

# 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

奥 寛 雅\*<sup>1</sup> 石川 貴 彦\*<sup>2</sup> 石川 正 俊\*<sup>1</sup>

## High-Speed Focusing Vision: Coupling of Image Processing System with Tunable Optics without Speed Bottleneck

Hiromasa Oku\*<sup>1</sup>, Takahiko Ishikawa\*<sup>2</sup> and Masatoshi Ishikawa\*<sup>1</sup>

Imaging optics is essential for a robot vision to acquire images, since it projects the image of remote object to its imager. In particular, dynamic control of imaging optics has been desired because it enables vision to measure new information, such as depth of scene, that single robot vision with static optics cannot obtain. Conventional imaging optics, however, takes around one second to change its optical property. Thus, measurement frequency of sensing method using dynamic control of optics was limited by the slow response. In this paper, high-speed focusing vision, that is composed of high-speed vision and high-speed imaging optics based on a Dynamorph Lens (DML), is proposed. DML is a liquid variable-focus lens that can dynamically focus by morphing liquid-liquid interface in millisecond order. Since both high-speed vision and high-speed imaging optics have millisecond response time, it can change its focus and zoom ratio almost every frame. High-speed focus-switch experiment in 2 [ms] was observed using a developed prototype. High-speed autofocusing in 15.8 [ms] by capturing and processing 14-images at different focal position, and continuous focusing on quickly moving object by switching focal position in every 5 [ms] were successfully demonstrated to validate the high-speed focusing vision.

**Key Words:** Vision System, Optics, Variable-Focus Lens, Visual Feedback

### 1. はじめに

ビジョンセンサは、ロボットの外界センサとして主要なデバイスの一つであり、デバイスそのものから画像処理手法に至るまで盛んに研究されている。特に、最近の情報処理技術の飛躍的な進歩を背景として、ここ10年ほどでフレームレート・画像処理速度ともに高速になってきており、研究レベルで1,000 [fps]以上で画像の計測と処理を行うものが報告されている [1]~[3]。

一方、ビジョンセンサが外界の映像を計測するためには、カメラレンズに代表される撮像用光学系が必要になる。その光学特性を動的に制御すると、通常単一のビジョンセンサでは測定できない奥行き方向の情報が得られるなどの利点があるため、画像中のぼけから対象の奥行き情報を得る Depth From Focus (DFF) [4]、光学的に撮像面と共役な位置でそこに存在する物体が合焦する位置（以下、物体合焦位置と呼ぶ）が異なる複数の画像から対象の奥行き情報を得る Depth From Defocus (DFD) [5] [6]、物

体合焦位置を走査しながら複数の画像を記録し、そこから対象の三次元形状を得る Shape From Focus (SFF) [7] など様々な手法が提案されてきた。しかし、そのような手法は提案されるに留まり、ほとんど現実のシステムに應用されてこなかった。

この理由として、撮像用光学系における焦点距離やズーム制御の遅さが挙げられる。通常のカメラレンズで焦点距離やズームを制御するとそれだけで1秒程度の時間がかかってしまい、これは撮像素子が撮像に要する時間や画像処理の速度に比べて桁違いに遅い。既存の光学系はレンズ系を構成するレンズ（群）を物理的に移動させてこれらの制御を行っており、レンズの質量が重いため応答を高速にすることは難しい。そのため、このような手法を採用すると光学系の応答速度がシステム全体のボトルネックになってしまう。

もしも撮像用光学系の制御に要する時間を撮像素子が撮像・画像処理に要する時間と同程度まで高速化できれば、このボトルネックは解消することができ、焦点距離やズーム制御を利用する手法の有用性を高められる。特に、既存の単体のビジョンセンサでは得られない奥行き情報などが、物体合焦位置が異なる複数の画像から得られることを考えると、光学系と撮像素子とがともに高速であれば、速度・計測物理量の両方について既存システムの性能を超える新たなビジョンシステムが実現できるはずである。

原稿受付 2008年12月20日

\*<sup>1</sup>東京大学大学院情報理工学系研究科

\*<sup>2</sup>日本電信電話株式会社

\*<sup>1</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*<sup>2</sup>Nippon Telegraph and Telephone Corporation

■ 本論文は提案性で評価されました。

そこで本論文では、ミリ秒オーダーで光学特性を制御可能な撮像光学系と、やはりミリ秒オーダーで高速に画像の取得から処理までを行う高速ビジョンとを組み合わせることで、上述したボトルネックを完全に解消した「高速フォーカスビジョン」を提案する。

高速フォーカスビジョンは、高速ビジョンが画像1フレームを撮像するのに必要な時間と同程度の時間で光学系の調節を行うことができるため、各フレームごとに焦点距離やズーム比を変更することが可能である。このため、例えば上述したDFP, DFD, SFFのように光学特性が異なる複数の画像の計測を前提とした手法でも高い計測周波数を実現できる。そのため、サーボ系のフィードバックループで利用されるセンサのように高速な計測周波数が求められる場合にもこれらの手法を応用できるようになる。さらに、高速ビジョンは得た画像を瞬時に処理・認識することが可能であるため、この処理結果を撮像光学系にフィードバックすることで、フレームごとの状況に適した光学パラメータで対象の画像を得ることができる。より具体的には、例えば画面奥行き方向に高速に運動している対象について、その運動に追従して対象に合焦し続けることができる。また、対象の高速な運動によって、対象の奥行き位置が変化すると画像中での対象の大きさも変化してしまうが、高速フォーカスビジョンを用いればズーム比を適応的かつ高速に制御することで対象のみかけの大きさを一定に保つことも可能である。

このような高速フォーカスビジョンを実現するためには既存の撮像光学系の限界を超える、ミリ秒オーダーで高速に制御可能な光学素子が必要不可欠である。このような光学素子として高速に焦点距離を制御できるダイナモルフレンズ (Dynamorph Lens; DML) を採用した [8]~[10]。当該レンズは筆者らによって開発された新たな光学デバイスであり、本論文はこのデバイスの応用の観点から高速フォーカスビジョンを提案するものである。

以下では、この観点からダイナモルフレンズについて説明し、次に、特に物体合焦位置の制御に注目した高速フォーカスビジョンの試作システムを示す。高速フォーカスビジョンが応用可能な用途は多岐にわたると考えられ、それらすべてにおける有効性を本論文で実証することは現実的でない。そこで本論文では、マクロ系における高速なオートフォーカスと動的なフォーカスのトラッキングを高速フォーカスビジョンを用いて実現した結果を示し、その有効性を示す。

## 2. ダイナモルフレンズ

上述したように、既存の撮像光学系はレンズ系を構成するレンズ (群) を物理的に移動させて焦点距離の制御を行っており、レンズの質量が重いため既存の方式では応答が遅く、高速フォーカスビジョンの実現は難しい。この問題は、(i) 応答が高速で、かつ、(ii) 通常のカメラレンズに相当する光学性能をもつ可変焦点レンズデバイスがあれば解決できる。

特に高速化を意図した可変焦点レンズの研究として、金子らの研究があげられる [11]。この可変焦点レンズは、弾性変形可能で透明な2枚のガラス薄板を平行に配置し、その内部を透明な液体で充填した構造をもつもので、複数枚の piezoelectric

