{v}_{\mathrm{Robj}t} + \mathbf{v}_{\mathrm{cam}t} \tag{16}$$

ここで，$\mathbf{v}_{\mathrm{cam}t}$ は能動カメラの角速度を表す．$\mathbf{v}_{\mathrm{Robj}t}$ は追跡対象の画像上での見掛けの角速度，カメラの投影中心から見た追跡対象の方位 $\mathbf{s}$ のフレーム間差分から求める．

$$\mathbf{s}_t = \arctan\left(\frac{\mathbf{c}_t - \mathbf{c}_{\mathrm{img}}}{f}\right) \tag{17}$$

$$\mathbf{v}_{\mathrm{Robj}t} = \frac{\mathbf{s}_t - \mathbf{s}_{(t-1)}}{\Delta t} \tag{18}$$

ここで，$\mathbf{c}_t$ は t フレームにおける式 (15) で求めた楕円の中心座標であり，追跡対象の画像中の重心座標である．$\mathbf{c}_{\mathrm{img}}$ は画像中心の座標，f はカメラの焦点距離，$\Delta t = t - (t-1)$ である．なお f の単位は pixel である．

$\mathbf{v}_{\mathrm{cam}t}$ はあらかじめ求めておいた PTU の運動特性 $g_{v_u}(t)$ から，フレーム間の PTU の平均角速度として求める．

$$\mathbf{v}_{\mathrm{cam}t} = \frac{1}{\Delta t}\int_{t-1}^{t} g_{v_u}(t)dt \tag{19}$$

5.1.2 PID 制御に基づく操作量の決定

推定された追跡対象の角速度をもとに操作量を決定する際，P，I，D それぞれの成分を以下のように計算する．

P 成分： 式 (16) で求めた追跡対象の角速度．

I 成分： 画像中心と追跡対象の重心位置のずれの補正と，カメラの動作を拘束するための項である．この項は位置成分であるが，PTU に与える命令は角速度形式なので，角速度形式に変換して I 成分 $\mathbf{v}_{\mathrm{dx}t}$ として加える．

$$\mathbf{v}_{\mathrm{dx}t} = \frac{\mathbf{s}_t}{\Delta t} \tag{20}$$

D 成分： 追跡対象はサンプリング時間内に等加速度運動をすると仮定して，追跡対象の運動を予測する．この加速度を D 成分 $\mathbf{a}_t$ として加える．

$$\mathbf{a}_t = \frac{\mathbf{v}_{\mathrm{obj}t} - \mathbf{v}_{\mathrm{obj}(t-1)}}{\Delta t} \tag{21}$$

以上のように P，I，D，それぞれの成分を決定し，以下の制御則で PTU を制御する．

$$\mathbf{v}_u(k) = \mathrm{K_p}\mathbf{v}_{\mathrm{obj}t} + \mathrm{K_i}\mathbf{v}_{\mathrm{dx}t} + \mathrm{K_d}\mathbf{a}_t\Delta t \tag{22}$$

ここで，$\mathrm{K_p}$，$\mathrm{K_i}$，$\mathrm{K_d}$ は，P，I，D それぞれの成分のゲインである．

5.2 ズーム制御

K-means tracker を用いてターゲットを追跡する際，サーチエリア（可変楕円）内にターゲットの色に類似した背景が含まれていると，一部の非ターゲットの画素をターゲットとして誤クラスタリングされる可能性がある．このような間違いが発生すると，次フレームにおけるサーチエリアを制限する可変楕円の重心やサイズなどの推定値に誤差が含まれてしまう．また，撮影される方向によって著しく面積が変化する物体（例：本など）の場合，ターゲットの姿勢変化によって可変楕円の大きさが著しく変化する可能性がある．

