

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420214

研究課題名(和文)視線移動と焦点調節の協働によるバイオミメティックビジョンの研究

研究課題名(英文) Research on biomimetic machine vision with the cooperation of eye movement and focusing

研究代表者

石井 明 (Ishii, Akira)

立命館大学・総合科学技術研究機構・客員研究員

研究者番号：90278490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：物体の状態識別と操作に適した画像を視線制御と焦点調節の協働により取得する生物模倣型視覚システムを実現するため自動外観検査と目視検査の補完的連携を支援する視覚システムと高所作業用飛行ロボットの作業能力向上を図る組込み型視覚システムを開発した。外観検査支援システムでは検査領域の全焦点画像表示による目視検査の安定性向上と蓄積画像に基づく事後検証機能の実現を図った。飛行ロボット視覚系では複雑高精度の高所作業を実現するためマルチロータ型ヘリコプタに機体固定用と作業用のマニピュレータ2種とARMプロセッサ内蔵組込型視覚システムを搭載した飛行ロボットを開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize a biomimetic machine vision system taking proper images for state discrimination and manipulation of a 3-D object with the cooperation of eye movement and focusing, we developed two types of vision systems for supporting the collaboration of automatic inspection and visual inspection and for an aerial robot working at high altitude respectively. The vision system for collaborative inspection composes an entirely-in-focus image of a product and displays it for visual inspection. The stored images can be used for post-analysis of inspection results. The aerial robot is equipped with two robotic manipulators and an embedded vision system onto a multirotor platform for realizing high precision and complex aerial manipulation. The ARM based embedded vision system was developed for position and orientation control of the aerial robot for achieving complex manipulation task.

研究分野：工学

キーワード：自動外観検査 目視検査 協働方式 全焦点画像 クアッド型飛行ロボット マルチロータ型飛行ロボット FPGAプロセッサ ARMプロセッサ

## 1. 研究開始当初の背景

研究課題の設定に当たり、先行研究で得ていた視覚システム（本件では画像情報を画像センサにより取得し情報機械により認識処理する情報システムの意、マシンビジョンとも称す）の技術的シーズの観点から捉えた産業と社会におけるニーズは、人口減少の見通しの中での製造業の生産性向上と社会基盤の老朽化に対応した保全技術の高度化であった。そこで研究課題として、製品の品質維持にかかわる外観検査の生産性向上と保全技術の高度化と安全性の向上を取り上げた。主な技術シーズはカメラの高速焦点調節機構（引用文献）と保全作業用飛行ロボットにおける視覚システムによる位置姿勢制御技術（引用文献）である。

## 2. 研究の目的

マシンビジョン技術の開発と応用は製造業に止まらず広く社会の各分野に浸透してきている。それに伴い人にしかできなかったことをロボットに期待するようになってきている。今後は、ロボットの視覚システムの一層の高機能化に向けて、いかに適切で有効な画像情報を獲得するか、そのための画像入力技術の高度化に益々眼を向けていく必要がある。研究担当者の先行研究（引用文献）において開発されたカメラの高速焦点調節機構と視線制御機構を有機的に組み合わせ、人や動物の眼のような動的なカメラ構造に基づくバイオメトリックビジョン（生物模倣型視覚）技術の開発を研究の主軸とする。

そこで研究の第一の目的を生産人口の減少を背景に近年求められている外観検査の生産性向上に寄与するために、自動検査と目視検査の協働方式を提案することとした。

第二の目的には、製造業以外の領域として、橋梁やトンネル、高層建築物や風力・水力発電施設の点検・保守作業におけるロボット技術の高度化を取り上げる。近年、社会応用が進む小型無人飛行体（ドローン）にロボットハンドやロボットアームを搭載し、ロボットの視覚システムの高度化により人間の作業者に替わって高所作業をさせ、作業者の危険を回避し作業の効率化と作業コストの削減を図ることを第二の研究目的とした。

## 3. 研究の方法

研究全体を物体の状態識別に重点を置く外観検査用視覚システムの研究と物体の操作に重点を置く飛行ロボット用視覚システムの研究に分けて研究を進めた。

### (1) 外観検査用視覚システム

研究開始に当たり初年度に製造会社4社の協力を得て、目視検査教育訓練システムの開発を進めている連携研究者と共に目視検査作業員の作業動作について調査を行い、自

動検査と目視検査の協働方式を視野に置き、外観検査視覚システムの開発条件を当面下記の通りとし、画質重視により前記先行研究である全焦点画像生成技術を基盤としてプロトタイプシステムの試作を行い、見通しの確認と次期研究課題の抽出を行うことを目標とした。視線制御は精密高速制御を期すためガルバノミラー偏向器と固定ミラー配置により視線制御を実現することとし、下記条件の下に、システム構築を行うこととした。