素子を取りつけた円筒でガラス表面を変形させることで可変焦点を実現する。この構造で 150 [Hz] の周波数応答と、他の光学系と組み合わせると最大で 12 [lp/mm] 以上の像側空間解像力を実現した [11]。ここで、像側空間解像力とは、像面でどれだけ細かな空間周波数のパターンまでを再現できるかを示しており、黒と白の縞の対が 1 [mm] に何対あるかを表す lp (line pairs)/mm で示される。

また、奥らは、やはり弾性変形可能なガラス製レンズ表面をもち、内部が液体で充填された可変焦点レンズを提案している [12]。このレンズは、積層型 piezoelectric アクチュエータで内部液体の圧力を直接制御することで、1 [kHz] 以上の周波数応答と、最大で 12 [lp/mm] 程度の像側空間解像力を実現した [12]。

石井らは、レンズではなく、金属板の弾性変形を利用する可変焦点ミラーを用いて焦点距離の制御を行い、100 [lp/mm] 以上の像側空間解像力と 33 [ms] 以内のステップ応答速度が報告されている [13] [14]。

しかし、通常のカメラレンズが 50 [lp/mm] 以上の解像力をもっていることを考慮すると、上記の可変焦点レンズは結像光学系に応用するのに十分な性能であるとはいえない。一方、可変焦点ミラーは結像性能は高いが応答速度が遅い。このように、高速応答と実用的な光学性能とを両立するデバイスは実現されていない。

この問題を解決するために、筆者らは、ミリ秒の高速応答と、高い解像力とを両立する新たな可変焦点レンズデバイスであるダイナモルフレンズを研究・開発してきた [8]~[10]。このレンズは互いに混ざらない液体同士の界面形状を高速な piezoelectric アクチュエータで駆動する構造をもつものであり、高速なビジョンセンサが画像を一枚撮像するのに必要な時間と同程度の時間で焦点距離を制御できる。

ダイナモルフレンズは、互いに混ざらない液体同士の界面を光の屈折面として使い、その屈折面形状を液体の圧力で制御することを原理とする新たな可変焦点レンズである。ダイナモルフレンズの断面構造の模式図を Fig. 1 に示す。このレンズは堅い容器に屈折率の異なる2種類の液体を入れた構造をもち、そ

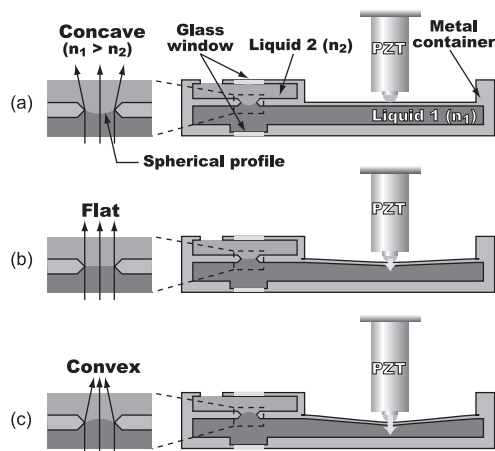


Fig. 1 Cross-sectional figure of the structure and focusing mechanism of dynamorph lens.  $n_1, n_2$ : refractive indices of respective liquid. In this figure,  $n_1 > n_2$  is assumed

れらは図中左にある開口部で互いに接して界面を形成している。積層型 piezo アクチュエータの伸縮によって液体のわずかな体積を移動させて界面形状を変形させ、それにより光の屈折角が変化することにより可変焦点を実現している。ダイナモフレレンズがもつ 1) 高速応答と、2) 高い解像力とは、それぞれ、i) 液体による圧力伝搬と積層型 piezo アクチュエータとを組み合わせた駆動機構と、ii) 液体界面による屈折面形成とにより実現されている。以下それぞれについて説明する。

## 2.1 高速応答

ミリ秒で高速に制御を行うためには、kHz 以上で高速に位置制御可能なアクチュエータが必要になる。このようなアクチュエータとして積層型の piezo アクチュエータ (PZT) がある。ところが、一般に数十 [kHz] の高い共振周波数をもつ積層型 piezo アクチュエータのストロークは 10 [ $\mu\text{m}$ ] 程度しかなく、直接レンズ形状を駆動するとわずかな焦点距離変化しか得られない。かといって、機械的な変位増幅機構をとりつけると、その部分の機械的な共振周波数が低いために高速な応答が得られなくなってしまう。

そこで、本レンズでは積層型 piezo アクチュエータが変形させる部分の面積を、レンズ面積の数十倍程度に設計し、piezo アクチュエータのわずかな変位が、この面積比程度に増幅されて屈折面に伝達されるようにしている。レンズ変形に必要な液体の体積は試作品での値で数 [ $\mu\text{l}$ ] とごくわずかですむため、液体の大部分はほとんど移動せずにほぼ圧力伝達だけを担うため粘性抵抗の増大を抑えることができ、応答を損なわずに大きな変位増幅比を得ることができる。

## 2.2 高解像力

最初に述べたような固体の板などの弾性体を変形させて屈折面とするタイプのレンズでは、屈折面形状が 4 次関数などの複雑な形状をとる [12] ために、光学的な性能が悪いという問題がある。変形部分の厚み分布を制御することで、屈折面形状を理想的な形状に近づける試みもなされている [15] が、光学的に要求される高い精度ですべての焦点距離において望みの屈折面形状を形成することは難しい。

一方、特定の条件下で液体の界面はオングストロームオーダーの精度をもつ球面を形成する [16] ため、高い面精度が要求されるレンズの屈折面に適している。最初に可変焦点レンズの屈折面としての応用が提案 [17] されて以来、Electro-wetting を駆動原理とする構造 [18] [19] を代表に、種々の構造が提案されてきた。

ダイナモフレレンズも高解像力を実現するために液体の界面を屈折面として利用しており、その液体界面の形状は物質と接触するとき界面と物体表面とがなす角度である接触角が一定であるというヤング-デュプレ (Young-Dupré) の法則 [16] によって決まる。例として Fig. 2 に示すように固体基板 (S) の上に少量の液滴 (W) を落とした場合を考える。液滴 (W) とその外界 (O) との界面と、基板表面とがなす角度が接触角  $\theta_E$  である。この場合、ヤング-デュプレの法則は次の式で表される。

$$\gamma \cos \theta_E = \gamma_{SO} - \gamma_{SW} \quad (1)$$

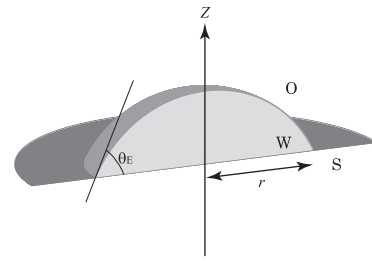


Fig. 2 Schematic figure of a liquid drop (W) on a flat substrate (S). Atmosphere (O) may be gas or liquid

ここで  $\gamma$ ,  $\gamma_{SO}$ ,  $\gamma_{SW}$  はそれぞれ、液体 (W)-外界 (O) 間、基板 (S)-外界 (O) 間、基板 (S)-液体 (W) の表面張力である。式 (1) から、接触角  $\theta_E$  は基板、液滴、外界の各物質間の表面張力のみによって決まることが分かる。温度が一定であれば表面張力は界面を形成する物質の組み合わせに固有の値であるため、この場合、接触角は一定値と考えてよい。なお、後述するように接触角はダイナモフレレンズの焦点距離の可変範囲を決める要素だが、提案する構造は十分大きな可変範囲をもつため、表面張力の温度変化によるレンズ性能への影響は小さい。

