



# 水晶振動子を用いたロボット用把持力センサに関する基礎的研究

村岡, 茂信

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-04-27

(Date of Publication)

2009-12-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2546

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002546>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【339】

氏名・(本籍) 村岡 茂信 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第229号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成13年4月27日

【学位論文題目】

水晶振動子を用いたロボット用把持力センサに  
関する基礎的研究

審査委員

主査 教授 高森 年

教授 賀谷 信幸

教授 峯本 工

## 要 旨：

本論文は、水晶振動子式力センサをロボット搭載用把持力センサに応用するための基礎的研究について述べたものである。

ロボットは機構部、センサ部、制御部および情報処理部などから構成されている。ロボットは自身の状況（内界）および対象とのかかわりや環境（外界）を認識しながら作業を行うため、センサ部は内界センサと外界センサとからなっている。内界センサには位置、姿勢、速度および加速度などのセンサがあり、外界センサには視覚、触覚、聴覚、味覚、嗅覚などいわゆる五感に相当するセンサがある。ヒトが柔らかいものや壊れやすいものを扱うとき、皮膚からの触覚情報に基づき対象の状態を認識しながら慎重に腕や手を動かしている。ロボットにこのような動作を行わせる場合にも、ヒトの皮膚感覚に相当する触覚センサが必要となる。触覚センサは、接触覚センサ、圧覚センサ、滑り覚センサ、力覚センサ、近接覚センサなどからなる。ロボットの把持制御、協調搬送、触覚による外界センシングなどでは、把持力、把持位置、滑り、接触力、接触位置などの触覚情報を取得するセンサが重要な役割を果たす。これらのセンサは、アクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存することや、動的な力を測定する必要があることから、耐ノイズ性や高速応答性が要求される。従来これらの分野で使用されてきたセンサは、歪みゲージ式、導電性ゴム式、ピエゾ抵抗式、圧電式などアナログ出力の力センサを用いたものがほとんどで、ノイズの影響を受けやすく信号レベルも低いものが多かった。このため、これらのセンサはフィルタ、アンプ、A/D 変換器などを要することが多かった。また、ローパスフィルタの使用により帯域が制限されてセンサ出力の応答性が問題となることもあった。これらのことから、ノイズに強く信号処理が容易で高速応答のロボットセンサの出現が切望されてきた。

水晶振動子は、外力が加わるとその共振周波数が増減するので力センサとして使用できる。この力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く、出力を周波数カウンタによりデジタル化できるなど信号処理が容易で、高感度・高分解能といった特長を有する。さらに水晶振動子の共振周波数が一般の環境ノイズよりはるかに高く（本研究で使用した水晶振動子の共振周波数は 10 MHz と 15 MHz）、仮にフィルタを使用しても高いカットオフ周波数のハイパスフィルタまたはバンドパスフィルタを使用できるので広い帯域が確保できる。したがって、水晶振動子を用いた力センサは、耐ノイズ性や高速応答を必要とするセンサとして威力を発揮すると考えられ、これを把持力、把持位置、滑りなどのロボット搭載用センサに応用できれば、従来のアナログ出力センサの欠点を補うセンサが実現できることになる。

ロボットが対象を把持するとき、対象との接触面で法線方向と接線方向の力を受ける。本論文では、これら両方向の力をあわせて把持力と呼ぶことにした。ロボットと対象との接触面で接線方向の力が最大静止摩擦力を越えたとき滑りが生じ、滑りはこれに伴う摩擦力変化を測定することにより検出できる。また、把持位置はフィンガなどの軸線に沿って離れた 2 カ所に生じる曲げ応力を測定することにより検出できる。このように、把持力、滑り、把持位置の各量は、いずれも把持に伴う量であり、力センサで測定できる量であるから、これらを測定するセンサをまとめて把持力センサと呼ぶことにした。協調搬送や外界センシングにおける接触力や接触位置も力学的には把持力や把持位置と同一であるため、これらの量を測定するセンサも把持力センサに含めることにした。本論文の題名にある "把持力センサ" もこの意味で使用した。

本論文はつぎの 6 章から構成されている。

## 第 1 章 序論

## 第 2 章 力センサとしての水晶振動子の基礎特性

## 第 3 章 水晶振動子の力センサへの応用

## 第 4 章 水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用

## 第 5 章 水晶振動子式力センサの把持滑りセンサへの応用

## 第 6 章 結論

1 章では、研究の背景、本論文で使用する把持力センサの意味、水晶振動子を用いたセンサに関するこれまでの研究概要、本研究の目的と本論文の構成を示した。

2 章では、矩形 AT カット水晶振動子の力センサとしての基礎特性を実験的に明らかにした。まず、厚さやオーバートーン次数の異なった矩形 AT カット水晶振動子を統一的に扱うために、応力感度（外力により水晶振動子に生じる単位応力あたりの周波数変化率）の概念を導入した。基本振動 10 MHz で振動している水晶振動子と 3 次オーバートーン 15 MHz で振動している水晶振動子を用いて、応力感度とその温度特性が外力の方向の関数であることを確認し、外力の方向が水晶振動子の電気軸から約 35° のとき応力感度の温度特性がほぼフラットになり、このときの応力感度が約  $18.7 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$  となることを明らかにした。つぎに、水晶振動子をロボットセンサとしてハンドなどに搭載するには、その機械的強度をあらかじめ知っておくことが必要となるため、応力感度の温