照明系を含む画像撮像系と検査画像処理装置を併せて卓上卓下規模で実装する。検査員あるいはピッキング機能付き搬送系または専用ロボットにより検査物品の位置決め設定を受ける使用条件を想定する。

最小検出欠陥サイズを視力1以上の目視検査員が明視距離(250mm)で検出可能な幅72.7 $\mu\text{m}$ (印刷解像度350dpi相当)とする。

### (2) 飛行ロボット用視覚システム

小型・軽量、低消費電力で必要な画像処理をリアルタイムかつ低遅延で実行するためにFPGAを用いた組み込みビジョンシステム(図1)を試作し、単眼カメラと組み合わせる小型のクアッドロータ機に搭載できるようにして制御方式の現場実験に備えた。

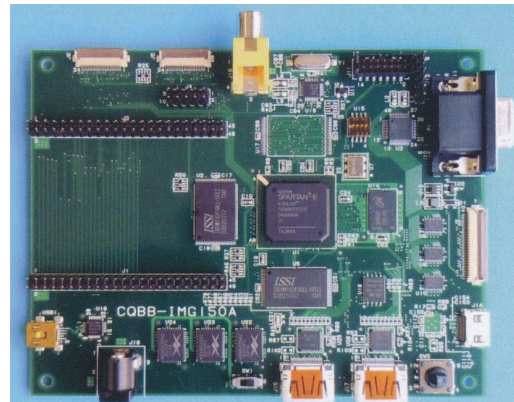


図1 組み込みビジョンシステム用FPGAボード

また、より広い範囲の視覚情報を取得するために、カメラにパン・ティルト機構を組み合わせたアクティブカメラを用いた視覚システムも開発し、デプスカメラを用いて対象物の三次元位置が計測できるようにした。さらに複雑な位置決め制御に備え、汎用性を高めるためARMプロセッサを搭載した小型の組み込みコンピュータボードを採用して研究の進展に備えた。

以上の視覚システムを作業用飛行ロボットに搭載し、タスクごとに必要な画像処理機能を実装することとした。

## 4. 研究の成果

### (1) 外観検査視覚システム

### システム構成

前記開発条件に基づき、卓上スペース 105 cm×85 cm 内で視覚システム実験装置の試作を行った(図2)。現状の企業調査の範囲内で対象とする検査物品は精密機械部品、電子部品のような小型物品を対象としてきたが、大型の検査物品については、スキャナと撮像系を一体として移動できるようにすると、人あるいはロボットがこれを把持して検査物品を走査する外観検査形態も採ることができると考えられる。検査目的に合った撮像光学系の構成を採ることにより各種検査空間が生み出される。

#### 全焦点画像の生成

図3に示す差動レンズの間隔  $g$  により合焦位置の異なる画像を取得する可変焦点撮像

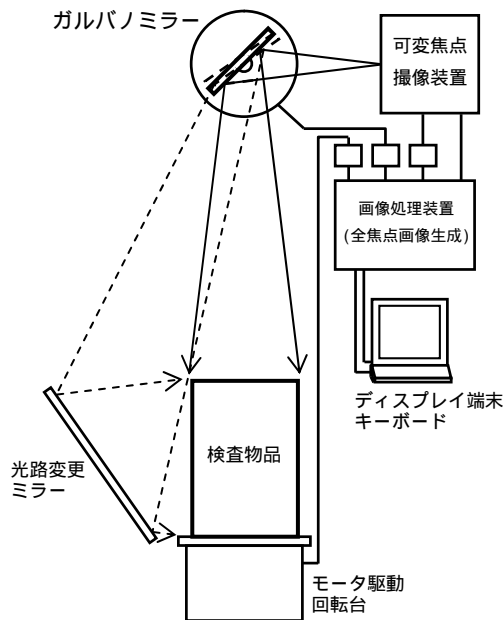
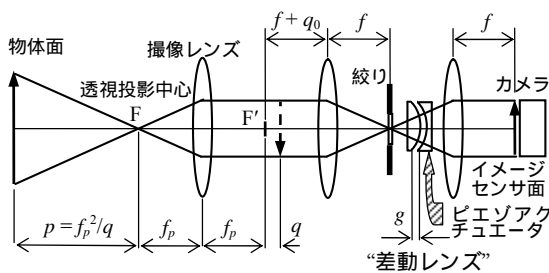


図2 全焦点画像生成・表示・外観検査装置



$q = q_0 + (f/f_d)^2 g$ ,  $g$ : レンズ間隔,  $f_d$ : 凹凸レンズ焦点距離  
 $q_0$ : 調節機構前側焦点の撮像レンズ焦点  $F'$ からの距離

