

## 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 5月15日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21680015

研究課題名（和文） ミリセカンド可変光学系による高速フォーカスビジョン

研究課題名（英文） High-speed focusing vision based on millisecond variable optical system

研究代表者

奥 寛雅（OKU HIROMASA）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：40401244

研究成果の概要（和文）：本課題では、1/1000 秒程度の応答速度をもつ高速光学デバイスと、やはり 1/1000 秒の高速画像処理技術とを組み合わせることで、高速に撮像と焦点距離制御が可能な高速フォーカスビジョンを提唱し、これを用いて、被写界深度や焦点距離を変更した画像系列を高いフレームレートで合成する手法や、対象の3次元的な運動を推定する新たな手法を実現した。また、高速に視線方向を制御する機構も開発し、スポーツにおけるボールの跳躍のような非常に高速の現象を追跡することに成功した。

研究成果の概要（英文）：High-speed focusing vision, that is composed of millisecond high-speed vision and millisecond high-speed imaging optics using high-speed liquid lens, was proposed. The proposed vision system could both capture images and also control its focal length in millisecond. Three new algorithms were developed due to the advantage of the matched bandwidth; (i) an algorithm synthesizing extended focus images with high frame rate, (ii) synthesizing a virtual image with arbitrary depth of field and focal position, (iii) estimating 3-dimensional movement of objects from the image sequence while the focal length was vibrated at high rate. Furthermore, a new optical unit called Saccade Mirro was also developed to achieve millisecond gaze control of the vision system. Due to the high-speed response, a high-speed target such as a bouncing ball was successfully tracked using the developed unit.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学

キーワード：センシングデバイス・システム

## 1. 研究開始当初の背景

通常のビジョンシステムは、撮像素子とその素子に外部の情報を投影する撮像光学系から構成される。撮像光学系はビジョンシ

テムの入り口に位置するため、その焦点距離や画角などの光学特性は入力画像の基本的な性質を決定する。そのため、撮像光学系の特性は見たい対象やその周囲環境に応じて

高速かつ適応的に制御できることが理想である。近年、撮像素子や画像処理装置は高速化が進んでおり、高速ビジョンに代表される高速なシステムになると 1/1000 秒程度で画像の取得から処理までを実現できる。しかし、その一方で、光学系の特性制御には 0.1 秒程度の応答時間が必要であり、これは高速ビジョンの画像取得・処理時間に比べて 100 倍も遅い。これは質量の重いレンズ（群）を物理的に移動させて光学特性を制御しているためであり、この遅い応答速度ゆえに、例えばズームのような光学特性制御を含む画像処理を行うと、光学系の応答速度がシステム全体のボトルネックとなってしまう、処理速度の面で良い性能が得られないという問題があった。

研究代表者はこの問題を解決するために、高速に制御可能な光学デバイスとして、互いに混ざらない 2 種類の液体の界面を光の屈折面として利用するダイナモルフレズ (Dynamorph Lens:DML) を研究・開発してきた。DML は、1) 界面の形状をピエゾ素子で高速に制御することでミリ秒での高速な応答を実現し、かつ、2) 液体の界面は分子レベルで滑らかな表面となるため、結像に十分な光学性能を実現するものである。試作品による評価実験より、高速ビジョンの画像取得・処理時間と同等の約 2 ms のステップ応答整定時間と、市販のカメラレンズと同等の 64 lp/mm の解像力とが確認されている。

## 2. 研究の目的

DML の実現によって撮像光学系の焦点距離を高速に制御することが可能となり、既存の撮像光学系の遅い応答速度というボトルネックは完全に解消される。これにより、いかに光学系を動かさずに対象の情報を抽出するのかに重点が置かれる既存のビジョン技術の枠組みとは異なる、いかに光学系を制御することで対象の情報を抽出するのかに重点が置かれる新たなビジョン技術の枠組みの創出が期待される。そこで本研究では、高速画像処理と高速光学系とを組み合わせたビジョンシステムを高速フォーカスビジョンとして提唱し、その特徴を活かした新たな映像制御・画像処理手法を開拓することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では開発した手法が実世界で機能することを重要視した。そのため、研究は実証的アプローチを採用し、実験の基盤となる光学系を構築して、その上で研究・開発したアルゴリズムを実際に動作させ、実世界に対して有効に機能することを確かめる形で進めた。DML は既に他のプロジェクトで開発した物を用いた。

