

氏名（本籍）	大池 洋史（和歌山県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第25号
学位授与日付	平成21年3月25日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	能動カメラの高速追従制御による移動物体の鮮明な画像撮影方法に関する研究
学位論文審査委員	（主査）教授 呉 海元 （副査）教授 和田 俊和 教授 入野 俊夫

論文内容の要旨

1 研究概要

運動している物体を対象とした画像の認識・理解をより正確に行うためには、注目物体を見失わないようにカメラの方位を能動的に制御しながら追跡し、かつ、対象の色やエッジ等の情報を損なわないように撮影する必要がある。本論文ではこのような、移動物体の能動的な追跡に焦点を当て、下記の2点について議論する。

- （1）追跡対象の鮮明な画像を撮影し続ける撮影方法
- （2）高速かつロバストな画像上での追跡手法

（1）に関しては、**K-means tracker** という画像上での物体追跡アルゴリズムを用いて画像上で注目対象を追跡し、その結果に基づき、能動カメラを対象の運動に合わせて適切に制御することにより、対象を追跡しながら鮮明な対象の画像を撮影することができる単眼と2眼の能動追跡システムを提案する。本論文で提案する単眼の能動カメラを用いた物体追跡システムは、ビデオレート（30fps）で画像を撮影しながら、能動カメラのパン・チルトを対象の運動速度に合わせて制御することにより、追跡対象を鮮明に撮影する。

また、2眼能動追跡システムは、単眼の能動カメラを2台使用して構築する。このシステムは、単眼の追従性能を保ったままカメラの視線を3次元空間中の一点で交差させながら対象に追従することが可能である。さらに、パン・チルトだけでなく、対象の3次元位置情報を利用することによりズーム・フォーカスも自動的に制御することもできる。

（2）に関しては、**K-means tracker** の問題点を解決し、高速化・安定化を計る方法について議論する。**K-means tracker** は、配置属性（画像の x, y 座標）と色属性（ Y, U, V など）で構成される5次元の特徴空間内にて **K-means** クラスタリングを行い、入力画像中の画素を対象が背景に分類することで対象を高速に追跡する手法である。このクラスタリングを行うために、背景に関する情報（非ターゲットクラスタ中心）と対象に関する情報（ターゲットクラスタ中心）を画像上に配置する。しかし、従来の **K-means tracker** では、現時刻における背景や対象の状況を考慮せず、背景に関する情報である非ターゲットクラスタ中心を機械的に画像上に配置しているため、真に必要な場所に非ターゲットクラスタ中心が配置されない、逆に不必要な場所に配置される、などの問題があった。

そこで本論文では、このような問題を解決するため、非ターゲットクラスタ中心の配置法を見直し、より安定な追跡処理と、処理コストの削減を両立することができる手法を提案する。また、**K-means tracker** のもう一つの問題である配置空間（ xy 空間）内距離と色空間内距離の統合方法について議論する。**K-means tracker** ではダイナミックレンジの異なるこれら2つの距離を統合する際、クラスタリングの時に不都合が生じないようにバランスをとる必要がある。従来の方法では、あらかじめ設定された固定値で配置空間内距離に重み付けすることで整合性を保っていたが、この値で整合性がとれる範囲を超えた場合、追跡処理が不安定になる問題があった。そこで、本論文ではこの問題を解決するために、色空間内のデータの分布に対して主成分分析を行い、求められた固有値を利用する事で追跡を安定化する方法も提案する。

以下、本研究の概要と今後の課題・展望を説明する。

2 高速追従型単眼能動カメラシステム

運動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同等に重要となる。そこで、本研究ではこれらの問題を解決するための1つの試みとして、撮影対象を、能動カメラを用いて追跡することにより、対象を鮮明かつ画像中心に撮影し続ける能動追跡システムを構築した。

従来の能動追跡システムでは、特殊なセンサや、実環境には適さない前提条件が必要な上、撮影される追跡対象の画質は度外視されていた(図1左)。そこで本論文では、撮影される追跡対象の画質に



図1: 従来の能動追跡システムで撮影される画像(左)と提案システムにて撮影される画像(右)。

も着目し、高速かつ自由に運動している物体を市販のカラービデオカメラで撮影し、ビデオレート(30Hz)で画像の撮影、物体追跡、能動カメラの制御を行いながら対象の鮮明な画像を撮影する単眼の能動追跡システムを提案する。この追跡システムの特徴は、追跡対象が運動している限り、能動カメラの回転動作を停止させることなく対象の速度に合わせて滑らかに制御することにより、背景はぶれ、対象は鮮明に、かつ画像の中心に撮影できることである(図1右)。



図2: 人物頭部追跡時の画像例

このシステムでは、K-means tracker により画像

上で対象追跡を行い、それにより推定された対象の重心座標から、追跡対象の角速度を求め、それに合わせて能動カメラの速度制御を行う。この制御はPID制御で行い、対象の角速度をP成分、位置をI成分、そして対象の加速度をD成分に対応付ける。これにより、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運動速度に合わせてると同時に、対象を画像の中心でとらえるというカメラ制御が実現する。

このシステムでカメラの前を歩く人物の頭部を追跡した時の画像系列の一部を図2に示す。カメラの前を横切る人物を、カメラの方位を変化させながらほぼ画像の中央に撮影し続けている様子がわかる。提案システムは、人物のようにゆっくり直線的に動くものだけでなく、素早くランダムに移動する物体(150度/秒程度)も追跡することができた(図3)。また、ぶれ低減の評価実験なども行い、提案システムの有効性を確認した。

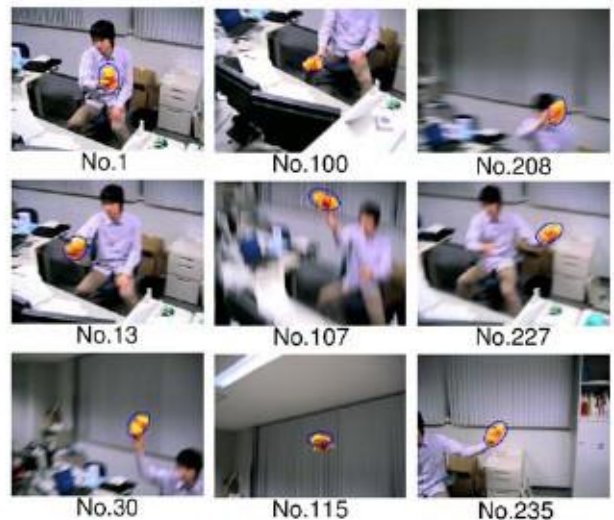


図3: ランダムに動く物体の追跡実験における画像例

3 高速追従型2眼能動カメラシステム

前章で述べた単眼の能動追跡システムを2台に拡張した、高速追従型2眼能動カメラシステムを構築した。このシステムでは、「どちらのカメラの追跡結果がどの程度信頼できるか」という情報を数値で表すために、k-means tracker における特徴空間内での距離を利用した「信頼度」という概念を導入した。この値に応じて、それぞれの能動カメラの動作をどの程度補正するかを決定し、左右のカメラの視線方向にずれが生じにくいような制御を行った。これにより、2台の能動カメラが連携

して動作しているにも関わらず、単眼の高速追従型能動カメラシステムの追従性能をほとんど落とさずにそれぞれの能動カメラを制御できることを確認した。

また、提案した 2 眼能動追跡システムは、ステレオ視を行うことができるメリットを活かし、パン・チルトの制御だけでなく、カメラから対象までの距離に応じたズーム・フォーカスの自動調整ができるシステムとなっている。このシステムにより撮影された画像例を図 4 に示す。なお、この実験時は、ズーム・フォーカスの様子をわかりやすくするため、右カメラのみの制御とし、初期フレームではピントをずらしている。この図から、初期



図 4: ズーム・フォーカス制御の様子

フレームでのピントずれが 55 フレーム目には解消され、ズーム・フォーカスの自動制御を行いながら対象を追跡していることがわかる。その他、性能評価実験を通し、本システムの有効性を示した。

4 K-means Tracker における適応的な非ターゲットクラスタ中心の配置法

K-means tracker は、画像上の追跡対象と背景に対して複数のクラスタ中心を割り当て、毎フレーム、K-means クラスタリングを行うことによってサーチエリア内の各画素をターゲットか非ターゲットに分けることにより追跡を行う手法である。画素毎にターゲット、非ターゲットのラベルをつけるため、追跡対象の領域に混入した背景画素を排除しながら追跡を継続できるという頑健性を持っている。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をターゲットクラスタにフィッティングさせることにより、入力画像中の追跡対

象の大きさや形状の変化にも追従できる。このように、K-means tracker は他の追跡手法に比べ、さまざまな条件下において対象を頑健に追跡することができるため、能動追跡システムに搭載する物体追跡手法として最適である。

しかし、従来の K-means tracker では、図 5 のサーチエリア楕円（水色）上に非ターゲットクラスタ中心を等間隔に機械的に配置するだけで、その配置方法について十分な議論がされておらず、それが原因で一部の場面で追跡が不安定になることがあった。

そこで、本研究では、非ターゲットクラスタ中心の配置に着目し、サーチエリア楕円上の画素を走査し、追跡にも使用される 5 次元特徴空間内の距離に基づき、背景の状態に応じた非ターゲットクラスタ中心の個数を適応的に配置する方法を提案した（図 5）その結果、図 6 に示すように、従

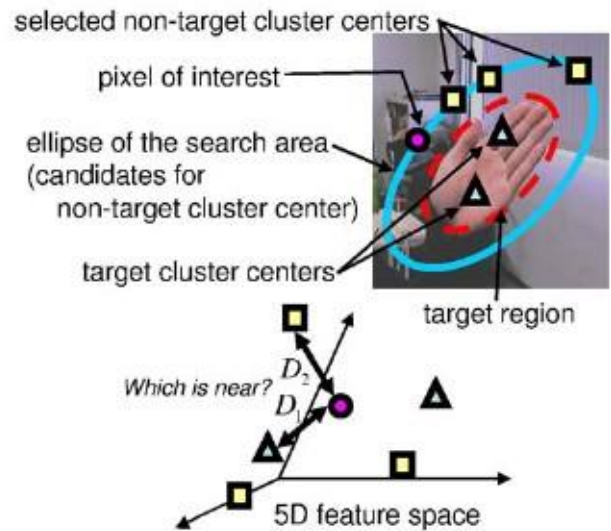


図 5: 非ターゲットクラスタ中心決定のための 5 次元特徴空間内における距離比較

来の K-means tracker の枠組みで追跡する場合より、提案手法で追跡するほうが、より安定に、かつ、非ターゲットクラスタ中心の個数を減らし、処理コストを削減することができた。

5 K-means Tracker における配置空間内距離と色空間内距離の統合法の考察

K-means tracker のもう一つの問題である、配置的空間 (xy 空間) 内距離と、色空間内距離の統合方法について議論した。従来の K-means tracker では、ダイナミックレンジの異なるこれら 2 つの距離を

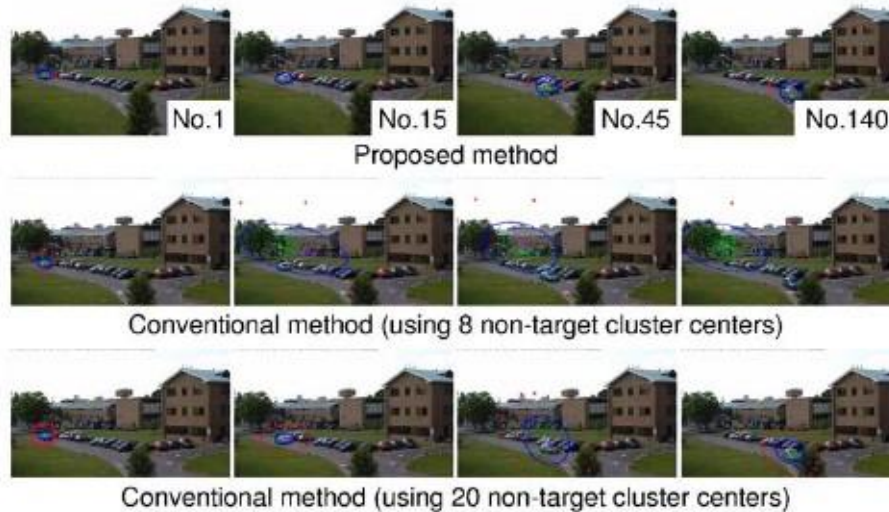


図 6: 背景に似た色がある場合の追跡結果の一部. 赤い点が非ターゲットクラスタ中心 (上段: 提案手法 (使用された非ターゲットクラスタ中心の個数の平均: 5.4 個), 中段: 従来手法 (同個数: 8 個) 下段: 従来手法 (同個数: 20 個))

統合する際, xy 空間内距離にあらかじめ設定された値で重みづけることで色空間内距離とのバランスをとっていた. しかし, この方法では, 固定された値で重み付けしているため, 楕円のサイズが大きくなった場合などに対処できず, 追跡に失敗することが多かった. そこで, 我々は, 対象周辺の領域中の画素の色空間内におけるデータのばらつき度合いを調べるため, 色空間内での分布を主成分分析し, 求められた固有値を利用して xy 空間内距離をオンラインで正規化する方法を提案した. これは, xy 空間内でのデータのばらつき度合いを表す対象を取り囲む楕円の長軸, 短軸の長さ, 色空間内でのデータのばらつき度合いを表す固有値を用いて正規化することで, xy 空間内距離と色空間内距離のバランスを保つ方法である. 実験を通して本手法の有効性を確認することができた. ただし, 処理コスト等の問題が残っており, さらなる議論の余地がある.

6 今後の課題・展望

K-means tracker における追跡対象初期化について: 現状では, 複数, もしくはひとつのターゲットクラスタ中心と, 非ターゲットクラスタ中心を手動で指定する必要があり, 多数のターゲットクラスタ中心を指定しなければならないときは手間がかかる. これを解決するためには, 自動的, もしくは手動で大きな対象の領域を抽出し, その画像内で領域分割する必要があると考えられる.

K-means tracker における xy 空間内距離と, 色空間内距離の統合方法について: 現状では xy 空間

内距離を正規化するための重みの計算に, xy 空間, 色空間それぞれの空間内におけるデータ分布の形状が反映されていない. そのため, これらを反映することができる手法を検討する必要があり, マハラノビス距離を使用する, データを白色化してクラスタリングする等, 他のアプローチも考える必要がある.

もう一つの問題として, 処理コストが挙げられる. 現状では, 処理速度を考慮していないため, 本研究で提案しているようなリアルタイム性が要求されるシステムで使用するのが難しい. そのため, 効率的な処理についても考察が必要である.

能動追跡システムの 3 台以上への拡張と応用:

対象を追跡するだけでなく, それを用いた応用システムを構築したいと考えている. 例えば, さらに能動カメラの台数を増やし, 多カメラで対象の鮮明な画像を撮影する事ができれば, 対象の 3 次元モデリングの質を高めることができると考えられる. これが実現できれば, 高画質な任意視点画像を生成することができ, スポーツ中継などへの応用が見込まれる.

論文審査の結果の要旨

本論文は、ビデオレート（30Hz）の追跡能動カメラ制御に関するもので、対象を鮮明に撮影する新しい方法に関する論述である。K-means Tracker と呼ばれるクラスタリング型のアルゴリズムを改良することと能動カメラの方位・ズーム・フォーカスをPID制御することによって、高速かつ自由に運動している対象を一定の解像度で、ぶれなく、かつ画像中心に撮影できることが示されている。

内容としては、既存手法に対する検討、提案手法に至る経緯、手法の説明、および拡張手法の提案について丁寧に述べられている。さらに、他にも応用可能な画像理解・認識に有用な技術も多く含んでいる。予備審査などで指摘された論文構成の一部修正、提案システムの有効性をさらにアピールするための追加実験、関連論文の追加サーベイ等に関する加筆修正なども適切になされており、博士論文として十分に評価できるものである。

最終試験の結果の要旨

公聴会（平成21年2月10日）は全審査員と関係者20数名の出席により開催され、発表に対する質問に対しては、質問内容の理解および回答の的確さと明確さの両面で良好な結果であった。

発表後に行なった口頭試問では、幾何学および制御理論に関する問題を出題し、概ね良好な回答を得られた。よって予備審査ならびに公聴会での結果を総合的に判断した結果、最終試験に合格したものと判定した。