

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360110
 研究課題名（和文） 超高速ビジョンシステムを用いた飛行体ダイナミクスの学習と編隊制御
 研究課題名（英文） Learning of Dynamics and Cooperative Control of Aerial Vehicles Using a High-Speed Vision System
 研究代表者
 橋本 浩一（HASHIMOTO KOICHI）
 東北大学・大学院情報科学研究科・教授
 研究者番号：80228410

研究成果の概要：ビジョンシステムの高速化にともない、機械システムのダイナミクスの測定をビジョンにより行うことが可能となってきた。特に、飛行体のような、非接触センサによる計測が求められるシステムでは、ビジョンの利用が有効である。本研究では、複数の超高速ビジョンから構成されるネットワークセンシングシステムに対する情報統合化アルゴリズムを設計し、複数の飛行体のフォーメーションフライト制御系を構築している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2007年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：①機械力学・制御 ②機械学習 ③計測工学

1. 研究開始当初の背景

ハードウェア的には、1ms のサンプリング周期を持つ固定用途のビジョンシステムが安価に入手出来るようになり、また、VGA 解像度を持ちながら 10ms 程度のサンプリング周期を持つ汎用ビジョンセンサが実用的になっ

てきている。これにより、高速なビジョンセンサを多数導入して非接触多点計測空間を構成することが可能になる。しかし、これらのセンサの情報を統合するための理論的枠組みは手付かずである。

また、ビジョンシステムの高速化は、機械システムのダイナミクスの測定をビジョンに

より行うことを可能にする。特に、非接触センサによる計測が求められる飛行体システムにおいて、ビジョンの有効利用が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、超高速ビジョンシステムを用いて、飛行体ダイナミクスの学習と複数の飛行体によるフォーメーションフライトを達成することを目的とする。具体的には、多数のセンサとPCをネットワークで結合し、この分散センサ・コントローラに超高速ビジュアルサーボを実装して、飛行体のフォーメーションフライトを達成することを目指す。本研究においては、ネットワーク構造、キャリブレーションとフィルタリング、ビジュアルサーボ(位置ベースか特徴ベースか)、オンライン学習と外乱推定、帯域制限されたネットワークを持つ分散制御、センサネットワークにおける最適センサ選択などの興味深い理論的課題が存在する。これらに対しひとつひとつのステップで最適解を与え、理論的な枠組みを提供する。さらに、これらの枠組みをネットワーク分散制御のシステム理論として体系化し、理論とシステム開発を高次元で融合することが本研究の真の目的である。

3. 研究の方法

研究の方法を、(1) ネットワークセンシングシステムの開発、(2) センサ特性にあわせたセンサ選択アルゴリズムの構築、(3) ビジュアルサーボによる飛行体のホバリング安定化制御則の構築、(4) 複数飛行体のホバリング安定化制御、(5) 飛行体のモデル推定とオンライン学習アルゴリズムの開発、に分けて説明する。

(1) ネットワークセンシングシステムの開発… 飛行空間全体をカバーするように超高速ビジョンを多数配置し、これらすべてをネットワークで結合する。実際は、ビジョンはPCに接続され、PCがネットワークにつながる形態をとる。飛行体の位置・姿勢の推定、移動目標位置の決定などはこのネットワークセンシングで行う。構築されたネットワークセンシングシステムを用いて、飛行空間の3次元位置を推定できるようにキャリブレーションを行う。

(2) センサ特性にあわせたセンサ選択アルゴリズムの構築… ネットワークセンシングに用いる個々のビジョンシステムは特性が異なる。例えば、超高速であるが低解像度のビジョン、高速・中程度の解像度のビジョン、低速であるが高解像度であり画角の大きい

(広域を観測できる) ビジョンなどが混在する。これら異種類センサ群から構成されるネットワークセンシングシステムに対して、通信帯域、個々のセンサの持つ情報量や通信遅れ時間を考慮して最適なセンサ選択を行うアルゴリズムを構築する。

