

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560231

研究課題名(和文) 力覚を提示できるマイクロピンセットの試作

研究課題名(英文) Experimental Model of a Large Displacement Micro Tweezers Used for Force Display.

研究代表者

阿部 幸勇 (ABE KOYU)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80261600

研究成果の概要(和文)：

本研究における成果は、大きく分けて次の二つである。

- (1) 起歪部にH形スリットを持つダブルビーム機構を採用する事で、荷重位置と実荷重を同時測定する手法をFEAと実験モデルによって見いだした。このことにより、操作者の違いによる把持位置変化の影響を排し、実際の把持力のみを知る事ができる。
- (2) 力覚提示機能を持つマイクロピンセットでは操作時の僅かな過大力が大きな損傷を生むことから、その過負荷防止は極めて重要である。そこで、微小な起歪体に適した新たな過負荷防止機構を提案した。

研究成果の概要(英文)：

Through the research project, two main achievements are obtained.

- (1) A method for simultaneously measuring the loading position and the magnitude of the load force is found out. It uses an H-slit type double beam structure as the deflection mechanism. The effectiveness of the method is verified by FEA simulations and an experimental model. As a result of the finding, we can know the actual magnitude of the load whichever part of the tweezers is gripped by an operator.
- (2) Overload prevention is important for a micro tweezers with function of force display. Since unexpected external force may damage it. A new type of overload prevention mechanism is proposed for those tweezers with small deflection mechanism.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械システム

キーワード：力覚センサ、マイクロピンセット、H形スリットはり、平行はり、偏置荷重

1. 研究開始当初の背景

マイクロマシン技術の進歩を背景に、微小物ハンドリングへの要求は急速に高まっている。医療工学においては、神経・血管の縫合手術、脳外科手術など、顕微鏡下での微小物有機体を取り扱う機会が多くなっており、このことを目的としたマイクロハンドの開発や微細血管縫合用遠隔手術システムなどの研究が行われている。また工業の分野においても、マイクロ部品の組み立てや加工作業にマイクロファクトリという考えが提案され、微小物体の把持・操作を必要とする機会が多くなっている。

このような微小物のハンドリングでは、把持対象物への静電作用や電磁力などの影響が強くなり、その作業を難しくする。また加工に用いる部品の操作などにおいては、従来のピンセットを縮小しただけでは剛性が得られない事が予想される。

そこで本申請者のグループは、ミリサイズからサブミリサイズまでの幅広い対象物の把持・操作を可能とする、高剛性、大変位マイクロピンセットを製作し、これまで培ってきた遠隔操作技術、ハプティックインタフェース、シミュレータの技術を応用して、一連のシステムとして構築することを考え、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、顕微鏡下で微小物体をハンドリングするマイクロピンセットを製作することである。具体的には、サブミリサイズの物体の把持・操作作業に用いる、力覚を提示できるマイクロピンセットの製作と、操作者へ力覚の提示を行うマスタースレーブ型制御システムを構築することである。このマイクロピンセットの特徴は、

- ① 力覚を提示するために必要となる力検出の起歪部に、申請者が提案している、高剛性と高感度を兼ね備えたH形溝付きはり構造を採用していること。
- ② 微小な力の検出によって剛性の下がった起歪部を保護するための過負荷防止機構を内蔵していること。
- ③ 大変形を可能とするために、超弾性機能処理を施したTi-Ni合金を用いること。
- ④ 弾性ヒンジの溝部の形状を、過度の応力集中を避ける形とすること。

である。このマイクロピンセットの概念を図1に示す。

3. 研究の方法

本研究課題の「力覚を提示できる大変位マイクロピンセット」は、ディスプレイに映し出された顕微鏡下の状況をもとに操作者がマスター側のピンセットを操作し、スレーブ側のマイクロピンセットに微小移動を行わ

