

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6207395号  
(P6207395)

(45) 発行日 平成29年10月4日(2017. 10. 4)

(24) 登録日 平成29年9月15日(2017. 9. 15)

(51) Int.Cl.

F I

H O 2 N 11/00 (2006.01)

H O 2 N 11/00

Z

請求項の数 26 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2013-534847 (P2013-534847)  
 (86) (22) 出願日 平成23年10月18日(2011. 10. 18)  
 (65) 公表番号 特表2013-543365 (P2013-543365A)  
 (43) 公表日 平成25年11月28日(2013. 11. 28)  
 (86) 国際出願番号 PCT/NZ2011/000214  
 (87) 国際公開番号 W02012/053906  
 (87) 国際公開日 平成24年4月26日(2012. 4. 26)  
 審査請求日 平成26年10月20日(2014. 10. 20)  
 (31) 優先権主張番号 592131  
 (32) 優先日 平成23年4月7日(2011. 4. 7)  
 (33) 優先権主張国 ニュージーランド(NZ)  
 (31) 優先権主張番号 588641  
 (32) 優先日 平成22年10月18日(2010. 10. 18)  
 (33) 優先権主張国 ニュージーランド(NZ)

(73) 特許権者 504448092  
 オークランド ユニサービシズ リミテッ  
 ド  
 AUCKLAND UNISERVICE  
 S LIMITED  
 ニュー・ジーランド、オークランド、シモ  
 ンズ ストリート 70、レベル 10

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 平面近似を使用した誘電エラストマーの自己検知

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

誘電エラストマー（DE）の物理的状態の少なくとも1つのフィードバック・パラメータを推定する方法であって、

小規模振動を前記DEの電極間の電圧差に導入するステップと、

一定期間に亘って、前記DEの両端の電位差および前記DEを通る直列電流を測定するステップと、

直交軸として定義した際の前記測定から導き出されたデータを介して、最良適合平面の係数から、1つまたは複数のフィードバック・パラメータを推定するステップと、を含む方法。

【請求項 2】

前記1つまたは複数のフィードバック・パラメータは、前記DEの静電容量を含み、前記静電容量は前記最良適合平面の第1の係数によって近似される、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

前記DEの前記静電容量を前記DEの前記物理的状態に関連付けるステップをさらに含む、請求項2に記載の方法。

【請求項 4】

前記1つまたは複数のフィードバック・パラメータは、前記DEを通る漏れ電流を含み、前記漏れ電流は、前記最良適合平面の第2の係数から推定される、請求項1乃至3のい

ずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

前記漏れ電流を監視するとともに、前記漏れ電流を制限するために前記 D E への入力を制御するステップをさらに含む、請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記 D E の両端の前記電位差および前記 D E を通る直列電流が測定される前記一定期間は、前記 D E の機械的および電氣的時定数に比して短い、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

1 つまたは複数のフィードバック・パラメータを前記最良適合平面の係数から推定する前記ステップは、前記測定から導き出された前記データの回帰分析を実行することを含む、請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の方法。

10

【請求項 8】

前記測定から導き出された前記データは、前記 D E の両端の電位差、前記 D E を通る直列電流、前記 D E に供給される電荷、および時間を含み、前記最良適合平面は超平面を含む、請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記 1 つまたは複数のフィードバック・パラメータは、前記 D E の等価直列抵抗を含み、前記等価直列抵抗は、前記最良適合平面の第 3 の係数から推定される、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

20

前記等価直列抵抗は、前記最良適合平面の前記第 3 の係数を、前記 D E の静電容量で除することによって近似される、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記漏れ電流は、前記最良適合平面の前記第 2 の係数から、前記 D E の静電容量の変化率と前記 D E の等価直列抵抗の変化率との公称相乗効果を減じることにより、前記第 2 の係数から推定される、請求項 4 に従属する場合における請求項 8 乃至 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記測定から導き出された前記データは、前記 D E の容量性構成要素の両端の電位差および前記 D E に一定期間に亘って供給された電荷を含む、請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 13】

前記 D E の前記容量性構成要素の両端の前記電位差は、前記 D E の等価直列抵抗 ( E S R ) の両端の電位差を、前記 D E の両端の前記電位差から減じることによって推定される、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記 D E の前記 E S R は、  
パルス幅変調 ( P W M ) 周期的作動信号を前記 D E に供給するステップと、  
前記 D E の両端の電圧のステップ変化、および前記 P W M 周期的作動信号の移行において前記 D E を通る電流の前記ステップ変化の大きさを測定するステップと、  
前記 D E の両端の電圧の前記ステップ変化を、前記 D E を通る電流の前記ステップ変化で除することによって前記 E S R を推定するステップと、  
前記推定された E S R の時刻歴を記録するステップと、  
時間に関する E S R の近似を、前記推定された E S R の前記記録された時刻歴から導き出すステップであって、それにより前記近似を使用して、前記 P W M 作動信号の移行の間  
の前記 E S R を推定するステップと、によって推定される、請求項 13 に記載の方法。

40

【請求項 15】

時間、前記 D E の前記容量性構成要素の両端の電位差、および前記 D E に供給された電荷は、それぞれ直交 x 軸、y 軸、および z 軸と定義される、請求項 12 乃至 14 のいずれか一項に記載の方法。

50

## 【請求項 16】

前記漏れ電流は、前記最良適合平面の前記第2の係数から前記DEの前記静電容量の変化率と前記DEの前記容量性構成要素の両端の前記電位差との積を減じることにより、前記第2の係数から推定される、最終的に請求項4に従属する場合における請求項12乃至15のいずれか一項に記載の方法。

## 【請求項 17】

前記DEに供給された前記電荷は、時間に関する前記DEを通る前記直列電流を積分することによって導き出される、請求項8乃至16のいずれか一項に記載の方法。

## 【請求項 18】

前記DEは、誘電エラストマー・アクチュエータ(DEA)を備え、前記方法は、前記フィードバック・パラメータに基づいて前記DEAの作動を制御するステップをさらに含み、それによって閉ループフィードバック制御システムを形成する、請求項1乃至17のいずれか一項に記載の方法。

10

## 【請求項 19】

前記DEAの必要とされる状態を示す入力信号を受信するステップと、

前記状態が、前記必要とされる状態に実質的に一致するように、前記入力信号と前記DEAの前記状態の両方に応答する1つまたは複数のシステム入力を調節するステップと、をさらに含む、請求項18に記載の方法。

## 【請求項 20】

1つまたは複数のフィードバック・パラメータを推定する前記ステップは、前記データを介して前記最良適合平面のための方程式を導き出すことを含む、請求項1に記載の方法。

20

## 【請求項 21】

誘電エラストマー(DE)システムであって、

エラストマー膜によって分離された1対の電極を含むDEと、

小規模電圧振動を前記DEに提供するように適合された給電手段と、

前記DEの両端の電位差および前記DEを通る直列電流を測定するための測定手段と、

前記測定手段に通信可能に結合された演算手段とを含み、前記演算手段は、所定の期間に亘って、直交軸として定義した際の前記測定から導き出されたデータを介して、最良適合平面の係数から、1つまたは複数のフィードバック・パラメータを推定するように適合されている、システム。

30

## 【請求項 22】

前記測定手段は、前記所定の期間の周波数より高いサンプリング周波数を有する、請求項21に記載のシステム。

## 【請求項 23】

前記演算手段は、前記DEの必要とされる状態を示す入力信号を受信し、かつ前記フィードバック・パラメータに基づいて、前記DEの閉ループフィードバック制御を提供するために、1つまたは複数のシステム入力を制御するように、さらに適合されている、請求項21に記載のシステム。

## 【請求項 24】

前記演算手段は、前記係数を推定するために回帰分析を実行するように適合されている、請求項21乃至23のいずれか一項に記載のシステム。

40

## 【請求項 25】

前記フィードバック・パラメータは、前記DEの静電容量、等価直列抵抗および/または漏れ電流の1つまたは複数の含む、請求項21乃至24のいずれか一項に記載のシステム。

## 【請求項 26】

前記演算手段は、前記データに最良に適合する平面のための方程式を導き出し、かつ前記平面のための方程式の係数から1つまたは複数のフィードバック・パラメータを導き出すことによって、1つまたは複数のフィードバック・パラメータを推定するように適合されている、請求項21乃至25のいずれか一項に記載のシステム。

50

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、誘電エラストマー（DE）の電気的パラメータを検知する方法および装置に関する。より詳細には、本発明は、DEの電気的パラメータを動的に推定し、DEの状態の推定をそれらのパラメータから導き出すことによる自己検知に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

誘電エラストマー（DE）を使用して、電気的エネルギーを機械的エネルギーに変換でき、または逆も同様である。DEは、アクチュエータ、発電器、および/またはセンサとして使用することができる。

## 【0003】

図1（a）および1（b）を参照すると、DE（概して10で示される）は、通常、柔軟電極12の間に提供される、容量を圧縮できない誘電エラストマー膜11を備える。

## 【0004】

誘電エラストマー・アクチュエータ（DEA）は、電圧差が、たとえば、「Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation」（Pelrine R.E.、Kornbluh R.D.、およびJoseph J.P.著、Sensors and Actuators, A, Physical 64（1）、77～85ページ（1998））に開示されたように、2つの電極12の両端に印加される際に、変形する。電荷は、コンデンサの手法で電極12上に蓄積し、膜の厚さ方向圧縮および面内膨張に、図1（a）の例によって示されたような休止状態または伸縮状態から、図1（b）に示された作動状態または膨張状態をもたらす静電圧が生成される。

## 【0005】

DEAの平面方向の寸法がその厚さよりはるかに大きい場合は、圧力の大きさは、以下の方程式によって定義される。式中、Pは圧力であり、 $\epsilon_r$ は誘電材料の比誘電率であり、 $\epsilon_0$ は自由空間の誘電率（ $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ）であり、Vは電圧であり、dは誘電膜厚さである。

## 【数1】

$$P = \epsilon_r \epsilon_0 \left( \frac{V}{d} \right)^2$$

## 【0006】

一方、誘電エラストマー発電器（DEG）は、機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換する。実際には、DEGは可変コンデンサであり、その静電容量は機械的歪み（すなわち膜の変形）と共に変化する。

## 【0007】

DEGは、その中に保管された電位エネルギーを増加することにより、電気的エネルギーを発生する。これを達成するためのステップは、図2に図式的に示されている。図2の頂部から開始すると、機械的エネルギー20は、まずそれを伸張することにより、DEG 21に印加される。これは、電極22の平面膨張および膜23の直交圧縮を引き起こし、静電容量を増加させる。次いで電気的エネルギー24は、対向する電極22が逆帯電になるように、電源（図示せず）から帯電（またはブライミング）させることにより、DEGに投入される。DEGを弛緩すると、対向する電極22上の逆帯電（+および-）を離れさせることにより、またその平面縮小に起因して互いに接近する各電極22上に同じ帯電をさせることにより、機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換する。電気的エネルギー24が抽出され、サイクルを繰り返す。

## 【0008】

誘電エラストマーは、別法として、または追加として、センサとして使用されてもよい。静電容量、電極抵抗、および誘電膜の等価並列抵抗などの、誘電エラストマーセンサの電気特性は、たとえば、機械的変形またはDEの作動環境の変化などの、外部刺激にตอบสนองして変化する。したがって、DEの電気的パラメータの変化を使用して、フィードバック情報を収集することができる。

## 【0009】

DEA、DEG、およびDEセンサの多くの実用的な適用に対して、検知および制御目的でDEAの瞬間状態に関するフィードバックを得ることが、概して必要であるか、または少なくとも好ましい。DEAおよびDEGに対して、それらを個々の剛質の歪み、変位、速度または加速度センサに直接結合すると、必然的にデバイスの費用および質量が増加し、このような戦略が運動学的に抑圧された構造の一部である、従来の剛質のデバイスに有効である一方、DEA/DEGの動きを不必要に抑制する。同様に、センサをDEが連結される剛体に取付けると、機械出力に関する有益なフィードバックを提供することがあるが、DE自体の電気機械の状態に関する制限された情報が提供される。したがって、DE自体をセンサとして使用し、検知を作動および/または発電と組み合わせることが重要であり、以下「自己検知」機能と呼ぶ。