図3 可変焦点撮像装置の構成図

装置を用いて、透視投影中心を固定したまま、合焦位置の異なる画像列を取得し、全画素について画素単位に合焦度の最大となる画像列中の一つの画像上の対応画素を選択し、合焦画素のみからなる一つの画像、全焦点画像

を生成する。本技術は先行研究(前記引用文献 参照)において開発されたものであり、本研究では合焦度演算と最大値比較を高速処理するため FPGA 画像信号演算プロセッサボードと汎用画像処理ボードをデスクトップ型 PC に実装し画像処理装置を試作した。20 枚の画像から 1/30 秒で 1 枚の全焦点画像(512×512 画素)を生成することができる。製品検査では形状が既知であるので被写界深度を考慮し合焦距離のサンプル数を限定することができる。

#### 試作結果の評価と今後の進め方

現在は画素サイズ 10.6  $\mu\text{m}$ 、画素数 512×512 のカメラを使用しているが、今後、画素サイズ 3.45  $\mu\text{m}$ 、画素配列数 2,464×2,056 (5M ピクセル)の 5 メガピクセルカメラが普及するものと考えられる。本研究の主要な目標は目視検査支援方式の基本設計である。基準となる視力 1 の検査員の明視距離(250 mm)における検知限界値 72.7  $\mu\text{m}$  の欠陥の像を画素サイズ 3.45  $\mu\text{m}$  のイメージセンサの画素(5M ピクセルカメラ)で受像できれば、検査領域 179 mm×149 mm を視野に入れることができる設計である。これは人の有効視野領域(水平視野角 30 度、垂直視野角 20 度)を十分覆うことができる視野範囲である。

今回の成果は、外観検査の自動化システムと目視検査との協働方式の基本的な構成を描く上で有用である。全焦点画像を高画質ディスプレイに表示することにより目視検査員の眼の調節筋の疲労を軽減し目視検査の安定性と生産性の向上が期待されると共に、自動検査で良否判定が不可能な製品を目視判定することにより製品の歩留り向上が期待できる。また目視検査においても検査結果の事後検証が画像保存により可能となり、また全焦点画像を含む目視検査結果のデータベースは自動検査の高度化、AI 技術開発に有用な手段となるものと期待される。最後に、連携研究者が開発中の目視検査教育訓練システムにおいても検査画像表示が中心となるので、上記検査画像の全焦点画像表示は検査技能の養成効果の点からも都合の良いことである。

今後の課題は、5 メガピクセル時代に対応して、全焦点画像の生成速度の向上と光学系の画像解像度を現在の 100 本/mm から 150 本/mm に向上させることである。

#### (2) 飛行ロボット用視覚システム

上向きハンドを搭載した飛行ロボット  
 橋梁の裏側やトンネルの天井に対する保守作業を考えた場合、飛行ロボットはこれらの作業領域に下側からアプローチするため、機体上側を作業領域にできると都合がよい。従来提案されてきた作業用飛行ロボットの

ほとんどは、ハンドやアームが機体の下側に搭載されており、機体の上側を作業領域とすることは難しかった。そこでクアドロータ機の機体上部に上向きにハンドを搭載した飛行ロボットを開発した(図4)。本ロボットにより、機体上方に設置された棒を把持するタスクを行った。ここで棒に対してハンドの位置を合わせる必要がある。本実験では直径30 mmの棒を開口幅50 mmのハンドで把持するために少なくとも10 mmの位置決め精度が



図4 上向きハンドを搭載した飛行ロボット

必要である。さらに飛行中の機体の揺れに対応しながら位置決めを行う必要がある。そこでFPGAベースの組込みビジョンを用いて低遅延で棒の位置とハンド位置の誤差を画像から計算し、位置決め制御を行った。これによりスムーズに棒把持が行えた。なお同様の構成の飛行ロボットを用いて、機体上方の物体を掴んだ後、それを捻じる作業を実現した。今後、実行可能な作業の種類を増やしていく計画であるが、その場合にも本研究の視覚システムは重要な役割を担う。

#### 機体固定用ハンド及び作業用マニピュレータ搭載飛行ロボット

マルチロータ型飛行ロボットはホバリングが可能であるが、風などの外乱のために、ホバリング位置を正確に保持し続けることは困難である。そのため高精度な作業を実現することは難しい。またバッテリー容量の制約から連続飛行時間もあまり長くないため、時間のかかる複雑な作業を行うことは難しい。

高精度かつ複雑な作業を実現する方法として、作業点の付近で機体を固定することで風などの影響を抑制し、プロペラを停止してバッテリー消費を抑え、その状態で作業を実行することを考えた。本研究では、機体上部に搭載したハンドで棒状物体を把持することで機体を固定した。また機体下部に搭載したロボットアームにより作業タスクを実行する(図5)。本ロボットにおいて、上向きハンドによる棒状物体の把持は、視覚システムに基づく自動制御により実行した。上向きハンドの近くにデプスカメラを設置し、把持対象物の位置と向きを計測した。上向きハンドに



図5 機体固定用ハンドと作業用マニピュレータを搭載した飛行ロボット

は並進およびヨー回転の2自由度をもたせ、把持対象物に対して位置姿勢を素早く制御できるようにした。

本ロボットにより、高圧電線に引っかかった紐状異物の除去を想定した実験を行い、機体固定、異物除去作業、機体離脱の一連の作業が行えることが確認できた。

#### 飛行ロボット搭載アクティブビジョン

固定カメラを用いた視覚システムは、カメラの視野が制限される。より広い範囲の視覚情報を取得し、視覚情報に基づいた自動制御が可能な領域を広げるために、パンおよびチルトの2軸カメラマウントを用いてデプスカメラを動かしてターゲットを追従し、飛行ロボットの自己位置推定を行う視覚システムを開発した(図6)。固定カメラの場合、

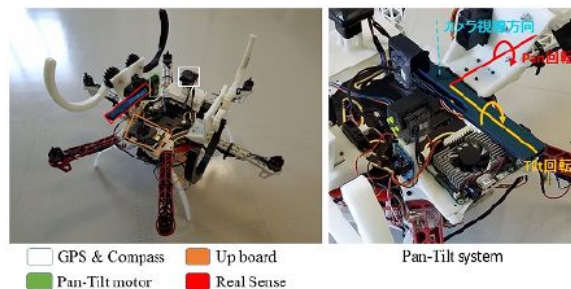


図6 飛行ロボット搭載用アクティブビジョン

マルチロータ機の並進移動に伴う機体傾斜により起こるターゲットの追跡ミスを解決した。本視覚システムを上向きハンドを搭載した飛行ロボットに適用し、体上方のターゲットを自動で追従し把持するタスクに成功した。なお本システムのデプスカメラ(Intel Realsense R200)は、デプス情報とカラー画像を取得できる。距離計測範囲を広げるためにこれらを組み合わせ、デプス情報のみでは取得できない0.5 mよりも近い範囲において距離計測を可能にした。これにより把持対象物に接近した状態でも視覚情報に基づくフィードバック制御が可能になった。

#### <引用文献>

Akira Ishii and Hiroaki Yamashiro、

Fast Focus Mechanism with Constant Magnification Using a Varifocal Lens and Its Application to Three Dimensional Imaging、IEICE Trans. Information and Systems、Vol. E95-D、No. 7、2012、pp. 1804-1810

鹿嶋拓人、下ノ村和弘、注視点ベースロボット視線安定化、日本ロボット学会誌、Vol. 32、No. 1、2014、pp. 84-90

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

Robert Ladig, Suphachart Leewiatwong, Kazuhiro Shimonomura、FPGA Based Fast Response Image Analysis for Orientational Control in Aerial Manipulation Tasks、Journal of Signal Processing Systems、査読有、Vol.90、2018、901-911  
DOI:10.1007/s11265-017-1286-y

### 〔学会発表〕(計 5 件)

石井 明、自動検査と目視検査の協働方式の検討、精密工学会画像応用技術専門委員会、2018

Syohei Shimahara, Leewiatwong Suphachart, Robert Ladig and Kazuhiro Shimonomura、Aerial torsional manipulation employing multirotor flying robot, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2016)、2016

Robert Oliver Ladig and Kazuhiro Shimonomura、High precision marker based localization and movement on the ceiling employing an aerial robot with top mounted omni wheel drive system, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2016)、2016

Suphachart Leewiatwong, Shohei Shimahara, Robert Ladig, Kazuhiro Shimonomura、Vision based autonomous orientational control for aerial manipulation via on-board FPGA、12th IEEE Embedded Vision Workshop (held in conjunction with IEEE CVPR 2016)、2016

Shohei Shimahara, Robert Ladig, Leewiat Suphachart, Shinichi Hirai, and Kazuhiro Shimonomura、Aerial manipulation for the workspace above the airframe、2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015)、2015

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

石井 明 (ISHII, Akira)  
立命館大学・総合科学技術研究機構・客員  
研究員  
研究者番号：90278490

### (2)研究分担者

下ノ村 和弘 (SHIMONOMURA, Kazuhiro)  
立命館大学・理工学部・准教授  
研究者番号：80397679

### (3)連携研究者

石井 明 (ISHII, Akira)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号：90134866