また、特に液体レンズのみに限定せず、これまでの光学系の中でボトルネックとなっている要素については、それを解決するデバイスを積極的に研究・開発した。

## 4. 研究成果

### (1) 高フレームレート全焦点合成

高速度カメラは高フレームレートで撮影するため露光時間が短く、十分な光量を確保するために明るいレンズを使う必要がある。しかし光学で知られている性質から、明るいレンズを使用すると被写界深度が浅くなってしまふ。被写界深度とはピントが合っている奥行き範囲のことで、被写界深度が浅いとピントの合う範囲が狭まり、観察したい対象の一部にしかピントが合わない、動き回る動物がすぐにピントから外れてしまうなどの問題が生じる。この被写界深度を深くする手法として、全焦点画像合成という技術が存在する。これは異なる位置に焦点の合った複数枚の画像を合成して被写界深度を深くするというものである。この全焦点画像合成に必要な焦点位置の異なる複数枚の画像を用意するためには、撮影に用いる光学系の焦点位置を動かす必要がある。しかし今までの技術ではこれを高速に行うことができなかった。

そこで高速フォーカスビジョンとして DML と高速度カメラとを組み合わせる系を構築し、焦点距離制御周波数 500Hz、撮像フレームレート 8000fps の高速撮像を行った。焦点距離は 500Hz で制御されているため、フォーカス位置が奥から手前、手前から奥の一回のスキューンは 1000Hz で行われ、その一度のスキューン中に 8 枚の画像を撮像した。これにより被写界深度を拡張した後でも 1000fps という高いフレームレートを実現した。スキューンの速度が早いため、日常世界の多くの運動程度の速度であればスキューン中の動きが無視でき、合成後の画像にほとんどアーチファクトは見られなかった。

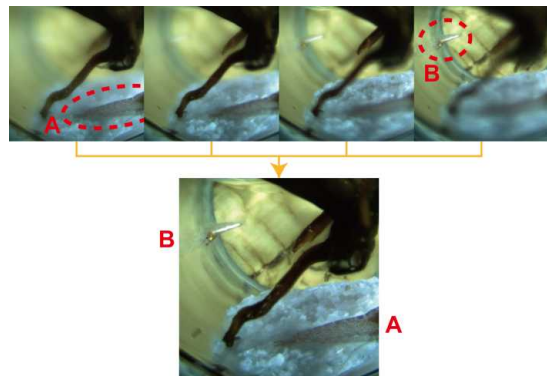


図 1 高フレームレート全焦点合成結果

図 1 にエビを対象とした場合の結果を示

す。この実験は光量の関係で焦点距離制御周波数 125Hz、撮像フレームレート 2000fps で行い、250fps の全焦点画像系列を合成した。エビは動きまわっているが、スキャン速度が高速なため、自然に被写界深度が合成されていることがわかる。

また、本手法は絞りを絞って被写界深度を深くする場合に比べて明るい像が得られる利点があることを理論的に示した。

### (2) DML による焦点スキャン画像群を用いた任意焦点・任意被写界深度の画像合成手法

近年、高速撮像素子及びデジタル技術の向上により、撮影した画像を後から統合する事で新たな表現を獲得する事が可能となってきた。中でも、ぼけや被写界深度の表現の拡張手法として、同一シーンにおける焦点位置の違う複数枚の画像を合成する手法がある。