## 【0010】

DEの静電容量の変化を、DEの物理的形状の変化に関連付けることは可能である。従来技術における自己検知効果は、検知を作動に組み合わせることに焦点を合わせていた。「An adaptive control method for dielectric elastomer devices」(Todd A. Gisby、Emilio P. Calius、Shane Xie、およびIain A. Anderson著、SPIE議事録、2008)は、DEAの状態を判定し、それによっていくらかのフィードバックを提供するために、電極間の静電容量に基づいた自己検知の使用を開示している。同様の方法は、たとえば、「Control system design for a dielectric elastomer actuator: The sensory subsystem」(Toth, L. A. およびA. A. Goldenberg著、SPIEの議事録、2002)、「Capacitive extensometry for transient strain analysis of dielectric elastomer actuators」(Keplinger, C.、Kaltenbrunner, M.、Arnold, N.、およびBauer, S.著、Applied Physics Letters、2008)、ならびに「A self-sensing dielectric elastomer actuator」(Jung, K.、K. J. Kim、およびH. R. Choi著、Sensors and Actuators A: Physical、2008)によって開示されている。

## 【0011】

「System and Method for Dynamic Self-Sensing of Dielectric Elastomer Actuators」という名称の国際特許公開第WO2010/095960号は、DEAの静電容量の推定を、DEAの静電容量の両端の電位差、該電位差の変化率、およびDEAを通る電流から導き出すことにより、自己検知の改善された方法およびシステムを開示している。静電容量から、DEAの電荷および物理的状態の推定を導き出すことができる。また、誘電膜を通る漏れ電流の推定を導き出すことも可能である。

## 【0012】

しかし、このことおよび従来技術の他の自己検知方法は、通常1つまたは複数の不利益を有する。これらは、DEが静止している(すなわち、外力によって引き起こされたいかなる摂動も受けない)、漏れ電流が極めてわずかである、または作動速度が低い場合などの、ある種の状況下のみで正確である推定を含むことがある。別法として、または追加と

10

20

30

40

50

して、必ずしも当てはまるとは限らない、他の仮定に基づいた推定を得る従来技術の方法および/または装置は、携帯使用のために設計されたシステムにおいて実用的な実装に適切でなく、騒音の影響を受けやすく、かつ/または不必要に複雑な、大量の、もしくはプロセス集約的な、実行されるべき計算を必要とする

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

従来技術の1つまたは複数の欠点を克服する、または少なくとも改善する、誘電エラストマー・アクチュエータまたは発電器自己検知もしくは誘電エラストマーセンサのための方法および装置を提供すること、あるいは代替として一般に有益な選択を少なくとも提供することが、本発明の目的である。

10

【0014】

本発明のさらに別の目的は、以下の説明から明らかになる。

【課題を解決するための手段】

【0015】

一態様では、本発明は、広義では、誘電エラストマー（DE）の状態を推定する方法であると言われることがあり、方法は、

小規模振動をDEの電極間の電圧差に導入するステップと、

一定期間に亘って、DEの両端の電位差およびDEを通る直列電流を測定するステップと、

20

直交軸として画定される際に、前記測定から導き出されたデータを通して、最良適合平面のための方程式を導き出すステップと、

1つまたは複数のフィードバック・パラメータを平面方程式の係数から導き出すステップと、を含む。

【0016】

好ましくは、フィードバック・パラメータは、DEの静電容量を含み、静電容量は平面方程式の第1の係数によって近似する。

【0017】

好ましくは、第1の係数は、平面方程式の電圧可変の係数である。

【0018】

好ましくは、フィードバック・パラメータは、DEを通る漏れ電流をさらに含み、漏れ電流は、平面方程式の第2の係数から導き出される。

30

【0019】

好ましくは、第2の係数は、平面方程式の時間変数の係数である。

【0020】

好ましくは、DEの両端の電位差およびDEを通る直列電流が測定される期間は、DEシステムの機械的および電氣的時定数に比して短い。

【0021】

好ましくは、前記期間は、小規模振動の期間に等しい、またはそれより長い。

【0022】

好ましくは、最良適合平面のための方程式を導き出すステップは、測定から導き出されたデータの回帰分析を実行することを含む。

40

【0023】

好ましくは、最良適合平面のための方程式を導き出すステップは、線形方程式の組を解くことを含む。

【0024】

好ましくは、測定から導き出されたデータは、DEの両端の電位差、DEを通る直列電流、DEに供給される電荷、および時間を含み、最良適合平面は超平面を含む。

【0025】

好ましくは、フィードバック・パラメータは、DEの等価直列抵抗をさらに含み、等価

50

直列抵抗は、超平面方程式の第3の係数から導き出される。

【0026】

好ましくは、第3の係数は、超平面方程式の電流変数の係数である。

【0027】

好ましくは、等価直列抵抗は、超平面方程式の第3の係数を、DEの静電容量で除することによって近似する。

【0028】

好ましくは、漏れ電流は、DEの静電容量の変化率とDEの等価直列抵抗の変化率の公称相乗効果を第2の係数から減じることにより、平面方程式の第2の係数から導き出される。

10

【0029】

好ましくは、漏れ電流は、静電容量の時刻歴およびDEの等価直列抵抗を使用して導き出される。

【0030】

好ましくは、DEの漏れ電流の近似は、本発明の方法に従って得た、静電容量および等価直列抵抗の近似を使用して導き出される。

【0031】

好ましくは、平面方程式の第1の係数は、DEの両端の電位差に関してDEに供給された電荷の偏導関数に対応する。

【0032】

20

好ましくは、第2の係数は、時間に関してDEに供給された電荷の偏導関数に対応する。

【0033】

好ましくは、第3の係数は、DEを通る直列電流に関してDEに供給された電荷の偏導関数に対応する。

【0034】

好ましくは、測定から導き出されたデータは、DEの容量性構成要素の両端の電位差、DEに供給された電荷、および時間を含む。

【0035】

好ましくは、前記時間、DEの容量性構成要素の両端の電位差、およびDEに供給された電荷は、それぞれ直交するx軸、y軸、およびz軸として定義される。

30

【0036】

好ましくは、漏れ電流は、DEの静電容量の変化率とDEの容量性構成要素の両端の電位差との積を、第2の係数から減じることにより、平面方程式の第2の係数から導き出される。

【0037】

好ましくは、DEの静電容量の変化率は、本発明の方法に従って獲得した静電容量の時刻歴を使用して導き出される。

【0038】

40

好ましくは、方法は、  
パルス幅変調(PWM)周期的作動信号をDEに供給することと、  
DEの両端の電圧のステップ変化、およびPWM作動信号の移行においてDEを通る電流のステップ変化を測定することと、  
DEの両端の電圧のステップ変化を、DEを通る電流のステップ変化で除することと、  
により、DEの等価直列抵抗(ESR)を推定することをさらに含む。

【0039】

好ましくは、DEのESRを推定することは、  
推定されたESRの時刻歴を記録するステップと、  
時間に関するESRの近似を、推定されたESRの記録された時刻歴から導き出すこと  
であって、それにより近似を使用して、PWM作動信号の移行の間のESRを推定するこ

50

とができる、導き出すステップと、をさらに含む。

【0040】

好ましくは、D Eの両端の電位差は、D Eの正極と負極の電圧差を判定することによって測定される。

【0041】

好ましくは、D Eに供給された電荷は、D Eを通る直列電流を時間に関して積分することによって導き出される。

【0042】

好ましくは、方法は、D Eの静電容量をD Eの物理的状態に関連付けるステップをさらに含む。これは、たとえば、D Eの平面面積、厚さ、および/または寸法の1つまたは複数の推定を含んでもよい。

10

【0043】

好ましくは、方法は、漏れ電流を監視するステップ、および漏れ電流を制限するためにD Eシステムへの流入を制御するステップをさらに含む。

【0044】

好ましくは、方法は、D Eの等価直列抵抗をD Eの歪みに関連付けるステップをさらに含む。

【0045】

好ましくは、方法は、フィードバック・パラメータに基づいてD E Aの作動を制御し、それによって閉ループフィードバック制御システムを形成するステップをさらに含む。

20

【0046】

さらなる態様では、本発明は、広義では、誘電エラストマー(D E)を制御する方法であると言われてもよく、方法は、

D Eの必要とされる状態を示す入力信号を受信するステップと、

前述の記述のうちの任意の1つの方法に従って、D Eの状態の推定を得るステップと、推定された状態が、必要とされる状態に実質的に一致するように、入力信号と推定の両方に応答する1つまたは複数のシステム入力を調節するステップと、を含む。

【0047】

さらなる態様では、本発明は、広義では、前述の記述のうちの任意の1つの方法を実行するように適合されたシステムであると言われてもよい。

30

【0048】

またさらなる態様では、本発明は、広義では、

エラストマー膜によって分離された1対の電極を備える誘電エラストマー(D E)と、小規模電圧振動をD Eに供給するように適合された給電手段と、

D Eの両端の電位差およびD Eを通る直列電流を測定するための測定手段と、

測定手段に通信可能に結合する演算手段であって、演算手段は、所定の期間に亘って、D Eの電気特性に関する測定データから導き出すように、データに最良に適合する平面に対する方程式を導き出すように、かつ平面方程式の係数から1つまたは複数のフィードバック・パラメータを導き出すように適合される、演算手段と、を備えるシステムであると言われてもよい。

40

【0049】

好ましくは、測定手段は、所定の期間の周波数より高いサンプリング周波数を有する。

【0050】

好ましくは、演算手段は、D Eの必要とされる状態を示す入力信号を受信するように、およびフィードバック・パラメータに基づいてD Eの閉ループフィードバック制御を提供するために、1つまたは複数のシステム入力を制御するように、さらに適合される。

【0051】

好ましくは、演算手段は、記憶されたデータ上で回帰分析を実行し、それによって直交軸として定義された際に、記憶されたデータに最良に適合する超平面に対する方程式を導き出すように適合される。

50



## 【0052】

好ましくは、フィードバック・パラメータは、DEの静電容量、等価直列抵抗および／または漏れ電流のうちの1つまたは複数を含む。

## 【0053】

好ましくは、演算手段は、フィードバック・パラメータを記録するようにさらに適合される。

## 【0054】

その新規の態様すべてにおいて考慮されるべき本発明のさらなる態様は、以下の説明から明らかになるう。

## 【0055】

次に本発明の多数の実施形態を、図を参照して例示として説明する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0056】

【図1】(a)休止した状態および(b)膨張した状態を示す、従来技術による誘電エラストマー(DE)を示す図である。

【図2】従来技術による誘電エラストマー発電器を使用して、電気の発生を示す工程図である。

【図3】四次元空間における超平面の三次元図である。

【図4】DEの電気の集中回路モデルを示す図である。

【図5】本発明による、単純な自己検知回路の一部としてのDEAの概略図である。

【図6】DEAの両端の電圧( $V_{DEA}$ )に基づくESRの効果を示す図である。

【図7】DEAを通る直列電流( $i_s$ )を示す図である。

【図8】(a)500pF、(b)1000pF、および(c)1500pFのシミュレーションした静電容量により、本発明の第2の実施形態に従って導き出された、適合した平面上の静電容量の影響を示す図である。

【図9】(a)-500%/s、(b)0%/s、および(c)500%/sのdC/dt値で、本発明の第2の実施形態に従って導き出された、適合平面上の非ゼロdC/dtの影響を示す図である。

【図10】(a)0の漏れ電流(すなわち、無限大のEPR)、および(b)250Mの等価並列抵抗(EPR)で、本発明の第2の実施形態に従って導き出された、適合平面上の漏れ電流の影響を示す図である。

【図11】DEAの静電容量と並列に250MのEPRと組み合わせられた、(a)負の値のdC/dtおよび0の漏れ電流、ならびに(b)同じ負の値のdC/dtで、本発明の第2の実施形態に従って導き出された、適合平面上のdC/dtに対して、漏れ電流と負の値の相乗効果を示す図である。

【図12】DEAの静電容量と並列に250MのEPRと組み合わせられた、(a)正の値のdC/dtおよび0の漏れ電流、ならびに(b)同じ正の値のdC/dtで、本発明の第2の実施形態に従って導き出された、適合平面上のdC/dtに対する、漏れ電流と正の値との相乗効果を示す図である。

【図13】本発明の方法の第2の実施形態を実験的に立証するために使用される、拡大ドットDEAを図式的に示す図である。

【図14】等価直列抵抗(ESR)およびEPRの値の範囲に対する、推定されたESRおよび実際のESRのグラフであり、推定された値は、本発明の第2の実施形態に従って導き出される。

【図15】ESRおよびEPRの値の範囲に対する、本発明の第2の実施形態を使用して推定された漏れ電流の電圧に対するグラフである。

【図16】ビデオ伸び計によって測定された静電容量に関して、本発明の自己検知方法の第2の例示的实施形態によって推定された、試験DEAの静電容量の比較を示す図である。

【図17】ビデオ伸び計によって推定された静電容量に対して、プロットされた自己検知

10

20

30

40

50

する方法の第2の実施形態によって推定された、DEAの静電容量を示す図である。

【図18】DEAの推定された静電容量が、図17に示された関係に従って拡大された後、ビデオ伸び計によって測定された静電容量に対して、プロットされた自己検知する方法の第2の実施形態によって推定された、DEAの静電容量を示す図である。

【図19】本発明の自己検知する方法を実施するための例示的システムの概略ブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0057】

静電容量、誘電膜を通る漏れ電流、および電極の抵抗のそれぞれは、アクチュエータ（DEA）、発電器（DEG）、またはセンサのいずれかとして使用される場合でも、誘電エラストマー（DE）に対して潜在的に重要なフィードバック・パラメータである。

【0058】

静電容量は、電極の瞬時面積および誘電膜の厚さに関連付けることができる。また、評価される誘電内の電界を推定することも可能であり、任意の時点でDE上に保存された電荷を測定するために必須である。漏れ電流は、DEの全体効率の指標であり、状態監視システムの一部として使用することができる。電極の抵抗（等価直列抵抗、ESR）は、DEが変形するにつれて変化し、したがって電極は歪みゲージと類似の手法で作用する。

【0059】

したがって、上記のフィードバック・パラメータの1つまたは複数の認識は、DEAの状態を判定または推定するために望ましい。DEAの「状態」は、たとえば、DEAのサイズ、形状、面積、厚さ、寸法、変形、電界、電荷、効果、および/または状態を指してもよい。

【0060】

上記のフィードバック・パラメータ（静電容量、漏れ電流、および等価直列抵抗）のそれぞれは、その他によって直接にまたは間接に影響を与えられ、したがってDEが電気的および機械的刺激を受けるにつれて、動的に変化する。歪みと抵抗の関係が、たとえば経時的に、および歪みサイクルの数で変化することは、珍しいことではない。しかし、残念ながら、関心のパラメータを直接測定するのは容易ではない。

【0061】

従来技術によれば、自己検知は、通常、DEAの静電容量および電極の等価直列抵抗（ESR）を推定することを制限されてきた。この自己検知は、概して作動信号の上に高周波数で低振動の交流信号を重ね合わせることによって達成されてきた。高周波数信号の利得は、それが一旦DEAを通過すると、静電容量に比例し、位相遅延をESRに関連付ける。しかし、携帯デバイスに対して、DEAのための作動信号を発生するために使用される低電力DC-DCコンバータは、通常、出力を修正し、高周波数信号を再生することは困難である。さらに、このような手法は、電源が多重DEAを独立して制御するために使用されることを妨げ、したがって、それぞれの自由度は、その独自の電源を必要とすることになる。作動が断続的である場合、または正常の作動が、同時に作動される自由度のすべてを必要としない場合、専用の電源は容量および重量の非効率な使用である。

【0062】

本発明は、任意のまたはすべてのこれらの重要なフィードバック・パラメータ（静電容量、漏れ電流、およびESR）の推定を実質的にリアルタイムでできる、方法および装置を提供し、それによって、それらの挙動について憶測を立てる必要性を低減し、向上した制御に対してDEの状態のフィードバックの精度を向上させ、かつ/または広範囲の条件に亘って監視する。

【0063】

#### 第1の例示的实施形態

例示として以下に記載された本発明の第1の実施形態では、本発明の方法は、誘電エラストマー（DE）の3つの電気特性および時間を含む、4つの変数に関するデータの導出に關与する。これらの4つの変数は、抽象四次元空間を形成する直交軸として定義され、

10

20

30

40

50

したがって、データを通る最良適合平面は、三次元超平面を含む。DEフィードバック・パラメータは、超平面に対する方程式の係数から導き出すことができる。

【0064】

超平面は、 $n$ 次元空間の $(n-1)$ 次元部分空間である。これは、単一の線形方程式により、 $n$ 次元空間の座標系の観点で記述することができる。たとえば、三次元空間では、 $z = ax + by + c$ の形の特性方程式のある二次元空間は、超平面である（式中、 $x$ 、 $y$ 、および $z$ は、三次元空間における直交軸であり、 $a$ 、 $b$ 、および $c$ は、定数である）。本明細書全体を通して、本発明の好ましい実施形態を説明する際に使用される場合、用語「超平面」は、四次元空間における三次元部分空間を指す。「超平面」の特性方程式は、 $z = ax + by + cw + d$ の形である（式中、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、および $w$ は、四次元空間における直交軸であり、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、および $d$ は、定数である）。 10

【0065】

四次元空間における三次元超平面は、容易に図示することができないが、図3は概念を示すために、四次元空間における超平面の三次元表示を提供する。超平面の $X$ 、 $Y$ 、および $Z$ 次元は、三次元図上の直交軸として示され、超平面は、第四次元（ $W$ ）に離散化された。これは、たとえば、 $X$ および $Z$ が直交軸上に示され、等高線プロット上の個別の線が $Y$ の離散値を表す、二次元等高線プロットを使用して三次元表面（直交軸として $X$ 、 $Y$ 、および $Z$ をもつ）を二次元において表示することに類似している。

【0066】

DEの電気の集中回路モデルが図4に示されている。DEを、可変抵抗と並列（DEの等価並列抵抗を表す、 $R_{EPR}$ ）の可変コンデンサ（ $C$ ）として表すことができ、またはモデル化することができ、その両方は、別の可変抵抗と直列に接続される（DEの等価直列抵抗を表す、 $R_{ESR}$ ）。 20

【0067】

容易に測定できるDEの電気特性は、全体としてDEの両端の電圧 $V_{DE}$ （すなわち、電極12の間の電位差ではなく、DEの端子間で、コンデンサ $C$ によって表される）、およびDEを通る直列電流（ $i_s$ ）である。

【0068】

コンデンサの両端の電圧（ $V_C$ ）は、方程式1によって示されるように、DEの両端の電圧（ $V_{DE}$ ）からDEを通る直列電流（ $i_s$ ）および電極のESR（ $R_{ESR}$ ）の積を減じる。 30

【数2】

$$V_C = V_{DE} - i_s R_{ESR} \quad (1)$$

【0069】

DEを通る電流（ $i_s$ ）は、容量性素子を通る電流（ $i_C$ ）とEPRを通る漏れ電流（ $i_{EPR}$ ）の和に等しい（方程式2）。

【数3】 40

$$i_s = i_C + i_{EPR} \quad (2)$$

【0070】

本発明は、繰り返し測定し、DEのある種の電気特性からデータを導き出すこと、データを通る最良適合超平面のための方程式を導き出すこと、および超平面の係数からDEのフィードバック・パラメータを導き出すことにより、静電容量（ $C$ ）、漏れ電流（DEのモデルでは、等価直列抵抗 $R_{ESR}$ を通る電流、 $i_{EPR}$ ）および等価直列抵抗 $R_{ESR}$ （ $R_{ESR}$ ）の推定を導き出す。 50

## 【 0 0 7 1 】

小規模、高周波数振動信号を使用して、D E の両端の圧力に振動を導入する際に、信号の振動成分の期間以上の期間に及ぶフィードバックデータの窓を使用して、D E フィードバック・パラメータを判定することができる。本発明は、振動信号に対するいかなる特定の波形にも限定されない。適切な波形には、これに限定されないが、たとえば、矩形波、正弦波、三角波、または鋸歯状波が含まれる。

## 【 0 0 7 2 】

方法の第 1 のステップは、電位差または D E の両端の電圧 ( $V_{DE}$ )、および短い時間窓の間に D E を通る直列電流 ( $i_s$ ) の測定を得ることならびに記録することである。時間窓は、D E の機械的および電氣的時定数に比べて短くするべきである。窓の長さを、D E の両端の電圧上に重ね合わせた、小規模振動の期間に対応するように設定することが好都合である。

10

## 【 0 0 7 3 】

D E の電圧  $V_{DE}$  および直列電流  $i_s$  の測定は、期間内の様々な時間にされる。また、後者の測定から、期間に亘る D E への電荷入力 ( $Q_{input}$ ) も、導き出すことができる (すなわち、期間に亘る直列電流  $i_s$  の積分として)、かつ記録されることができる。

## 【 0 0 7 4 】

測定は、好ましくは時間窓の周波数より実質的に高いサンプリング率でされて、各時間窓の間に複数のデータ点を与える。

## 【 0 0 7 5 】

20

D E の電氣的および機械的時定数に比べて短い、期間に亘る D E への電荷入力 ( $Q_{input}$ ) が、 $t = 0$  と  $t = t_a$  との間の D E の容量性素子を通る電流の時間に関する積分 (これは  $t = t_a$  におけるコンデンサ上の電荷  $Q_c(t_a)$  から  $t = 0$  における電荷  $Q_c(0)$  を減じたものと等価である) と、時間  $t = 0$  と  $t = t_a$  との間の漏れ電流  $i_{leak}$  の時間に関する積分  $Q_{leakage}(t_a)$  の和に等しいことを示すことができる (方程式 3)。

## 【 数 4 】

$$Q_{input}(t_a) = Q_c(t_a) - Q_c(0) + Q_{leakage}(t_a) \quad (3)$$

30

## 【 0 0 7 6 】

短期間のため、C は一次近似を使用してモデル化することが可能である、すなわち、 $dC/dt$  は実質的に一定であると仮定できる。窓の期間に対する  $V_c$  の最大振幅が、十分に小さい場合は、漏れ電流 ( $dQ_{leakage}/dt$  と等価な  $i_{leak}$ ) も実質的に一定であると仮定できる。これらの仮定を方程式 3 に適用し、C および  $V_c$  に関して電荷を表すと、方程式 4 がもたらされる。

## 【 数 5 】

$$Q_{input}(t_a) = C(t_a)V_c(t_a) - C(0)V_c(0) + \left(\frac{dQ_{leakage}}{dt}\right)t_a \quad (4)$$

40

## 【 0 0 7 7 】

方程式 4 の右辺の第 1 項内の項  $V_c$  は、E S R 依存項を含む等価項で置換されることが可能である、すなわち、 $V_c$  は  $V_{DE} - i_s R_{ESR}$  になり、方程式 5 がもたらされる。

## 【 数 6 】

$$Q_{input}(t_a) = C(t_a)V_{DE}(t_a) - C(t_a)i_s(t_a)R_{ESR}(t_a) - C(0)V_c(0) + \left(\frac{dQ_{leakage}}{dt}\right)t_a \quad (5)$$

50

## 【 0 0 7 8 】

したがって、D E の容量性構成要素の両端の電圧 ( $V_c$ ) を得る代わりに、D E 自体の両端の電圧 ( $V_{D E}$ ) を使用することができる。 $V_{D E}$  は、 $V_c$  とは異なり、容易に測定できる回路の電気特性である。

## 【 0 0 7 9 】

方程式 5 は、 $t = t_a$  である時点で D E A の電氣的パラメータ間の関係を表す。

## 【 0 0 8 0 】

$t$ 、 $V_{D E}$ 、 $i_s$ 、および  $Q_{input}$  が 4 D 空間の直交軸として定義される場合、複数の記録されたデータ点は、それらの軸に対してプロットされる際に、すべてが実質的に三次元超平面上、または三次元超平面に隣接して落ちることがわかった。多数のデータ点は、好ましくは、平面適合が十分に調整されていることを確実にするために記録される。しかし、比較的少数のデータ点 (最少でも 4 以上) は、ある種の適用においては許容できることがある。特定の適合に対する適切な数のデータ点 (したがって、測定のサンプリング率) は、当業者には明らかであろう。

## 【 0 0 8 1 】

超平面を利用可能なデータ点に首尾よく適合する重要な部分は、D E の両端の電圧に導入される振動である。帯電 / 放電振動なしに、 $Q_{input}$ 、 $V_c$ 、および  $t$  データは、4 D 空間内の線または 2 D 平面の中に落ちることになる。システムは、劣決定になることになり、したがって、すべてのデータ点を通過する独自の超平面を見出すことは不可能になることになる。これにより、平面を適合する工程が機能しなくなり、D E の電気特性の正確な判定が妨げられる。

## 【 0 0 8 2 】

超平面の係数を推定し、D E の 3 つの主要なフィードバック・パラメータすべてに関連付けることができる。たとえば、回帰を使用して、 $t$ 、 $V_{D E}$ 、 $i_s$ 、および  $Q_{input}$  に対して、記録されたデータ点を最良に表す超平面の係数 (すなわち、最良適合超平面) を見出すことができる。しかし、超平面の係数を推定する他の方法が、別法として、本発明の範囲から逸脱することなく、使用されてもよい。用語「最良適合超平面」は、本明細書で使用される場合、平面が導き出されてもよいいかなる方法によってでも、その同じ軸に沿ったデータ点の「勾配」と実質的に対応する、各軸に沿った平面の傾斜または勾配を提供される、電位差、電流、電荷、および時間の 4 D プロット内の少なくともデータ点のほとんどがその上または実質的に隣接して位置する超平面を指すに過ぎない。

## 【 0 0 8 3 】

記録されたデータ点によって形成された超平面の係数は、 $t$ 、 $i_s$ 、および  $V_{D E}$  に関して  $Q_{input}$  (方程式 5) の偏導関数と等しい。すなわち、超平面方程式の変数 ( $t$ 、 $V_{D E}$ 、 $i_s$ 、および  $Q_{input}$ ) のそれぞれに関連した係数は、それぞれの軸に沿った超平面の勾配を表す。データ点のそれぞれが超平面上に実質的に落ちることを考えると、これらの勾配は、方程式 5 の前述の偏導関数と等しく、したがって、D E のフィードバック・パラメータは、以下のように超平面の係数から導き出すことができる。

## 【 0 0 8 4 】

方程式 5 を参照すると、短期間または関連測定の窓に亘る  $dC / dt$  および  $dQ_{leakage} / dt$  と同様に、 $dR_{ESR} / dt$  は定数であると仮定することができる。項  $C(0) V_c(0)$  は定数であり、したがって偏導関数内には現れない。

## 【 0 0 8 5 】

$V_{D E}$  に関する  $Q_{input}$  の偏導関数 (超平面方程式の第 1 の係数に等しい) は、フィードバック窓の期間に亘る D E の公称静電容量であり (方程式 6 の C、明確にするために時間の添え字を省略した)、 $i_s$  に関する  $Q_{input}$  の偏導関数 (超平面方程式の第 3 の係数と呼ばれるものに等しい) を C で除すると、フィードバック窓の期間に対する電極の公称 ESR になり (方程式 7 の  $R_{ESR}$ 、明確にするために時間の添え字を省略した)、 $t$  に関する  $Q_{input}$  の偏導関数 (超平面方程式の第 2 の係数と呼ばれるものに等しい) は、静電容量の変化率、電極の ESR の変化率、および漏れ電流の公称相乗効果で

ある（方程式 8、明確にするために時間の添え字を省略した）。

【数 7】

$$\frac{\partial Q_{input}}{\partial V_{DE}} = C \quad (6)$$

【数 8】

$$\frac{\left( \frac{\partial Q_{input}}{\partial i_s} \right)}{C} = -R_{ESR} \quad (7)$$

【数 9】

$$\frac{\partial Q_{input}}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} V_{DE} - \left( \frac{\partial C}{\partial t} R_{ESR} + C \frac{\partial R_{ESR}}{\partial t} \right) i_s + \frac{\partial Q_{leakage}}{\partial t} \quad (8)$$

【0086】

したがって、DEの静電容量Cの近似または推定を、（ $Q_{input}$ 軸に対して）電圧軸 $V_{DE}$ に沿って最良適合超平面の勾配から直接導き出せる、すなわち、方程式における電圧可変の係数は、最良適合超平面を画定する。

【0087】

同様に、DEの等価直列抵抗 $R_{ESR}$ の近似は、（ $Q_{input}$ 軸に対して）直列電流 $i_s$ 軸に沿って超平面の勾配を前の近似からの静電容量Cで除することにより導き出すことができる。

【0088】

方程式 6 および 7 を使用して計算されたCおよび $R_{ESR}$ の時刻歴を使用して、 $dC/dt$ および $dR_{ESR}/dt$ のそれぞれ（両方とも実質的に定数であると仮定される）を計算でき、 $dC/dt$ および $dR_{ESR}/dt$ を使用して、方程式 8 の個々の項、および特に最終項 $dQ_{leakage}/dt$ に等しい漏れ電流 $i_{EPR}$ を同定できる。

【0089】

本発明のこの実施形態は、以下に記載された第 2 の実施形態および / または従来技術に勝るいくつかの利点を有し、以下の 1 つまたは複数を含む。

1. 超平面を適合するプロセスは、単段の数学的プロセスを使用して達成される。
2. DEの両端の電圧内の小規模振動を発生するために使用される波形上に、厳しい要件は少ない。すなわち、方法は、PWMの電源を必ずしも必要とせず、それによってハードウェア設計に関して柔軟性を増加させる。
3. 静電容量は、超平面を利用可能なデータに適合することにより直接獲得される。
4. プロセスは以下の理由によりノイズに感度が低い。
  - a. 直列電流の積分は（ $Q_{input}$ を得るために）、直列電流のフィードバックデータをローパスフィルタリングする手段として作用する。ノイズがゼロの平均値を有する場合、積分は、信号からノイズ成分を減衰するように作用する。
  - b. 利用可能なデータに平面を適合するために回帰を使用するには、利用可能なデータのすべてを使用する。これは任意の一時点からのデータ点にも起因せず、それ故、推定されたパラメータ上の疑似データ点の影響は最小に抑えられる。

【0090】

10

20

30

40

50

また、最小二乗回帰の使用により、定数  $d R_{E S R} / d t$ 、 $d C / d t$  および  $d Q_{l e a k a g e} / d t$  仮定の妥当性を評価するための機構も提供する。仮定が妥当である場合、回帰工程の残差は小さくなる。しかし、大きい残差は、1つまたは複数の仮定が満たされないことを示す。

【0091】

## 第2の例示的实施形態

本発明の方法のさらなる例示として、以下に説明される第2の実施形態によれば、方法は、誘電エラストマー (DE) の2つの電気特性および時間を含む、3つの変数に関するデータを導き出すことに関与する。これらの3つの変数は、三次元空間を形成する直交  $x$  軸、 $y$  軸、および  $z$  軸として定義され、したがって、データを通る最良適合平面は、平面を含む。

10

【0092】

本発明のこの第2の例示について、誘電エラストマー・アクチュエータ (DEA) システムに関連した方法の適用に関して、以下に説明する。しかし、方法は、誘電エラストマー発生器またはセンサに同様に適用されてもよい。

【0093】

DEAシステムは、入力電力 (作動信号) のパルス幅変調 (PWM) 制御を使用して、同時にDEAを作動し、小規模振動をDE電極間の電圧差に導入する。これにより、DEAの静電容量、誘電膜の等価並列抵抗 (EPR) を通る漏れ電流、および動的に推定される電極の等価直列抵抗 (ESR) が可能になる一方で、DEAは作動される。PWMは、デジタル・コンピュータと容易に交換が可能であり、単一電源を固定電圧に設置し、複数の独立したDEAに同時に電力を供給するために使用することが可能である。

20

【0094】

PWM信号の期間を、DEAの機械的および電氣的時定数に比して十分に小さくすることにより、信号のデューティサイクルの制御が、DEAの両端に見られる平均電圧を制御し、これは作動の程度を管理する。同時に、PWM信号の迅速なスイッチングは、小規模振動をこの電圧に導入する。したがって、この方法は、明らかに、電極の抵抗の動的变化、高電界における誘電膜の伝導性への変化、およびDEAが作動される、かつ/または緩められるにつれ、DEAの静電容量の変化率に誘導される電流の要因となる。

【0095】

30

第2の例示的实施形態の方法および装置/システムは、PWM電源を含むように開示されているが、PWMは、本発明の必須特性ではない。DEAの静電容量および漏れ電流の検知が可能になるために、重ね合わせられた高周波数振動信号を有する、振幅変調作動信号などの、任意の他の時変信号が、代替的に使用されてもよい。本発明の平面適合方法を使用して、たとえば、少なくともKeplingerらによって開示された方法などの、自己検知の多くの既存または未来の方法を拡張させる場合があることを理解されたい。しかし、PWM電源は、本発明のこの第2の例示的实施形態における多数の利点を提供する。

【0096】

第1の例示的实施形態に先に説明されたように、DEAを通る直列電流  $i_s$ 、およびDEAの正極端子と負極端子との間の電圧または電位差  $V_{DEA}$  を測定することが必要である。再度図4を参照すると、DEAを、可変抵抗 ( $R_{EPR}$ ) と並列に接続された可変コンデンサ ( $C$ ) としてモデル化することができ、その両方は、別の可変抵抗 ( $R_{ESR}$ ) と直列に接続される。

40

【0097】

DEAシステムの概略は、図5に示されており、破線の四角形内部に図4のモデルの構成要素によって表されたDEA50を有する。

【0098】

DEAシステムの電源は、好ましくは、高電圧、高速オプトカプラを介してDEAに接続された、高電圧のDC-DCコンバータである。DC-DCコンバータからPWMスイ

50

ッチを介してD E Aに流れる電流は、オプトカブラへの入力電流に比例する。したがって、D C - D Cコンバータおよびオプトカブラは、共に電流源（ $I_{source}$ ）として挙動する。P W M信号は、オプトカブラへの入力電流を制御するために使用される。30 kの固定抵抗器（ $R_s$ ）は、D E Aを通る直列電流を測定するために使用され（電圧V 1を測定し、オームの法則を適用することにより）、100 M : 120 k（それぞれ $R_{p1}$ および $R_{p2}$ ）の抵抗ラダー（電圧分配器）は、D E A 50の正極端子で電圧V 2を測定し、D E Aに対する受動放電経路を提供するために使用される。

【0099】

上述の本発明の第1の例示と異なり、この第2の例示の方法は、D E Aの容量性構成要素の両端の電位差（ $V_c$ ）、D E Aに供給される電荷（ $Q_{input}$ ）、および測定から導き出される時間（ $t$ ）についてのデータを必要とする。

10

【0100】

D Eに供給される電荷（ $Q_{input}$ ）、D Eの容量性構成要素の両端の電圧（ $V_c$ ）、および時間 $t$ を直交軸上にプロットすることにより、3 D空間内に描かれたデータに適合された2 D平面への第1の例示的实施形態の超平面を低減することが可能である。

【0101】

E S Rが著しい場合は、D E Aの両端の電位差（ $V_{DEA}$ ）からE S Rの両端の電位差（ $V_{ESR}$ ）を減じて、方程式9によって示されたように、D E Aの容量構成要素の両端の電位差（ $V_c$ ）を判定する必要がある。

【数10】

20

$$V_c = V_{DEA} - V_{ESR} \quad (9)$$

【0102】

たとえば、D Eに送達される電力が、パルス幅変調（P W M）を使用して制御される場合、等価直列抵抗 $R_{ESR}$ は、P W M信号が高い状態と低い状態との間を移行する一定時点で推定することができる。P W M信号が移行するにつれて、D Eを通る直列電流のステップ変化は、D Eの両端の電圧のステップ変化をもたらす。D Eの容量性構成要素の両端の電位差 $V_c$ は、即座に変化できないので、 $R_{ESR}$ は、D Eの両端の電圧 $V_{DE}$ のステップ変化の大きさを、P W M信号の移行で、D Eを通る直列電流 $i_s$ のステップ変化の大きさを除いたものと等しい。計算された抵抗値の時刻歴を記録することにより、時間に関して $R_{ESR}$ の $n$ 次近似を使用して、P W M移行の間の一定時点で電極抵抗を推定することができる。

30

【0103】

D E AのE S Rを検知する他の方法が、本発明の範囲を逸脱することなく、別法として使用されてもよい。たとえば、P W M入力信号のスルーレドが制限される場合、E S Rは、P W M信号の移行について2つの短期間（図6および7のパート1およびパート2）を考慮することによって、検知されることが可能である。パート1は、P W M入力信号のサイクルの開始直前に始まり、P W Mサイクルの開始時に終わる。パート2は、パート1の終了から続き、P W Mサイクルの開始時に始まり、一旦P W M入力信号がそのピーク値に達すると終わる。パート1の開始時は $t_i$ であり、パート1の終了/パート2の開始時は $t_{ref}$ であり、パート2の終了時は $t_f$ である。E S Rがごくわずかである際は、 $V_{DEA}$ は $V_c$ にほぼ等しく、 $V_{DEA}$ は、図6に示されたように（破線）、パート2の間、放電から帯電相への円滑な移送を示す。それ以外は一定であるが、やはり図6に示されたように（実線）、著しいE S Rは不連続または鋭い角を、 $t = t_{ref}$ において電圧波形に導入する。この不連続は、より明白になる、すなわち、E S Rが増加するにつれて、角はより鋭くなる。

40

【0104】

E S Rが $t_1 < t < t_2$ に対して一定であると仮定することにより、E S Rは、不連続

50



を取り除くために  $V_{DEA}$  を変換することによって推定することができる。これは、4つの曲線の適合操作の実行を必要とする。PWM信号の期間をシステムの電氣的時定数に比して短くすることによって、パート1の間にDEAを通る直列電流 ( $i_s$ ) およびDEAの両端の電位差 ( $V_{DEA}$ )、ならびにパート2の間にDEAを通る直列電流 ( $i_s$ ) は、図6および7に示されたように、ほぼ線形である (方程式10~12)。  $R_{EPR}$  および静電容量の時間に関する導関数の両方が、特定の時点で実質的に一定であると仮定すると (線形化点)、ランプ入力電流を印加することにより (すなわち、PWM入力において制限されたスルーレート)、時間次元に沿って放物線を描く  $V_{DEA}$  がもたらされる。したがって、第2次の適合は、パート2の間に  $V_{DEA}$  に必要とされる (方程式13)。

【数11】

$$i_s(Part1) = m_{i1}t + c_{i1} \quad (10)$$

10

【数12】

$$V_{DEA}(Part1) = m_{v1}t + c_{v1} \quad (11)$$

20

【数13】

$$i_s(Part2) = m_{i2}t + c_{i2} \quad (12)$$

【数14】

$$V_{DEA}(Part2) = a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (13)$$

30

【0105】

適合された曲線を方程式9に代入すると (方程式14および15をもたらす)、パート1に対する  $V_c$  の時間に関する導関数は、不連続を取り除くために、パート2に対して  $t = t_{ref}$  において  $V_c$  の時間に関する導関数と等しくなければならない。したがって、パート1および2に対して  $t = t_{ref}$  において  $V_c$  の時間に関する第1の導関数を等しくすることにより、方程式16に示された  $R_{ESR}$  に対する方程式を導き出すことができる。

【数15】

$$V_c(Part1) = (m_{v1}t + c_{v1}) - (m_{i1}t + c_{i1})R_{ESR} \quad (14)$$

40

【数16】

$$V_c(Part2) = (a_2t^2 + a_1t + a_0) - (m_{i2}t + c_{i2})R_{ESR} \quad (15)$$

50

【数 17】

$$R_{ESR} = \frac{m_{v1} - 2a_2 t_{ref} - a_1}{m_{i1} - m_{i2}} \quad (16)$$

【0106】

PWM信号上の制限されたスルーレートは、放電から帯電、およびその逆の円滑な移行を提供する。これは、スイッチングノイズを取り除き、 $V_c$ が時間に関する連続関数であることを確保し、 $R_{ESR}$ を推定することを可能にする。最小二乗検知における生データに適合する方程式13の係数は、連立方程式を解くことによって見出すことができ、これは、たとえば、クラメールの公式を使用して正攻法の手法で達成することができる。また、このプロセスは、必要な和の多くを事前に計算できるので、実質的に便利であり、そうできないものは、各データ点が利用可能になるにつれて、更新することが可能である。

10

【0107】

等価直列抵抗が一旦わかると、または推定されると、上の方法のいずれか、または任意の他の代替手段のいずれかにより、DEAの静電容量を、本発明のこの第2の例示的实施形態の方法に従って計算することができる。

【0108】

DEA50を表す図5における支回路を参照すると、コンデンサの両端の電圧( $V_c$ )は、方程式17(方程式9から導き出された)によって示されたように、DEA50の両端の電圧( $V_{DEA}$ )からDEAを通る直列電流( $i_s$ )と電極のESR( $R_{ESR}$ )の積を減じる。

20

【数 18】

$$V_c = V_{DEA} - i_s R_{ESR} \quad (17)$$

【0109】

DEAの支回路を通る直列電流( $i_s$ )は、容量性素子を通る電流( $i_c$ )とEPRを通る漏れ電流( $i_{EPR}$ )の和に等しい(方程式18)。

30

【数 19】

$$i_s = i_c + i_{EPR} \quad (18)$$

【0110】

小規模、高周波数の振動信号がDEAに供給された作動信号上に重ね合わせられた際、信号の振動成分の、1つまたは複数の周期に及ぶフィードバックデータの窓を使用して、DEAの静電容量( $C$ )および漏れ電流( $i_{EPR}$ )を判定することができる。PWMを使用して、作動信号の振動成分を発生してきたが、 $V_c$ がわかっている場合は、周期振動を発生するための他の方法を使用して、本発明の範囲から逸脱することなく、 $C$ および漏れ電流を判定することができる。

40

【0111】

PWM信号の周期と一致するために、フィードバックデータの窓の幅を設定することが好都合である。発明者らは、窓の開始時にゼロであるために、時間( $t$ )およびDEA上に記憶された電荷( $Q_c$ )を定義する。第1の例示におけるように、時間 $t_a$ においてDEAへの入力電荷 $Q_{input}(t_a)$ は、方程式3および4によって定義される。

【0112】

$t$ 、 $V_c$ 、および $Q_{input}$ データによって形成された2D平面の係数は、方程式4における $Q_{input}$ の $t$ および $V_c$ に関する偏導関数に等しい。すなわち、 $Q_{input}$

50

$t$  の  $V_c$  に関する偏導関数（第 1 の係数）は、静電容量（ $C$ ）である（方程式 19、明確にするために時間の添え字を省略した）。 $Q_{input}$  の時間に関する偏導関数（第 2 の係数）は、静電容量の変化率（ $V_c = C / t$ ）と誘電膜を通る漏れ電流（ $Q_{leakage} / t$ ）の相乗効果である（方程式 20、明確にするために時間の添え字を省略した）。

【数 20】

$$\frac{\partial Q_{input}}{\partial V_c} = C \quad (19)$$

10

【数 21】

$$\frac{\partial Q_{input}}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} V_c + \frac{\partial Q_{leakage}}{\partial t} \quad (20)$$

【0113】

したがって、DEA の静電容量  $C$  の近似または推定は、電圧軸（ $Q_{input}$  軸に対する）、すなわち、 $V_c$  に関する  $Q_{input}$  の偏導関数に沿って最良適合の 2D 超平面の勾配から直接導き出すことができる（方程式 19）。

20

【0114】

有限差分を使用して、 $C / t$  を評価することができ（すなわち、短期間  $t$  に亘って  $C$  の 2 つの計算から勾配を判定することにより、 $C / t$  を近似する）、これを方程式 20 に代入して、静電容量の変化および DEA を通る直列電流  $i_s$  からの漏れ電流  $i_{EP}$  に起因して誘発された電流  $i_c$  を分離することができる。したがって、漏れ電流  $i_{EP}$ （誘電膜を通して漏れる電荷  $Q_{leakage}$  の時間に関する導関数に等しい）を、時間軸に沿った最良適合平面の勾配から導き出すことができる、すなわち、方程式の第 2 の係数は最良適合平面を画定する（方程式 20）。

30

【0115】

最小二乗検知において利用可能なデータに最良適合の 2D 平面を、たとえば、回帰を使用して見出されることができるが、他の方法を、本発明の範囲から逸脱することなく、代替的に使用してもよく、用語「最良適合平面」は、この文脈で使用される場合、電位差のプロットのうちの少なくとも大部分の測定された点、および時間に関する電荷がある平面上、または実質的に隣接する平面を定義するように判定された、いかなる方法を用いて導き出されてもよい、両軸に沿った平面の傾斜または勾配は、図 8 ~ 12 に対して以下に説明されるように、データ点の勾配に実質的に対応することを条件とする、3D 空間内の 2D 平面を単に指す。

【0116】

平面方程式は、 $f(x, y) = a_1 x + a_2 y + a_3$  の形式に一般化することができる。式中、 $t$ 、 $V_c$ 、および  $Q_{input}$  は、それぞれ  $x$ 、 $y$  および  $f(x, y)$  で表される。したがって、一般的な場合では、最小二乗解を定義する  $a_1$ 、 $a_2$ 、および  $a_3$  の値は、方程式 21 において線形方程式の組を解くことによって見出すことが可能である。

40

【数 2 2】

$$Ma = b \quad (21)$$

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n t_j^2 & \sum_{j=1}^n t_j V_{c_j} & \sum_{j=1}^n t_j \\ \sum_{j=1}^n t_j V_{c_j} & \sum_{j=1}^n V_{c_j}^2 & \sum_{j=1}^n V_{c_j} \\ \sum_{j=1}^n t_j & \sum_{j=1}^n V_{c_j} & \sum_{j=1}^n 1 \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n t_j Q_{input_j} \\ \sum_{j=1}^n V_{c_j} Q_{input_j} \\ \sum_{j=1}^n Q_{input_j} \end{bmatrix}$$

【0 1 1 7】

3つの未知数のある3つの方程式の組に対して、線形方程式のこの組は、クラメールの公式を適用することにより、正攻法の手法で解くことができる。i = { 1 , 2 , 3 } である場合、未知の変数  $a_i$  は方程式 2 2 を使用して見出すことができる。式中、 $M_i$  は、M の第 i 列を列ベクトル b で置換することによって形成された行列である。

10

【数 2 3】

$$a_i = \frac{\det(M_i)}{\det(M)} \quad (22)$$

【0 1 1 8】

第 1 の例示におけるように、D E A の両端の電圧内の振動は、 $Q_{input}$ 、 $V_c$ 、および t のデータが実質的に 3 D 空間内の線に落ちるのを回避するために重要であり、そうなった場合は、最良適合の正確な平面を見出すことができない。振動でデータの 2 つの同一線上にない線が生成され、したがって、独自の平面を利用可能なデータ点に適合させることができる。

20

【0 1 1 9】

本発明のこの第 2 の実施形態をさらに説明するために、3 D グラフを使用して D E A の電氣的パラメータの影響を示すことが好都合である。図 5 の単純駆動回路の数値シミュレーションを、適合された平面の特性方程式上に D E A の電氣的パラメータの影響を示すために、The Mathworks, Inc. から入手可能な MATLAB ソフトウェアを使用して生成した。

30

【0 1 2 0】

シミュレーションを使用して、回路のノード  $V_1$  および  $V_2$  における電圧の時刻歴は、作動状態の範囲に対して生成された。D E A の両端の電圧  $V_{DEA}$  および D E A を通る電流  $i_s$  をこのデータから再生した。次いで電極抵抗  $R_{ESR}$  の両端の電圧降下を推定し、D E A の両端の総電圧  $V_{DEA}$  から減じて、D E A の容量性構成要素の両端の電圧  $V_c$  を見出した。次いで時間 t、コンデンサの両端の電圧  $V_c$ 、および直列電流  $i_s$  の積分  $Q_{input}$  を 3 D 空間内にプロットし、最良適合の 2 D 平面をデータ点上に重ねた。クラメールの公式を使用する回帰を使用して、様々な条件下で適合された平面に対して方程式を推定した。

【0 1 2 1】

40

図 8 は、適合された平面上の静電容量の変化の影響を示す。漏れ電流および  $dC/dt$  はゼロに設定され、500 pF、1000 pF、および 1500 pF の静電容量をシミュレーションした（それぞれ図 8 の (a) ~ (c)）。静電容量の増加は、電圧軸の方向に沿って適合された平面の勾配を増加するのに役立つ。これが直観的であるのは、静電容量が大きいほど、コンデンサ上の電荷の変化が、電圧内の所与の変化を達成するために大きくなければならないからである。以下の各グラフは数値シミュレーションの結果である。但し、 $(Q/V)_{plane}$  は、電圧軸の方向に適合された平面の勾配であり、 $C_{nom}$  は、示された 5 ms 周期に亘る D E A の実際の公称静電容量であり、 $(Q/t)_{plane}$  は、時間軸の方向に適合された平面の勾配であり、 $(V dC/dt)_{nom}$  は、D E A の容量性構成要素の両端の公称電圧と、示された 5 ms 周期に対する D E A の静

50

電容量の公称変化率の積であり、 $(dQ_{\text{leakage}}/dt)_{\text{nom}}$ は、示された5ms周期に対する公称漏れ電流である。

#### 【0122】

図9では、非ゼロ $dC/dt$ の影響が示されている。漏れ電流 $i_{\text{EPR}}$ をゼロに設定した。初期の静電容量 $C$ を1000pFに固定し、回路は、定数 $dC/dt$ が適用される前に定常状態に達することができた。プロットされたデータは、干渉が適用された後の第1のPWMサイクルに由来する。示された $dC/dt$ の値は、それぞれ(a) -500%/s、(b) 0%/s、および(c) 500%/sである。漏れ電流はゼロであるので、等価電圧線に沿ったコンデンサ $C$ 上の総電荷 $Q$ のあらゆる変化は、静電容量の変化に起因するはずである。すなわち、コンデンサの両端の電圧に対して、静電容量が変化したときに  
10  
同じままであるために、電荷はコンデンサへの流れをオンまたはオフしなければならない。したがって、これは時間軸の方向に沿って、適合された平面の勾配に影響を与える。静電容量 $C$ が低減すると勾配は減少し、静電容量 $C$ が増加すると勾配は増加する。適合された曲線の勾配によって予測された静電容量と示された周期に対する実際の公称値との間の小さい誤差は、 $C$ および $Q_{\text{leakage}}$ について作成された一次近似のアーチファクトである。しかし、この誤差は、 $dC/dt$ に対して非常に高い絶対値であっても( $\pm 500\%/s$ )、0.5%未満である。さらに静電容量の変化に起因して誘発された公称電流は、依然として正確に推定される。

#### 【0123】

図10では、漏れ電流 $i_{\text{EPR}}$ の影響が実証される。初期の静電容量 $C$ を1000pFに固定し、回路は、250MのEPRがコンデンサの両端に接続される前に定常状態に達することができた。(a)をゼロ漏れ電流(すなわち、無限EPR)、および(b)を250MのEPRで、回路に対するデータが、比較として並んで示されている。等価電圧線を考慮すると、システムへの干渉が漏れ電流のみである場合は、コンデンサの電圧を一定に維持するために、電荷をコンデンサ上に連続して流さなければならない。この場合もこれは直観的であり、抵抗経路は、DEAの端子間に存在し、したがって、永久電流はDEAを通して流れる一方で、電位差はその端子の両端に存在する。方程式20によって示されるように、漏れ電流はまた、時間軸の方向に沿って適合された平面の勾配を変化させるように作用する。DEAの線形化に起因して、推定された静電容量と実際の公称静電容量との間に小さい誤差が存在するが、この場合も、漏れ電流は、平面を適合するプロセスにより、正確に推定される。  
20  
30

#### 【0124】

図9および10に示され、上に説明されたように、漏れ電流 $i_{\text{EPR}}$ および $dC/dt$ の両方は、時間軸の方向に沿って適合された平面の勾配への変化として現れる。図11(b)では、漏れ電流と $dC/dt$ に対する負の値の相乗効果は、比較のために図11(a)における漏れ電流のない $dC/dt$ の同じ値に対するプロットの隣に示されている。図12(b)は、図12(a)における同じ値の $dC/dt$ および漏れ電流のないプロットの隣に示された、漏れ電流 $i_{\text{EPR}}$ と $dC/dt$ に対する正の値の相乗効果を示す。両方の現象は、同じ手法で最良適合平面上に現れる。しかし、静電容量 $C$ は、電圧軸の方向に沿って平面の勾配から計算することができるので、 $dC/dt$ は、 $C$ の時刻歴および無限差を使用して推定することができる。したがって、これを使用して、漏れ電流の影響と静電容量の変化の影響とを分離できる。推定された静電容量における誤差は、 $dC/dt$ に対する高い値および漏れ電流の両方の相乗効果の下でわずかに増加するが、誤差はいぜんとして小さく、時間軸の方向に適合された平面の勾配は、静電容量の変化に起因して誘発された電流と漏れ電流の相乗効果を、依然として正確に推定する。  
40

#### 【0125】

また、上記の方法の実験実証の結果は、本発明をさらに示す図に示されている。数個の試験DEA回路は、ESRおよび自己検知システムの漏れ電流推定の態様を立証するために、公称固定値の成分を使用して構成された。回路は、高電圧コンデンサおよびDEAのESRおよびEPRを表す抵抗の範囲で構成された。これにより、回路がその構成部品に  
50

分解することが可能になり、その結果構成要素は、容易に独立して試験することができた。高電圧のセラミック静電容量の未知の電圧の依存により、静電容量の推定を立証する際にその使用が除外された。その代わりに拡大ドット D E A を使用して、静電容量の検知の性能を評価した。推定された静電容量は、ビデオフィードバックデータを使用して測定されるように、電極面積の変化に基づいて、予想される静電容量と比較された。

#### 【 0 1 2 6 】

拡大ドット D E A は、図 1 3 に図示され（実寸に比例していない）、概して 8 0 で示されており、3 M Company から入手可能な一般的な D E A 膜材料、V H B 4 9 0 5 から構成されており、その元の面積の 1 6 倍に事前に伸張され、剛体支持枠 8 1 に接着された。枠は、直径 1 3 0 m m の円形内部開口を有した。伸張された膜の中心に、直径 5 0 m m の円形電極 8 2 を、N y e Lubricants, Inc. から入手可能な、N y o g e l 7 5 6 導電性炭素を添加したグリースを使用して、膜の反対側に取り付けた。また、N y o g e l 7 5 6 の導電性軌道 8 3 を、電極面積から外付け回路に接続できる支持枠の縁部上の点に放射状に外向きに塗布した。

#### 【 0 1 2 7 】

駆動電圧を印加すると、電極 8 2 の面積は放射状に拡大した。第 2 の独立した D E A 8 4 は、干渉を適用する目的で、V H B 膜の周囲の周りにパターン化された。第 2 の D E A の作動は、拡大ドットの周囲の周りの膜内の放射状張力を弛緩させ、それにより静電気力と機械力との間の新しい均衡が見出されるまで伸縮された。

#### 【 0 1 2 8 】

E S R に対する 4 つの値（抵抗なし、2 2 5 k 、4 4 7 k 、および 6 7 5 k ）ならびに E P R に対する 3 つの値（抵抗なし、3 0 0 M 、および 1 5 0 M ）のあらゆる組合せを試験して、システムの E S R および漏れ電流の推定機能の評価した。それぞれの試験回路は、5 0 0 V きざみで 5 0 0 ~ 2 5 0 0 V の平均電圧に対応するデューティサイクルを受けた。

#### 【 0 1 2 9 】

拡張ドット D E A を使用して、静電容量の推定を評価した。その残余の静電容量（ $C_0$ ）を測定するために、1 0 M 抵抗器を D E A の負極端子と接地との間に接続し、低電圧三角波（0 . 8 H z において最大振幅 2 0 V）を D E A の正極端子に印加した。静電容量は、1 0 0 M 抵抗器を通る電流の振幅の、入力電圧の変化率に対する割合を使用して計算された（方程式 2 3）。カメラを使用して、D E A に電圧が印加されない際の電極の面積を測定した。この測定は、推定される D E A の面積伸張（ $\lambda$ ）を可能にする基準面積として役立ち、これは方程式 2 4 により瞬時静電容量に関連付けられる。

#### 【 数 2 4 】

$$C = \frac{i}{\left(\frac{dV}{dt}\right)} \quad (23)$$

#### 【 数 2 5 】

$$C = C_0 \lambda^2 \quad (24)$$

#### 【 0 1 3 0 】

高電圧試験のために、D E A を図 5 の自己検知回路に接続した。電流源は、オプトカブラのスイッチを入れたときに 9 5  $\mu$  A、スイッチを切った時に実質的に 0  $\mu$  A を供給するように構成された。2 0 0 H z の P W M 信号を使用して、オプトカブラへの入力電流を制御した。まず D E A は、定常状態に達するまで、1 0 % の P W M デューティサイクルを受けた。次いでこれを 1 0 秒毎に 1 % 増加した。正弦波干渉信号（0 . 1 H z において 0 ~

2000V)を伸張した膜の周囲の周りにパターン化された第2のDEAに同時に印加した。実験は、DEAを30%のデューティサイクルで10秒かけた後完了した。電極の面積伸張は、ビデオ伸び計を使用して測定され、静電容量を推定するために使用された。これは、自己検知工程を使用して推定された静電容量と比較された。

【0131】

図14は、ESR推定の実験検証を示す。線はESRの真値を示し、データ点はESRに対する推定値を示す。ESRの各値に対して3組のデータ、すなわちEPRに対する3つの値のそれぞれに対して1つずつ存在する。

【0132】

試験DEA回路は、未知の電圧依存静電容量を有するセラミックコンデンサを使用する、自己検知方法のESR、および漏れ電流の推定機能を評価するために使用された。これに関わらず、ESRおよび漏れ電流の両方の正確な推定が達成された。図14によって示されたように、ESRに対する推定は、DEAに印加されやすい電圧を表す電圧の範囲に依存する、ごくわずかな電圧を示した。さらに、推定されたESRは、漏れ電流の大きさに顕著な依存を示さなかった。

【0133】

図15は、漏れ電流の推定の実験検証を示す。線は、試験DEA回路の容量性素子の両端の電圧に基づいて予測された漏れ電流、および並列に接続されたEPRの値を示す。データ点は、漏れ電流に対する推定値を示す。EPRの各値に対して4組のデータ、すなわち、ESRに対する4つの値のそれぞれに対して1つずつ存在する。

【0134】

図15から、漏れ電流は、印加された電圧の範囲に亘る $R_{EPR}$ 値の範囲に対して正確に推定されたことがわかる。さらに、ESRは、漏れ電流の推定の精度にごくわずかしが影響を与えなかった。これは、ESRの推定の精度を強化し、漏れ電流の推定は、 $R_{ESR}$ の両端の電圧の正確な推定を必要とする。

【0135】

図16は、自己検知プロセスによって推定された静電容量の形状と、測定された静電容量との間に優れた一致が存在することを示す。2つの静電容量の間に小さい比例オフセット(または利得誤差)が存在するが、図17は、推定と測定の間に線形関係が存在することを示す、すなわち、図18に示されたように、単純な校正ルーチンは2本の線を融合する。これは、この線形関係が、DEAが外部干渉を受ける際であっても達成されるので、特に著しく、したがって、観察されたオフセットは、自己検知回路の固有の挙動のアーチファクトではない。

【0136】

#### 方法の実用的な適用

したがって、本発明は、DEの3つの主要フィードバック・パラメータのうちの任意の1つまたは複数上に正確なフィードバックを提供し、これは今度はDEの状態に改善されたフィードバックを提供する。

【0137】

漏れ電流は、最低限でもDEの効率に関する測定を提供することができ、誘電破壊(DEの重大な故障モード)を予測し、防止する機構を提供してもよい。高度に局在した漏れ電流は常に、DEAが誘電破壊を受ける際、DEAへの回復不能な損傷の根本原因である。

【0138】

DEの電氣的パラメータは、それが変形された際に著しく変化することができるとすると、本発明はDEベースのデバイスの特性をその場で特徴づけるために、特に有益である、すなわち、DEがアクチュエータ、発電器、または単にセンサとしてのいずれかとして動作するように設計された課題を実行する間、DEの状態についてのフィードバックを、提供されることが可能であることを理解されよう。

【0139】

10

20

30

40

50

D E の通常作動する範囲内で容量的に非圧縮性で、また誘電定数が D E の作動の程度または歪み状態で著しく変化しない、一般的な D E 膜材料に対して、静電容量は、電極の領域の優れた予測因子であり、したがって、閉ループフィードバック・システムの根拠を提供し、駆動または発生の制御を向上させることを可能にする。

#### 【 0 1 4 0 】

D E の静電容量とその電極の面積との関係を考えると、本発明は、誘電エラストマー・アクチュエータ ( D E A ) の作動に対するフィードバックの提供に特に有用であり、特に自己検知を使用して閉ループフィードバック・システムを形成するのに利用されて、D E A の制御を向上させることが可能になる場合があることが理解されよう。このようなシステムの実装は、通常、マイクロコントローラ、F P G A、もしくはプログラム可能なロジックコントローラ ( P L C ) などのコンピューティング手段またはコンピューティング・デバイス、およびたとえば、比例積分微分 ( P I D ) 制御などの制御アルゴリズムの、何らかの形であり、埋め込みシステムおよび制御システムの当業者に可能な範囲内であると考えられ、したがって、本明細書には詳細を記載しない。

#### 【 0 1 4 1 】

また、D E の静電容量の推定により、D E 上に記憶された瞬時電荷の推定も可能になる。D E の電荷の制御により ( 電圧とは対照的に )、D E の全体的な安定性を大幅に向上させることができる。Q の関数として、圧力 P を配列しなおして表したものが方程式 2 5 であり、式中、Q は D E 上の電荷であり、d は誘電膜の厚さであり、v o l u m e は電極の面積と誘電膜の厚さ d の積である。

#### 【 数 2 6 】

$$P = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \left( \frac{Qd}{\text{volume}} \right)^2 \quad (25)$$

#### 【 0 1 4 2 】

一定電荷 Q は D E 電極上に維持され、誘電膜の厚さは実質的に均一のままである場合、d を低減するように作用する機械的干渉は、静電圧も低減し、逆も同様である。したがって、静電圧は、干渉を退けるように作用し、それによって D E は電気機械的不安定度を受けを防止する。対照的に、定電圧が維持されるときは、静電圧はあらゆる機械的干渉に対して持ちこたえるように作用する。しかし、最も重要なことに、電荷および電圧の両方を制御できると、D E の有効剛性を制御可能になる。

#### 【 0 1 4 3 】

D E の剛性の制御により、特に D E A ベースの人工筋肉を原動力とするデバイスに対して、多数の潜在的可能性を生み出す。適合したアクチュエータは逆運転可能である。適合したアクチュエータは、機械的衝撃を吸収し、振動および機械的干渉を緩和する固有の能力を有する。ロボットマニピュレータでは、握力を制御でき、適合した把持部は、握られる対象の形に自然に適合し、不規則な形状もしくは柔らかい対象物、または対象が空間を通して平行移動されるにつれて、マニピュレータに対して移動する場合がある対象物を取り扱う課題に十分に適合する。歩行ロボットに対して、適合した関節部は、足が着地するときに弾むことを防止し、良好な接触が、特に地面が平坦でない場合に、ロボットの足と地面との間に維持されることを確保し、これによりロボットの安定性を改善する。さらに、脚関節の適合を制御し、高利得位置の制御を使用して、関節角度すべての厳重な管理を維持するのとは対照的に、運動量および動力学エネルギーに脚のそれぞれの部分の軌跡を管理させることは、必要とされる入力エネルギーの観点から著しい節約を提供する。

#### 【 0 1 4 4 】

したがって、広い意味で、本発明の方法は、D E の電気特性を示す測定信号、ならびに D E の物理的状態および / またはフィードバック・パラメータを表す信号もしくはデータ



を導き出す、それらの測定の変換を獲得することに関する。

【0145】

したがって、本発明は、本発明の方法に関して本明細書に記載されたように、自己検知を実行するように適合された、システムで構成されるとも言われることもある。DEAの閉ループフィードバック制御に対する、本発明の第1の実施形態の方法を実行するように適合された、このようなシステムの例は、非制限例として図19に概略的に示されている。

【0146】

システムは、好ましくは、DEA191の作動を制御するように適合された(すなわち、作動信号192を制御することにより)、コントローラ190を備える。また、システムは、DEA191の静電容量、等価直列抵抗、および漏れ電流のうちの1つまたは複数の推定を導き出すために、本発明の自己検知方法を実施するための、コンピューティング手段またはコンピューティング・デバイス193も含む。これを可能にするために、システムはまた、小規模振動信号をDEAに提供された作動信号192に導入するための、振動電圧源または他の手段194、ならびに好ましくは直列電流センサ195および電圧センサ196の形の測定手段またはセンサも含む。測定手段から、データ収集手段または装置197は、時間に関して、DEAの両端の電位差(または方法の第2の実施形態に対する、その容量性構成要素)、DEAを通る直列電流、およびDEAに供給された電荷を表すデータを導き出す。これらの測定は、上記のように、DEAフィードバック・パラメータを導き出すために、本発明の方法の適用のためのコンピューティング手段193に通信される。

【0147】

システムがDEA作動の閉ループフィードバック制御を実行するように適合される場合、コントローラ190は、設定点198の形で、DEAの必要な状態の表示を受け取るように適合される。これは、たとえば、ヒューマン・インターフェース・デバイスからコントローラ190に通信されてもよい。

【0148】

本発明の方法は、通常、ある形のプログラム可能なコンピューティング手段またはデジタルもしくは混合信号コンピューティング・デバイス、概してマイクロコントローラなどの埋め込みコンピューティング・デバイスによって実行されるコンピュータ・プログラムにおける少なくとも一部で実施される。一旦、本発明の方法を実施するプログラム・ソフトウェアからの命令に従って、特定の機能を実行するためにプログラムされると、このようなデジタル・コンピューティング手段またはシステムは実際に、特に本発明の方法のための特殊用途機械になる。このために必要な技法は、埋め込みコンピュータシステムの当業者に周知である。

【0149】

あるいは、本発明の方法は、1つまたは複数の特殊用途向け集積回路(ASIC)により、少なくとも部分的に実行できる可能性がある。

【0150】

また、上述のコントローラ190、コンピューティング手段193、およびデータ集積手段197の機能は、単一のこのようなコンピューティング・デバイス(たとえば、マイクロコントローラまたはASIC)によって、または代替的に複数のこのようなデバイスの間で分配されて、中央で実行されてもよいことが理解されよう。

【0151】

コンピューティング手段193および/またはデータ収集手段197は、好ましくは、本発明の方法を実行するために必要とされるデータを、記憶または記録するためにデータ記憶手段またはメモリデバイスを含む。データ記憶手段は、揮発性であっても、または非揮発性であってもよく、また単一の集積回路(IC)においてコンピューティング手段193内に統合されてもよく、または公知の方法でコンピューティング手段と通信可能に結合された個別のIC構成要素であってもよい。

## 【 0 1 5 2 】

本発明の方法を実施するコンピュータ・プログラムは、フロッピーディスク（登録商標）、CD-ROM、USBフラッシュメモリ、または他のコンピュータ可読媒体などの、分配媒体上でユーザに分配されてもよい。それらからコンピュータ・プログラムは、内蔵固体メモリまたはコンピューティング手段の同様の中間記憶媒体にコピーされてもよい。プログラムが実行される際に、プログラムは、いずれかの中間記憶媒体からコンピューティング手段の実行メモリにロードされてもよく、本発明の方法に従って、作用するためにコンピューティング手段を構成する。これらの作動すべては、内蔵システムおよび/またはコンピュータシステムの当業者に周知である。

## 【 0 1 5 3 】

用語「コンピュータ可読媒体」は、分配媒体、中間記憶媒体、コンピュータの実行メモリ、および本発明の方法を実施するコンピュータ、コンピュータ・プログラムによって後で読み取るための記憶可能なあらゆる他の媒体またはデバイスを包含する。

## 【 0 1 5 4 】

したがって、本発明はまた、本発明の方法を実施するコンピュータ・プログラム、コンピュータ・プログラムを記憶するコンピュータ可読媒体、ならびに/または方法を実行するおよび/もしくは本発明のソフトウェアを実行するように適合されたシステムであるとも言われることがある。

## 【 0 1 5 5 】

上述のように、コンピューティング手段は、一定時点においてDEの両端の電位差およびDEを通る直列電流を測定するための、測定手段または測定デバイスと通信可能に結合される。直列電流測定から、DEに入力される電荷を導き出すことができる。

## 【 0 1 5 6 】

適切な測定手段/デバイスは当業者に公知であり、個別の、または統合された抵抗器、コンデンサ、およびたとえば、単一利得バッファ増幅器として演算増幅器（オペアンプ）を公知の方法で配設された回路を含んでもよい。

## 【 0 1 5 7 】

データ収集手段197および/またはコンピューティング手段193は、好ましくは、測定をデジタル・コンピューティング手段によって、さらに処理するために適切なデジタル形式に変換するために、少なくとも1つのアナログ-デジタル変換器（ADC）を含む。

## 【 0 1 5 8 】

用語「測定する」または「測定された」が本明細書で使用される場合、特定のパラメータまたは特性が、決して直接測定されなければならない要件ではないことに留意されたい。むしろ、パラメータは、本発明の範囲から逸脱することなく、他の測定から測定される、導き出される、推定される、または近似してもよい。

## 【 0 1 5 9 】

本明細書において用語「瞬時」は、任意の特定の時点における、本発明の成分または整数の一般的状態を指す。しかし、たとえば、測定が（機械的または電氣的時定数に関して）短期間に亘って平均値を求める、またはフィルタリングされる場合のように、多重測定から導き出される状態の測定または近似を除外することを意図しない。事実、このように平均値を求めることは、ノイズまたは量子化誤差の影響を最小にすることが好ましい場合がある。したがって、用語「瞬時」は、状況に応じて、特定の時点でまたは実質的に特定の時点に隣接して、成分の時変状態を少なくとも示す、あらゆる測定、微分または近似を指す。

## 【 0 1 6 0 】

前述から、本発明は、電極の等価直列抵抗のDE状態のフィードバック・パラメータ、DEの静電容量、およびDEが作動されるか、電氣的エネルギーを発生するために使用されるか、またはセンサのみとして使用されるかのいずれであっても、誘電膜を通る漏れ電流を動的に推定するための方法を提供することがわかるであろう。これは、自己検知によ

10

20

30

40

50

って達成され、別個の歪み、変位、速度、または加速センサを必要としないことを意味する。

【0161】

本発明は、例として、およびその考えられる実施形態を参照して説明されたが、修正形態または改良形態が、本発明の範囲から逸脱することなく、それになされてもよいことを理解されたい。また、本発明は、広義には、個別にあるいは集合的に、本出願の明細書で言及された、または示された、2つ以上の部分、要素および特徴のいずれかまたはすべての組合せのかたちの、複数の部分、要素、および特徴であると言ってもよい。さらに、公知の等価物を有する本発明の特定の構成要素または完全体を参照した場合、このような等価物は個別に説明されたかのように本明細書に組み込まれる。

10

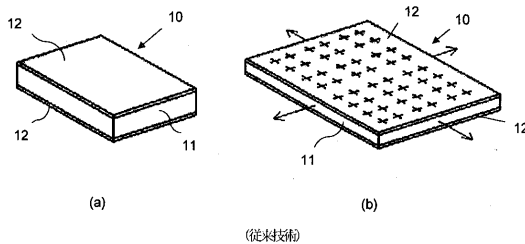
【0162】

文脈が明確にそうでない限り、説明全体を通して、用語「comprise（含む）」、「comprising（含む）」などは、排他的または網羅的意味とは反対に包括的な意味、すなわち、「including（含む）」がこれに限定されない」という意味に解釈されるべきである。

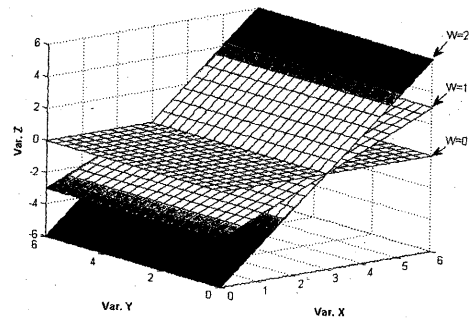
【0163】

本明細書全体を通して先行技術のあらゆる検討は、決してこのような先行技術が当技術分野における、広く公知の、または共通一般知識の一部の形である証としてみなされるべきではない。

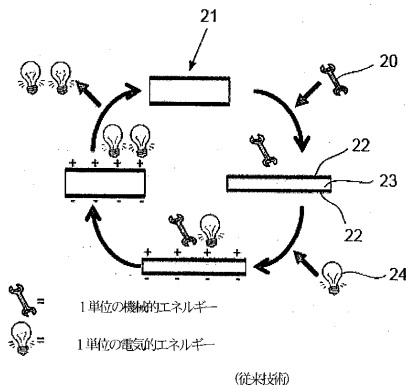
【図1】



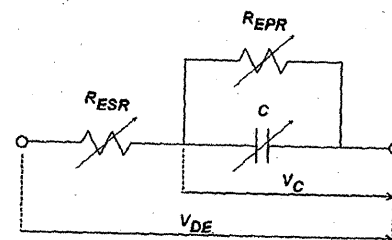
【図3】



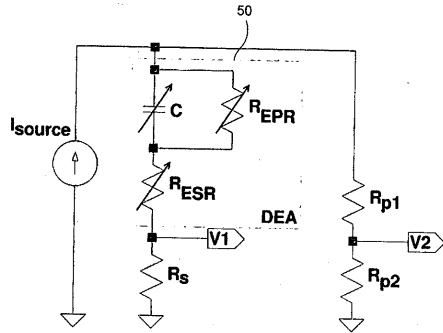
【図2】



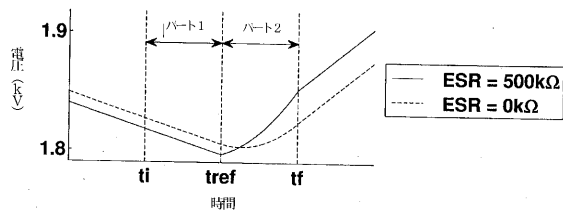
【図4】



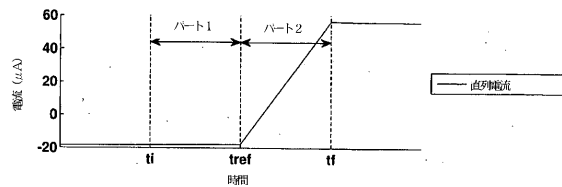
【図 5】



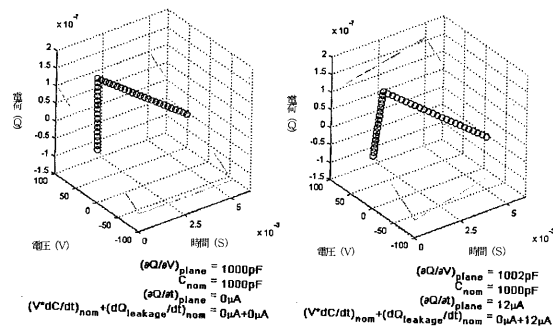
【図 6】



【図 7】



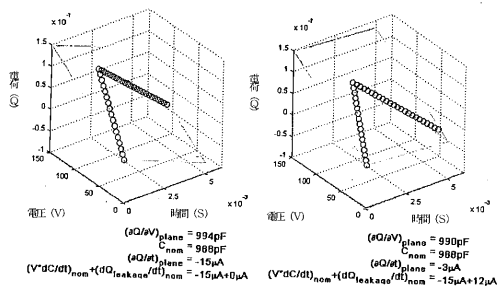
【図 10】



(a)

(b)

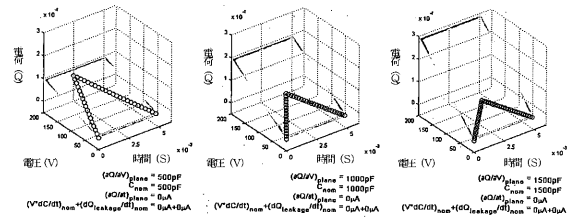
【図 11】



(a)

(b)

【図 8】

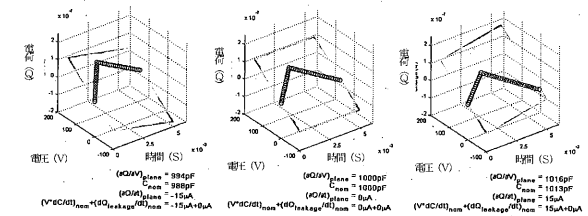


(a)

(b)

(c)

【図 9】

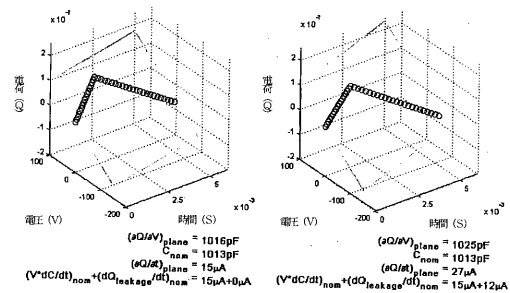


(a)

(b)

(c)

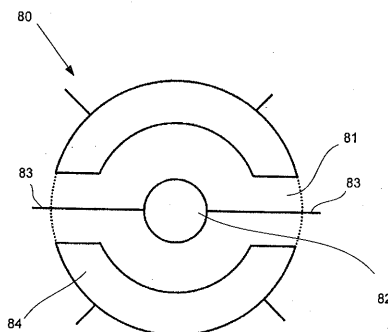
【図 12】



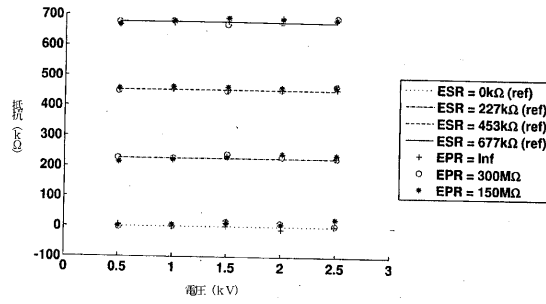
(a)

(b)

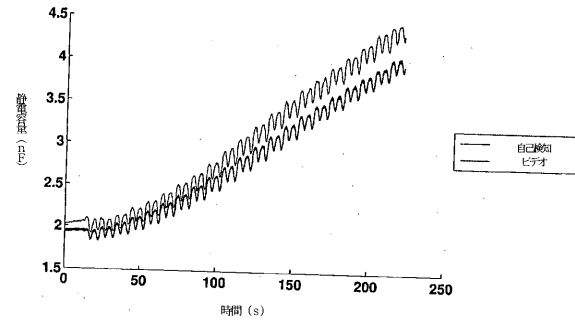
【図 13】



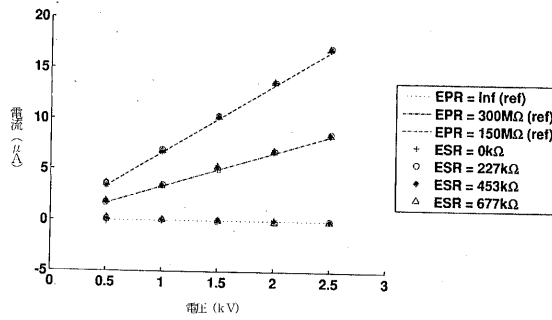
【図 14】



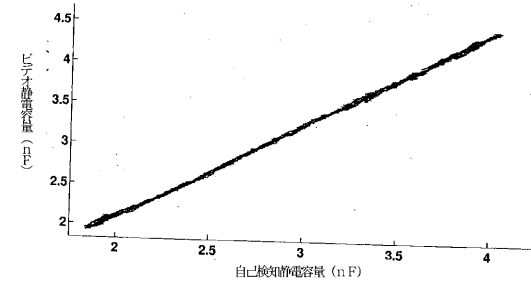
【図 16】



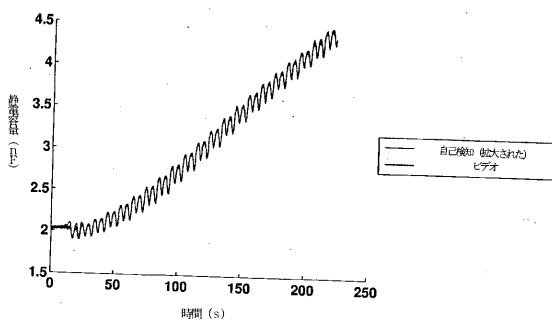
【図 15】



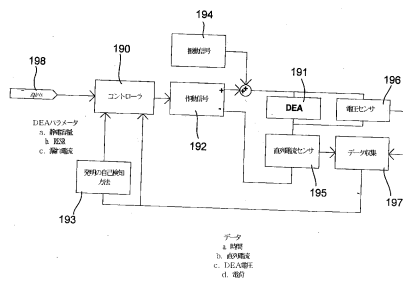
【図 17】



【図 18】



【図 19】



## フロントページの続き

(73)特許権者 313012039

ギスビー, トッド アラン

GISBY, Todd Alan

ニュージーランド、0622、オークランド、タカプナ、ブロムフィールド スパ 10、ユニット 2

Unit 2, 10 Blomfield Spa, Takapuna, Auckland, 0622, New Zealand

(73)特許権者 313012040

オブライエン, ベンジャミン マーク

O'BRIEN, Benjamin Marc

ニュージーランド、0794、オークランド、アルバニー、アールディー 4、ポストマン ロード 112

112 Postman Road, RD 4, Albany, Auckland, 0794, New Zealand

(73)特許権者 313012051

アンダーソン, イアン アレクサンダー

ANDERSON, Iain Alexander

ニュージーランド、0604、オークランド、チチランギ、コニニ ロード 149

149 Konini Road, Titirangi, Auckland, 0604, New Zealand

(74)代理人 100091502

弁理士 井出 正威

(72)発明者 ギスビー, トッド アラン

ニュージーランド、0622、オークランド、タカプナ、ブロムフィールド スパ 10、ユニット 2

(72)発明者 オブライエン, ベンジャミン マーク

ニュージーランド、0794、オークランド、アルバニー、アールディー 4、ポストマン ロード 112

(72)発明者 アンダーソン, イアン アレクサンダー

ニュージーランド、0604、オークランド、チチランギ、コニニ ロード 149

審査官 安池 一貴

(56)参考文献 特開2008-216074(JP, A)

特開平01-091481(JP, A)

国際公開第2009/051051(WO, A1)

欧州特許出願公開第01686681(EP, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H02N 11/00