以上の理由で，単眼カメラで撮影された画像中の楕円の大きさを一定に保つようにズーム制御を行う場合，一定の画質の画像を撮影し続けることができない可能性がある．

提案システムでは，カメラ間の外部パラメータが既知である 2 台のカメラを使用している．したがってそれぞれのカメラによって撮影された画像中の対象の位置，PTU の PAN，TILT の方位から，カメラ座標系，若しくはワールド座標系における対象の三次元位置を推定することができる．追跡対象の三次元位置情報から，それぞれのカメラから追跡対象までの距離を計算し，それに応じて動的にズーム，フォーカスを制御することができる．このような制御を行うことにより，追跡対象はカメラに対して奥行の変化があっても同じ高品質・高解像度の画像を撮影し続けることができる．

初期状態におけるカメラの画角を ρ_0，投影中心から追跡対象までの距離を $\|\mathbf{q}_0\|$ とし，頂角を ρ_0，高さを $\|\mathbf{q}_0\|$ としたときに形成される二等辺三角形の底辺の長さを l_0 とする．また，時刻 t における l を l_t とする（図 5）．このとき，常に

$$l_t = l_0 \tag{23}$$

となるように焦点距離 f を調節することにより，追跡対象を一定の解像度で撮影することを実現できる．時刻 t における焦点距離 f_t は以下の式で決定できる．

$$\tan\left(\frac{\rho_t}{2}\right) = \frac{\kappa}{2f_t} = \frac{l_t}{2\|q\|} \tag{24}$$

ここで，κ は画像の解像度である．

5.3 フォーカス制御

フォーカス値は，カメラから対象までの距離に応じて変化させる．カメラからの対象までの距離 $\|\mathbf{q}\|$ と合焦するフォーカス値 ζ の関係を事前に調べておき，距離・フォーカス特性 $h(\|\mathbf{q}\|)$ として保持しておく．

$$\zeta = h(\|\mathbf{q}\|) \tag{25}$$

そして，追跡処理により求められた対象の三次元位置と，この特性 $h(\|\mathbf{q}\|)$ から適切なフォーカス値 ζ を算出，制御する．

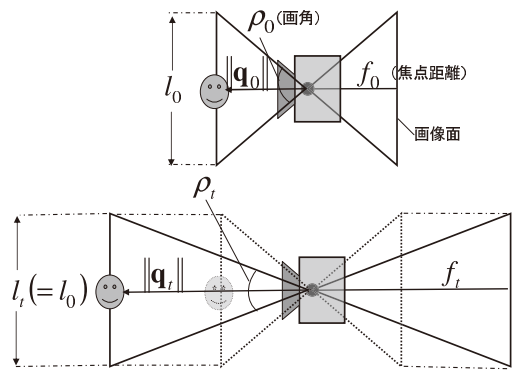

図 5 ズーム制御の原理
Fig. 5 Principle of active zoom control.

6. 実験と考察

6.1 評価実験

構築した高速追従型 2 眼能動カメラシステムの性能を評価するために，以下の三つの手法で，比較実験を行った．

手法 1：エピポーラ拘束を行わず，2 台の能動カメラをそれぞれ独立に制御する．

手法 2：$w = 1$ で，低信頼度カメラの動作拘束を行う．

手法 3：式 (12) により拘束量に重み付けし，相対的な信頼度に基づくカメラ動作の拘束を行う．

比較実験の実験環境を図 6 に示す，三つの手法を比較するために，追跡対象の運動の再現性を高める必要がある．したがって，2 眼高速追従型能動カメラから約 4 m 離れた位置に天井から吊り下げた振り子運動をするぬいぐるみを追跡対象とし，図 7 中の No.0 のように，毎回ほぼ同じ高さからぬいぐるみを落下させ，その後は落下の惰性により運動させた．なお，式 (22) 中の K_p，K_i，K_d は，これらのゲインは実験的に定め，$K_p = 1.0$，$K_i = 1.0/5.0$，$K_d = 1.0$ とした．また，本実験におけるターゲットクラスタ中心の数 n，非ターゲットクラスタ中心の数 m はそれぞれ，$n = 3$，$m = 9$ である．