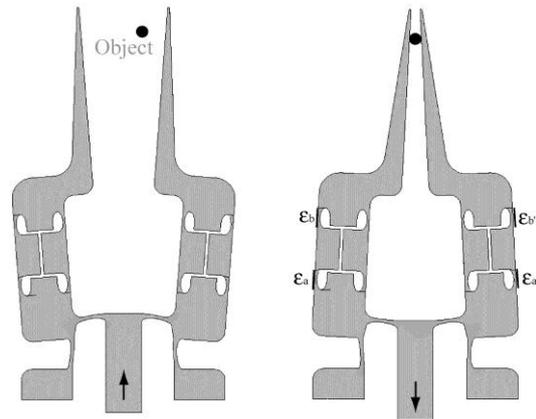


図1 マイクロピンセットの概念

せながら、微小物の把持・操作を行おうとするものである。そこで課題は、スレーブ側にあたるマイクロピンセットの製作と、マスター側にあたるハプティックインタフェースの構築となる。図1のマイクロピンセットの例では、 ϵ_{a-d} 部において力信号を得る。

マイクロピンセットの材料選定の過程で、当初の候補であったTi-Ni合金の超弾性材料の調達が困難となり、アルミニウム系軽合金とした。また力信号の検出素子の選定にあたっては、製造メーカーの工場を訪問し、最新の力信号検出素子について技術交流をした。そのなかで、申請段階で候補としていたピエゾフィルム(PVDF)と圧電セラミクス(PZT)については、可能ではあるが実験段階での少量生産ではかなり高価なものになることから、極小サイズのひずみゲージを用いることとした。一方のマスター側となるハプティックインタフェース部はマイクロローサージェリ用剪刀の制御系として先行研究で構築したものを採用することとして研究を進めた。

マイクロピンセットに内蔵する力覚センサの開発では、力やモーメントを弾性ひずみに変換するセンサ構造体(起歪体)をいかに設計するかが重要なポイントとなる。研究代表者は、この力覚センサの起歪部に極めて高い指向性を示す、H形スリットを持つダブルビーム構造を提案している(図2)。このH形スリットを持つダブルビーム型ロードセルは、平行ばねなどの直線案内要素として古くから用いられているものと同様の機構である。特に近年は、電子てんびんの起歪体(ロードセル)として多く用いられている。

このH形スリットを持つダブルビーム機構の特徴ある変形を上皿てんびんに用いられているローバール機構(荷重偏置誤差の除去機構)としてとらえた場合、その偶力の影響除去に向けた研究が重要となる。

また一方、本課題のマイクロピンセットに

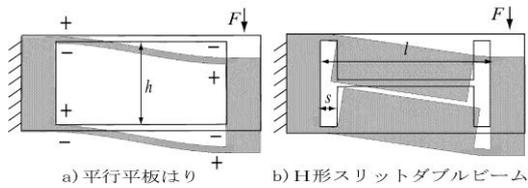


図2 平行平板とH形スリットはりの変形様と発生応力

おける力覚センサとして考えると、実荷重と同時にその把持位置（荷重位置）を知る事ができれば、作業性が向上する。そこで、この実荷重と荷重位置情報を同一の起歪体で取得することができれば、力情報を作業に用いる分野における有益な道具となる。

これらのことから、本研究ではH形スリットを持つダブルビーム構造によってもたらされる変形の特徴と、平行はりの切り欠き部における発生ひずみ値の關係に着目をし、荷重位置の違いによってもたらされる偏置誤差の影響が除去される仕組みについて、平行平板はりの変形機構とロバーバル機構を対比させて解明することとした。

さらに課題としているマイクロピンセットでは、その内包する力覚センサ部も小さく、また極めて弱く作られている。このことから、僅かな過大力が致命的な損傷を与える。そこで、この起歪部を保護するための過負荷防止機構が重要となる。本研究では、このことについての新たな提案をし、その有用性について検証した。