Fig. 1 に示したように、ダイナモフレレンズは二種類の液体の界面 (液-液界面) が容器にある円形開口に接触する構造をとっている。円形開口は、その断面をみると角度が急に変化するエッジ部分が形成されている。説明のために接触角を  $\theta_E = \pi/2$  と仮定すると、ヤング-デュプレの法則により液-液界面は常に開口壁面に対して垂直になる必要がある。よって、液-液界面がエッジより下の壁面に接しているときは、壁面に対して垂直となるため液-液界面は図中上方向に対して凹面の球面になる。一方、エッジより上の壁面に接しているときは、凸球面となる。残る場合は、液-液界面がちょうどエッジで壁面に接している場合であり、液-液界面はエッジに接触した状態を保ちながら様々な曲率をもつ球面となる。球面の曲率は液体の体積で決まる。このとき、界面はエッジに固定されているかのごとく振る舞うため、液体の移動に対する液-液界面の曲率変化が最も大きくなる。そこで、ダイナモフレレンズはこの状態の液-液界面を屈折面として利用している。なお、界面が球面になるためには重力の影響を無視できることが必要であるが、2 種類の液体の比重を適切な物質を混合することで同じにすれば重力の影響をなくすることができる [19] ため、この前提は妥当である。

## 3. 高速フォーカスビジョンの試作

提案する高速フォーカスビジョンの有効性を検証するためにダイナモフレレンズの試作品、市販のレンズ系と高速ビジョンを組み合わせることで物体合焦位置の制御を目的とした高速フォーカスビジョンを試作した。これを用いて高速オートフォーカス、フォーカストラッキングの応用実験を行い、その結果より高速フォーカスビジョンの有効性を実証する。

なお、2 個以上のダイナモフレレンズを適切に組み合わせればズームの制御も可能になるが、機材の都合上本論文では扱わない。

### 3.1 試作した高速フォーカスビジョン

高速フォーカスビジョンの試作に用いたダイナモフレレンズ

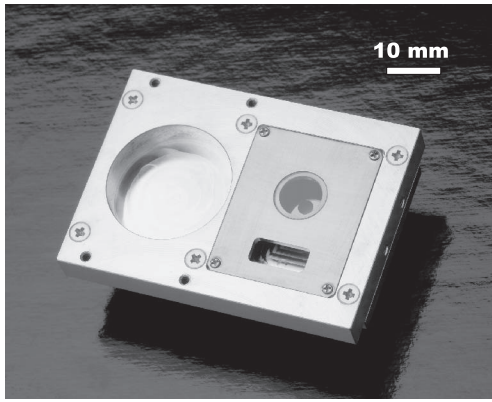


Fig. 3 Photograph of the prototype of dynamorph lens

Table 1 Specifications of the dynamorph lens prototype

Lens aperture	3 [mm]
Deformable plate diameter	24 [mm]
Liquid 1	Ultra pure water
Liquid 2	Poly-dimethyl-siloxane (PDMS)
Kinematic viscosity (PDMS)	5,000 [centistokes (cSt)]
Refractive index (water)	1.33
Refractive index (PDMS)	1.40

の写真を Fig. 3 に示す。写真中右の小さな円形の開口が液-液界面が形成される部分であり、左の円形のくぼみの底面をピエゾアクチュエータが押すことでレンズの焦点距離を調節する。本論文では、これまでの性能評価から高速な応答性能が確認されている、レンズ径が 3 [mm]、ピエゾアクチュエータが押す部分の直径が 24 [mm] の試作品を用いた。仕様を Table 1 に示す。

液体は、Liquid 1 として DirectQ UV (Millipore) により採取した超純水 (屈折率  $n_1 = 1.33$ ) を脱気した物を、Liquid 2 として動粘度 5,000 [cSt] の Poly-dimethyl-siloxane (PDMS) (屈折率  $n_2 = 1.40$ ) を用いた。本来であれば、これらは比重が異なるので適切な物質を混ぜて比重を等しくすることが必要であるが、PDMS の比重 (0.975 [g/cm<sup>3</sup>]) と、純水の比重 (0.997 [g/cm<sup>3</sup>]) との差がわずかであるため比重の調節は行っていない。また、駆動する積層型ピエゾアクチュエータとして、15 [μm] のストロークと 18 [kHz] の固有振動数をもつ P-841.10 (PI Japan) を用いた。

これまで、デバイス単体として以下の性能を確認している。Fig. 4 にピエゾアクチュエータの変位とそのときの屈折力 (焦点距離  $f$  の逆数,  $D = 1/m$ ) を示す。12 [μm] の変位により、約 12 [D] ( $f = 83$  [mm]) から約 -40 [D] ( $f = -25$  [mm]) まで屈折力を変化できた。さらに、封入する液体の量を調節することにより、アクチュエータの変位原点における屈折力も調節可能である。また、物体側開口数 (NA) が 0.045 のときに白色照明下で解像力チャートを試作品を通して撮像し、それを目視で観察したところ Table 2 に示す結果が得られ、最高で 64.07 [lp/mm] の像側解像力を得た。

このダイナモフレレンズを使用して、高速フォーカスビジョンを構築した。構築した高速フォーカスビジョンの光学的な配置と構成を Fig. 5 に示す。

高速フォーカスビジョン用光学系として比較的光学倍率の高

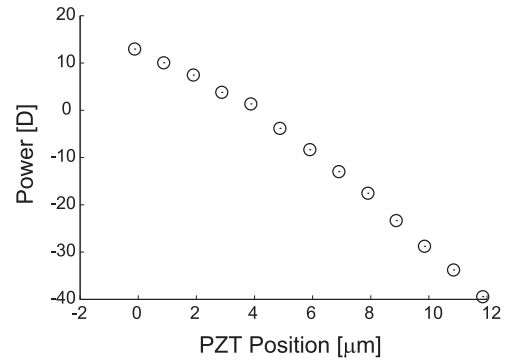


Fig. 4 Refractive power versus PZT actuator displacement

Table 2 Resolution of the dynamorph lens prototype

Focal length [mm]	Resolution [lp/mm]
22.67	19.66
82.49	45.18
194.1	54.23
-274.6	64.07
-110.3	58.53
-65.11	53.81
-42.55	56.51
-31.27	57.47

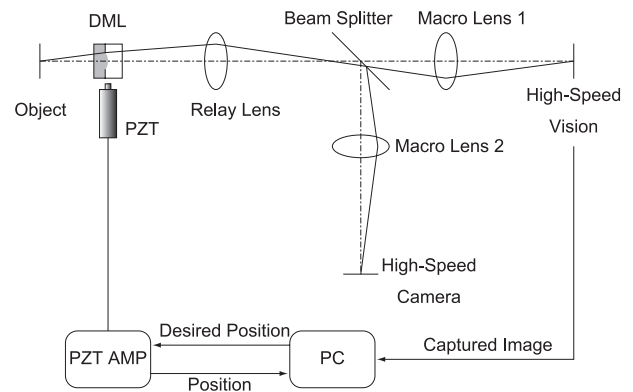


Fig. 5 System connection and imaging optics configuration of the developed high-speed focusing vision. PZT: PZT actuator, PZT AMP: driver of the PZT, PC: computer for control

