

印加電圧波形の変化による液晶アクチュエータの駆動方向制御

Control of driving direction of liquid crystal actuators by means of changing the waveform of applied voltage

航空宇宙工学コース

流体工学研究室 1235102 小坂 昇平

1. 緒言

近年、技術の進歩により多種多様な製品のマイクロ化が進んでいる。それに伴い、マイクロアクチュエータが開発されている。その中の一つに液晶アクチュエータ⁽¹⁾⁽²⁾がある。これは液晶に電場を印可した際に起こる液晶分子の回転運動による流動（背流）を利用したアクチュエータである。

先行研究では液晶アクチュエータの駆動方向制御を複雑な電極と配向のパターニングと電場印加領域のスイッチングによって行っていた⁽³⁾。しかし、この方法では構造が複雑になりマイクロ化が困難である。

そこで、本研究では印加電圧波形が液晶アクチュエータの駆動方向に及ぼす影響を解明し、無パターン電極下で印加電圧波形の制御のみによる前進後退駆動制御を目指す。

図1に液晶アクチュエータの駆動原理を示す。図1の左図は2枚の平板間の液晶にパルス波電場を印加した場合の分子配向と背流を表している。一方、右図は電場を解放した場合の分子配向と背流を表している。電場印加時と解放時では液晶分子の回転方向が異なっているため、背流の方向も異なる。よって、電場印加時を前進方向とすると電場解放時は後退方向に駆動する。このように、前進と後退駆動を繰り返しながら移動量の差で前進駆動している。したがって、後退駆動量が前進駆動量を上回り後退駆動する印加電圧条件が存在すれば複雑な電極と配向のパターニング無しで2方向駆動制御が可能となる。そこで、印加電圧波形をパラメータとし数値計算を行い、印加電圧波形が駆動方向に及ぼす影響を明らかにした後、液晶アクチュエータの前進・後退駆動制御を実現する。

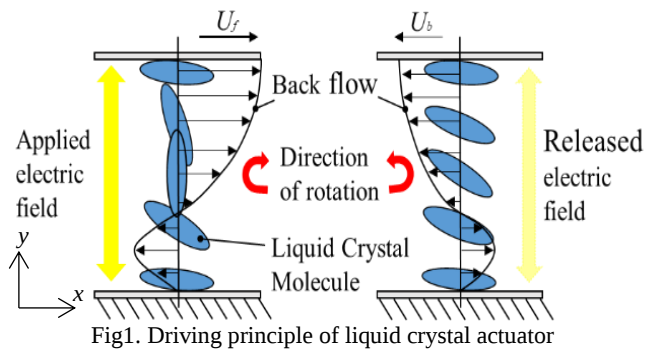


Fig1. Driving principle of liquid crystal actuator

2. 数値計算による液晶アクチュエータの駆動解析

2.1 計算方法

平行平板間の液晶に電場を印加した際の背流と上部平板の運動を連成問題として解くことで液晶アクチュエータの駆動シミュレーションを行う。

液晶流動の計算には、Leslie-Ericksen 理論を用いる。速度場およびディレクタ場の支配方程式を以下に示す。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} \cdot (\nabla \mathbf{n})^T + \alpha_1 \mathbf{n} \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} + \alpha_2 \mathbf{n} \mathbf{N} + \alpha_3 \mathbf{N} \mathbf{n} + \alpha_4 \mathbf{A} + \alpha_5 \mathbf{n} \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} + \alpha_6 \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \mathbf{n} \right\} \quad (2)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{n} \times \left\{ \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} + (\alpha_3 - \alpha_2) \mathbf{N} + (\alpha_3 + \alpha_2) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は速度ベクトル、 ρ は液晶の密度、 p は圧力、 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は Leslie 粘度係数、 $\mathbf{n}$ は局所的な液晶分子の配向を表す単位ベクトルであるディレクタ、 $\mathbf{A}$ は変形速度テンソル、 $\mathbf{N}$ はディレクタ流体の相対角速度ベクトル、 $\Delta \varepsilon$ は誘電率異方性、 $\mathbf{E}$ は電場ベクトルである。また、 F はディレクタ場の歪みによって生じる自由エネルギー密度である。上部平板の運動方程式を以下に示す。

$$m \frac{dU}{dt} = \tau_w S - \text{sgn}(U) \mu m g \quad (4)$$

上式の m は上部平板の質量、 U は上部平板の駆動速度、 τ_w は液晶が上部平板に及ぼすせん断応力、 S は上部平板の面積、 μ は摩擦係数である。

図2に印加電圧波形を示す。先行研究ではパルス波を印加していたが本研究ではのこぎり波を用いる。のこぎり波を用いる理由は前進駆動における分子の回転速度を抑制し、駆動量を小さくすることで、前進駆動量を後退駆動量以下にするためである。

図3に計算モデルおよび座標系を示す。配向処理を施した平板間に液晶を充填し、 y 軸方向に電場を印加した時の平板間隔に対して、平板は十分に広いため y 軸方向の1次元モデル化を行う。計算条件として最大電圧値 $V=10\text{V}$ 、平行平板間隔 $H=10\mu\text{m}$ 、duty 比 $D=10 \sim 100\%$ 、周波数 $f=10 \sim 200\text{Hz}$ ののこぎり波を印加した場合の数値シミュレーションを行った。液晶の物性値には4-Cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB) の値を使用する。

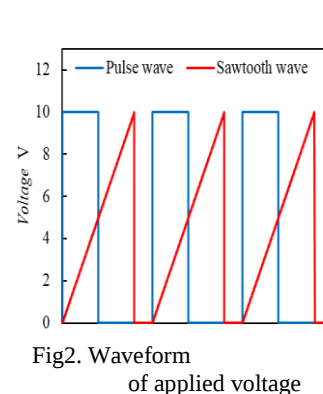


Fig2. Waveform of applied voltage

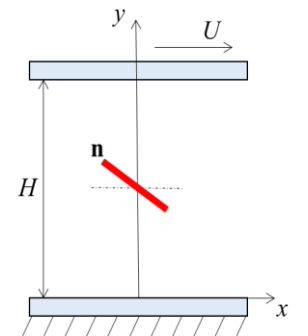


Fig3. Calculating area and coordinate system

2.2 計算結果および考察

図 4 は液晶アクチュエータにのこぎり波($V=10\text{V}$, $D=10\sim 100\%$, $f=10\sim 200\text{Hz}$)を印加した時の上部平板の速度を, 正の値を前進駆動方向速度, 負の値を後退駆動方向速度としてカラーバーで表し, $U=0\mu\text{m/s}$ を曲線で示したものである.

低 duty 比では前進駆動し, duty 比が増加するにつれて平均速度は低下している. また, $70\sim 80\%$ あたりで後退駆動に移行している. これは, 低 duty 比では電場の時間変化が大きく, 分子の回転速度が大きいため前進駆動の背流が増加していることに起因すると考えられる. 一方, 高 duty 比では電場の時間変化が緩やかであり, 前進駆動の背流が減少したことにより, 後退駆動量が前進駆動量を上回り, 後退駆動する. 後退駆動領域において平均速度は周波数に対して極小値を持ち, $30\sim 50\text{Hz}$ あたりで最小となる.

$f\geq 20\text{Hz}$ の領域では, duty 比の変化のみで駆動方向の制御が可能である. 一方, $D\geq 70\%$ では, 周波数の変化のみで駆動方向の制御が実現できる.

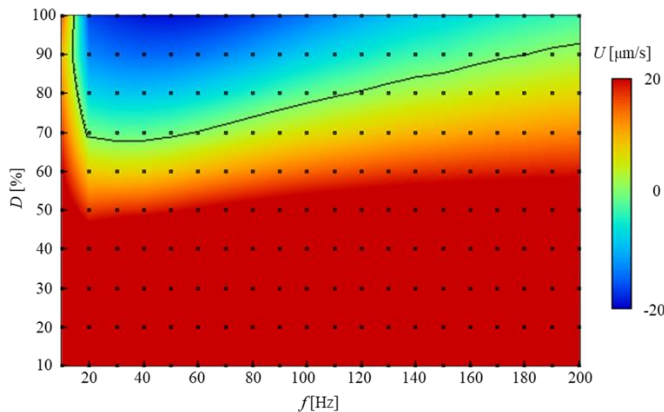


Fig.4 Influence of duty and frequency on average speed

3. 実験による液晶アクチュエータの2方向制御の実証

3.1 実験方法

図 5 に本実験に用いた液晶アクチュエータの概要を示す. ガラス平板には ITO 透明電極膜が成膜され, その上から液晶分子を配向させるための水平配向膜が成膜されている. 上部平板には銅線から水滴を介して, ファンクションジェネレータが接続されている. 作成した液晶セルを顕微鏡に固定し, 上部平板の駆動の様子を動画撮影する. 液晶材料は数値シミュレーションと同様に, 5CB である.

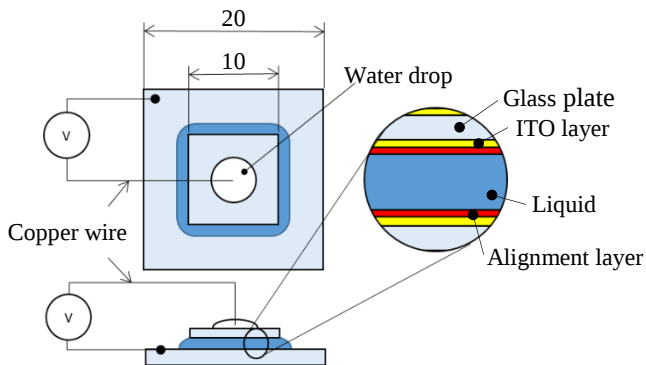


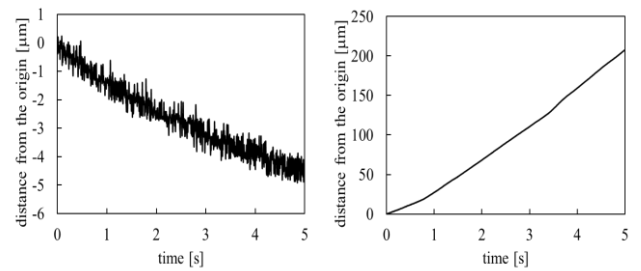
Fig.5 Liquid crystal cell in experiment

3.2 実験結果および考察

図 6(a)にのこぎり波($V=10\text{V}$, $D=100\%$, $f=100\text{Hz}$)電場を印加した場合の上部平板位置の時間変化を示す. $D=100\%$ では上部平板は後退駆動を示し平均速度は $-1.81\mu\text{m/s}$ である. 数値計算より速度が低いのは, 計算では考慮されていない上部平板周りの界面の影響によると考えられる.

図 6(b)にのこぎり波($V=10\text{V}$, $D=10\%$, $f=100\text{Hz}$) 電場を印加した時の上部平板位置の時間変化を示す. $D=10\%$ では上部平板は前進駆動を示し, 平均速度は $41.5\mu\text{m/s}$ である.

図 7 に前進駆動にのこぎり波($V=10\text{V}$, $D=10\%$, $f=100\text{Hz}$)と後退駆動にのこぎり波($V=10\text{V}$, $D=100\%$, $f=100\text{Hz}$)を用いて 2 方向駆動を行った時の上部平板位置の時間変化を示す. duty 比の切り替えに応じて上部平板が前進および後退を繰り返している. すなわち, 前進と後退を印加電圧波形の duty 比のみで切り替え可能であることを実証した. 前進駆動の平均速度は $43.8\mu\text{m/s}$, 後退駆動の平均速度は $-19.6\mu\text{m/s}$ となった.



(a) $D=100\%$ (b) $D=10\%$
Fig.6 Driving the liquid crystal actuator in the experiment

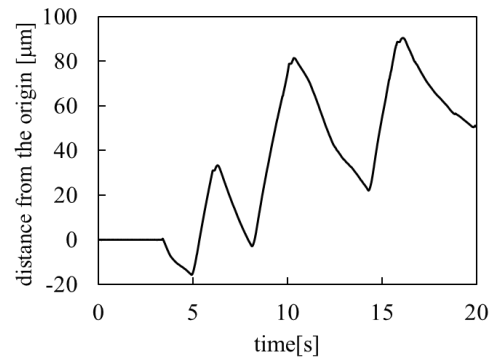


Fig.7 Two-way drive of liquid crystal actuator in experiment

4. 結言

本研究では印加電圧波形をパラメータとし数値計算を行い, 印加電圧波形が駆動方向に及ぼす影響を明らかにした後, 液晶アクチュエータの前進・後退駆動を試みた.

数値シミュレーションでは, 高 duty 比では後退駆動, 低 duty 比では前進駆動することを明らかにした. また, 平均速度は周波数 $f=40\text{Hz}$ あたりで極小値を持つことを明らかにし, 周波数においても駆動方向制御の可能性を見出した.

実験では, 液晶アクチュエータの前進・後退駆動制御を行い, 印加電圧波形の duty 比によって前進駆動と後退駆動の制御が可能であることを実証した.

参考文献

- (1) 蝶野成臣, 辻知宏, “液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (第 1 報, 流動の発生とそのメカニズム)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72(2006), pp.656-661.
- (2) 蝶野成臣, 辻知宏, “液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (第 5 報, 平板駆動の数値計算)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77(2011), pp.1758-1766.
- (3) 辻知宏, 蝶野成臣, “液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (第 6 報, 駆動方向制御)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 81(2015), p.14-006.