

# ミリセカンド高速液体可変焦点レンズと そのロボットビジョン応用への可能性

奥寛雅（東大・情報理工）， 門内靖明（東大・情報理工）， 石川正俊（東大・情報理工）

## Milliseconds High-Speed Liquid Variable-Focus Lens for Robot Vision

\*Hiromasa OKU (Univ. of Tokyo), Yasuaki MONNAI (Univ. of Tokyo), Masatoshi ISHIKAWA (Univ. of Tokyo)

**Abstract**— This paper describes a new liquid variable-focus lens named “Dynamorph Lens” that can dynamically focus by morphing liquid-liquid interface. The goal of this lens is to achieve both high-speed response and high image resolution simultaneously. High-speed step response of 2 ms and high resolution of 49 cycles/mm were demonstrated in high-speed focus switching experiment using a prototype of the Dynamorph Lens. Finally, wide potential applications of the Dynamorph Lens in a robot-vision field are described.

**Key Words:** Lens, Variable Focus, High-Speed, High Resolution, Vision

### 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年程でフレームレート・画像処理速度共に高速になってきており、研究レベルで1000fps以上で画像の計測と処理を行う物が報告されてきている [1, 2, 3]。

一方、ビジョンセンサが外界の情報を計測するためには、必ず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、通常では測定できない奥行き方向の情報が計測できるなどの利点があるため、Depth From Focus (DFF) [4], Depth From Defocus (DFD) [5, 6], Shape From Focus (SFF) [7] など様々な手法が提案されてきた。しかし、そのような手法は理論として提案されるに留まり、ほとんど現実のシステムに応用されてこなかった。

この理由として、光学特性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。そのため、動的に光学特性を制御する手法を採用すると、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い、メリットよりもデメリットの方が大きくなってしまふ。

この問題は、高速な可変焦点レンズデバイスを実現することで解決できる。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 [8]。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150Hzの周波数応答と、他の光学系と組み合わせると最大で12 cycles/mm以上の像側空間解像力を実現した [8]。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 [9]。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 cycles/mm程度の像側空間解像力を実現した [9]。

しかし、通常のカメラレンズが50 cycles/mm以上の解像力をもっていることを考慮すると、これら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。近年のビジョンセンサの高速化を鑑みると、ミリ秒の高速応答と、結像に十分な解像力をもつ可変焦点レンズの実現が重要であるが、いまだにこれをみたくデバイスは実現されていない。

そこで、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を研究・開発してきた。本発表では、高速応答と高解像力とを同時に実現する新たな可変焦点レンズであるダイナモルフレンズ (Dynamorph Lens) を報告し、試作品による実際の測定結果からダイナモルフレンズがもつ高速応答特性と高解像力特性とを示して本レンズの有効性を実証する。また、ダイナモルフレンズをロボットビジョン用光学系に組み込むことでどのような応用の可能性があるかについて著者らの見解を示す。

### 2. ダイナモルフレンズ

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用い、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高速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持ち、そ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 piezoelectric 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。ダイナモルフレンズが持つ 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

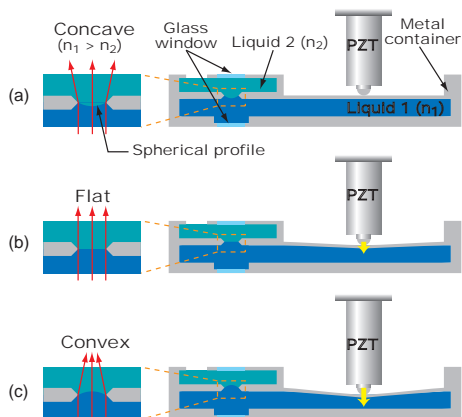


Fig.1 ダイナモルフレンズの構造の模式図と可変焦点の原理． $n_1, n_2$ ：各液体の屈折率．なおこの図では  $n_1 > n_2$  を仮定した．

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素子 (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 PZT 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 PZT が変形させる部分の面積を、レンズ面積の数十～百倍程度に設計し、PZT 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  $\mu\text{l}$  とごく僅かで済むため、液体の大部分はほぼ圧力伝達だけを担うだけでほとんど抵抗を受けないと考えられ、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 [9] ために、光学的な性能が悪いという問題がある．

一方、特定の条件下で液体同士の界面はオングストロームオーダの精度を持つ球面を形成する [10] 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 [11] されて以来、Electro-wetting を駆動原理とする構造 [12, 13] を代表に、種々の構造が提案されてきた．

ダイナモルフレンズも高解像力を実現するために液体同士の界面を屈折面として利用しており、その界面形状制御は液体界面が他の物質と接触する時に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 [10] に基づ