い、近接した物を見るための光学系 (マクロ系) を採用し、光学倍率が 1 倍程度として光学 CAD (ZEMAX) で設計し、構築した。ダイナモフレレンズとリレーレンズとによって対象像が一度結ばれ、それをマクロレンズで撮像面へ投影する構成をとっている。リレーレンズはダイナモフレレンズを通った光を有効にマクロレンズに転送する機能も担っている。また、同時に 2 台のカメラで像を取得できるようにマクロレンズの手前にビームスプリッターを入れて光路を分割し、それぞれ画像処理用の高速ビジョンと画像観察用の高速カメラを接続してある。

高速ビジョンとして、CPV4 (Column Parallel Vision) システム (浜松ホトニクス) [20] を用いた。CPV4 は 512 × 512 の PD (Photo Detector) アレイのセンサ部と 128 × 128 の PE (Processing Element) アレイの並列処理部とから構成される。処理部には最大で四つのセンサ部を接続することができ、2 台の

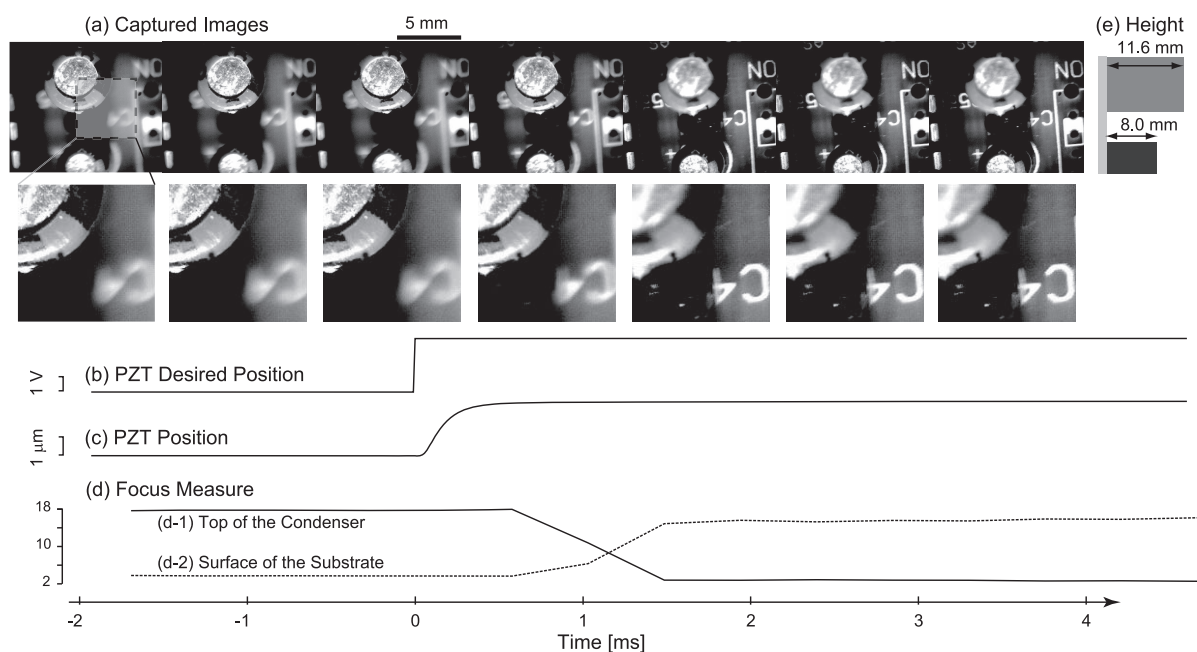


Fig. 6 Step response of the developed high-speed focusing vision system

センサ部からそれぞれ  $128 \times 128$  画素の部分領域を 1,000 [fps] で取得することができる。また、センサ部からの像を直接外部に出力することもできる。本論文では機材の都合で処理部は使用しておらず、センサ部は制御用計算機と直接接続した。

高速フォーカスビジョンの制御用計算機として、Xeon 2.8 [GHz] (Intel)、メモリ容量 1 [GB]、Windows XP (Microsoft) を搭載する市販の PC を用いた。本計算機は、CPV4 で得られた画像の画像処理と、ダイナモフレズを駆動するピエゾアクチュエータの制御とを行う。画像の入力インターフェースとしてカメラリンクを用い、ピエゾアクチュエータへの指令値出力は DA ボードにより出力される電圧値で行った。なお、高速フォーカスビジョンの制御では 1 [ms] オーダの制御周期が求められるため、Windows XP が備える高い時間分解能のタイマー割り込みである、Multimedia Timer を用いた。本タイマーは最短で 1 [ms] ごとのタイマー割り込みを指定できるが、Windows XP は非リアルタイム OS であるので高い精度の割り込み周期の維持は保証されていない。しかし、不要なプロセスを止めて計算機の負荷を低く保つことで比較的安定して割り込み周期を保てることが分かっており、カメラリンクインターフェースのデバイスドライバーがそのまま使えるという利点もあるため、今回の目的である試作システムの評価であれば支障はないとみなして導入した。

画像観察用の高速カメラとして、Phantom V4.3 (Vision Research) を用いた。この高速カメラは  $512 \times 512$  画素のカラー画像を最大 2,200 [fps] で記録でき、外部からのトリガー信号に対応して撮像の開始や終了を同期させることが可能である。

ダイナモフレズを駆動するピエゾアクチュエータへの位置指令値や変位センサによるアクチュエータの変位はアナログ電圧として出力されており、これらを記録するためのデータロガーとして NR-600 (Keyence) を用いた。上述したように制御

用計算機のタイマー割り込みの時間的な精度は低く時系列データの正確な記録には適さないため、以下の実験ではデータロガーに記録されている時間を基準にしてデータを示している。高速カメラは外部からのトリガー信号に同期して撮像するように設定し、同時にこの信号をデータロガーでも記録した。これによりマイクロ秒オーダで映像とアナログ信号との同期をとった。

### 3.2 高速フォーカスビジョンの物体合焦位置応答測定

試作した高速フォーカスビジョンの応答速度を計測するために、異なる深さの 2 点間で物体合焦位置を高速に繰り返し切り替える実験を行った。なお、本実験では高速カメラのみで観測ができるため、ビームスプリッターを外して全光量が高速カメラに入射するようにして実験を行った。

対象として電子基板を用い、その像を構築した光学系を通して高速カメラで撮像した。Fig. 6 に実験結果を示す。時刻 0 でフォーカス位置指令値をステップ状に変化させており (Fig. 6 (b))、それに対してピエゾアクチュエータが 0.5 [ms] 程度の遅れで追従している (Fig. 6 (c))。Fig. 6 (a) に 2,200 [fps] で撮像した高速カメラ像の連続写真が示されている。この連続写真は撮影された一連の像から一枚おきに抜粋した系列を示したもので、上部の写真の左端が露光開始時刻と一致する。各像の露光時間は  $445 \mu\text{s}$  である。最初は画像中上部のコンデンサー上面にフォーカスが合っているが、1 [ms] 前後でフォーカス位置が変化し始め、2 [ms] 以降では基板表面にフォーカスが合っていることが分かる。また、物体合焦位置が変化している最中でも歪みや偏在したボケのない像が得られていることからダイナモフレズは焦点距離を動的に変更している最中でも球面界面が保たれていると考えられる。Fig. 6 (e) に対象の電子基板に取り付けられているコンデンサの高さを示す。写真上部のコンデンサの上面から基板表面までの距離は 11.6 [mm] であり、物体合焦位置をこの距離だけ移動させていたことになる。

物体合焦位置の変化を定量的に示すために、コンデンサ上面と、基板上面の領域について画像の詳細さを 4.1 節で後述する Brenner gradient を用いて算出し、それぞれ Fig. 6 (d-1), (d-2) として示した。値が大きいほど画像に高い空間周波数を多く含み、合焦の度合いが高いことを示している。これより、時刻が 0.5 [ms] あたりまではコンデンサー上面に合焦しているが、それ以降は基板上面に合焦する位置が移動していき 1.5 [ms] でほぼ移動を終えて、基板上面に合焦していることが分かる。

これより、試作した高速フォーカスビジョンは約 2 [ms] の高速な応答時間と実用的な解像力をもつことが確認された。

#### 4. 高速フォーカシング実験

構築した高速フォーカスビジョンを用いて高速オートフォーカス実験と、高速フォーカストラッキング実験とを行った。

##### 4.1 コントラスト法による高速オートフォーカス実験

高速に画像を処理した結果を物体合焦位置制御に直接フィードバックすることで、高速なオートフォーカスを行う実験を行った。

オートフォーカス手法の一つとして、像のコントラストを利用してフォーカシングを行うコントラスト法がある [21]。コントラスト法は、物体合焦位置を移動させながら複数の像を撮像し各位置における像のコントラストが一番高くなる点を合焦位置と判断する手法で、対象と光学系との距離が近いマクロ撮影や顕微鏡計測で主として利用されている手法である。この条件では、視差によって対象の見え方が変化してしまうためステレオによる測距が難しく、アクティブに投光することも対象と光学系の間の空間が狭いために困難が多くなるため、コントラスト法が唯一有効なオートフォーカスの手法となる。

コントラスト法では物体合焦位置の移動と撮像とを複数回行う必要があるが、既存の物体合焦位置制御は遅いためにオートフォーカスの完了までに時間がかかるという難点があり、高速化は難しかった。そこで、この問題を物体合焦位置制御と撮像が高速な高速フォーカスビジョンを用いて解決し、コントラスト法に基づく高速なオートフォーカスの実現を目的とした実験を行った。

具体的なオートフォーカスの手順は次のようにした。まず最初に対象を含む空間の中でオートフォーカスを行う範囲を決め、その一方の端に物体合焦位置を置く。次に物体合焦位置を他方の端まで移動させながら高速ビジョンにより 1,000 [fps] で画像を撮像・処理し、合焦の程度を表す評価値である合焦測度を取得する。得られた各位置での合焦測度から、最も評価値が高い場所を合焦位置と判断し、物体合焦位置をそこへ移動させて、オートフォーカスを完了する。

オートフォーカスのための合焦測度としてこれまで様々な物が提案されてきているが、本実験では、J. F. Brenner らによって提案された Brenner gradient を採用した [22]。Brenner gradient  $B$  は近隣の画素の差を二乗して画像全体で加算したものであり、計算が単純なために高速で、かつ合焦に対して感度が高いことが知られている [23]。

$$B = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [I(i, j) - I(i + m, j)]^2 \quad (2)$$

ここで  $I(x, y)$  は入力画像中で  $(x, y)$  に位置する画素の画素値、 $m$  はいくつ離れた画素を見るかを定めるパラメータで本実験では 2 とした。式 (2) では画像中  $x$  方向に垂直なエッジのみを検出する形になっているため、実験では各画素について  $x$  方向に対する物と  $y$  方向に対する物を両方求めて大きな値をもつほうを加算した結果を合焦測度として用いた。

Brenner gradient は物体が合焦する面の近くでローレンツ関数に近似できることが経験的に知られており [23]、次のように記述できる。

$$B(z) \simeq \frac{\alpha}{\beta + (z - z_0)^2} \quad (3)$$

ここで  $z$  は光学系の物体合焦位置、 $z_0$  は実際に対象が存在する位置、 $\alpha$ 、 $\beta$  は測定条件によって決まる定数である。このことから、合焦測度の逆数は、物体の近くでは近似的に物体合焦位置に対して 2 次関数として見なせることが分かる。そこで計測された合焦測度のうち値が閾値より大ききところについて合焦測度の逆数を 2 次関数でフィッティングを行い、その頂点位置を合焦する位置として推定した。閾値は人間が実験条件に合わせて決めた。

以上の手法により、文字が印刷されている基板表面を対象として高速オートフォーカス実験を行った。制御用計算機は、高速ビジョンより画像を得てそれを処理し、その結果に基づいてダイナモフレレンズを駆動するピエゾアクチュエータへ指令電圧を出力する、という一連の制御を制御周期 1 [ms] で行うようにした。Fig. 7 に実験結果を図示する。Fig. 7 (a) に、オートフォーカスを行っている間に高速フォーカスビジョンが捉えている画像を 2,200 [fps] の高速カメラで計測したもので、一部を抜粋して示した。画像下の矢印は各画像の露光開始時刻に対応している。Fig. 7 (b) と (c) はそれぞれ、ダイナモフレレンズを駆動しているピエゾアクチュエータへの位置指令入力電圧とピエゾアクチュエータの変位とを示している。Fig. 7 (d) に得られている画像の合焦測度を示した。時刻 0 でオートフォーカスを開始した時点では、物体合焦位置はオートフォーカス範囲の端にあり合焦測度も小さいが、その移動につれて測度が大きくなり、時刻 7.5 [ms] 付近で最大値をとったあとに再度測度は小さくなっていく。開始後およそ 14 [ms] までは焦点面のスキャンを行って各位置での合焦測度を測定して、その結果に基づいて開始後 15.8 [ms] で合焦位置へ物体合焦位置を制御し終えている。15.8 [ms] 以降の合焦測度は、時刻 7.5 [ms] あたりでの合焦測度の頂点とほぼ同じ程度の値を示しており、合焦に成功している。

今回の試作システムでは、ダイナモフレレンズがもつ 2 [ms] 程度の応答時間に加え、高速ビジョンが画像を撮像してから転送し、処理するまでの 1~2 [ms] 程度の時間や、画像の転送と制御周期とのタイミング不一致に伴う最大 1 [ms] のむだ時間によって、システムに無視できない時間遅れ要素が存在する。そのため、例えば Fig. 7 (a) の画像を撮像した時刻における実際の光学系の物体合焦位置は、Fig. 7 (c) に示されているピエゾアクチュエータ位置に対して少し遅れて変化しており、ピエゾアクチュエータの変位が終了した 8.5 [ms] 以降でも画像や合焦測度の変化が観測されている。ある合焦測度を計測したときに、その画像が撮像されたときの光学系の物体合焦位置を知るために