これらの解明には、FEAと実験モデルを用い、材料力学的観点からの理論値と合わせて検討を行った。

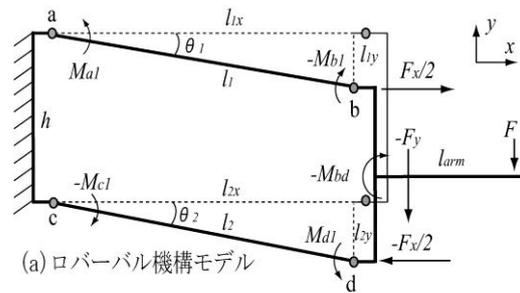
4. 研究成果

(1) ダブルビーム構造を用いた偶力除去法

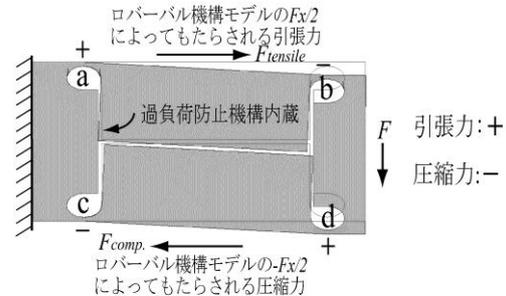
本研究代表者は特定方向への感度のみを持つ指向性の高い起歪体として平行平板はりの進展型であるH形スリットを持つダブルビーム構造を提案している。

これは、高いひずみ信号の分離性とセンサの加工段階で付与できる高精度な過負荷防止機構を特徴としている。

これまでダブルビーム型ロードセルの特徴ある変形機構を上皿天秤の原理であるロバーバル機構と同様と捉え、その荷重位置によってもたらされる偏置誤差の除去に向けた取り組みが行われてきたが、解決には至っていない。一方、ロボットの把持指などの力覚センサとして考えると、実荷重と同時にその把持位置（荷重位置）を知る事ができれば、作業性が向上する。つまり、この実荷重と荷重位置情報を同一の起歪体で取得することができれば、力情報を用いる分野における新たな道具となる。そこで本研究代表者は、こ



(a) ロバーバル機構モデル



(b) H形スリットビームモデル

図3 ロバーバル機構とH形スリットはりにおける応力発生メカニズム

のH形スリットを持つダブルビーム構造によってもたらされる変形の特徴と、切り欠き部における発生ひずみ値の關係に着目し、荷重位置の違いによってもたらされる影響が除去される仕組みについて、平行平板はりの変形機構とロバーバル機構を対比させるといふ、極めて斬新なアイデアによって解明した。

図3 (a)はロバーバル機構を模した概念図である。図中の腕木(l_{arm})における荷重 F によってもたらされる $F_x/2$, $-F_x/2$ の力は b , d の回転節において $-M_{bt}$, M_{dt} となって相殺される。このことから、この4節リンクは荷重位置に関りなく $-F_y$ によってのみ変位する。

しかし図3 (b)図のH形スリットダブルビームの4点の切り欠き部には、平行平板はりの変形によってもたらされる引張応力(+)と圧縮応力(-)が生じている。加えて、4節リンク機構と違い回転節には抵抗がある。このことから、上部のはりには $F_x/2$ による張力が、下部のはりには $-F_x/2$ による圧縮力が加わることになる。つまり、荷重位置が離れるに従って、 a 点の引張応力と c 点の圧縮応力は大きくなり、 b 点の圧縮応力と d 点の引張応力は小さくなっていく。

図4は、このことを検証した解析結果で、 a , c 点のひずみ値は腕木の荷重位置が離れるに従って増えていき、 b , d 点のひずみ値は同様に減少していく。しかし、これらの値の平均値 ($a-b$, $c-d$) は変化しない。このことから、固定端側 (a , c) あるいは荷重端側 (b , d) のひずみ値を用いることで荷重位置を知る事ができ、これらの合計値を用いることで実荷重を知る事ができることがわかる。