高速フォーカスビジョンを用いると、わずかなずつ焦点位置を変化させ走査しながら同一シーンを高速に撮影した画像系列を得る事が可能となる。このような高速のフォーカス走査により取得した多量の画像を用いれば、高い品質での画像合成が可能である。また高速フォーカス走査の性質から、様々な表現拡張を施した動画生成においても観賞に十分なフレームレートでの出力が期待できる。そこで、焦点距離や絞り径が異なるレンズ系により同一シーンを撮影したかのような自由な焦点位置及び被写界深度を持つ画像の合成手法を開発した。

図 2 に撮影時の被写界深度とは異なる被写界深度の像を合成した結果を示す。



図 2 被写界深度を変更した像の合成結果。左が撮影時の被写界深度。

### (3) 焦点スキャン画像群による 3 次元動き推定手法

焦点を高速にスキャンしながら画像を撮影し続けることを考える。一回のスキャンで得られる画像一式は、その焦点位置の変化に伴って異なる情報を持つため、対象の 3 次元情報を含むことになる。この画像一式を焦点スキャン画像群と呼ぶ。この画像群の時系列データは撮影対象の 3 次元の時系列情報を反映していることになる。つまり、時系列焦点スキャン画像群は対象の 3 次元運動情報を含む。

既存の手法、例えば合焦位置からデプスマップを抽出する手法などを用いれば、焦点ス

キャン画像群 1 式から対象の 3 次元的な構造やテクスチャを抽出することができるが、複雑な処理を大きなデータに対して行うことになるため、特に実時間処理の実現は難しい。特にロボット制御のように処理結果のフィードバックが必要で実時間での処理が求められる用途では、より処理系の負担が少ないアルゴリズムが求められる。

そこで、時系列焦点スキャン画像群から、3 次元構造やテクスチャへの変換を行わずに直接対象の 3 次元運動を推定する手法を開発した。開発した手法は特徴点のトラッキングによく用いられる Lucas-Kanade 法を 3 次元に拡張したアルゴリズムを基本としている。通常トラッキングしたい点は合焦している場所であるが、合焦点付近ではフォーカス方向に画素値が極大、もしくは極小となっており、直接適用しても数値的に不安定になるという問題がある。そこで、フォーカス方向に一度微分した画像群を用いてトラッキングする手法を開発した。これにより対象の 3 次元的な運動を安定に追跡することができた。

図 3 に本手法で運動するエビの頭部を追跡した様子をその 3 次元的な位置に赤丸として示したものを示す。エビの頭部を継続して追跡できていることがわかる。

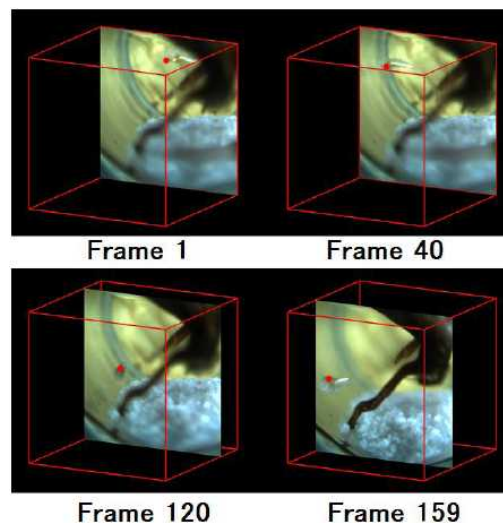


図 3 遊泳するエビの頭部を開発したアルゴリズムによって 3 次元的にトラッキングした結果。

### (4) サッカードミラー

通常ビジョンシステムの視野には限界があるが、主として監視用途やロボットビジョン用途ではその範囲を超えた広い領域の映像を取得したい場合が多く、レンズを含むビジョン (カメラ) 自体を動かしてパン・チルトの視線方向を制御できる電動雲台がよく用いられている。しかし、電動雲台はカメラ全体を物理的に動かすためその応答は特に

高速なビジョンシステムの撮像・画像処理に要する時間に比べはるかに長く、これがシステム全体の高速化のボトルネックとなっている。そこで、ビジョン自体は固定したまま、光学的に視線方向のみを高速に制御可能なデバイス、サッカードミラー (Saccade Mirror) を研究・開発した。図4にサッカードミラーの構成を示す。

