

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560278

研究課題名（和文） 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 bio-mimetic machine vision

研究代表者

石井 明（ISHII AKIRA）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：90278490

研究成果の概要（和文）：

生物模倣型ビジョンシステムを構築するために、高速定倍率焦点調節機構と画像による物体追跡技術を開発した。小型可変焦点レンズを考案して完全な平行投影あるいは透視投影の下で動作する高速焦点調節機構を実現し、調節サイクル 30 Hz の動画像焦点調節技術を確立した。また濁った水中の移動物体を複雑な背景において安定に画像追跡するための画像処理技術として、階調イコライゼーション、二値化による粗い領域抽出、SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特徴を用いたマッチングによる領域内特徴群の移動距離と回転角の算出、および算出結果の投票処理を組合せた物体追跡画像処理法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

Fast focus mechanism with constant magnification and a method of visually tracking an object were developed to build a bio-mimetic machine vision system. A tiny varifocal lens was devised to realize a fast focus mechanism. It worked perfectly under both parallel and perspective projections and was used to generate images of a moving object entirely in focus at a rate of 30 Hz. A robust method for visually tracking an object moving in a water of low visibility against complicated backgrounds was developed by combining gray value equalization, coarse region extraction by binarization, template matching based on scale-invariant feature transform(SIFT), and voting for object translations and rotations by the matching results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：合焦点法・焦点調節・全焦点画像・透視投影・共心パターン投影・視線制御・SIFT・投票処理

1. 研究開始当初の背景

撮像光学系の焦点調節は、取得画像の品質

を確保するために必須であるが、それまでの三次元画像計測においては、このことは当然

のこととして扱われるものの、物体が被写界深度にあることを確認するのみで、試料検査室における顕微鏡下の奥行段差計測を除き、焦点調節を積極的に利用する三次元距離計測法「合焦点法」の研究に大きな進展は無かった。この点、合焦点法の研究状況は、ロボットビジョンを代表するステレオビジョン(両眼立体視法)の近年の研究の隆盛ぶりとは対照的であった。(注：合焦点法は、焦点調節機構の操作量と合焦距離との既知の関係に基づき機構の操作量から合焦計測点の距離を知る方法で、厳密な平行(透視)投影による画像形成が要求される)しかし、従来のステレオビジョンに問題がないわけではなかった。製品組立てのような物体が錯綜する近接作業空間においては、左右2眼のカメラのいずれかに視線が届かない物体の陰が生ずる(オクルージョン occlusion と称す)ことが多く、この場合、両眼立体視が成り立たない。また近接空間では左右のカメラの見る方向が互いに大きく異なるため、同一の物体表面の画像でも同一ではない。そのため計測点の三角測量に必要な、計測点の左右画像における対応する像点の検出に誤差が生じ易いという問題があった。また結像倍率の大きな近接空間では焦点深度が浅く、ぼけによる画質劣化も計測精度低下の要因となった。合焦点法では、カメラの視野に入る画像について、画素毎に合焦点度を評価して画素に対応する計測点の距離を決定するので、上記ステレオビジョンにおける問題は起こらない。また近接空間では被写界深度が浅く合焦点法に有利である。

合焦点法の産業応用が進まなかった要因には二つの技術的障害があった。第一の障害は、一つの立体形状を把握するのに焦点位置の異なる数十枚の画像を対象として画素単位に合焦点度を高速計算する必要があり、膨大な計算が要求されることであった。第二の障害は、小型で高速高精度の焦点調節機構が存在しなかったことである。第一の障害については、FPGA(Field Programmable Gate Array)技術の進展により、合焦点度を画素単位に高速計算する専用画像処理プロセッサを比較的安価に実現できるようになり克服されつつあった。第二の障害については、顕微鏡下の世界に限れば、三次元観察顕微鏡システム[1]が商品化され克服されつつあった。顕微鏡の対物レンズをピエゾアクチュエータにより光軸方向に移動し、異なる焦点位置の画像列を高速度で取得して、奥行距離によらず全画素で合焦した遊泳微生物の全焦点画像をビデオフレームレート(30 Hz)で生成す

ることができるようになった。しかし、対物レンズの質量が大きいため高速移動できる距離は限られ、観察できる奥行き距離は100 μm に止まっていた。ロボットの作業空間のような、遥かに広大な空間において高速高精度の焦点調節を行う機構は未だ実用化されていなかった。なお静電気力により二層液体の界面の曲率制御を行う携帯カメラ用超小型液体レンズの実用化が進められているが、高速高精度が狙いではない。また液体を封入した透明容器の圧力変形による可変焦点レンズの研究も二、三あるが、画像計測に十分な画像品質には達していなかった。