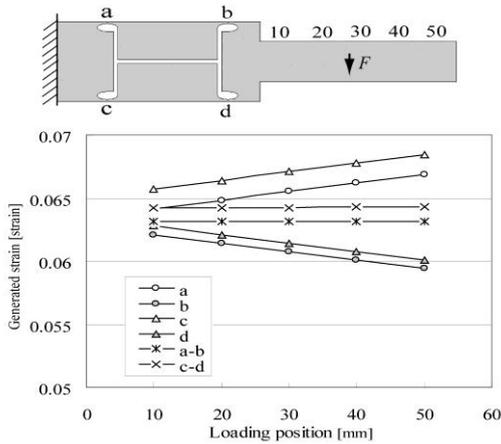


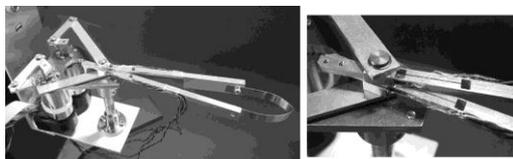
図4 H形スリットはりの各切り欠き部における発生ひずみ値とその平均値

図5は、このH形スリット起歪体を脳外科手術シミュレータの力覚計として用いることを考え試作した例である。このような場合には被験者ごとに変わる術具の把持位置の影響を受けないことが望まれることから、本手法を用いる以外、その解決は難しい。また荷重位置情報を用い、電子天秤において出現した偏置誤差を補正できることから、極めて高精度な秤への応用としても期待できる。さらにロボットの把持指として用いた場合、極めて簡素なシステム構成で、力覚、把持位置、すべりなどの情報が得られるという他にない特徴を持っている。

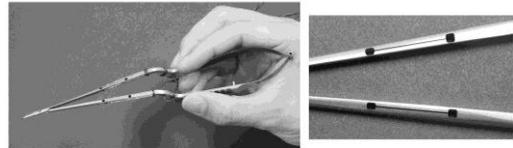
図6は、このことを検証するために用いた試作把持指モデルで、直交するH形スリットによって、把持物体の重量を同時に取得するものである。実験の結果は、F E Aの解析結果と変わらないことを確認している。

このことから、H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルにおける、荷重位置によってもたらされる偶力の影響除去の仕組みが明らかとなった。その結論は以下の通りである。

①H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルにおいて、その実荷重を知りたい場



(a) H形スリットを持つ試作マイクロ剪刀とその力覚提示装置



(b) H形スリット力覚センサを持つ脳外科手術用マイクロ剪刀

図5 H形スリット力覚センサを用いた脳外科手術用剪刀と手術シミュレータ



図6 H形スリット実験モデル

合には、上側はり（あるいは下側はり）の2ヶ所の切り欠き部におけるひずみ値を合わせて取得するか、4ヶ所の全ての切り欠き部におけるひずみ値の合計を用いる。

②また荷重位置を知りたい場合には、H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルの固定端側（あるいは自由端側）における上はりと下はりの2ヶ所の切り欠き部のひずみ値の合計を用いる。

③しかし、その平行はり間距離 (h) が、溝部厚さ (t)、はり長さ (L) に比べて狭い場合には、荷重位置によってもたらされる偶力の影響を除去することが困難となる。その場合には、実荷重として得た偏置誤差のある校正曲線にたいし荷重位置情報をもとにした補正を行うことで、より高精度の実荷重値を知ることができる。

(2) 単板はり構造における偶力除去法

しかしH形スリットダブルビーム構造は、微小物体を扱う場合の把持指としては構造が複雑である。そこで、図7のような単純な把持指を用いた場合における把持指についても検討を行った。図中の信号取得の位置関係 (L) が既知であれば、 F_1 によって生ずる s_1 , s_2 におけるひずみ値の差の値と、 F_2 によって生ずる s_1 , s_2 におけるひずみ値の差の値は同じであることから、実荷重を知るには s_1 の値から s_2 の値を差し引くことで、また荷重位置を知るには、 s_1 と s_2 の和を s_1 と s_2 の差で除した値を用いることで求められることが解明できた。

図8はこのことを検証するためのモデル ($5[\text{mm}] \times 6[\text{mm}] \times 50[\text{mm}]$) と、このモデルに線長 $2[\text{mm}]$ 歪ゲージを貼り付けて取得した時の、実荷重と荷重位置の校正曲線である。この校正曲線を用いることで、把持位置に関らず実荷重が取得でき、また必要であれば把持位置も知る事ができる。

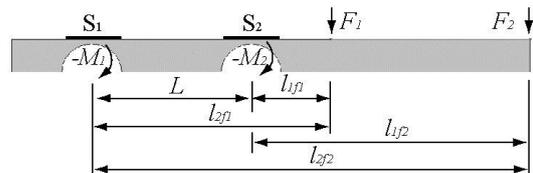


図7 単板はりモデル

(3) 過負荷防止機構

力覚センサの多くは弾性体に生じるひずみを計測することによって力やモーメントを計算するのが一般的な方法である。このことから、力を検出する部位の剛性を下げる事がその感度を高めることにつながる。しかし、機械的剛性が低くなることはその運動精度の点からも好ましいことではない。そこで、センサの感度を大きく取りながらも機械的剛性を高いたもつという相反する要求に応える事が検出用はりの設計における重要な点である。

