

論文内容の要旨

論文題目： 三次元形状計測シートにおける立体再構成法の研究

氏名： 星 貴之

本論文では自己形状を計測する新しい布状デバイス「三次元キャプチャシート」を提案し、その実現を目指す。

布という素材は我々にとって非常に身近な素材であり、欠かすことのできないものである。布の特徴のひとつとして、柔軟性に富み、周囲の環境によって様々な形状に変化することが挙げられる。これは逆に言うと、布の形状には周囲の環境がよく反映されるということである。よって、布の形状計測には潜在的な需要があると推測される。しかし布形状を計測する方法として簡易で実用的なものは、現在のところ存在していない。CG の分野では、近年、より自然な布の動きを生成するために現実の布を計測して三次元データを取得する方法が採られるようになった。そこで用いられるのは、カメラで布を撮影し、布上の模様や投影した構造化光にもとづいてその形状をデータ化する方法である。このようなビジョンにもとづく方法は（複数台の）カメラや光源を必要とするため、スタジオなどの限定された場所でのみしか用いることができない。布とカメラの間に障害物が存在すると計測不能になるため、手で操るなどの操作を布に加えることもできない。また布が柔軟素材であるため自己遮蔽が容易に生じ、そのことも問題となる。これらの制約を取り払うことができれば、“布形状”を情報として利用できるようになり、それにもとづいた新たなアプリケーションも期待される。

我々は、従来とは全く異なる新たな布の形状計測手法を提案する。それは、布（シート）上に微小センサを多数分布させ、それらの協調によって全体形状を再構成する方法である。言わばシート自身がひとつのセンサデバイスとして動作し、自己の形状を計測する。外部から観測する装置が不要であるため、使用場所を選ばず、また障害物や自己遮蔽の問題も生じない。そのように簡易に形状計測ができるという特長から、様々なアプリケーションが考えられる。例えば 3D モデリングの直感的な入力デバイスや、対象を直接包み込むことによる形状・寸法計測、触覚や体性感覚を持つぬいぐるみ、モーションキャプチャスーツ、などである。

布に電子的な機能を付与するという考え方は、ウェアラブルコンピューティングの分野で e-textile あるいはスマートファブリックとして研究されている。情報端末や、室内での位置を計測するセンサ、体の姿勢や動きを計測するセンサなどを衣服（布）に取り付けることが試みられている。布上に電子部品を配置するときに考慮しなければならないポイントは、デバイスサイズと配線である。初期（2000 年代前半）の研究は 10 cm 角程度のデバイスを装着する程度に止まっており、それらの間はワイヤで接続されていた。そのうち次第にデバイスサイズが数 cm 角程度になって多数取り付けることが可能になり、それに伴って配線が煩雑になることが問題化してきた。そこで導電性の糸を布に縫いこんで配線とする方法や、2 層の導電布をそれぞれ電源とグラウンドとしてそれらと接続することによって給電を（さらには通信も）行う方法が研究されるようになった。

我々の提案する方法は、その流れをさらに押し進めて布上に多数の微小センサを高密度に配置

するものである。そこでは現在開発中の2つの技術が背景となっている。まず1つは、センサの微小化である。ベアチップを積層して小型パッケージ化するSiP (System in Package) 技術や、MEMSセンサ構造体と同一ウェハ上に処理回路を形成するCMOS-MEMS技術などが開発され、数mm角のセンサチップが実現しつつある。もう1つは、筆者の所属する研究室で開発が行われている「二次元通信」技術である。これは有線による一次元の通信、無線による三次元の通信の代替となる通信技術である。2枚の導体シートの上に局在させた電磁波によって、通信、及び給電を行う。シート内との電磁波の授受は、電気的接点を持たないコネクタを介して行われる。これにより、多数のセンサをシート上に配置した場合でも個別配線をすることなくセンサアレイシステムを構築できる。また導体シートには導電性を持つ材料であれば何でも用いることができ、例えば導電性の布やゴムシートでもよい。これら2つの技術により、布上への微小センサを高密度実装することが現実味を帯びてきている。

