

# 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656239

研究課題名（和文） 周波数遷移を利用したMEMS単一素子でのベクトル触覚センシング

研究課題名（英文） Vector tactile sensing with single MEMS sensor using resonant frequency shift

研究代表者

山下 馨 (YAMASHITA KAORU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：40263230

研究成果の概要（和文）：

ベクトル触覚を得るための MEMS 素子による新たなセンシング手法を提案した。従来の、静的力検出素子を用いた複数素子の組み合わせによるベクトル計測に代わり、振動型センサデバイスを用いて共振周波数遷移により触覚を検知する原理を確立し、有限要素法解析により単一素子のみで三方向の触覚ベクトル各成分を推定可能であることを示した。また周波数応答のわずかな非線形性が触覚推定に大きな影響を与えることを明らかにし、さらにより非線形性の小さなデバイスの作製プロセスを確立した。

研究成果の概要（英文）：

A new technique for vector tactile sensing with MEMS devices was proposed. While tactile vectors had been conventionally measured with a combination of plural sensor elements each of which detected force in only one direction, the proposed technique enabled a single sensor element to measure a tactile vector based on resonant frequency shift of a vibratory microcantilever. The principle was confirmed in finite element analysis and the cantilever sensors were fabricated and evaluated. It was found that nonlinearity in the frequency response of the sensors drastically affected the tactile vector estimation, and an improved sensor structure to reduce the nonlinearity was designed and fabricated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：電子デバイス工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：(1) 触覚 (2) 共振 (3) 圧電 (4) MEMS

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットハンドでの柔軟物（人体等）の把持や医療現場における触診の代替デバイスなどの分野で、高度なベクトル触覚（接触面を垂直に押す感覚だけでなく接触面と平行に滑る感覚）を有するデバイスが求められている。そのような中、微細な力覚センサを人間の皮膚を模した柔軟な材料（エラストマ等）で被覆した構造のセンサが作製されており、複数のセンサ素子を組み合わせることにより多軸感度を得るものが研究開発されて

いる。しかしながら、これらのセンサでは静的に力を計測するため、原理的に検知軸の一方向に対して一方向ずつのセンサ素子を必要とする。このため、面垂直1方向と面内2方向の検知を行うためには最低3種の素子が必要となり、高密度にアレイ化する際には、素子そのものの実装密度と配線取り出しの点で問題となる。また単一のベクトル量の各成分を計測するセンサが空間的に異なる位置に配置されるため、狭い範囲に比較的集中した力が加わった場合には誤検知する可能

性がある。センサ機能の面からも高密度実装の観点からも、単一素子によるベクトル触覚計測が望まれている。

## 2. 研究の目的

圧電型 MEMS カンチレバーを力覚センシング素子としてエラストマに埋め込んだ触覚センシングシステムを提案する。外部からこのセンサの圧電体へ交流電圧を印加することでカンチレバーに振動を誘起するが、エラストマ表面に触覚荷重が加わりエラストマ自体が変形した際、カンチレバーが接触しているエラストマから応力を受けて振動状態が変化する。提案手法は、この振動状態変化を共振周波数変化として捉えることにより触覚を検知しようとするものである。誘起する振動モードとして3個以上のモードをうまく選び、直交3方向の印加触覚荷重に対する各モードにおける共振周波数変化が独立であれば、この触覚荷重→エラストマ変形→カンチレバー共振周波数変化というシステムを逆に解き、観測された共振周波数変化から印加された触覚荷重をベクトル量として推定しうる。これにより触覚荷重の3軸方向成分を単一素子で計測することができる。本研究ではこの触覚計測手法の原理確認を行うとともに、本測定手法に適応しうる微細な圧電カンチレバー型センサデバイスの作製手法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

柔軟なエラストマ材料中での圧電 MEMS カンチレバー構造体の共振挙動について有限要素法解析による数値シミュレーションを行い、エラストマ表面へ触覚荷重を印加した際のカンチレバーの共振周波数変化のメカニズムを明らかにする。この中で、カンチレバー形状と振動モードの選択により、触覚推定結果にどのような影響を与えるかを吟味し、最適なセンサ形状を検討する。また得られた最適構造について、シリコンマイクロマシニングプロセスにより圧電マイクロカンチレバー構造体を作製評価する。

(1) 荷重をうけたエラストマ中でのカンチレバーの振動解析

単一素子でベクトル触覚計測を可能とするカンチレバーの形状として、まず3軸各方向の荷重に対して応力を生じ、かつ各軸方向荷重に対して共振周波数が増えること、特に荷重方向の正負に応じて応答も符号を変える必要がある点に注意して構造を設計する。最も単純な形状として水平なカンチレバーを考えると、一見鉛直方向の力のみしか応答できないように見えるが、実際にはエラストマの水平方向変形によりカンチレバーの軸方向荷重が増えることで水平方向荷重が検知できる。また水平荷重の向きが

逆転すると、カンチレバーに生ずる軸方向荷重の符号がそれに伴って逆転するため、正しく水平荷重を検知することができる。一方でエラストマの鉛直方向の変形は、上向きであっても下向きであってもカンチレバーに同じ影響を与えるため、鉛直方向の荷重の大きさは検知できても方向を検知できないことになる。実際にはセンサの底部には基板があり解放されていないため拘束条件が異なり、完全に上下対称ではないが、荷重の向きが逆転に正しく対応して応答の符号が逆転するかどうかは個々の構造毎に詳細に確認せねばならず、設計を複雑化させてしまう。

以上の観点より、複数方向の荷重に正しく応答するためには各荷重方向に対して単純な非対称性を持つ構造を形成する必要がある。そこで、まず鉛直と水平の2方向に応答する形状として、基板から水平に伸びつつ徐々に鉛直方向に湾曲した構造を検討する。この場合、鉛直と水平の2方向いずれにもカンチレバーが非対称な形状を持つため、荷重方向の反転に伴う応答の反転を含めて正しく応答できるものと予想できる。さらに第3の方向に対しても正しく応答するために、湾曲して鉛直に立ち上がった先端から、さらに前2方向のいずれにも直交した方向へ向けてさらに湾曲した構造を検討する。これは、ちょうどアルファベットのLの文字の直線部分を紙面から立ち上がる方向に湾曲させた構造に相当する。そこで、まずこのような構造のカンチレバーをエラストマに埋め込んだ系において、カンチレバーを振動させた際の共振周波数が、エラストマ表面に印加した荷重に応じてどのように変化するかを有限要素法解析により明らかにする。

3方向荷重を検知するためには3個(以上)の振動モードを利用する必要がある。各モードにおいて、x, y, z各方向の荷重( $P_x, P_y, P_z$ とする)を印加した際の共振周波数変化率(荷重印加時の共振周波数の変化分を荷重印加前の共振周波数で割ったもの)を $F_1, F_2, F_3$ とすると、印加荷重から共振周波数変化率への順方向の関係が式(1)

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1x} & a_{1y} & a_{1z} \\ a_{2x} & a_{2y} & a_{2z} \\ a_{3x} & a_{3y} & a_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

で表される。これを

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}\mathbf{P} \quad (2)$$

と表すと、測定された共振周波数変化 $\mathbf{F}$ から触覚荷重 $\mathbf{P}$ を推定する作業は式(2)を逆に解いて

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{F} \quad (3)$$

を求めることに相当する。ここで正しく触覚推定を行うためには、行列 $\mathbf{A}$ が正則であることはもちろんのこと、実用的には逆問題を解く際に測定誤差が大きく拡大されないこと

が重要である。最も直接的には行列  $A$  の条件数が十分小さな値であることが必要であるが、それ以外にも、そもそもシステム自体が式(1)で表されるような線形システムへ十分な精度で近似できることが必要となる。

(2) 圧電 MEMS カンチレバー構造体の作製

カンチレバー部分は基板から立ち上がった構造とするため、基板上で平面構造と積層構造を形成した後何らかの方法でカンチレバー下部の基板を除去する必要がある。基板の表側から犠牲層エッチングにより基板表面の一部を除去する方法が、時間的にもプロセス工程的にも簡便ではあるが、カンチレバー根元部分にサイドエッチ部分が生ずることが避けられず、この形状をシミュレーションに反映すると前節で述べた設計と解析を不必要に複雑化することになる。そこで今回は、時間とプロセス工程の複雑さでは劣るものの設計通りの形状を形成しやすい方法として、裏面からシリコンの垂直エッチングを行いカンチレバー下部の基板を全て取り除くこととした。