またこのような力の検出を行う部位が変形を伴う場合には、その部位の損傷を防ぐために過負荷防止の対策が重要となる。このことは微小力を測定する目的で作られた力センサにおいては特に重要で、取り扱い時の不注意によってもたらされる僅かな過電力が起歪部に対し致命的な損傷を与えることにつながる。

そこで本研究では、H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルにおける新たな過負荷防止法について提案し、その有用性の検証を行った。

図9はこのモデルを用いて行った実験結果で、荷重が6.5[N]を越えた時点で過負荷防止機構が働き変形の進行が止まっている。

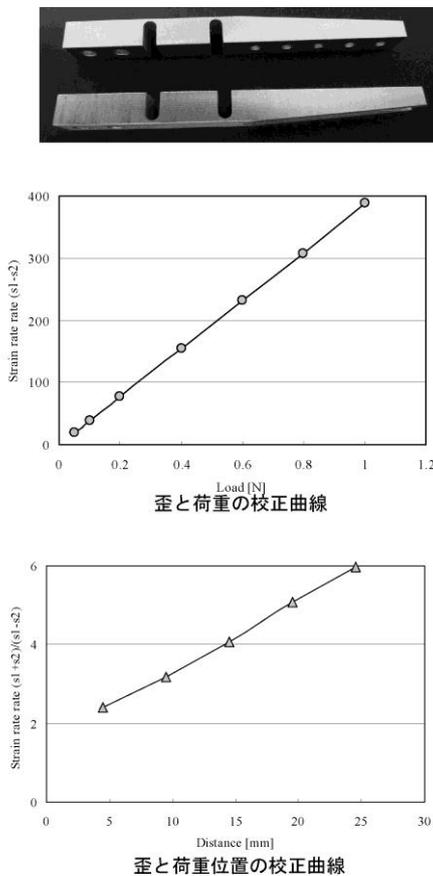


図8 単板はりモデルと校正曲線

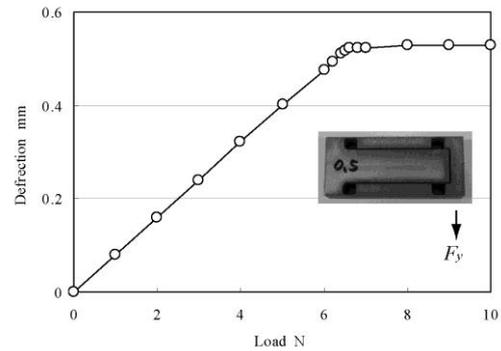


図9 過負荷防止の作動点

図10の解析モデルより、荷重を加えられた右端が変形によって左辺の固定端より伸びている舌状の部位に接触することで変位の進行が止まることがわかる。つまり、過負荷の作動点は図中の s のスリット幅で決まることから、起歪体の設計段階で過負荷の作動点を精度よく付与できる。

Hスリット形は、4ヶ所のスリット部に置く応力集中が課題となる。この部位の疲労を防ぐ目的から行った研究の結果、楕円の短軸と長軸比が1/5程度のものが、過度の応力を防ぎ、またひずみ信号値においても優れる事がわかっている。しかしこのような切り欠き部形状を持つ平行はりの変位を計算によって求めることは難しい。そこで、楕円溝を角溝と仮定した場合の有用性についてFEAモデルと実験により検証を行った。図11はその結果で、楕円溝の平均溝厚さを角溝形状とする方法で、その過負荷作動点を簡便に求められる事が分かる。

これらの成果の概要は以下の通りである。

- ① H形スリットを持つダブルビーム型はりの変形機構を用いた過負荷防止機構は、他の部品を用いての組み立て・調整工程を省く事ができることから、その生産性が高い。
- ② 先に提案したH形スリットを持つダブルビーム型ロードセルの過負荷防止機構で課題となっていた平行はり中間の剛体部における適切な厚さについては、切り欠き部厚さの8倍程度あればH形スリットを持つダブルビーム型はりの特徴となる振れに対する抗力がじゅうぶんとなる。
- ③ また感度の必要な方向への干渉を防ぐに

