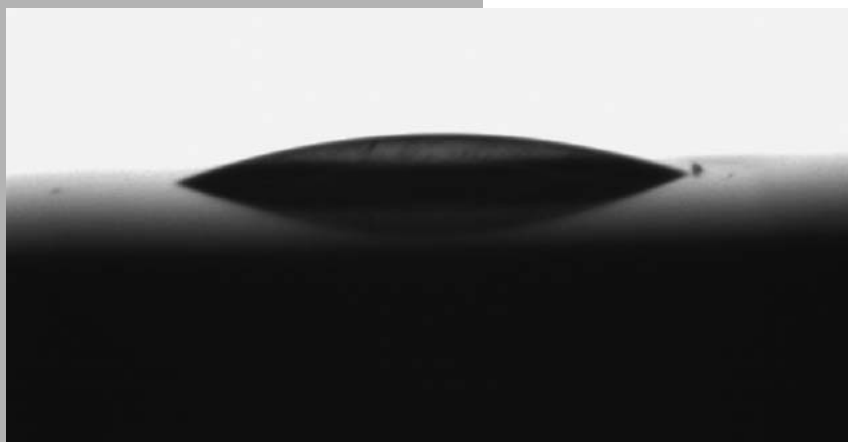


機構部品ゼロ 量産近づく 液体レンズの実力

屈折力を電圧で制御

Bruno Berge
フランス Varioptic 社
Chief Scientific Officer



液滴の高さを制御

絶縁体で覆った金属基板上に垂らしたオイルの高さを、電圧を加えることで変えることができる。液体レンズはこの現象を応用した。基板とオイルは水溶液中にある。

携帯電話機メーカーにとって悩みの種の1つが、内蔵するカメラでオートフォーカス機能や光学ズーム機能を実現することである。カメラ・モジュールが占める実装空間が大きくなりがちだからだ。これは機械的にレンズの位置を光軸に沿って動かさなければならないことに起因する。それならば、思い切ってレンズを前後に動かさなければよい。こう提案するのがフランスVarioptic社である。同社は液体レンズと呼ぶ光学部品を開発し、2005年末までに量産出荷の準備を終える。同社の技術を使って、韓国Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.も液体レンズを造る見込みだ。液体レンズを使えば、製造コストや消費電力面も抑えられるとVarioptic社は主張している。こうした利点や、レンズ性能や信頼試験の概要、そして動作原理について同社の開発責任者が述べる。 (大槻 智洋=本誌)

本誌注1) Varioptic社は、水溶液とオイルの組成を公開していない。両方の液体とも、所望の温度特性や光学特性を満たすために組成を工夫したという。水溶液は、凍結防止材料などが混じっている。水溶液とオイルの屈折率は異なる。

我々は、オートフォーカス機能や光学ズーム機能を備えた光学モジュールを抜本的に小型化できる「液体レンズ」を開発した。これまでの固体レンズのように所望の屈折力を得るために、レンズ自体を光軸方向の前後に動かす必要がない。液体レンズにお

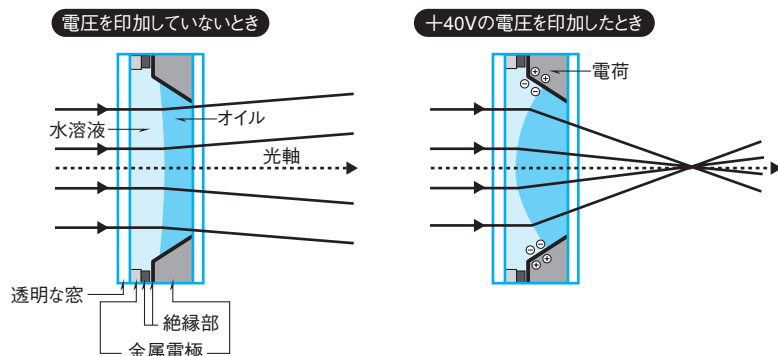
いて光を収斂/発散させるレンズ面になるのは、容器に封止した水溶液とオイルの界面である。この界面の形状を電圧の印加によって変えることで、液体レンズは所望の屈折力を得る(図1) 本誌注1~2)。