カンチレバーを湾曲させる方法としては、積層構造における応力差を利用する。基板表面に形成するシリコン熱酸化膜は圧縮の残留応力を持ち、基板から解放されると伸びようとする。これに対し、圧電体として使用する PZT をゾル・ゲル法により形成すると基板上で引っ張りの残留応力を持ち、基板から解放されると縮もうとする。よって、基板上に上から順に上部電極/ゾル・ゲル PZT/下部電極/シリコン熱酸化膜となる 4 層構造を形成すると、弾性体の上に圧電キャパシタが載った圧電カンチレバー構造であるとともに、基板から解放されると自動的に反り上がる向きに立ち上がることが予想される。このとき、各層の厚みと弾性率および残留応力の値の組み合わせにより、立ち上がった湾曲形状の曲率が決定されるので、これらのパラメータを調整することにより所望の形状を実現できる。

4. 研究成果

前節 3.(1)で述べた L 字形カンチレバーにより解析を行い、本提案方法の原理確認を行い、また同形状のセンサ構造体を作製するプロセスを確立した。ここで同形状のセンサでは周波数応答の非線形性が大きく触覚推定誤差が大きくなることが見いだされた。そこでセンサとしての性能を向上するためのアプローチとして、まず同形状のセンサにおいて使用するモードをより詳細に吟味することにより触覚推定誤差の低減を図った。次に別のアプローチとして、形状をより単純にしたモデルを作成し、推定誤差の低減を図った。さらに、誤差低減を実現できる改良型のセンサ構造について、単一カンチレバー中に複数

の制御された曲率をもつ形状を実現するプロセスを確立した。

(1) 二重湾曲型 L 字形圧電カンチレバーによるベクトル触覚計測の原理

図 1 に圧電カンチレバーをエラストマに埋め込んだ解析モデルの模式図を、また図 2 に触覚推定に用いる 3 種の振動モードを示す。

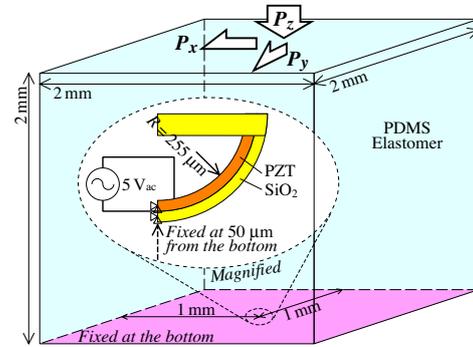


図 1 L 字形圧電カンチレバー・エラストマ系解析モデルの模式図。

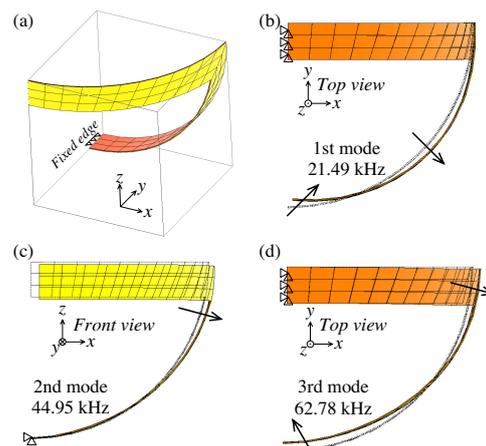


図 2 L 字形カンチレバーの(a)鳥瞰図と触覚推定に用いる 3 種の基本的な振動モード: (b) モード 1, (c) モード 2, (d) モード 3。

エラストマとしてシリコンゴムの一種である PDMS (polydimethylsiloxane) を仮定しており一辺 2 mm 角の立方体形状としている。これは人間の指先等の湾曲した表面に実装する場合などを考慮して、基板とエラストマを一素子分に分割した状態を表している。このエラストマ内に埋め込んだ状態のカンチレバーの圧電キャパシタ部に 5 V の交流電圧を印加して振動を誘起する。振動モードとしては、ここでは原理確認のため動作を理解しやすい単純な振動モードを選んだ。モード 1, 2 および 3 ではそれぞれ L 字形の主に先端部分のみ、主に根元部分のみ、および根元部分と先端部分の両方が、それぞれ撓み振動するものである。これら各振動モードにおいて、エラストマ表面に x, y, z 各方向の一軸荷重を

印加した場合と三軸荷重を印加した場合の共振周波数変化率を図3に示す。各共振周波数変化は、大まかには印加荷重に対して線形に変化しており、また各方向の一軸荷重に対する応答の和が三軸荷重に対する応答に概ね一致し、近似的に重ね合わせが成り立っていることが分かる。一軸荷重応答で最も非線形性が大きいものはモード1におけるz方向荷重に対する応答で9.60%、重ね合わせの最大誤差はモード2において4.76%である。また式(2)における係数行列  $A$  は正則であり条件数は3.76である。

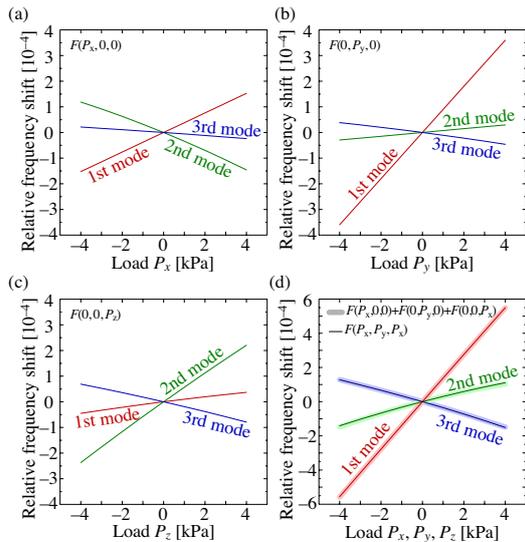


図3 各モードにおける印加荷重に対する共振周波数変化率：(a) x方向一軸荷重、(b) y方向一軸荷重、(c) z方向一軸荷重、(d) 一軸荷重応答の和と三軸荷重に対する応答の比較。

この系において、式(3)に基づいて共振周波数変化率から印加荷重の逆推定を試みたところ、 $\pm 4$  kPaの荷重範囲内において、推定荷重ベクトルの誤差絶対値は最大で33%となった。この大きな推定誤差は、主に荷重に対する共振周波数応答の非線形性に起因するもの、すなわち10%程度の非線形性をもつシステムに対して単純に式(3)の線形逆問題をもって解いているためと考えられる。応答非線形性の影響を低減して触覚推定誤差を評価するため、予め取得しておいた離散点での推定値を基にした **transfinite mapping** を利用して線形逆推定結果の補正を行った。その結果、 $\pm 4$  kPaの荷重範囲内1 kPa間隔のベクトル荷重印加において推定誤差を最大43 Paまで低減することができ、単一素子でのベクトル触覚計測が可能であることを確認した。

(2) 圧電MEMSカンチレバー構造体の作製  
上部電極/ゾル・ゲルPZT/下部電極/シリコン熱酸化膜の4層構造を基板表側に形成し、L字形カンチレバー形状に形成した後、

裏面からのシリコン垂直エッチングにより圧電カンチレバー構造体を作製する。以下に作製プロセスの概略を示す。(a) シリコンウェハの表面を厚さ1  $\mu\text{m}$ まで熱酸化する。(b) 下部電極としてTi薄膜およびPt薄膜をrfマグネトロンスパッタリングによりそれぞれ20 nmおよび200 nm製膜する。(c) ゼル・ゲル法によりPZT薄膜を厚さ1  $\mu\text{m}$ まで製膜する。(d) 上部電極としてAu薄膜をrfマグネトロンスパッタリングにより50 nm製膜する。(e) Au薄膜およびPZT薄膜をそれぞれヨウ素・ヨウ化カリウム水溶液およびフッ硝酸水溶液によりウェットエッチングで、Pt/Ti薄膜をArプラズマによるスパッタエッチングで、またSiO<sub>2</sub>膜をバッファードフッ酸で、それぞれエッチングしてカンチレバーのL字形形状を形成する。(f) カンチレバー直下のシリコンをSF<sub>6</sub>プラズマおよびC<sub>4</sub>F<sub>8</sub>プラズマを用いて裏面から垂直にエッチングする。

ここで、垂直エッチング時には基板を冷却するために基板裏面をウェハチャックに密着する必要があるが、この状態で積層構造の応力が解放されると脆弱なカンチレバーが破壊されるおそれがある。そこで、垂直エッチングは基板を貫通する手前2~3  $\mu\text{m}$ まで停止し、その後基板とウェハチャックの間にスペーサを挟んで、応力解放によりカンチレバーが湾曲しても破損しない程度の隙間を空ける。この状態ではもはや基板を冷却することができないので、垂直エッチングではなく冷却を必要としない等方的なプラズマエッチングを行う。このとき、エッチング形状が裏面マスクの形状より広がるが、元の垂直エッチングの速度自体に面内分布があり、エッチング孔の周辺部ほどシリコンの残存量が多いため、最終的なカンチレバーの形状維持には支障がない。この工夫により、ほぼ100%の歩留まりで、二重湾曲形状を持つL字形カンチレバーの形成を可能とした。作製したカンチレバーの顕微鏡写真を図4に示す。図4(a)は基板に焦点を合わせたもの、図4(b)はカンチレバー先端部に焦点を合わせたもので、焦点のぼけ具合から湾曲形状が見て取れる。先端部と根元部の長さはいずれも400  $\mu\text{m}$ であり曲率半径はいずれも設計通りの255  $\mu\text{m}$ である。

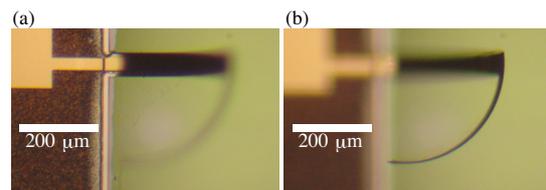


図4 作製した二重湾曲L字形圧電カンチレバーの顕微鏡写真：(a) 基板部に合焦、(b) 先端部に合焦。

### (3) 触覚推定誤差を低減する新規カンチレバー形状

原理確認に用いた二重湾曲L字形カンチレバーと3個の単純な振動モードでは触覚ベクトルの推定誤差が30%以上と大きくなったが、これは荷重に対する周波数応答の非線形性が原因と考えられた。そこでまず応答非線形性の小さいモードの組み合わせを用いることで触覚推定誤差の低減を試みた。初期のモード1~3よりも高い共振周波数を持つ振動モードについて、荷重に対する周波数応答を調べ、その非線形性の小さなものを探索した。その結果、モード2とモード3に代わる新たなモードとして、4番目と5番目のモードを見いだした。モード4は共振周波数68.3 kHzで主に根元部分が面内振動するもの、モード5は共振周波数86.0 kHzで主に根元部分の撓み振動とねじれ振動が合成されたものである。これらモード1, 4, 5を用いて触覚推定を行うと、推定誤差は12%まで低減できることが分かった。このことから、実際に周波数応答の非線形性が小さいモードを選択することにより測定誤差を低減できることが確認できた。

次に、カンチレバーの構造再検討を含めてより測定誤差を低減できるセンサシステムの構築を試みた。当初の二重湾曲型構造は、原理を理解しやすくするために3方向のエラストマ変形をとらえやすい形状としたが、振動部分が2箇所存在するため、所望の主要な振動以外に不要な振動が誘起され、それが周波数応答の非線形性を助長していると考えられた。そこで、基板から湾曲して立ち上がった部分のみに圧電体を配置した形状とし、これの振動面に直交するエラストマ変形は、先端に小さな鉤状部分を設けることにより捉える構造を考案した。ここで先端鉤状部分は、不要な振動を誘起すること無く効率的にエラストマの変位を捉えるため、コンパクトで曲率半径が小さな構造とする必要がある。

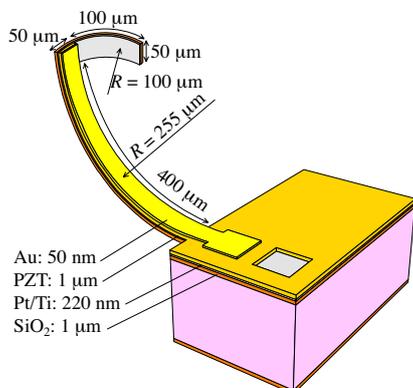


図5 振動部分を一カ所のみとし先端に鉤状部分を形成した改良版カンチレバー構造の模式図。

図5に改良型カンチレバー構造の模式図を示す。この構造において3個の振動モード、すなわちモード1として共振周波数28.3 kHzで面内振動、モード2として共振周波数47.0 kHzで撓み振動、モード3として共振周波数67.0 kHzで面内振動と撓み振動が合成された振動を用いて解析を行ったところ、触覚推定誤差を5.7%まで低減できることが分かった。

図5に示す構造を実現するためには、1本のカンチレバー内に異なる曲率を持つ部分を作り込む必要がある。ここで先端鉤状部分は振動を誘起する必要がないので圧電体層が不要である。そこで、Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>のみからなるカンチレバーを作製して曲率を評価したところ、従来の圧電体を含む積層構造の5倍近くの曲率半径1.17 mmを生じた。しかしながら、実際のセンサ作製プロセスではPZT製膜の際に650°Cでの結晶化アニール工程を含む。そこで、Pt/Ti膜を形成した後裏面からのシリコン垂直エッチングを行う前に同様のアニールを行ったところ、曲率半径を116 μmまで縮小できることが分かった。これらの結果を踏まえて、先端部分に余分のアニール処理を行った短い突起部を持つ圧電カンチレバー構造を形成するプロセスを確立した。本プロセスにより作製したカンチレバーの顕微鏡写真を図6に示す。圧電振動部分に曲率半径116 μm、先端鉤状部分に曲率半径215 μmを持つ形状を形成することができた。これにより、直接的な線形逆推定のみにおいても誤差を6%程度まで低減したベクトル触覚計測が可能になると期待される。

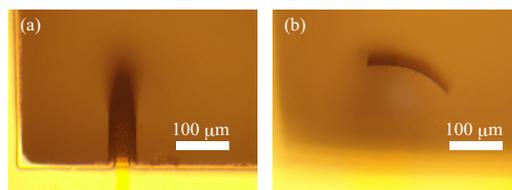


図6 作製した改良版カンチレバー構造体の顕微鏡写真：(a) 基板部に合焦、(b) 先端部に合焦。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1) Kaoru Yamashita, Yi Yang, Takanori Nishimoto, Kazuya Furukawa, Minoru Noda, "Piezoelectric Vibratory-Cantilever Force Sensors and Axial Sensitivity Analysis for Individual Triaxial Tactile Sensing", IEEE Sensors Journal, 査読有, Vol. 13, No. 3, 2013, pp. 1074–1080.

DOI: 10.1109/JSEN.2012.2237547

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) Hikaru Tanaka, "Curvature Controlled Microstructures for Improved Triaxial Sensitivity in Piezoelectric Vibratory Cantilever-Type Tactile Sensors Based on Resonant Frequency Shift", The 2013 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, 査読有, Suita, Japan, June 5-6, 2013, pp. 90-91.
- (2) 紀宏俊, 「共振周波数変化型触覚センシング用圧電カンチレバー構造の設計」, 平成 25 年電気学会全国大会, 査読無, 3-157, 名古屋市, 3 月 20 日~22 日, 2013, p. 223.
- (3) Yi Yang, "Vibration Mode Design for Precision Improvement of Triaxial Tactile Measurement Using Individual Vibratory Microcantilever Sensor", IEEE Sensors 2012, 査読有, Taipei, Taiwan, October 28-21, 2012, pp.1763-1766.
- (4) Kaoru Yamashita, "Piezoelectric Vibratory-Cantilever Force Sensors and Axial Sensitivity Analysis for Individual Triaxial Tactile Sensing", IEEE Sensors 2011, 査読有, Limerick, Ireland, October 28-31, 2011, pp. 484-487.
- (5) Kaoru Yamashita, "Vector Tactile Sensing by a Single Sensor Element of Vibratory Microcantilever Based on Multimode Resonant Frequency Shift", Eurosens XXV, 査読有, Athens, Greece, September 4-7, 2011, pp. 615-618 (Procedia Engineering, Vol. 25).
- (6) Yi Yang, "Piezoelectric Vibratory Microcantilever-type Tactile Sensors and Three-axis Sensitivity by a Single Sensor Element Using Resonant Frequency Shift", The 28th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Application Systems, 査読有, Tokyo, Japan, September 26-27, 2011, pp. 6-9.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 馨 (YAMASHITA KAORU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号 : 40263230

### (2) 研究分担者

野田 実 (NODA MINORU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授  
研究者番号 : 20294168

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

### (4) 研究協力者

楊 藝 (YANG YI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・博士  
前期課程大学院生

田中 光 (TANAKA HIKARU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・博士  
前期課程大学院生

紀 宏俊 (KII HIROTOSHI)

京都工芸繊維大学・工芸科学部・4 年生