比較実験で得られた右カメラ画像系列の一部を図 7 に示す．画像中の直線は左カメラの視線を射影したものである．ここで，視線とは，カメラの投影中心と画像中心を通る直線である．

本研究の目的である，「2 台のカメラの視線が三次元空間中の 1 点で交わるように制御すること」の達成度を評価するために，カメラの視線が三次元空間中でどの程度一致しているかを比較した．評価尺度は，それぞれのカメラを基準としたエピポーラ平面の法線ベクトルの角度のずれ量を用いた．もし，カメラの視線が三次元空間中で交わっていれば，法線ベクトルのずれ量は 0 となる．

追跡は 120 フレーム間行い，法線ベクトルのずれ量の絶対値の平均，偏差を求めた．それぞれの手法における法線ベクトルのずれ量を時系列で示したものを図 8，ずれ量の絶対値の平均と偏差を表 1 に示す．

手法 1 に比べ，提案手法である手法 3 の方がずれの平均値と偏差値の両方が小さく，それぞれのカメラの視線が三次元空間中で交わっている度合が高いことが確認できる．手法 2 における平均と偏差のずれ量が手法 1，3 に比べ大きい理由は，推定誤差があったエピポーラ線への楕円位置の拘束を行うとき，対象の運動速度に合わせた制御が不安定になったためであると考

図 6　比較実験の環境
Fig. 6　The environment of comparative experiments.

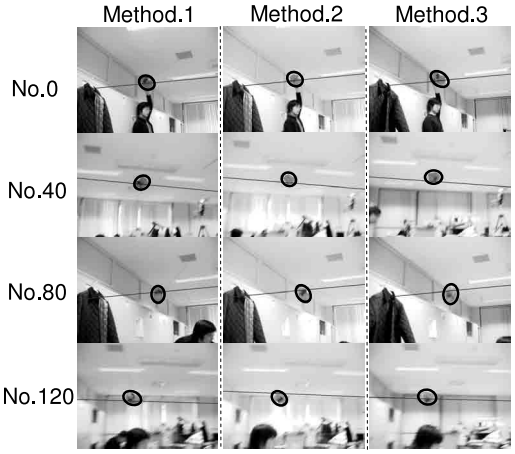

図 7　比較実験における画像系列の一部（右カメラ画像）
Fig. 7　Three image sequences of the comparative experiment (taken by the right camera).

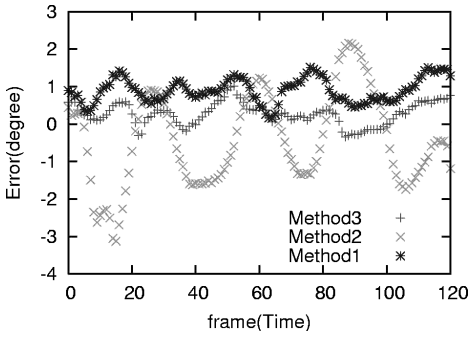

図 8　各手法におけるエピポーラ平面の法線ベクトルのずれ
Fig. 8　The displacements between normalized vectors of the epipolar plane for each method.

表 1　各手法における法線ベクトルのずれ量の絶対値の平均と偏差
Table 1　The average and deviation of the displacements between the normalized vectors estimated by each method.

単位：度	平均	偏差
手法 1	0.84	0.28
手法 2	1.06	0.71
手法 3	0.33	0.20

表 2　各手法におけるフレーム間の位置差の絶対値の平均・偏差
Table 2　The average and deviation of the absolute values of the position error between frames.

