

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 神山和人

本論文は「力ベクトル場計測を目的とした光学式触覚センサの研究」と題し、6章からなる。触覚センサは、ロボットの感覚器としては勿論のこと、例えば、接触の有無や接触位置を計測するタッチパネル、床面に加わる力の位置と大きさを計測し自動車のタイヤの接地圧などを計測する力分布計測センサ等の多くの応用をもつ重要なセンサである。ところが、現在商品化されている触覚センサには、接触力を抵抗値変化として検出する方式である導電ゴムなどを用いたもの、静電容量変化として検出する方式のもの、光特性の変化として検出するもの等があるが、いずれも分布している接触圧を計測することを目的としており、力の方向を計測することはできない。逆に、力の大きさや方向を計測できる力センサは、その点の計測に限られ、分布として計測することができない。本論文では、力の大きさ及び方向の分布、すなわち、力ベクトル場を計測可能な計測手法を提案し、それを弾性体のセンサとして実現し、その有効性を示し、かつその設計法を明らかにして応用への道を拓いている。

第1章「序論」は緒言で、力ベクトル場を計測することに加えて、触覚センサに特有の壊れやすさを回避するために適切な弾性を持つことを目標に挙げ、そのため弾性体で構成され、その変形情報を接触面から離れた場所から光学的に計測し、その情報から力ベクトル分布を計算する新しいタイプの触覚センサを実現するという、本研究の目的と立場と意義とを明らかにしている。

第2章は、「力ベクトル場計測理論」と題し、弾性体の内部変位情報から表面に付与される力ベクトル場を求める一般的な理論を導出し、その後、提案手法が用いる具体的な理論を求めている。すなわち、弾性体が線形弾性体であるという仮定を用い、表面の力ベクトル場を、弾性体内部の表面から一定の深さに存在する複数点の変形情報から求める式を導出している。提案している計測方法は、弾性体の二次元の変形情報を深さの異なる2層で計測することで計測情報を増やし、三次元の力ベクトル分布の計測を容易にするというものである。2層でマーカの色を例えば青と赤に変え、カメラを用いて光学的に計測する。表面のベクトル場の計測点を n 点とし、青マーカ及び赤マーカも計測点と同数の n 個である場合、表面の1点に付与される力ベクトルの算出に3つの独立した情報が必要となるため、求めるべき値は $3 \times n$ 個、計測できる情報が2層計測を行うので、 $2 \times 2 \times n$ 個であり、マーカの移動情報から力ベクトル場への写像行列はフルランクとなる。しかし、青マーカと赤マーカの移動は完全に独立ではなく、混合決定問題となるため、擬似逆行列に一種の境界条件を加えた形である一般逆行列を用いている。なお、弾性体内部に埋め込まれる2層のマーカはそれぞれ適切な深さに配置される必要があるが、その最適な深さを本論では計測精度が最大となる位置とし求めている。

第3章は「光学式三次元触覚センサの試作及び評価」と題し、提案した触覚センサの設計パラメータの決定及び試作、評価について論じ、透明弾性体の内部に配置された色を違えた2層のマーカ及び1台のカメラを用いることで、弾性体内部の変形情報を取得する具体的な構成法を明確にしている。配置するマーカの大きさを決める際、重心計測を行うことから、マーカの大きさは撮影画素の数 pixel を占める必要があることを考慮しつつ、マーカの配置間隔は人の指先の2点弁別閾に合わせて1[mm]から1.5[mm]程度とすることから、0.5[mm]のマーカサイズを導出している。各マーカを配置する深さ

については、アンチエイリアシング及び求める力の各方向成分 F_x 、 F_y 、 F_z の独立性から1層目の深さを2.5[mm]、2層目の深さを5[mm]と決定している。また、6軸力センサ及びxyz-ステージを用いて任意の力を構成しセンサに付与し、試作したセンサから得られた計測値と付与した力を比較することにより、性能評価を行っている。その結果、力の合計値に対して、大きさの分解能は約30[gf]、角度分解能は約5[deg]の評価値を得、4[mm]から5[mm]程度の空間分解能を持つことが分かったとしている。また約3[ms]の計算時間を要する。なお、マーカーを層状にすることで向上する精度をシミュレーションによって計算した結果、単層と比較し、最大で誤差が6割程度減少することを確認している。

第4章は「光学式触覚センサの応用:大面積計測型力センサ」と題し、提案手法を用いた触覚センサの応用例として計測領域が大面積に及ぶ力ベクトル場計測センサを提案している。提案手法を用いたセンサは、計測領域の拡大に伴い計測面-カメラ間距離を大きくする必要があり、センサ配置に必要な体積が増加する。計測面が1[m]×1[m]の領域である場合、計測面からおよそ1[m]程度の位置にカメラは配置する必要があり、その際計測に必要な占有体積は1[m³]となる。そこで、この問題の解決のため1つの弾性体とカメラをユニットと考え、ユニットを計測面に敷き詰めることで大面積化を可能としている。その際に生じる問題としてユニット間接合部における非連続性を挙げ、接合部に共通部位を設けることで非連続性の問題の解決を行っている。また、広い計測領域を得る目的で使用する広角レンズにより発生するレンズ歪への対応方法についても提案し実装している。

第5章は「光学式触覚センサの応用:ロボットの指先への搭載を目的とした触覚センサ」と題し、提案手法を用いた指先形状型触覚センサの開発及びセンサのロボットハンドへの搭載について述べている。計測面形状が平面のセンサとは異なり指先のような曲面をとる場合に発生する問題として、写像行列の理論的導出が不可能となる点を挙げ、解決手法として実測によってデータベースを作成し、これを用いることで写像行列を求める方法を提案している。データベースの作成には、各計測点に可能な限り独立した方向成分を持つ3種の既知の力を付与し、マーカーの移動情報を、 F_x 、 F_y 、 F_z 方向それぞれの力による移動情報に分離する。分離された移動情報が各点に付与される力に対するインパルス応答に当たり、これらを要素に行列が作成される。提案した手法を用いることで、計測面の形状を問わずセンサが実現可能なことが示されたとしている。さらに、作成された指先形状のセンサをロボットハンドに搭載し、センサ情報を用いロボットハンドの制御を行っている。センサはカメラを用いたものであるため計測ループが約14[ms]であるのに対し、ロボットハンドは1[ms]の制御ループ速度を持つ。従って、センサ及びロボットハンドのループ速度の違いから、カメラ画像から力ベクトル場を求めるPCとロボットハンドの制御を行うPCを分離し、2台のPC間はLANケーブルによって接続し、センサ計測情報をロボットハンド制御用PCに転送することで安定な制御を可能としている。

第6章「結論」は結語で、本論文の結果をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、これまで困難であった力ベクトル場の計測を可能とする方式を理論的に考察し、それに基づき、透明弾性体の内部に点状マーカー群を配置し、表面に生じた力ベクトル場をマーカー群のパターン変形に置き換え、それをカメラで撮影することで、その変形情報から力分布を計算するという方式を提案し、実際のセンサを試作し評価することで、その理論の有効性を実験的に明らかにするとともに、センサの設計法を明確に示して応用への道を拓いたものであって、計測工学及びシステム情報学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。