近年のロボット研究に目を転じると、その進展には著しいものがあった。しかし、主要な研究努力は、柔軟多指ロボットの把持動作や二足歩行動作の研究に見られたように、ロボットの動作に人の匠みな動作をいかに再現して行くかに注がれていた。しかし、ロボットの知能化に関わるセンシング技術においては、特に、視覚、ロボットビジョンについては、従来の工業用カメラと画像処理技術を基礎として、特定のビジョンの課題に個別に対応されていた。カメラはますます高解像度高速化し、画像処理は巧緻化してきたが、人や生物に見られる柔軟な視覚情報処理には程遠い状況であった。その原因の一つは既成のカメラと画像処理技術の枠内に留まっていることにあった。一方で、将来、多くの分野でロボットの高度利用がますます求められていくものとの見方が一般的であった。実用ロボットの発祥の地である製造業では、多品種少量生産、商品ライフサイクルの短縮、グローバル化を背景として、工場の海外移転と現地での労働集約型生産など、生産環境と生産様式の変化があった。海外の生産活動の経験を通じて、人間中心のセル生産方式が注目され、その発展形が模索されるようになった。その中で、将来形産業ロボットとして、作業員である人間と協調して作業支援を行うパートナー(アシスタント)ロボットの概念が注目され、オクルージョンの発生しやすい多物体が錯綜する近接作業空間における、柔軟物のハンドリング、組み立て配線作業などに見られる人間の手の巧みな動作に近づくためには、有効な視覚情報を提供する三次元ロボットビジョンの開発が要望された。

一方、人の眼に注目すると、視線移動と注視、そして焦点調節、輻輳(注視点への両眼視線の集中)、両眼網膜像の視差などを手がかりとする奥行知覚によって、効率的な視覚認識を行っている。しかし、効き目の存在があり、両眼立体視は3割の人は能力を発揮し

ていないとも言われた[2]。つまり単眼でも奥行知覚を得て生活することは可能であるとの見方があった。広く動物界を見ると、カメレオンは単眼の焦点調節だけで距離を検出し、舌の長さを設定して餌を捉えているとの研究報告があった[3]。

以上に述べたように研究開始当初の三次元画像計測技術の状況を捉えたとき、単眼のビジョンシステムを基本として複雑な作業空間には複数の単眼ビジョンシステムを分散配置することとし、合焦点法の中核技術として高速高精度の焦点調節機構を開発し、視線走査と焦点調節による奥行走査に基づく三次元注視能力を発揮し、近接作業空間でオクルージョンのない柔軟な動作をするバイオミメティックなビジョンシステムを実現することは意義のあることと判断した。関連する研究としては、カメラの位置と視線を制御して、視覚情報入力の能動制御を行うロボットビジョンが、25年前、J. Aloimonosらによりアクティブビジョンとして提唱され[4]、国内でも國吉らによりアクティブビジョンシステムの試作実験が行われた[5]。しかし、焦点調節のアクティブ制御までには至っていなかった。

[1] リアルタイム・フルカラー全焦点顕微鏡システム Focuscope FV-100C, (株)フォトロン <http://www.photron.co.jp>

[2] 池谷祐二, 進化しすぎた脳, 講談社ブルーバックス, 2007年1月, p.p. 105-107.

[3] L. Harkness, Nature, Vol. 267, No. 26 May, 1977, pp. 346-349 (1977).

[4] J. Aloimonos, et al., Active Vision, Proc. of First ICCV, pp. 552-573, 1987.

[5] Y. Kuniyoshi, et al., Active Stereo Vision System with Foveated Wide Angle Lenses, Asian Conf. on Computer Vision, pp. 359-363, 1995.

2. 研究の目的

合焦点法の適用を含め、高精度かつ効率的な画像による三次元の計測および認識に有用な、透視投影系(結像倍率が距離に反比例)あるいは平行投影系(結像倍率が一定)を厳密に維持することができる高速高精度焦点調節機構の発明(日本国特許第4189798号、権利者: 応募者)に基づき、同機構を適用して、人や動物の眼と同様な、視線走査と動的焦点調節機能を有するロボットの眼を構成し、注視に基づく効率的な認識戦略をとることが可能なバイオミメティックビジョン(Bio-mimetic vision: 生物模倣視覚)を実現することを目的とした。具体的には、顕微鏡下の観測、セル生産におけるパートナロボットに要求される柔軟物ハンドリング、部品の