	右カメラ		左カメラ		左右合算	
単位：pixel	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差
手法 1:x 方向	3.9	2.6	3.6	2.7	3.8	2.6
手法 3:x 方向	3.8	2.4	3.6	2.6	3.7	2.5
手法 1:y 方向	3.3	2.1	3.6	2.3	3.5	2.2
手法 3:y 方向	3.7	2.9	3.9	3.0	3.8	2.9

えられる．

次に，追跡性能の評価として，どの程度，対象の運動速度と能動カメラの回転速度が一致しているかを示す．評価基準には，現・前フレーム間の対象の画像上における位置の差を用いる．以下，フレーム間の位置差と呼ぶ．

フレーム間の位置差は，もし対象と能動カメラの速度が完全に一致していれば，0 となり，速度のずれ量が大きくなれば，フレーム間の位置差も大きくなる．

手法 1，手法 3 における，両カメラにおけるフレーム間の位置差の絶対値の平均と偏差を表 2 に示す．

x 方向の位置差の平均，偏差は，手法 1，手法 3 の間でほぼ差がないが，手法 3 の y 方向の平均と偏差が手法 1 のそれに比べ，若干大きい結果となった．これは，本手法では動作を拘束された能動カメラは対象を画像中心で撮影することより，カメラの視線をも片方のカメラの視線に近づけるという動作を優先させるからである．しかし，手法 1，手法 3 間のこれらの差は 1 ピクセル以下で，追跡処理に与える影響は少ない．

以上の結果から，2 台のカメラを協調させ，エピポーラ線を用いたカメラ動作の拘束を加えても，単眼高速追従型能動カメラを独立に 2 台それぞれ動作させる場合に比べ，追従性能はほとんど低下しないことを確認した．

6.2　人物追跡実験

カメラの前を歩く人物の頭部を追跡したときの画像系列の一部を図 9 に示す．なお $n = 2$，$m = 9$ である．

図 9　人物の頭部を追跡する画像系列例
Fig. 9　An image sequence of tracking a human head.

表 3　人物追跡実験におけるフレーム間の位置差の平均・偏差
Table 3　The average and deviation of the position errors between frames while tracking a human head.

	右カメラ		左カメラ		左右合算	
単位：pixel	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差
x 方向	2.4	2.7	2.1	2.2	2.2	2.4
y 方向	3.1	3.3	3.1	3.0	3.1	3.2

人物はカメラの右側から左側へと直線的に歩き，フレーム No.080 のあたりで能動カメラに最接近している．

このときの，x 方向，y 方向それぞれのフレーム間の位置差の平均値，偏差を表 3 に示す．**6.1** の追跡対象に比べ，速度が遅く，等速に近い運動をしていたため，これらの誤差が小さくなっている．

6.3　自由に動く物体の追跡実験

空間中で自由に動く物体の追跡実験を行った．追跡対象は手に持ったぬいぐるみで，240 フレーム間追跡を行った．この実験で撮影された画像系列の一部を図 10 に示す．なお，$n = 3$，$m = 9$ である．

実験中，追跡対象は，直線運動，円運動，急停止などの動作を行った．No.165 のように，急な加速度の変化が起こった場合，対象は，画像の中心から大きくずれ，対象の画像もぶれるという現象が発生するが，提案システムでは，空間中で自由に動き，運動予測が難しい物体を追跡対象としても追跡することが可能であることが分かった．

この実験における x 方向，y 方向それぞれのフレーム間の位置差の平均，偏差を表 4 に示す．

急な加速度の変化に，能動カメラが反応できないため，これらの誤差が大きくなった．しかし，提案シス

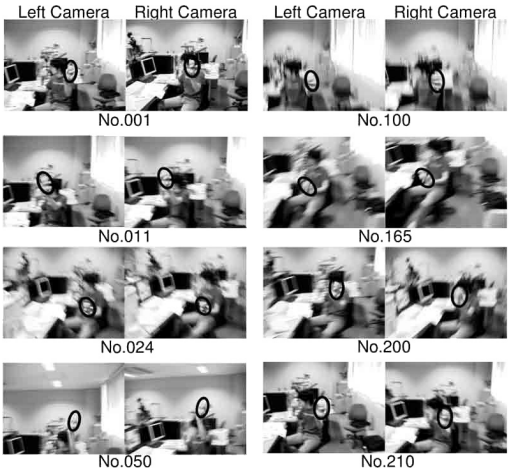

図 10　自由に動く物体（ぬいぐるみ）の追跡実験時の画像系列例
Fig. 10　An image sequence of tracking a freely moving object (a stuffed bear).