これ以降では、三次元キャプチャシートの具体的な実現方法について検討する。まずシートを離散化して扱うため、リンクをシート上に正方格子状に配置する。リンクは硬く、伸びも曲がりもしないものとし、リンク間はフリージョイントで接続されているとする。このようにリンクを配置しても、全体の布らしさが大きく損なわれることはない。それは実際の布が伸びないたて糸とよこ糸が交差したものとしてモデル化できることにもとづいている。このモデルはチェビシェフネットと呼ばれ、布の変形を糸同士の交差角の変化によって記述するものである。提案した離散モデルもリンク間の回転が自由であり交差角が変化するるので、布のような変形が可能である。この各リンク（もしくはジョイント）にセンサを搭載することを考える。

各センサで計測して形状再構成に用いる物理量には、いくつか候補が考えられる。ジョイント部における曲率・角度、基準点からジョイントまでの距離、重力・地磁気、運動加速度・角速度の時間積分、格子の対角線やリンクの伸縮、などである。これらの中で我々は、重力・地磁気にもとづいて各リンクの三次元空間中での姿勢を導出する方法を採用する。その理由は、地球上であればどこでも信号が供給されている、データの瞬時値にもとづいており時間積分を行わないため誤差の影響で結果が発散することがない、数mm角の小型センサがすでに市販されている、などである。本論文では、加速度・磁気センサにより重力・地磁気の両方を計測する場合と、加速度センサにより重力のみを計測する場合の2通りについて具体的な形状再構成アルゴリズムを与える。

重力と地磁気にもとづく形状計測は、以下のようにして行われる。リンク1本について考えると、その姿勢は固定されたワールド座標に対するロール角、ピッチ角、ヨー角で記述される。そのすべての角度はセンサ出力から計算によって直接求められる。全体形状は、すべてのリンクを結合することにより再構成される。姿勢が一意に定まらないのは、加速度データか磁気データが零ベクトルになるか、それらが平行な場合に限られる。この形状再構成問題は冗長性を持ち、その冗長性はリンク4本が閉じた四角形（単位格子）をなして互いに繋がっていること（閉ループ条件）として表される。これを活用することによりノイズへの対応が可能である。単位格子の形状が誤推定されたときはループが開いてしまうため、そこが閉じるように補正をかけることで正しい形状が得られる。通常、重力はシートを動かさなければ保証されるが、地磁気は磁石や強磁性体が近接すると容易に乱される。そのように外乱磁場の影響のみが問題となる場合にはヨー角のみを補正すればよく、計算コストを減らすことができる。シミュレーションにより、重力の8%

程度、地磁気の水平成分の 25 %程度までのノイズが許容されることがわかった。市販の 6 軸モーションセンサ（3 軸加速度+3 軸磁気）を用いてセンサチップを作成した。それを用いて 3×3 格子程度のシートを試作し、その動作を確認した。今後、さらにセンサ数を増やした試作機へと発展させる予定である。

センサコストを抑えるため、重力のみにもとづく方法も試みた。それは以下のように行われる。リンクに搭載した加速度センサの出力から、ロール角とピッチ角が計算によって求められる。残るヨー角についてはセンサ出力からは直接得られないが、単位格子の閉ループ条件と、その単位格子が対角線を軸とする対称モードで変形することを仮定すると、リンク間の相対的なヨー角が得られる。それにもとづいて単位格子の形状が求められる。全ての単位格子の形状が求められた後、それらを結合することで全体形状が再構成される。このアルゴリズムの非可解性を特異値解析した結果、単位格子が水平面上にあるかまたは完全に潰れてしまった場合に形状が一意に定まらないことがわかった。シミュレーションの結果、各センサには重力の 5 %までのノイズが許容されることがわかった。また試作機（2×2 格子）による検証から、実際にはリンク回りの回転による、対称モード以外のシート変形も存在し、それが大きな誤差として観測されることが判明した。結論として、重力のみにもとづく方法はある程度は形状計測が可能であるものの、水平面とリンクに沿って折れる場合には対応しきれないことがわかった。