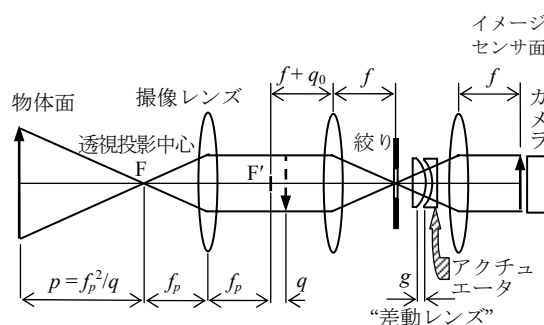
パレタイジング、物体が錯綜する近接空間でのロボット作業組立て作業あるいは水中探査ロボットの試料採取作業など非整備環境でのロボット作業を想定し、合焦点法による安定した効率的な距離計測と高精度画像による物体認識を実現するための基本技術を獲得することを目的とした。

3. 研究の方法

相互に関連する三つの基本技術についてそれぞれ次のように研究を推進した。

(1) 高速焦点調節機構

フーリエ光学的方法論に従い、無限遠補正光学システムにおいて、可変焦点レンズの前側主点を前記光学システムの第一のレンズの後側焦点に光軸を共通にして一致させ焦点調節機構を構成する。その結果、可変焦点レンズの焦点距離の調節により、前記第一のレンズの焦平面の前後の物体面と前記第二のレンズの焦平面(イメージセンサ受光面)との間に倍率一定の共役関係を成立させることができる(前記日本国特許)。本機構について、バイオミメティックビジョンとして実用的な構成法を検討した。特に、可変焦点レンズとして、製作技術が確立している凸レンズと凹レンズを対向させ互いの間隔を制御して焦点距離を調節する差動レンズ(前記日本国特許)を取り上げ、調節性能を光学シミュレーションと解像力チャート撮像により評価した。また評価結果によりレンズ間隔を制御するアクチュエータの方式を選択した。上記調節機構を有するバイオミメティック・ビジョンシステムの基本構成を図1に示す。



$q = q_0 + (ff_a)^2 g$, g : レンズ間隔, f_a : 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1 バイオミメティック・ビジョンシステム

イメージ・テレセントリック型撮像レンズによる中間像は透視投影像を形成し、調節機構により最終像がイメージセンサ面に平行投影される。撮像レンズが角膜に、絞りが瞳孔に、差動レンズが水晶体に、イメージセンサが網膜に対応している。

(2) 三次元運動物体の奥行きトラッキングと全焦点画像生成

焦点調節をビデオフレームレートで高速に行うことができると、認識戦略の中で、視線による視野の選択と同時に、奥行き距離の選択が可能となり、画像のコントラストが低い背景領域は除外し、注視領域を空間から一定の体積切り出すことができる。またその注視領域の移動に応じて奥行き方向にトラッキングすると同時に、注視領域を奥行き方向に異なる合焦点面でサンプリングし、画素毎に合焦点画素を集積して全焦点画像を生成することができる。図1に示す構成に基づくバイオメテック・ビジョンシステム実験装置を構築し、上記認識戦略を制御用PCに実装した。具体的には運動物体の全焦点動画像の取得を行い、三次元運動物体の高速奥行きトラッキングの実現性を確認した。

(3) 変形する三次元運動物体の高速トラッキング画像処理法

変形する三次元運動物体の動画像について、前項(2)の奥行きトラッキングの合焦点条件下で、二次元画像上で物体を識別しながらその軌道をトラッキングする。変形運動物体は三次元空間の中で6自由度の動きと自身の形状変形を行うので、識別テンプレートを適応的に修正しながら物体をトラッキングする高速画像処理法の検討を進めた。応用として、水中探査ロボットにカメラを搭載して得た水中生物の生態観測画像から水中生物の動きの軌跡を計測することを想定した。

4. 研究成果

(1) 高速焦点調節機構の研究

予備的な先行研究の結果に基づき、解析と計算機による光学シミュレーションを実施して光学系のレンズ構成の調整を行い、像視野径 8 mm (1/2 インチカメラ相当)、焦点調節範囲 1 mm (平行投影系) に渡って 100 本/mm の解像力と 0.2% 以下の歪曲収差を得て、優れた結像性能を達成した。その結果、合焦点法による距離計測分解能は、均一なテクスチャをもつ物体平面において、平行投影系では $0.92 \mu\text{m}(\sigma)$ ($q = 0 \sim 1(\text{mm})$)、透視投影系では $0.25 \text{mm}(\sigma)$ ($p = 120 \sim 350(\text{mm})$) を得た。最大調節範囲の応答周波数は 55 Hz まで piezo アクチュエータによる駆動が可能であった。また、透視投影系において距離計測の効率化と精度の向上を図るため、半透明鏡の鏡像を介して透視投影系の投影中心に一致する発散中心をもつ多線状 (99 本) レーザ光投影装置を撮像系に前置し、物体距離によらずイメージセンサ面の定位置に多線状像を形成する共心パターン投影法を考案し (特願 2010-179808)、前記バイオメテック・ビジョンシステム (図 1) 実験装置の撮像レンズの前段に置く付加装置として発散光源とミ