表 4　自由に動く物体の追跡実験におけるフレーム間の位置差の平均・偏差
Table 4　The average and deviation of the position errors between frames while tracking a freely moving object.

	右カメラ		左カメラ		左右合算	
単位：pixel	平均	偏差	平均	偏差	平均	偏差
x 方向	17.9	9.7	18.7	10.5	18.3	10.1
y 方向	15.6	12.4	13.0	11.5	14.3	11.9

テムでは，能動カメラの制御を PID 制御で行っているため，時間の経過とともにこのような遅れを回復し，対象の運動に合わせて能動カメラが動作する．

x 方向より y 方向の誤差の平均が小さいのは，本実験における対象の加速度の変化が x 方向の方が急激だったからである．それにもかかわらず，y 方向の偏差が x 方向に比べて大きく，誤差の量にばらつきがある理由は，対象が高速に動いたことで拘束量が大きくなることがあったためであると考えられる．

6.4　類似色の物体の近接実験

色が類似している物体への近接実験の様子を図 11 に示す．図 11 中の左側はエピポーラ拘束を行い追跡した際の画像系列，右側がエピポーラ拘束を行わずに追跡した際の画像系列である．なお，$n = 3$，$m = 9$ である．

エピポーラ拘束なしの制御では，追跡対象は類似色の物体が接近したあと再び離れる際，対象を撮影する角度の違いから，それぞれのカメラが違う物体を追跡してしまう可能性が高い．一方，提案手法では y 方向

図 11　類似色の物体への近接実験における画像系列例
Fig. 11　Two image sequences while the target was approaching to another object with similar colors.

に能動カメラの動作を拘束しているため，矛盾せず追跡できることを確認した．ただし，類似色の物体に近接した後，対象が水平方向にのみ動いた場合，本手法では追跡結果に矛盾があることを検知することができない場合がある．

6.5　奥行方向に移動する物体の追跡実験

カメラに対して奥行方向に移動するボールを 210 フレーム間，ズーム・フォーカス制御を行いながら追跡した結果を図 12 に示す．右カメラだけ画像上でボールが一定の大きさに映るようにズーム・フォーカス制御を行っている．なお，合焦する様子が分かりやすいように初期状態では故意にフォーカスをずらしている．なお，$n = 1$，$m = 9$ である．

図 12 に示した左カメラ画像と右カメラ画像を比較すると，左カメラ画像中の追跡対象のサイズが小さくなっているが，右カメラ画像中の追跡対象はズームアップされて撮影されていることが分かる．また，初期フレームにおけるフォーカスのずれも解消されていることが分かる．

図 13 に，追跡実験中のカメラから対象までの距離，底辺の長さ l_t，画角の変化の様子を示す．左の縦軸が，カメラから対象までの距離，l_t に対応し，右の縦軸が

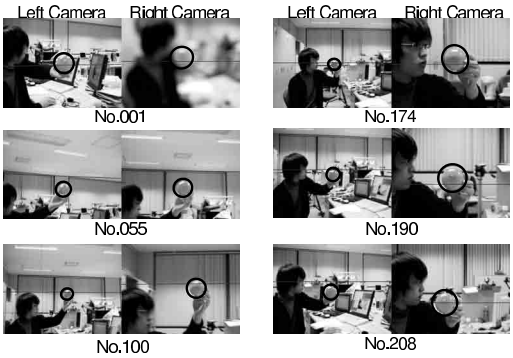

図 12　ズーム・フォーカス制御の様子
Fig. 12　An image sequence of controlling the zoom and focusing.

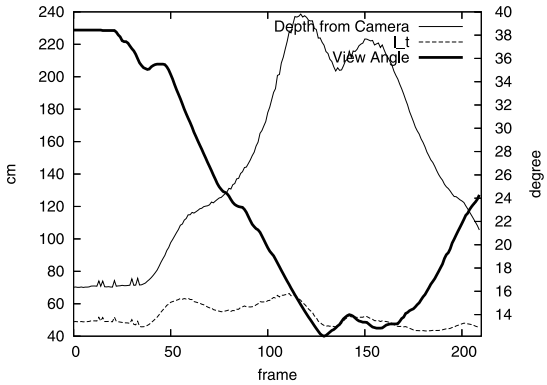

図 13　右カメラから対象までの距離（左軸），l_t（左軸），画角（右軸）
Fig. 13　Distance from right camera to the object (left axis), l_t (left axis) and angle of view (right axis).

画角に対応している．図 13 から，カメラから対象までの距離が，近いときは広角で撮影し，遠いときは望遠で撮影されていることが分かった．

40 フレームから 120 フレームのあたりで，l_t の値と初期値 l_0 との差が大きくなっている．これは，カメラのズームスピードの限界を超える速度で対象が奥行方向に移動したためであると考えられる．

この実験によって推定されたワールド座標系における対象の運動軌跡を図 14 に示す．右カメラ投影中心から約 80 cm 離れた場所から追跡を開始し，左右に動きながら約 240 cm の所まで移動した．そしてまたカメラに近づいた．本システムの距離推定誤差は，カメラから 2 m の地点で，±20 cm 程度であった．

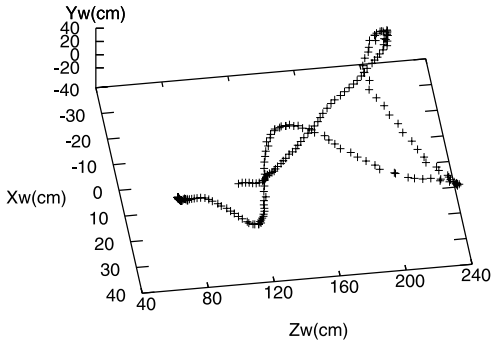

図 14　推定された対象の運動軌跡
Fig. 14　Estimated object trajectory.

7. むすび

本論文では，2 台の能動カメラの視線方向に矛盾が生じないように，それぞれのカメラの視線が三次元空間中の 1 点で交わるように制御しながら，追跡対象を画像中心で，かつ高画質・高解像度に撮影し続けることを実現するために，K-means tracker の距離計算結果に基づく信頼度を用いたカメラ動作の拘束の方法を提案した．また，追跡が不安定になることを防ぐため，相対的な信頼度で拘束量に重みをつけ，能動カメラを制御する方法も提案した．

評価実験の結果，y 方向のみ能動カメラの動作を拘束するという非等方な制御を行っても，単眼高速追従型能動カメラに比べ提案システムは追従性能をほとんど低下させることなく 2 台のカメラの視線が三次元空間中の 1 点で交わるように制御することに成功していることを確認した．また，ステレオ視のメリットを生かし，カメラから対象までの距離に応じたズーム・フォーカス制御を行い，カメラに対して奥行方向に移動する物体も鮮明に撮影することが可能となった．

謝辞　本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）（2）16200014 及び（C）（2）18500131 の補助を受けている．

文　献

[1] 大池洋史，呉　海元，華　春生，和田俊和，“高速追従型能動カメラシステム，” システム制御情報学会論文誌，vol.20, no.3, pp.114–121, 2007.
[2] 鏡　慎吾，小室　孝，渡辺義浩，石川正俊，“ビジョンチップを用いた実時間視覚処理システム，” 信学論（D-I），vol.J88-D-I, no.2, pp.134–142, Feb. 2005.
[3] T. Senoo, A. Namiki, and M. Ishikawa, “High-speed batting using a multi-jointed manipulator,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,

pp.1191–1196, 2004.
[4] 喜多伸之，“心窩両眼能動ビジョンシステムにおける注視制御についての考察,” 情処学研報，97-CVIM-103, pp.131–138, 1997.
[5] 岡田隆三，大明準治，近藤伸宏，“ロボットのための高速視覚システム,” 東芝レビュー，vol.59, no.9, pp.29–32, 2004.
[6] 和田俊和，松山隆司，“能動カメラによる実時間対象追跡,” 日本ロボット学会誌，vol.19, no.4, pp.433–438, 2001.
[7] 喜多伸之，S. Rougeaux，國吉康夫，坂根茂幸，“仮想ホロプタを用いた実時間両眼追跡,” 日本ロボット学会誌，vol.13, no.5, pp.101–108, 1995.
[8] T. Uhlin, P. Nordlund, A. Maki, and J.O. Eklundh, “Towards an active visual observer,” Proc. ICCV, pp.679–686, 1995.
[9] A. Maki and T. Uhlin, “Disparity selection in binocular pursuit,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E78-D, no.12, pp.1591–1597, Dec. 1995.
[10] K. Pahlavan and J.O. Eklundh, “A head-eye system – Analysis and design,” Proc. Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding, vol.56, pp.41–56, 1992.
[11] 岡田隆三，白井良明，三浦　純，久野義徳，“オプティカルフローと距離情報に基づく動物体追跡,” 信学論（D-II），vol.J80-D-II, no.6, pp.1530–1538, June 1997.
[12] 和田俊和，浮田宗伯，松山隆司，“視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用,” 信学論（D-II），vol.J81-D-II, no.6, pp.1182–1193, June 1998.
[13] C. Hua, H. Wu, Q. Chen, and T. Wada, “Object tracking with target and background samples,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E90-D, no.4, pp.766–774, April 2007.
[14] K-means tracker movies, http://vrl.sys.wakayama-u.ac.jp/VRL/studyresult/study_result_3.html
[15] M. Isard and A. Blake, “Condensation-conditional density propagation for visual tracking,” Int. J. Comput. Vis., vol.29, no.1, pp.5–28, 1998.
[16] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer, “Kernel-based object tracking,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.25, no.5, pp.564–577, 2003.

（平成 19 年 7 月 11 日受付，10 月 28 日再受付）

大池　洋史

2004 和歌山大・システム工卒．2006 同大大学院システム工学研究科博士前期課程了．同年，同研究科博士後期課程入学．現在に至る．物体追跡，能動カメラ制御の研究に従事．IEEE 学生員．

呉　　海元　（正員）

1987 中国西安交通大学大学院修士課程了．同年より同大学助手．1990 より同大学講師．1994 大阪大学大学院基礎工学研究科物理専攻博士後期課程に入学，1996 同中退．同年より京都工芸繊維大学工芸学部助手．2002 より和歌山大学システム工学部助教授．工博．情報処理学会，システム制御情報学会，ヒューマンインターフェース学会，IEEE 各会員．

華　　春生

2001 瀋陽工業大卒．2003 京都工芸繊維大学工芸科学研究科修士課程了．同年和歌山大学システム工学研究科博士後期課程入学．2006 同課程了．同年より大阪大学大学院情報科学研究科特任研究員．顔認識，物体追跡の研究に従事．情報処理学会，IEEE 学生員．

和田　俊和　（正員）

1987 東京工業大学大学院修士課程了．1990 同大学博士課程了．同年より岡山大学工学部助手．1994 より同大学大学院自然科学研究科助手．1995 より同大学工学部講師．1997 より京都大学大学院情報学研究科助教授．2002 より和歌山大学システム工学部教授．工博．1995 第 5 回コンピュータビジョン国際会議 David Marr 賞受賞．情報処理学会，IEEE 各会員．