我々は、オートフォーカス機能向け液体レンズの量産出荷の準備を2005年末までに終える。量産する品種は、現在サンプル出荷中の「AMS1000」である(図2)。この液体レンズを1枚対物側に、通常の固体レンズを1枚撮像素子側に配置することでオートフォーカス機能を実現できる。加えて、液体レンズを駆動するために、DC-DCコンバータを集積した液体レンズ用ドライバIC「VIC-040」も実装する必要がある。

量産出荷の開始時には、現在100枚/日である当社工場の生産能力を、1000枚/日に拡大する。我々の液体レンズの製造技術は、薄い金属板のプレス加工といったごく一般的なもので、工程も決して複雑ではない。このため、容易に全製造工程を自動化できるだろう。液体の充填など幾つかの工程は、既に自動化している。

さらに2005年末をメドに、2.5倍の光学ズーム機能に向けた液体レンズの開発を終えたい(表1)。対物側からズーム用液体レンズ、オートフォーカス用液体レンズ、固体レ

(a) 基本的な構造



(b) 撮影結果



図1 界面形状を変えて、光を収斂/発散

液体レンズは、水溶液とオイルで主に構成する。水溶液とオイルの成分は開示していない。これらを封じ込めた容器の内側には、部分的に撥水性コーティングを施してある。これにより、電極に電圧を印加していないときは、はじかれた水溶液とオイルがほぼ平らな界面を作る。これは無限遠に焦点が合った状態に相当する。電極に電圧を印加すると、絶縁部の周辺に電荷が集まり、周囲の力関係の中で撥水性が相対的に弱まる。水溶液とオイルの界面は光を収斂させる形状になる(a)。(b)は、試作品を使って5cm先の文字と無限遠にそれぞれ焦点を合わせて撮影した写真。

レンズの3枚のレンズで構成することになる。ピントが合う被写体との距離(合焦範囲)は10cm~∞。利用を想定している撮像素子の光学サイズは1/4インチ型~1/3インチ型。総画素数は200万~300万である。

いずれの液体レンズも、想定する用途はカメラ付き携帯電話機である。しかしながら、小型の光学モジュールはさまざまな用途で必要とされている。我々は今後、薄型デジタル・カメラや内視鏡、車載カメラ、監視カメラ、バーコード・リーダーなどに向けた液体レンズを開発する予定だ。

我々の事業の柱は、技術ライセンスの供与である。例えば、既に韓国Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.にライセンスを付与した。我々が量産出荷を始めた直後にライセンス先企業も量産を始められるように、準備を進めている^{本誌注3)}。

小型、低コスト、低消費電力を実現可

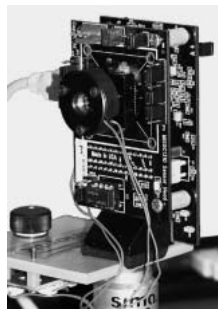
我々の液体レンズは、それ自体では結像しない¹⁾。このため固体レンズと組み合わせて使う。液体レンズの役割はピントを合わせる距離の調整などである。固体レンズを用いた光学系におけるアクチュエータの役割を果たすものといえる。

固体レンズと既存のアクチュエータを組み合わせる場合と比べて、液体レンズを用いた光学系には小型、低コスト、低消費電

(a) 外観



(c) 評価ボード



(b) 仕様

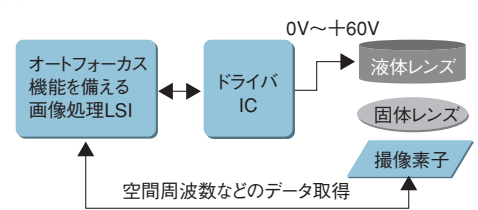
外形寸法	直径10.5mm×厚さ2.46mm
開口口径	3.6mm
焦点距離	-200mm~+75mm
合焦範囲	5cm~∞
歪曲収差	rms値で1μm
350nm~700nmの波長の光に対する透過率	88%~92%
液体間の界面の形状変化に要する時間	最大100ms
動作保証回数	100万回
動作温度範囲	-25℃~+60℃
保存温度範囲	-40℃~+85℃
動作電圧	標準+40Vrms(最大+60Vrms)
動作周波数	1kHz
消費電力	1mW未満