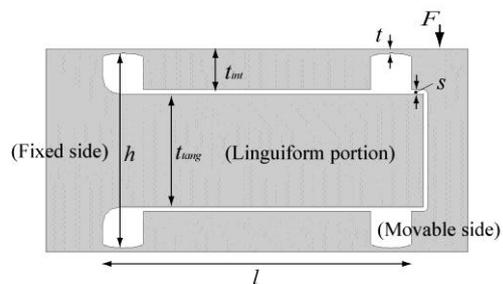


図10 過負荷防止機構

は、切り欠き部の板厚の5倍程度でじゅうぶんであることから、H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルにおける、平行

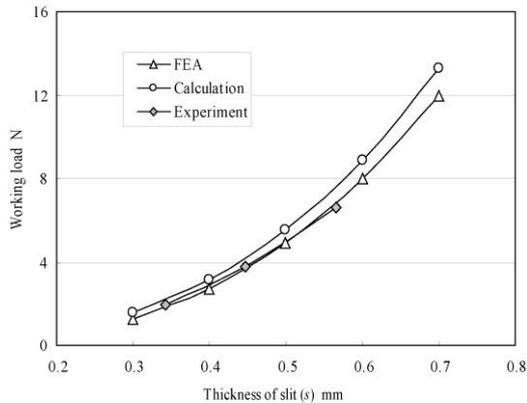


図 11 ヒンジ部形状と過負荷の作動点

はり中間の剛体部厚さは、切り欠き部の板厚の8倍程度あれば十分で、それ以上の厚さはセンサの感応速度に影響を及ぼす。

- ④ H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルの切り欠き部に楕円形状を用いた場合の過負荷防止作動点は、その切り欠き部全体における平均板厚を用いたH形スリットを持つダブルビーム型はりのたわみの式によって簡易的に求めることができる。

(4) マイクロサージェリー分野への応用

現在は、脳外科手術を想定した両手対応型手術シミュレータの開発をおこない、その術具部に、これまでに開発を行ったマイクロピンセット型の手術用剪刀を取り付けることを想定して研究を進めている。

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3件)

- ① 阿部幸勇, 内山勝; H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルにおける過負荷防止機構, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 76, No. 11, pp. 1299-1304, 2010.
- ② 阿部幸勇, 内山勝; H形スリットを持つダブルビーム型ロードセルの変形機構を用いた荷重位置と実荷重の同時測定, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 76, No. 10, pp. 1200-1205, 2010.
- ③ Koyu ABE and Masaru UCHIYAMA, Overload Protection Mechanisms for Force Detecting Beam in a Force Sensor, Journal of Robotics and Mechatronics, on refereed, Vol. 20, No. 2, pp. 316-321, 2008.

[学会発表] (計3件)

- ① 阿部幸勇, 近野敦, 内山勝; H溝型ロードセルにおける荷重偏置誤差の除去, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010年6月16日, 旭川市.
- ② 高木優, 阿部幸勇, 姜欣, 安孫子聡子, 近野敦, 内山勝, 脳外科手術シミュレータ用ハプティックインタフェースの開発, 日本機械学会, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010年6月15日, 旭川市.
- ③ 阿部幸勇, 姜欣, 近野敦, 内山勝; 東北大学内山・近野研究室のRT-高指向性力覚センサ技術一, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月11日, 神戸市.

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

- ① 名称: はり構造起歪体および荷重測定法
 発明者: 阿部幸勇, 内山勝, 近野敦, 姜欣, 安孫子聡子
 権利者: 東北大学
 種類: 特許
 番号: 特願 2010-118938
 出願年月日: 2010年5月25日
 国内外の別: 国内
- ② 名称: 荷重センサ
 発明者: 阿部幸勇, 内山勝, 近野敦, 姜欣
 権利者: 東北大学
 種類: 特許
 番号: 特願 2009-229502
 出願年月日: 2009年10月1日
 国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 幸勇 (ABE KOYU)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 80261600

(2) 研究分担者

内山 勝 (UCHIYAMA MASARU)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 30125504

近野 敦 (KONNO ATSUSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 90250688

姜 欣 (JIANG XIN)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 30451537

安孫子 聡子 (ABIKO SATOKO)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 40560660

(3) 連携研究者

()

研究者番号: