

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-504273
(P2005-504273A)

(43) 公表日 平成17年2月10日(2005.2.10)

(51) Int. Cl.⁷

GO1C 19/56
GO1P 9/04

F I

GO1C 19/56
GO1P 9/04

テーマコード(参考)

2F105

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願2003-529090(P2003-529090)
(86) (22) 出願日 平成14年9月18日(2002.9.18)
(85) 翻訳文提出日 平成16年3月19日(2004.3.19)
(86) 国際出願番号 PCT/US2002/029495
(87) 国際公開番号 W02003/025506
(87) 国際公開日 平成15年3月27日(2003.3.27)
(31) 優先権主張番号 09/957,425
(32) 優先日 平成13年9月20日(2001.9.20)
(33) 優先権主張国 米国(US)

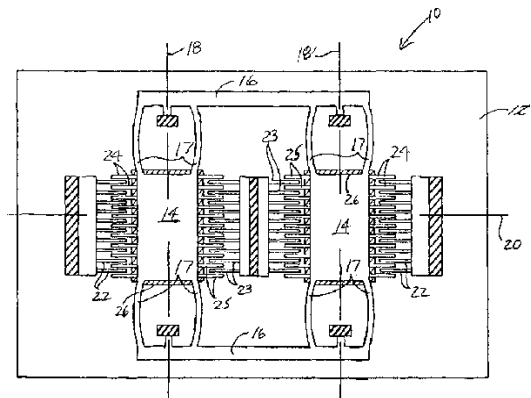
(71) 出願人 500575824
ハネウェル・インターナショナル・インコーポレーテッド
アメリカ合衆国ニュージャージー州07962, モーリスタウン, コロンビア・ロード101
(74) 代理人 100089705
弁理士 社本 一夫
(74) 代理人 100076691
弁理士 増井 忠式
(74) 代理人 100075270
弁理士 小林 泰
(74) 代理人 100080137
弁理士 千葉 昭男

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ピックオフ共振減衰が大きくなった超小型機械慣性センサ

(57) 【要約】

ピックオフQが小さくなり、かつ、大きなモータQを維持した超小型機械慣性センサ(10)が提供される。超小型機械慣性センサは、一対の保証質量(14)および整合したピックオフプレート(26)を備えている。個々のピックオフプレートは、保証質量の面外運動によって変化するギャップによって個々の保証質量と間隔を隔てている。また、超小型機械慣性センサは、ピックオフプレートに電荷を提供するための少なくとも1つの電圧源(28)を備えている。ピックオフプレートと個々の保証質量の間のギャップが変化する際の、ピックオフプレートを含んだ各電気回路内の電荷の移動を測定することにより、入力軸の周りの超小型機械慣性センサの回転の測値を得ることができる。超小型機械慣性センサは、さらに、電圧源と個々のピックオフプレート間に直列に配置された、超小型機械慣性センサのピックオフ共振の減衰を大きくするための抵抗素子(30)を備えている。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第 1 の軸の周りの回転を検知するようになされた超小型機械慣性センサであって、
基板と、
前記基板と間隔を隔て、かつ、前記基板に機械接続された第 1 および第 2 の保証質量であ
って、前記第 1 の軸に対して実質的に直角をなす第 2 の軸に沿って振動するようになされ
、かつ、前記第 1 および第 2 の軸に対して実質的に直角をなす第 3 の軸に沿って移動する
ことができる保証質量と、
個々の保証質量と少なくとも部分的に整合した、前記第 3 の軸に沿った前記保証質量の運
動によって変化するギャップによって前記保証質量と間隔を隔てた複数のピックオフプレ
ートと、
前記ピックオフプレートに電気接続された少なくとも 1 つの電圧源と、
前記少なくとも 1 つの電圧源と個々のピックオフプレートの間直列に配置された、前記
超小型機械慣性センサのピックオフ共振を小さくするための複数の抵抗素子とを備えた超
小型機械慣性センサ。

【請求項 2】

個々の抵抗素子のサイズが 10 キロオームと 10 メグオームの間である、請求項 1 に記載
の超小型機械慣性センサ。

【請求項 3】

個々の抵抗素子のサイズが 1 メグオームである、請求項 2 に記載の超小型機械慣性センサ

【請求項 4】

個々の抵抗素子が、前記ピックオフ共振の Q が 1000 を超えないように選択された、請
求項 1 に記載の超小型機械慣性センサ。

【請求項 5】

複数の駆動電極をさらに備え、個々の保証質量が、前記駆動電極に印加される電氣的刺激
に、前記第 2 の軸に沿った前記個々の保証質量の振動が含まれるよう、前記駆動電極とイ
ンターディジタル化された複数の被駆動電極を支えている、請求項 1 に記載の超小型機械
慣性センサ。

【請求項 6】

第 1 の軸の周りの回転を検知するようになされた超小型機械音叉ジャイロスコープであ
って、

機械接地に動作接続され、かつ、前記第 1 の軸に対して実質的に直角をなす第 2 の軸に
沿って振動するようになされ、さらに、前記第 1 の軸の周りの回転によって、前記第 1 お
よび第 2 の軸に対して実質的に直角をなす第 3 の軸に沿って移動することができる第 1 お
よび第 2 の保証質量と、

個々の保証質量と少なくとも部分的に整合し、かつ、前記保証質量との間に確立される容
量によって前記第 3 の軸に沿った前記保証質量の運動の測値が提供されるように前記個々
の保証質量に容量結合された複数のピックオフプレートと、

前記ピックオフプレートに電気接続された少なくとも 1 つの電圧源と、

前記少なくとも 1 つの電圧源と個々のピックオフプレートの間直列に配置された、前記
超小型機械音叉ジャイロスコープのピックオフ共振の減衰を大きくするための複数の抵抗
素子とを備えた超小型機械音叉ジャイロスコープ。

【請求項 7】

個々の抵抗素子のサイズが 10 キロオームと 10 メグオームの間である、請求項 6 に記載
の超小型機械音叉ジャイロスコープ。

【請求項 8】

個々の抵抗素子のサイズが 1 メグオームである、請求項 7 に記載の超小型機械音叉ジャ
イロスコープ。

【請求項 9】

10

20

30

40

50

個々の抵抗素子が、前記ピックオフ共振のQが1000を超えないように選択された、請求項6に記載の超小型機械音叉ジャイロスコープ。

【請求項10】

複数の駆動電極をさらに備え、個々の保証質量が、前記駆動電極に印加される電氣的刺激に、前記第2の軸に沿った前記個々の保証質量の振動が含まれるよう、前記駆動電極とインターディジタル化された複数の被駆動電極を支えている、請求項6に記載の超小型機械音叉ジャイロスコープ。

【請求項11】

第1の軸の周りの回転を検知するようになされた超小型機械慣性センサであって、
基板と、
前記基板と間隔を隔て、かつ、前記基板に機械接続された第1および第2の保証質量であって、前記第1の軸に対して実質的に直角をなす第2の軸に沿って振動するようになされ、かつ、前記第1の軸の周りの回転によって、前記第1および第2の軸に対して実質的に直角をなす第3の軸に沿って移動することができる保証質量と、
個々の保証質量と少なくとも部分的に整合した前記基板上に配置された、前記第3の軸に沿った前記保証質量の運動によって変化するギャップによって前記保証質量と間隔を隔てた複数のピックオフプレートと、
前記ピックオフプレートに電気接続された少なくとも1つの電圧源と、
前記少なくとも1つの電圧源と個々のピックオフプレートの間直列に配置された、サイズが10キロオームと10メガオームの間である複数の抵抗素子とを備えた超小型機械慣性センサ。

10

20

【請求項12】

個々の抵抗素子のサイズが1メガオームである、請求項11に記載の超小型機械慣性センサ。

【請求項13】

個々の抵抗素子が、前記ピックオフ共振のQが1000を超えないように選択された、請求項11に記載の超小型機械慣性センサ。

【請求項14】

複数の駆動電極をさらに備え、個々の保証質量が、前記駆動電極に印加される電氣的刺激に、前記第2の軸に沿った前記個々の保証質量の振動が含まれるよう、前記駆動電極とインターディジタル化された複数の被駆動電極を支えている、請求項11に記載の超小型機械慣性センサ。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は一般に超小型機械慣性センサに関し、より詳細には、ピックオフ共振減衰が大きくなった、超小型機械音叉ジャイロスコープなどの超小型機械慣性センサに関する。

【背景技術】

【0002】

超小型機械慣性センサは、頑丈で、かつ、小型であるため、航空機、自動車および他のアプリケーションにおける回転運動を検出するべく、その利用がますます増加している。例えば自動車産業においては、超小型機械慣性センサは、レベリング制御、アンチスピンシステム、アンチスキッドシステムおよび運行目的に利用されている。また、軍事産業においては、超小型機械慣性センサは、ミサイル誘導、スマート軍需品、トラックブイ、自走車両、陸路運行および無数の他のアプリケーションに利用されている。さらに、消費財に関しては、超小型機械慣性センサは、仮想現実感システム、カムコーダ、GPSレシーバ等に利用されている。また、超小型機械慣性センサは、その頑丈性および小型であることに加えて、コストの面で、競合する技術に勝る潜在的に大きな利点を提供している。

40

【0003】

有利な超小型機械慣性センサの1つは、第1の軸すなわち入力軸の周りの回転を検知する

50

ようになされた音叉ジャイロスコープである。通常、音叉ジャイロスコープには、第1の軸に対して実質的に直角をなす第2の軸に沿って振動するべく所定のモータ周波数で駆動される一対の保証質量が含まれている。保証質量がこのように下層基板に対して配置されるため、通常、この第2の軸に沿った運動は、面内運動と呼ばれている。第1の軸の周りの回転により、保証質量はコリオリの力を受け、それにより、第1および第2の両方の軸に対して実質的に直角をなす第3の軸に沿って移動し、延いては面外運動が生成される。また、音叉ジャイロスコープには、個々の保証質量と整合し、かつ、間隔を隔てたピックオフプレートすなわち検知電極が含まれており、個々の保証質量と個々のピックオフプレートとの間にギャップが確定されている。個々のピックオフプレートは、電圧源などの電荷源に電気接続されている。個々の保証質量が、例えばコリオリの力によって第3の軸に沿って移動すると、保証質量と個々のピックオフプレートとの間のギャップが変化し、それにより保証質量と個々のピックオフプレートとの間の容量が変化し、ピックオフプレートを含んだ電気回路すなわち検知回路内を電荷が移動する。検知回路内における電荷の移動を測定することにより、音叉ジャイロスコープは、個々の保証質量と個々のピックオフプレートとの間の容量の測値、延いては第1の軸すなわち入力軸の周りの音叉ジャイロスコープの回転の角速度を提供することができる。音叉ジャイロスコープに関する詳細については、そのすべての内容が本明細書に組み込まれている、John C. Pinsonに対する米国特許第5,920,012号を参照されたい。

10

【0004】

面外運動を許容するために、通常、保証質量は、たとえ保証質量が基板に機械的に接続されている場合であっても、個々の保証質量が基板に対して振動し、あるいは他の運動を引き起こすことができるよう、基板上に懸垂されている。保証質量を基板に取り付けることにより、保証質量は、第2の軸に沿って運動するためのモータ固有共振周波数と、第3の軸に沿って運動するためのピックオフ固有共振周波数の両方を有することができる。また、音叉ジャイロスコープは、保証質量を第2の軸に沿って振動させ、それにより保証質量をモータ周波数で運動させるために必要なエネルギーに関連するモータ共振Q値を有している。保証質量を駆動するために必要なエネルギーを最小化するために、モータのQは、可能な限り大きいことが好ましい。

20

【0005】

第1の軸の周りの一定速度の回転により、個々の保証質量は、第3の軸に沿ってモータ周波数で振動する。第3の軸に沿った保証質量のモータ周波数での振動を機械的に増幅するためには、ピックオフ固有共振周波数は、所定のモータ固有共振周波数の近傍であって、同じ周波数ではないことが好ましい。例えば、ピックオフ固有共振周波数は、通常、所定のモータ固有共振周波数から1キロヘルツまたは2キロヘルツだけ離れている。

30

【0006】

音叉ジャイロスコープが第1の軸に沿って、所定の周波数で変化する回転速度で回転する場合、保証質量に掛かるコリオリの力は、2つの周波数、すなわちモータ周波数に所定の周波数を加えた周波数と、モータ周波数から所定の周波数を減じた周波数で同時に生成される。したがって保証質量の運動は、これらの2つの周波数で同時に生じる。この運動を検出し、かつ、復調基準のためのモータ周波数を有する信号を使用して復調することにより、所定の周波数の信号が回復される。速度入力すなわち第1の軸の周りの回転速度と、特定の周波数を関数としたこの構造の復調出力との間の伝達関数は、(1)周波数を関数とした、応答が一度変調周波数すなわちモータ周波数にゼロ周波数シフトしたピックオフモード応答に、(2)周波数を関数とした、応答が一度マイナス変調周波数すなわち大きさがモータ周波数に等しい負の値にゼロ周波数シフトしたピックオフモード応答をプラスした合計の半分である。したがって、特定の周波数がモータモード固有共振周波数とピックオフモード固有共振周波数の差に等しい場合、以下で説明するように、ピックオフモードQに応じて大きな応答が存在する。残念なことには、ピックオフ共振は、あいにく大きなQ、例えば100,000を有している。この大きなピックオフQは、入力速度伝達関数のピークがジャイロスコープの意図する入力速度帯域幅の外側になるように音叉ジャイ

40

50

ロスコーブを設計しなければならないことを意味している。また、極めて大きな信号レベルに起因する飽和から処理エレクトロニクスを保護するためには、厳格な対策を施し、モータモード固有共振周波数とピックオフモード固有共振周波数の差に等しい周波数の速度入力からジャイロスコーブを保護しなければならない。

【0007】

したがって、第3の軸に沿ったピックオフ固有共振周波数における運動に対するピックオフ共振の有害な影響を緩和するためには、ピックオフ固有共振周波数における保証質量の運動と結合したピックオフQを小さくすることが望ましい。残念なことには、ピックオフQを小さくするための従来の試行には、モータQをも小さくするという欠点がある。例えば、ピックオフQを小さくするために、超小型機械慣性センサを収納しているハウジング内の大気ガス圧が高くなっているが、ガス圧を高くすることによってピックオフQが小さくなる一方で、モータQも小さくなっている。したがって、残念なことには、保証質量を同じ程度に振動させるための余計なエネルギーを必要としている。

10

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

したがって、ピックオフQが小さく、かつ、比較的大きいモータQを維持している、超小型機械音叉ジャイロスコーブなどの超小型機械慣性センサが提供される。したがって、本発明による超小型機械慣性センサは、所定のモータ周波数における応答を実質的に変更することなく、ピックオフ固有共振周波数における減衰が大きくなっている。したがって、本発明による超小型機械慣性センサは、センサの有効帯域幅の外側の周波数の入力回転速度による飽和の影響を受け難くなっている。

20

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明による超小型機械慣性センサは、第1の軸すなわち入力軸の周りの回転を検知するようになされている。この超小型機械慣性センサは、機械接地に動作接続された第1および第2の保証質量を備えている。例えば、この保証質量は、通常、基板とは間隔を隔てており、該基板に機械的に接続されている。保証質量は、第1の軸に対して実質的に直角をなす第2の軸に沿って振動するようになされている。また、保証質量は、第1の軸の周りの回転によって、第1および第2の軸に対して実質的に直角をなす第3の軸に沿って移動することができる。また、超小型機械慣性センサは、個々の保証質量と少なくとも部分的に整合した2つのピックオフプレートを備えている。ピックオフプレートの各々は、第3の軸に沿った保証質量の運動によって変化するギャップによって個々の保証質量と間隔を隔てている。また、超小型機械慣性センサは、個々のピックオフプレートに電気接続された、ピックオフプレートに電荷を提供するための電圧源を備えている。ピックオフプレートと保証質量の間のギャップが変化する際の、個々のピックオフプレートを含んだ各電気回路内の電荷の移動を測定することにより、ピックオフプレートと保証質量の間の容量結合の測値が得られ、その測値から、第3の軸に沿った保証質量の運動の測値が得られ、延いては第1の軸の周りの超小型機械慣性センサの回転の測値を得ることができる。

30

【0010】

本発明によれば、超小型機械慣性センサは、さらに、電圧源と個々のピックオフプレート間に直列に配置された、超小型機械慣性センサのピックオフ共振の減衰を大きくするための抵抗素子を備えている。一実施形態では、この抵抗素子は、例えばピックオフ共振のQが1,000を超えないように選択されている。有利なことには、この抵抗素子によって、所定のモータ周波数すなわち保証質量が第2の軸に沿って振動する所定の周波数における保証質量の共振の減衰が大きくなることはない。これは、保証質量が第2の軸に沿って移動する際に、個々の保証質量と個々のピックオフプレート間の容量が変化せず、したがってこの運動によっては抵抗器に電流が流れないことによるものである。したがって、この抵抗素子は、10キロオームと10メガオームの間のサイズにすることができ、有利な一実施形態では1メガオームである。

40

50

【0011】

また、超小型機械慣性センサは、複数の駆動電極を備えることもできる。したがって、この実施形態の個々の保証質量は、駆動電極に印加される電氣的刺激に、第2の軸に沿った個々の保証質量の振動が含まれるよう、駆動電極とインターディジタル化された複数の被駆動電極を支えている。

【0012】

抵抗素子を組み込むことにより、所定のモータ固有共振周波数における共振の減衰に重大な悪影響を及ぼすことなく、超小型機械慣性センサのピックオフ共振の減衰を大きくすることができる。つまり、超小型機械慣性センサのモータQを大きく減少させることなく、ピックオフ共振のQを例えば1,000以下に実質的に小さくすることができる。したがって、ピックオフ共振によって、第1の軸の周りの一定速度の回転による第3の軸に沿った保証質量のモータ周波数における振動の増幅が継続されるが、ピックオフQによって、モータ固有共振周波数とピックオフ固有共振周波数の差に近い周波数で変化する回転速度による、第3の軸に沿った保証質量の振動が極端に大きくなることはない。

10

【0013】

以上、本発明についてその概要を説明したが、次に添付の図面を参照して説明する。添付の図面は、必ずしもスケール通りには描かれていない。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

以下、本発明について、本発明による好ましい実施形態を示した添付の図面を参照してより詳細に説明するが、本発明は、多くの様々な形態で具体化することが可能であり、本明細書において示す実施形態を、本発明をそれらに限定するものとして捕えてはならない。そうではなく、これらの実施形態は、本発明を余すところなく完全に開示するためのものであり、また、本発明の範囲を当分野の技術者に完全に伝えるためのものである。同一の番号は、全図を通して同一のエレメントを表している。

20

【0015】

本発明によれば、改良型超小型機械慣性センサ10が提供される。当分野の技術者には明らかであるように、本発明による超小型機械慣性センサには様々な構成を持たせることができるが、図1にその一実施例を示す音叉ジャイロスコープ構成に関連して、本発明による超小型機械慣性センサを説明する。しかしながら、本発明による超小型機械慣性センサには、参照によりそのすべての内容が本明細書に組み込まれている、Jonathan J. Bernsteinらに対する米国特許第5,249,855号に示されている構成など、他の音叉ジャイロスコープ構成が含まれていることを理解されたい。

30

【0016】

図1に示すように、超小型機械慣性センサ10は、ガラス基板などの基板12を備えている。基板12は、基板上に懸垂された保証質量構造をサポートしている。図に示す実施形態では、保証質量構造は、基板に対して懸垂され、かつ、基板および互いの両方に対して間隔を隔てた第1および第2の保証質量14を備えている。保証質量は、様々な方法で基板に対して懸垂することができるが、図に示す実施形態の超小型機械慣性センサは、基板から外側に向かって、すなわち上側に向かって展開し、かつ、1つまたは複数のビーム17によって保証質量に接続された一对の枕木ビーム構造16を備えている。当分野の技術者に知られているように、通常、保証質量構造は、米国特許第5,920,012号および第5,349,855号により詳細に記載され、かつ、当分野の技術者に知られているように、多数のドライエッチング工程およびウェハ溶解エッチングプロセス工程によって統合形成されている。

40

【0017】

保証質量14を基板に対して懸垂させることにより、座標系が画定される。この点に関して、超小型機械慣性センサ10は、超小型機械慣性センサの第1の軸の周りの回転を測定することができるように、第1の軸すなわち入力軸18を画定している。以下で説明するように、保証質量は、第1の軸に対して直角をなす第2の軸20に沿って振動するように

50

駆動され、それにより面内運動が生成される。また、保証質量を基板に対して懸垂させることにより、超小型機械慣性センサの第1の軸の周りの回転に応じて、第1および第2の両方の軸に対して直角をなす第3の軸に沿って保証質量を移動させることができる。この第3の軸は図示されていないが、図1のページに向かって入り、かつ、図1のページから出ていく方向であるため、この軸に沿った運動を面外運動と呼んでいる。

【0018】

保証質量14を第2の軸20に沿って振動させるために、図に示す実施形態の超小型機械慣性センサ10は、保証質量の外縁に隣接した複数の駆動電極22を備えている。したがって、保証質量は、保証質量の外縁から外側に向かって展開した被駆動電極24を支えていることが好ましい。図に示すように、駆動電極および被駆動電極は、網の目状にして駆動電極および被駆動電極をインターディジタル化することができる櫛形構造を形成するべく、いずれも概ね歯の形をしている。同様に、超小型機械慣性センサは、第1の保証質量と第2の保証質量の間に配置された、インターディジタル化された検知電極23および25を備えている。この点に関して、検知電極25は、保証質量によって支えられ、かつ、保証質量の内縁から外側に向かって展開しており、中央に配置された、共通サポートから外側に向かって展開している複数の検知電極23とインターディジタル化されている。

10

【0019】

例えば、2つの相対する極性の間で振動させることによって駆動電極22を駆動し、かつ、検知電極23を一定駆動し、さらに、適切な回路を使用して共通サポートおよび駆動電極を通して流れる検知電荷出力信号を接続することによって、当分野の技術者に知られている自己発振器ループを構築し、それを使用して駆動電極22および検知電極23に適切な電氣的刺激を印加することにより、保証質量14を第2の軸20に沿って振動させることができる。詳細には、駆動モードすなわちモータモードの固有共振周波数に等しい所定のモータ周波数で保証質量を振動させることができる。

20

【0020】

このように構成することにより、第1の軸18の周りを超小型機械慣性センサ10が回転することによって保証質量14が振動し、さらに第3の軸に沿って、つまり基板12に向かう方向あるいは基板12から遠ざかる方向に振動または移動する。超小型機械慣性センサは、さらに、第3の軸に沿った保証質量のこの振動を測定するためのセンサシステムを備えている。このセンサシステムには、基板上または基板中に配置され、かつ、個々の保証質量と少なくとも部分的に整合したピックアッププレート26が含まれている。保証質量を基板に対して懸垂させることにより、個々のピックアッププレートは、保証質量の第3の軸に沿った運動によって変化するギャップによって、個々の保証質量から間隔を隔てている。保証質量は一括して電氣的に接地されているが、ピックアッププレートは、通常、金属などの導電材料で形成されており、電荷がピックアッププレート上に維持されている。この点に関して、超小型機械慣性センサは、さらに、個々のピックアッププレートに一括して接続された、個々のピックアッププレートに電荷を提供するための電圧源28を備えている。ピックアッププレートを含んだ電気回路すなわち検知回路内の電荷の移動すなわち電流を測定することにより、個々の保証質量の運動の測値が得られ、延いては第1の軸の周りの超小型機械慣性センサの回転の測値を得ることができる。

30

40

【0021】

超小型機械慣性センサ10の第1の軸18の周りの一定速度の回転による個々の保証質量14の第3の軸に沿った運動は、保証質量が第2の軸20に沿って振動するべく駆動される所定のモータ周波数における運動であるが、超小型機械慣性センサの構成は、さらに、第3の軸に沿った、ピックアップ固有共振周波数と呼ばれる、モータ固有共振周波数に近い、しかし同じ周波数ではない固有共振周波数を確立している。この点に関して、ピックアップ固有共振周波数は、通常、所定のモータ周波数から1キロヘルツまたは2キロヘルツを超えてオフセットしていない。上で説明したように、従来の超小型機械慣性センサの構成は、ピックアップ共振すなわちピックアップ固有共振周波数における共振が、あいにく、例えば100,000という大きいQを有するような構成になっている。モータQを大きく減

50

小さくすることなくピックアップQを実質的に小さくするために、本発明による超小型機械慣性センサは、電圧源28と個々のピックアッププレート26の間に直列に配置された、抵抗器などの抵抗素子30を備えている。以下、図2を参照して、抵抗素子によるピックアップQの低減について説明する。

【0022】

個々の保証質量14と下層ピックアッププレート26の関係は、図2に示すように表現することができる。この点に関して、保証質量は質量Mを有しており、スプリングKおよびダンパDを介して機械接地に接続されている。また、保証質量は、力、すなわちギャップの両端間の電界による力 F_c および超小型機械慣性センサ10の第1の軸18の周りの回転によって生成されるコリオリの力による力Fを受けている。また、保証質量は、電氣的に接地されている。図に示すように、ピックアッププレートも機械的に接地され、電荷Qを維持している。図に示すように、ピックアッププレートは、さらに電圧源Eに接続されている。本発明によれば、抵抗素子Rは、ピックアップQを小さくするべく、電圧源とピックアッププレートの間に配置されている。最後に、ギャップの幅はzであり、また、容量はC、ギャップ電圧は E_c である。

10

【0023】

以下の数学解析を使用して、抵抗素子Rによる超小型機械慣性センサ10のピックアップQの低減について例証する。この点に関して、以下の式には電氣的な状況が示されており、ピックアッププレート26上の電荷Qは、独立変数Eの関数として表されている。

【0024】

20

【数1】

$$Q = CE_c$$

$$E_c = E - R\dot{Q}$$

$$\dot{Q} + (RC)^{-1}Q = R^{-1}E$$

【0025】

一般的に、yは、時間に対するyの導関数を表している。上の式では、例えば

【0026】

【数2】

30

$$\dot{Q}$$

【0027】

は、時間に対するQの導関数を意味している。

また、以下の式は、音叉ピックアップモードの機械的な状態を定義しており、音叉ピックアップモードは、単一スプリング-質量系として表されている。Fはコリオリの力を表し、 F_c は、ピックアップコンデンサ内の電界からの力を表している。

【0028】

【数3】

$$M\ddot{z} + D\dot{z} + K(z - z|_{\text{forces}=0}) = -F - F_c$$

40

【0029】

$z|_{\text{forces}=0}$ は、保証質量14に力が印加されていない状態におけるギャップ値である。

したがって、電界によって保証質量14に印加される力は、

【0030】

【数4】

$$F_c = \frac{1}{2}Q^2 \frac{d}{dz}C^{-1}$$

50

【 0 0 3 1 】

で定義され、したがって機械的な状況を定義する式は、次のように書き直すことができる。

【 0 0 3 2 】

【 数 5 】

$$M\ddot{z} + D\dot{z} + K(z - z|_{\text{forces}=0}) = -F = -\frac{1}{2}Q^2 \frac{d}{dz}C^{-1}$$

【 0 0 3 3 】

得られた2つの式は、2つの未知の従属変数Qおよびzを提供している。残念なことには、これらの式には従属変数の非線形関数が含まれているため、式に対する摂動解を計算しなければならない。この点に関して、ベースライン励起 E_0 および F_0 によるQおよびzに対するベースライン解（すなわち Q_0 および z_0 ）は、既知であることが仮定されている。その結果、励起摂動EおよびFによる応答摂動Qおよびzは、以下に示すように決定される。

【 0 0 3 4 】

本出願においては重要な意味をなさないフリンジング、ティルティングおよびカップリングを無視すると、ギャップ幅zの摂動による容量Cに対する影響は、以下のように定義される。

【 0 0 3 5 】

【 数 6 】

$$C^{-1} = \frac{z}{C_0 z_0}$$

$$\frac{d}{dz}C^{-1} = \frac{1}{C_0 z_0}$$

$$\delta C^{-1} = \frac{\delta z}{C_0 z_0}$$

$$\delta \frac{d}{dz}C^{-1} = 0$$

【 0 0 3 6 】

電気的な状況を定義している式を摂動させ、かつ、以上の式に基づいて代入することにより、

【 0 0 3 7 】

【 数 7 】

$$\delta \dot{Q} + R^{-1} \delta C^{-1} C_0 + R^{-1} C_0^{-1} \delta Q = R^{-1} \delta E$$

$$\delta \dot{Q} + R^{-1} C_0^{-1} \delta Q + (R C_0 z_0)^{-1} Q_0 \delta z = R^{-1} \delta E$$

【 0 0 3 8 】

が得られる。

同様に、機械的な状況を定義している式を摂動させ、かつ、以上の式に基づいて代入することにより、

【 0 0 3 9 】

【 数 8 】

$$M\delta\ddot{z} + D\delta\dot{z} + K\delta z = -\delta F - Q_0 C_0^{-1} z_0^{-1} \delta Q$$

$$Q_0 C_0^{-1} z_0^{-1} \delta Q + M\delta\ddot{z} + D\delta\dot{z} + K\delta z = -\delta F$$

【 0 0 4 0 】

10

20

30

40

50

が得られる。

これにより、摂動従属変数 Q および z に対する線形微分方程式が得られる。また、ベースライン値 Q_0 、 z_0 、 E_0 および F_0 は、一定の時間になるべく制限されていないため、この線形微分方程式は、時間変動係数を有することができる。しかしながら、瞬時について言えばベースライン値は一定であり、したがって式の解が簡略化される。この点に関して、ラプラス変換の後、次の行列式で、電気的状況および機械的状況を表す最終摂動式を表すことができる。

【 0 0 4 1 】

【 数 9 】

$$\begin{bmatrix} s+(RC_0)^{-1} (RC_0z_0)^{-1} Q_0 & \delta Q \\ (C_0z_0)^{-1} Q_0 Ms^2 + Ds + K & \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^{-1}\delta E \\ -\delta F \end{bmatrix}$$

10

【 0 0 4 2 】

したがって、これらの式の解は、

【 0 0 4 3 】

【 数 1 0 】

$$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} Ms^2 + Ds + K & -(RC_0z_0)^{-1} Q_0 \\ -(C_0z_0)^{-1} Q_0 & s + (RC_0)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^{-1}\delta E \\ -\delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta Q \\ \delta z \end{bmatrix}$$

20

【 0 0 4 4 】

であり、上式で、

【 0 0 4 5 】

【 数 1 1 】

$$\Delta = (Ms^2 + Ds + K)(s + (RC_0)^{-1}) - Q_0^2 R^{-1} (C_0z_0)^{-2}$$

【 0 0 4 6 】

である。

重要な関数は、保証質量 1 4 に作用するコリオリの力によって移動する電荷として定義される Q / F であり、次のように定義される。

30

【 0 0 4 7 】

【 数 1 2 】

$$\frac{\delta Q}{\delta F} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{(MRC_0)s^3 + (DRC_0 + M)s^2 + (KRC_0 + D)s + (K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2})}$$

【 0 0 4 8 】

抵抗素子 R を変化させることによる、共振に近い応答に対する効果を決定するためには、極すなわち分母のゼロを調査することが有効である。根軌跡手法によれば、極は、式 = 0、すなわち

40

【 0 0 4 9 】

【 数 1 3 】

$$0 = 1 + R \times \frac{C_0 s (Ms^2 + Ds + K)}{Ms^2 + Ds + K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2}}$$

【 0 0 5 0 】

を満足する s 値に位置している。

R を掛け合わせた有理 s 関数は、通常根軌跡問題のコンテキストにおいてはオープンループ伝達関数 (O L T F) と呼ばれている。このゼロは、 $R = 0$ に対する O L T F 極であり、 R の増加に伴って、O L T F の偏角が 180° である s 平面経路に沿って O L T F ゼ

50

口に向かって移動する。O L T F は、s 平面の起点にゼロを有しており、また、ピックアップ固有共振周波数である、j 軸に極めて近い約 18 kHz にゼロを有している。O L T F 極は、オープンループゼロより数百ヘルツ低い周波数に位置している。R がゼロから無限大に増加すると、Q / F の極は、s 平面の左側の半円に沿って、O L T F 極から O L T F ゼロへ移動する。したがって、必要に応じて抵抗素子 30 を検知回路に挿入し、ピックアップ共振の減衰を大きくすることができる、

次の式は、抵抗素子 30 によってピックアップ共振の減衰が大きくなる度合を説明するべく定義したもので、ピックアップ共振「Q」は、 Q_r で定義されている。

【0051】

【数14】

$$Q_r = \frac{\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=j\omega_{\text{pickoff peak}}}}{\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=0}}$$

10

【0052】

Q / F がピークになる周波数を決定するために、Q / F の分母に D および R を含む項が、式の中に存在している他の項に対して小さいことが安全に仮定されており、したがってこの事例では無視することができる。したがってピーク Q / F 値は、 s^2 および s^0 分母項が相殺される部分、すなわち s が、 r が、

20

【0053】

【数15】

$$\omega_r = \sqrt{M^{-1}(K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2})}$$

【0054】

で定義される $j \omega_r$ に等しい部分で生じることになる。この点に関して、D および / または R 中の二次項を無視することにより、

【0055】

【数16】

$$\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=j\omega_r} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{(D + R Q_0^2 z_0^{-2})(j\omega_r)}$$

30

$$\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=0} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{M \omega_r^2}$$

$$Q_r = \frac{M \omega_r}{D + R Q_0^2 z_0^{-2}}$$

【0056】

が得られる。

40

したがって、本発明の仮説実施形態では、変数は以下のように定義されている。

M = 2 . 5 2 E - 9 k g
 K = 3 2 . 2 N / m
 z₀ = 2 . 5 E - 6 m
 C₀ = 5 0 0 E - 1 5 F
 Q₀ = C₀ E₀
 E₀ = 5 V
 D = 2 . 8 5 E - 6 N / m / s
 Q_r = 1 0 0 , 0 0 0 (ただし R = 0)

【0057】

50

図3は、上記のように定義された変数を有する本発明の例示的实施形態による様々なサイズの抵抗素子30の効果をグラフで示すべく、素子Rの抵抗を関数としたピックオフ共振の Q_r をプロットしたものである。図に示すように、また、上で定義したように、抵抗がない場合のピックオフ共振の Q_r は100,000である。この点に関して、抵抗が最小(すなわち約1k)の場合、ピックオフ共振の Q_r に対する抵抗の効果は極めて小さいが、抵抗が約10kに増加すると、ピックオフ共振は約20,000まで減少している。抵抗がさらに増加して約300kオームになると、ピックオフ共振は約1000まで有利に減少している。

【0058】

上で説明したように、保証質量14に対するコリオリの力の印加による電荷の大きな運動として定義される、モータ周波数での大きなピックオフ共振は、第1の軸18の周りの一定速度の回転によるものであることが望ましい。一定速度の回転による保証質量の第3の軸に沿った振動に所望の機械利得を提供するためには、モータ固有共振周波数とピックオフ固有共振周波数が、わずかに1キロヘルツまたは2キロヘルツだけ離れていることが好ましい。一定の回転速度における超小型機械慣性センサ10の回転の検出に有利である一方で、正弦波回転速度の周波数がモータ固有共振周波数とピックオフ固有共振周波数の周波数差に近い周波数になると、モータ固有共振周波数とピックオフ固有共振周波数の間のこの比較的小さい分離は、従来の音又ジャイロスコープの高ピックオフQと共に不利である。生成されるコリオリの力は、超小型機械慣性センサの回転速度が変化する周波数で変調されたモータ周波数成分を有している。これらの側波帯の1つとピックオフ固有共振周波数における高ピックオフQが一致すると、望ましくない大きな応答が生成されるが、電圧源28と個々のピックオフプレート26の間に抵抗器30を組み込むことにより、ピックオフQが実質的に減少し、それにより、超小型機械慣性センサが回転している周波数が、たとえモータ固有共振周波数とピックオフ固有共振周波数の差に近い周波数であっても、ピックオフ共振が保証質量の振動および得られる超小型機械慣性センサの回転速度の測値に悪影響を及ぼすことはない。抵抗器を追加することによって、不利益をもたらすモータQの減少を伴うことなく、ピックオフQが有利に減少する。

【0059】

図4は、様々な周波数における、コリオリの力に対するピックオフ電荷の応答の大きさ(dQ/dF)を示したものである。図4に示す曲線は、上で引き出された、上に示したパラメータに対する式をプロットしたものである。図に示すように、抵抗器30の値が1メガオームの場合、ピークピックオフモード応答は、51dBだけ小さくなっており、より低い周波数での応答は、ほとんど変化していない。抵抗器の値が大きくなると、望ましいピーク減少がもたらされるが、より低い周波数での応答の減少が犠牲になっている。

【0060】

ピックオフQを適切に漸減させることにより、本発明による超小型機械慣性センサ10は、第1の軸18の周りの超小型機械慣性センサの意図したセンサ帯域幅内の周波数での回転による第3の軸に沿った個々の保証質量14の振動の機械的な増幅を継続することができるが、超小型機械慣性センサの回転速度が、モータ周波数とピックオフ固有共振周波数の差に近い周波数で変化する実施例では、ピックオフQを小さくすることにより、超小型機械慣性センサの動作を継続することができ、保証質量を過度に振動させる不利が生じることはない。

【0061】

当分野の技術者には、以上の説明および関連する図面の中で示した教示の利益を有する、本発明に属する、本発明に対する多くの改変および他の実施形態が思い浮かべられよう。したがって、本発明を開示した特定の実施形態に限定してはならないこと、また、改変および他の実施形態が特許請求の範囲の各請求項の範疇に含まれるべきことを理解されたい。本明細書には特定の用語が使用されているが、それらは包括的かつ記述的な意味合いで使用されたものに過ぎず、何ら制限を目的としたものではない。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 6 2 】

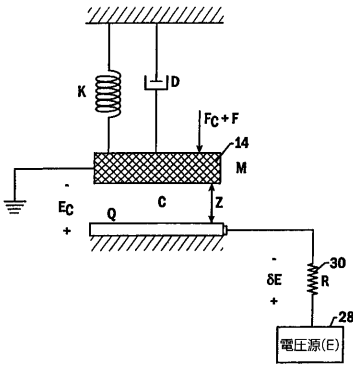
【 図 1 】 本発明の一実施形態による超小型機械慣性センサの平面図である。

【 図 2 】 保証質量と個々のピックオフプレートとの関係を示す、図 1 の超小型機械慣性センサの一部を図式的に示した図である。

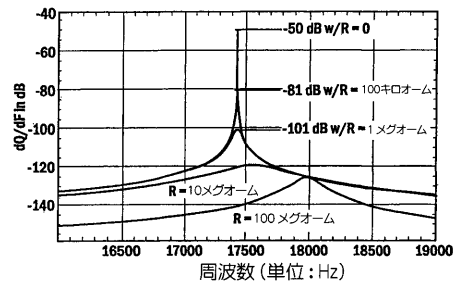
【 図 3 】 抵抗素子を開数としたピックオフQを示すグラフである。

【 図 4 】 サイズが0オームから100メガオームの範囲に渡って異なる抵抗素子に対する、コリオリの力によって移動する電荷を周波数を関数として測定した、超小型機械慣性センサの応答を示すグラフである。

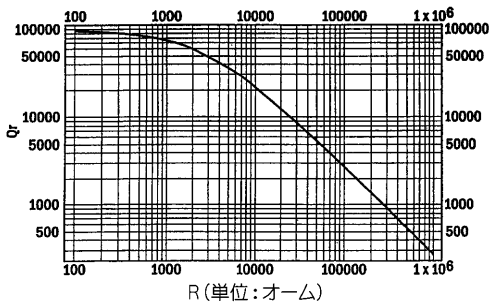
【 図 2 】



【 図 4 】



【 図 3 】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau



(43) International Publication Date
27 March 2003 (27.03.2003)

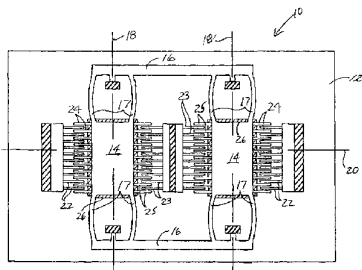
PCT

(10) International Publication Number
WO 03/025506 A1

- (51) International Patent Classification: G01C 19/56
- (21) International Application Number: PCT/US02/29495
- (22) International Filing Date: 18 September 2002 (18.09.2002)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 09/957,425 20 September 2001 (20.09.2001) US
- (71) Applicant: HONEYWELL INTERNATIONAL INC.
[US/US]; 101 Columbia Avenue, P.O. Box 2245, Morristown, NJ 07960 (US).
- (81) Designated States (national): AF, AG, AI, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GI, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (regional): ARIPPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

- (72) Inventor: PINSON, John, C.; 5069 Crescent Drive, Anaheim, CA 92807 (US).
- (74) Agents: CRISS, Roger, H. et al.; Honeywell International Inc., 101 Columbia Avenue, P.O. Box 2245, Morristown, NJ 07960 (US).
- Published: — with international search report
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: MICROMECHANICAL INERTIAL SENSOR HAVING INCREASED PICKOFF RESONANCE DAMPING



(57) Abstract: A micromechanical inertial sensor (10) is provided having a reduced pickoff Q, while maintaining a high motor Q. The micromechanical inertial sensor includes a pair of proof masses (14) and aligned pickoff plates (26). Each pickoff plate is spaced from the respective proof mass by a gap that varies in response to out-of-plane movement of the proof mass. The micromechanical inertial sensor also includes at least one voltage source (28) for providing charge to the pickoff plates. By measuring the movement charge in each electrical circuit that includes a pickoff plate as the gap between the pickoff plate and the respective proof mass varies, a measurement of the rotation of the micromechanical inertial sensor about an input axis may be obtained. The micromechanical inertial sensor further includes resistive elements (30) disposed in series between the voltage source and each pickoff plate to increase the pickoff resonance damping of the micromechanical inertial sensor.



WO 03/025506 A1

WO 03/025506

PCT/US02/29495

MICROMECHANICAL INERTIAL SENSOR HAVING
INCREASED PICKOFF RESONANCE DAMPING

FIELD OF THE INVENTION

5 The present invention relates generally to micromechanical inertial sensors and, more particularly, to micromechanical inertial sensors, such as micromechanical tuning fork gyroscopes, having increased pickoff resonance damping.

BACKGROUND OF THE INVENTION

10 Micromechanical inertial sensors are increasingly being utilized to detect rotational motions in aircraft, automobiles and other applications because of their ruggedness and small size. For example, in the automotive industry, micromechanical inertial sensors are utilized for leveling controls, anti-spin systems, anti-skid systems and navigation purposes. In the military industry, micromechanical inertial sensors are
15 utilized for missile guidance, smart munitions, tracker buoys, autonomous vehicles, land navigation as well as a myriad of other applications. Moreover, with respect to consumer goods, micromechanical inertial sensors are utilized in virtual reality systems, camcorders, GPS receivers, and the like. In addition to their ruggedness and small size, micromechanical inertial sensors also offer potentially significant cost advantages over
20 competing technologies.

One advantageous micromechanical inertial sensor is a tuning fork gyroscope adapted to sense rotation about a first or input axis. A tuning fork gyroscope generally includes a pair of proof masses driven to vibrate along a second axis substantially perpendicular to the first axis at a predetermined motor frequency. As a result of the
25 manner in which the proof masses are situated with respect to an underlying substrate, movement along the second axis is typically referred to as in-plane motion. In response to rotation about the first axis, the proof masses are subjected to a Coriolis force which, in turn, causes the proof masses to move along a third axis which is substantially perpendicular to both the first and second axes, thereby producing out-of-plane motion.
30 The tuning fork gyroscope also includes pickoff plates or sense electrodes aligned with and spaced from each proof mass such that a gap is defined between each proof mass and the respective pickoff plate. Each pickoff plate is electrically connected to a source of charge, such as a voltage source. As each proof mass moves along the third axis,

WO 03/025506

PCT/US02/29495

such as in response to Coriolis forces, the gap between the proof mass and the respective pickoff plate will vary, thereby altering the capacitance between the proof mass and the respective pickoff plate and causing charge to move in the electrical circuit that includes the pickoff plate, i.e., in the sense circuitry. By measuring the movement of charge in the sense circuitry, the tuning fork gyroscope can provide a measurement of the capacitance between each proof mass and the respective pickoff plate and, in turn, angular rate of rotation of the tuning fork gyroscope about the first or input axis. Further details regarding tuning fork gyroscopes are provided by U.S. Patent No. 5,920,012 to John C. Pinson, the contents of which are incorporated herein in their entirety.

In order to permit the out-of-plane motion, the proof masses are generally suspended above a substrate such that even though the proof masses are mechanically connected to the substrate, each proof mass is capable of vibration or other movement relative to the substrate. As a result of the attachment of the proof masses to the substrate, the proof masses will have both a motor natural resonant frequency for movement along the second axis and a pickoff natural resonant frequency for motion along the third axis. A tuning fork gyroscope also has a motor resonance quality factor (Q) that relates the energy required to drive the vibration of the proof mass along the second axis to the resulting movement of the proof mass at the motor frequency. In order to minimize the energy required to drive the proof mass, the motor Q is preferably as large as possible.

In response to a constant rate of rotation about the first axis, each proof mass will vibrate along the third axis at the motor frequency. In order to mechanically amplify the vibration of the proof masses along the third axis at the motion frequency, the pickoff natural resonant frequency is preferably near, but not equal to, the predetermined motor natural resonant frequency. Typically, for example, the pickoff natural resonant frequency is separated from the predetermined motor natural resonant frequency by one or two kilohertz.

If the tuning fork gyroscope rotates about the first axis at a rate of rotation that varies at a predetermined frequency, Coriolis force on the proof masses is generated simultaneously at two frequencies; namely, motor frequency plus the predetermined frequency, and motor frequency minus the predetermined frequency. Proof mass motion results at these two frequencies simultaneously. When this motion is detected and demodulated using a signal having the motor frequency for the demodulation

WO 03/025506

PCT/US02/29495

reference, a signal at the predetermined frequency is recovered. The transfer function between the rate input, i.e., the rate of rotation about the first axis, and the demodulated output of this arrangement, as a function of the particular frequency, is one half the sum of: (1) the pickoff mode response as a function of frequency once the response has
5 been zero frequency shifted to the modulation frequency, i.e., the motor frequency, plus (2) the pickoff mode response as a function of frequency once the response has been zero frequency shifted to minus the modulation frequency, i.e., a negative value equal in magnitude to the motor frequency. Thus there is a large response, depending on the pickoff mode Q as described below, when the particular frequency equals the difference
10 between the motor mode and pickoff mode natural resonant frequencies. Unfortunately, the pickoff resonance has an undesirably large Q, such as 100,000. This large pickoff Q means that the tuning fork gyroscope must be designed such that the input rate transfer function peaks outside the intended input rate bandwidth of the gyroscope. Also, stringent measures must be taken to protect the gyroscope from rate inputs at
15 frequencies equal to the difference between motor mode and pickoff mode natural resonant frequencies, so as to protect the processing electronics from saturation resulting from the very large signal levels.

In order to reduce the deleterious impact of the pickoff resonance on the movement along the third axis at the pickoff natural resonant frequency, it would
20 therefore be desirable to reduce the pickoff Q associated with the movement of the proof mass at the pickoff natural resonant frequency. Unfortunately, prior attempts to reduce the pickoff Q have also disadvantageously reduced the motor Q. For example, the gas pressure of the atmosphere within the housing that contains the micromechanical inertial sensors has been increased in order to reduce the pickoff Q. While the increased
25 gas pressure does reduce the pickoff Q, the motor Q is also reduced, thereby disadvantageously requiring additional energy to cause the proof mass to vibrate to the same degree.

SUMMARY OF THE INVENTION

30 A micromechanical inertial sensor, such as a micromechanical tuning fork gyroscope, is therefore provided that has a reduced pickoff Q, while still maintaining a relatively high motor Q. As such, the micromechanical inertial sensor of the present invention will have an increased damping at the pickoff natural resonant frequency

WO 03/025506

PCT/US02/29495

without substantially altering the response at a predetermined motor frequency. Thus, the micromechanical inertial sensor of the present invention is less susceptible to saturation from input rates of rotation at frequencies outside the useful bandwidth of the sensor.

5 The micromechanical inertial sensor is adapted to sense rotation about a first or input axis. The micromechanical inertial sensor includes first and second proof masses operably connected to mechanical ground. For example, the proof masses are typically spaced apart from and mechanically connected to a substrate. The proof masses are adapted to vibrate along a second axis substantially orthogonal to the first axis. The
10 proof masses are also moveable along a third axis substantially orthogonal to the first and second axes in response to rotation about the first axis. A micromechanical inertial sensor also includes two pickoff plates in at least partial alignment with respective proof masses. Each pickoff plate is spaced from the respective proof mass by a gap that varies in response to movement of the proof mass along the third axis. The
15 micromechanical inertial sensor also includes voltage sources electrically connected to respective pickoff plates for providing charge to the pickoff plates. By measuring the movement of charge in each electrical circuit that includes a respective pickoff plate as the gap between the pickoff plate and the proof mass varies, a measurement of the capacitive coupling between the pickoff plate and the proof mass is obtained from
20 which a measure of the movement of the proof mass along the third axis and, in turn, a measure of the rotation of the micromechanical inertial sensor about the first axis may be obtained.

 According to the present invention, the micromechanical inertial sensor further includes resistive elements disposed in series between the voltage sources and each of
25 the pickoff plates to increase the damping of the pickoff resonance of the micromechanical inertial sensor. In one embodiment, for example, the resistive element is selected such that the pickoff resonance has a Q of no more than 1,000. Advantageously, the resistive element causes no increase in damping of the resonance of the proof masses at the predetermined motor frequency, i.e., at the predetermined
30 frequency at which the proof mass vibrates along the second axis. This is because the capacitance between each proof mass and the respective pickoff plate does not vary as the proof mass moves along the second axis, thus no current is caused to flow in the

WO 03/025506

PCT/US02/29495

resistors with this motion. As such, the resistive element may be sized to between 10 kilohms and 10 megohm and, in one advantageous embodiment, is one megohm.

The micromechanical inertial sensor can also include a plurality of drive electrodes. Correspondingly, each proof mass of this embodiment can carry a plurality of driven electrodes that are interdigitated with the drive electrodes such that electrical stimuli applied to the drive electrodes induces the vibration of each proof mass along the second axis.

By incorporating a resistive element, the pickoff resonance damping of the micromechanical inertial sensor can be increased without significantly adversely impacting the damping of the resonance at the predetermined motor natural resonant frequency. In other words, the Q of the pickoff resonance is substantially decreased, such as to 1,000 or less, without significantly decreasing the motor Q of the micromechanical inertial sensor. Thus, the pickoff resonance will continue to amplify vibration of the proof masses along the third axis at the motor frequency, such as in response to a constant rate of rotation about the first axis. However, the pickoff Q will not cause excessively large vibrations of the proof masses along the third axis in response to the rates of rotation that vary at a frequencies near the separation between the motor natural resonant frequency and the pickoff natural resonant frequency.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Having thus described the invention in general terms, reference will now be made to the accompanying drawings, which are not necessarily drawn to scale, and wherein:

Figure 1 is a plan view of a micromechanical inertial sensor according to one embodiment of the present invention;

Figure 2 is a graphical representation of a portion of the micromechanical inertial sensor of Figure 1 depicting the relationship of a proof mass and a respective pickoff plate;

Figure 3 is a graph depicting the pickoff Q as a function of the resistive element; and

Figure 4 is a graph depicting a response of a micromechanical inertial sensor as measured in the electrical charge that is moved per Coriolis force as a function of

WO 03/025506

PCT/US02/29495

frequency for resistive elements of different sizes ranging from 0 ohms to 100 megohms.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

5 The present invention now will be described more fully hereinafter with reference to the accompanying drawings, in which preferred embodiments of the invention are shown. This invention may, however, be embodied in many different forms and should not be construed as limited to the embodiments set forth herein; rather, these embodiments are provided so that this disclosure will be thorough and
10 complete, and will fully convey the scope of the invention to those skilled in the art. Like numbers refer to like elements throughout.

An improved micromechanical inertial sensor **10** is provided according to the present invention. As will be apparent to those skilled in the art, the micromechanical inertial sensor of the present invention can have a variety of configurations. However,
15 the micromechanical inertial sensor of the present invention will be described in conjunction with a tuning fork gyroscope configuration, one example of which is depicted in Figure 1. However, it should be understood that the micromechanical inertial sensor of the present invention can include other configurations of tuning fork gyroscopes, such as those configurations depicted by U.S. Patent No. 5,249,855 to
20 Jonathan J. Bernstein et al., the contents of which are incorporated herein in their entirety by reference.

As shown in Figure 1, the micromechanical inertial sensor **10** includes a substrate **12**, such as a glass substrate, which supports a proof mass structure suspended above the substrate. In the illustrated embodiment, the proof mass structure includes
25 first and second proof masses **14** suspended relative to the substrate and spaced apart from both the substrate and one another. While the proof masses may be suspended relative to the substrate in various manners, the micromechanical inertial sensor of the illustrated embodiment includes a pair of cross tie beam structures **16** that extend outwardly or upwardly from the substrate and are connected to the proof masses by
30 means of one or more beams **17**. As known to those skilled in the art, the proof mass structure is typically integrally formed by a number of dry etch and dissolved wafer process steps as described in more detail in U.S. Patent Nos. 5,920,012 and 5,349,855 and as known to those skilled in the art.

WO 03/025506

PCT/US02/29495

As a result of the manner in which the proof masses 14 are suspended relative to the substrate, a coordinate system is defined. In this regard, the micromechanical inertial sensor 10 defines a first or input axis 18 such that rotation of the micromechanical inertial sensor about the first axis can be measured. As described below, the proof masses are driven so as to vibrate along a second axis 20 perpendicular to the first axis, thereby producing in-plane motion. As a result of the suspension of the proof masses relative to the substrate, the proof masses are also adapted to move along a third axis perpendicular to both the first and second axes in response to rotation of the micromechanical inertial sensor about the first axis. The third axis is not depicted, but is directed into and out of the page in Figure 1 such that movement therealong is termed out-of-plane motion.

In order to cause the proof masses 14 to vibrate along the second axis 20, the micromechanical inertial sensor 10 of the illustrated embodiment includes a plurality of drive electrodes 22 adjacent the outer edges of the proof masses. Correspondingly, the proof masses preferably carry driven electrodes 24 extending outwardly from the outer edges thereof. As illustrated, both the drive electrodes and the driven electrodes are generally teeth-like so as to form comb structures that may be meshed such that the drive electrodes and the driven electrodes are interdigitated. Similarly, the micromechanical inertial sensor may include interdigitated sense electrodes, 23 and 25, disposed between the first and second proof masses. In this regard, sense electrodes 25 are carried by the proof masses and extend outwardly from an inner edge thereof so as to be interdigitated with the plurality of centrally located sense electrodes 23 extending outwardly from a common support.

By supplying appropriate electrical stimuli to the drive and sense electrodes 22 and 23 such as by driving the drive electrodes 22 in an oscillatory manner between two opposite polarities, and driving the sense electrodes 23 with a constant, and connecting the sense charge output signal flowing through the common support and the drive electrodes with suitable circuitry so as to make a self-oscillator loop as known to those skilled in the art, the proof masses 14 will vibrate along the second axis 20. In particular, the proof masses will oscillate at a predetermined motor frequency equal to the natural resonant frequency of the drive or motor mode.

As a result of its construction, rotation of the micromechanical inertial sensor 10 about the first axis 18 will cause the vibrating proof masses 14 to also vibrate or move

WO 03/025506

PCT/US02/29495

along the third axis, that is, toward and away from the substrate 12. In order to measure this vibration of the proof masses along the third axis, the micromechanical inertial sensor also includes a sensor system. The sensor system includes pickoff plates 26 disposed on or in the substrate and in at least partial alignment with the respective proof masses. As a result of the suspension of the proof masses relative to the substrate, each pickoff plate is spaced from a respective proof mass by a gap that varies in response to movement of the proof mass along the third axis. While the proof masses are generally electrically grounded, the pickoff plates are typically formed of a conductive material, such as a metal, and a charge is maintained thereupon. In this regard, the micromechanical inertial sensor also includes a voltage source 28 generally connected to each pickoff plate for providing electrical charge to each pickoff plate. By measuring the movement of charge or current in the electrical circuit that includes the pickoff plate, i.e., the sense circuitry, a measure of the movement of the respective proof mass and, in turn, a measure of the rotation of the micromechanical inertial sensor about the first axis can be obtained.

The movement of each proof mass 14 along the third axis in response to a constant rate of rotation of the micromechanical inertial sensor 10 about the first axis 18 is at the predetermined motor frequency at which the proof masses are driven to vibrate along the second axis 20. However, the configuration of the micromechanical inertial sensor also establishes a natural resonant frequency, termed the pickoff natural resonant frequency, along the third axis which is near, but not equal to the motor natural resonant frequency. In this regard, the pickoff natural resonant frequency is typically no more than one or two kilohertz offset from the predetermined motor frequency. As explained above, conventional micromechanical inertial sensors are configured such that the pickoff resonance, i.e., the resonance at the pickoff natural resonant frequency, has an undesirably high Q, such as 100,000. In order to substantially reduce the pickoff Q while not significantly decreasing the motor Q, the micromechanical inertial sensor of the present invention includes a resistive element 30, such as a resistor, disposed in series between the voltage source 28 and each pickoff plate 26. In order to explain the manner in which the resistive element reduces the pickoff Q, reference is made to Figure 2.

The relationship between a respective proof mass 14 and the underlying pickoff plate 26 can be represented as shown in Figure 2. In this regard, the proof mass has

WO 03/025506

PCT/US02/29495

mass M and is connected to mechanical ground through a spring K and a damper D. The proof mass is also subjected to forces, namely, force F_c attributable to the electric field across the gap and a force F due to the Coriolis forces created by rotation of the micromechanical inertial sensors 10 about the first axis 18. Additionally, the proof mass is electrically grounded. As shown, the pickoff plate is also mechanically grounded and maintains an electric charge Q. As shown, the pickoff plate is also connected to a voltage source E. According to the present invention, a resistive element R is disposed between the voltage source and the pickoff plate to reduce the pickoff Q. Finally, the gap has a width z, a capacitance C and a gap voltage E_c .

In order to demonstrate the manner in which the resistive element R lowers the pickoff Q of the micromechanical inertial sensor 10, the following mathematical analysis is provided. In this regard, the electrical situation is set forth in the following equations in which the charge Q upon the pickoff plate 26 is written as a function of the independent variable E:

$$Q = CE_c$$

$$E_c = E - R\dot{Q}$$

$$\dot{Q} + (RC)^{-1}Q = R^{-1}E$$

where, in general terms, \dot{y} means the derivative of y with respect to time. In the above equation, for example, \dot{Q} means the derivative of Q with respect to time.

Additionally, the following equation defines the mechanical state of the tuning fork pickoff mode wherein that mode is represented as a single spring-mass system with F representing Coriolis force and F_c representing the force from the electric field within the pickoff capacitor:

$$M\ddot{z} + D\dot{z} + K(z - z|_{F_{\text{coris}}=0}) = -F - F_c$$

where $z|_{F_{\text{coris}}=0}$ is the gap value when no forces are exerted on the proof mass 14.

Thus, the force on the proof mass 14 due to the electric field can be defined as:

WO 03/025506

PCT/US02/29495

$$F_c = \frac{1}{2} Q^2 \frac{d}{dz} C^{-1}$$

such that the equation defining the mechanical situation can be rewritten as:

$$M\ddot{z} + D\dot{z} + K(z - z)|_{\text{force}=0} = -F - \frac{1}{2} Q^2 \frac{d}{dz} C^{-1}$$

5

The resulting two equations provide for two unknown dependent variables, Q and z . Unfortunately, these equations involve nonlinear functions of the dependent variables. As such, a perturbative solution to the equations will be calculated. In this regard, it is assumed that the baseline solution for Q and z (namely Q_0 and z_0) in response to the baseline excitations, E_0 and F_0 , is known. As a result, the response perturbations, δQ and δz , resulting from excitation perturbations, δE and δF , can be determined as set forth below.

Neglecting fringing, tilting and cupping which are insignificant in the present application, the effects of perturbations in the gap width z on the capacitance C are as follows:

15

$$C^{-1} = \frac{z}{C_0 z_0}$$

20

$$\frac{d}{dz} C^{-1} = \frac{1}{C_0 z_0}$$

$$\delta C^{-1} = \frac{\delta z}{C_0 z_0}$$

25

$$\delta \frac{d}{dz} C^{-1} = 0$$

Perturbing the equation defining the electrical situation and making substitutions based on the foregoing equations yield the following:

30

$$\delta \dot{Q} + R^{-1} \delta C^{-1} C_0 + R^{-1} C_0^{-1} \delta Q = R^{-1} \delta E$$

10

$$\delta \dot{Q} + R^{-1} C_0^{-1} \delta Q + (R C_0 z_0)^{-1} Q_0 \delta z = R^{-1} \delta E$$

WO 03/025506

PCT/US02/29495

Similarly, perturbing the equation defining the mechanical situation and making
 5 substitutions based on the foregoing equations yields the following:

$$M\delta\ddot{z} + D\delta\dot{z} + K\delta z = -\delta F - Q_0 C_0^{-1} z_0^{-1} \delta Q$$

$$10 \quad Q_0 C_0^{-1} z_0^{-1} \delta Q + M\delta\ddot{z} + D\delta\dot{z} + K\delta z = -\delta F$$

This results in linear differential equations for the perturbed dependent variables,
 δQ and δz . Additionally, the baseline values Q_0, z_0, E_0, F_0 , have not been restricted to
 be constants in time, so the linear differential equations could have time varying
 coefficients. For the instant case, however, the baseline values are constants, thereby
 15 simplifying the solution of the equations. In this regard, after Laplace transforming, the
 final perturbed equations representing the electrical and mechanical situations can be
 written as the following matrix equations:

$$20 \quad \begin{bmatrix} s + (RC_0)^{-1} & (RC_0 z_0)^{-1} Q_0 \\ (C_0 z_0)^{-1} Q_0 & Ms^2 + Ds + K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta Q \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^{-1} \delta E \\ -\delta F \end{bmatrix}$$

Hence, the solution of these equations is:

$$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} Ms^2 + Ds + K & -(RC_0 z_0)^{-1} Q_0 \\ -(C_0 z_0)^{-1} Q_0 & s + (RC_0)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^{-1} \delta E \\ -\delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta Q \\ \delta z \end{bmatrix}$$

25 Where

$$\Delta = (Ms^2 + Ds + K)(s + (RC_0)^{-1}) - Q_0^2 R^{-1} (C_0 z_0)^{-2}$$

WO 03/025506

PCT/US02/29495

The function of interest is $\delta Q/\delta F$ which defines as the charge moved per Coriolis force acting upon the proof mass 14 can be defined as:

$$\frac{\delta Q}{\delta F} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{(MRC_0)s^3 + (DRC_0 + M)s^2 + (KRC_0 + D)s + (K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2})}$$

5 To determine the manner in which varying the resistive element R effects the response near resonance, it is instructive to examine the poles, that is, the zeros of the denominator. Following the root locus approach, the poles are located at the s-values satisfying the equation $\Delta = 0$, or

$$0 = 1 + R \times \frac{C_0 s(Ms^2 + Ds + K)}{Ms^2 + Ds + K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2}}$$

10

The rational s-function multiplying R is called the open-loop transfer function (OLTF) in the usual root locus problem context. The zeros of Δ are the OLTF poles for R=0, and move to the OLTF zeros, as R increases, along an s-plane path for which the argument of the OLTF is 180°. The OLTF has zeros at the s-plane origin and at the pickoff natural resonant frequency, about 18 kHz, very near the $j\omega$ axis. The OLTF poles are located a few hundred hertz lower than the open loop zeros. As R increases from zero to infinity, the poles of $\delta Q/\delta F$ move along a semi-circle in the left hand s-plane from the OLTF poles to the OLTF zeros. Thus, as desired, inserting a resistive element 30 in the sense circuit increases the damping of the pickoff resonance.

20

To illustrate the magnitude by which the resistive element 30 increases pickoff resonance damping, the following equations are defined in which pickoff resonance " Q " is defined as Q :

$$Q = \frac{\left| \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=j\omega_{\text{pickoff-resonant}}}}{\left| \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=0}}$$

25

WO 03/025506

PCT/US02/29495

In order to determine the frequency at which $\delta Q/\delta F$ peaks it is safely assumed that the terms involving D and R in the $\delta Q/\delta F$ denominator are small relative to the other terms present in the equation and thus can be ignored in this instance. Therefore, the peak $\delta Q/\delta F$ value must occur where the s^2 and s^0 denominator terms cancel, i.e., where s equals $j\omega_r$, with ω_r defined as:

$$\omega_r = \sqrt{M^{-1}(K - Q_0^2 C_0^{-1} z_0^{-2})}$$

In this regard, neglecting second order terms in D and/or R yields the following equations:

$$\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=j\omega_r} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{(D + R Q_0^2 z_0^{-2})(j\omega_r)}$$

$$\left. \frac{\delta Q}{\delta F} \right|_{s=0} = \frac{z_0^{-1} Q_0}{M\omega_r^2}$$

$$Q_r = \frac{M\omega_r}{D + R Q_0^2 z_0^{-2}}$$

Therefore, in a hypothetical embodiment of the present invention, the variables may be defined as follows:

	$M = 2.52\text{E-}9$	kg
20	$K = 32.2$	N/m
	$z_0 = 2.5\text{E-}6$	m
	$C_0 = 500\text{E-}15$	F
	$Q_0 = C_0 E_0$	
	$E_0 = 5$	V
25	$D = 2.85\text{E-}6$	$N/m/s$
	$Q_r = 100,000$ with $R=0$	

WO 03/025506

PCT/US02/29495

To graphically illustrate the effect of a resistive element 30 of various sizes, Figure 3 is a plot of the pickoff resonance Q_r as a function of the resistance of the element R, in accordance with an exemplary embodiment of the present invention having the variables defined as set forth above. As illustrated and defined above, the pickoff resonance Q_r is 100,000 when no resistance is provided. In the same regard, when the resistance is minimal (i.e., about $1k\Omega$), the resistance has very minimal effect on the pickoff resonance, Q_r . When the resistance is increased to about $10k\Omega$, however, the pickoff resonance is reduced to about 20,000. If the resistance is further increased, to about $300k\Omega$, the resulting pickoff resonance is advantageously reduced to about 1000.

As described above, a large pickoff response, defined as a large movement of electrical charge per application of Coriolis force upon the proof mass 14, at the motor frequency is desired in response to a constant rate of rotation about the first axis 18. In order to provide the desired mechanical gain for the vibration of the proof masses along the third axis in response to a constant rate of rotation, the motor natural resonant frequency and the pickoff natural resonant frequency are preferably separated by only one or two kilohertz. While advantageous for detecting the rotation of the micromechanical inertial sensor 10 at a constant rate of rotation, this relatively small separation between the motor natural resonant frequency and the pickoff natural resonant frequency, together with the high pickoff Q of a conventional tuning fork gyroscope, is disadvantageous when a sinusoidal rotation rate of frequency near the frequency separation between the motor natural resonant frequency and the pickoff natural resonant frequency is encountered. The Coriolis force produced has components at the motor frequency modulated by the frequency at which the rate of rotation of the micromechanical inertial sensor is varied. When one of these sidebands coincides with the high pickoff Q at the pickoff natural resonant frequency, an undesirably large response is produced. By incorporating a resistor 30 between the voltage source 28 and each pickoff plate 26, however, the pickoff Q can be substantially reduced such that even if the frequency at which the micromechanical inertial sensor is rotating nears the separation between the motor natural resonant frequency and the pickoff natural resonant frequency, the pickoff resonance will not adversely effect the vibration of the proof mass and the resulting measurements of the rate of rotation of the

WO 03/025506

PCT/US02/29495

micromechanical inertial sensor. The addition of the resistor reduces pickoff Q, which is advantageous, without reducing motor Q, which would be disadvantageous.

Figure 4 shows the magnitude of pickoff charge response to Coriolis forces (dQ/dF) at various frequencies. The curves depicted in Figure 4 are plots of the equations derived above for the parameter set given above. As shown, for a resistor 30 having a value of 1 megohm, the peak pickoff mode response is decreased by 51 dB, with little change in response at lower frequencies. For larger resistor values, desirable peak reduction occurs, but at the price of reduced response at lower frequencies.

By appropriately diminishing the pickoff Q, the micromechanical inertial sensor 10 of the present invention can continue to provide mechanical amplification of the vibration of each proof mass 14 along the third axis in response to rotation of the micromechanical inertial sensor about the first axis 18 at frequencies within the intended bandwidth of the sensor. However, in instances in which the rate of rotation of micromechanical inertial sensor is varying at a frequency near the separation between the motor frequency and the pickoff natural resonant frequency, the reduced pickoff Q will permit the micromechanical inertial sensor to continue to operate and will not disadvantageously cause the proof mass to vibrate excessively.

Many modifications and other embodiments of the invention will come to mind to one skilled in the art to which this invention pertains having the benefit of the teachings presented in the foregoing descriptions and the associated drawings. Therefore, it is to be understood that the invention is not to be limited to the specific embodiments disclosed and that modifications and other embodiments are intended to be included within the scope of the appended claims. Although specific terms are employed herein, they are used in a generic and descriptive sense only and not for purposes of limitation.

WO 03/025506

PCT/US02/29495

THAT WHICH IS CLAIMED:

1. A micromechanical inertial sensor adapted to sense rotation about a first axis, the micromechanical inertial sensor comprising:
- 5 a substrate;
- first and second proof masses spaced apart from and mechanically connected to said substrate, said proof masses adapted to vibrate along a second axis substantially orthogonal to the first axis, said proof masses also being movable along a third axis substantially orthogonal to the first and second axes;
- 10 a plurality of pickoff plates in at least partial alignment with respective proof masses, said pickoff plates spaced from said proof masses by a gap that varies in response to movement of said proof masses along the third axis;
- at least one voltage source electrically connected to said pickoff plates;
- and
- 15 a plurality of resistive elements disposed in series between the at least one voltage source and respective pickoff plates to reduce pickoff resonance of the micromechanical inertial sensor.
2. A micromechanical inertial sensor according to Claim 1 wherein
- 20 each resistive element is sized to between 10 kilohms and 10 megohms.
3. A micromechanical inertial sensor according to Claim 2 wherein each resistive element is sized to be 1 megohm.
- 25 4. A micromechanical inertial sensor according to Claim 1 wherein each resistive element is selected such that the pickoff resonance has a Q of no more than 1000.
- 30 5. A micromechanical inertial sensor according to Claim 1 further comprising a plurality of drive electrodes, wherein each proof mass carries a plurality of driven electrodes that are interdigitated with said drive electrodes such that electrical stimuli applied to said drive electrodes induces vibration of the respective proof mass along the second axis.

WO 03/025506

PCT/US02/29495

6. A micromechanical tuning fork gyroscope adapted to sense rotation about a first axis, the micromechanical tuning fork gyroscope comprising:
- 5 first and second proof masses operably connected to mechanical ground and adapted to vibrate along a second axis substantially orthogonal to the first axis, said proof masses also being movable along a third axis substantially orthogonal to the first and second axes in response to rotation about the first axis;
- 10 a plurality of pickoff plates in at least partial alignment with respective proof masses and capacitively coupled thereto such that capacitance established between said pickoff plates and said proof masses provides a measure of the movement of said proof masses along the third axis;
- at least one voltage source electrically connected to said pickoff plates;
- 15 and
- a plurality of resistive elements disposed in series between said at least one voltage source and respective pickoff plates to increase pickoff resonance damping of the micromechanical tuning fork gyroscope.
- 20 7. A micromechanical tuning fork gyroscope according to Claim 6 wherein each resistive element is sized to between 10 kilohms and 10 megohms.
8. A micromechanical tuning fork gyroscope according to Claim 7
- 25 wherein each resistive element is sized to be 1 megohm.
9. A micromechanical tuning fork gyroscope according to Claim 6 wherein each resistive element is selected such that the pickoff resonance has a Q of no more than 1000.

WO 03/025506

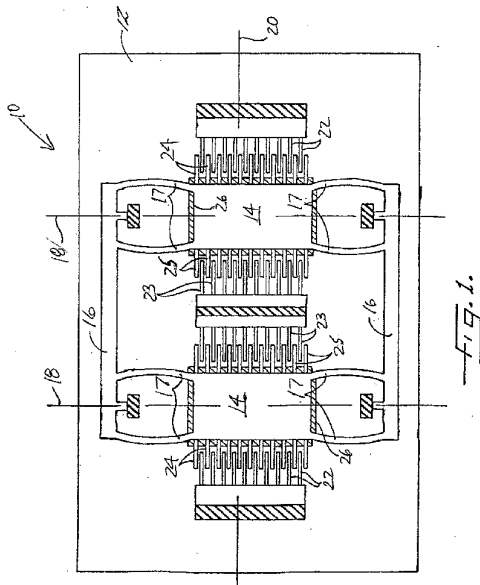
PCT/US02/29495

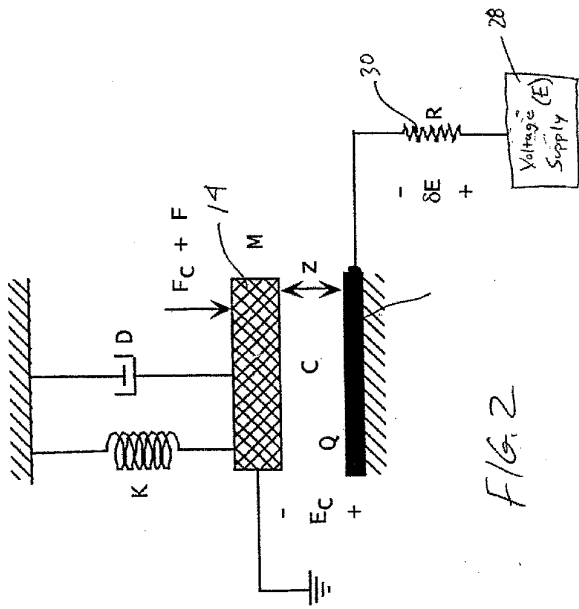
10. A micromechanical tuning fork gyroscope according to Claim 6 further comprising a plurality of drive electrodes, wherein each proof mass carries a plurality of driven electrodes that are interdigitated with said drive electrodes such that electrical stimuli applied to said drive electrodes induces vibration of the respective proof mass along the second axis.
11. A micromechanical inertial sensor adapted to sense rotation about a first axis, the micromechanical inertial sensor comprising:
- 10 a substrate;
 - first and second proof masses spaced apart from and mechanically connected to said substrate, said proof masses adapted to vibrate along a second axis substantially orthogonal to the first axis, said proof masses also being movable along a third axis substantially orthogonal to the first and second axes in response to rotation about the first axis;
 - 15 a plurality of pickoff plates disposed upon said substrate in at least partial alignment with respective proof masses, said pickoff plates spaced from said proof masses by a gap that varies in response to movement of said proof masses along the third axis;
 - 20 at least one voltage source electrically connected to said pickoff plates;
 - and
 - a plurality of resistive elements disposed in series between the at least one voltage source and respective pickoff plates, said resistive elements being sized between 10 kilohms and 10 megohms.
12. A micromechanical inertial sensor according to Claim 11 wherein each resistive element is sized to be 1 megohm.
13. A micromechanical inertial sensor according to Claim 11 wherein each resistive element is selected such that the pickoff resonance has a Q of no more than 1000.

WO 03/025506

PCT/US02/29495

14. A micromechanical inertial sensor according to Claim 11 further comprising a plurality of drive electrodes, wherein each proof mass carries a plurality of driven electrodes that are interdigitated with said drive electrodes such that electrical stimuli applied to said drive electrodes induces vibration of
- 5 the respective proof mass along the second axis.





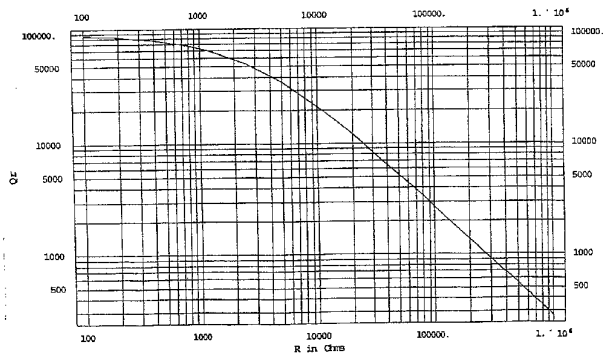


FIG. 3

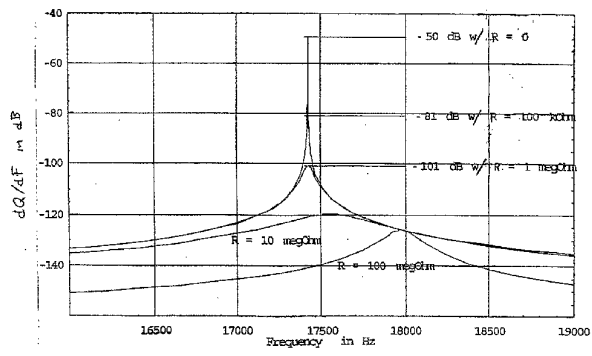


FIG. 4

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/US 02/29495
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 G01C19/56		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G01C G01P		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 920 012 A (PINSON JOHN CARVER) 6 July 1999 (1999-07-06) column 3, line 14 -column 4, line 28; figure 1 ---	1-14
A	WO 01 22094 A (DRAPER LAB CHARLES S) 29 March 2001 (2001-03-29) page 5, line 3 -page 7, line 15; figures 1,2,8 ---	1-14
A	EP 0 900 999 A (MURATA MANUFACTURING CO) 10 March 1999 (1999-03-10) column 2, line 46 -column 4, line 7 --- -/--	1-14
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier document but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, each combination being obvious to a person skilled in the art. *&* document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
11 December 2002	23/12/2002	
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Springer, O	

Form PCT/ISA210 (second sheet) (July 1999)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/US 02/29495

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, A	EP 1 193 215 A (NOKIA CORP) 3 April 2002 (2002-04-03) page 2, line 35 - line 45 page 7, line 27 - line 28 page 8, line 31 - line 32 -----	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International Application No
 PCT/US 02/29495

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5920012	A	06-07-1999	NONE
WO 0122094	A	29-03-2001	US 6257059 B1 10-07-2001 AU 1106501 A 24-04-2001 EP 1216397 A2 26-06-2002 GB 2371363 A 24-07-2002 WO 0122094 A2 29-03-2001
EP 0900999	A	10-03-1999	JP 3285140 B2 27-05-2002 JP 11142155 A 28-05-1999 CN 1210255 A ,B 10-03-1999 EP 0900999 A2 10-03-1999 US 6023973 A 15-02-2000
EP 1193215	A	03-04-2002	FI 20002173 A 03-04-2002 CN 1344670 A 17-04-2002 EP 1193215 A2 03-04-2002 US 2002108442 A1 15-08-2002

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW, ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES, FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,N O,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100101373

弁理士 竹内 茂雄

(72)発明者 ピンソン, ジョン・シー

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 2 8 0 7 , アナハイム, クレセント・ドライブ 5 0 6 9

Fターム(参考) 2F105 AA02 AA03 BB02 CC01 CC04 CD03 CD05