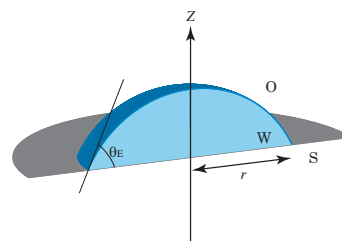


Fig.2 ヤング-デュプレの法則 [10]．平坦な固体基板 (S) 上に少量の液滴 (W) を落とした場合の例．液滴とその外界 (O) との界面と、基板表面とがなす角度である接触角  $\theta_E$  は基板、液滴、外界の各物質間の表面張力のみによって決まる一定値となる．

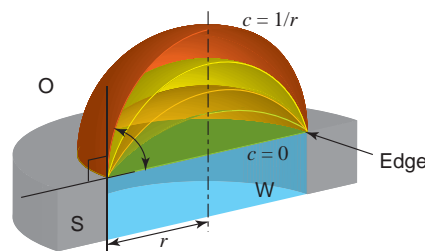


Fig.3 界面形状制御の原理． $r$ ：円形穴の半径， $c$ ：球殻の曲率．図は界面が変化する様子の断面を接触角  $\theta_E = \pi/2$  の場合に示す．各部分球殻はとり得る界面形状を示している．図中の W と O は、それぞれ Fig. 1 中の Liquid 1, Liquid 2 に対応する．

いている．Fig. 2 にこの法則の説明を図示する．

ダイナモルフレンズの容器には Fig. 3 に示すような平板状基板に垂直に円形の穴をあけた構造が形成しており、基板上面と穴とのエッジ部分に液-液界面が接触させてある．以後接触角を  $\theta_E = \pi/2$  と仮定して説明をする．液体 W の体積が少なくて界面が穴の内部にある場合、界面は壁面に垂直に接するため平面となる．液体 W の体積が増加してくるとやがて界面はエッジ部分に到達し、それ以後の体積増加は界面が球面となって上に膨らむことで解消される．なぜならば、界面の面積に比例して表面エネルギーが増加するため、エッジから離れてかつ基板上面との接触角が  $\pi/2$  になるためには界面形状が球面でなくなり表面エネルギーが増加するので、エッジと接触しながら球面を保った方が表面エネルギーが低くなるからである．このエッジへの拘束は、球面と基板上面との接触角が  $\pi/2$  になるまで保たれる．このため、界面と基板が接触する部分は特定の範囲でエッジに固定され液体の体積変化が曲率の変化となる．

形成される界面が精度のよい球面となるためには、界面と基板とが接触している部分がなす三次元的な線である接触線が精度のよい円形となる必要があるため、エッジ部分には高い加工精度が要求される．さもないと、液-液界面を用いても光学性能が悪い [14]．この部分の加工精度を考察する指標としてレイリーの解像力基準 [15] を用いた．これは、光学系を通過した実際の波面と理想的な波面との差である光路差が光の波長の  $1/4$  以内であれば、結像光学系として理想的な系とほぼ同等の性能が出せるという経験則である．ここでは

仮に球面形状の界面が光学的に理想的な面であると考え、面の歪みによる光波面の位相差を  $1/4$  波長以内に収めることを基準として加工精度の仕様を求めた。具体的な仕様は試作品の説明で述べる。

### 3. ダイナモルフレンズの試作

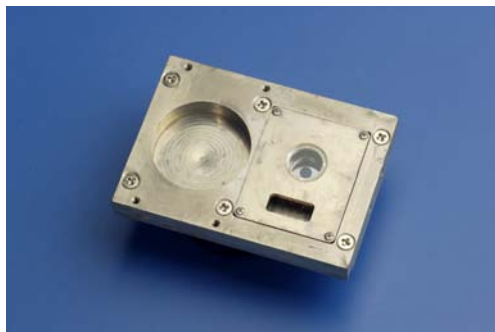


Fig.4 試作品の写真。

以上の原理に基づき、実際にダイナモルフレンズを設計・試作した。Fig. 4 に試作したレンズの写真を示す。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 PZT が押すことでレンズの焦点距離を調節する。レンズ径は 3 mm, PZT が押す部分の直径は 24 mm である。

液体は、Liquid 1 として Millipore 社の DirectQ UV 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 5000 cSt の Polydimethyl-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 の比重が 0.975 と、純水との差が僅かであることと、今回はまだ基本的な評価であることから、比重の調節は行っていない。