rms:root mean square

図2 「AMS1000」の概要

オートフォーカス機能に向けた液体レンズ「AMS1000」を現在サンプル出荷している(a)。外形寸法は直径10.5mm×厚さ2.46mm。動作温度は-25℃~+60℃と、携帯電話メーカーが求める一般的な基準を満たす(b)。我々は、AMS1000の評価ボードを用意している(c)。同ボードには、液体レンズのドライバIC「VIC-040」などの周辺部品をあらかじめ実装した(d)。

(d) 液体レンズと組み合わせる主な部品



力といった特徴がある(表2)。小型化について大まかに言えば、既存の携帯電話機におけるオートフォーカス機構と比べて実装に要する空間が半分になることもある。レンズを移動させるために使う空間や機構部品が不要になるからだ。

低コスト化できるのは部品点数が少なく、組み立てが容易だからである。我々は今後、液体レンズの低価格化を進める。

表1 2005年末の開発完了を目指す光学ズーム品の目標仕様

光学ズーム倍率	2.5倍
焦点距離	4.26mm~10.64mm(35mmフィルム換算値:42mm~105mm)
レンズ構成	液体レンズ2枚と固体レンズ1枚
歪曲収差	rms値で0.1μm(最大0.5μm)
焦点距離が4.26mmのときの画角	56度
F値	2.8~4または5
100サイクル/mm時のMTF	中心60%、全域の8割で40%、全域で20%

MTF : modulation transfer function

本誌注2) 液体レンズは、オランダRoyal Philips Electronics社も開発している。これについてVarioptic社 CEOのEtienne Paillard氏は、2005年4月に次のように述べた。「Philips社の技術は当社と非常によく似ている。しかし当社はPhilips社と違って重要な特許を使える。WIPO特許99018456号と同00058763号である。両特許ともフランスUniversity of Grenobleから実施権を取得した。Philips社の特許出願は、当社が使う特許の出願より6年遅い。成立は難しいのではないか」。

本誌注3) Varioptic社 CEOのEtienne Paillard氏は「ライセンス先企業と当社を合計した量産規模を、遠くない将来に100万個/月ほどにしたい」と言う。

注1) 液体レンズのドライバICに求められる技術要件は、圧電素子やボイス・コイル・モータのドライバICと似ている。VIC-040は、台湾UMC (United Microelectronics Corp.)の標準CMOSプロセスを使って製造した。

注2) ここでいう歪曲収差は、液体レンズを通った光の波面が理想とどれだけ異なるかを示す。液体レンズには固体レンズでの歪曲収差の測定方法を適用できないため、我々の独自方式で測定した。

本誌注4) 技術的にいえば、液体レンズ内部の電極数を増やした上で、その配置場所を工夫すれば、水溶液とオイルの間に非球面の界面を形成できる。球面収差に代表される収差の抑制が容易になる。収差とは、レンズを通して結像させるときに生じる理想像からのズレの総称である。

AMS1000の量産出荷時の価格は、購入条件などに左右されるが、1個3ユーロほど。2006年中ごろには1個1ユーロの液体レンズを発売したい。ドライバICについては、液体レンズの量産初期において0.8ユーロほどだが、2006年中ごろに0.5ユーロ以下には抑えたい。

液体レンズを使った光学モジュールは、消費電力も少ない。最大で+60Vと高い電圧を使うことがあるが、消費電流は120μAにすぎない。電圧と電流の位相差を考慮に入れると、液体レンズ単体の消費電力は1mW未満である。我々が開発したドライバICもわずかな電力しか消費しない。おおむね10mW～15mWである。携帯電話機で一般に用いるCMOSセンサと同じ+3V前後の電圧を入力すると、0V～+60Vを出力できる^{注1)}。

このほか、前述のように液体レンズに光学ズーム機能を持たせられることもボイス・コイル・モータ、圧電素子に対する優位点である。圧電素子やボイス・コイル・モータを使うメーカーは、レンズの移動距離が数mmと長い(屈折力の変化が大きい)光学ズーム機能をなかなか実現できないでいるようだ。我々は既に、2005年3月にドイツで開催された展示会「CeBIT 2005」で光学ズーム品のデモを披露した。

解像力は300万画素対応

応答速度が速いことも液体レンズの特徴である。ピントが合う被写体との距離を5cmから無限遠に変えるのに最大100msしか要しない。この速度は、周囲の環境温度によって変わる。液体は一般に、低温環境下で粘性が高くなる。液体レンズに使う材料といえども例外ではなく、界面形状の変更にかかる時間が延びる。ただし、実用上はまず問題にならない。現在サンプル出荷しているAMS1000は、-25℃の環境下でも100msの間にピントが合う距離を変えられる。我々が発見した材料の中には、-20℃の環境下で形状を変えるのに30msしかかからないものもある。

液体レンズの解像力については、まずまずの結果を得ている。人間がカメラを使う通常の温度環境ならば、ごく一般的な品質の固体レンズと組み合わせることで、光学サイズが1/4インチ型で300万画素の撮像素子に対応できる。レンズを通して映し出した像が樽形に歪んだりする歪曲収差は、AMS1000におけるrms (root mean square) 値で1μmである^{注2)}、本誌注4)。

液体レンズのレンズ面は、液体間の界面張力が働いているため平滑度が極めて高

表2 他方式よりも小型化などで優れる液体レンズ
我々の調査結果に基づき、オートフォーカスに用いる動力源の利害得失を大まかに比較した。

オートフォーカスに用いる動力源	ステッピング・モータ	ボイス・コイル・モータ	圧電素子	液体レンズ
小型化のしやすさ	△ (部品点数が多い)	○	○	○
応答時間	△ (0.1秒以上)	○	○	○
耐衝撃性	△	△	△	○ (機構部品なし)
ドライバICを含む消費電力	△ (50mW)	不明	不明	○ (10mW～20mW)
レンズ・モジュールの組み立てやすさ	×	△	△	○ (機構部品なし)
製造コストの安さ	△	○	△	○

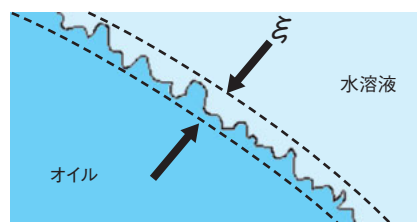


図3 極めて滑らかなレンズ面
液体同士の界面の面精度は十分実用に堪える水準である。図中に熱による界面の変動ξを求める方程式を示した。

熱による界面の変動

$$\xi \approx \sqrt{K_B T / \gamma_{ow}}$$

K_B: ボルツマン定数
T: 絶対温度
γ_{ow}: オイルと水溶液の界面張力

い。表面粗さの実測値は約0.3nmにすぎない(図3)²⁾。

液体レンズの信頼性は、携帯電話機メーカーなどが求める水準にあると考えている。液体を入れる容器が落下の衝撃を受けて壊れてしまうのではないかと懸念する技術者は少なくない。こうした懸念を払拭(ふっしょく)するため本来は信頼性の試験結果を示すべきだが、まだ我々が量産出荷を始めていない状況なので公表を差し控えたい。ただ我々は既に、+85℃と-40℃の環境下でそれぞれ動作を繰り返したり、電圧を20日間印加し続けたり、さまざまな角度で1.5mの落下を20回繰り返したりする試験を実施しており、良好な結果を得ている。

電圧で界面を操れる訳

液体レンズを実現するカギは、大きく3つある。①電圧により液体の界面を制御する技術、②2つの液体の密度を同等に保つこと、③液滴の形状を安定に保つこと、である。液体レンズが高速な応答や低消費電力を実現しているのは、①を活用していることによる。②や③は実用的なレンズの品質を達成する上で重要な点である。

我々は①の電圧による界面制御技術をエレクトロウエティングと呼んでいる^{3~6)}。液体レンズは2つの透明な窓の間に、水溶液とオイルという混じり合わない2つの液体を封じ込めた構造を採る。その内部には3つの界面が存在し、それぞれの界面に生じる張力のバランスで、レンズとして働く界面の形状が決まる(図4)。エレクトロウエティングは、電圧を印加することで3つの力のバランスを変えて界面の形状を制御する。

電圧を印加する前の状態では、レンズとして用いる、水溶液とオイルの間の界面が

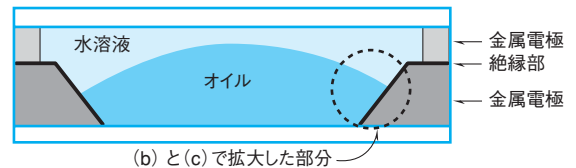
電極と成す角 θ は比較的小さい。このときの θ は、固体の電極と水溶液の間(sw)、オイルと水溶液の間(ow)、固体の電極とオイルの間(so)のそれぞれに生じる界面張力を γ_{sw} 、 γ_{ow} 、 γ_{so} とすると、Young-Laplaceの方程式により

$$\cos\theta = \frac{(\gamma_{sw} - \gamma_{so})}{\gamma_{ow}}$$

で決まる⁷⁾。この角度を適切に選べば、電圧が加わっていない場合にピントが合う位置を無限遠にできる。我々は容器内の一部に撥水性コーティングを施すなどして、 θ の大きさを調整している。

次に、液体レンズの電極に+40Vといった高い電圧を加えると、静電気による別の力が生じる。液体レンズの電極のうち1つは導電性の水溶液に接しており、もう1つは薄い絶縁体に覆われ、水溶液と絶縁性のオイルの両方に接している。この結果、絶縁した電極と水溶液の界面に電荷が生じ

(a) 液体レンズの構造



(b) 電圧を印加していないとき



(c) 電圧を印加したとき

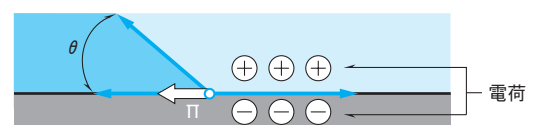


図4 界面張力が変化する

液体レンズの内部では、3つの界面張力が発生する(a)。電極と水溶液の間(SW)、オイルと水溶液の間(OW)、電極とオイルの間(SO)に働く力を、それぞれ γ_{sw} 、 γ_{ow} 、 γ_{so} と表す。電圧を加えていなければ、3つの界面張力と、金属電極とオイルの接触角度(θ)の間にはいわゆるYoung-Laplaceの方程式から $\cos\theta = (\gamma_{sw} - \gamma_{so}) / \gamma_{ow}$ という関係が成り立つ(b)。電圧を印加したときは、発生した電荷による圧力(Π)が加わる(c)。 Π は $1/2 \cdot (\epsilon \epsilon_0) / e \cdot V^2$ と表せる。ここで ϵ は絶縁部の誘電率、 ϵ_0 は真空誘電率、 e は絶縁部の厚さ、 V は印加電圧を表す。電圧印加時の θ と各界面張力の間に $\cos\theta = (\gamma_{sw} - \gamma_{so}) / \gamma_{ow} - 1/2 \cdot (\epsilon \epsilon_0) / e \cdot V^2$ が成り立つ。

る。この電荷により図4に示した力(Π)が生まれ、θの大きさが変わる。ここでΠとθはそれぞれ

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon \epsilon_0}{e} \cdot V^2$$

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{sw} - \gamma_{so})}{\gamma_{ow}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon \epsilon_0}{e} \cdot V^2$$

で表せる⁸⁾。ここでεは絶縁部の誘電率、ε₀は真空の誘電率、eは絶縁部の厚さ、Vは電圧である。この式からθは電圧印加前より大きくなり、界面の形状が特定の距離に焦点を結ぶようになる。

エレクトロウエッティングによる界面の変形は、そのために外部から加えなければならないエネルギーが少ない。我々のものは全く別の構成、例えば液体を入れた容器の内部を薄い膜によって2つに区分けし、外付けのポンプで液体を送り込んで膜を動かす、という場合を想定しよう。こうした構成だと、薄い膜を動かすために、大きな圧力を加えなければならない。我々の方式において界面の形状変更をするときの、少なくとも10倍のエネルギーを要する。それだけ多くの電力や長い時間が必要になる。

実際にはエレクトロウエッティングには、界面張力ほど大きな影響を及ぼさないものの、別な力も同時に関与している(図5)。液体レンズを設計するときには、これらの影響も加味しなければならない。

1つは、液体の体積全体に作用する力(volumic force)である。強い電界によ

て引き付けられた水分子に起因する力の相互作用があることをWang氏などが最近解明した⁹⁾。もう1つは、水溶液とオイルと電極の3つが接する線で作用する力(lineic force)である。lineic forceは、液体レンズで電界強度をどんどん高めたときに界面を不安定な状態するといった働きをする^{注3)、10)}。

材料と容器がカギ

液体レンズの品質を高める上で重要なのが、2つの液体の密度を使用温度範囲内で、できるだけ等しくすることである。両者に差が大きいと、コマ収差が生じてしまう。コマ収差とは、レンズの光軸に対して斜めに入射する光が撮像素子^{すいせい}上に、彗星のように尾が伸びた非対称なボケを形成することをいう。

密度に差がある場合の界面状態の例を図6に示した。オイルの密度が水溶液のそれを上回った結果、両液体の界面状態が

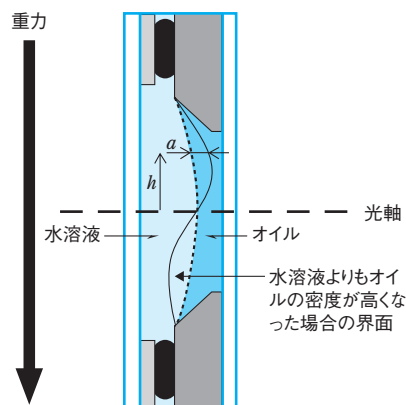


図6 重力によってコマ収差が生じ得る
液体レンズに用いるオイルと水溶液は、幅広い温度範囲で密度(単位体積当たりの重さ)が同等でなければならない。密度のバランスが崩れるとコマ収差が生じる恐れがある。コマ収差とは、撮像面に尾が伸びたような非対称なボケが現れること。図では水溶液よりもオイルの密度が高くなった場合における液体間の界面を、緩い逆S字の曲線で示した。光軸からh離れた部分での所望の界面位置からのズレをaとする。「AMS1000」の場合では、hが0~1.5mmの範囲でaが0.5μmになるとコマ収差を確認できた。

注3) lineic forceの影響は、 $K\epsilon\epsilon_0 V^2 \log L$ に比例して増える。Kは幾何学的に決まる無次元の値、εは絶縁体の誘電率、ε₀は真空の誘電率、Lは水溶液とオイルと固体の接触する線の長さである。

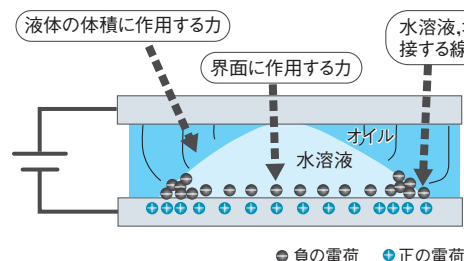


図5 エレクトロウエッティングに関与する3つの力
電圧により液体間の界面の形状を変える「エレクトロウエッティング」には、実際は3種類の力が関与する。液体の体積に作用する力、各界面に作用する力、3種類の材料が接する線上で作用する力、である。

緩い逆S字曲線を描いてしまう。界面がこのような状態になるとコマ収差が生じる。

こうした現象は、周囲の温度が変わったことで、水溶液とオイルの密度の差が大きくなると起きる。この問題を防ぐためには $\Delta\rho/\rho$ を 10^{-2} 未満にする必要がある。 $\Delta\rho$ は両液体の密度差、 ρ は両液体の密度の平均である¹¹⁻¹²⁾。オイルなどと比べて水の熱膨張率はかなり小さいため、この条件を満たす材料を見つけることは容易ではなかった。我々が製品を間もなく量産出荷できるのは、こうした特性を幅広い温度範囲で満たす水溶液とオイルを用意できたからである^{注4)}。

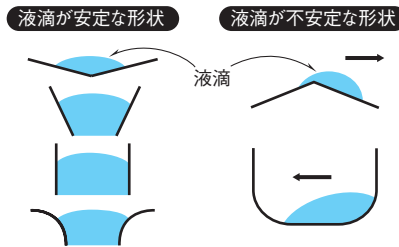
液体レンズを製品化する上でのもう1つのポイントは、光軸ズレを起こさないようにすること。固体レンズは、既存のレンズ・ホルダーや鏡筒によって光軸の位置を合わせられる。これに対して液体レンズは、それらだけでは光軸を合わせられない。例えば、液体と容器の間の摩擦により界面の変形時にヒステリシスが生じ、界面の形状が非対称になってしまう可能性がある。こうした現象を防ぐには、液体自体が自発的に元の形状に戻るよう工夫する必要がある。

これは液体を収める容器の形状を工夫すると実現できる(図7)。界面が所望の状態になったときに位置エネルギーが最も小さくなるように容器の形状を設計する。こうすると界面が変形しても元の形に戻す方向で力が働く。この復元力の強さは0.1N/m程度にすることが可能である。この手段をうまく利用することによって、数 μm の単位で界面の配置を決めることができる。

参考文献

1) Saurei, L., "Design of an autofocus lens for VGA 1/4" CCD and CMOS sensors," *Proceedings of SPIE*,

(a) 容器形状による違い



(b) 液滴を動かすのに必要なエネルギー

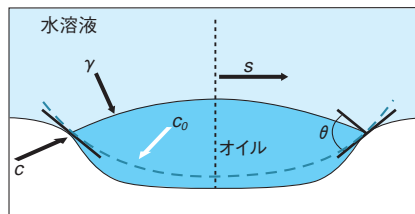


図7 液滴の中心を合わせる

液体が安定な容器の形状と、不安定な容器の形状を例示した(a)。実際の液体レンズでは、液体が動きにくく所望の位置に中心が来るように設計した容器を用いる。なお、液体を横方向にsだけ動かすために必要なエネルギー(ΔE)は次の数式で表せる。 $\Delta E = (c_0 - c) \gamma r \sin \theta s^2$ 。sはオイル滴の移動量、cとc0は図で示した各曲面における曲率(曲率半径の逆数)、 γ は水溶液とオイルの界面における界面張力、rはオイル滴の半径、 θ は図で示した接触角をそれぞれ示す。

vol.5249, pp.288-296, 2003.
 2) Braslaw, A. et al., "Surface Roughness of Water Measured by X-Ray Reflectivity," *Phys. Rev. Lett.*, 54, pp.114-117, 1985.
 3) Sato, M., "Electrocapillary Optical Switch," *IEEE Trans. Commun.*, pp.197-203 (E77-B), 1994.
 4) Pollack, M. et al., "Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications," *Applied Physics Letters*, 77, pp.1725-1726, 2000.
 5) Prins, M. et al., "Fluid Control in Multichannel Structures by Electrocapillary Pressure," *Science*, 291, pp.277-280, 2001.
 6) Verheijen, H. et al., "Contact-angles and wetting velocity measured electrically," *Rev. Sci. Instr.*, 70, pp.3668-3673, 1999.
 7) Israelachvili, J., *Intermolecular and surface forces second edition*, Academic Press, 1991.
 8) Berge, B. et al., *Sci. Paris Ser II*, 317, p.157, 1993.
 9) Wang, K. et al., "Electrowetting dynamics of microfluidic actuation," *Langmuir*, 21, pp.4211-4217, 2005.
 10) Vallet, M. et al., "Limiting phenomena for the spreading of water on polymer films by electrowetting," *Eur. Phys. J.*, B11, pp.583-591, 1999.
 11) Berge, B., "Liquid lens technology: principle of electrowetting based lenses and applications to imaging," *proceedings of the 18th IEEE conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS 2005*, p.227, 2005.
 12) Gabay, C. et al., *to be published in the proceedings of SPIE conf. Photonics Asia*, 2004.

注4) 水溶液とオイルは、実際にユーザーが頻繁に使用する環境を考慮して、+25℃のとき画質劣化の1つであるコマ収差が最小になるように設計している。