度特性がフラットとなる電気軸から約 35°の方向に引張の静荷重を加えて破断強さを調べた結果、150 MPa 程度となった。また、ロボットフィンガーに相当する片持ちはりに水晶振動子を装着し、水晶振動子の電気軸から約 35°の方向に引張と圧縮の静荷重を加えて破断強さを調べた結果、引張に対して 70~100 MPa、圧縮に対して 140~180 MPa 程度となった。さらに、ロボットフィンガーに相当するジュラルミン製片持ちはりの固定端近くに水晶振動子対を装着し、この片持ちはりの自由端付近にシリコーンゴムを貼付した場合と貼付しない場合について、この部位に鋼球を衝突させて衝撃荷重に対する水晶振動子の強度を調べた。この結果、貼付した場合は引張に対して 0.3 Nm 程度、圧縮に対して 0.4 Nm 程度までの衝突エネルギーに耐えることができ、貼付しない場合は引張に対して 0.2 Nm 程度、圧縮に対して 0.3 Nm 程度までの衝突エネルギーに耐えることができた。これらにより、応力感度とその温度特性および機械的強度の面から、水晶振動子がロボットセンサとして有用であることを明らかにした。

3章では、水晶振動子を力センサとして使用する際に重要となる差動法について検討した。差動法は、特性の揃った2個のセンサ素子に入力信号を加えたとき、入力変化に対するセンサパラメータの変化が各々の素子で逆方向に、環境変化に対しては同方向になるよう構成したもので、差をとることにより環境変動の影響をうち消すようにした構成法である。ここで述べた差動法は、AT カット水晶振動子の発振周波数の増減が引張と圧縮に対して逆特性であることを利用したもので、外力により1対の水晶振動子の一方が引張に他方が圧縮となるよう構成し、これらの差周波数を出力信号としたものである。まず、差動法での応力感度の温度特性がフラットになる条件を求め、外力の方向がこの条件を満たすとき差動法での応力感度は約  $37.3 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$  となり、水晶振動子個々の応力感度の和となることを明らかにした。つぎに、一対の水晶振動子を応力感度の温度特性がフラットになる条件を満足するよう装着した力検出装置を試作し、これを用いて差動法としての応力感度とその温度特性を実験的に検証した。また、水晶振動子の振動外力に対する応力感度を実験的に調べ、少なくとも 2 kHz 程度までは減衰しないことを明らかにした。

4章では、水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用として、ロボットの指に相当する片持ちはりに水晶振動子対を装着した把持力センサを提案し、水晶振動子対の差周波数変化量と把持力の大きさや把持位置との関係などを明

らかにした。2組の水晶振動子対を有する把持力センサは、外力の1方向成分とその作用点が検出できること、3組の水晶振動子対を有する把持力センサは、特定の外力の方向を除き、指の軸線に垂直な断面内での外力の2方向成分とその作用点が検出できることを明らかにした。4組の水晶振動子対を有する把持力センサは指の軸線に垂直な断面内の全ての方向での外力の2方向成分とその作用点が検出でき、水晶振動子の異常監視や、1対の水晶振動子に不具合が生じた場合の急場凌ぎも可能であることを明らかにした。また、外界センシングへの応用として、この把持力センサにより対象物を一定接触力でなぞってセンサと外界との接触点軌跡から対象の2次元形状を再構成できることを明らかにした。

5章では、滑りに伴う摩擦力変化を検出するロボット用把持滑りセンサ（本論文題名の把持力センサはこの滑りセンサも含む）に水晶振動子式力センサを応用するため、まず、水晶振動子式力センサを用いた滑りセンサの構造と検出原理を示した。つぎに、1組の水晶振動子対からなる1次元滑りセンサを試作し、これにより対象とセンサとの間で生じる滑りに伴う摩擦力変化を容易に検出できることを示した。さらに、2組の水晶振動子対を互いの主面が直交するように配置した2次元滑りセンサを試作し、これを用いて同時に検出した摩擦力の2方向成分から滑り方向の時間波形を求めた。この結果、 $\pm 2^\circ$  程度の精度で滑り方向のセンシングが可能であることが明らかとなった。

6章では、各章の結果を列記し、水晶振動子式力センサがアナログ出力力センサの欠点を克服するロボットセンサとして有望であることを述べた。

以上、力センサとしての水晶振動子の基礎特性、差動法について検討し、水晶振動子式力センサを把持力センサに応用するための基礎的研究を行った。

以上

## 論文審査の結果の要旨

氏名	村岡茂信		
論文題目	水晶振動子を用いたロボット用把持力センサに関する基礎的研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	高森年
	副査	教授	賀谷信幸
	副査	教授	峯本工
	副査		
要旨			
<p>本論文は、水晶振動子式力センサをロボット搭載用把持力センサに応用するための基礎的研究について述べたものである。</p> <p>ロボットは機構部、センサ部、制御部および情報処理部などから構成されている。ロボットは自身の状況（内界）および対象とのかかわりや環境（外界）を認識しながら作業を行うため、センサ部は内界センサと外界センサとからなっている。内界センサには位置、姿勢、速度および加速度などのセンサがあり、外界センサには視覚、触覚、聴覚、味覚、嗅覚などに相当するセンサがある。ヒトが柔らかいものや壊れやすいものを扱うとき、皮膚からの触覚情報に基づき対象の状態を認識しながら慎重に腕や手を動かしている。ロボットにこのような動作を行わせる場合にも、ヒトの皮膚感覚に相当する触覚センサが必要となる。触覚センサは、接触覚センサ、圧覚センサ、滑り覚センサ、力覚センサ、近接覚センサなどからなる。ロボットの把持制御、協調搬送、触覚による外界センシングなどでは、把持力、把持位置、滑り、接触力、接触位置などの触覚情報を取得するセンサが重要となる。これらのセンサは、アクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存するため耐ノイズ性が要求される。従来これらの分野で使用されてきたセンサは、歪みゲージ式、導電性ゴム式、ピエゾ抵抗式、圧電式などアナログ出力の力センサを用いたものがほとんどで、ノイズの影響を受けやすく信号レベルも低いものが多かった。このため、これらのセンサはフィルタ、アンプ、A/D変換器などを要することが多かった。また、ローパスフィルタの使用により帯域が制限されてセンサ出力の応答性が問題となることもあった。これらのことから、ノイズに強く信号処理が容易で高速応答のロボットセンサの出現が切望されてきた。</p>			

水晶振動子は、外力が加わるとその共振周波数に変化するので力センサとして使用できる。この力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く、出力を周波数カウンタによりデジタル化できるなど信号処理が容易で、高感度・高分解能といった特長を有する。さらに水晶振動子の共振周波数が一般の環境ノイズよりはるかに高く（本研究で使用した水晶振動子の共振周波数は10 MHzと15 MHz）、仮にフィルタを使用しても高いカットオフ周波数のハイパスフィルタまたはバンドパスフィルタを使用できるので広い帯域が確保できる。したがって、水晶振動子を用いた力センサは、耐ノイズ性や高速応答を必要とするセンサとして威力を発揮すると考えられ、これを把持力、把持位置、滑りなどのロボット搭載用センサに応用できれば、従来のアナログ出力センサの欠点を補うセンサが実現できることになる。

ロボットが対象を把持するとき、対象との接触面で法線方向と接線方向の力を受ける。本論文では、これら両方向の力をあわせて把持力と呼ぶことにした。ロボットと対象との接触面で接線方向の力が最大静止摩擦力を越えたとき滑りが生じ、滑りはこれに伴う摩擦力変化を測定することにより検出できる。また、把持位置はフィンガなどの軸線に沿って離れた2カ所に生じる曲げ応力を測定することにより検出できる。このように、把持力、滑り、把持位置の各量は、いずれも把持に伴う量であり、力センサで測定できる量であるから、これらを測定するセンサをまとめて把持力センサと呼ぶことにした。協調搬送や外界センシングにおける接触力や接触位置も力学的には把持力や把持位置と同一であるため、これらの量を測定するセンサも把持力センサに含めることにした。本論文の題名にある“把持力センサ”もこの意味で使用した。

1章では、研究の背景、本論文で使用する把持力センサの意味、水晶振動子を用いたセンサに関するこれまでの研究概要、本研究の目的と本論文の構成を示した。

2章では、矩形ATカット水晶振動子の力センサとしての基礎特性を実験的に明らかにした。まず、厚さやオーバートーン次数の異なった矩形ATカット水晶振動子を統一的に扱うために、応力感度（外力により水晶振動子に生じる単位応力あたりの周波数変化率）の概念を導入した。基本振動10 MHzで振動している水晶振動子と3次オーバートーン15 MHzで振動している水晶振動子を用いて、応力感度とその温度特性が外力の方向の関数であることを確認し、外力の方向が水晶振動子の電気軸から約35°のとき応力感度の温度特性がほぼフラットになり、このときの応力感度が約 $18.7 \times 10^{-12}$  Pa<sup>-1</sup>となることを明らかにした。つぎに、水晶振動子をロボットセンサとしてハンドなどに搭載するには、その機械的強度をあらかじめ知っておくことが必要となるため、応力感度の温度特性がフラットとなる電気軸から約35°の方向に引張の静荷重を加えて破断強さを調べた結果、150 MPa程度となった。また、ロボットフィンガーに相当する片持ちはりに水晶振動子を装着し、水晶振動子の電気軸から約35°の方向に引張と圧縮の静荷重を加えて破断強さを調べた結果、引張に対して70～100 MPa、圧縮に対して140～180 MPa程度となった。さらに、ロボットフィンガーに相当するジュラルミン製片持ちはりの固定端近くに水晶振動子対を装着し、この片持ちはりの自由端付近にシリコンゴムを貼付し、この部位に鋼球を衝突させ、衝撃荷重に対する水晶振動子の強度を調べた。この結果、引張に対して0.3 Nm程度、圧縮に対して0.4 Nm程度までの衝突エネルギーに耐えることができた。これらから、応力感度とその温度特性および機械的強度の面から、水晶振動子がロボットセンサとして有用であることを明らかにした。

3章では、水晶振動子を力センサとして使用する際に重要となる差動法について検討した。差動法は、特性の揃った2個のセンサ素子に入力信号を加えたとき、入力変化に対するセンサパラメータの変化が各々の素子で逆方向に、環境変化に対しては同方向に

なるよう構成したもので、差をとることにより環境変動の影響をうち消すようにした構成法である。ここで述べた差動法は、ATカット水晶振動子の発振周波数の増減が引張と圧縮に対して逆特性であることを利用したもので、外力により1対の水晶振動子の一方が引張に他方が圧縮となるよう構成し、これらの差周波数を出力信号としたものである。まず、差動法での応力感度の温度特性がフラットになる条件を求め、外力の方向がこの条件を満たすとき差動法での応力感度は約 $37.3 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ となり、水晶振動子個々の応力感度の和となることを明らかにした。つぎに、一対の水晶振動子を応力感度の温度特性がフラットになる条件を満足するよう装着した力検出装置を試作し、これを用いて差動法としての応力感度とその温度特性を実験的に検証した。また、水晶振動子の振動外力に対する応力感度を実験的に調べ、少なくとも2 kHz程度までは応力感度が減衰しないことを明らかにした。

4章では、水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用として、ロボットの指に相当する片持ちはりに水晶振動子対を装着した把持力センサを提案し、水晶振動子対の周波数変化量と外力の大きさやその作用点との関係などを明らかにした。2組の水晶振動子対を有する把持力センサは、外力の1方向成分とその作用点が検出できること、3組の水晶振動子対を有する把持力センサは、特定の外力の方向を除き、指の軸線に垂直な断面内での外力の2方向成分とその作用点が検出できることを明らかにした。4組の水晶振動子対を有する把持力センサは、指の軸線に垂直な断面内の全ての方向での外力の2方向成分とその作用点が検出でき、水晶振動子の異常監視や、1対の水晶振動子に不具合が生じた場合の急場凌ぎも可能であることを明らかにした。また、外界センシングへの応用として、この把持力センサにより対象物を一定接触力でなぞってセンサと外界との接触点軌跡を求め、この軌跡により対象の2次元形状を再構築できることを明らかにした。

5章では、滑りに伴う摩擦力変化を検出するロボット搭載用把持滑りセンサ（本論文題名の把持力センサはこの滑りセンサも含む）に水晶振動子式力センサを応用するため、まず、水晶振動子式力センサを用いた滑りセンサの構造と検出原理を示した。つぎに、1組の水晶振動子対からなる1次元滑りセンサを試作し、これを用いて対象とセンサとの間で生じる滑りに伴う摩擦力変化を検出し、この摩擦力変化の時間波形が容易に得られることを明らかにした。さらに、2組の水晶振動子対を互いの主面が直交するように配置した2次元滑りセンサを試作し、これを用いて摩擦力の2方向成分を同時に検出し、これらから滑り方向の時間波形を求めた。この結果、 $\pm 2^\circ$ 程度の精度で滑り方向のセンシングが可能であることを明らかにした。

6章では、各章の結果を列記し、水晶振動子式力センサがアナログ出力力センサの欠点を克服するロボットセンサとして有望であることを述べた。

本論文は、力センサとしての水晶振動子の基礎特性、差動法について検討し、水晶振動子式力センサを把持力センサに応用するための基礎的研究を行ったものであり、その有効性について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 村岡茂信は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。