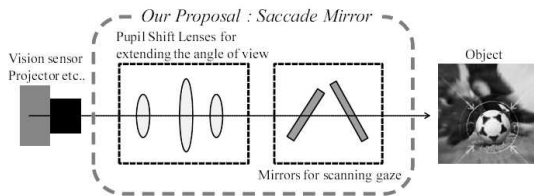


図4 サッカードミラー構成図

サッカードミラーはカメラレンズを含むカメラシステムの前に瞳転送光学系と呼ばれる光学系と2軸の回転鏡を並べた配置をとるものである。カメラのシステムの前に単に鏡を配置してしまうと、画角全体の光を反射するためには大面積の鏡が必要となってしまう、慣性モーメントが大きくなるために鏡の応答速度が遅くなる。この問題を解決するには、カメラレンズの射影中心に対応する入射瞳を前方に光学的に転送し、2枚の鏡の間に入射瞳が存在すればよい。入射瞳はカメラに入射する光線束の断面積が最小となる部分であるため、小さな鏡でも必要な光線全ての角度を制御できる。これを実現するために、瞳転送光学系と呼ばれる光学系がカメラの前に配置してある。鏡としてはガルバノミラーと呼ばれる鏡とサーボモータが一体となった物を用い、40度の視線方向制御を3.5msで実現した。

サッカードミラーの主要なアプリケーションとして、高速運動対象のトラッキング、並びにその映像記録がある。これはサッカードミラーと高速ビジョンシステムを組み合わせることで、例えば高速に運動するボールなどを常に視野の中央に追跡し、大きな空間の運動を詳細かつ継続的に撮影するものである。特にスポーツ中継など業務放送において利点があると考えられるため、画像処理用の映像に加えて放送に対応するFullHDの映像を同軸で記録できるFullHD対応サッカードミラーシステムを開発した。図5に開発したシステムの写真を示す。

当該システムを用いて実際に卓球の球をトラッキングした結果を図6に示す。卓球の経験者2名にラリーをしてもらい、左のプレイヤーがスマッシュを打った球を右のプレイヤーがうち損ねるシーンを示している。人間がほとんど反応できないような高速現象についても安定して球を追跡できているこ

とがわかる。



図5 Full-HD対応サッカードミラー。左に出ている2つの突起はモニター接続用のポートであり、同時に3台のカメラが同じ映像を取得できる。

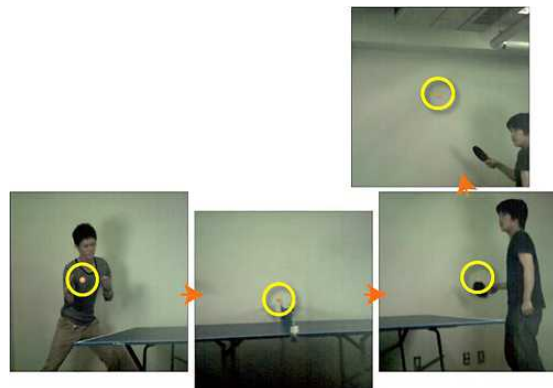


図6 サッカードミラーによる卓球ラリー中の球のトラッキング結果

## 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 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.29, No.2, pp.201-211 (2011)
- ② 小室孝, 奥寛雅, 石井抱, 石川正俊: 高速画像処理を利用した撮像システムならびにその撮像処理への応用, 映像情報メディア学会誌, 査読無, Vol.65, No.10, pp.1376-1380 (2011)