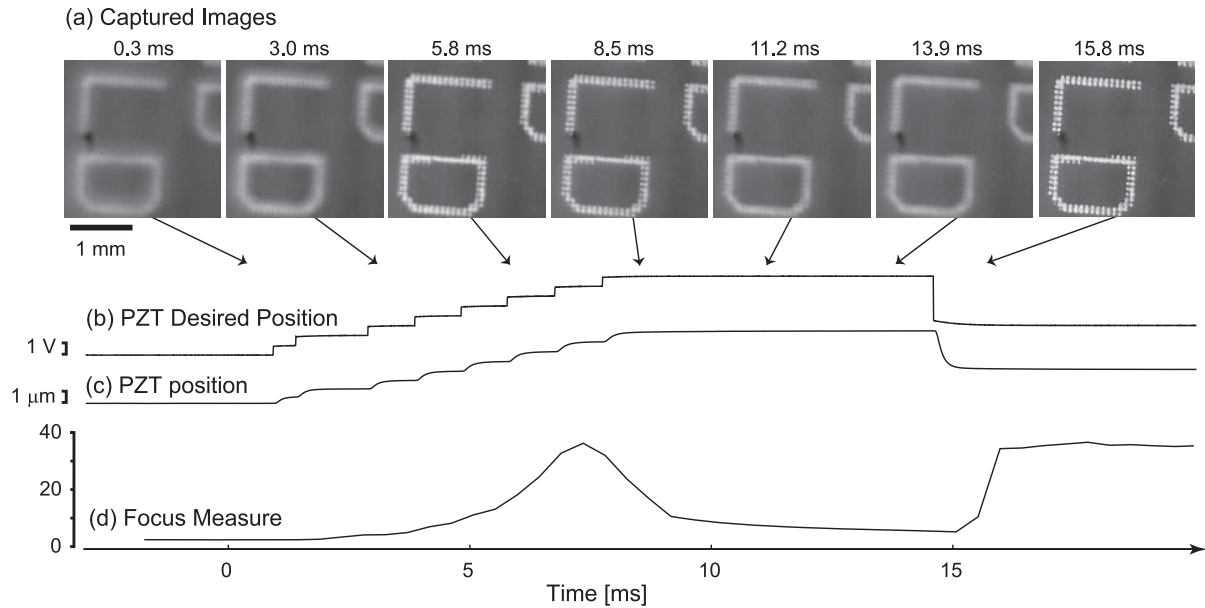


Fig. 7 High-speed autofocusing of surface of bread board

は、ピエゾアクチュエータへの指令値入力を行ってから、ダイナモフレレンズを駆動し、画像を撮像・転送・処理するまでにどの程度の時間が必要となっているのかを知る必要がある。そこで、あらかじめこの時間遅れは推定しておき、それを用いて物体合焦位置を推定した。この実験ではピエゾアクチュエータの指令電圧を走査した後、時間遅れに相当する時刻だけ待ち、それから合焦位置へ焦点位置を制御している。

本実験では開始後 15.8 [ms] でオートフォーカスを終えており、既存の光学系ではコントラスト法を用いたオートフォーカスが 1 秒程度必要であること [23] を考えると、高速フォーカスビジョンは 50 倍以上高速なオートフォーカスを実現している。このオートフォーカスの速度は、通常の 30 [fps] のカメラが 1 フレームを撮像するのに必要な 33 [ms] 以下でオートフォーカスを完了できることを示している。

#### 4.2 高速フォーカストラッキング実験

次に、より高速なビジュアルフィードバックが必要となるフォーカストラッキング実験を行った。フォーカストラッキングとは、光軸方向に高速に動く対象に対して物体合焦位置を合わせ続けて常に合焦した画像を得る機能を指す。

高速に運動する対象に物体合焦位置を合わせ続けるためには、1. 対象の運動を計測し、2. それに対応して物体合焦位置を制御する、ことが必要である。対象の光軸方向の位置を画像から推定するためには、最低でも 2 枚の物体合焦位置が異なる画像が必要である。これは、一枚の画像だけでは対象の物体合焦位置からの変位の絶対量は推定できるものの、その変位の方向、つまり手前に動いたのか、奥に動いたのかが分からないからである。そのため、異なる物体合焦位置で画像を計測し、それぞれの画像に重畳しているボケの量を抽出し、それらを比較して変位の方向を推定し、推定結果に基づいて焦点位置を制御することが必要である。特に対象が高速に運動している場合には、この一連の処理を高速かつ継続的に行うことが重要になる。

既存の光学系は焦点距離制御に時間がかかるため、このような処理を高速に行うことができず、運動している対象に合焦し続けることはできなかった。しかし、高速フォーカスビジョンは高速に物体合焦位置を制御でき、かつ高速にそれぞれの位置での画像を計測・処理できるため、フォーカストラッキングを高速に実行することができると考えられる。そこで、実際に高速フォーカストラッキングのアルゴリズムを開発し、実験を行った。

開発したアルゴリズムを説明する。ある時点  $k$  における光学系の物体合焦位置を  $x_k$  とする。

- (1) 物体合焦位置  $x_k$  で画像を計測し、その画像における合焦測度  $B_k$  を算出する。合焦測度は高速オートフォーカス実験と同じ Brenner gradient を用いた。
- (2) これまでの 3 カ所の物体合焦位置  $x_k, x_{k-1}, x_{k-2}$  と、それぞれの位置における合焦測度  $B_k, B_{k-1}, B_{k-2}$  から、現在の合焦位置  $\hat{x}_k$  を推定する。推定は高速オートフォーカス実験と同様に、合焦測度の逆数は対象位置を中心とする 2 次関数に従うと仮定して行った。
- (3) 次に移動する焦点位置  $x_{k+1}$  を、

$$x_{k+1} = \begin{cases} \hat{x}_k & (k \bmod 3 = 0) \\ \hat{x}_k + \delta x & (k \bmod 3 = 1) \\ \hat{x}_k - \delta x & (k \bmod 3 = 2) \end{cases} \quad (4)$$

とし、そこに物体合焦位置を移動する。ここで  $\delta x$  は所与の微小な値であり、意図的に推定値とずらした場所を与えることで画像を計測する物体合焦位置にばらつきを与え、合焦位置の推定誤差を小さくするために導入した。

- (4) (1) に戻ってこれを繰り返す。

上記のアルゴリズムを実際に実装し、電子基板を対象として実験を行った。このアルゴリズムは物体合焦位置を一定時間ごとに変化させて 3 カ所で画像の合焦測度を評価するが、この間対象はほぼ静止していると仮定している。しかし、実際の対象

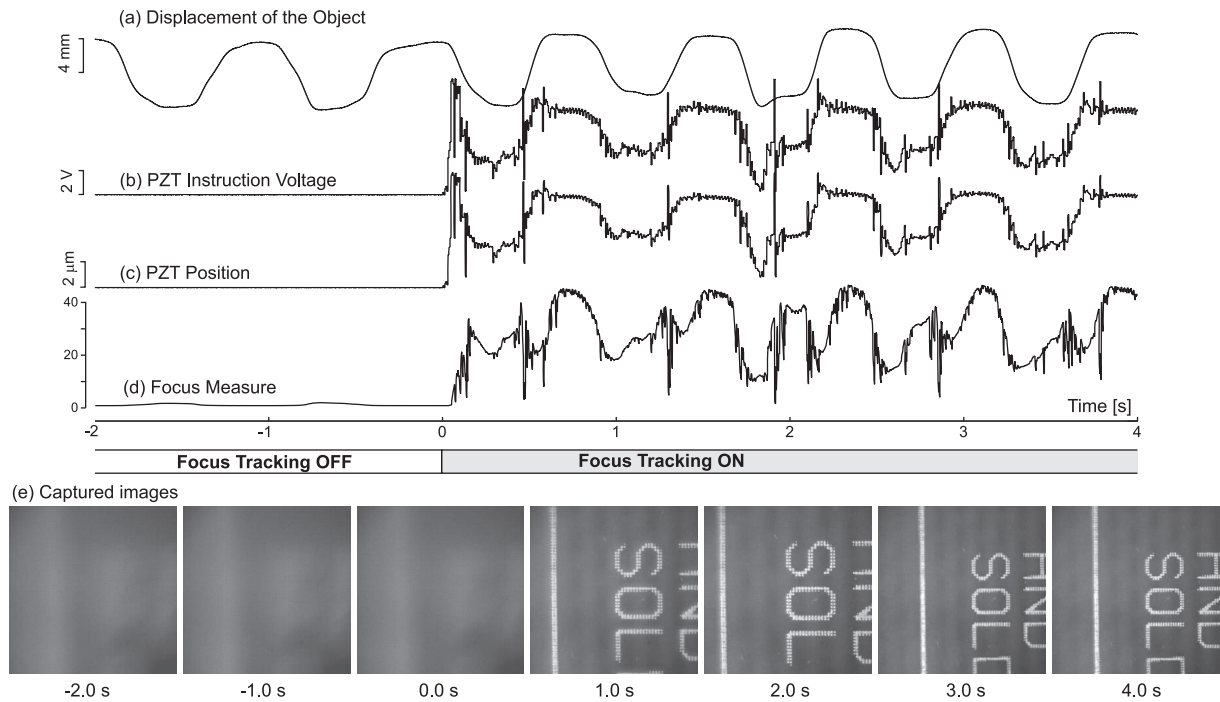


Fig. 8 Result of high-speed focus tracking experiment

は運動をしているため、この一連の測定は高速に行うことが重要である。さもないと、計測中の対象の運動が無視できなくなり、合焦位置の推定に失敗する。極端な例として、仮に対象の運動と、物体合焦位置の移動とがほぼ一致してしまったとすると、3カ所で計測した合焦測度の間の違いが小さくなり、大きく誤った推定合焦位置が得られるようになってトラッキングが不安定になる。これを防ぐためには、物体合焦位置の移動速度、つまり  $\delta x$  を時間間隔で割った値が対象の運動速度に比べて十分大きければよい。

今回の実験では 5 [ms] ごとに物体合焦位置の移動と撮像・処理を行って合焦測度を抽出し、直近の 15 [ms] で計測された3点の情報から合焦位置を推定している。ただし、推定値は 5 [ms] ごとに直近の値を用いて更新される。物体合焦位置はダイナモルフレンズに取り付けられたピエゾアクチュエータで制御されているため、物体合焦位置のばらつき  $\delta x$  を実現するためにピエゾアクチュエータの指令値電圧を目標値に対して  $\pm 0.2$  [V] 変化させた。本実験の系ではこれはおおむね  $\delta x = 0.2$  [mm] とすることに相当する。また、物体合焦位置の移動速度はおよそ  $0.2/0.005 = 40$  [mm/s] であり、物体の運動速度はこれより十分に遅い必要がある。

高速ビジョンは 1,000 [fps] で画像を計測しているが、物体合焦位置の移動が終わったと考えられる画像のみを取り出して画像処理を行った。物体合焦位置の移動終了は、ピエゾアクチュエータへの指令値入力時刻から経過時間があらかじめ計測した応答時間を超えるか否かで判断した。

対象に運動を与えるため、電子基板は光軸方向にスライドするステージの上に取り付け、人間がその位置を動かした。対象の位置はレーザ変位計 (LK-G155, Keyence) で測定した。人間

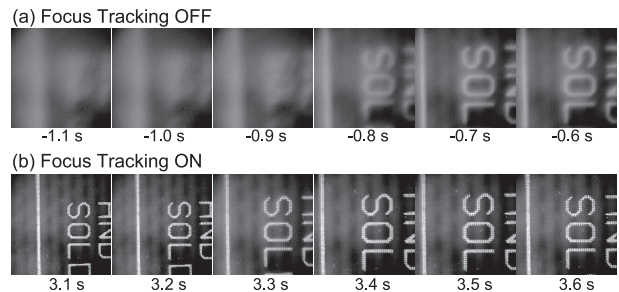


Fig. 9 Image sequences when (a) the focus tracking control was off, and (b) the focus tracking control was on

が観測するための画像は高速カメラにより 200 [fps] で記録した。

実験結果を Fig. 8 に示す。図中 (a) は対象の位置、(b) はダイナモルフレンズ駆動用ピエゾアクチュエータへの指令電圧値、(c) はピエゾアクチュエータの実際の変位、(d) は合焦測度、(e) は高速カメラによって得られた画像を示している。この実験では、時刻 0 [s] で高速フォーカストラッキングを開始したピエゾアクチュエータへの指令値入力から、高速フォーカストラッキング中は対象の動きに対応した指令電圧が入力され、高速カメラ像から対象に焦点が合い続けていることが分かる。なお、ピエゾアクチュエータへの指令電圧値 (b)、変位 (c)、合焦測度 (d) においてところどころ急激な変化が見られる。これは、対象の移動速度が物体合焦位置の移動速度に対して十分小さいと見なせなくなり、一時的に合焦位置の推定に失敗した結果だと考えられる。

フォーカストラッキングが機能している場合と機能していない場合とを比較するために、Fig. 9 に、対象がほぼ同じ動きを

しているときの高速カメラ像をフォーカストラッキングなしの場合 (a) とフォーカストラッキングありの場合 (b) とを上下に並べて示した。どちらも対象が高速フォーカスビジョンに近づいてくる部分での像を示しており, (a) では場所によってボケの量は違うものの常に合焦しない状態であるのに対し, (b) では常に対象に合焦していることが分かる。なお, 基板上の文字の大きさが変化しているが, これは対象の奥行き位置が変化するために光学倍率が変化するためである。

以上より, 高速フォーカスビジョンを用いることで高速に運動する対象に合焦し続ける高速フォーカストラッキングに成功した。なお, 意図的に合焦位置からずらした場所でも像を撮像するため, 厳密に焦点が合っている画像は 3 回に 1 回の割合で撮影されることになる。もし厳密に焦点が合っている画像系列のみを出力することが必要であれば, 3 回に 1 回撮像される 5 [ms] の画像を 3 倍の 15 [ms] に引き延ばして外部に出力すればよい。

## 5. 結 論

本論文では, 物体合焦位置やズーム比をミリ秒オーダーで制御可能な撮像光学系と, やはりミリ秒オーダーで画像の取得から処理までを行う高速ビジョンとを統合した「高速フォーカスビジョン」を提案した。次に, 筆者らによって開発された高速な可変焦点レンズであるダイナモルフレンズと, 1,000 [fps] で画像の取得・処理ができる CPV4 とを組み合わせて高速フォーカスビジョンを試作し, 物体合焦位置の制御を 2 [ms] 以内で行えることを示した。本試作システムを用いて, 高速オートフォーカス実験と高速フォーカストラッキング実験を行った。

高速オートフォーカス実験では, 1,000 [fps] で画像を取得しながら焦点位置を 14 [ms] にわたって走査し, その結果得られた 14 枚の画像を処理した結果から合焦位置を推定し, そこに焦点を合わせる高速オートフォーカスに成功した。これら一連の処理を全部で 15.8 [ms] で完了しており, 通常の 30 [fps] のカメラが 1 フレームを撮像するのに必要な 33 [ms] 以下でオートフォーカスを完了できる。また, 高速フォーカストラッキング実験では, 5 [ms] ごとに物体合焦位置を変更しながら画像を取得・処理することで, 高速に運動する対象に合焦し続けることに成功した。これより, 提案する高速フォーカスビジョンは従来の固定された光学系を利用するビジョンシステムの限界を超えた, 新たな画像利用計測を実現するものであることが示された。

本論文では実験機材の都合でダイナモルフレンズを一つだけ利用し, 物体合焦位置の制御に注目した高速フォーカスビジョンの有効性を示したが, 複数のダイナモルフを組み合わせれば物体合焦位置の制御に加えて高速にズームも行う高速フォーカスビジョンを構築することも可能である。特に対象の大きさや状態に合わせてズームを高速かつ適応的に制御することで, 対象の状態に柔軟に対応できるロボットビジョンが実現できることが予想されるため, 今後はズーム機能をもつ高速フォーカスビジョンについても研究を進めていく予定である。

謝 辞 本研究の一部は, NEDO・平成 19 年度産業技術研究助成事業の下で行われた。

## 参 考 文 献

- [1] 小室, 鏡, 石川: “ビジョンチップのための動的再構成可能な SIMD プロセッサ”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J86-D-II, no.11, pp.1575–1585, 2003.
- [2] I. Ishii, K. Kato, S. Kurozumi, H. Nagai, A. Numata and K. Tamura: “Development of a Mega-pixel and milli-second Vision System using Intelligent Pixel Selection,” 2004 1st IEEE Technical Exhibition Based Conf. on Robotics and Automation (TEXCRA 2004), pp.9–10, 2004.
- [3] 平井, 座光寺, 増淵, 坪井: “FPGA ベースリアルタイムビジョン”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.7, pp.873–880, 2004.
- [4] P. Grossmann: “Depth from focus,” Pattern Recognition Letters, vol.5, pp.63–69, 1987.
- [5] A.P. Pentland: “A New Sense for Depth of Field,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), vol.9, no.4, pp.523–531, 1987.
- [6] M. Subbarao and G. Surya: “Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach,” Int. J. of Computer Vision, vol.13, no.3, pp.271–294, 1994.
- [7] S. K. Nayar and Y. Nakagawa: “Shape from Focus,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), vol.16, no.8, pp.824–831, 1994.
- [8] H. Oku and M. Ishikawa: “High-speed liquid lens with 2 ms response and 80.3 nm root-mean-square wavefront error,” Applied Physics Letters, vol.94, 221108, 2009.
- [9] 奥, 門内, 石川: “ミリ秒高速・高解像度液体可変焦点レンズ”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 2a-ZG-9, 2008.
- [10] 奥, 門内, 石川: “ミリ秒高速液体可変焦点レンズとそのロボットビジョン応用の可能性”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3I1–03, 2008.
- [11] T. Kaneko, T. Ohmi, N. Ohya, N. Kawahara and Tadashi Hattori: “A New, Compact and Quick-Response Dynamic Focusing Lens,” TRANSDUCERS '97, vol.1, pp.63–66, 1997.
- [12] H. Oku, K. Hashimoto and M. Ishikawa: “Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth,” Optics Express, vol.12, no.10, pp.2138–2149, 2004.
- [13] 石井: “可変焦点ミラーを用いた定倍率焦点調節機構の検討”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '02 講演論文集, 1A1–D01, 2002.
- [14] 北川, 玉井, 平井, 石井: “可変焦点ミラーを用いた三次元画像取得システム”, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3F26, 2004.
- [15] T. Kaneko, Y. Yamagata, T. Idogaki, T. Hattori and T. Higuchi: “3-Dimensional Specific Thickness Glass Diaphragm Lens for Dynamic Focusing,” IEICE Trans. ELECTRON, vol.E78-C, no.2, pp.123–127, 1995.
- [16] P.-G. de Gennes, F. B.-Wyart and D. Quéré: 表面張力の物理学—しずく, あわ, みずたま, さざなみの世界—. 吉岡書店, 2004.
- [17] C.B. Gorman, H.A. Biebuyck and G.M. Whitesides: “Control of the Shape of Liquid Lenses on a Modified Gold Surface Using an Applied Electrical Potential across a Self-Assembled Monolayer,” Langmuir, vol.11, pp.2242–2246, 1995.
- [18] B. Berge and J. Peseux: “Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting,” The European Physical Journal E, vol.3, pp.159–163, 2000.
- [19] S. Kuiper and B.H.W. Hendriks: “Variable-focus liquid lens for miniature cameras,” Applied Physics Letters, vol.85, no.7, pp.1128–1130, 2004.
- [20] Y. Sugiyama, M. Takumi, H. Toyoda, N. Mukozaka, A. Iori, T. Kurashina, Y. Nakamura, T. Tonbe and S. Mizuno: “A High-Speed CMOS Image Sensor With Profile Data Acquiring Function,” IEEE J. of Solid-State Circuits, vol.40, no.12, pp.2816–2823, 2005.
- [21] 辻内, 黒田 ほか: 最新・光学技術ハンドブック. 朝倉書店, 2002.
- [22] J.F. Brenner, B.S. Dew, J.B. Horton, T. King, P.W. Neurath and W.D. Shelles: “An Automated Microscope For Cytologic

Research A Preliminary Evaluation,” The J. of Histochemistry and Cytochemistry, vol.24, no.1, pp.100–111, 1976.

[23] S. Yazdanfar, K.B. Kenny, K. Tasimi, A.D. Corwin, E.L. Dixon

and R.J. Filkins: “Simple and robust image-based autofocusing for digital microscopy,” Optics Express, vol.16, no.12, pp.8670–8677, 2008.



奥 寛雅 (Hiromasa Oku)

1998年東京大学理学部物理学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。2003年同専攻博士課程修了。2003～2005年科学技術振興機構研究員。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年同助教。現在に至る。マイクロビジュアルフィードバック、ダイナモルフレンズなどの研究に従事。博士（工学）。

(日本ロボット学会正会員)



石川貴彦 (Takahiko Ishikawa)

2007年東京大学工学部計数工学科卒業。2009年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在に至る。光学系の高速制御に関する研究に従事。



石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1977年東京大学工学部計数工学科卒業。1979年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所入所。1989年東京大学工学部計数工学科助教授。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002, 2003年東京大学総長特任補佐。2004年度東京大学副学長。2005年度理事・副学長。超並列・超高速ビジョン、センサフュージョン、メタ・パーセプションなどの研究に従事。1998, 2001, 2008年度本学会論文賞受賞。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)