(3) ビジュアルサーボによる飛行体のホバリング安定化制御則の構築… ネットワークセンシングシステムを用いて飛行体(小型模型ヘリコプタ)のホバリング制御を行う。3次元位置を推定する問題は、本質的に精度向上が難しく飛行の安定化に利用することは避けたい。したがって、安定化に用いるビジョンは特徴ベースビジュアルサーボにより構成する。特徴ベース法は3次元の再構成を必要とせず、安定して得られる特徴量のみを用いてフィードバック制御を行うので、光源状態の揺らぎや離散化に対して頑健(ロバスト)で

あることが期待される。

(4) 複数飛行体のホバリング安定化制御… ネットワークセンシングシステムを構築するビジョンシステムの数を増やし、複数飛行体をホバリングさせる。この段階では機体間の相互作用が影響する領域でのフォーメーション制御は考えず、(3)で構築された制御則を独立に並列して利用することで複数飛行体のホバリングを達成する。

(5) 飛行体のモデル推定とオンライン学習アルゴリズムの開発… 飛行体がフォーメーションを組む場合、他の機体から受ける影響は機体同士の相互位置関係に強く依存し、すべての状況を広範囲かつ高精度に同定することは極めて困難である。したがって飛行を実施しながら相互作用モデルを学習することが必要となる。まず外乱のない室内で飛行させ、ビジョンシステムにより飛行体の運動を測定して飛行体自身のダイナミクスパラメータを精度よく推定する。飛行体が不安定なため、ビジョンを用いた閉ループ系(ビジュアルサーボ系)を構成して閉ループ同定を行う。閉ループ同定されたパラメータを初期値として、オンラインでモデル学習を行う方法を開発する。また、オンラインモデル学習に基づき、複数飛行体のフォーメーション制御を実現する。従来のビジョンシステムはサンプリング間隔が長かったため、画像情報の時間微分が利用できず、同定の精度向上が困難であった。しかし、高速ビジュアルサーボシステムを用いることにより時間微分情報も十分な精度で得られるので、格段の学習効果が期待される。

4. 研究成果

研究の方法に記した五つの項目についてそれぞれの研究成果を記す。

(1) ネットワークセンシングシステムの開発… 飛行体の位置・姿勢を推定するネットワークセンシングシステムを構築した。画像処理時間を考慮して、最大2台までのPCが1台のPCに接続され、画像処理用のPC群と制御用PCをそれぞれネットワーク接続した。構築したシステムでは、カメラ台数の増減は容易に行うことができる。また、カメラの内部パラメータと外部パラメータを個々にキャリブレーションすることで、飛行体のホバリング制御に十分な3次元計測が実現できることを確認した。一方で、ヘリコプタのロータの回転運動によって、ヘリコプタに取り付けたマーカが、しばしば不可視となる問題が生じた。この問題を解決するために、隠れに頑健(ロバスト)なトラッキング手法を開発した。提案手法を用いると、飛行体以外の物体が飛行領域に存在しても飛行体の3次元計測が可能である。



図1. ネットワークセンシングシステム

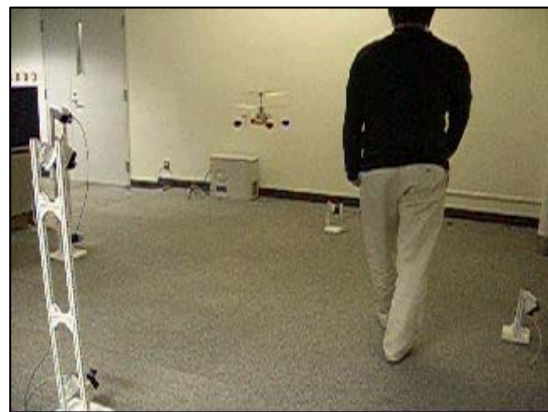


図2. 障害物存在下での3次元計測

(2) センサ特性にあわせたセンサ選択アルゴリズムの構築… ネットワークの通信帯域を考慮したセンサ選択問題をモデル予測制御問題として定式化し、高速センサスケジューリングアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムにより、異種類センサ群が結合されたネットワークセンシングシステムに対して効率的なセンサ選択が可能となる。センサの観測誤差モデルがある条件を満たすならば、得られるセンサ選択系列の最適性が保証される。

(3) ビジュアルサーボによる飛行体のホバリング安定化制御則の構築… 飛行体（小型模型ヘリコプタ）のホバリングを達成するビジュアルサーボ手法を開発した。ビジュアルサーボ手法は、初めに画像ベース制御手法を構築したが、後に位置ベース制御も可能になった。また、構築したホバリング安定化制御則を拡張することで、軌道追従制御や自動着陸・離陸制御が可能になった。さらなる拡張として、ラジコンヘリコプタ制御初心者の手動制御に対する制御支援システムも構築している。

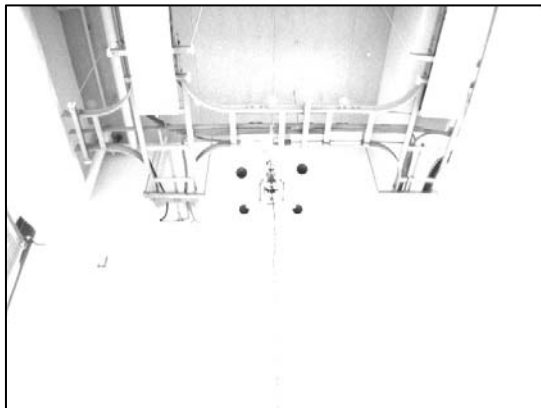


図3. 画像ベースビジュアルサーボによりホバリングを達成しているヘリコプタ



図4. ラジコンヘリコプタ制御初心者のための手動制御支援

(4) 複数飛行体のホバリング安定化制御… 構築したネットワークセンシングシステムは隠れに頑健であり、またカメラ台数の調整による飛行空域の拡大も容易である。このシステムを用いて、飛行体間の相互作用が小さい範囲で複数飛行体の制御が可能であることを確認した。無線通信システムの混線の問題があるため、現在の最大同時制御機体数は3台である。

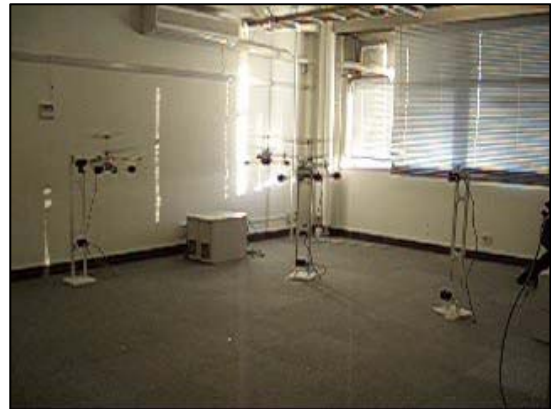


図5. ヘリコプタ3機体のホバリング制御

(5) 飛行体のモデル推定とオンライン学習アルゴリズムの開発… 対象システムにおいてモデル推定を困難にする要因の一つはシステムの非線形性にある。すなわち、光学系の非線形性と、飛行体ダイナミクスの非線形性の両者がシステム同定に悪影響を及ぼす。そこで、まず光学系の非線形性がシステム同定に与える影響を考察するために、ダイナミクスが線形に近いと考えられるアクティブカメラシステムに対してシステム同定実験を行った。実験結果を基に、光学系と力学系の分離同定問題を定式化し、より良いダイナミクスモデルを得ることに成功した。飛行体のモデル推定とオンライン学習アルゴリズムの開発は残念ながら成功しなかったが、ここで構築した手法は飛行体のモデル推定問題に対しても有用であると考えられる。

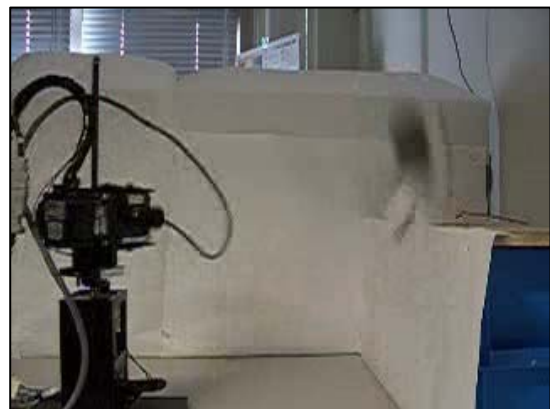


図6. アクティブカメラシステム

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 岩谷靖、渡部溪、橋本浩一、隠れにロバストなビジュアルサーボ、日本ロボット学会誌、27巻、1号、55-62 ページ、2009年、査読有
- ② 荒井翔悟、岩谷靖、橋本浩一、センサスケジューリング問題におけるセンサ切替平面の解析、システム制御情報学会論文誌、21巻、12号、417-419 ページ、2008年、査読有
- ③ 荒井翔悟、岩谷靖、橋本浩一、高速最適センサスケジューリング、システム制御情報学会論文誌、21巻、10号、327-335 ページ、2008年、査読有
- ④ K. Watanabe, Y. Yoshihata, Y. Iwatani and K. Hashimoto. Image-based visual PID control of a micro helicopter using a stationary camera, *Advanced Robotics*, Vol. 22, No. 2-3, pp. 381-393, 2008. 査読有

[学会発表] (計10件)

- ① S. Arai. Fast and optimal sensor scheduling for networked sensor systems. *IEEE Conf. on Decision and Conference, Cancun*, Mexico, December 9, 2008.
- ② Y. Iwatani. A visual-servo-based assistant system for unmanned helicopter control. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, September 23, 2008.
- ③ Y. Iwatani. Fast sensor scheduling for mobile sensor networks. *SICE Annual Conf.*, Tokyo, Japan, August 21, 2008.
- ④ Y. Iwatani. Multi-camera visual servoing of multiple micro helicopters. *SICE Annual Conf.*, Tokyo, Japan, August 21, 2008.
- ⑤ Y. Iwatani. Automatic take-off and landing of an unmanned helicopter using vision-based control with occlusion handling. *Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (RoManSy)*, Tokyo, Japan, July 6, 2008.
- ⑥ Y. Iwatani. Visual tracking with occlusion handling for visual servo control. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Pasadena, USA, May 21, 2008.

- ⑦ Y. Iwatani. Multi-camera visual servoing of a micro helicopter under occlusions. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, USA, October 31, 2007.
- ⑧ Y. Iwatani. Image-based visual PID control of a micro helicopter using a stationary camera. *SICE Annual Conf.*, Takamatsu, Japan, September 20, 2007.
- ⑨ Y. Iwatani. Visual control of a micro helicopter under dynamic occlusions. *Int. Conf. on Advanced Robotics*, Jeju, Korea, August 23, 2007.
- ⑩ S. Arai. Optimal sensor scheduling of sensors in a sensor network for mobile robot navigation. *American Control Conference*, New York City, USA, July 11, 2007.

[図書] (計1件)

- ① Y. Yoshihata, K. Watanabe, Y. Iwatani, and K. Hashimoto. Springer-Verlag, Visual control of a micro helicopter under dynamic occlusions. In S. Lee, I. H. Suh, and M. S. Kim, editors, *Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human*, pp. 185-197, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 浩一 (HASHIMOTO KOICHI)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：80228410

(2) 研究分担者

岩谷 靖 (IWATANI YASUSHI)
東北大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：10400300

(3) 連携研究者

()
研究者番号：