ラー系からなる多線状レーザ光投影装置を試作し設置した。差動レンズを駆動するアクチュエータは、piezo 式とボイスコイル式を比較した結果、小型で実装時の位置決めが容易であり、必要な移動距離と移動速度が得られる前者を採用し上述した所期の性能を得ることができた。

(2) 三次元運動物体の奥行きトラッキングと全焦点画像生成の研究

前記実験装置の PC に組み込まれた全焦点画像生成機能を有する FPGA 画像プロセッサにより、デスクトップ上の近接空間 (距離 260 mm ~ 450 mm) において、それぞれ距離 290 mm、320 mm、360 mm にある三種の図形の全焦点画像を毎秒 30 フレームの速度で生成することができた。また同様に、商用全焦点顕微鏡に使用されている全焦点画像生成プロセッサ (Photron 社製 Focuscope FV-100) の制御の下に差動レンズを駆動し、



$p = 430 \text{ (mm)}$



$p = 340 \text{ (mm)}$



$p = 280 \text{ (mm)}$

図2 運動物体の全焦点動画像再生 (30 Hz)

周期 2 秒で上記近接空間内を揺動するブランコに乗った人形(平均直線速度 150 mm/s)の鮮明な全焦点動画像の撮像再生にも成功した(図 2)。特に、後者の結果は、本技術が既存の実用市販機との親和性にも優れていることを示したものである。

(3) 変形する三次元運動物体の高速トラッキング画像処理法の研究

複雑な背景と濁りのある水中に沈められた物体(ジュースパック)の画像に対し、階調イコライゼーションと二値化による粗い領域抽出、テンプレート画像とのSIFT特徴マッチングによる領域内特徴点群の移動距離と回転角の算出、および算出結果の投票処理の組合せにより、これまでのSIFT法単独に比し移動距離と回転角を安定に検出することができた。この結果は、対象画像の変形が、これまでの姿勢変化による見かけ形状の変形から物体変形によるものにまで拡張されたとき、より安定なテンプレート更新法の有力な開発手段となるものと期待される。

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 2 件)

① 著者名：A. Ishii and H. Yamashiro、論文標題：Fast Focus Mechanism with Constant Magnification Using a Varifocal Lens and Its Application to Three-dimensional Imaging、雑誌名：IEICE Transactions on Information and Systems、査読：有、巻：E95-D、発行年：2012、ページ：-

② 著者名：A. Ishii、論文標題：Fast Focus Mechanism Using a Pair of Convergent and Divergent Lenses Differentially for Three-dimensional Imaging、雑誌名：Proc. of MVA 2011 IAPR Conference on Machine Vision Applications、査読：有、巻：、発行年：2011、ページ：168-172

[学会発表] (計 5 件)

① 発表者名：石井 明、発表標題：定倍率高速焦点調節機構と一般化ロボット視覚システムへの応用、学会名等：精密工学会画像応用技術専門委員会(招待講演)、発表年月日：2011年11月11日、発表場所：東京電機大学(東京都)

② 発表者名：田久保遠鴻、平井慎一、発表標題：投票法と SIFT を用いたテンプレート更新型動物体追跡、学会名等：日本ロボット学会学術講演会、発表年月日：2011年9月7日、発表場所：芝浦工業大学(東京都)

③ 発表者名：加藤禎章、平井慎一、発表標

題：水中画像における投票と領域抽出を用いたロバストな物体移動量計測、学会名等：日本ロボット学会学術講演会、発表年月日：2011年11月11日、発表場所：東京電機大学(東京都)

④ 発表者名：石井 明、発表標題：フォーカス・プラスマシビジョンの新展開、学会名等：映像情報メディア学会技術報告(招待講演)、発表年月日：2009年11月13日、発表場所：NHK放送技術研究所(東京都)

⑤ 発表者名：村中 裕之、平井 慎一、発表標題：高速ビジョンシステムを用いた2リンクフレキシブルアームの制御、学会名等：日本ロボット学会学術講演会、発表年月日：2009年9月17日、発表場所：横浜国立大学(神奈川県)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：離散的な発散光線束群を用いた合焦点三次元座標測定方法および装置

発明者：石井 明

権利者：石井 明

種類：特許

番号：特願 2010-179808

出願年月日：2010年7月22日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 明 (ISHII AKIRA)

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：90278490

(2) 研究分担者

平井 慎一 (HIRAI SHINICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90212167