界面が接するエッジ部の加工精度は  $\pm 1\mu\text{m}$  以内とした。この理由は、光の波長  $\lambda = 546\text{nm}$ （緑）で界面の球面からのずれによる位相差が  $1/4$  波長以内になるという基準を考えると、許容される界面の理想的な球面からのずれは  $1.95\mu\text{m}$  以内となることに拠る。この要求を満たすために、エッジ部分についてはシリコン基板にフォトリソグラフィとエッチングで高精度に穴あけ加工をした部材を用いた。

また、駆動する積層型 PZT として、 $15\mu\text{m}$  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。

## 4. 評価実験と結果

### 4.1 解像力

解像力測定用のテストチャートである USAF1951 チャートを用いて、試作レンズが解像可能な像側空間周波数を測定した。測定は、試作レンズと市販のマクロレンズをつけたカメラを直列に配置し、試作レンズによって結像される像を撮像し、それをカメラで撮像した結果を人間が目視で確認することにより行った。物体側開口数が 0.04, 焦点距離が  $-30.9\text{ mm}$  の凹レンズの時に、 $49.0\text{ cycles/mm}$  の解像力が得られた。界面が球

面であると仮定した時に予想される値とほぼ同等であり、球面レンズ並みの高い解像力が実現された。

Table 1 測定された焦点距離・屈折力変化

焦点距離 $f[\text{mm}]$		屈折力 $= 1/f[\text{D}=\text{m}^{-1}]$	
変位前	変位後	変位前	変位後
112	65.7	8.9	15
865	175	1.2	5.7
-546	-200	-1.8	-5.0
-30.9	-28.4	-32	-35

### 4.2 焦点距離の可変範囲

PZT を  $8\mu\text{m}$  変位させた時に焦点距離の可変焦点範囲を計測した。液体の量を変更して計測した結果の例を Table 1 に示す。屈折力でおおよそ 6 D 程度の変化が得られた。

### 4.3 高速フォーカシング

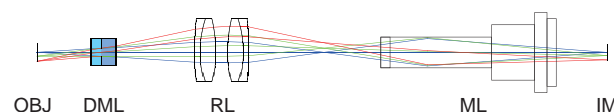


Fig.5 高速フォーカシング実験用光学系配置。OBJ:対象, DML:試作したダイナモルフレンズ, RL:リレーレンズ, ML:マクロレンズ, IM:高速カメラ撮像面

応答速度を計測するために、異なる深さの 2 点間で焦点位置を高速に繰り返し切り替える実験を行った。対象として電子基板を用い、その像をダイナモルフレンズとリレーレンズを通してマクロレンズ (0.8 倍) を取り付けた高速カメラ (Phantom V4.3, Vision Research) で撮像した。Fig. 5 に実験に用いた光学系配置を示す。リレーレンズは、ダイナモルフレンズの開口径を通過した光線を効率的にマクロレンズに伝達するために用いた。ダイナモルフレンズの焦点距離を変化することで物体面位置を光軸方向に制御可能である。

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 (図中 (b)), それに対して PZT が  $0.5\text{ ms}$  程度の遅れで追従している (図中 (c))。図中上段 (a) に  $2200\text{ fps}$  で撮像した高速カメラ像の連続写真が示されており、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、 $1\text{ ms}$  前後でフォーカス位置が変化し始め、 $2\text{ ms}$  以降では基板表面にフォーカスが合っていることがわかる。

以上の実験より、ダイナモルフレンズは  $2\text{ ms}$  の高速な応答時間と、基本的な結像用途に足りる高い解像力を持つことがわかる。

## 5. ロボットビジョン応用における可能性

これまで多くの画像処理アルゴリズムでは撮像用光学系の特性は固定されていることを前提としていたが、これは高速に特性を制御できる光学デバイスが存在しなかったことが大きな原因であると考えられる。ダイナモルフレンズを用いれば取得画像毎にフォーカスやズームを動的に制御できるようになるため、ロボットビジョンの高速化や高機能化に寄与するとともに、動的な対象にフォーカスを合わせ続けるといった、これまで不可能であった新たな機能の実現が期待される。

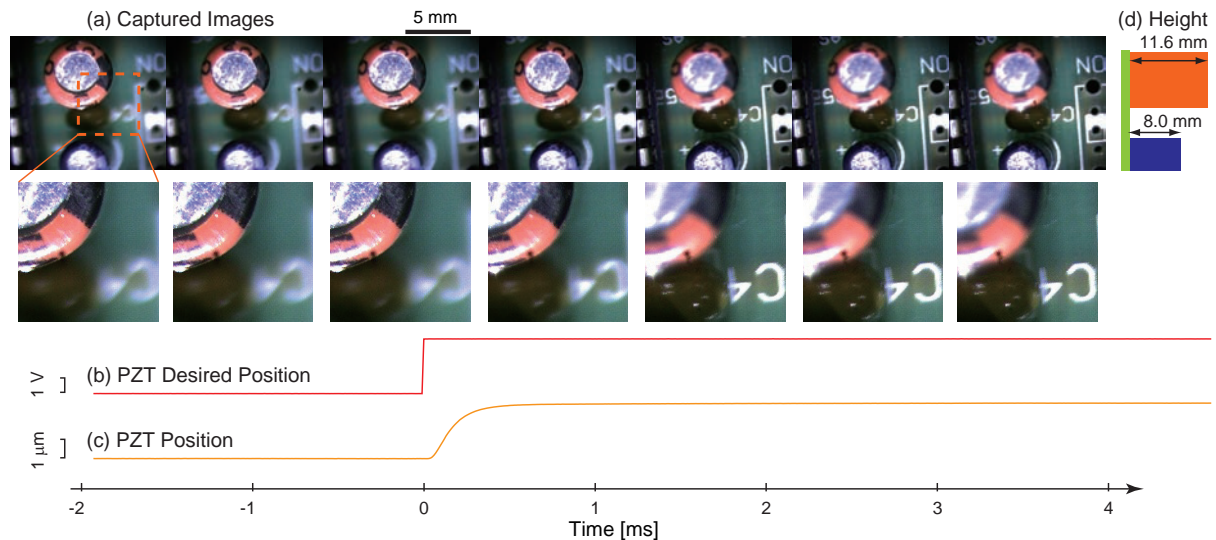


Fig.6 高速フォーカシング実験結果．時刻 0 でフォーカシングを開始し，2 ms 後には応答を完了している．

例えば最初に述べたように，光学特性を変更して複数毎の撮像を行うと対象の 3 次元情報が計測できることが知られている．ダイナモルフレンズは最短 2 ms で焦点距離の切り替えができるので，ビジョンの撮像と画像処理速度が十分高速であれば，数百 Hz の計測周波数で高速な 3 次元計測が可能となる．

また，マイクロ・ナノ分野では光学顕微鏡による計測が重要になるが，顕微光学系は焦点深度が非常に浅いため，その焦点位置の高速な制御が望まれている．ダイナモルフレンズを用いれば，光学顕微鏡の焦点位置制御が高速にできるため，動的な対象への焦点面の追従や，さらには焦点面スキャンによる高速 3 次元計測 [16]，高速な全焦点画像合成 [17] など様々な応用の高速化・高機能化を可能とする．

## 6. おわりに

本論文では，高解像力・高速応答を持つ新たな可変焦点レンズであるダイナモルフレンズ (Dynamorph Lens) の原理を説明し，その試作品による実験結果から 2 ms での高速応答と，49 cycles/mm の高い解像力が実現されていることを示した．さらに当該レンズをロボットビジョンと組み合わせることで，幅広いロボットビジョン応用分野で高性能化・高機能化が期待できるとともに，これまで不可能であった新たな応用の実現が期待されることを説明した．

## 謝辞

実験で多くの協力を頂いた学部生の高部晃史氏に感謝を表す．本研究は，NEDO・平成 19 年度産業技術研究助成事業の下で行われた．

- [1] 石川：“超並列・超高速視覚情報システム - 汎用ビジョンチップと階層型光電子ビジョンシステム -”，応用物理，vol. 67, no. 1, pp. 33–38, 1998.
- [2] 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.
- [3] 石井，山本：“超速ハイパヒューマンビジョンとその応用”，電子情報通信学会誌，vol. 90, no. 10, pp. 838–841, 2007.

- [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, 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, vol. 16, no. 8, pp. 824–831, 1994.
- [8] T. Kaneko, T. Ohmi, N. Ohya, N. Kawahara, and T. Hattori：“A New, Compact and Quick-Response Dynamic Focusing Lens,” TRANSDUCERS'97, vol. 1, pp. 63–66, 1997.
- [9] H. Oku, K. Hashimoto, and M. Ishikawa：“Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth,” Optics Express, vol. 12, no. 10, pp. 2138–2149, 2004.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] H. Oku and M. Ishikawa：“Rapid Liquid Variable-Focus Lens with 2-ms Response,” Proc. of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society, pp. 947–948, 2006.
- [15] R. E. Fischer and B. T.-Galeb：Optical System Design. McGraw-Hill, 2000.
- [16] D. A. Agard and J. W. Sedat：“Three-dimensional architecture of a polytene nucleus,” Nature, vol. 302, pp. 676–681, 1983.
- [17] 大場，J. C. P. Ortega，谷江，林，段木，武井，金子，川原：“実時間マイクロ VR カメラの試作”，電気学会論文誌 E, vol. 120, pp. 264–271, 2000.