- ③ 奥寛雅, 石川正俊 : 高速液体レンズによる映像制御技術, 画像ラボ, 査読無, Vol.21, No.9, pp.16-22 (2010)
- ④ 奥寛雅, 石川貴彦, 石川正俊 : 光学系と画像処理系の速度を整合した高速フォーカスビジョン, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.27, No.7, pp.739-748 (2009)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 奥寛雅 : 安全・安心を支える高速映像制御技術, フォトニクス技術フォーラム平成 23 年度第 4 回光技術研究会 (大阪科学技術センター, 大阪, 2012.2.10) **[招待講演]**
- ② 大塚博, 奥寛雅, 石川正俊 : 液体可変焦点レンズを用いた高速ズーム系の基礎評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012) (浜松, 2012.5.29) / 講演論文集, 2P1-K02
- ③ 末石智大, 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : 二眼駆動鏡面式視線制御による高速ステレオビジョンシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012) (浜松, 2012.5.28) / 講演論文集, 1A1-A11
- ④ 奥寛雅 : 高速光学系によるダイナミックイメージコントロール, 第 35 回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム, 画像センシングとその応用 (主催 次世代センサ協議会) (化学会館, 東京, 2011.6.22), pp.3-16 (2011) **[招待講演]**
- ⑤ 奥寛雅 : ダイナミックイメージコントロールとその生物運動計測への応用, (大阪市立大学, 大阪, 2011.10.28 (\*第 27 回に講演)) 第 26 回エアロ・アクアバイオメカニクス研究会講演会資料集, pp.3-6 (2011) **[招待講演]**
- ⑥ Kohei Okumura, Hiromasa Oku and Masatoshi Ishikawa : High-Speed Gaze Controller for Millisecond-order Pan/tilt Camera, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011) (Shanghai, 2011.5.12) / Conference Proceedings, pp.6186-6191
- ⑦ 松崎翔太, 奥寛雅, 石川正俊 : 焦点の異なる複数の画像を用いた 3 次元動き推定アルゴリズム : 第 12 回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(京都, 2011.12.25) / 講演論文集, pp.2442-2445
- ⑧ 出口裕己, 奥寛雅, 石川正俊 : 高速液体レンズによるフォーカス走査画像系列を用いた任意焦点・被写界深度の画像合成手法, 2011 年映像情報メディア学会冬季大会(東京, 2011.12.21) / 講演予稿

- 集, 6-2
- ⑨ 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : Full HD 画質対応超高速パンチルトカメラ, 2011 年映像情報メディア学会年次大会(武蔵野市, 2011.8.24) / 講演予稿集, 7-12
- ⑩ 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : サッカードミラーと画像処理を用いた高速飛翔体の映像計測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 (ROBOMECH 2011) (岡山, 2011.5.28) / 講演論文集, 2A1-L10
- ⑪ Hiromasa Oku and Masatoshi Ishikawa : High-Speed Liquid lens for Computer Vision, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010) (Anchorage, 2010.5.5) / Conference Proceedings, pp.2643-2648
- ⑫ 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : 駆動鏡面を用いた超高速アクティブビジョン, 第 16 回画像センシングシンポジウム (SSII2010) (横浜, 2010.6.10-11) / 講演論文集, DS2-04
- ⑬ 等康平, 奥寛雅, 石川正俊 : 高速焦点スキャン画像群に基づく実時間画像認識フレームワークの提案, 第 16 回画像センシングシンポジウム (SSII2010) (横浜, 2010.6.10) / 講演論文集, IS1-03
- ⑭ 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : 駆動する鏡面を用いた高速視線制御システム-サッカードミラー-, 第 15 回ロボティクスシンポジウムプログラム (吉野山, 2010.3.15) / 予稿集, pp.214-219
- ⑮ 奥寛雅, 石川正俊 : 高速・高解像力液体レンズによるダイナミックイメージコントロール, 映像情報メディア学会情報センシング研究会 (東京, 2009.11.13) / 社団法人映像情報メディア学会技術報告, Vol.33, No.49, pp.7-14 (2009) **[招待講演]**
- ⑯ Nobuyuki Mizoguchi, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa : High-speed variable-focus optical system for extended depth of field, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) (Seoul, 2009.7.8) / Proceedings, pp.1668-1673
- ⑰ 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊 : 駆動鏡面式超高速アクティブビジョン : 第 27 回日本ロボット学会学術講演会 (横浜, 2009.9.17) / 予稿集, 3R1-02

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥 寛雅 (OKU HIROMASA)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：40401244

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし