

三次元形状計測シートにおける
立体再構成法の研究

星 貴之

目次

第1章 序論	1
1.1 布形状計測への期待	1
1.2 従来の計測法	2
1.3 三次元キャプチャシート ～自己形状を計測する布～	3
1.4 スマートファブリック	4
1.5 近年の技術革新	5
1.5.1 センサの微小化	5
1.5.2 二次元通信	6
1.6 本論文の構成	8
第2章 三次元キャプチャシートの問題設定	9
2.1 布の離散モデル化	9
2.1.1 布の構造	9
2.1.2 正方格子構造	11
2.1.3 通常の布との相違点	12
2.1.4 ジョイントの機構	13
2.2 利用可能な物理量	15
2.2.1 曲率, 角度	15
2.2.2 距離	15
2.2.3 重力, 地磁気	18
2.2.4 運動加速度, 角速度	18
2.2.5 伸縮	19
2.3 本論文で扱う問題設定	20
第3章 重力と地磁気にもとづく形状計測	22
3.1 基本原理	22
3.1.1 問題設定	22
3.1.2 リンク姿勢角の導出	24
3.2 冗長自由度	25
3.2.1 式の本数からの見積り	25
3.2.2 冗長性の利用	26
3.3 シミュレーション	28

3.3.1	モデル生成と計算法	28
3.3.2	ノイズなしの場合	31
3.3.3	リンク長がランダムに変化した場合	31
3.3.4	外乱磁場源が接近した場合	34
3.3.5	センサデータにランダムノイズが含まれる場合	36
3.4	試作	36
3.4.1	システム構成	36
3.4.2	動作実験	40
3.5	本章のまとめ	50
第4章	重力のみを利用する方法	51
4.1	自由度の削減	51
4.1.1	最少リンク数	51
4.1.2	重力のみを利用	51
4.2	原理	52
4.2.1	問題設定	52
4.2.2	再構成法	54
4.2.3	解の唯一性	56
4.3	シミュレーション	57
4.3.1	モデル生成と計算法	59
4.3.2	ノイズなしの場合	61
4.3.3	センサデータにランダムノイズが含まれる場合	61
4.4	試作	61
4.4.1	システム構成	61
4.4.2	動作実験	65
4.5	本章のまとめ	70
第5章	結論	71
	謝辞	73
	参考文献	74
	付録 A 布形状の微分幾何学的記述	82
	関連発表	85

概要

本論文は、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、問題設定やその理論的性質、具体的な実現法についてまとめたものである。

現在、布の形状を簡易に計測する方法は確立されていない。特殊な用途としては、CG アニメーションの分野で、より現実に近い動きを再現するため実際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ことがある。それはカメラで布を撮影する光学的な方法であるため、作業空間が制限され、また遮蔽を生じない場面でしか用いることができない。これに対して提案手法は、布上に微小センサを分布させ、それらの協調によって全体形状を再構成する。この方法は、近年のセンサ微小化の流れと、無配線での通信と給電を可能にする二次元通信の開発により現実味を帯びてきたものである。

布自身がセンサデバイスとして機能するので、シート以外の外部装置は不要である。またカメラを用いる場合と異なり、布の自己遮蔽や障害物があっても問題ない。そのように簡易に形状計測できる特長から、様々なアプリケーションが考えられる。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・サイズ計測、触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。

三次元キャプチャシートの1つの実現法として、重力と地磁気にもとづく方法を提案する。シート形状を再構成する基本原理について述べ、その問題が変数の個数と同程度の冗長性を持つことを明らかにする。また挑戦的な方法として、半分のデータ(重力または地磁気)のみから形状再構成を行うことも考える。それぞれの方法について、シミュレーションと実機による検証を行う。

第1章

序論

1.1 布形状計測への期待

布は我々の生活に密着した素材である。衣服、布団、タオル、ハンカチ、風呂敷、巾着袋、カーテン、テーブルクロス、ソファカバー、ぬいぐるみなど、日常生活の中で出会う布製品には枚挙に暇がない。それは布が十分な強度としなやかさを持ち、それでいて軽量であり、吸水性に富み、収納スペースをとらない、など実用的な性質を多く備えているためである。本論文では特に、布の「形状」に着目する。もともと二次元状のシートである布は、裁断・縫製によって立体形状へと姿を変え、使用時にもその柔軟性と伸縮性によって多様な形状に変化する。物体を覆ったときにはその表面を（大雑把にはあるが）反映した形状をとり、張力をかければしわがなくなって密着性を増す。

そのような布形状を計測することは、工学的に非常に興味深いテーマである。もし日常的に使える簡易な布形状計測系が実現すれば、以下のようなアプリケーションが期待される。

布状インタフェース

近年、Wii リモコン (Nintendo Co., Ltd.) のように直感的な入力インタフェースが注目され始めている。その媒介として布を用いることができれば、エンターテインメント以外にも3D モデリングツールなどの用途が期待される。両手で直接バーチャル物体の表面形状を変化させることができ、また複数人数が同時に操作することもできる。

形状・サイズ計測ツール

形状計測できる風呂敷で対象物体を包み込めば、その大まかな形状や、差し渡し、外周などが測定できる。対象表面に凸凹がある場合、張力をかけると布は隙間や穴に入り込まないので、そのとき計測される形状は凸包（すべての頂点を囲む最小の凸多面体）に相当する。またタオル状にすると、腕や胴回りに巻き付ける簡易な採寸装置として使える。

柔軟触覚センサ

発泡ウレタンなど柔軟材料を布で被覆し、その形状をモニタリングする。これにより物体が接触したときの柔軟材料の表面変位を計測することができる。その変位にもとづいて、物体の大きさ、形状、数、接触位置、接触力などが推定される。またぬいぐるみ表面の形状がすべ

て取得できるので、内部に骨組みやエンコーダなどを入れることなく、手足の姿勢や動きなど (体性感覚) もわかる。それらの情報を用いれば、持ち主とのインタラクションが可能となる。

モーションキャプチャスーツ

通常行われる人のモーションキャプチャは、腕、脚、胴体などをリンクとみなして少数のマーカーやセンサを取り付けて行う。しかし各部位の表面は中心軸 (骨) と必ずしも平行ではないため、決められた位置に取り付けたり、傾きを補正する必要がある。身体にフィットした衣服の形状を測ることができれば、人の動きを近似的にまるごと取り込むことができる。くまなく覆っているのでセンサの位置合わせも不要である。腕などは円筒として表現され (関節部にしわが寄る可能性はあるが)、その中心軸や表面の変形もデータから推定できる。

1.2 従来の計測法

布形状を計測する研究にはコンピュータグラフィックス関連のものが多い。近年、映画やゲームの分野で CG が広く用いられるようになり、それに伴って布 (特に衣服) にも現実に近い複雑な動きが求められているからである。物理シミュレーションによって形状や動きを生成するという方向性もあるが [1, 2, 3, 4], そこでは布のモデルに仮想的なバネを導入するなどアドホックな方法が採られている。またそのパラメータも現実の物性と結びつけることが難しく、試行錯誤で調節しているのが現状である。(実測データとのフィッティングによってパラメータを推定する研究もある [5, 6].)

それに対して実際に布を計測する方法は、風になびくなどの自然な動きをそのままデータ化できるというメリットがある。これはモーションキャプチャによる人物動作の直接取得と同様の考え方である。具体的な計測法としては、以下のようなものがある。任意模様が描かれた一般の布を対象とした研究には、スケールや照明、アフィン変換に対して不変な (SIFT, Scale Invariant Feature Transform) 特徴点を模様から抽出し、ステレオ法により各点の位置座標を算出する方法がある [7]。またオプティカルフローによって布上各点の速度を検出し、変形を追跡する方法も提案されている [8]。報告が多くなされているのは、対象とする布を限定し、布上に印刷された既知のパターンから形状を再構成する研究である。用いられるパターンとしては市松模様 [9], ID 情報をコーディングしたマーカー [10], 自己相似な三角形 [11], ランダムに生成したカラードット [12] や三角形モザイク [13] などがある。布に特化した方法ではなく、一般の表面形状を対象とする立体計測法 (三次元スキャナ) [14] を応用することも考えられる。例えば既知のカラーパターン [15] や、3 相 (以上) の位相をずらした正弦波パターン [16] を投影し、その映像から布形状を再構成した報告がある。

上記をまとめると、布の形状計測は光学的で遠隔的な方法によって行われているとすることができる。カメラや光源を必要とするため、それらがカバーする範囲内に作業空間が制限される。また三次元データを得るには、ステレオ法のためや死角をなくすために多数のカメラが必要となる。布の自己遮蔽や障害物によって隠れた部分は計測不可能であるため、人間が手で布を変形させることもできない。光学的方法である限りこれらの制約から逃れられず、よって従来法は 1.1 節で挙げたようなアプリケーションには適さないと結論付けられる。

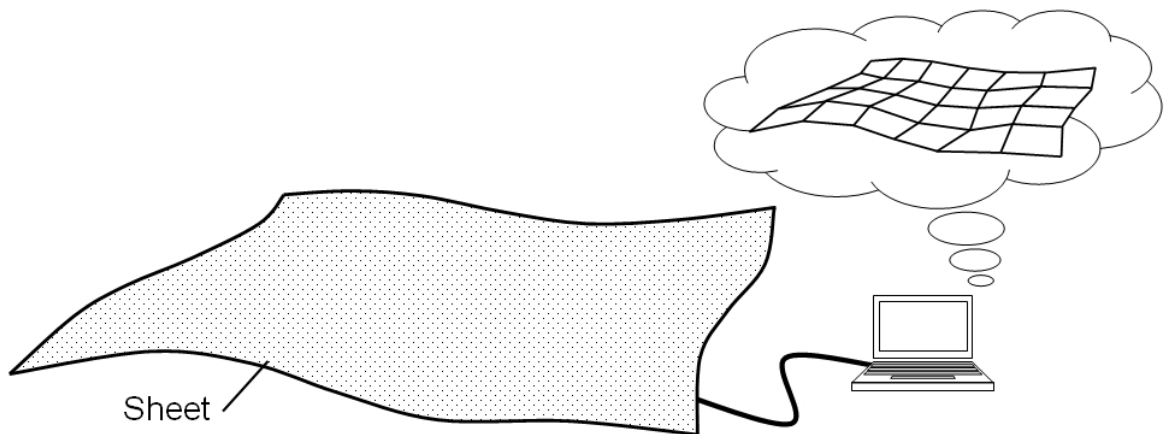


図 1.1 提案する三次元キャプチャシートの概念図. シート形状が PC 内でリアルタイムに再構成される. カメラなどの外部装置は不要である. シート内に多数の微小センサを分布させ, 二次元通信によって電力供給及び信号伝送を行う.

1.3 三次元キャプチャシート ～自己形状を計測する布～

布の形状計測をより簡単化し, その応用を広げるため, 本論文では新しい計測法を提案する. それは布 (シート) 上に多数の微小センサを分布させ, それらから得たデータを用いて布の全体形状をリアルタイムに再構成する方法である (図 1.1). センサを載せたために布自身の特性 (質量, 柔軟性など) は変わると予想されるが, 布の自然な動きではなく, 1.1 節で挙げたアプリケーションへの応用を目指すのであれば問題にはならない. シートは二次元通信層になっており, 形状計測の対象であると同時に, 各センサへの電力供給とデータの収集にも利用される. 二次元通信の詳細については 1.5.2 節で説明する. 図 1.1 では PC との接続がワイヤになっているが, シンクノードと小型バッテリーをシート内に搭載する構成にすれば, シンクノードから無線でデータ伝送することもできる. このような構成をとることで, 布自身が単独で計測デバイスとして機能する. カメラなどの外部装置は不要であり, 通常であればカメラの死角となる場所や状況, 物体との接触面においても形状計測が可能である. この新しい布状デバイスを「三次元キャプチャシート (3DCS, Three Dimensional Capture Sheet)」と名付ける. 本論文では, このデバイスの実現法について論じる.

三次元キャプチャシートの大きな特徴のひとつは, 布に電子的な機能を付与する点である. これはスマートファブリックと呼ばれ, ウェアラブルコンピューティングの分野で研究されている考え方である. そこでなされてきた研究を 1.4 節で概観する. 布上に多数のセンサを高密度実装するという方法論は, これまで実現可能性の低いものであった. センサユニットが数 cm 角と大きく, また布の柔軟性を保ちつつ多数センサへ配線する技術が存在しなかったためである. ところが近年, センサチップの微小化と二次元通信という 2 つの技術革新によりそれらの問題が解決されようとしている. これらについては 1.5 節で説明する.

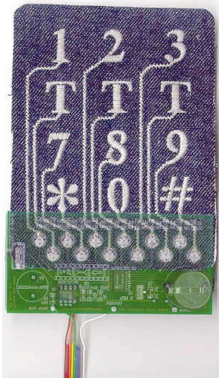


図 1.2 導電繊維による静電容量型キーパッド [18].

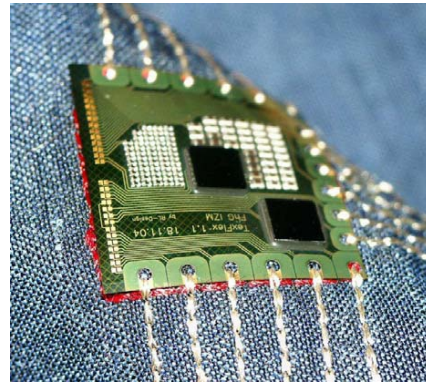


図 1.3 フレキシブル基板を布上に配置し、導電繊維で配線した例 [28].

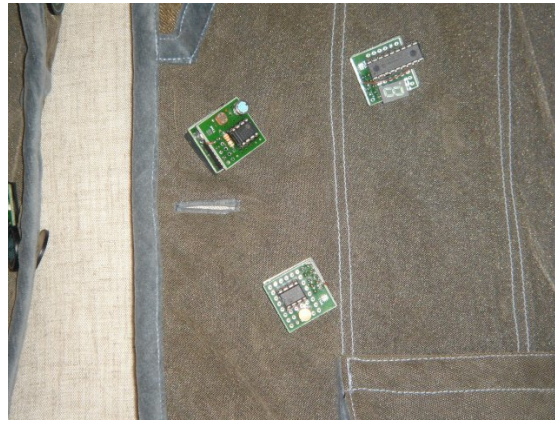


図 1.4 TextileNet [30] (ウェブサイト [31] より転載).

1.4 スマートファブリック

ウェアラブルコンピューティングとは、コンピュータを持ち歩く究極の形態として「着ている」ことにより、リアルタイムでの情報処理やネットワークの恩恵を日常的に得られるようにする技術である [17]. その実現を目指した研究には、大きく分けて 2 つの方向性がある. ひとつは PDA (Personal Digital Assistants), HMD (Head Mounted Display), 小型カメラや生体センサなどの電子デバイスを装着し、ライフログを採ったり、健康状態をモニタリングしたり、道案内などの状況に応じた情報提示を行うものである. もうひとつは、衣服 (すなわち布) に何らかの電子的機能を付与して日常的に着用するものである. そうやって機能化された布は、スマートファブリック (あるいは e-textile) と呼ばれる.

スマートファブリックには、導電繊維をセンサとして利用するものと、布上に電子部品を搭載したものの 2 通りがある. 導電繊維とは、金属蒸着やスパッタリングなどによって導電性を与えられた糸である. 同様の目的で金属糸が用いられることもある. これらは力学的特性が通常の糸と近いため、親和性よく衣服に導入することができる. その糸で編まれた布は

引っ張りによって抵抗値が増加するなど、センサに応用可能な電気的特性を持つ。導電繊維をセンサとして用いた研究には、指の接触を静電容量の増加として検出するキーパッド [18] (図 1.2) や、抵抗値、誘導起電力、静電容量など電気的特性の変化から人物の行動をモニタリングするものがある [19, 20, 21]。一方、布上に電子部品を実装した研究には、全身に配置した 30 個の二軸加速度センサを用いた人物の動作検出 [22]、複数マイクロフォンを用いたフェーズドアレイ [23, 24]、周囲 360° をカバーする超音波測距計のデータと部屋のマップからユーザの位置、姿勢を推定するもの [25] などがある。

スマートファブリックにおいて、給電と通信は重要な技術的課題である。一般的な回路のようにワイヤやフレキシブル基板で結線する方法では、布の柔軟性、伸縮性が損なわれてしまう。周囲の布と配線の硬さが異なるため、応力集中が生じて断線する可能性もある。またセンサ数の増大に伴って配線も煩雑になり、実装すること自体が困難になる。各センサにバッテリーを搭載し、データ通信は無線で行う方法も考えられるが、バッテリー交換が手間であるし、混信の恐れもある。これらの方法に代わる、布上への実装に特化した方法が求められている。布の柔軟性を維持することを目的とした研究には、導電繊維を布に縫いこむことによって配線とするものがある [26, 27, 28] (図 1.3)。また衣服を多層構造とし、導電性の布を用いて電源層と GND 層を設ける方法もある [29, 30] (図 1.4)。電源層の電位を変動させることにより、データの送受信も可能となる。この方法では電極ピンを突き刺すことにより 2 つの層との電気的接続をとるため、短絡に注意する必要がある。

1.5 近年の技術革新

1.4 節で挙げたスマートファブリックの例は、数個、多くても数十個のセンサユニットを布上に実装したものであった。いずれも原理検証段階であったことは理由のひとつであるが、数百個以上を高密度実装するにはセンササイズが大きく、また実用的な給電・通信法が存在しなかったことも大きな要因であった。近年、それらを解決するような技術の開発が進められている。ひとつは MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) をはじめとするセンサの集積化、微小化技術であり、もうひとつは筆者が所属する研究室で開発中の二次元通信技術である。以下、それぞれについて説明する。

1.5.1 センサの微小化

MEMS 技術の進歩により、数 mm 角サイズのセンサチップが市販されるようになってきた [32]。例えば 2008 年 2 月現在、世界最小の三軸加速度センサは 2.9 mm 角 (H30CD, Hitachi Metals, Ltd.) である [33, 34]。梁で支持された慣性質量の変位を、梁に配置したピエゾ抵抗の抵抗値変化によって計測する。このピエゾ抵抗式は、極板面積が感度に影響する静電容量式よりも小型化に向いている計測原理である。デジタル回路も搭載しており、12 bit A/D 変換したデータを I²C デジタル出力する。また半導体の抵抗率は大きな温度依存性を持つが、それについても内蔵された温度センサのデータを用いてデジタル補正する。ワンチッ

プですでにかなりの機能化がなされている。そのような小型加速度センサは、ノート PC や音楽プレーヤーなどの HDD 搭載機器の落下検出、家庭用ゲーム機のコントローラ、携帯電話のモーション操作などに使われている。他の種類のセンサも、自動車をはじめとする産業界からの要求により小型・軽量・高性能・低コスト化が進むと考えられる [35]。

センサチップ内に収められている回路は通常、MEMS 構造体などのセンサ部と信号処理部を別々のウェハ上に形成し、それらをワイヤボンディングで接続することにより構成されている。これに対して、MEMS 構造体と信号処理部を同一ウェハ上に形成する CMOS-MEMS 技術が研究されている [37]。例えば加速度センサの場合、MEMS 構造体だけならば現在 1 mm 角未満のスペースに収まるサイズである [34]。その直近に信号処理回路を配置することで、センサチップのさらなる小型化が期待できる。

またセンサチップを他の回路要素 (電源回路、マイコン、アンテナなど) と接続してセンサユニットとするためには、それらを同一基板上で結線する必要がある。そのための方法にも小型化の工夫を盛り込んだものがある。複数チップを積層する SiP (System in Package) 技術である [36]。フレキシブル基板上に各種チップを載せてそれを折りたたむことで、実装面積を最小限に保つことができる。

1.5.2 二次元通信

二次元通信とは、既存の有線、無線の代替手段となる通信技術である [38]。現在その研究、開発が筆者の所属する研究室で行われている。通信媒体は 2 つの導電性の層で絶縁性の層を挟んだ構造のシートであり、導電層間に局在して伝搬する電磁波 (マイクロ波) を利用して通信を行う。(理論的、技術的詳細については文献 [38] 参照。) この通信技術は以下のような特長を持つ。

- 通信シートには、導電性、絶縁性を持つ任意の材料を用いることができる。例えば導電性のフィルムや布、塗料なども適用可能である。
- 電磁波が 2 次元面内に局在するため、無線通信と比較してエネルギー効率がよい。
- 外部へ漏洩しないので十分なエネルギーの電磁波を印加でき、給電にも使える。
- 通信シート内と、電気的接点を持たないコネクタを介して電磁波を授受できる。

他にも、情報セキュリティが確保される、電磁波による外部機器への悪影響がない、任意の周波数を用いることができる、などの利点がある。通信速度は、使用する周波数帯域とプロトコルに依存する。例えば、既存の無線 LAN (IEEE 802.11g, 2.4 ~ 2.5 GHz 帯) は公称速度 54 Mbps であり、それはそのまま二次元通信に用いることができる。三次元空間中で用いる場合マルチパスと混信によって通信速度が低下するが、二次元通信ではそれらの影響がほとんどなく、理論値に近い高速通信が期待できる。さらにプロトコル最適化の余地もある。ルームサイズのセンサネットワーク、PC や周辺機器への配線が不要なデスク、RFID タグによる商品管理棚、自動車内部のワイヤハーネスの代替、などの応用が考えられる。

この二次元通信を利用すると、導電性の布上に多数のセンサを配置したとき、個別に配線することなく通信と給電を行うことができる。それにより実現される物理的な柔軟性に着目したアプリケーションとして、リストバンド型筋電インタフェース [39, 40] (図 1.5), ロボットのための触覚センサ (人工皮膚) [41, 42] (図 1.6) がこれまでに提案されている。

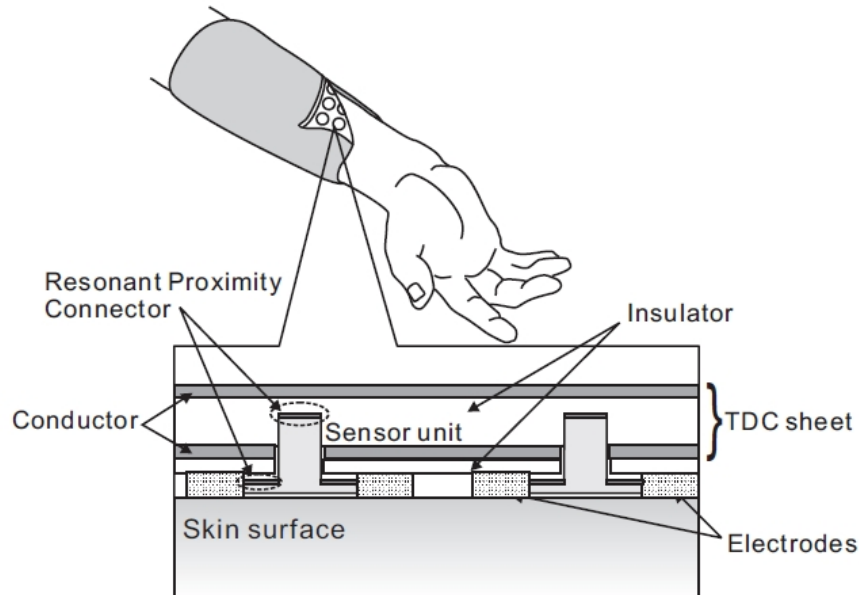


図 1.5 リストバンド型筋電インタフェース [39, 40]. 配線に拘束されることなく前腕の動作を計測できる。電磁波で給電することにより計測回路がフロートで動作するため、コモンモードノイズに強いことが示されている。

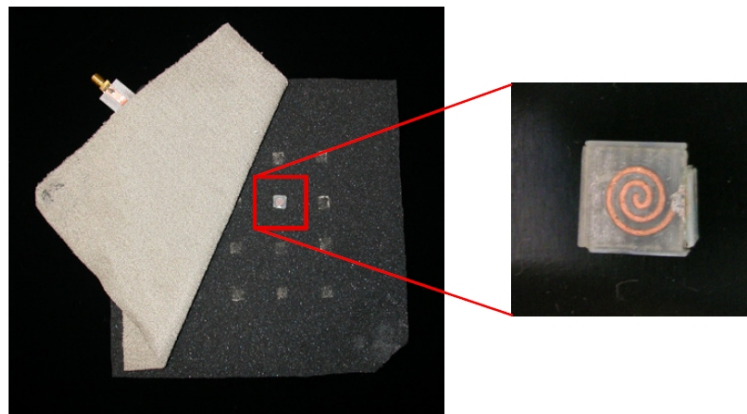


図 1.6 柔軟な触覚センサスキン [41, 42]. 発泡ウレタン (絶縁層) に触覚センサチップを埋め込み、近接共鳴コネクタ (直径 2.8 mm, 写真右) を介して電氣的接点なしに通信を行う。そのため柔軟性と耐久性を兼ね備えることができる。

1.6 本論文の構成

本章では、布形状を計測することができれば様々なアプリケーションが期待されることと、従来の計測法ではその要求を満たせないことを述べた。そして新しい計測法として、布自身がデバイスとして機能し、自己形状を計測する方法を提案した。布に高密度配置された多数のセンサが連携し、布全体の形状が再構成される。本論文ではその布を「三次元キャプチャシート」と呼ぶ。これまでになされてきた布上にセンサを実装する研究を概観し、さらなる発展のために求められる技術的要求を明らかにした。またその要求に応える 2 つの技術革新を紹介した。それらの技術は、提案手法の実現可能性を支えるものである。

以上を踏まえて、これ以降、三次元キャプチャシートの構造や計測原理などを具体的に考えていく。最初に第 2 章で布を格子構造として離散モデル化する。また様々な分野における研究を参考にして、三次元キャプチャシートの計測原理について検討する。そこでもっとも現実的な方法として、重力と地磁気にもとづく方法を選択する。第 3 章では重力と地磁気にもとづいてシート形状を再構成する問題について詳しく説明する。まず基本原理を定式化する。次に自由度の観点から、この問題が冗長性を有することを論じる。その冗長性を利用することにより、ノイズの影響を低減することができる。一方、できるだけ自由度を省くことによりセンサコストを抑える考え方もある。その実現例として、第 4 章では半分のセンサデータ (重力あるいは地磁気) のみを用いる方法を提案する。情報が不足する分は、格子構造に拘束条件を追加することにより補う。それぞれの方法について、シミュレーションによって検証し、また実機の製作を行う。最後に第 5 章で、本論文の成果についてまとめる。

第 2 章

三次元キャプチャシートの問題設定

本章では, 三次元キャプチャシートの形状再構成問題を考える準備として, シートのモデル化と計測原理の選定を行う. モデル化に関しては, 布の幾何学的特性を参考にして正方格子構造を選ぶ. これにより布の柔軟性, 伸縮性を保つことができる. またシート形状と関連する物理量の中から, 重力と地磁気にもとづく姿勢計測を原理として採用する.

2.1 布の離散モデル化

近年の微小化技術の発展 (1.5.1 節参照) により, 近い将来センサユニットは数 mm 角サイズになることが期待される. しかしそのような微小サイズであっても, 布の最小単位である糸 (多くのものは太さ 1 mm 以下) と比べると格段に大きい. そのようなセンサを例えば数 cm に 1 個の割合で布上に実装すると, センサ間隔よりも細かいしわやひだが生じたとき再構成ができなくなってしまう. したがって布を離散的に扱えるよう, とりうる形状を制約する必要がある. それは布の柔軟性, 伸縮性をなるべく損なわないことが望ましい. ここでは布 (特に織物) の構造を解析した研究を参考に, 妥当なモデルを探る.

2.1.1 布の構造

布には, 大きく分けて織物と編物の 2 種類がある (図 2.1). 織物は経 (たて) 糸と緯 (よこ) 糸を直角に交錯させたものであり, 編物 (メリヤス, ニット) はループにした糸同士を絡め合わせたものである. 幾何学的な特徴としては, それらは布の伸びる方向が異なる. 織物はたて糸, よこ糸方向にはほとんど伸びないが, 編物はすべての方向に伸縮性を持つ. ここでは, 比較的構造が簡単な織物について考える.

織物には, たて糸, よこ糸の交点でどちらが上にくるかのパターンによって, 平織, 斜紋織, 朱子織などの種類がある [43]. これらの織り方について, 製品設計のための CAE (Computer-Aided Engineering) を目指したものがある [44, 45]. 糸の断面が圧縮されたり互いに押しつけあったりすることを考慮しており, 曲面をなすときなどの形状を精密に予測する. これにより, 実際に織ることなく糸の太さの影響などを確認しながら設計することができる.

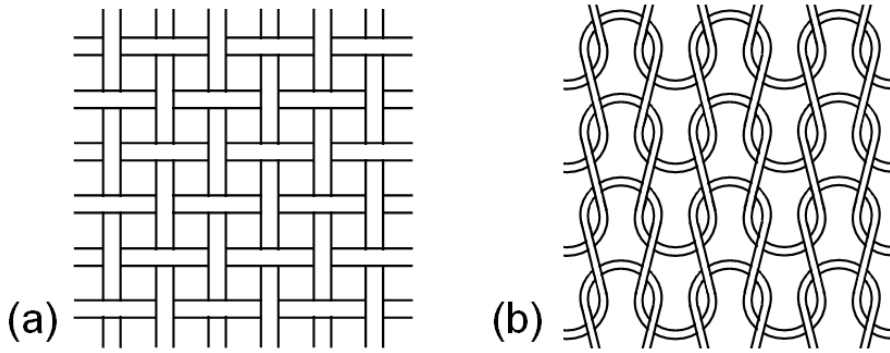


図 2.1 織物, 編物の基本的な構造. (a) 平織, (b) 平編.

一方, それほどの精度は必要なく基礎的な変形を解析する目的においては, 次のように簡略化したモデルが有用である [46]. それは, たて糸とよこ糸を太さがなく伸びない曲線とし, それらが交差して曲面をなしているモデルである. 糸は無限に密に敷き詰められている. これは微分幾何学の分野では「チェビシェフネット」[47, 48, 49] と呼ばれる. 織物とそのモデルを関連付けた論文に「フロシキで西瓜を包む話」がある. これは昭和 22 年 (1947) に森口繁一氏が「応用数学・力学」誌上で発表した論文である. その中で次のような興味深い問題提起がなされているので, 紹介する. (原本が入手できなかったため, 文献 [46] から引用.)

フロシキで西瓜 (スイカ) を包むときは, 紙でつつむときのようにしわくちゃにはならない. かといってゴムのように大きな弾性変形を生ずる筈もない. それでは塑性変形のように伸びっぱなしになるのかということ, そうでもない. 用がすんでたたむときは, ちゃんともとの通りに平らになっている. まことに不思議である. たしかにこれは手品である. どこにそのタネがあるのだろう.

普段何気なく見過ごしているが, 言われてみれば確かに不思議な現象である. 詳細は付録 A に譲ることとし, ここではそのタネの要点のみを述べる. たて糸とよこ糸で編まれた曲面 \mathbf{p} を考え, それぞれに沿った方向を u, v とする (図 2.2).

$$\mathbf{p}(u, v) \equiv \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

接ベクトル $\mathbf{p}_u, \mathbf{p}_v$ のなす角を θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) とする. ここで $\mathbf{p}_u \equiv \partial \mathbf{p} / \partial u$, $\mathbf{p}_v \equiv \partial \mathbf{p} / \partial v$ である. 伸びない糸を仮定しているので $|\mathbf{p}_u| = |\mathbf{p}_v| = 1$ と置いて差し支えない. このとき曲面のガウス曲率 K (主曲率 κ_1, κ_2 の積) は次の θ に関する微分方程式によって表される [46].

$$K = \frac{-1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 \theta}{\partial u \partial v} \quad (2.2)$$

この式は, 織物の変形の本質が交差角 θ の分布にあることを意味している. 交差角が布上の位置によって異なった値をとることで, 初め平面的であった織物は立体的な曲面をなすのである. そしてこの交差角変化は可逆的であるため, 再び平面形状に戻ることができる.

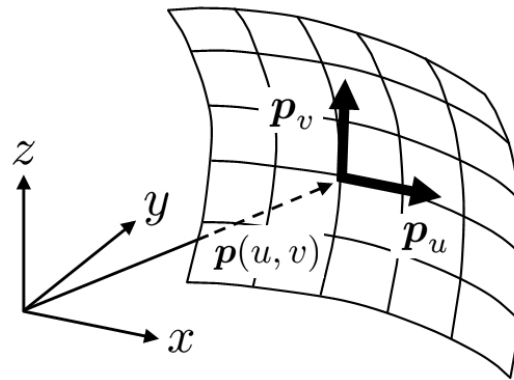


図 2.2 パラメータ表示された布.

2.1.2 正方格子構造

本論文では、布のモデルとして剛体リンクとフリージョイントによる正方格子構造を提案する (図 2.3 (a)). これはチェビシェフネットのたて糸、よこ糸をそれぞれ離散化したモデルである。リンクは正方格子状に配置され、伸びも曲がりもせず、ジョイント (格子点) の周囲を自由に回転することができる。センサはリンク 1 本 1 本 (もしくはジョイント 1 つ 1 つ) に搭載する。この構造によって、再構成の妨げとなる細かいしわを防ぐ。またセンサ間の距離や関係性に制約を与え、不良設定問題に陥ることを回避する効果も期待できる。各格子点において、たて糸、よこ糸方向のリンクのなす角は自由に変換することができる。2.1.1 節で布変形の本質であると結論付けた「交差角が位置によって異なる」性質を有しているため、正方格子構造は布のモデルとして妥当であろうと考えられる。これを布に縫い付けることで、その変形に制約を与える。

チェビシェフネットを離散的に扱った例としては文献 [50] がある。そこではある曲面に沿うようなチェビシェフネットを近似的に描く方法が提案されている。曲面上に基準点を設定し、そこからある半径の球を描く。基準点で直交して曲面に沿って伸びる 2 本の曲線と、その球面との交点を求める。それ以降はその交点を中心とした同じ半径の球を描いて曲線との新しい交点、及び球同士の曲面上における交点を求めていくという反復法である。それらの点をたて糸、よこ糸方向に直線で結ぶことにより、リンク長さ一定で曲面に沿った格子構造を得る。そのようにして得られるのは正方格子構造であり、本論文と同様の考え方である。

「単一の正多角形により平面を埋め尽くす」という観点で見ると、提案した四角形の他に三角形、六角形がリンク配置の候補として考えられる。チェビシェフネットにおいて交差角 θ が変化することは、 $\mathbf{p}_u, \mathbf{p}_v$ のなす平行四辺形の面積 $s = |\mathbf{p}_u \times \mathbf{p}_v| = \sin \theta$ が減少することと言い換えられる。よって、他の多角形も面積が減少するのであれば布のモデルとして用いることが可能である。三角形 (図 2.3 (b)) はリンク長を固定するとリンクのなす角度も固定されるため、面積が変化せず、可展面しか表現することができない。さらに曲げの対称軸となる方向が $0, 120, 240^\circ$ の 3 方向に限定される。可展面とは、平面形状から面積を変えずに作ることでできる立体曲面のことである。微分幾何学的には、ガウス曲率 $K = 0$ (2 つの主曲率 κ_1, κ_2 のうち片方がゼロ) となる曲面として定義される。例えば、紙やプラスチックフィ

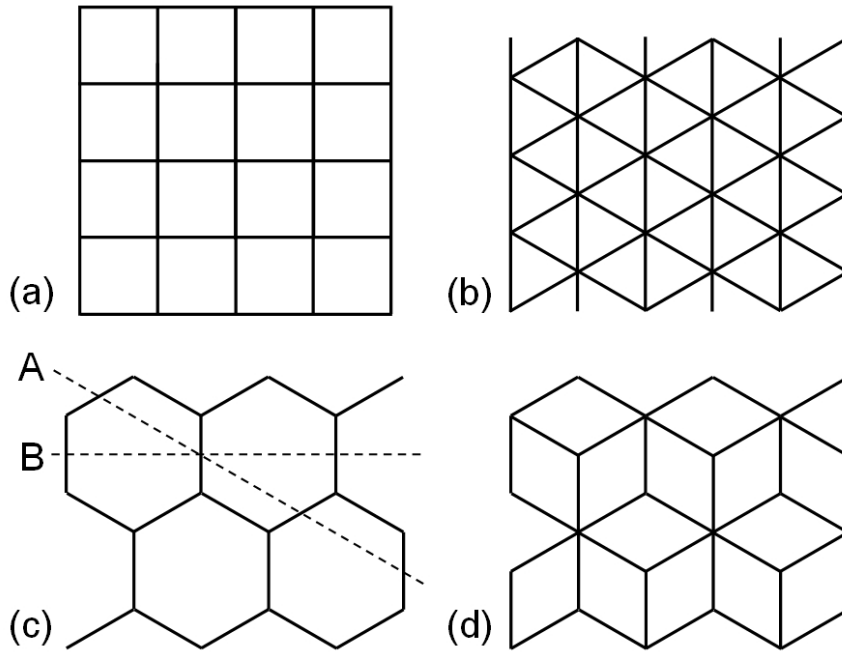


図 2.3 平面を埋め尽くす格子構造. (a) 正方形, (b) 正三角形, (c) 正六角形, (d) 菱形.
リンクの長さはすべて同じ.

ルムを曲げて作ることでできる円筒や円錐などが可展面である. ペーパークラフトにおいては, 可展面以外の曲面をいかに可展面 (と多面体) で近似するかが課題となる [51, 52]. 一方, 六角形 (図 2.3 (c)) は面積変化が可能であり, 布のモデルとして採用することができる. この構造は面内の全方向へ伸縮可能である. 伸縮率は, 図 2.3 (c) において破線 A の方向に $1/2 \sim 3/2$ 倍, 破線 B の方向に $0 \sim 2/\sqrt{3} (\approx 1.15)$ 倍である. この異方性は 60° の回転周期性を持つ. 四角形の 45° 方向の伸縮率が $0 \sim 2/\sqrt{2} (\approx 1.4)$ 倍であることを考えると, これらの伸縮率の範囲はやや狭い. 全方向へ伸縮することから編物のモデルとして用いることもできそうだが, 実際のものより伸縮性に欠ける可能性がある. また同じ長さのリンクを用いたとき, 四角形よりもセンサ密度が低く, その分布も偏ることが欠点となりうる. この問題は六角形をさらに菱形で細分化した構造によって解決される (図 2.3 (d)). 本論文では, 織物をもとに考え, それを十分に近似する離散モデルとして正方格子構造を採用する. リンクの結合方向が u, v という二つのパラメータで表せるので, リンクや格子点にインデックスがつけやすいという副次的な利便性もある.

2.1.3 通常の布との相違点

提案した正方格子構造は, チェビシエフネットを離散化したものである. よってリンク長を究極的に短くする (連続に近づける) ことができれば, チェビシエフネットと一致する. チェビシエフネットは太さがなく伸びない糸を仮定したものである. 一方, 実際の織物を構成す

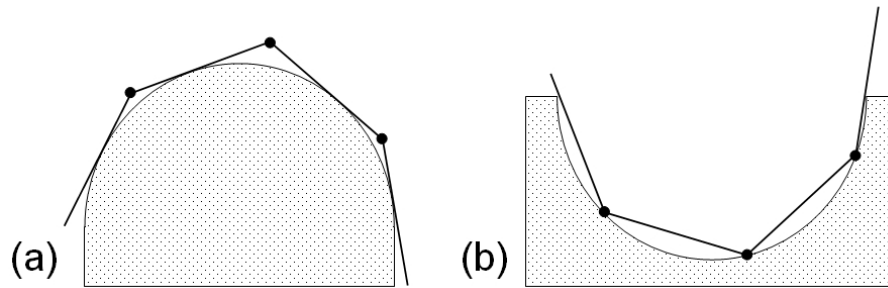


図 2.4 対象物体と格子構造の接し方. (a) 凸形状, (b) 凹形状.

る糸は繊維を束ねたものである。特殊な加工 (捲縮 [53]) を施さない限り繊維自体はほとんど伸びないが、繊維同士の絡み合い構造が変化することにより糸は伸縮性を示す。また実際の糸は太さを持つため、たて糸、よこ糸の交差により波打った形状をなしている。この波は張力によって膨れたり潰れたりするため、その構造変化によって糸の見かけの長さはさらに大きく変化する。この糸 (リンク) の伸縮性が正方格子構造と実際の布との本質的な違いであり、正方格子構造を布に縫い付けることによって課される制約のひとつである。

対象物体に被せたときの格子構造の特徴は、応用上留意すべき点である。布は表面に沿って糸が曲がるため滑らかに変形するが、格子構造の場合はリンクが曲がらないため、凸形状に対してはリンクが、凹形状に対しては格子点が表面に接することになる (図 2.4)。1.1 節で対象物体の凸包が得られることを述べたが、格子構造で包むと本来凸包の頂点となるべき箇所リンクが接するので (ちょうど格子点が当たる場合もありうるが)、真の凸包よりも大きい立体が計測される。アプリケーションによって、要求される精度を満たす長さのリンクを用いる必要がある。

まとめると、布の細かいしわやひだを防ぐことが離散モデル化の目的であったが、剛体リンクを入れることによって糸の伸縮と湾曲も阻害される。そのため正方格子構造が取りうる形状のクラスは実際の織物に近いものの、それよりやや小さいものとなる。

2.1.4 ジョイントの機構

実際に格子構造を作成するときには、ジョイント (格子点) の機構がポイントのひとつとなる。ボールジョイントなどの機械的な継ぎ手は、加工と強度の面で微小化には向かない。また布に直接リンクを縫い付けたり、2枚の布で挟んでリンクごと縫い合わせる方法も考えられる。この場合ジョイント部には布があるだけなので、そこが伸びることでリンクの実効的長さが変わってしまう恐れがある。

ひとつ考えられる構造は、リンクに細い糸を通して連結し、結び目を作ることで格子点とするものである。伸びにくい糸を用いれば結び目と結び目の間の距離が保たれ、リンクの実効的長さが変わってしまうことを防げる。細い糸は結び目を基点としてどの方向にも曲がることができ、またリンクも糸を中心軸として自由に回転するため、フリージョイントとみなすことができる。外径 1.2 mm、内径 0.6 mm、長さ 15 mm の真鍮パイプを、直径 0.3 mm の

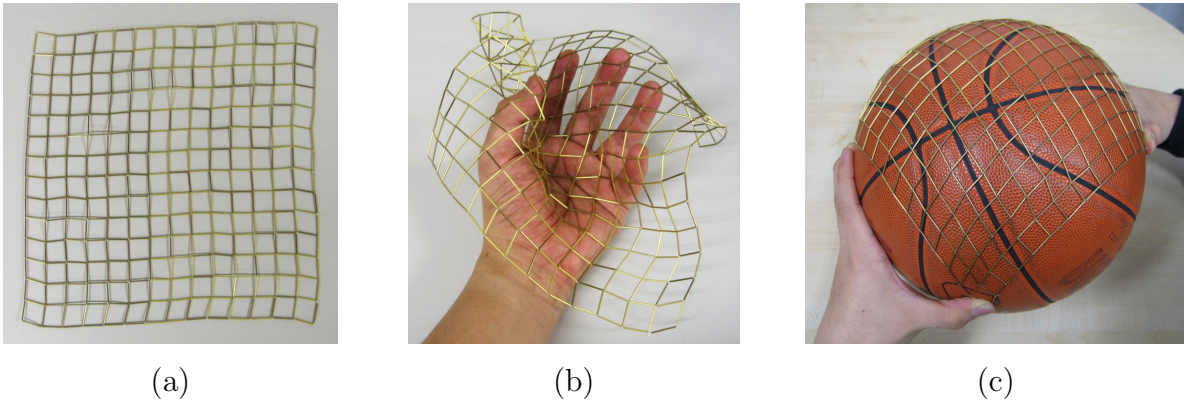


図 2.5 14×14 正方格子構造. (a) 長さ 15 mm の真鍮パイプをテグスで組み合わせた模型. (b) 手で曲げた感触は布に近い. (c) 球面にぴったり沿わせることができる.

テグスで組み合わせた 14×14 格子の模型を図 2.5 に示す. 主観的には, このリンク長でも意外と布に近い柔らかさを感じる. リンク長 30 mm では違和感があったので, リンク長が指の関節より短いことが柔らかい感覚の要因ではないかと思われる.

また他には, リンク間の継ぎ手として柔軟な弾性体 (ゴムなど) を用いる構造もありうる. 正方格子構造の場合は, 十字型の継ぎ手を用いることになる. 弾性体を厚くするとねじれにくくなる. これは第 4 章において, リンクの中心軸周りの回転を拘束するために有用な構造である. 長さ l [m] のリンク同士を長さ $2L$ [m] の継ぎ手でつなぐとき, 実効的なリンク長は $l + 2L$ となる. 図 2.6 のように曲率半径 r [m] で継ぎ手が曲がる時, 実効的なリンク長は $l + L + L' = l + L + r \tan(L/r)$ になり, その変化率は $\{r \tan(L/r) - L\} / (l + 2L)$ で表される. 例えば $L = l/2$ のとき, リンクが直角をなすように曲がると $(4L/\pi - L)/4L \approx 0.07$ よりリンク長が 7% 程度伸びる. 想定される曲率半径 r に応じて, リンク長の変化率が許容値内に収まるよう L を調整する. L が小さいほど変化率も小さい. 許容値に関しては, 3.3.3 節でシミュレーションによって指標を与える.

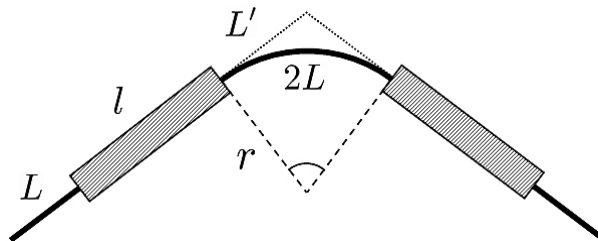


図 2.6 柔軟弾性体によるリンク間の結合. $L' - L$ が実効的なリンク長の変化を表す.

2.2 利用可能な物理量

ここでは布の三次元形状と関連する物理量についてまとめ、形状再構成への応用を検討する。外部装置を用いることなく計測できることを前提とすると、格子構造のリンクとジョイントに関して、次のような物理量が考えられる。

- ジョイントにおける曲率, 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
- 格子の対角線やリンクの伸縮

以下, それぞれについて説明と検討を行う。これらはモーションキャプチャ, ウェアラブルコンピューティング, ユビキタスコンピューティング, 触覚ディスプレイ, 触覚センサなどの分野で行われている研究を参考にしたものである。

2.2.1 曲率, 角度

曲率や角度など, 曲げセンサにもとづく三次元形状計測としてはシェイプテープ, フレキシブルセンサチューブなど, 一次元構造のデバイスが提案されている。シェイプテープ [54] は, テープ上に複数配置された光ファイバ曲率センサによって各位置におけるテープの曲率と振率を計測し, それら離散点の値を連続的に補間したのち, 積分することでテープ全体の形状を推定する (図 2.7)。これはすでに商品化されており [55], モーションキャプチャ [56], ジェスチャ認識 [57], 3D モデリング [58, 59, 60] などへの応用が研究されている。また, 光ファイバの代わりに PVDF を用いて同様の機能を実現する研究 [61] も報告されている。フレキシブルセンサチューブ [62] は, 円筒形の外骨格にポテンショメータ, マイコン, 配線を収めた, 多関節構造のデバイスである (図 2.8)。各関節のなす角度から, チューブに沿った経路を計測することができる。論文中では, 腕の先端位置を計測し, 遠隔操作システムのマスタとして使用している。これら一次元構造のデバイスを縦横に組み合わせることで, 二次元的なシート形状が計測できると考えられる。しかしシェイプテープは計測点と同じ数だけ光ファイバを引き回す必要があり, またフレキシブルセンサチューブは関節に機械的構造が必要となるため, 柔軟性を保ったまま計測点を布上に高密度配置することが困難である。

2.2.2 距離

一般に空間中の 1 点は, 4 つ以上の基準点からの距離によって決定される。そこで, シート内に配置した基準点からの距離にもとづく方法が考えられる。例としてシートの 4 隅にマスタノードを配置し, シート内の各ジョイント部にスレーブノードを配置する方法を説明する。

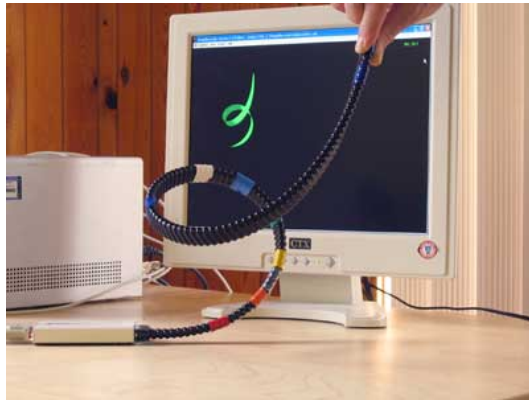


図 2.7 シェイプテープ [54] (ウェブサイト [55] より転載). 光ファイバ曲率センサによってテープの形状を計測する.



図 2.8 フレキシブルセンサチューブ [62]. 各関節にポテンショメータが組み込まれている.

マスタは、他のマスタまたはスレーブノードまでの距離を計測する機能を持つ。まず 4 つのマスタノードが互いの距離を計測し、相対的な位置を決定する (図 2.9 (a)). (ここでマスタノードの相対位置に 2 通りの任意性が生じる。どちらか一方に決定するためには他の情報が必要である。) それら 4 つのマスタノードからの距離にもとづき、各スレーブノードの位置が決定される (図 2.9 (b)).

距離計測は、超音波や電磁波によるものが考えられる。超音波距離計測を利用した研究には、人体モーションキャプチャ [63] がある。しかしこれを布に適用すると、自己遮蔽が生じたとき計測不能に陥るし、超音波デバイスの指向性なども問題となる。電磁波を用いるものとしては、導電繊維によって布上に複数のループコイルを配置した研究がある (スマートふろしき [64]). これは柔軟な RFID タグリーダとして機能する。また自身に埋め込まれた RFID タグを検出することで自己形状を認識するが、ユーザが「折り畳んだ」「包んだ」などのコンテキストを取得するにとどまっている (図 2.10). 電磁波の速度は約 3×10^8 [m/s] であるため、到達時間による距離計測法は 1 ns の時間精度で 30 cm の誤差が生じる。文献 [66] では数百 ps の時間分解能を持つ LSI を用いて、実環境で誤差 36 cm が達成されている。これを三次元形状計測へ応用するには、あと 1 桁か 2 桁の精度向上が望まれる。

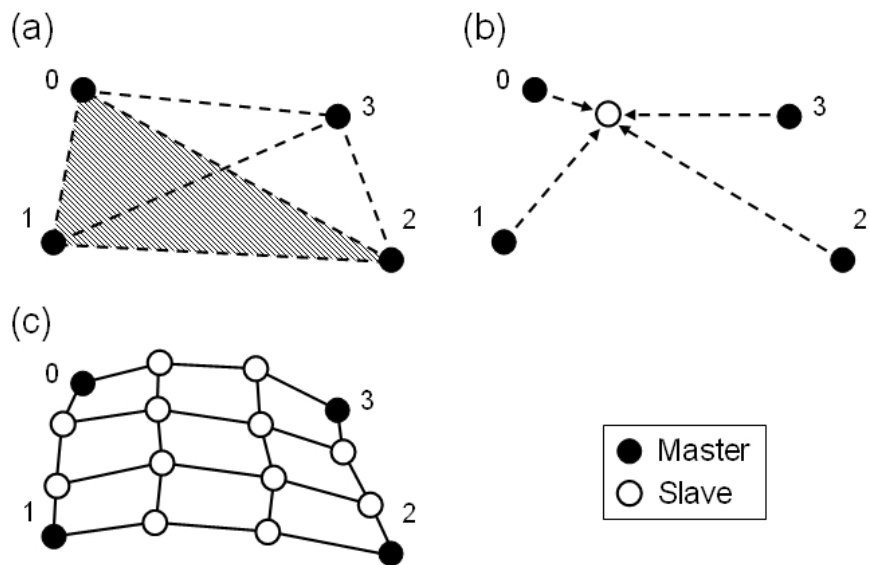


図 2.9 基準点からの距離にもとづく三次元形状計測. (a) シートの 4 隅に取り付けられたマスタノードが, 互いの距離にもとづいて相対的な位置を決定する. このとき点 3 の位置には, 面 $\{0, 1, 2\}$ (斜線部) を対称面とする任意性が生じる. (b) 4 つのマスタノードからの距離にもとづき, スレーブノードの位置を決定する. (c) 同様にしてすべてのノードの相対位置を決定することにより, 形状が再構成される.

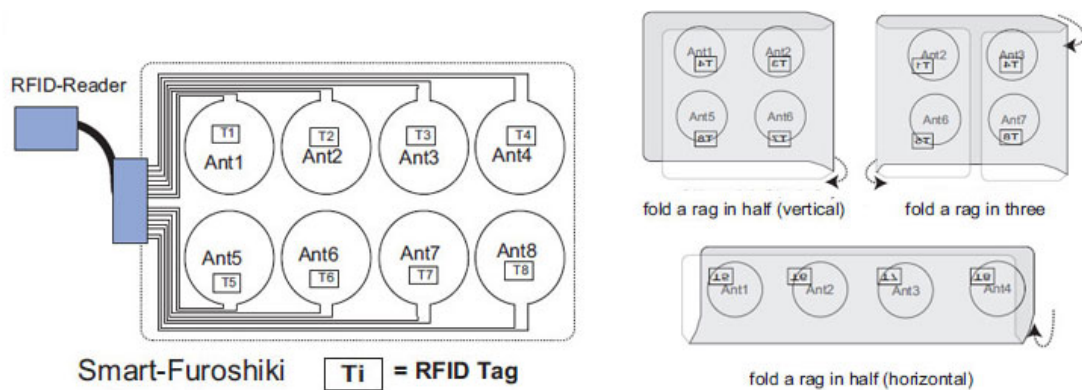


図 2.10 スマートふろしき [64] (ウェブサイト [65] より転載). 布にループ状に導電繊維が織り込まれ, RFID タグリーダーとして動作する. 自身に埋め込まれた RFID タグを検出することで自己形状を認識することができる.

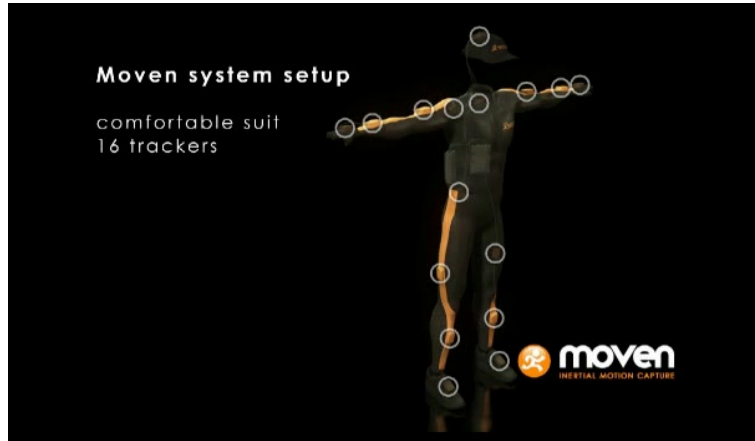


図 2.11 Moven [74] (画像はデモムービーから切り出したもの). 慣性・磁気センサのデータから各部位の姿勢を算出し、つなぎ合わせることで全身の動きを得る.

2.2.3 重力, 地磁気

腕や脚などに加速度センサと磁気センサを装着するモーションキャプチャは, それらが計測した重力と地磁気にもとづいて各部位 (リンク) の姿勢を算出している [67, 68]. すべてのリンクをつなぎ合わせることで, 全身の姿勢が得られる. この方法は重力, 地磁気が一様であるという仮定にもとづいているため, それらが乱された場合には誤った結果となる. 運動加速度が存在する状況については, ジャイロセンサとのセンサフュージョンにより, 精度のよい姿勢計測を行う研究がなされている [69, 70, 71, 72, 73]. モーションキャプチャシステム Moven (図 2.11) [74] は同様の原理にもとづいて商品化されたものであり, ダンスなどのダイナミックな動きにも対応している. 磁場の歪みについては, 家電機器などが姿勢計測に与える影響を実測した研究がある [75]. そこでは, 家電から 2 ft (約 60 cm) 離れていれば影響がほとんどないと結論付けている. また, カルマンフィルタ [72, 76, 77] や, あらかじめ取得しておいた室内環境の対応表 [78] によって外乱磁場に対応する方法も提案されている.

2.2.4 運動加速度, 角速度

運動加速度・角速度を時間積分して各計測点の三次元空間中での位置・姿勢を求める方法 (デッドレコニング) も考えられる. 航空機やロボット [79] の制御, 人間の歩行経路の記録 [80, 81, 82] などに用いられる. この方法では, センサ出力のランダムドリフトが誤差として時間的に蓄積することが問題となる. この誤差はセンサの特性上ゼロにはできない. 対処法としては, 一定時間ごとに既知 (ゼロ) の入力を与えてオフセットを補正する方法 (ZUPT, Zero velocity UPdaTe) や, 既知の位置で積分結果を補正する方法 (CUPT, Coordinate UPdaTe) などがある [83]. 例えば人間の歩行の場合には, 脚が地面に接触した瞬間を速度の CUPT に利用している. また quasi-static (準静的) な状態を時系列データから検出し, そのときには

重力しか働いていないとみなして加速度センサの ZUPT を行う方法 [84] や、重力、地磁気方向を用いて角速度積分の CUPT を行う方法 [73] も提案されている。

数 10 cm 角の布の三次元形状を再構成する場合には数 mm ~ 数 cm 程度の精度が求められる。前述の歩行経路の研究では移動距離に対して 10 % 程度の誤差が報告されているが、これがそのまま適用できたとしても、計測点が延べ数 m 動いた時点で布のサイズと同程度の誤差が蓄積してしまう。したがって、この方法を三次元キャプチャシートに適用することは現実的ではない。

2.2.5 伸縮

面上の伸長分布にもとづいて曲面形状の表現や計測をする研究もなされている。スマートメッシュ [85] は表面形状を提示する触覚ディスプレイである。格子構造を重ねて上下 2 層にし、下層のリンクを伸縮させることで三次元曲面を作り出す (図 2.12)。伸縮するアクチュエータの代わりに伸縮センサを配置することで、表面形状を計測するデバイスになると考えられる。しかし機械的、立体的構造であるため、布には適用しがたい。感圧導電ゴムシートの周囲に多数の電極を配置し、EIT (Electric Impedance Tomography) によって圧力分布を求める大面積触覚センサが提案されている [86, 88] (図 2.13)。感圧導電ゴムは面内方向の伸縮にも感度を持つため、文献 [86] では伸縮分布にもとづく曲面形状センサとしての可能性にも触れている。そのとき 2 枚重ねにすることにより、円筒などの伸縮を生じない曲面 (可展面) にも対応できると述べている。またウェアラブルコンピューティングの分野では、導電繊維 [21] や導電エラストマー [89] を用いて布上に配置する伸縮センサが提案されている。これらのセンサは伸縮する際に内部応力を生じ、形状を保つためには力を加え続ける必要がある。力を加えなければセンサ出力が得られず、形状計測もできない。よってこの方法を採用すると、物体に自然にかけるなどした場合の形状計測は不可能となる。

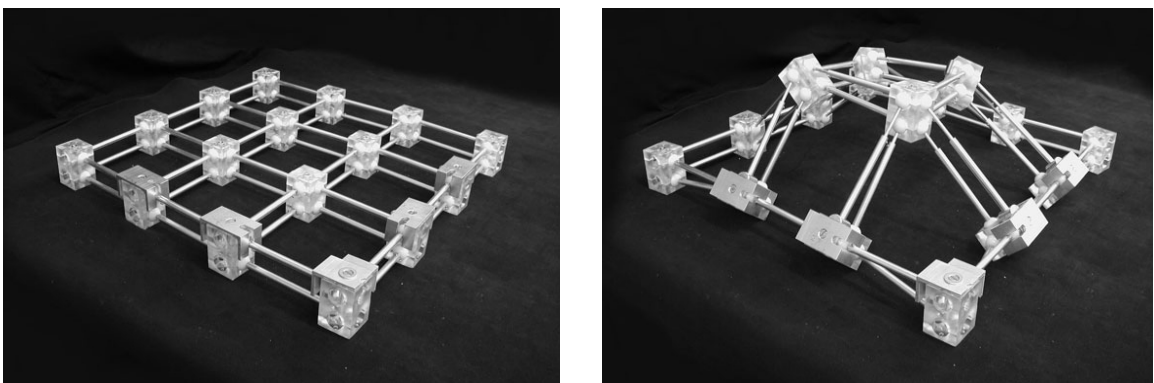


図 2.12 スマートメッシュ [85]。リンクの伸縮により三次元曲面を提示する。この模型には、アクチュエータはまだ搭載されていない。

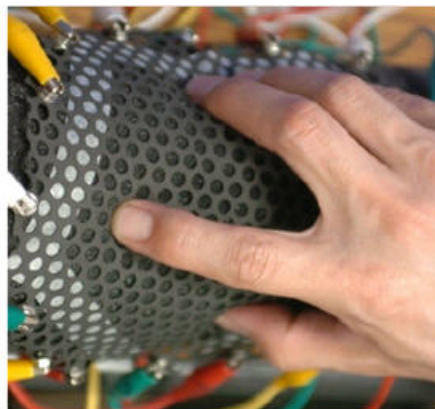
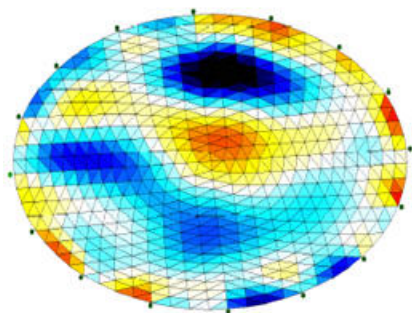


図 2.13 EIT 触覚分布センサ [86] (ウェブサイト [87] より転載). 導電感圧ゴムシートの周囲に多数の電極を配置し, 計測された電極間電圧から圧力分布を求める. 面内の伸縮分布を測ることもできる.

2.3 本論文で扱う問題設定

本論文では, 布を正方格子構造として離散モデル化したものに対し, 重力と地磁気にもとづく姿勢計測を採用する. 各リンクの姿勢を求めた後, すべてのリンクを結合することでシートの全体形状を得る. 第3章でその詳細について説明する. 重力と地磁気にもとづく方法の利点を, 以下にまとめる.

信号がいつでもどこでも供給される

地球上のどの場所においても, 重力と地磁気は常に存在する. それらは局所的には一様であると仮定してよく, 定式化などにも好都合である. これらを利用することにより, 新たに信号源を用意することなく, センサを搭載したリンクの姿勢を計測することができる.

データの瞬時値にもとづく方法である

基本的に, リンクの姿勢を求めるために必要なデータはある瞬間の加速度と磁気のベクトルである. それらからシート形状は幾何学的に再構成される. その演算はたかだか使用するセンサの個数程度の空間積分であり, デッドレコニングのような時間積分は行わない. したがって時間経過とともにノイズが蓄積して結果が発散してしまう問題は生じない.

小型センサがすでに市販されている

過去のモーショキャプチャの研究には, 数 cm 角の二軸加速度センサを組み合わせることで三軸センサユニットを実現しているものもある. そのような大きいセンサでは, とても布上に実装することはできない. しかし三軸加速度センサは 2004 年頃から, 加速度と磁気を計測する 6 軸小型センサも 2006 年頃から市販され始めている. それらのサイズは 5 mm 角程度である. そのように小さいセンサが実際に入手可能だからこそ, 現実味があるものとして開発を進めることができる.

なお重力と地磁気にもとづく姿勢推定の研究では, しばしばジャイロセンサを用いて精度を向上させる方法が採られる. それらの研究はセンサフュージョンによって加速度的な動作や磁場の乱れに対処すること目指したものである. 一方, 本論文では基礎原理を対象とするため重力と地磁気のみを考え, ジャイロセンサは扱わないこととする. 布上に実装するためセンサは小型, できればワンチップであることが望ましいのであるが, 加速度, 磁気, 角速度を 9 軸で計測する数 mm 角のセンサが存在していないことも理由のひとつである. 2008 年 2 月現在, 世界最小の 9 軸センサはアナログ出力の MAG³ (MEMSense, LLC) であるが, そのサイズ $17.8 \times 17.8 \times 10.2 \text{ mm}^3$ は布上に実装するにはまだ大きい. 将来的に数 mm 角のものが開発されれば, 提案手法にジャイロによる補正を取り込むことは可能である.

第3章

重力と地磁気にもとづく形状計測

本章では、加速度場、磁場として重力、地磁気が支配的な状況を仮定する。それらを各リンクに搭載した三軸加速度センサと三軸磁気センサで計測し、そのデータにもとづいてリンクの姿勢を求める。全てのリンクを連結することでシートの全体形状を再構成する。また格子構造が持つ冗長性を利用することにより、ノイズの影響を低減することも期待できる。以下、その方法について説明し、シミュレーションと試作機によって検証する。

3.1 基本原理

3.1.1 問題設定

位置によらず一様な重力場と地球磁場を仮定する。すなわち $\mathbf{g}(\mathbf{p}) = \mathbf{g}$ (一定), $\mathbf{b}(\mathbf{p}) = \mathbf{b}$ (一定). $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ は三次元空間中の一点である。ワールド座標は、 z 軸が \mathbf{g} と平行、逆向きに、また x - z 平面が \mathbf{b} を含むように設定されている。三次元キャプチャシートは長さ l [m] の剛体リンクによって離散化されており、各リンクには三軸加速度センサ、三軸磁気センサが搭載されている (図 3.1)。それらは a_x, m_x 軸がリンクの中心軸方向と一致するように配置されている。また初期状態において、センサ座標 $\{a_x, a_y, a_z\}$ 及び $\{m_x, m_y, m_z\}$ とワールド座標 $\{x, y, z\}$ の各軸は一致しているものとする。リンクの三次元空間中での姿勢はロール角 α [rad], ピッチ角 β [rad], ヨー角 γ [rad] ($-\pi \leq \alpha < \pi$, $-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2$, and $-\pi \leq \gamma < \pi$) で記述される (図 3.2)。ワールド座標からセンサ座標への回転行列 \mathbf{G} は、リンクの姿勢角を用いて次のように書かれる。ここで s, c はそれぞれ \sin, \cos の省略形である。

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &\equiv \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.1)$$

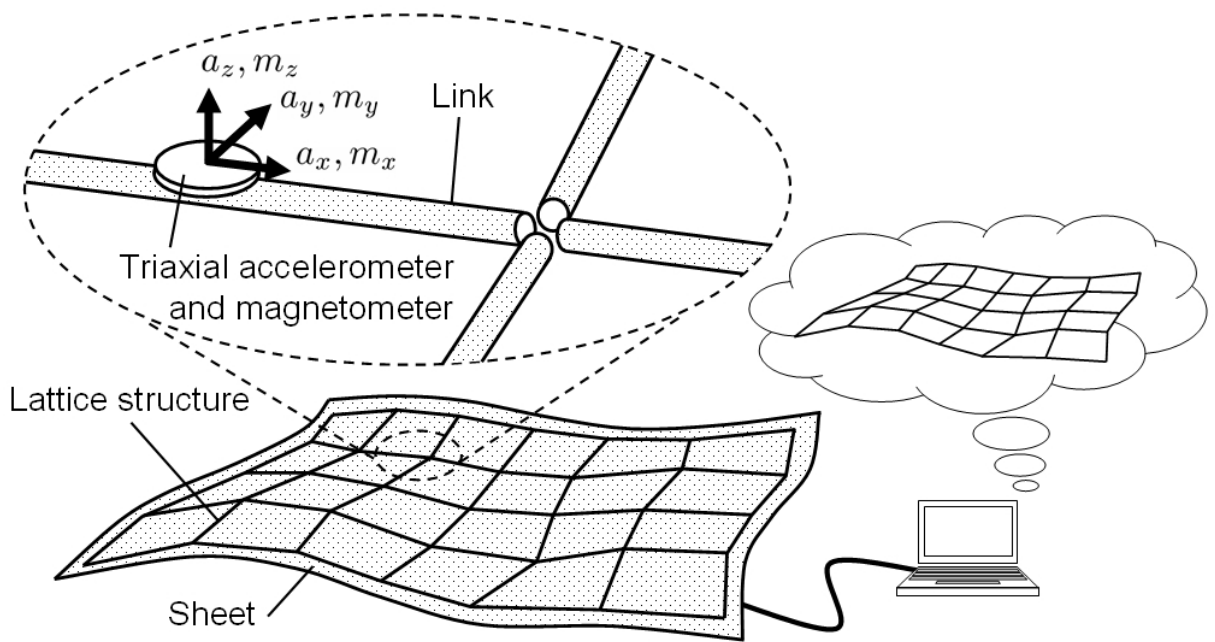


図 3.1 重力及び地磁気にもとづく三次元キャプチャシートの模式図. 各リンクには 6 軸センサ (3 軸加速度 + 3 軸磁気) が搭載されている. 便宜上 a_x 軸及び m_x 軸がリンクと平行になるよう配置するが, 原理的には任意の取り付け向きでよい.

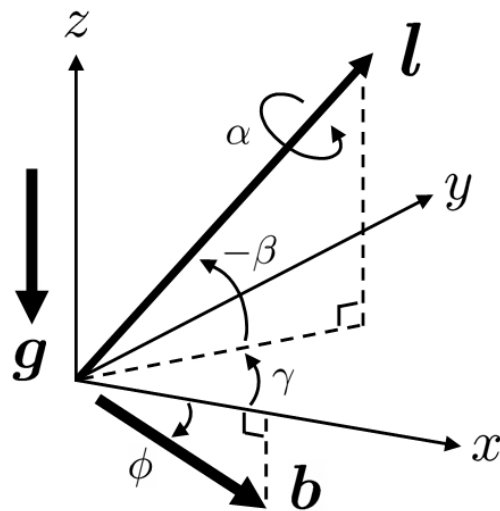


図 3.2 リンクの姿勢角. ワールド座標の x, y, z 軸回りの回転角度をそれぞれロール角 α , ピッチ角 β , ヨー角 γ といい, この順に回転したものとしてリンクの姿勢を記述する. z 軸は重力 g と平行になるように, また $x-z$ 平面は地磁気 b を含むようにとられている. l はリンクの方向ベクトル. ϕ は地磁気が水平面となす角 (伏角).

ここで姿勢角 α, β, γ が未知パラメータである。またリンクを方向ベクトル \mathbf{l} で表す。中心軸方向がセンサの x 軸方向と一致しているので、ワールド座標の x 軸方向単位ベクトル $\mathbf{e}_x = [1, 0, 0]^T$ に回転行列 \mathbf{G} をかけて l 倍したものとして以下のように定義する。

$$\mathbf{l} \equiv l \mathbf{G} \mathbf{e}_x = l \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ s\gamma c\beta \\ -s\beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

すべてのリンクについて方向ベクトル \mathbf{l} が得られれば、それらを連結することでシートの全体形状が再構成される。 \mathbf{l} に含まれている未知数は β, γ であり、形状再構成はこれら2つの姿勢角を求める問題に帰着する。

3.1.2 リンク姿勢角の導出

重力と地磁気にもとづいてデバイスの姿勢角を求める方法はモーションキャプチャやモバイル機器 [90, 91] などのアプリケーションでよく用いられている。重力から「下方向」を、地磁気から「方角」を求めるのである。本論文でも基本的にはこの方針を採用する。

回転行列 \mathbf{G} の各列は、回転後の $x, y,$ 及び z 軸方向の単位ベクトルをワールド座標で記述したものである。加速度データ \mathbf{a} 及び磁気データ \mathbf{m} は回転行列 \mathbf{G} の各列と重力ベクトル $\mathbf{g} = g[0, 0, -1]^T$ 及び地磁気ベクトル $\mathbf{b} = b[c\phi, 0, -s\phi]^T$ の内積として以下のように表される。ここで g [m/s²] は重力加速度 (東京で 9.8 m/s² 程度 [94]) を表す。また b [T] 及び ϕ [rad] は地磁気的全磁力及び伏角 (それぞれ東京で 46.5 μ T 程度, 49° 程度, したがって地磁気の水平成分は 30 μ T 程度 [94]) を表す。

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}^T \mathbf{g} = -g \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^T \mathbf{b} = bc\phi \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha \\ c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \end{bmatrix} - bs\phi \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

これらを解くことで重力加速度 g , 地磁気的全磁力 b , 伏角 ϕ と、ロール角 α , ピッチ角 β , ヨー角 γ が得られる。具体的な解き方は、例えば \mathbf{a}, \mathbf{m} の各成分を用いて以下のように書かれる。 $\text{atan2}(y, x)$ は y/x の逆正接を $[-\pi, \pi]$ の範囲で返す C 言語標準ライブラリ関数である。ここで $\text{atan2}(0, 0) \equiv 0$ rad とする。

$$\alpha = \text{atan2}(-a_y, -a_z) \quad (3.5)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}\right) \quad (3.6)$$

$$\gamma = \text{atan2}\left(-m_y c\alpha + m_z s\alpha, (m_y s\alpha + m_z c\alpha) s\beta + m_x c\beta\right) \quad (3.7)$$

なお一様な運動加速度や外乱磁場 (空間的な DC 成分) が存在する場合には, それらを含めた加速度, 磁気データを式 (3.3), (3.4) の \mathbf{a} , \mathbf{m} として扱う. これはワールド座標系 (下方向など) を設定し直すことに相当する. 姿勢角が不定となるのは $\mathbf{a} \times \mathbf{m} = \mathbf{0}$ ($\mathbf{a} = \mathbf{0}$, $\mathbf{m} = \mathbf{0}$, or $\mathbf{a} \parallel \mathbf{m}$) の場合である. g , b , ϕ が変化しても, 再構成に不要なパラメータであるため問題ない. 次のように規格化と直交化によってそれらを除いた \mathbf{a}' , \mathbf{m}' を考えるとわかりやすい.

$$\mathbf{a}' \equiv \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} = - \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{m}' \equiv \frac{\mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{a}') \mathbf{a}'}{|\mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{a}') \mathbf{a}'|} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha \\ c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2 冗長自由度

三次元キャプチャシートには多数のセンサが分布しており, その形状を再構成する問題は冗長自由度を持つと考えられる. ここでは冗長性の度合いを見積もり, その利用法を述べる.

3.2.1 式の本数からの見積り

簡単のため線形の場合を例にとると, 冗長性を見積もり方は以下のように記述される. ソース \mathbf{s} とデータ \mathbf{d} 及び定ベクトル \mathbf{c} の関係が以下のように書かれるとする.

$$\mathbf{d} = \begin{matrix} \leftarrow m \rightarrow \\ \uparrow \\ n \\ \downarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} \mathbf{s} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{c} = \begin{matrix} \leftarrow m \rightarrow \\ \uparrow \\ k \\ \downarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} \mathbf{s} \quad (3.11)$$

ここで m , n , k はそれぞれソース, データ, 拘束式の個数を表す. 仮にこれらの行列が零特異値を持たなければ (すべての式が縮退していなければ), $m \leq n + k$ のときに \mathbf{s} を求める逆問題は一意の解を持つ. このとき $n + k - m$ が冗長自由度の数を表し, データに含まれているノイズのエネルギー (誤差分散) が $\mu = m/(n + k)$ 程度に抑えられる [92, 93].

非線形の場合にも同様の考え方で冗長性を見積もることができる. いま $N \times N$ の格子構造を考える. ここで N は一辺をなすリンクの本数を表す. この格子構造の形状を表す変数は三次元空間中の $(N + 1)^2$ 個の格子点位置 \mathbf{p} である. シート全体の平行移動を考えないことにすると, 変数の総数はある格子点 (原点) の位置を除いた $3\{(N + 1)^2 - 1\}$ 個となる. 一方,

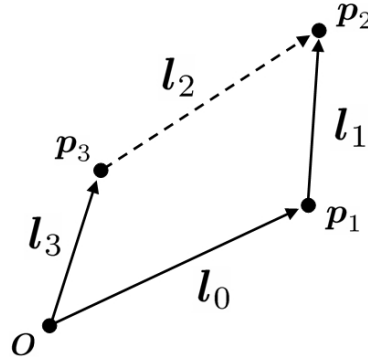


図 3.3 リンク 4 本がなす単位格子. すべての頂点が l_2 を用いることなく表せる. この冗長性は, リンク $3 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ をたどる経路とリンク 2 が一致するという, 方向ベクトルについての閉ループ条件として用いることができる.

先験情報のない状態で再構成のために利用可能な情報は, センサデータとリンクの長さである. センサデータからは各リンクの方向に関する 2 自由度の情報 (ピッチ, ヨー角) が得られる. リンクの本数は $2N(N+1)$ 本なので, センサデータからは $4N(N+1)$ 本の式が立つ. またリンク長 l を既知として, 格子点間の距離に関する拘束式もリンクの本数と同じ数だけ立つ. よって式は計 $6N(N+1)$ 本である. ここで変数の個数と式の本数の比 μ をとると,

$$\mu = \frac{3N(N+2)}{6N(N+1)} \rightarrow \frac{1}{2} \quad (N \rightarrow \infty) \quad (3.12)$$

これは冗長性によって減らさうるノイズのエネルギーがたかだか 1/2 程度であることを意味している. それ以上にノイズのエネルギーを減らして精度を上げるためには, 何らかの先験情報を追加しなければならない.

例として, リンク 4 本 (l_0, l_1, l_2, l_3) からなる格子 1 つ (単位格子) を考える. 単位格子は $N=1$ の場合であり, $\mu=3/4$ となるので冗長性を持つことがわかる. その冗長性は次のように理解することができる. 単位格子は原点 $O \equiv [0, 0, 0]^T$ の他に頂点 p_1, p_2, p_3 を持つ. この 3 点は, 例えば $p_1 = l_0, p_2 = l_0 + l_1, p_3 = l_3$ のように, l_2 を用いることなく書き表すことができる (図 3.3). すなわちこの場合はリンク 2 の長さ l と姿勢角 β, γ の 3 自由度が冗長自由度ということになる.

3.2.2 冗長性の利用

3.2.1 節では形状再構成が, 変数に対して (最大で) 2 倍の式を持つ, 冗長な問題であることを明らかにした. これは, 例えば図 3.3 においては l_2 が冗長であり, 一切のノイズが存在しないときには l_0, l_1, l_3 のみから単位格子の形状が完全に再構成できることを表している. しかし実際には, センサの熱雑音やドリフト, 取り付け誤差, リンク長の誤差や変化, 加速度場及び磁場の時間的空間的な変動, などがノイズとして存在する. そのような状況下では, 残る

l_2 を考慮することによりノイズの影響を低減することが期待できる. 以下, その具体的な方法を説明する.

図 3.3 の単位格子を考える. 格子構造をなすという前提から, リンク $3 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ をたどる経路とリンク 2 は一致するはずである. そのことは閉ループ条件として次のように書かれる.

$$-l_3 + l_0 + l_1 = l_2 \quad (3.13)$$

これはリンク長 l_i , ピッチ角 β_i , ヨー角 γ_i (i はリンクの番号) に関する拘束式である. $l_i = l$ と式 (3.3), (3.4) から初めに求められた β_i, γ_i の周辺で解を探索することで, 単位格子が閉ループとなるようにリンク長と姿勢角が再推定される. リンク 0 を基準として姿勢角 2 自由度を固定すると, この問題は 10 変数の逆問題となる. 式 (3.13) を解くため, 次のような最小化問題に書き換えることを考える.

$$P_l \equiv \sum_{j \in \{x,y,z\}} (l_{0j} + l_{1j} - l_{2j} - l_{3j})^2 \rightarrow \min. \quad (3.14)$$

ここで j はベクトルの成分を表す添え字である. もし P_l の最小値がゼロとなるような解があれば, それは式 (3.13) の解でもある. ゼロとならない場合は最小自乗解が得られる.

実用的には, 変動が無視できるほど小さいと期待される変数を定数とすることで式 (3.14) の計算量を削減する. 例えばリンク長がすべて l のままであれば, その 4 自由度が定数となって 6 変数の最小化問題とすることができる. また, 重力はシートを動かさない限り信頼できるが, 地磁気は微弱であるため (東京で水平成分が $30 \mu\text{T}$ 程度) 磁石, コイル, 強磁性体などによって容易に乱される (図 3.4 (a)). 一様な地磁気を仮定しているのに, 外乱がある場合にはヨー角の推定値のみが誤る (図 3.4 (b)). このように片方のみ誤るときには, γ_i のみについての 3 変数の最小化問題になる. 変数をいくつとるかは計算時間とトレードオフの関係にある. 本論文では計算コスト削減のため 3 変数問題によるヨー角補正を採用し, シミュレーションと試作を行う. ただしリンク長変動の影響を調べるシミュレーションでは, リンク長以外を変数とした 6 変数問題で再推定した結果を示す.

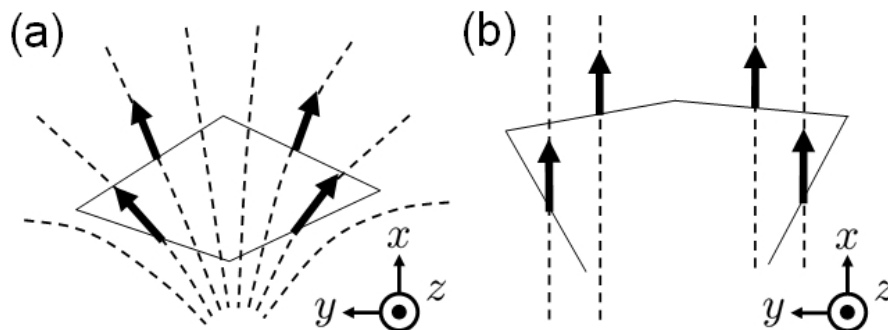


図 3.4 (a) 外乱磁場源によって乱された磁場. (b) 磁場が一様であると仮定して再構成した単位格子. ここで点線は磁力線を表す.

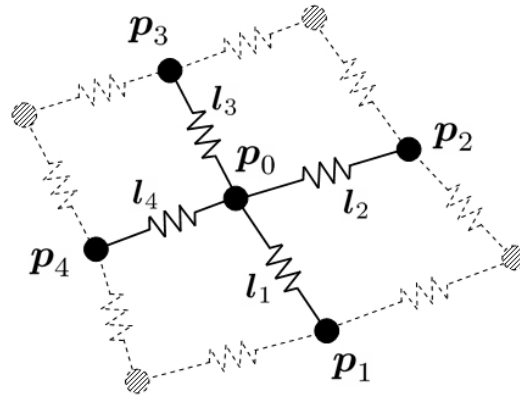


図 3.5 格子構造のバネマスモデル. 格子点の質量 m , バネ (リンク) の長さ l , バネ定数 k はすべて等しいものとする.

またこの問題はもともと冗長性を持つので, 他に先験情報がある場合それらはすべて冗長自由度となる. 例えば, 動力学などにもとづく運動加速度の分布に関する知識や, 磁場の空間的な滑らかさなどを追加条件とすることにより耐ノイズ性が上げられる可能性がある.

3.3 シミュレーション

前述の再構成法の有効性を, シミュレーションによって検証した. またリンク長の変動, 外乱磁場, ランダムノイズについて, その影響を調べた.

3.3.1 モデル生成と計算法

三次元キャプチャシートのモデルとして 13×13 の格子構造を用いた. 各リンクは太さ無限小の剛体とし, 格子点まわりに自由に回転できるようにした. そのモデルを仮想物体の上に被せ, モデル形状とした. 被せる操作は反復計算によって行い, 各リンクの姿勢から加速度センサ, 磁気センサの出力を計算した. 得られたセンサデータを用いて, 形状を再構成した. モデル形状と再構成形状を最小自乗法で重ね合わせた後, 対応する格子点間の距離のうち最大のものを推定誤差として誤差評価を行った. この一連のシミュレーションについて, モデルと計算法の詳細を以下に述べる.

* * * * *

まず, 再構成の対象となるモデル形状を生成する. 格子構造は, 格子点を質量 m [kg] の質点, リンクを長さ l , バネ定数 k [N/m] のバネとしてモデル化した (図 3.5). このとき格子点に関する運動方程式は以下のように書かれる. ∂_t は時間 t [s] に関する一階微分を表す.

$$m \partial_t^2 \mathbf{p}_0 = m \mathbf{g} - c \partial_t \mathbf{p}_0 - \sum_{i=1}^4 k \Delta l_i \frac{\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_i}{|\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_i|} \quad (3.15)$$

ここで \mathbf{p}_0 は注目する格子点の位置座標, 右辺第一項は重力, 第二項は空気抵抗などの粘性, 第三項は4本のバネ(リンク)から受ける力である. i はバネを介して接続する格子点の番号, Δl_i [m] はバネの伸びである. 本来リンクは剛体なので, Δl_i が十分小さくなるようバネ定数 k を大きい値に設定する. このモデルを仮想物体に被せる操作は次のように行った. まず仮想物体の上空 ($z = H$ [m]) に格子構造を x - y 平面と平行に配置した. そして次のような更新則 (FB オイラー法) によって式 (3.15) の時間発展を計算し, 格子構造を仮想物体に被せた. これは布シミュレーションの研究でも用いられる更新則である [4].

$$\partial_t \mathbf{p}_0(t + \Delta t) = \partial_t \mathbf{p}_0(t) + \partial_t^2 \mathbf{p}_0(t) \Delta t \quad (3.16)$$

$$\mathbf{p}_0(t + \Delta t) = \mathbf{p}_0(t) + \partial_t \mathbf{p}_0(t + \Delta t) \Delta t \quad (3.17)$$

ここで Δt は時間の刻み幅である. 本シミュレーションでは, 仮想物体として次のような高さ h [m], 標準偏差 σ [m], 中心座標 (x_c, y_c) のガウシアン形状 $z = f(x, y)$ を用いた.

$$f(x, y) \equiv h \exp \left\{ -\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (3.18)$$

計算で用いた値は, 質点の質量 $m = 1$ g, リンク長 $l = 2$ cm, ダンパ定数 $c = 2$ g/s, バネ定数 $k = 500$ N/m, 格子構造を最初に配置する高さ $H = 30$ cm, 時間の刻み幅 $\Delta t = 1$ ms, ガウシアンの高さ $h = 20$ cm とした. また, σ の値を変化させるシミュレーション以外では $\sigma = 10$ cm とした. モデル形状の表面は滑らないものとし, 格子点が表面に触れた時点でその格子点についての反復計算を終了した. そのような仮想物体に被せたときのリンク長の変化は $\pm 0.6\%$ (± 0.12 mm) の範囲に収まっていた. これは無視できる程度の変動である.

次に, 格子点座標の系列で表されるモデル形状から, 出力されるべきセンサデータを求める. 図 3.5 のリンク \mathbf{l}_i に搭載された三軸加速度, 三軸磁気センサの x, y, z 軸方向単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ とする. \mathbf{X}_i は方向ベクトルと一致するように配置してあるので次のように書ける.

$$\mathbf{X}_i = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0|} \quad (3.19)$$

このベクトルの向きはセンサの取り付け向きに応じて決まる. また, $\mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ に関しては \mathbf{X}_i と直交してさえいればよい (ロール角 α は任意) として, 次のように定めた.

$$\mathbf{Y}_i = \frac{1}{\sqrt{X_{ix}^2 + X_{iy}^2}} \begin{bmatrix} X_{iy} \\ -X_{ix} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{X}_i \times \mathbf{Y}_i \quad (3.21)$$

そして, 次のようにセンサの各軸方向単位ベクトルと重力ベクトル \mathbf{g} , 地磁気ベクトル \mathbf{b} の内積をとることでセンサデータ $\mathbf{a}_i, \mathbf{m}_i$ を得た.

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{g} \\ \mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{g} \\ \mathbf{Z}_i \cdot \mathbf{g} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{Z}_i \cdot \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

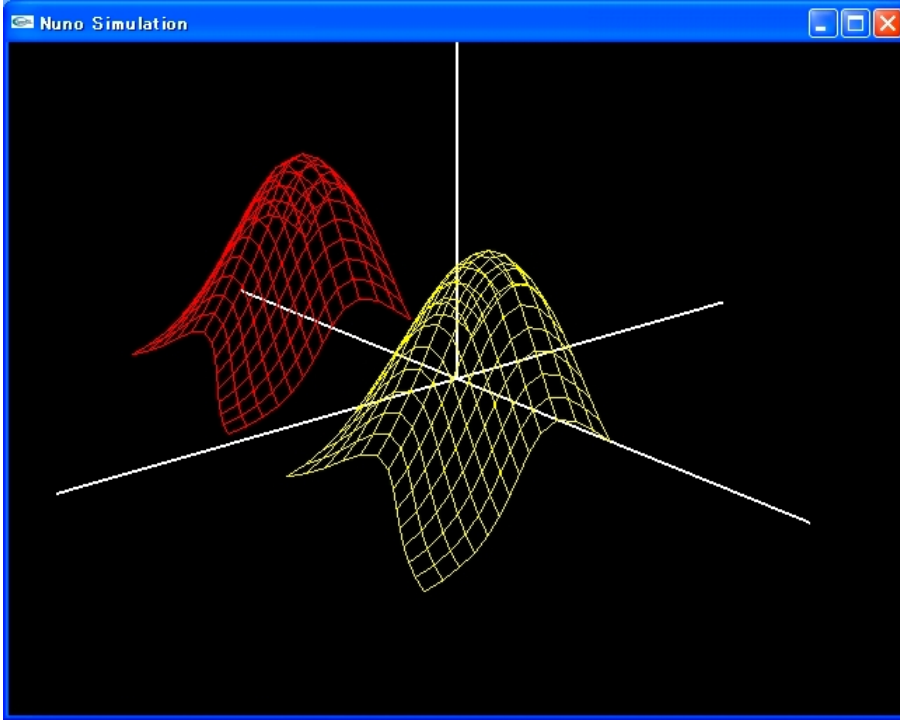


図 3.6 ノイズなしの結果. 奥側がモデル形状 $\{p_i\}$, 手前側が再構成形状 $\{p'_i\}$.

最後に、モデル形状から得られたセンサデータを用いて、提案手法による形状再構成を行う。まず式 (3.5), (3.6), (3.7) を用いて姿勢角 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ を計算した。次に冗長性を利用した補正を行うため、得られた姿勢角を初期値として、式 (3.14) を共役勾配法 [95] によって解いた。補正された姿勢角 β_i, γ_i と既知のリンク長 l を用いて、適当な座標を基準点とする再構成形状の格子点位置 p'_i を求め、それを結果とした。

またモデル形状からの再構成形状の誤差を評価するため、推定誤差を定義する。問題の性質上、たとえほとんどの格子点が正しく再構成されていたとしても、1点でも大きく間違っていれば全体も本来の形状と大きく異なるものとなる。それを踏まえて本論文では、推定誤差として対応する格子点間の距離のうち最大のものを採用した。具体的には以下で述べるように計算した。まずモデル形状と再構成形状を次のような最小自乗法によって重ね合わせた。

$$Q \equiv \sum_i \{p_i - R(p'_i + r)\}^2 \rightarrow \min. \quad (3.23)$$

これは再構成形状をベクトル r だけ平行移動し、回転行列 R で回転させる操作である。この6変数最小化問題を共役勾配法 [95] によって解いた。そうやって重ね合わせた再構成形状の格子点を p''_i として、推定誤差 ε を次のように計算した。

$$\varepsilon \equiv \frac{1}{Nl} \max_i |p_i - p''_i| \quad (3.24)$$

Nl は $N \times N$ 格子構造の一辺の長さである。この ε がゼロに近ければ近いほど、再構成が精度よく行われたことを表す。

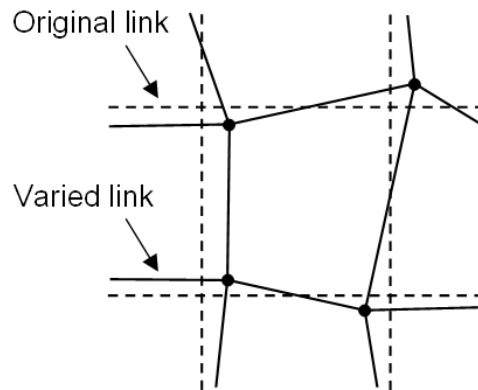


図 3.7 リンク長をランダムに変化させたモデルの生成法. 点線が変化前, 実線が変化後. この変化後のモデルを仮想物体に被せてモデル形状とした.

3.3.2 ノイズなしの場合

まずノイズなし場合に前述のアルゴリズムで形状が再構成できることを確認した. シミュレーション結果を図 3.6 に示す. ガウシアン形状が再構成できていることがわかる.

3.3.3 リンク長がランダムに変化した場合

ノイズありの場合を考える. 要因としては, センサの熱雑音やドリフト, 取り付け誤差, リンク長の誤差や変化, 加速度場及び磁場の時間的空間的な変動, などがある. ここではリンク長の変化に関して, その影響を調べた. まず格子点を等間隔 (リンク長 l) に配置したモデルを x - y 平面上に用意した. ノイズ n_p [m] を以下の式にしたがってメルセンヌツイスター [96] で生成し, 格子点位置座標の x , y 成分にそれぞれ加えた (図 3.7). そのモデルを 3.3.1 節の手順によって仮想物体に被せ, モデル形状とした. ここで $\text{rand}[q_1, q_2]$ は区間 $[q_1, q_2]$ から選んだランダムな実数値を返す関数とする. ノイズレベル ν_p はリンク長に対する比率である.

$$n_p \equiv \nu_p l \times \text{rand}[-1, 1] \quad (3.25)$$

このように各格子点に対して一様分布に従ってノイズを与えると, 格子点間の距離, すなわちリンク長は図 3.8 のような分布になり, $[-2\nu_p, 2\nu_p]$ の値をとることがわかった. よってこれ以降は $\nu_l \equiv 2\nu_p$ をリンク長のノイズレベルとして用いる. データから姿勢角を求めた後, 式 (3.14) を β_i, γ_i について解き, 最小値を与える解をもっともらしい推定値とした.

各ノイズレベルに対して 10 試行ずつ行った. 図 3.9 に推定誤差 ε をプロットしたものを示す. 再構成結果を観察したところ, 推定誤差が $\varepsilon = 10\%$ を超えたときモデル形状とのずれが目立つ歪んだ形が現れた. 図 3.9 によると, 推定誤差が $\varepsilon = 10\%$ を超えはじめるのはノイズレベルが $\nu_l = 12\%$ より大きいときである. よって, $\nu_l = 12\%$ 以下のノイズレベルならば許容できると言える. ノイズレベル $\nu_l = 13\%$ で再構成に失敗した場合の代表的な例を

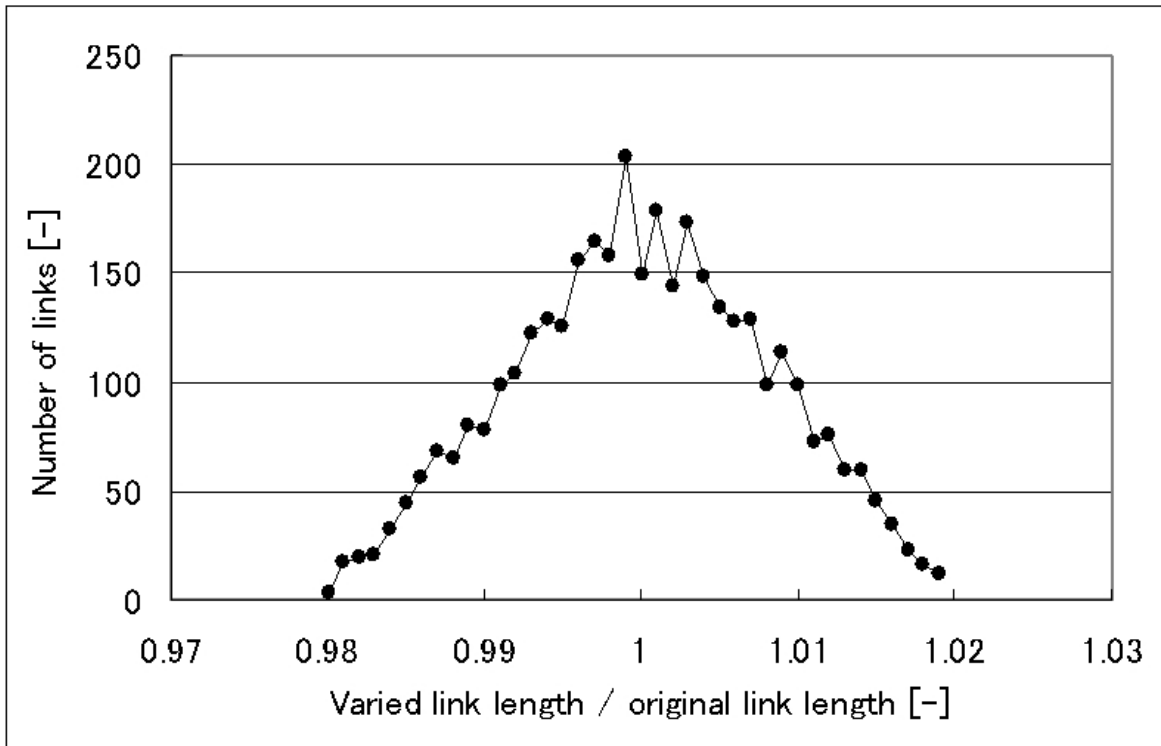


図 3.8 リンク長の度数分布 (1% 刻み). $\nu_p = 1\%$, 10 試行 (総リンク数 3640 本) の結果.

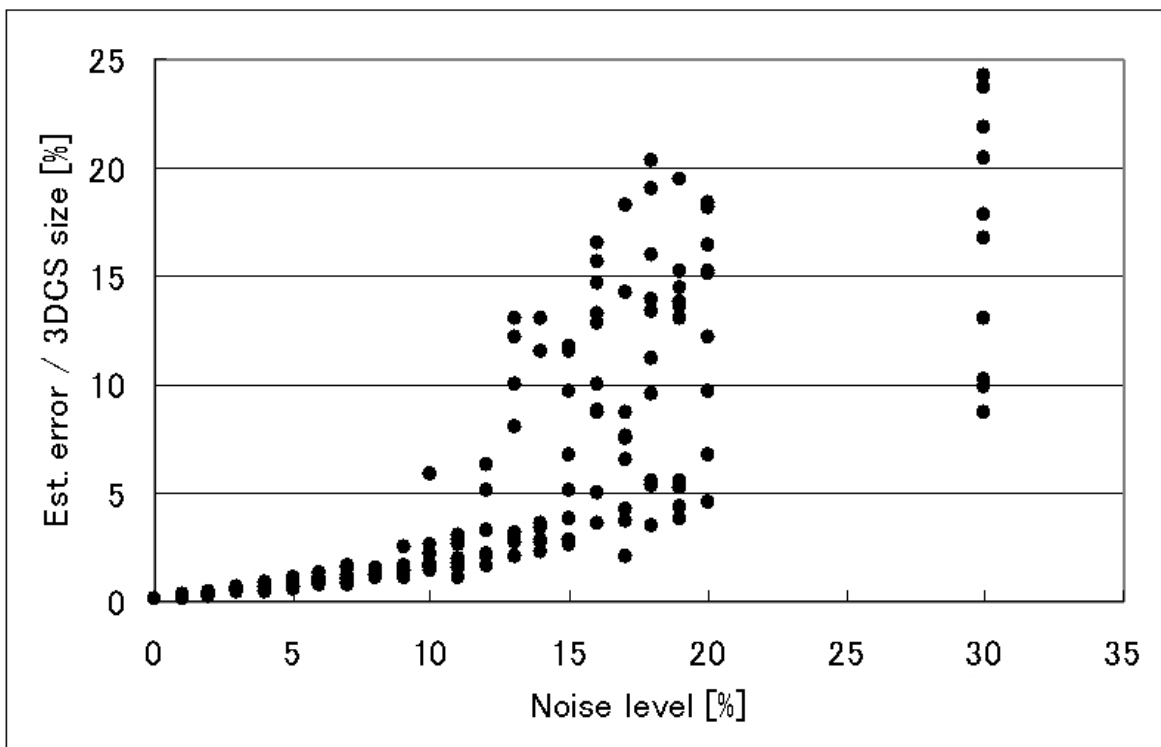


図 3.9 リンク長がランダムに変化したモデル形状に対する推定誤差. 10 試行の推定誤差をプロットしている. ノイズレベルはもとのリンク長に対する比率で表されている. 推定誤差が $\varepsilon = 10\%$ を超えると再構成結果が歪む.

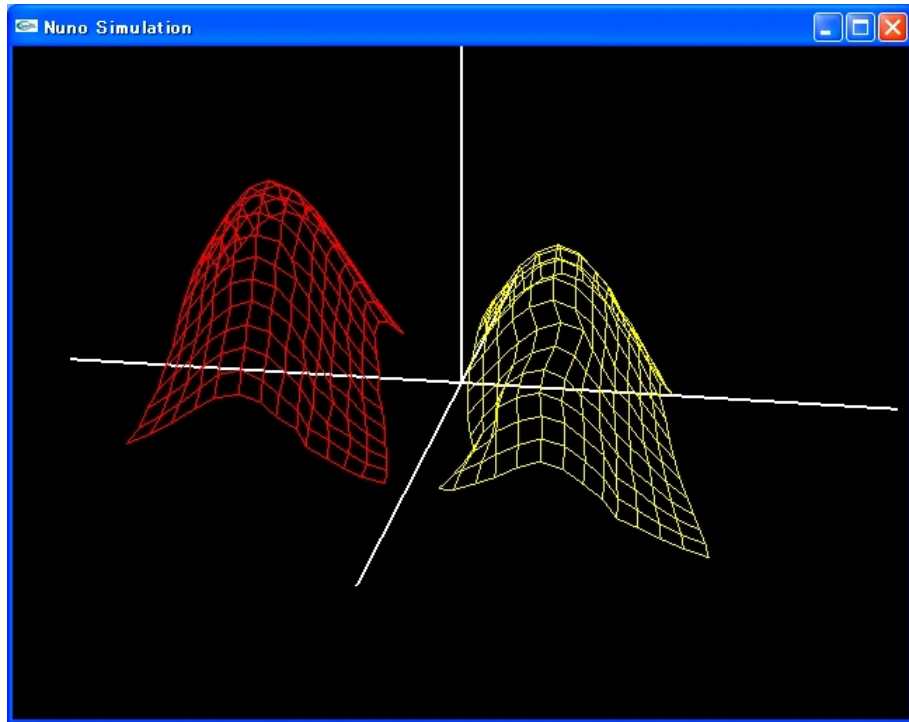


図 3.10 再構成が失敗した例 ($\sigma/l = 5$, $\nu_l = 13\%$). 左側がリンク長がランダムに変化したモデル形状, 右側が再構成形状. $\nu_l \leq 12\%$ ではこのように歪むことはない.

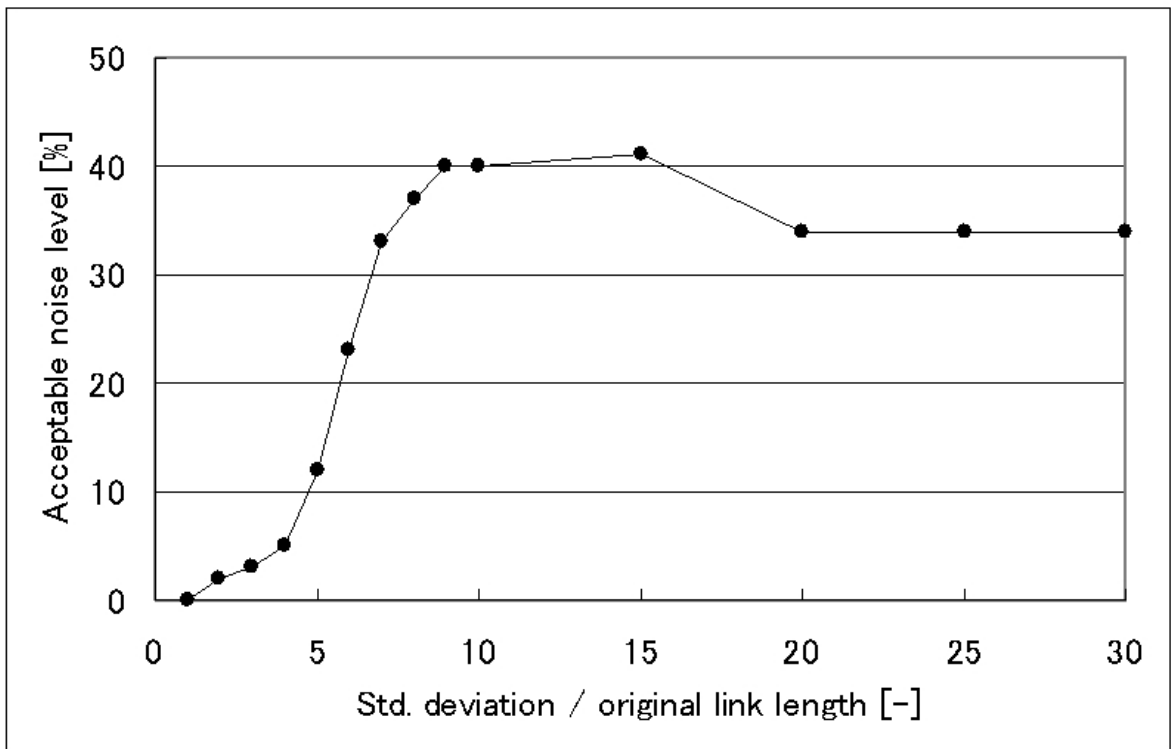


図 3.11 対象とするガウシアン標準偏差と許容できるノイズレベルの関係. 標準偏差 σ はもとのリンク長で規格化してある. $\sigma/l \geq 7$ のとき許容値は横這いとなる.

図 3.10 に示す. ところでこの結果は仮想物体として用いたガウシアン標準偏差 $\sigma = 5l$ のときのものであるが, 許容できるノイズレベルが標準偏差の値によって異なることもわかった. それをプロットしたものが図 3.11 である. $\sigma \geq 7l$ になると許容値はほぼ変わらなくなり, その値は $\nu_l = 30 \sim 40\%$ であることがわかった. 以上の結果は布上にリンクを配置する際の製作誤差や, 使用時の変動範囲などの許容値を与える.

3.3.4 外乱磁場源が接近した場合

次に, 磁場の歪みに対する補正の効果を確認した. なお, これ以降のシミュレーションと試作機においては, 計算コスト削減のためヨー角のみに関する再推定を行う. 図 3.12 に示すように, x - y 平面に平行に置いたループコイルを磁場源とし, シートとの距離 d [m] を変化させてそのときの推定誤差を記録した. コイルは直径 10 cm, 電流 10 A とした. コイルから発生する磁場は Biot-Savart 則を数値積分 (Romberg 積分 [95]) することによって求めた.

図 3.13 に, 距離 d に対する推定誤差 ε を示す. d はリンク長 l で規格化してある ($l = 2$ cm). ランダム性がないので, 各距離に対して 1 試行ずつ行った. 結果から, 補正アルゴリズムを用いた場合にはコイルが 1.8 cm ($d/l = 0.9$) まで近づいても再構成できることがわかる. そのときの推定誤差は $\varepsilon = 1.1\%$ (2.9 mm 程度) である. 補正を行わない場合には同程度の推定誤差は $d = 9$ cm ($d/l = 4.5$) のときに当たり, 補正アルゴリズムが効果的に働いていることがわかる. 再構成が成功した場合と失敗した場合の代表的な例を図 3.14 に示す. また補正可能距離がコイルの直径によるかを調べるため直径 2 cm (リンク長と同程度) も試した. そのときの補正可能距離は 2.2 cm ($d/l = 1.1$) であった. 直径 10 cm の場合とほぼ同程度なので, コイルの直径は大きな要因ではないと推測される.

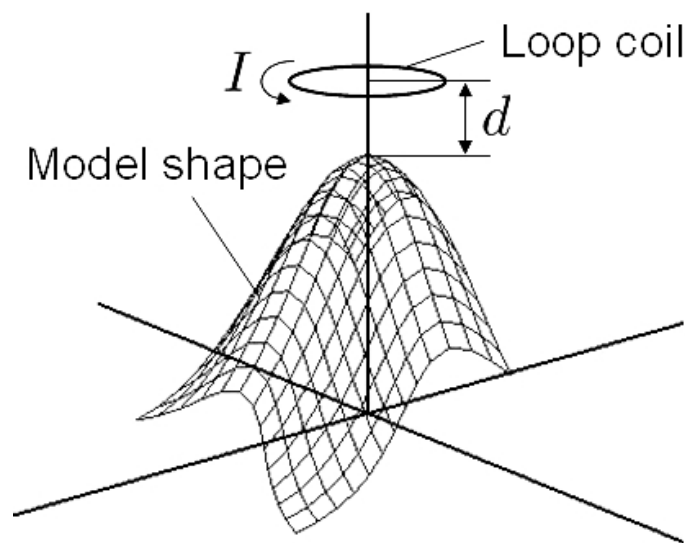


図 3.12 モデル形状とループコイルの位置関係. コイルの直径は 10 cm, 電流は $I = 1$ A.

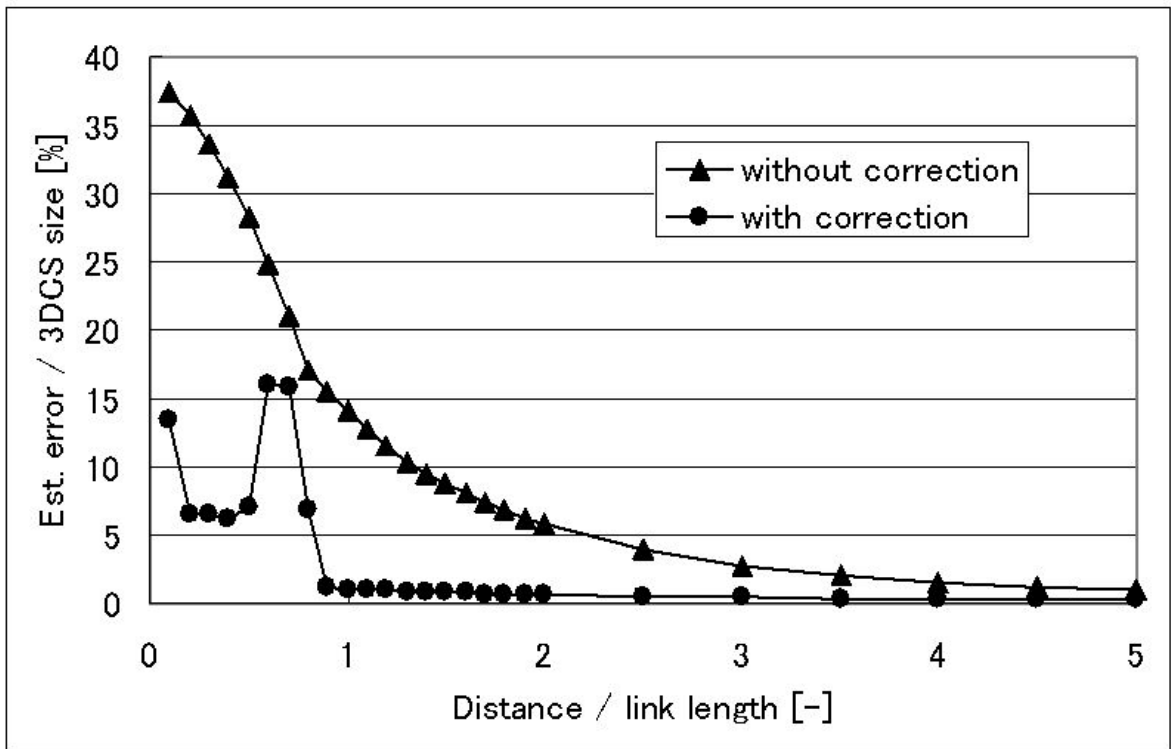
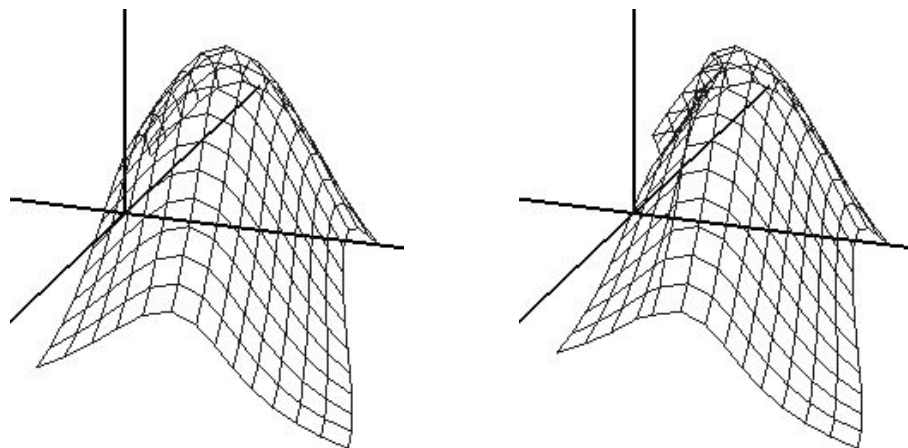


図 3.13 磁場源 (ループコイル) を近づけたときの距離 d と推定誤差の関係.



(a) $d/l = 0.9$

(b) $d/l = 0.8$

図 3.14 再構成が成功した場合 (a) と失敗した場合 (b).

3.3.5 センサデータにランダムノイズが含まれる場合

ここではセンサデータに重畳する熱雑音の影響を考え、様々な S/N 比での提案手法の安定性を調べた。ノイズ n_a [m/s²] 及び n_m [T] を以下の式に従ってメルセンヌツイスター [96] で生成し、センサデータの各成分に加えた。ここで $\text{rand}[q_1, q_2]$ は区間 $[q_1, q_2]$ から選んだランダムな実数値を返す関数とする。ノイズレベル ν_a, ν_m は重力 g 及び地磁気の水平成分 $bc\phi$ に対する比率である。

$$n_a \equiv \nu_a g \times \text{rand}[-1, 1] \quad (3.26)$$

$$n_m \equiv \nu_m bc\phi \times \text{rand}[-1, 1] \quad (3.27)$$

各ノイズレベルにおいて 10 試行ずつ行い、推定誤差 ε を記録した。観察により、推定誤差が $\varepsilon = 15\%$ を超えると再構成結果が大きく崩れることがわかった。10 試行中 1 回でも $\varepsilon = 15\%$ を超えたら不安定と判断することとし、 ε の最大値を評価量とする。図 3.15 に 10 試行中の最大推定誤差を示す。図 3.15 から、加速度ノイズレベルが $\nu_a = 8\%$ (加速度換算 0.8 m/s² 程度) 以下、磁気ノイズレベルが $\nu_m = 25\%$ (東京での磁気換算 7.5 μT 程度) 以下ならば三次元キャプチャシートの安定動作が期待できる。これは実際のデバイスにおいても達成可能な値である。再構成が成功した場合と失敗した場合の代表的な例を図 3.16 に示す。

3.4 試作

3.3 節のシミュレーションにより提案手法が有効であることが示されたので、三次元キャプチャシートの試作機を作成した。現段階ではまだ二次元通信を用いず、ワイヤで給電及び通信を行うものとした。センサチップには市販の 6 軸モーショセンサとマイコンを搭載した。以下、その詳細と実験結果について述べる。

3.4.1 システム構成

図 3.17 にシステム構成を示す。各センサチップは重力及び地磁気を計測し、そのセンサデータにもとづいてシート形状が再構成される。I²C 通信は 2 線式 (SDA, SCL) のバス通信プロトコルであり、異なるアドレスを割り振られた複数のセンサチップを同一バス上に接続することができる。アドレスは 7 bit (または 10 bit) で設定可能である。USB-to-I²C (SB Solutions, Inc.) は、I²C バスに PC をマスタとして接続する機能を持つ回路である。PC はこれを介してセンサチップに呼びかけ、それに応じて送られてきたデータを取り込む。

試作したセンサチップを図 3.18 に示す。6 軸モーショセンサ (AMI601, 5.2×6.0×1.57 mm³, Aichi Micro Intelligent Corp.) を搭載している。これは、加速度と磁気をそれぞれ 3 軸で計測する小型センサである。各軸のデータは 12 bit でデジタル化され、公称感度は加速度 400 LSB/g (= 2.5 mg/LSB), 磁気 10 LSB/ μT (= 0.1 μT /LSB) である (電源電圧 3 V のとき)。ここで g は重力加速度の大きさを、LSB は最下位ビットを表している。このセンサ

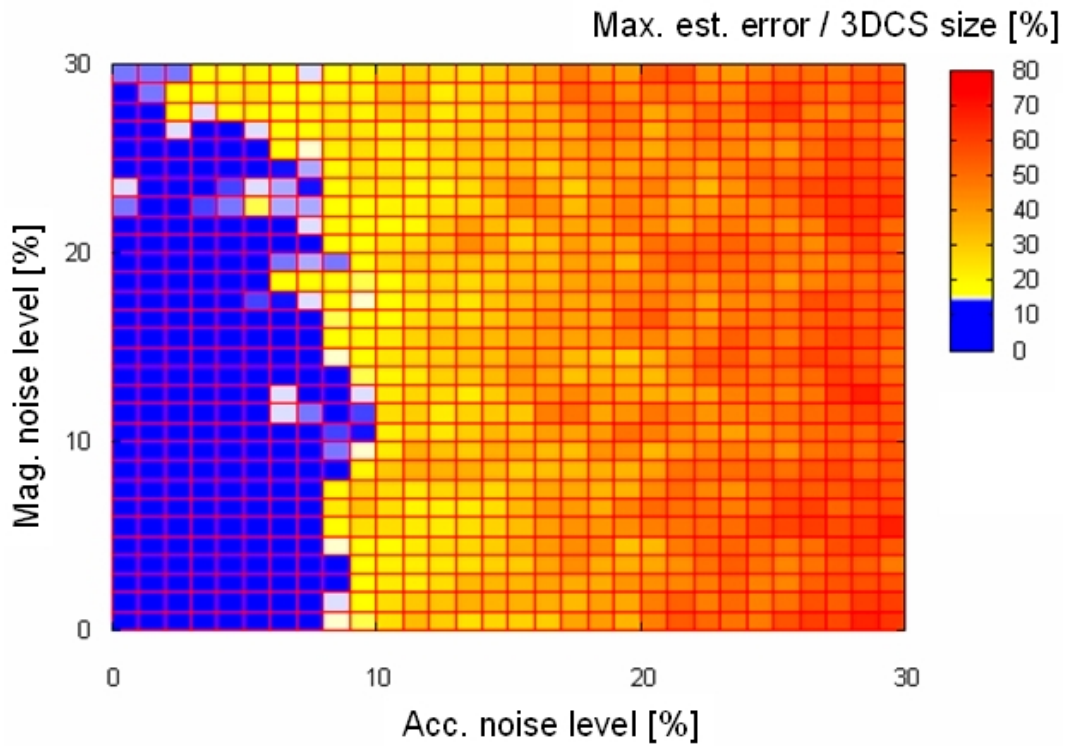
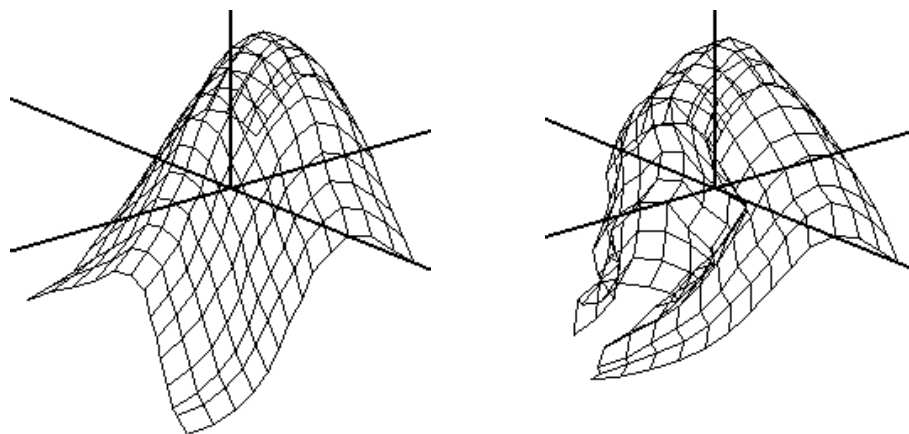


図 3.15 ノイズありの場合の最大推定誤差 (10 試行). 各ノイズレベルに対する最大推定誤差をカラー表示し, 安定とみなせる領域 ($\epsilon \leq 15\%$) を青で示している. ノイズレベルは重力 g 及び地磁気の水平成分 $bc\phi$ に対する比率で表されている.



(a) $\nu_a = 5\%$, $\nu_m = 20\%$.

(b) $\nu_a = 10\%$, $\nu_m = 20\%$.

図 3.16 再構成が成功した場合 (a) と失敗した場合 (b).

は I²C バス通信でデジタル出力するものであるが、製品固有のアドレスが設定されているため同一バス上に複数個を配置することができない。そこで I²C 端子を 2 ch 持つマイコン (PIC18F45J10-I/ML, 8.0×8.0×0.9 mm³, Microchip Technology Inc.) を、アドレス変換のため搭載する。これによりセンサチップすべてを同一バス上に配置でき、そのバスを介して加速度及び磁気データが PC へ送信される。マイコンを高速動作させるため 20 MHz クロックを搭載する。センサチップの大きさは幅 13 mm, 長さ 33 mm であり、消費電力は約 50 mW である (電源電圧 2.8 V, 消費電流 18 mA)。

このセンサチップを用いて、試作機を製作した (図 3.19)。センサチップ 24 個を 3×3 の格子状に配置した。現段階ではまだ布へ搭載することは行っていない。センサチップ間を平行ケーブルで接続した。これは 2.1.4 節で触れた 2 つ目のジョイント機構に相当する。リンク長はセンサチップとケーブルを合わせて 5.5 cm, すなわち格子構造の一边は 16.5 cm である。交差する部分を糸で結わえることで、交差角の変化を可能にしている。しかし給電・通信用のケーブルで物理的にも接続するこの構造は強度的に決してよいものではなく、改善が必要である。データを受信し、各リンクの姿勢を求め、共役勾配法 [95] によって式 (3.14) の最小化問題を解き、再構成結果をディスプレイに表示した。計算には過去 5 サンプルの平均を用いた。通信クロック SCL = 250 kHz のとき、システム全体の実効的なサンプリングレートは 7 Hz であった。(ヨー角補正の場合、ピッチ・ヨー角補正にすると 4 Hz とさらに遅くなった。) そのように遅い原因は受信回路で 1 回の通信ごとに 3.5 ms の待ち時間が入ることと、形状再構成に 40 ms かかることである。センサチップ内ではセンサ-マイコン間のデータの受け渡しが 5.2 ms で完了する。1 センサチップ当たりのパケット長は 0.5 ms であり、24 個で 12 ms となることから、理想的には 83 Hz までの高速化が期待できる。

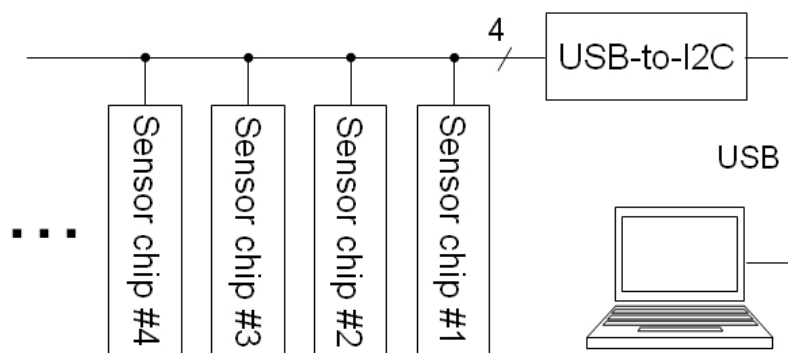


図 3.17 システムの構成. 4本のワイヤは電源, GND, 信号, クロックである.

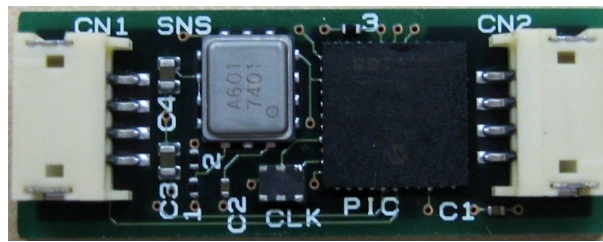


図 3.18 試作したセンサチップ. 右側のマイコン (PIC) が、左側の 6 軸モーショセンサ (SNS) のデジタル出力を受信し、I²C バス通信によってそのデータを PC へ送信する. チップのサイズは $13 \times 33 \text{ mm}^2$.

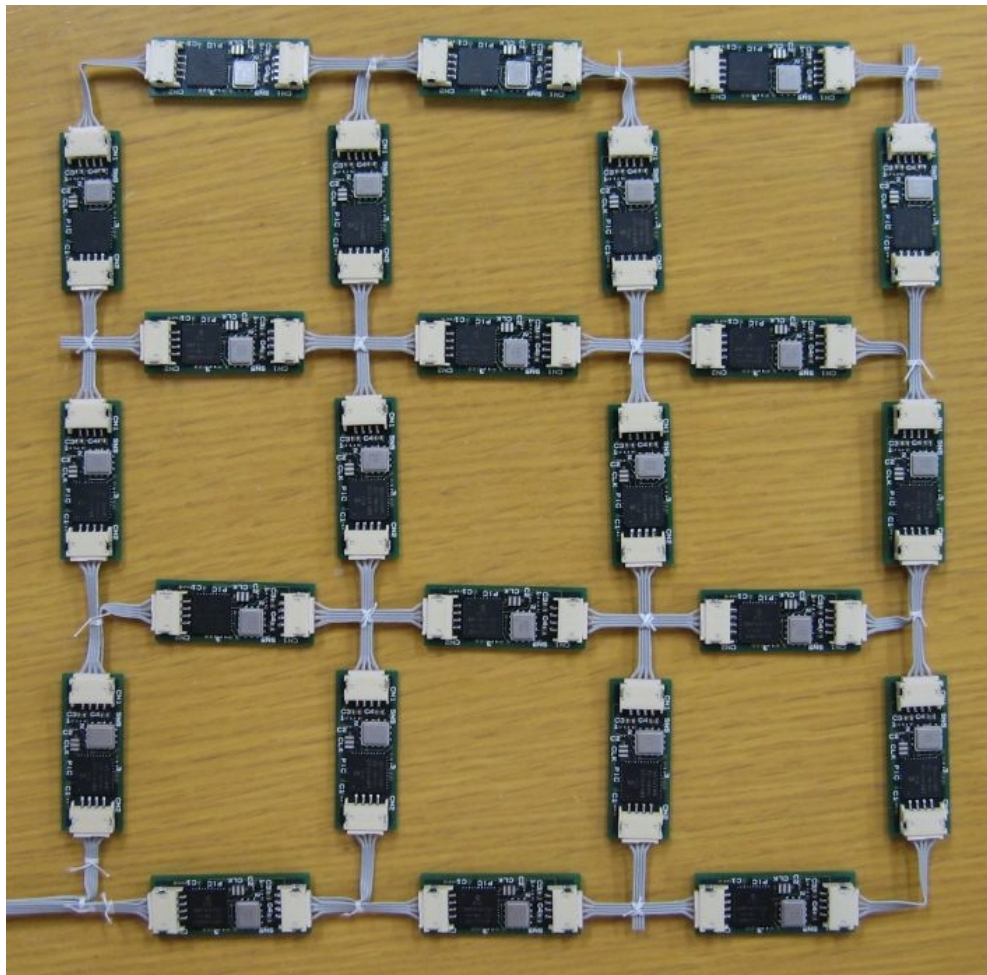


図 3.19 重力及び地磁気にもとづく三次元キャプチャシートの試作機. 24 個のセンサチップが格子状に接続されている. チップ間には電源 (VDD), GND, 信号 (SDA), クロック (SCL) の 4 本のワイヤが張られ、一箇所から PC へ繋がっている.

3.4.2 動作実験

センサチップの特性

試作したセンサチップについて、磁気及び加速度に対する出力を確認した。

まず 24 個すべてについて、図 3.20 のようにチップを水平回転させ、各角度での磁気、加速度の計測値を記録した。各センサチップについて 1 試行ずつ行った結果を図 3.21, 3.22 に示す。全てほぼ正しく動作しており、磁気データのばらつきの幅は (地磁気的全磁力と比較して) 最大 5 % 程度、加速度データのばらつきの幅は (重力加速度と比較して) 最大 9 % 程度であった。その原因としてはセンサの熱雑音、オフセット誤差またはドリフト、基板への取り付け誤差、手動で実験を行ったためのばらつきなどが考えられる。また、そのデータから求めたロール角 α 、ピッチ角 β 、及びロール角 γ を図 3.23 に、リンクの先端位置座標を図 3.24 に示す。

次に、図 3.25 のようにチップを傾け、各角度での磁気、加速度の計測値を記録した。センサチップごとのばらつきを十分小さいとみなし、代表 1 個についてのみ実験を行った。結果を図 3.26, 3.27 に示す。ほぼ理論通りに動作していることがわかる。また、そのデータから求めたロール角 α 、ピッチ角 β 、及びロール角 γ を図 3.28 に、リンクの先端位置座標を図 3.29 に示す。

めくり上げた場合

試作機を水平面上に置き、隅をつまんで試作機をめくり上げた場合の動作を確認した (図 3.30)。図から、 3×3 の格子が再構成できていることがわかる。

平面の場合

試作機を平面に貼り付け、全体を一様に傾けた場合の動作を確認した (図 3.31)。図から、センサチップを載せた 3×3 の格子が再構成できていることがわかる。

再構成の誤差を定量化するため、次のような実験を行った。図 3.32 に示すように平面に載せたシートの傾き θ [deg] を変化させ、そのときの各格子点の位置座標をデータとして保存した。理論的な平面形状との最小自乗法により、 θ に関する誤差と、平面形状からの誤差 ε を求めた。3 試行の結果を図 3.33, 3.34 に示す。角度誤差は平均 6° 程度、平面形状からの誤差は平均 $\varepsilon = 6\%$ (一辺 165 mm に対して 10 mm) 程度であった。またセンサデータのゆらぎ (ランダムノイズ) による位置誤差 ε のばらつきは 3 試行で 2 % 以内の幅に収まっていた。

球面の場合

試作機を球体 (直径 23.2 cm) に載せたときの結果を図 3.35 に示す。この場合にも 3×3 格子を再構成することができた。

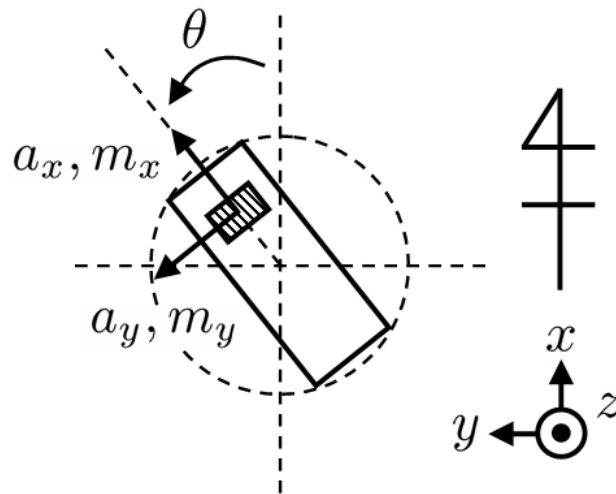


図 3.20 方位 (ヨー角) θ ($-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) に対するセンサチップの出力を確認する実験.

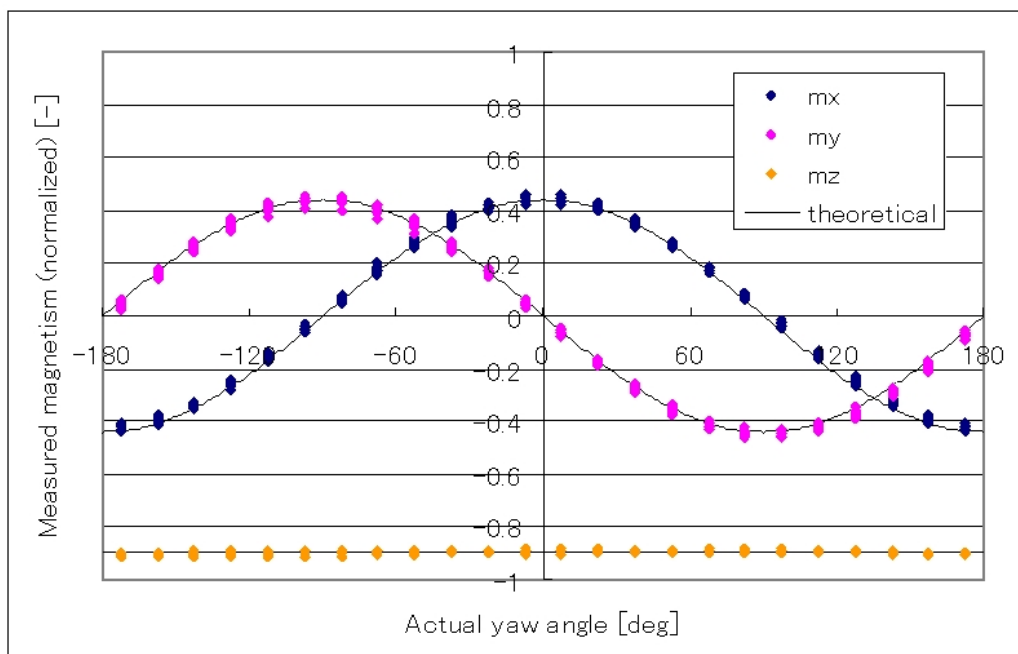


図 3.21 センサチップ 24 個の, 方位 (ヨー角) に対する磁気計測値 (1 試行ずつ). 軸ごとに色分けしてプロットしてある. 磁場ベクトルは正規化したものである. 実線は理論曲線. データのばらつきの幅は (地磁気的全磁力と比較して) 最大 5% 程度であった.

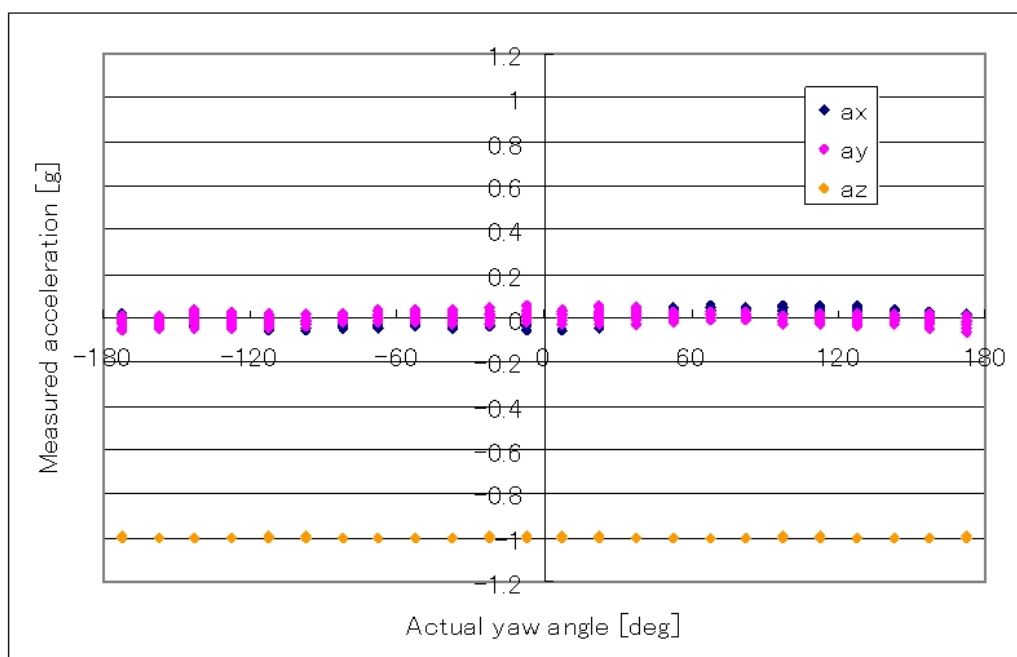


図 3.22 センサチップ 24 個の, 方位 (ヨー角) に対する加速度計測値 (1 試行ずつ). 軸ごとに色分けしてプロットしてある. ここで $1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$ である. データのばらつき幅は (重力加速度と比較して) 最大 9% 程度であった.

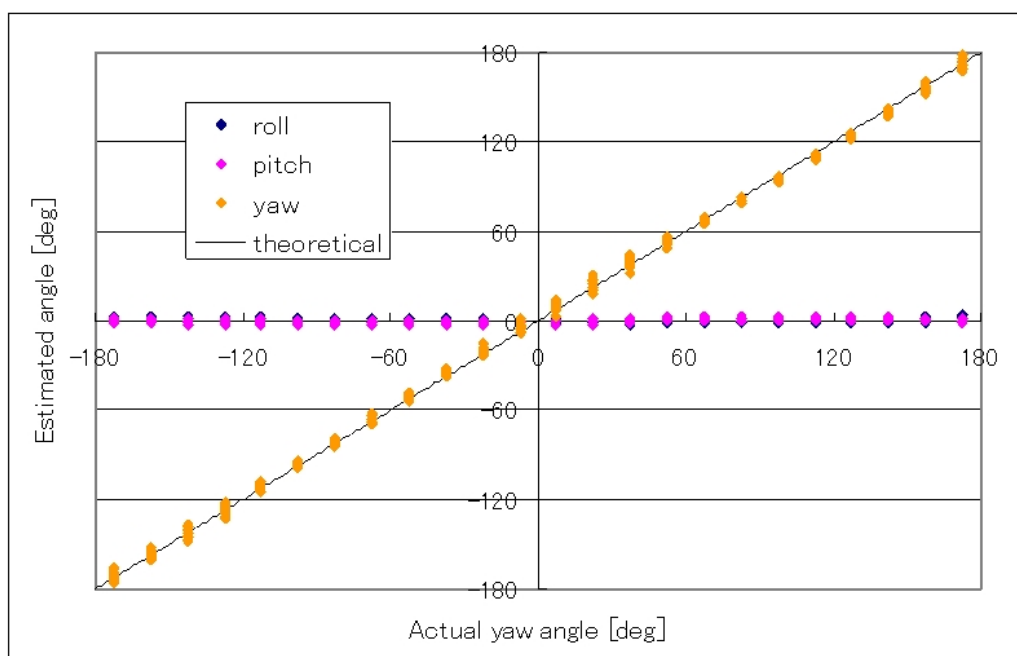


図 3.23 センサチップ 24 個の, データから求めたリンクのロール角 α , ピッチ角 β , 及びヨー角 γ . 実線は理論曲線.

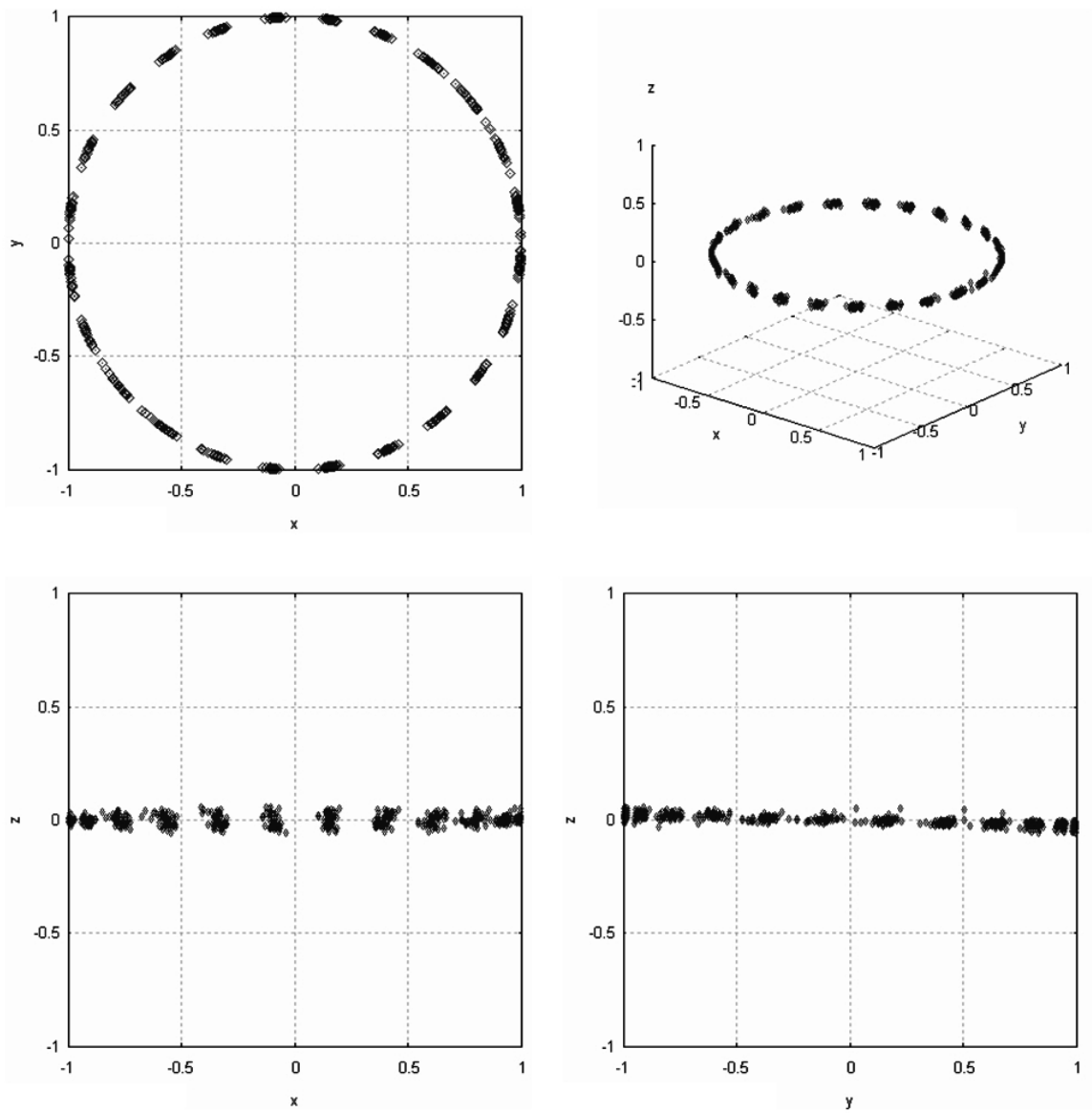


図 3.24 センサチップ 24 個の, データから求めたリンクの先端位置座標.

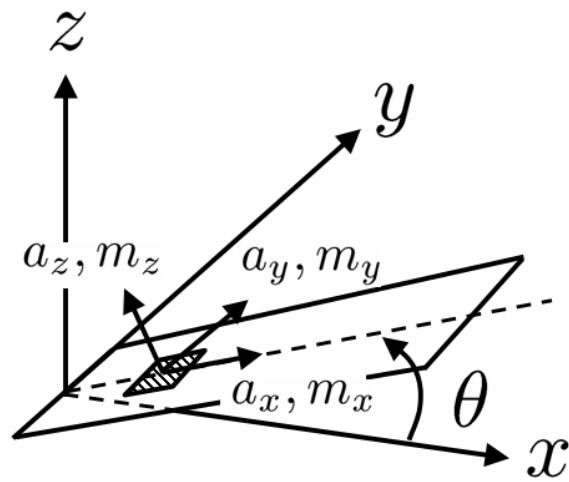


図 3.25 傾き (ピッチ角) θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) に対するセンサチップの出力を確認する実験.

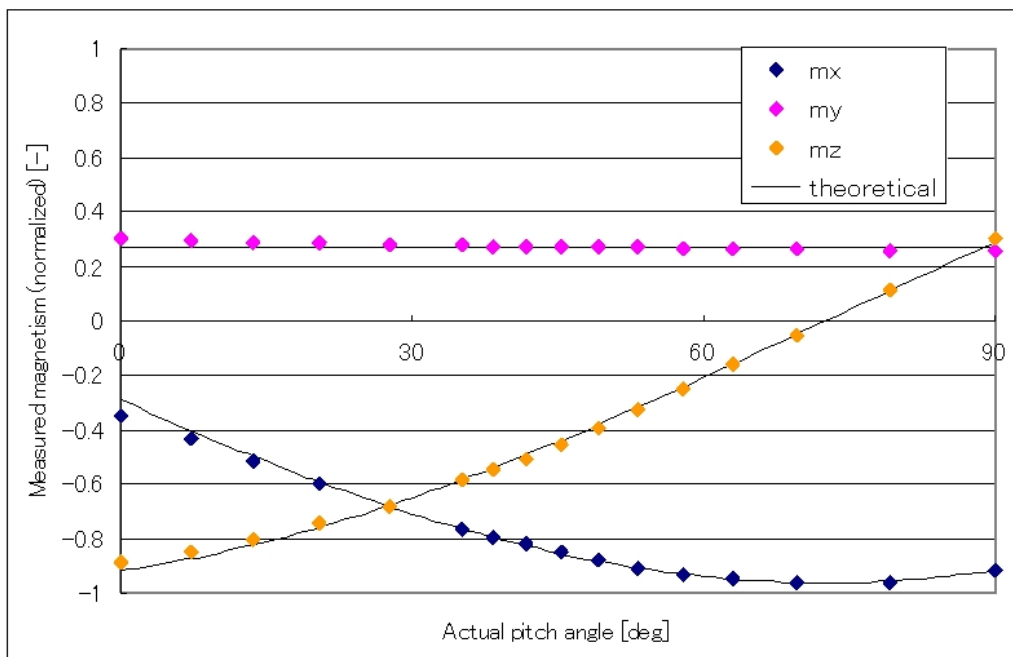


図 3.26 傾き (ピッチ角) に対する磁気計測値 (1 試行). 磁場ベクトルは正規化したものである. 実線は理論曲線 ($\gamma = -136.5^\circ$, $\phi = 66.4^\circ$).

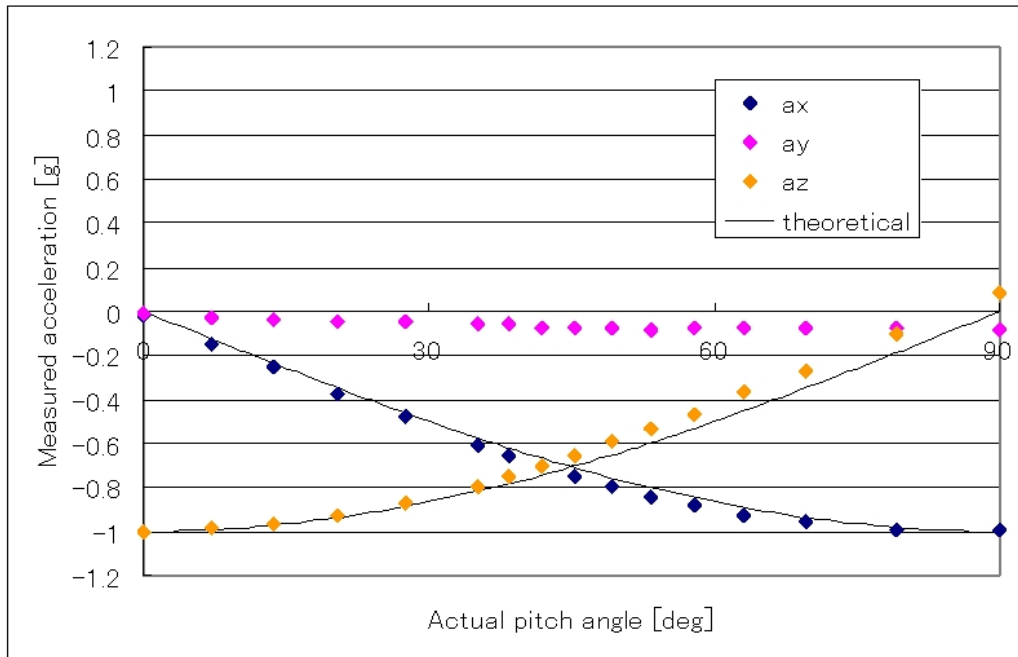


図 3.27 傾き (ピッチ角) に対する加速度計測値 (1 試行). ここで $1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$ である. 実線は理論曲線.

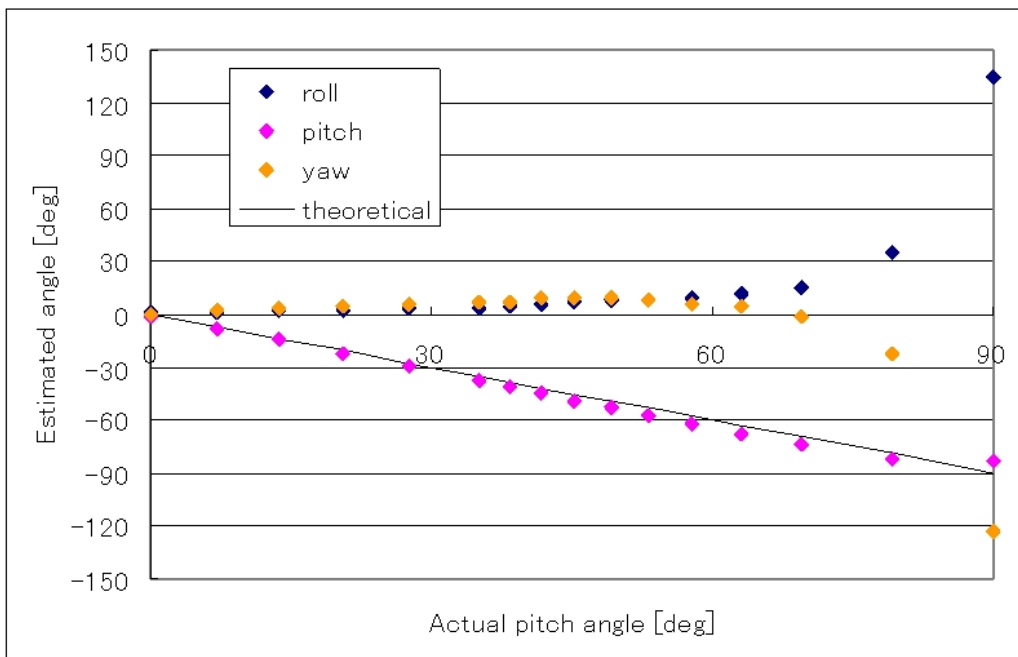


図 3.28 データから求めたリンクのロール角 α , ピッチ角 β , 及びヨー角 γ . 実線は理論曲線. ただし ヨー角 γ については, 理論値が 0 rad になるよう補正をかけた値をプロットした. $\theta = 90^\circ$ に近づくとロール角の推定誤差が大きくなるが, その分はヨー角によって補われる. これは, 採用した姿勢表現法に起因する性質である.

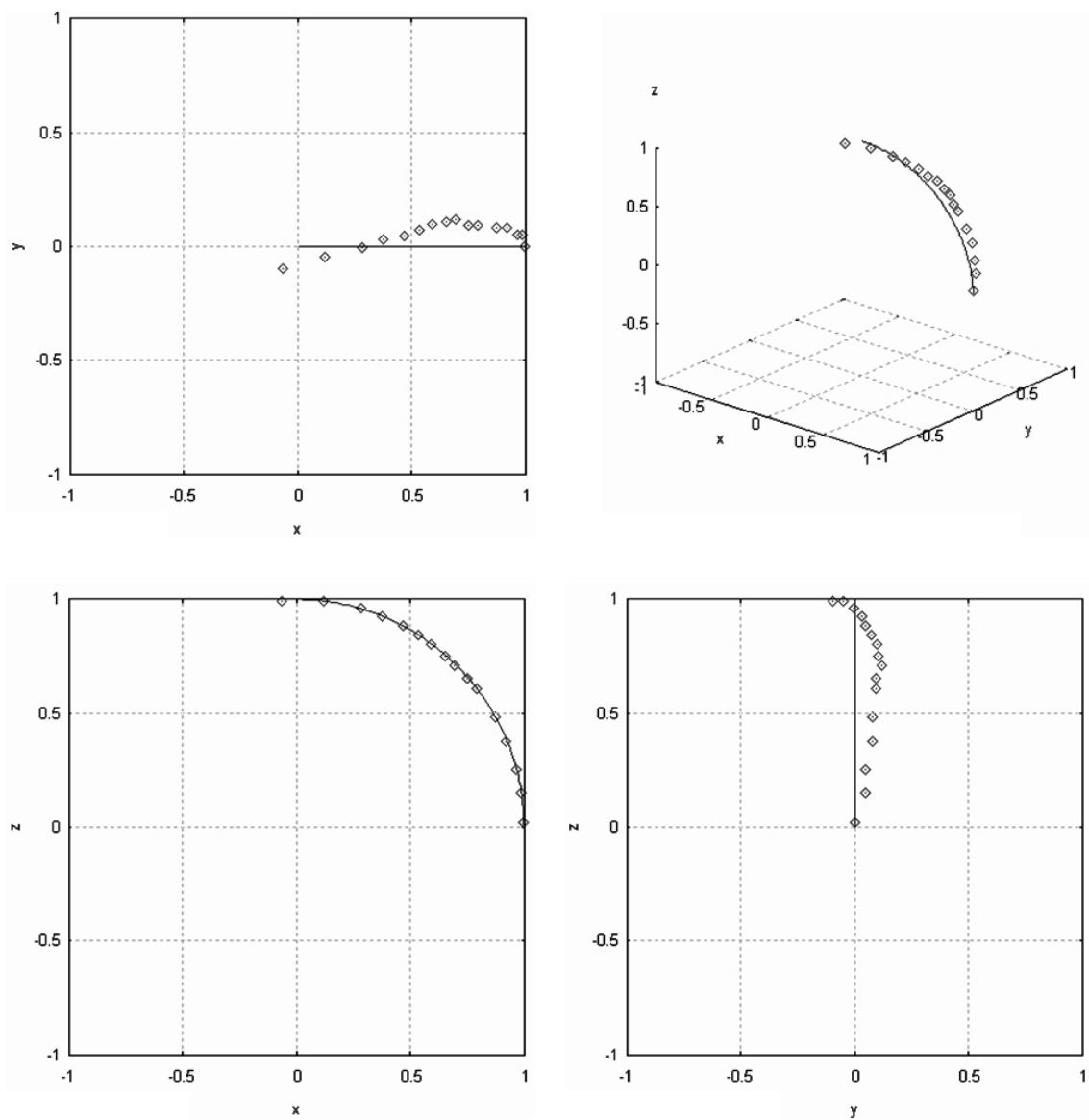


図 3.29 データから求めたリンクの先端位置座標. 実線は理論曲線.

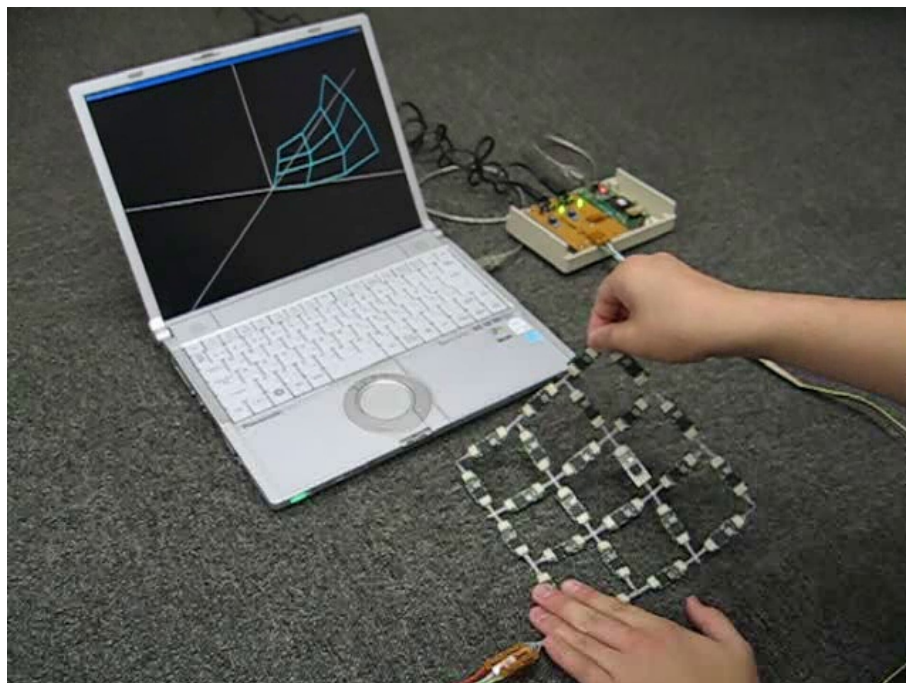


図 3.30 動作実験 1. めくり上げた場合.

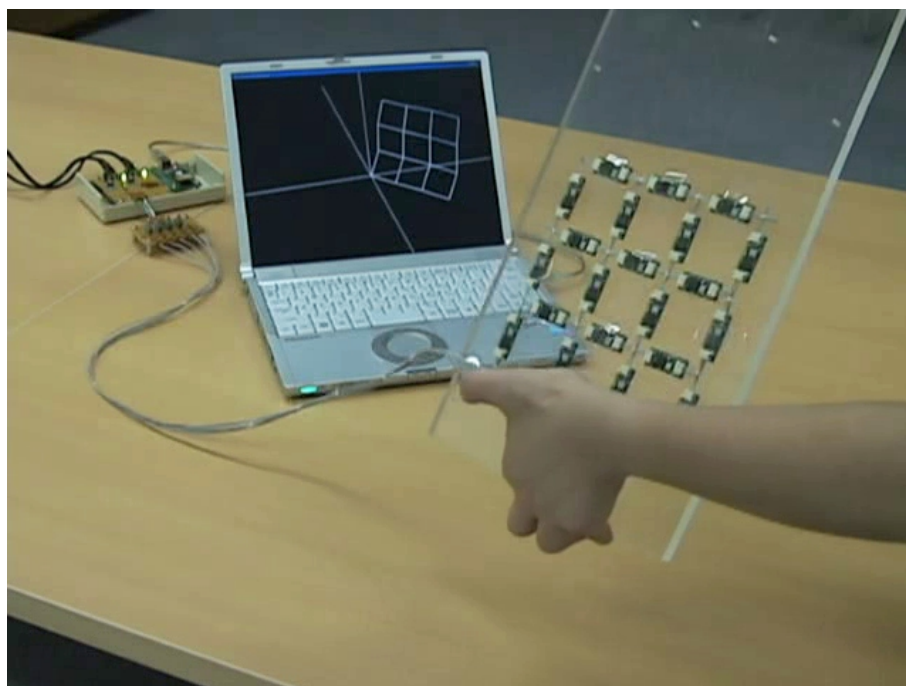


図 3.31 動作実験 2. 平面の場合.

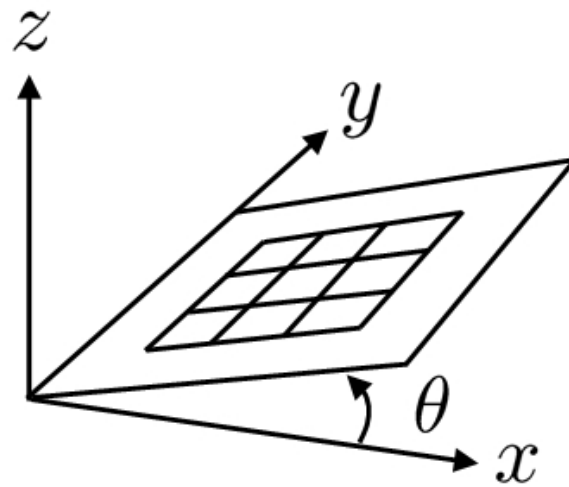


図 3.32 傾き (ピッチ角) θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) に対する試作機の誤差を確認する実験.

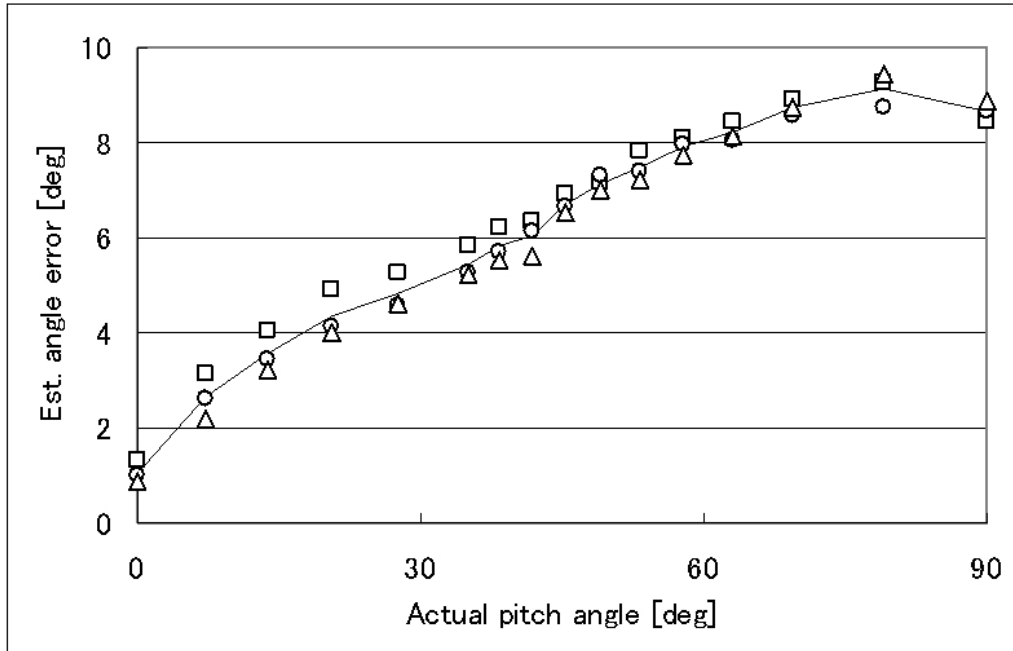


図 3.33 傾き (ピッチ角) θ の推定誤差. 3 試行のデータと平均 (実線). 平均 6° 程度の角度誤差があった.

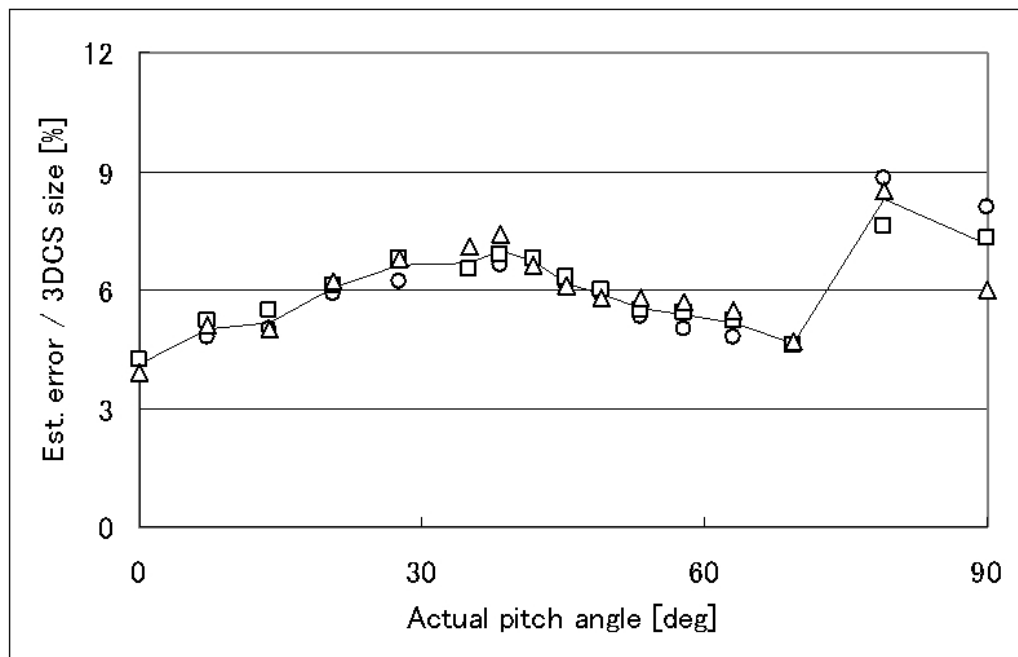


図 3.34 格子点の平面形状からの誤差. 3 試行のデータと平均 (実線). 平均 $\varepsilon = 6\%$ (10 mm) 程度の位置誤差があった.

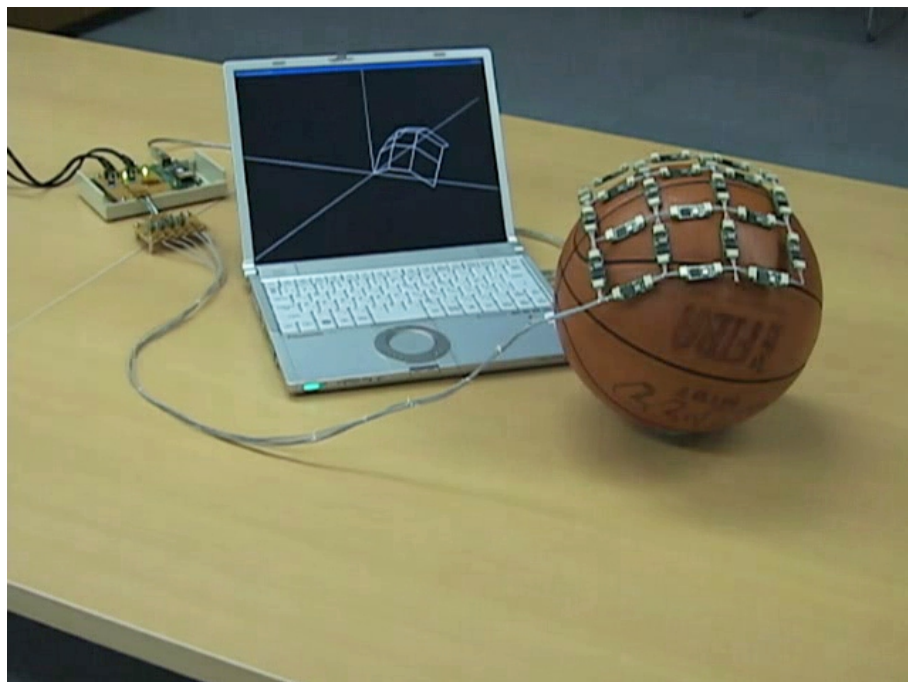


図 3.35 動作実験 3. 球面の場合.

3.5 本章のまとめ

重力と地磁気にもとづく形状計測法を提案した。これら2つを合わせて用いることにより、各リンクの全ての姿勢角が直接求められる。解が一意に定まらないのは、加速度データか磁気データの片方もしくは両方が零ベクトルになるか、それらが平行な場合である。また格子構造の全体形状を再構成する問題が、変数と同程度の冗長自由度を持つことを明らかにした。その冗長性を利用してノイズの影響を低減できることも述べた。シミュレーションにより、提案するアルゴリズムでシート形状の再構成が可能であることを確認した。リンク長のランダムな変化に関して、シートのとりうる形状と許容できる値の関係を明らかにした。リンク長2 cmのシートを標準偏差10 cmのガウシアン形状に被せる場合には12%程度まで許容できた。外乱磁場の影響を低減するため、問題の冗長性を利用する方法の有効性も示した。直径10 cm、電流1 Aのループコイルを2 cmまで近づけても問題なく再構成が可能であった。またランダムノイズの影響も調べ、重力の8%程度、地磁気の水平成分の25%程度まで許容されることがわかった。市販の6軸センサとマイコンを用いてセンサチップを構成し、3×3の試作機を作成した。角度誤差は6°程度、位置誤差は10 mm程度であった。

今回の試作機にはいくつか課題が残されている。まず各センサチップのサイズが大きい点である。6軸センサは $5.2 \times 6.0 \text{ mm}^2$ と小型であるのに、I²C通信用のマイコン($8.0 \times 8.0 \text{ mm}^2$)と配線接続用のコネクタ($6.5 \times 7.5 \text{ mm}^2$)のために基板全体は14倍の面積になってしまっている。これほどの大きさがあると基板自体がリンクの役割も果たす必要がある。通信用のワイヤがセンサチップ間の物理的な接続も兼ねているので、構造的に弱いものとなっている。また6軸センサ、マイコンのリセット回路に不具合があり、動作の安定性に欠けている。今後、より小型で安定に動くセンサチップを作成し、実用に近いデバイスを開発する。さらに二次元通信の導入も視野に入れ、布上への高密度実装を目指す。

第 4 章

重力のみを利用する方法

第 3 章において重力と地磁気にもとづく形状再構成が、変数に対して 2 倍の式を有する冗長な問題であることを明らかにした。本章ではその冗長分を省くことにより、使用するセンサの数や種類を削減することを考える。この場合、センサのコストを抑える代わりに耐ノイズ性が犠牲になる。つまり冗長自由度がないのでノイズのエネルギーを低減することができず、そのまま影響を受けることになる。一例として、重力のみにもとづく再構成法を試みる。重力はヨー角に関する情報を含まないため、格子構造に拘束条件を追加することでそれを補う。以下、その方法について説明し、シミュレーションと試作機によって検証する。

4.1 自由度の削減

4.1.1 最少リンク数

シート形状を再構成するために必要な最少のリンク数を、自由度の観点から導出する。3.2.1 節で述べたように $N \times N$ (N は一辺をなすリンクの本数) の格子構造において、変数の個数は原点を除いた格子点の位置座標 $3N(N+2)$ 個である。三軸加速度、三軸磁気センサを搭載したリンクには 3 自由度 (姿勢角 2, リンク長 1) が割り振られるので、変数の個数を 3 で割ると $N(N+2)$ 。つまりセンサを搭載したリンクが $N(N+2)$ 本あれば形状再構成が可能であろうと予測される。実際、例えば図 4.1 のような構造が考えられる。このとき変数の個数と式の本数の比は $\mu = 1$ である。

また図の点線部分に対してセンサを搭載しないリンクを配置することは、リンク長に関する自由度を N^2 だけ増やすことに当たり、そのとき $\mu = 3N(N+2)/\{3N(N+2) + N^2\} \rightarrow 3/4$ ($N \rightarrow \infty$) に改善する。

4.1.2 重力のみを利用

自由度の削減の仕方には、リンクに搭載するセンサの種類を減らす方法もありうる。すなわち加速度センサもしくは磁気センサのどちらかのみを用いて、センサに関するコストを半

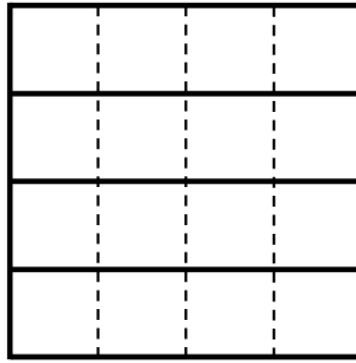


図 4.1 必要最小限のリンク配置 ($N = 4$ の場合). 実線のリンクに三軸加速度, 三軸磁気センサを搭載し, 点線の部分にはリンクもセンサも配置しない.

分にするのである. ここでは重力と地磁気のうち, より安定して一様性が保たれるソースとして重力を採用する. 地磁気は磁石や強磁性体などによって乱されやすいが, 重力はデバイスを動かささえしなければ保たれるからである. また動かしたとしても人間の日常動作はそれほど大きな運動加速度を生じず, 持続時間も長くないので, ローパスフィルタでほぼ除去することができる. もちろん地磁気の方が安定している状況においては磁気センサを用いてもよく, これから述べる内容の「重力」を「地磁気」と読み替えればよい.

重力からは, 姿勢角のうちロール角 α とピッチ角 β しか得られない (詳細は 4.2.2 節). よって形状再構成の際, 各リンクには 2 自由度 (姿勢角 1, リンク長 1) が割り振られる. このとき $N \times N$ 格子構造において $\mu = 3N(N+2)/4N(N+1) \rightarrow 3/4$ ($N \rightarrow \infty$) となる.

一度に扱う変数の個数を少なく抑えるため, 単格子 ($N = 1$) について考えたい. このとき上式の値は $\mu = 9/8$ となり, 解を一意に定めるためには式の数足りないことがわかる. これに対して, 本論文では格子構造に拘束条件を課すことにより式の本数を増やす方針を採用. それは基準リンクからそれ以外のリンクへの相対ヨー角 γ と α, β を関係付けるものであり, 式が 3 本追加される. その結果 $\mu = 9/11$ となり, 解が一意に決まることが期待できる. 本章では以下, この単格子に着目する方法について説明する.

4.2 原理

4.2.1 問題設定

第 3 章の問題設定と異なるのは, 三軸磁気センサを用いない点と, リンクの中心軸回りの回転を拘束する点の 2 点である.

位置によらず一様な重力場を仮定する. すなわち $\mathbf{g}(\mathbf{p}) = \mathbf{g}$ (一定). $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ は三次元空間中の一点である. ワールド座標は, z 軸が \mathbf{g} と平行, 逆向きになるよう設定されている. 三次元キャプチャシートは長さ l [m] の剛体リンクによって離散化されており, 各リンクには

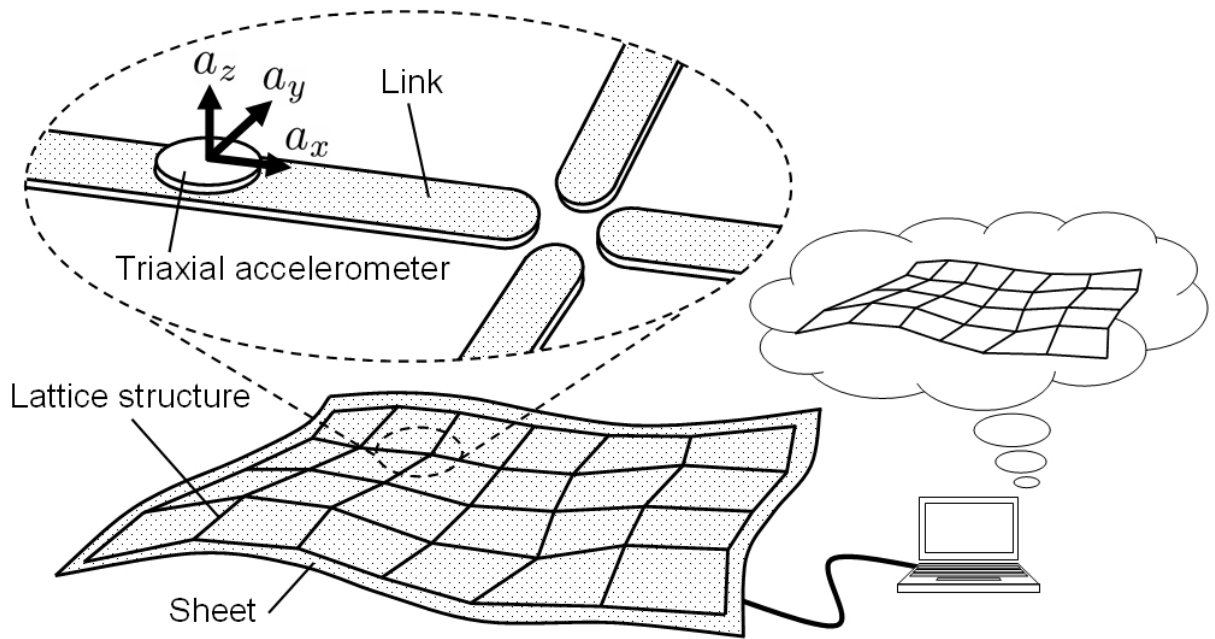


図 4.2 重力にもとづく三次元キャプチャシートの模式図. 各リンクには三軸加速度センサが搭載されている. a_x 軸はリンクと平行になるよう配置されている. また a_z 軸がいつでもシートの法線方向と一致するようにリンクを固定する.

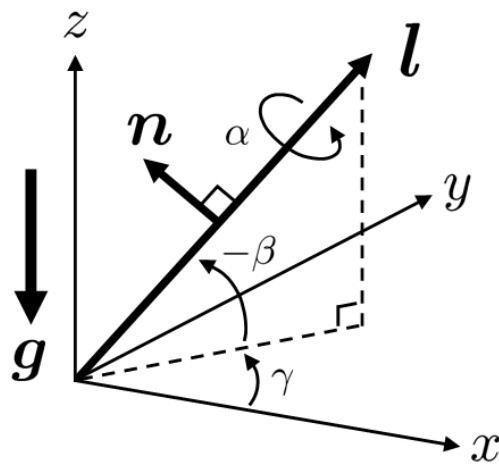


図 4.3 リンクの姿勢角. ワールド座標の x, y, z 軸回りの回転角度をそれぞれロール角 α , ピッチ角 β , ヨー角 γ といい, この順に回転したものとしてリンクの姿勢を記述する. z 軸は重力ベクトル g と平行になるよう設定されている. l はリンクの方向ベクトル, n は法線ベクトル (シートの法線方向と一致).

三軸加速度センサが搭載されている (図 4.2). a_x 軸がリンクの中心軸方向と一致するように配置されている. さらに a_z 軸が常にシートの法線方向と一致するよう, リンクの中心軸回りの回転を拘束する. また初期状態において, センサ座標 $\{a_x, a_y, a_z\}$ とワールド座標 $\{x, y, z\}$ の各軸は一致しているものとする. リンクの三次元空間中での姿勢はロール角 α [rad], ピッチ角 β [rad], ヨー角 γ [rad] ($-\pi \leq \alpha < \pi$, $-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2$, and $-\pi \leq \gamma < \pi$) で記述される (図 4.3). ワールド座標からセンサ座標への回転行列 \mathbf{G} は, リンクの姿勢角を用いて次のように書かれる. ここで s, c はそれぞれ \sin, \cos の省略形である.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで姿勢角 α, β, γ が未知パラメータである. またリンクを方向ベクトル \mathbf{l} で表す. 中心軸方向がセンサの x 軸方向と一致しているので, ワールド座標の x 軸方向単位ベクトル $\mathbf{e}_x = [1, 0, 0]^T$ に回転行列 \mathbf{G} をかけて l 倍したものとして以下のように定義する.

$$\mathbf{l} \equiv l \mathbf{G} \mathbf{e}_x = l \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ s\gamma c\beta \\ -s\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

すべてのリンクについて方向ベクトル \mathbf{l} が得られれば, それらを連結することでシートの全体形状が再構成される. \mathbf{l} に含まれている未知数は β, γ であり, 形状再構成はこれら 2 つの姿勢角を求める問題に帰着する.

さらに後に利用するため, シートの法線ベクトル \mathbf{n} を次のように定義する. シート法線方向はセンサの z 軸方向と一致しているので, ワールド座標の z 軸方向単位ベクトル $\mathbf{e}_z = [0, 0, 1]^T$ に回転行列 \mathbf{G} をかけたものとして以下のように書かれる.

$$\mathbf{n} \equiv \mathbf{G} \mathbf{e}_z = \begin{bmatrix} c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.2.2 再構成法

提案手法は, センサデータから直接求めるロール角及びピッチ角と, 格子構造に課した拘束条件から求めるヨー角の二段階に分かれている. 以下, それらを順に説明する.

ロール角及びピッチ角

これらの角度は, 加速度データから解析的に求めることができる. リンクが三次元空間中で回転したときのセンサデータ \mathbf{a} は, 重力ベクトルを $\mathbf{g} = g [0, 0, -1]^T$ として以下のように表される. ここで g [m/s²] は重力加速度 (東京で 9.8 m/s² 程度 [94]) を表す.

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}^T \mathbf{g} = -g \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

これを解くことで重力加速度 g と、ロール角 α 及びピッチ角 β が得られる。再構成に不要な g は、規格化によって無視してもよいし、静止状態の判定などに用いることもできる [84]。具体的な解き方は、例えば \mathbf{a} の各成分を用いて以下のように書かれる。 $\text{atan2}(y, x)$ は y/x の逆正接を $[-\pi, \pi]$ の範囲で返す C 言語標準ライブラリ関数である。ここで $\text{atan2}(0, 0) \equiv 0 \text{ rad}$ とする。

$$\alpha = \text{atan2}\left(-a_y, -a_z\right) \quad (4.5)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}\right) \quad (4.6)$$

ヨ一角

式 (4.4) に γ が含まれないことからわかるように、この角度は重力からは決定できない。加速度センサによる人体モーションキャプチャ [67, 68] の研究でも、ヨ一角 γ に関しては磁気センサを併用して地磁気にもとづいて求めている。本章では地磁気を使わず、格子構造に課した拘束条件からリンク間の相対的なヨ一角を求める方法を採用。ここでリンク 4 本がなす格子 1 つ (単位格子) に注目する。

まず第 3 章と同様、リンクの方向ベクトル \mathbf{l}_i (i はリンクを区別する添え字) について考える。単位格子は閉ループをなしているため (図 4.4), リンク $3 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ をたどる経路とリンク 2 は一致するはずである。したがって次式が成り立つ。

$$-\mathbf{l}_3 + \mathbf{l}_0 + \mathbf{l}_1 = \mathbf{l}_2 \quad (4.7)$$

式 (4.2) からわかるように γ は方向ベクトルの x, y 成分にのみ含まれており、したがって式 (4.7) は γ_i に関する 2 本の式である。これだけでは式の本数が足りないため、法線ベクトル \mathbf{n}_i に関して成り立つ式を導入する。単位格子の変形 (図 4.5) のみによってシートが変形し、 \mathbf{n}_i に関する次式が成り立つと仮定する。

$$\mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_3 \quad (4.8)$$

実際には隣り合った単位格子が共有するリンク回りに折れ曲がるシート変形もあるが、なだらかに湾曲する曲面上にシートを載せたときにはこの仮定が近似的に成り立つ。これもまた式 (4.3) からわかるように γ_i に関する 2 本の式である。

式 (4.7), (4.8) を解くことでヨ一角 γ_i が求められる。ただし、式 (4.7), (4.8) は不良設定問題である (重力のみからは絶対的なヨ一角は得られないという事実より)。そこで、4 つの γ_i のうち少なくとも 1 つを定数として固定し、他の 3 つをそれに対する相対的な値として求めることにする。これは再構成された形状について、形状全体の z 軸回りの回転に任意性が残ることを意味している。式 (4.7), (4.8) を解くため、次のような最小化問題に書き換えることを考える。

$$P_{ln} \equiv \sum_{j \in \{x, y, z\}} \left\{ (l_{0j} + l_{1j} - l_{2j} - l_{3j})^2 + (n_{0j} - n_{1j} + n_{2j} - n_{3j})^2 \right\} \rightarrow \min. \quad (4.9)$$

ここで j はベクトルの成分を表す添え字である。もし P_{ln} の最小値がゼロとなるような解があれば、それは式 (4.7), (4.8) の解でもある。ゼロとならない場合は最小自乗解が得られる。

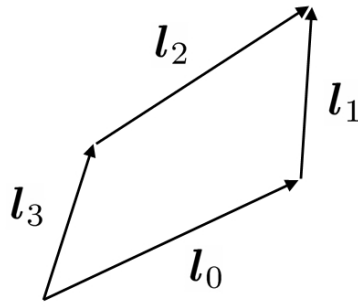


図 4.4 閉ループ条件. リンク 3 → 0 → 1 をたどる経路とリンク 2 が一致する.

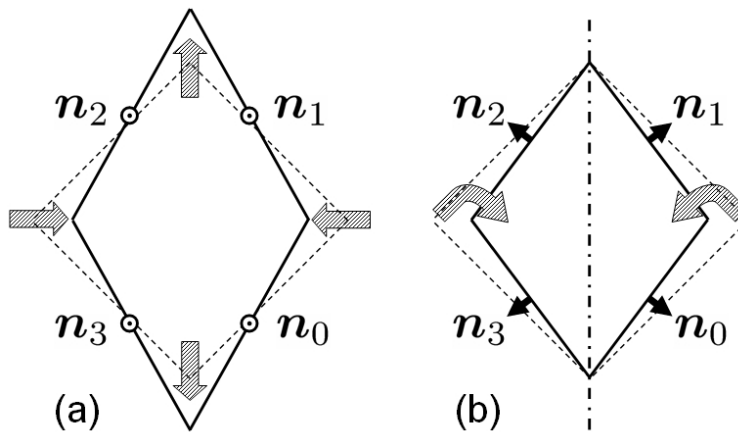


図 4.5 法線ベクトルについての条件. シートが変形するとき, 単位格子は (a) 菱形になるか (b) 折り曲げられるかの 2 種類の変形しかしないと仮定する.

4.2.3 解の唯一性

式 (4.7), (4.8) の解が一意に定まらない場合を特異値分解 [95] によって調べる. γ_i が含まれている x, y 成分を抜き出し, 整理して行列に書き換えると次のようになる.

$$\begin{bmatrix} -c\beta_1 & 0 & c\beta_2 & 0 & c\beta_3 & 0 \\ 0 & -c\beta_1 & 0 & c\beta_2 & 0 & c\beta_3 \\ s\beta_1 c\alpha_1 & s\alpha_1 & -s\beta_2 c\alpha_2 & -s\alpha_2 & s\beta_3 c\alpha_3 & s\alpha_3 \\ -s\alpha_1 & s\beta_1 c\alpha_1 & s\alpha_2 & -s\beta_2 c\alpha_2 & -s\alpha_3 & s\beta_3 c\alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\gamma_1 \\ s\gamma_1 \\ c\gamma_2 \\ s\gamma_2 \\ c\gamma_3 \\ s\gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\gamma_0 c\beta_0 \\ s\gamma_0 c\beta_0 \\ c\gamma_0 s\beta_0 c\alpha_0 + s\gamma_0 s\alpha_0 \\ s\gamma_0 s\beta_0 c\alpha_0 - c\gamma_0 s\alpha_0 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

γ_0 は基準となる固定値であり, γ_i ($i = 1, 2, 3$) は γ_0 に対する相対値として得られる. 係数行列の非零特異値が 3 個未満 (劣決定問題) のとき, 格子の形状は一意に定まらない. この 3

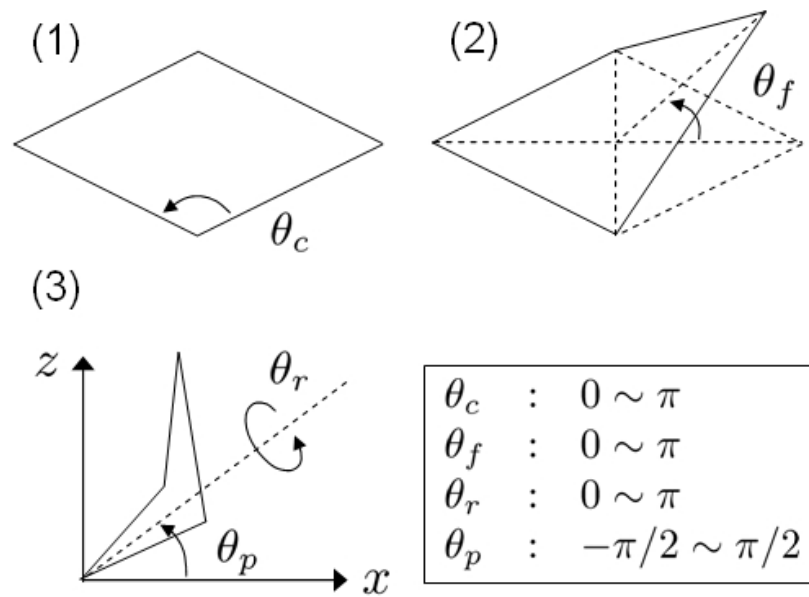


図 4.6 単位格子モデルの生成. コーナー (corner) 角 θ_c , 折れ (fold) 角 θ_f , ロール (roll) 角 θ_r , ピッチ (pitch) 角 θ_p を変えて, 様々な姿勢・形状の単位格子を生成した.

個という値は最も未知パラメータが多い場合 (1 個目の単位格子) についてのものである. すでに他の単位格子について解いた結果, 基準以外の γ_i が得られている場合はそのまま固定値として扱うため, 非零特異値の個数がその分少なくともよい.

図 4.6 のように 4 変数をそれぞれ 20 段階で変化させてモデルを生成し, 係数行列の特異値を計算した [95]. 図 4.7 に劣決定となる $(\theta_c, \theta_f, \theta_r, \theta_p)$ をプロットした. 最大特異値に対する第三特異値の比が 0.1 未満 ($\lambda_3/\lambda_1 < 0.1$) となることを劣決定とみなした. 図 4.7 から, 劣決定となる条件は

1. 単位格子をなす全てのリンクが水平面上にある場合
2. 単位格子が完全に潰れる場合

のどちらかに含まれることがわかる. 実際の格子構造や布を構成する糸には物理的サイズがあるため条件 2 が自然に回避されるので, 結局, 実質的に解が一意に定まらない条件は条件 1 のみとなる.

4.3 シミュレーション

前述の再構成法の有効性を, シミュレーションによって検証した. またセンサデータに加算されるランダムノイズの影響についても調べた.

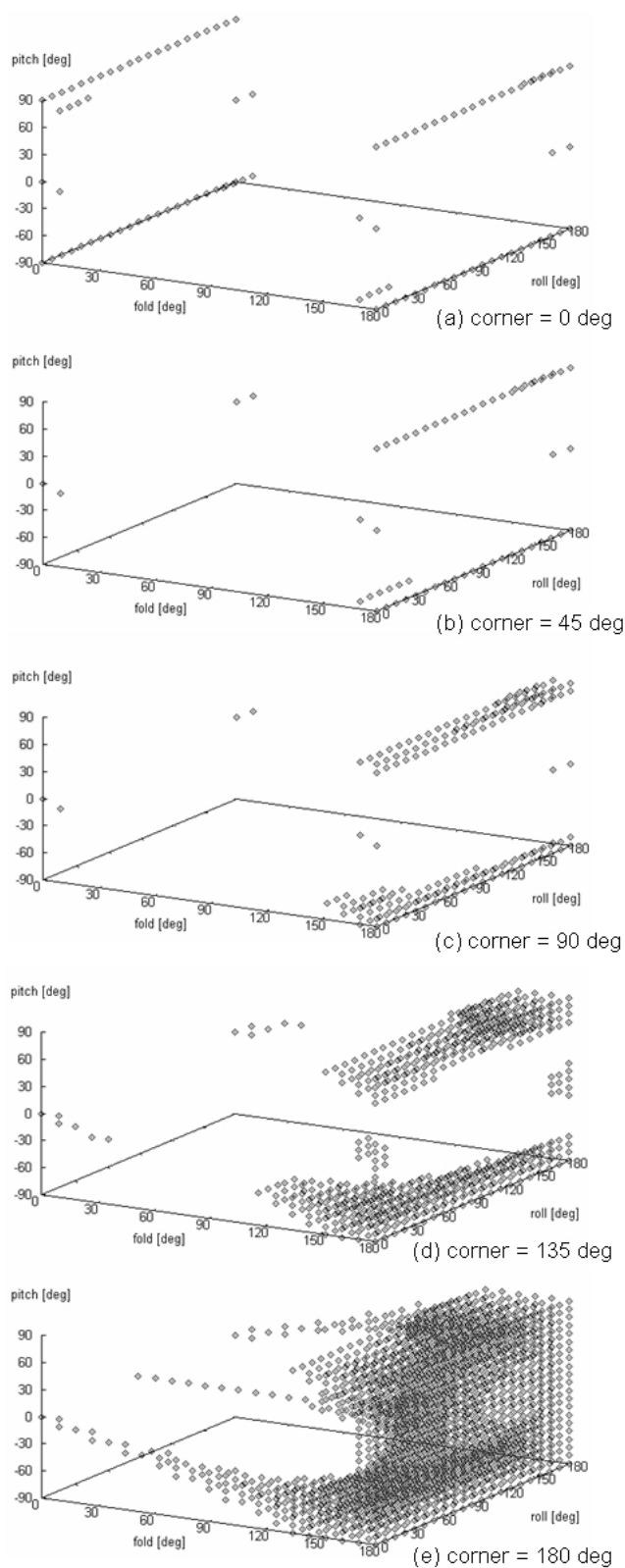


図 4.7 特異値解析の結果. 最大特異値に対する第三特異値の比が 0.1 未満 ($\lambda_3/\lambda_1 < 0.1$) となる $(\theta_c, \theta_f, \theta_r, \theta_p)$ が, 劣決定な場合としてプロットされている. (a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ $\theta_c = 0, 45, 90, 135, 180^\circ$ のときの結果を表す. ある限られた条件のとき以外は解が一意に定まる (劣決定ではない) ことが分かる.

4.3.1 モデル生成と計算法

三次元キャプチャシートのモデルとして 13×13 の格子構造を用いた。各リンクは太さ無限小の剛体とし、格子点まわりに自由に回転できるようにした。そのモデルを仮想物体の上に被せ、モデル形状とした。被せる操作は反復計算によって行い、各リンクの姿勢から加速度センサの出力を計算した。得られたセンサデータを用いて、形状を再構成した。モデル形状と再構成形状を最小自乗法で重ね合わせた後、対応する格子点間の距離のうち最大のものを推定誤差として誤差評価を行った。この一連のシミュレーションについて、モデルと計算法の詳細を以下に述べる。第3章と異なるのは、 $\mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ の与え方と、磁気データを求めない点である。

* * * * *

まず、再構成の対象となるモデル形状を生成する。格子構造は、格子点を質量 m [kg] の質点、リンクを長さ l 、バネ定数 k [N/m] のバネとしてモデル化した (第3章, 図 3.5 参照)。このとき格子点に関する運動方程式は以下のように書かれる。 ∂_t は時間 t [s] に関する一階微分を表す。

$$m \partial_t^2 \mathbf{p}_0 = m \mathbf{g} - c \partial_t \mathbf{p}_0 - \sum_{i=1}^4 k \Delta l_i \frac{\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_i}{|\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_i|} \quad (4.11)$$

ここで \mathbf{p}_0 は注目する格子点の位置座標、右辺第一項は重力、第二項は空気抵抗などの粘性、第三項は4本のバネ (リンク) から受ける力である。 i はバネを介して接続する格子点の番号、 Δl_i [m] はバネの伸びである。本来リンクは剛体なので、 Δl_i が十分小さくなるようバネ定数 k を大きい値に設定する。このモデルを仮想物体に被せる操作は次のように行った。まず仮想物体の上空 ($z = H$ [m]) に格子構造を x - y 平面と平行に配置した。そして次のような更新則 (FB オイラー法) によって式 (4.11) の時間発展を計算し、格子構造を仮想物体に被せた。これは布シミュレーションの研究でも用いられる更新則である [4]。

$$\partial_t \mathbf{p}_0(t + \Delta t) = \partial_t \mathbf{p}_0(t) + \partial_t^2 \mathbf{p}_0(t) \Delta t \quad (4.12)$$

$$\mathbf{p}_0(t + \Delta t) = \mathbf{p}_0(t) + \partial_t \mathbf{p}_0(t + \Delta t) \Delta t \quad (4.13)$$

ここで Δt は時間の刻み幅である。本シミュレーションでは、仮想物体として次のような高さ h [m]、標準偏差 σ [m]、中心座標 (x_c, y_c) のガウシアン形状 $z = f(x, y)$ を用いた。

$$f(x, y) \equiv h \exp \left\{ -\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (4.14)$$

計算で用いた値は、質点の質量 $m = 1$ g, リンク長 $l = 2$ cm, ダンパ定数 $c = 2$ g/s, バネ定数 $k = 500$ N/m, 格子構造を最初に配置する高さ $H = 30$ cm, 時間の刻み幅 $\Delta t = 1$ ms, ガウシアンの高さ $h = 20$ cm, ガウシアンの標準偏差 $\sigma = 10$ cm とした。モデル形状の表面は滑らないものとし、格子点が表面に触れた時点でその格子点についての反復計算を終了した。そのような仮想物体に被せたときのリンク長の変化は $\pm 0.6\%$ (± 0.12 mm) の範囲に収まっていた。これは無視できる程度の変動である。

次に、格子点座標の系列で表されるモデル形状から、出力されるべきセンサデータを求める。図 3.5 のリンク l_i に搭載された三軸加速度、三軸磁気センサの x, y, z 軸方向単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ とする。 \mathbf{X}_i は方向ベクトルと一致するように配置してあるので次のように書ける。

$$\mathbf{X}_i = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0|} \quad (4.15)$$

このベクトルの向きはセンサの取り付け向きに応じて決まる。またシートは完全にモデル形状に沿っており、シートの法線方向（センサの z 軸方向）がモデル形状の法線方向と一致していると仮定して、 $\mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ を次のように定めた。ここで (x_{ci}, y_{ci}) は \mathbf{p}_0 と \mathbf{p}_i の中点（センサ取り付け位置）の (x, y) 座標。厳密にはモデル形状表面にあるのは格子点のみで、リンクはそれらを直線補間するものなので、この \mathbf{Z}_i は近似的なものである。

$$\mathbf{Z}_i = \frac{1}{\sqrt{\{\partial_x f(x_{ci}, y_{ci})\}^2 + \{\partial_y f(x_{ci}, y_{ci})\}^2 + 1}} \begin{bmatrix} -\partial_x f(x_{ci}, y_{ci}) \\ -\partial_y f(x_{ci}, y_{ci}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{Z}_i \times \mathbf{X}_i \quad (4.17)$$

そして、次のようにセンサの各軸方向単位ベクトルと重力ベクトル \mathbf{g} の内積をとることでセンサデータ \mathbf{a}_i を得た。

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{g} \\ \mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{g} \\ \mathbf{Z}_i \cdot \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

最後に、モデル形状から得られたセンサデータを用いて、提案手法による形状再構成を行う。まず式 (4.5), (4.6) を用いて姿勢角 α_i, β_i を計算した。次に γ_i を求めるため、式 (4.9) を共役勾配法 [95] によって解いた。得られた姿勢角 β_i, γ_i と既知のリンク長 l を用いて、適当な座標を基準点とする再構成形状の格子点位置 \mathbf{p}'_i を求め、それを結果とした。

またモデル形状からの再構成形状の誤差を評価するため、推定誤差を定義する。問題の性質上、たとえほとんどの格子点が正しく再構成されていたとしても、1点でも大きく間違っていれば全体も本来の形状と大きく異なるものとなる。それを踏まえて本論文では、推定誤差として対応する格子点間の距離のうち最大のものを採用した。具体的には以下で述べるように計算した。まずモデル形状と再構成形状を次のような最小自乗法によって重ね合わせた。

$$Q \equiv \sum_i \{\mathbf{p}_i - \mathbf{R}(\mathbf{p}'_i + \mathbf{r})\}^2 \rightarrow \min. \quad (4.19)$$

これは再構成形状をベクトル \mathbf{r} だけ平行移動し、回転行列 \mathbf{R} で回転させる操作である。この6変数最小化問題を共役勾配法 [95] によって解いた。そうやって重ね合わせた再構成形状の格子点を \mathbf{p}''_i として、推定誤差 ε を次のように計算した。

$$\varepsilon \equiv \frac{1}{Nl} \max_i |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}''_i| \quad (4.20)$$

Nl は $N \times N$ 格子構造の一辺の長さである。この ε がゼロに近ければ近いほど、再構成が精度よく行われたことを表す。

4.3.2 ノイズなしの場合

最初にノイズなしの場合に前述のアルゴリズムで形状が再構成できることを確認した。図 4.8 にシミュレーション結果を示す。ガウシアン形状が再構成できていることがわかる。

4.3.3 センサデータにランダムノイズが含まれる場合

ノイズありの場合を考える。要因としては、センサの熱雑音やドリフト、取り付け誤差、リンク長の誤差や変化、式 (4.8) の法線条件に適合しない格子の変形、などがある。このうちセンサデータに重畳する熱雑音の影響について、様々な S/N 比での提案手法の安定性を調べた。ノイズ n_a [m/s²] を以下の式に従ってメルセンヌツイスター [96] で生成し、センサデータの各成分に加えた。rand[q_1, q_2] は区間 [q_1, q_2] から選んだランダムな実数値を返す関数とする。ノイズレベル ν_a は重力 g に対する比率である。

$$n_a \equiv \nu_a g \times \text{rand}[-1, 1] \quad (4.21)$$

各ノイズレベルに対して 10 試行ずつ行った。図 4.9 に推定誤差 ε をプロットしたものを示す。再構成結果を観察したところ、推定誤差が $\varepsilon = 15\%$ を超えると、再構成結果が大きく崩れているように見えた。図 4.9 によると、推定誤差が $\varepsilon = 15\%$ を超えはじめるのはノイズレベルが $\nu_a = 5\%$ (加速度換算 0.5 m/s² 程度) より大きいときである。よって、ノイズレベルが $\nu_a = 5\%$ 以下ならば三次元キャプチャシートの安定動作が期待できる。これは実際のデバイスにおいても達成可能な値である。再構成が成功した場合と失敗した場合の代表的な例を図 4.10 に示す。

4.4 試作

4.3 節のシミュレーションにより提案手法が有効であることが示されたので、三次元キャプチャシートの試作機を作成した。現段階ではまだ二次元通信を用いず、ワイヤで給電及び通信を行うものとした。センサチップには市販の三軸加速度センサとマイコンを搭載した。なお、この内容は尾崎沙世 氏の卒業研究 [97] の成果である。

4.4.1 システム構成

図 4.11 にシステム構成を示す。各センサチップは重力を計測し、そのセンサデータにもとづいてシート形状が再構成される。I²C 通信は 2 線式 (SDA, SCL) のバス通信プロトコルであり、異なるアドレスを割り振られた複数のセンサチップを同一バス上に接続することができる。アドレスは 7 bit (または 10 bit) で設定可能である。USB-to-I²C (SB Solutions, Inc.) は、I²C バスに PC をマスタとして接続する機能を持つ回路である。PC はこれを介してセンサチップに呼びかけ、それに応じて送られてきたデータを取り込む。

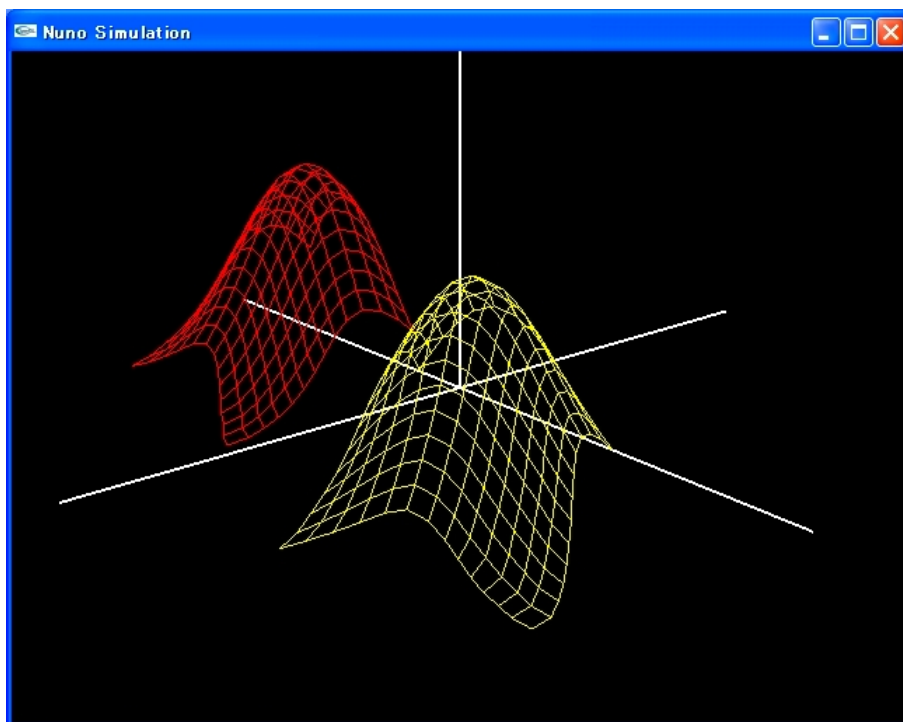


図 4.8 ノイズなしの結果. 奥側がモデル形状 $\{p_i\}$, 手前側が再構成形状 $\{p'_i\}$.

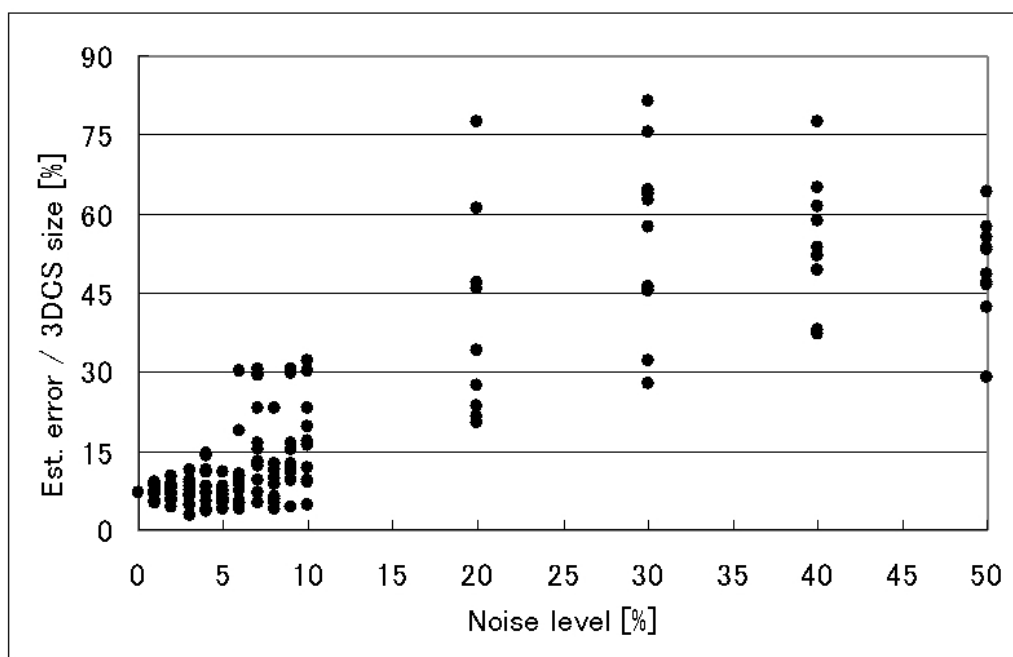
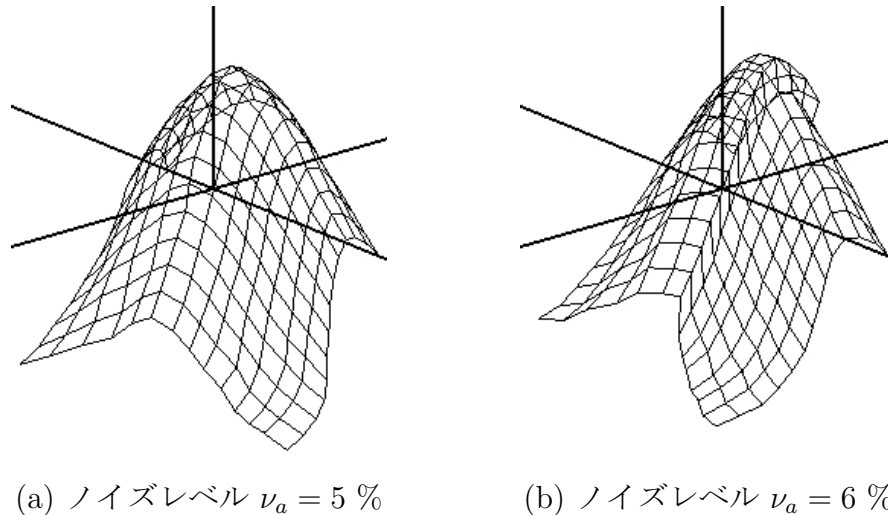


図 4.9 ノイズありの場合の推定誤差. 10 試行の推定誤差をプロットしている. ノイズレベルは重力に対する比率で表されている. 推定誤差が $\varepsilon = 15\%$ を超えると再構成結果が大きく崩れる. ノイズ $\nu_a = 0\%$ における推定誤差は, 法線ベクトル \mathbf{n} のモデル化誤差によるものと思われる.



(a) ノイズレベル $\nu_a = 5\%$ (b) ノイズレベル $\nu_a = 6\%$

図 4.10 再構成が成功した場合 (a) と失敗した場合 (b).

試作したセンサチップを図 4.12 に示す. 三軸加速度センサ (AGS61231, $4.6 \times 4.6 \times 1.3 \text{ mm}^3$, Matsushita Electric Works, Ltd.) と, そのアナログ出力を 10 bit A/D 変換するマイコン (R8C/16, $6.4 \times 6.5 \times 1.45 \text{ mm}^3$, Renesas Technology) を搭載している. 加速度センサはピエゾ抵抗型であり, 公称感度は電源電圧 3 V のとき 0.5 V/g である. ここで g は重力加速度の大きさを表している. マイコンは I²C バス通信機能を持ち, デジタル化されたセンサデータを PC へ送信する. また 8 MHz クロックを内蔵している. センサチップの大きさは幅 14 mm, 長さ 38 mm であり, リンクの役割も果たす.

このセンサチップを用いて, 試作機を製作した (図 4.13). 一辺 60 cm の布に長さ 10 cm のリンク (真鍮パイプ, 直径 2 mm, 内径 1 mm) で 4×4 格子を構成し, その内部の 2×2 にセンサチップを 12 個配置した. それらからセンサデータを受信し, 共役勾配法 [95] によって式 (4.9) の最小化問題を解き, 再構成結果をディスプレイに表示した. 計算には過去 5 サンプルの平均を用いた. システム全体の実効的なサンプリングレートは 58 Hz であった.

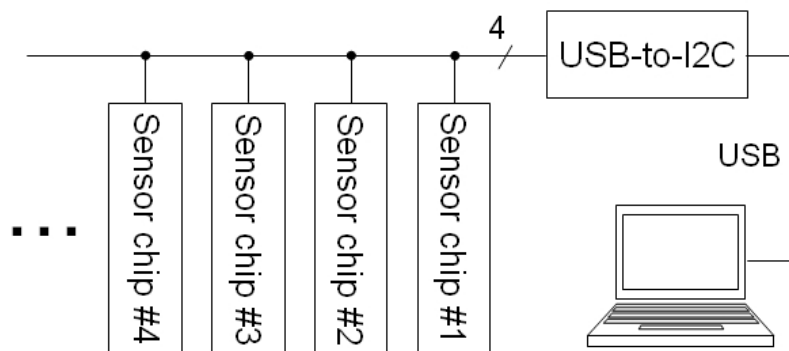


図 4.11 システムの構成. 4 本のワイヤは電源, GND, 信号, クロックである.

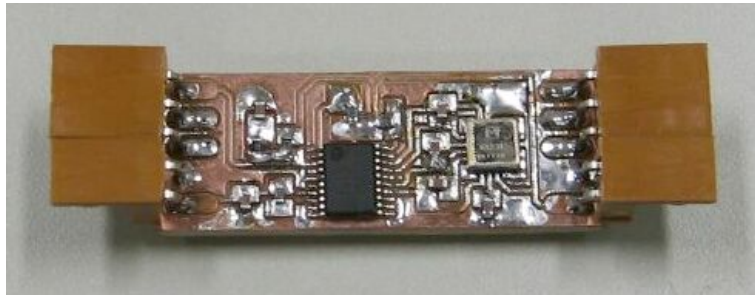


図 4.12 試作したセンサチップ。中央のマイコンが、右側の三軸加速度センサのアナログ出力を A/D 変換し、I²C バス通信によってそのデータを PC へ送信する。チップのサイズは 14×38 mm²。

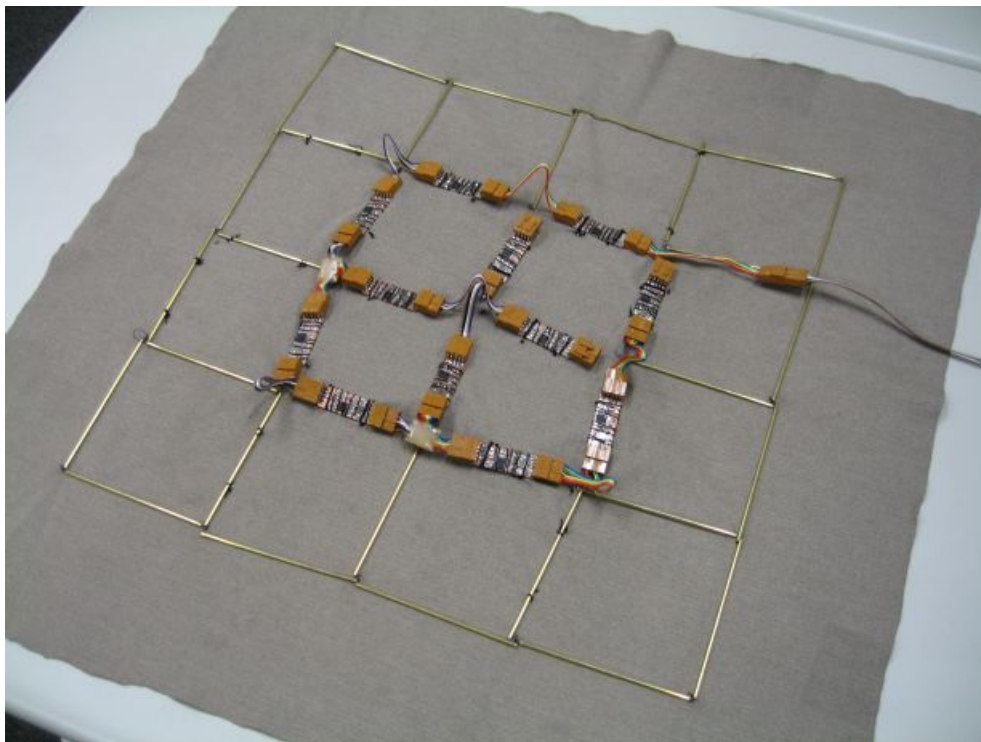


図 4.13 重力にもとづく三次元キャプチャシートの試作機。12 個のセンサチップが中央に配置されている。チップ間には電源 (VDD)、GND、信号 (SDA)、クロック (SCL) の 4 本のワイヤが張られ、一箇所から PC へ繋がっている。

4.4.2 動作実験

センサチップの特性

試作した 12 個のセンサチップについて、加速度に対する出力を確認した。図 4.14 のようにチップを傾け、各角度でデジタル出力から計算された加速度を記録した。各センサチップについて 1 試行ずつ行った結果を図 4.15 に示す。全てほぼ正しく動作しており、データのばらつきの幅は最大 (重力加速度と比較して) 12 % 程度であった。その原因としてはセンサの熱雑音、オフセットの誤差またはドリフト、基板への取り付け誤差、手動で実験を行ったためのばらつきなどが考えられる。また、そのデータから求めたロール角 α 及びピッチ角 β を図 4.16 に、リンクの先端位置座標を図 4.17 に示す。

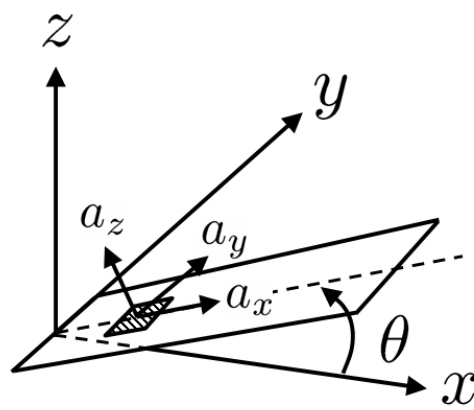


図 4.14 傾き (ピッチ角) θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) に対するセンサチップの出力を確認する実験。

平面の場合

試作機を平面に貼り付け、全体を一様に傾けた場合の動作を確認した (図 4.18)。図から、センサチップを載せた 2×2 の格子が再構成できていることがわかる。

再構成の誤差を定量化するため、次のような実験を行った。図 4.19 に示すように平面に載せたシートの傾き θ [deg] を変化させ、そのときの各格子点の位置座標をデータとして保存した。理論的な平面形状と最小自乗法によって比較し、 θ に関する誤差と、平面形状からの誤差 ε を求めた。3 試行の結果を図 4.20, 4.21 に示す。 $\theta \leq 15^\circ$ のときに誤差が大きいのは、アルゴリズムが水平面に弱いことが原因と考えられる。 $15^\circ < \theta$ においては、角度誤差は絶対値の平均で 5° 程度、平面形状からの誤差は平均 $\varepsilon = 12\%$ (一辺 200 mm に対して 24 mm) 程度であった。またセンサデータのゆらぎ (ランダムノイズ) による位置誤差 ε のばらつきは 3 試行で 4 % 以内の幅に収まっていた。

球面の場合

試作機を球体 (直径 23.2 cm) に載せたときの結果を図 4.22 に示す。この場合にも 2×2 格子を再構成することができた。

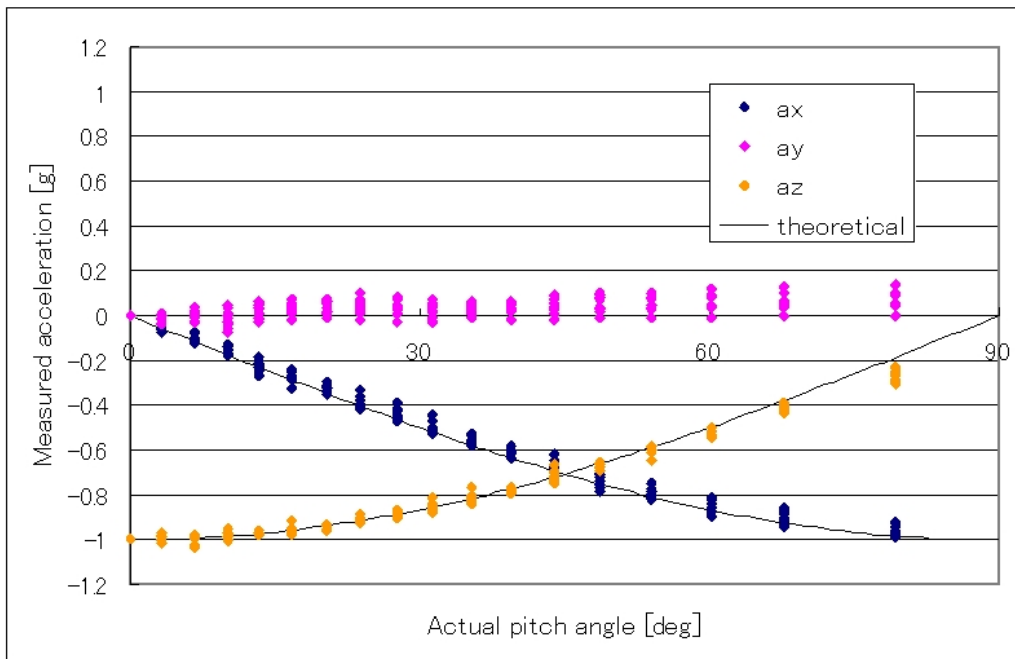


図 4.15 センサチップ 12 個の、傾き (ピッチ角) に対する計測値 (1 試行ずつ). 軸ごとに色分けしてプロットしてある. ここで $1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$ である. 実線は理論曲線. データのばらつきの幅は最大 (重力加速度と比較して) 12 % 程度であった.

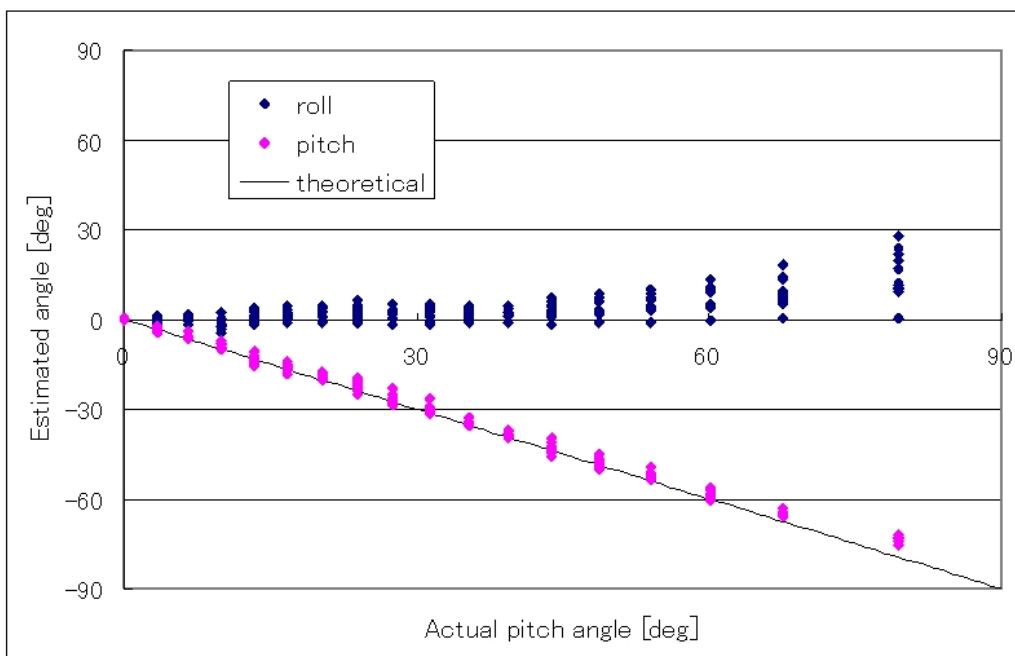


図 4.16 センサチップ 12 個の、データから求めたリンクのロール角 α 及びピッチ角 β . 実線は理論曲線.

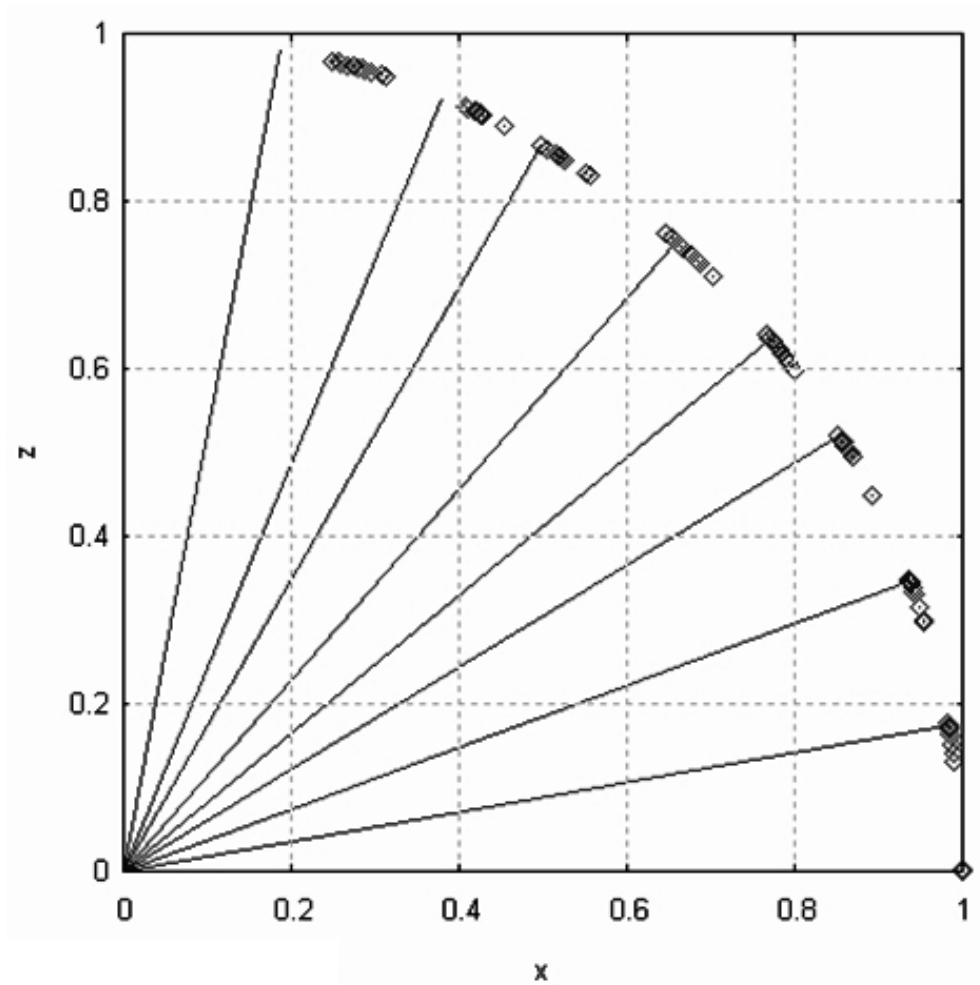


図 4.17 センサチップ 12 個の, データから求めたリンクの先端位置座標 (傾き θ について約 10° ごとの結果). 実線は実際のリンク姿勢.

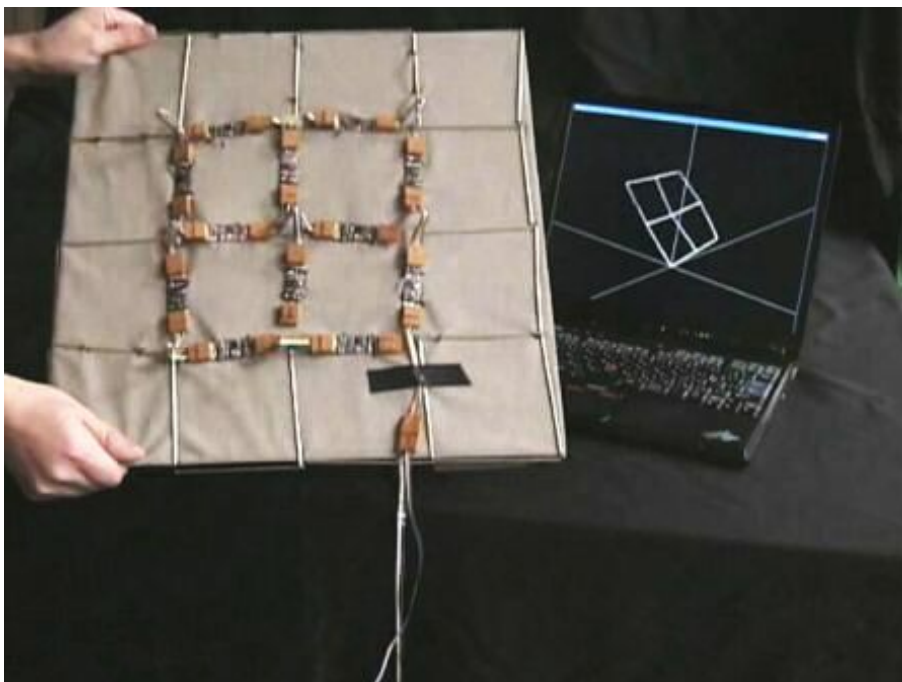


図 4.18 動作実験 1. 平面の場合.

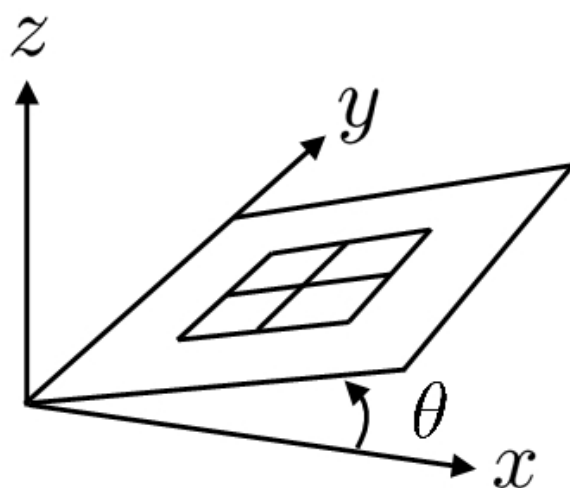


図 4.19 傾き (ピッチ角) θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) に対する試作機の誤差を確認する実験.

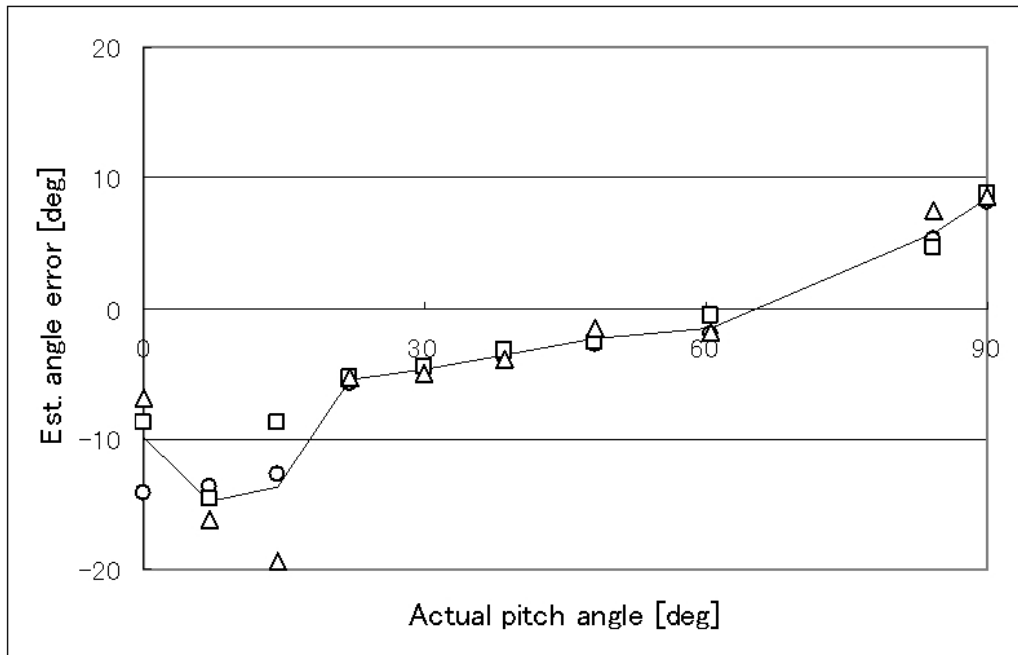


図 4.20 傾き (ピッチ角) θ の推定誤差. 3 試行のデータと平均 (実線). $15^\circ < \theta$ において, 絶対値の平均で 5° 程度の角度誤差があった.

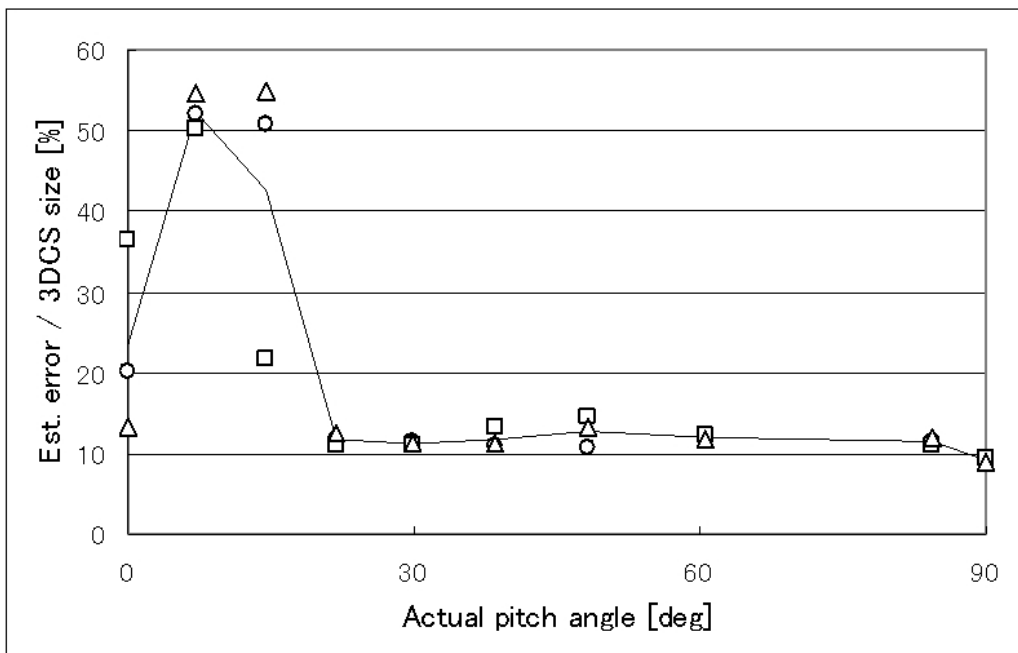


図 4.21 格子点の平面形状からの誤差. 3 試行のデータと平均 (実線). $15^\circ < \theta$ において平均 $\varepsilon = 12\%$ (24 mm) 程度の位置誤差があった.



図 4.22 動作実験 2. 球面の場合.

4.5 本章のまとめ

重力のみにもとづく形状計測法を提案した. 重力から直接求められるのは各リンクのロール角とピッチ角のみである. ヨー角の情報を得るため, 格子構造に課した拘束条件を利用した. 連立方程式の特異値解析により, 単位格子をなすリンク全てが水平面上にあるとき解が一意に定まらないことが示された. シミュレーションにより, 提案するアルゴリズムでシート形状の再構成が可能であり, 重力の 5% 程度のランダムノイズまで許容されることがわかった. 市販の三軸加速度センサとマイコンを用いてセンサチップを構成し, 2×2 の試作機を作成した. 正常動作時の角度誤差は 5° 程度, 位置誤差は 24 mm 程度であった. 水平面から 15° 以内では大きな位置誤差が観測された. これはシートが重力とほぼ直交しているためであり, 特異値解析の結果と一致する. またデータは示していないが, シートがリンクに沿って折れ曲がる場合にも大きな誤差が観測された. これは単位格子の変形よりもリンク回りの回転が支配的で, 法線ベクトルに関する条件が満たされなくなるからである. 例えば急激に湾曲する曲面に載せたり, 直立した柱に巻きつけたとき, リンクの方角によってはそのような状況に陥る.

本章で単位格子 ($N = 1$) に着目したのは, 数値計算のコストを抑えるためであった. 一度に扱う変数が増えると反復回数も増え, またローカルミニマムにも陥りやすくなる. しかしそれらを考慮しなければ, より大きな格子を考えることで法線条件が不要になる可能性がある. 例えば $N = 2$ のとき, センサデータとリンク長だけで $\mu = 24/24 = 1$ となる. さらに $N \rightarrow \infty$ で $\mu = 3/4$ なので, 式の数だけを考えれば解けてもおかしくない. これらの式が縮退していないか (問題が一意に解けるか) についての解析は, 今後の課題である.

第 5 章

結論

本論文は、新しい布状デバイス「三次元キャプチャシート」を提案し、その実現法を示したものである。それは自己形状を計測するという機能を電子的に付与された布である。布上には微小センサが多数配置されており、それらの協調により布全体の形状が再構成される。布自身が計測デバイスとして働くため、従来のカメラなどを用いた光学的手法と異なり、外部装置が不要である。そのため、セッティングの手間や作業空間の制限から解放される。また布の自己遮蔽や、物体とのインタラクション、障害物による遮蔽なども問題にならない。

第 1 章では、三次元キャプチャシートの提案と、関連研究、及び技術的背景について述べた。近年、MEMS などの発達によってセンサの微小化が進んでおり、また筆者が所属する研究室では新しい通信技術「二次元通信」を開発中である。これらの技術革新により、布上に無数のセンサを高密度に配置し、無配線で通信及び給電を行うことが実現されようとしている。三次元キャプチャシートはその流れを受けて考案されたデバイスである。

第 2 章では、三次元キャプチャシートの内部構造と計測原理について検討した。まず独特の柔軟性を持つ布を、なるべくその幾何学的性質を損なわないように離散モデル化した。布(織物)の解析に用いられる「チェビシェフネット」を離散化したものとして、正方格子構造を採用した。次に、格子構造の形状に関係し、形状再構成に利用可能な物理量を比較、検討した。自分で信号源を設置する必要がない、誤差の時間的蓄積が生じない、すでに十分に小型化されたセンサが入手可能、などの理由から各リンクに三軸加速度センサ及び三軸磁気センサを搭載する方法を採用した。これ以降は、ここで採用した構造を前提とした形状再構成法についての議論である。

第 3 章で、重力と地磁気にもとづいてシート形状を再構成する基本原理を示した。またシート形状を表す変数の個数と同程度の冗長自由度を持つ問題であることと、その冗長性を利用することによりノイズの影響を低減させられることを述べた。例えば地磁気は外乱磁場によって容易に乱されることが懸念されるが、単位格子が閉じたループであることを利用してその影響を補正することもできる。シミュレーションによってシート形状が再構成できることを確認した。リンク長のランダムな変化については、例えばリンク長 2 cm のシートを標準偏差 10 cm のガウシアン形状に被せる場合には 12 % 程度まで許容できることがわかった。また直径 10 cm、電流 1 A のループコイル(外乱磁場源)を 2 cm まで近づけても問題

なかった. さらにランダムノイズについては重力加速度に対して 8 % 程度, 地磁気の水平成分に対して 25 % 程度まで許容できることがわかった. また市販の 6 軸モーションセンサ (3 軸加速度 + 3 軸磁気) を用いて 3×3 の試作機を作成した. その角度誤差は 6° 程度, 位置誤差は一辺の長さ 16.5 cm に対して 1.0 cm (6 %) 程度であった.

一方, 耐ノイズ性を犠牲にする代わりにセンサに関するコストを下げる試みも行った. 第 4 章では, 半分のセンサデータ (ここでは重力) のみを用いる方法について考察した. 単位格子に着目した場合には情報が不足しており, それを補う工夫が必要となる. 具体的には, 格子点位置を決定するための姿勢角 (ピッチ角とヨー角) のうちピッチ角しかセンサデータから得られない. そこで残りのヨー角に関しては, 格子構造に課した拘束条件を用いて導出する方法を考案した. 具体的には, 4 本のリンクによって構成される格子 (単位格子) に着目し, それが閉じたループであることに加え, なららかに湾曲する曲面に載せられたとき対称モードの変形が生じることを条件として用いた. 提案したアルゴリズムでシート形状が再構成できることを, シミュレーションによって確認した. センサデータにランダムノイズが混入した場合についても調べ, 重力加速度に対して 5 % 程度までなら許容できることがわかった. また市販の三軸加速度センサを用いて 2×2 格子の試作機を作成した. その角度誤差は 5° 程度, 位置誤差は一辺の長さ 20 cm に対して 2.4 cm (12 %) 程度であった. この方法は原理上, 単位格子が水平面上にある場合とシートがリンクに沿って折れる場合に弱い.

やはり重力のみにもとづく方法にはやや無理があり, 解けない状況が存在することがわかった. 今後は十分な情報が得られ, 冗長性を利用することもできる重力と地磁気にもとづく方法についての研究開発を進める. 論文中の試作機はセンサチップ 24 個を使用した 3×3 アレイにとどまっていたが, センサチップの小型化と二次元通信の導入によって, 布上への高密度センサアレイの構築を目指す.

謝辞

博士課程の3年間、システム第三研究室でのびのびと研究することができました。関係者の皆様と、自分の幸運に感謝しています。ありがとうございます。

指導教官の篠田裕之 准教授には、修士課程から引き続き博士課程でも大変お世話になりました。2006年5月、アメリカで開催されたINSSの終了後に「来年はあのネタで出そう」と話したのが本研究の本格始動のきっかけでした。当時はまだ漠然としたイメージしかない状態でしたが、篠田先生のご指導、ご協力、励ましのおかげで発展し、このようにまとめられるまでになりました。それとともに、私自身も大きく成長できたと感じています。教えていただいたことを心に留め、一人前の研究者を目指して精進します。

安藤繁 教授には、様々な場で本研究に関して貴重な助言をいただきました。特に「フロシキで西瓜を包む話」は安藤先生にご紹介いただいたもので、それがなければあれほど興味深い話を知ることもなく、関連研究を辿ることもできませんでした。奈良高明 講師(現 電気通信大学 准教授)には、理論面でのサポートをいただきました。逆問題に関する講義は非常に参考になり、また本論文の可解性解析についても相談に乗っていただきました。物理世界に対して厳密な定式化で挑むお二人の姿勢には感心するとともに、大いに刺激を受けました。本論文の審査においては、篠田 准教授に主査を、舘暲 教授、安藤 教授、原辰次 教授、石川正俊 教授に副査を引き受けていただきました。布を格子構造としてモデル化することの妥当性やその影響など、曖昧なまま進めていた部分についてご指摘いただき、それをもとに考察を深めることができました。

栗原 助教、岩本 研究員、牧野 研究員のお三方には、修士課程から通じて5年間、様々な面でお世話になりました。相談するといつでも快く応じて下さり、先輩の立場からのアドバイスをいただくことができました。何をやるにも不安が先行する性格なので、そのように聞けることはとても安心感がありました。尾崎さんには、卒業研究という形で力を借りました。教えるよりも教わることの方が多く、おかげで試作機の作成など研究が大幅に進展しました。株式会社セルクロスの方々とは、二次元通信や本研究のアプリケーションなどについて有意義なディスカッションすることができました。また基板加工など、力を貸していただくこともありました。三研で一緒に過ごした皆さんには、色々迷惑をかけたこともあると思いますが、非常に楽しい日々を送らせていただきました。

好きなことにこれほど打ち込めたのは、見守ってくれた家族のおかげです。両親と妹、柴犬の鉄兵の支えはいつでも心強かったです。これからもよろしくお願ひします。

こうして思い返すと、多くの方々に支えられてきたことを改めて実感します。繰り返しになりますが、本当にありがとうございます。その支えを糧に、少しでも報いることができるようこれからも励みたいと思います。

(2008年2月29日 星 貴之)

参考文献

- [1] D. Baraff and A. Witkin: Large steps in cloth simulation, Proc. ACM SIGGRAPH 98, pp. 43–54, 1998.
- [2] R. Bridson, R. Fedkiw, and J. Anderson: Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation, ACM Trans. Graphics (ACM SIGGRAPH 2002), vol. 21, pp. 594–603, 2002.
- [3] K.-J. Choi and H.-S. Ko: Stable but responsive cloth, ACM Trans. Graphics (ACM SIGGRAPH 2002), vol. 21, pp. 604–611, 2002.
- [4] E. Boxerman and U. Ascher: Decomposing cloth, Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2004), pp. 153–161, 2004.
- [5] N. Jovic and T. S. Huang: Estimating cloth draping parameters from range data, Proc. International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three Dimensional Imaging, pp. 73–76, 1997.
- [6] K. S. Bhat, C. D. Twigg, J. K. Hodgins, P. K. Khosla, Z. Popović, and S. M. Seitz: Estimating cloth simulation parameters from video, Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2003), pp. 37–51, 2003.
- [7] D. Pritchard and W. Heidrich: Cloth motion capture, Proc. Eurographics 2003, vol. 22, pp. 263–271, 2003.
- [8] V. Scholz and M. A. Magnor: Cloth motion from optical flow, Proc. 9th International Fall Workshop Vision, Modeling, and Visualization, pp. 117–124, 2004.
- [9] I. Guskov and L. Zhukov: Direct pattern tracking on flexible geometry, Proc. Winter School of Computer Graphics (WSCG 2002), pp. 203–208, 2002.
- [10] I. Guskov, S. Klibanov, and B. Bryant: Trackable surfaces, Proc. ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2003), pp. 251–257, 2003.
- [11] R. White, A. Lobay, and D. A. Forsyth: Cloth capture, UC Berkeley Technical Report, no. UCB/CSD-5-1387, 2005.

-
- [12] V. Scholz and M. Magnor: Multi-view video capture of garment motion, Proc. IEEE Workshop on Content Generation and Coding for 3D-Television, pp. 1–4, 2006.
- [13] R. White, K. Crane, and D. A. Forsyth: Capturing and animating occluded cloth, ACM Trans. Graphics (ACM SIGGRAPH 2007), vol. 26, article no. 34, 2007.
- [14] M. Petrov, A. Talapov, T. Robertson, A. Lebedev, A. Zhilyaev, and L. Polonskiy: Optical 3D digitizers: Bringing life to the virtual world, IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 18, pp. 28–37, 1998.
- [15] P. Fong and F. Buron: High-resolution three-dimensional sensing of fast deforming objects, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pp. 1606–1611, 2005.
- [16] T. Weise, B. Leibe, and L. V. Gool: Fast 3D scanning with automatic motion compensation, Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '07), pp. 1–8, 2007.
- [17] P. Huang: Promoting wearable computing: A survey and future agenda, Proc. International Conference on Information Society in the 21st Century: Emerging Technologies and New Challenges (IS 2000), 2000.
- [18] E. R. Post, M. Orth, P. R. Russo, and N. Gershenfeld: E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing, IBM Systems Journal, vol. 39, no. 3&4, pp. 840–860, 2000.
- [19] J. Farrington, A. J. Moore, N. Tilbury, J. Church, and P. D. Biemond: Wearable sensor badge & sensor jacket for context awareness, Proc. 3rd IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '99), pp. 107–113, 1999.
- [20] R. Wijesiriwardana, T. Dias, and S. Mukhopadhyay: Resistive fibre-meshed transducers, Proc. 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '03), pp. 200–209, 2003.
- [21] R. Wijesiriwardana, K. Mitcham, and T. Dias: Fiber-meshed transducers based real time wearable physiological information monitoring system, Proc. 8th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '04), pp. 40–47, 2004.
- [22] K. Van Laerhoven, A. Schmidt, and H.-W. Gellersen: Multi-sensor context aware clothing, Proc. 6th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '02), pp. 49–56, 2002.

- [23] S. Basu, S. Schwartz, and A. Pentland: Wearable phased arrays for sound localization and enhancement, Proc. 4th IEEE International Symposium on Wearable Computing (ISWC '00), pp. 103–110, 2000.
- [24] T. Martin, M. Jones, J. Edmison, and R. Shenoy: Towards a design framework for wearable electronic textiles, Proc. 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '03), pp. 190–199, 2003.
- [25] M. Chandra, M. T. Jones, and T. L. Martin: E-textiles for autonomous location awareness, Proc. 8th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '04), pp. 48–55, 2004.
- [26] E. R. Post and M. Orth: Smart fabric, or “wearable clothing”, Proc. 1st IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97), pp. 167–168, 1997.
- [27] R. B. Katragadda and Y. Xu: A novel intelligent textile technology based on silicon flexible skins, Proc. 9th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '05), pp. 78–81, 2005.
- [28] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, and H. Reichel: Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric, Proc. 9th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '05), pp. 86–91, 2005.
- [29] K. Van Laerhoven, N. Villar, and H.-W. Gellersen: A layered approach to wearable textile networks, Proc. IEE Euroearable 2003, pp. 61–67, 2003.
- [30] 秋田純一, 戸田真志: TextileNet: ウェアラブルコンピュータ向けネットワーク基盤システム, インタラクシオン 2005 論文集, pp. 235–236, 2005.
- [31] TextileNet: <http://ambition.ec.t.kanazawa-u.ac.jp/tn/>
- [32] 前中一介: 集積化センサのあゆみと MEMS 技術, 第 24 回センシングフォーラム論文集, pp. 19–24, 2007.
- [33] 山田剛良: 3 軸加速度センサ / 3 mm 角製品が続々登場 / 200 円切りで普及が本格化, 日経エレクトロニクス, 2006 年 9 月 11 日号, pp. 71–77, 2006.
- [34] 瀧本大輔: 加速度センサー / ミクロの機械で動きを検知, 日経ビジネス, 2007 年 7 月 23 日号, pp. 134–136, 2007.
- [35] 野々村裕: 自動車用センサと MEMS 技術, 電気学会論文誌 E, vol. 126, no. 8, pp. 387–392, 2006.

- [36] 山崎隆雄: ベア・チップ大の SiP を開発 / フレキシブル基板でチップを包む, 日経エレクトロニクス, 2004 年 4 月 28 日号, pp. 107–116, 2004.
- [37] O. Brand: Microsensor integration into systems-on-chip, Proc. IEEE, vol. 94, no. 6, pp. 1160–1176, 2006.
- [38] 篠田裕之: 素材表面に形成する高速センサネットワーク, 計測自動制御学会誌 計測と制御, vol. 46, no. 2, pp. 98–103, 2007.
- [39] 牧野泰才: 二次元信号伝送技術に基づく柔軟体インタフェースの研究, 博士論文, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻, 2007.
- [40] Y. Makino, A. Okada, and H. Shinoda: Measuring myoelectric potential patterns based on two-dimensional signal transmission technology, Proc. SICE Annual Conference 2006, pp. 2005–2009, 2006.
- [41] 千種大雅: 共鳴近接結合素子を用いる大面積触覚センシングの研究, 修士論文, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻, 2007.
- [42] H. Chigusa, Y. Makino, and H. Shinoda: Large area sensor skin based on two-dimensional signal transmission technology, Proc. 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2007), pp. 151–156, 2007.
- [43] 喜成年泰: やさしい繊維基礎講座 / 布をつくる, 繊維学会誌 繊維と工業, vol. 59, no. 10, pp. 333–339, 2003.
- [44] 池口達治, 太田幸一: 織物断面の静的シミュレーション技術の確立, 愛知県産業技術研究所研究報告, 2005.
- [45] 太田幸一, 池口達治: 織物断面の動的シミュレーション技術の確立, 愛知県産業技術研究所研究報告, 2005.
- [46] 篠原昭: 衣服の幾何学, 光生館, 1997.
- [47] A. C. Pipkin: Equilibrium of Tchebychev nets, Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 85, p.81–97, 1984.
- [48] S. L. Samelson: Global Tchebychev nets on complete two-dimensional Riemannian surfaces, Archive for Rational Mechanics and Analysis, vol. 114, p.237–254, 1991.
- [49] J. J. Koenderink and A. J. van Doorn: Shape from Chebyshev nets, Proc. of 5th European Conference on Computer Vision (ECCV '98), pp. 215–225, 1998.

- [50] E. V. Popov: Geometric approach to Chebyshev net generation along an arbitrary surface represented by NURBS, Proc. International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2002), 2002.
- [51] J. Hoschek: Approximation of surfaces of revolution by developable surfaces, Computer-Aided Design, vol. 30, pp. 757–763, 1998.
- [52] J. Mitani and H. Suzuki: Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding, ACM Trans. Graphics (ACM SIGGRAPH 2004), vol. 23, pp. 259–263, 2004.
- [53] 村上確司: やさしい繊維基礎講座 / 糸加工, 繊維学会誌 繊維と工業, vol. 59, no. 9, pp. 280–284, 2003.
- [54] L. Danisch, K. Englehart, and A. Trivett: Spatially continuous six degree of freedom position and orientation sensor, Sensor Review, vol. 19, no. 2, pp. 106–112, 1999.
- [55] Measurand: <http://www.measurand.com/>
- [56] S. Naik: Real-time avatar construction using Shape Tape, Technical Report 02-036, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599-3175, 2002.
- [57] Y. Baillot, J. J. Eliason, G. S. Schmidt, J. E. Swan II, D. Brown, S. Julier, M. A. Livingston, and L. Rosenblum: Evaluation of the ShapeTape tracker for wearable, mobile interaction, Proc. IEEE Virtual Reality 2003 (VR '03), pp. 285–286, 2003.
- [58] R. Balakrishnan, G. Fitzmaurice, G. Kurtenbach, and K. Singh: Exploring interactive curve and surface manipulation using a bend and twist sensitive input strip, Proc. 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 111–118, 1999.
- [59] T. Grossman, R. Balakrishnan, and K. Singh: An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom curve input device, Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 185–192, 2003.
- [60] I. Llamas, A. Powell, J. Rossignac, and C. Shaw: Bender: Deforming 3D shapes by bending and twisting a virtual ribbon with both hands, Proc. 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling (SPM), 2005.
- [61] T. Kato, A. Yamamoto and T. Higuchi: Shape recognition using piezoelectric thin films, Proc. 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2003), pp. 112–117, 2003.
- [62] 岩田哲也, 大須賀公一: FST を用いた双腕ロボットのマスタスレーブ制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 (ROBOMECH 2007) 講演論文集, 2P1-J06(1–4), 2007.

- [63] C. Einsmann, M. Quirk, B. Muzal, B. Venkatramani, T. Matrin, and M. Jones: Modeling a wearable full-body motion capture system, Proc. 9th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '05), pp. 144–151, 2005.
- [64] R. Ohsawa, M. Iwai, T. Imaeda, K. Suzuki, T. Yonezawa, K. Takashio, and H Tokuda: SmartFuroshiki: A sensorized fabrics supporting office activities, Proc. 8th International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP 2006), 2006.
- [65] スマートふろしき: http://www.ht.sfc.keio.ac.jp/smart-furoshiki/j/index_j.html
- [66] 原田達也, 伊藤覚, 森武俊, 佐藤知正: 室内三次元位置計測のための SS 無線と高精度時間計測 LSI を用いた距離計測デバイスの開発, 日本ロボット学会誌, vol. 23, no. 4, pp. 496–505, 2005.
- [67] J. Lee and I. Ha: Real-time motion capture for a human body using accelerometers, *Robotica*, vol. 19, pp. 601–610, 2001.
- [68] D. Fontaine, D. David, and Y. Caritu: Sourceless human body motion capture, Proc. Smart Objects Conference (SOC '03), 2003.
- [69] E. R. Bachmann, R. B. McGhee, X. Yun, and M. J. Zyda: Inertial and magnetic posture tracking for inserting humans into networked virtual environments, Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 2001 (VRST 2001), pp. 9–16, 2001.
- [70] N. Miller, O. C. Jenkins, M. Kallmann, and M. J. Matarić: Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation, Proc. 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2004), vol. 2, pp. 547–565, 2004.
- [71] R. Zhu and Z. Zhou: A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package, *IEEE Trans. Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 295–302, 2004.
- [72] D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. M. Baten, and P. H. Veltink: Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation, *IEEE Trans. Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 395–405, 2005.
- [73] A. Saxena, G. Gupta, V. Grasimov, and S. Ourselin: In use parameter estimation of inertial sensors by detecting multilevel quasi-static states, Proc. 9th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES '05), vol. 3684, pp. 595–601, 2005.
- [74] Moven: <http://www.moven.com/>

- [75] E. R. Bachmann, X. Yun, and C. W. Peterson: An investigation of the effects of magnetic variations on inertial/magnetic orientation sensors, Proc. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), vol. 2, pp. 1115–1122, 2004.
- [76] E. R. Bachmann, R. B. McGhee, X. Yun, and M. J. Zyda: Inertial and magnetic posture tracking for inserting humans into networked virtual environments, Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 2001 (VRST 2001), pp. 9–16, 2001.
- [77] T. Harada, T. Mori, and T. Sato: Development of a tiny orientation estimation device to operate under motion and magnetic disturbance, International Journal of Robotics Research, vol. 26, pp. 547–559, 2007.
- [78] E. R. Bachmann, X. Yun, and R. B. McGhee: Sourceless tracking of human posture using small inertial/magnetic sensors, Proc. 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA 2003), vol. 2, pp. 822–829, 2003.
- [79] 遠藤大輔, 永谷圭司, 吉田和哉: 滑りを考慮したデッドレコニングによるクローラ型移動ロボットの推定位置精度の向上, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2G17, 2006.
- [80] C. Randell, C. Djiallis and H. Muller: Personal position measurement using dead reckoning, Proc. 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '03), pp. 166–173, 2003.
- [81] 佐川貢一, 煤孫光俊, 大瀧保明, 猪岡光: 足爪先加速度積分による歩行経路の 3 次元無拘束計測, 計測自動制御学会論文集, vol. 40, no. 66, pp. 635–641, 2004.
- [82] X Yun, E. R. Bachmann, H. Moore and J. Calusdian: Self-contained position tracking of human movement using small inertial/magnetic sensor modules, Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2526–2533, 2007.
- [83] 相原修, 長谷祐児, 齋藤知孝, 熊谷秀夫: 慣性測量装置の開発, 日本測量調査技術協会機関紙 APA, vol. 74, 1999.
- [84] J. C. Lötters, J. Schipper, P. H. Veltink, W. Olthuis, and P. Bergveld: Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications, Sensors and Actuators A, vol. 68, pp. 221–228, 1998.
- [85] A. Mazzone, C. Spagno, and A. Kunz: A haptic feedback device based on an active mesh, Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '03), pp. 188–195, 2003.

- [86] 長久保晶彦, H. Alirezaei, 國吉康夫: 逆問題解析に基づく触覚分布センサ, 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 6, pp. 960–969, 2007.
- [87] Laboratory for Intelligent Systems and Informatics: <http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>
- [88] 加藤 陽, 向井 利春, 早川 知範, 柴田 哲好: トモグラフィの原理を用いた柔軟面状触覚センサ, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 (ROBOMECH 2007) 講演論文集, 1P1-H03(1–3), 2007.
- [89] A. Tognetti, F. Lorussi, R. Bartalesi, S. Quaglini, M. Tesconi, G. Zupone and D. De Rossi: Wearable kinesthetic system for capturing and classifying upper limb gesture in post-stroke rehabilitation, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 2, no. 8, 2005.
- [90] 株式会社 日立製作所 日立研究所 企画室: 姿勢センサを利用した携帯端末向け 3 次元地図表示技術, 広報誌 はいたつく, 2005 年 4 月号, pp. 15–16, 2005.
- [91] 新しい「モーションコントロールセンサー」を開発 ～世界最小 1 チップの 6 軸センサ搭載で、携帯電話が星座早見盤に～, 愛知製鋼株式会社プレスリリース, 2006.
<http://www.aichi-steel.co.jp/topics/data/pdf/topics060228.pdf>
- [92] Y. Nakamura and Y. Xu: Geometrical fusion method for multi-sensor robotic systems, *Proc. 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '89)*, pp. 668–673, 1989.
- [93] 鏡慎吾, 石川正俊: センサフュージョン —センサネットワークの情報処理構造—, *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. J88-A, no. 12, pp. 1404–1412, 2005.
- [94] 国立天文台編: 理科年表 平成 19 年, 丸善株式会社, 2006.
- [95] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery: *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing Second Edition*, Cambridge University Press, 1992.
- [96] M. Matsumoto and T. Nishimura: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. Modeling and Computer Simulation*, vol. 8, no. 1, pp. 3–30, 1998.
- [97] 尾崎沙世: 三次元形状キャプチャシートの研究, 卒業論文, 東京大学工学部計数工学科, 2007.

付録 A

布形状の微分幾何学的記述

本論文で採用した布のモデルは、織物を幾何学的に解析する際に用いられてきた連続モデル「チェビシェフネット」を離散化したものである。ここではそのチェビシェフネットにより織物の変形がどう記述されるかについて、文献 [46] から紹介する。

織物は、たて糸とよこ糸が互いに交差した構造をしている。それぞれの糸を太さがなく伸びない曲線であるとする。たて糸とよこ糸で編まれた曲面 \mathbf{p} を考え、それぞれに沿った方向を u, v とする (図 A.1).

$$\mathbf{p}(u, v) \equiv \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

接ベクトル $\mathbf{p}_u, \mathbf{p}_v$ のなす角を θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) とする。ここで $\mathbf{p}_u \equiv \partial \mathbf{p} / \partial u$, $\mathbf{p}_v \equiv \partial \mathbf{p} / \partial v$ である。伸びない糸を仮定しているので $|\mathbf{p}_u| = |\mathbf{p}_v| = 1$ と置いて差し支えない。このとき曲面 \mathbf{p} の第一基本形式の係数はそれぞれ次のように書かれる。

$$E \equiv \mathbf{p}_u \cdot \mathbf{p}_u = 1 \quad (\text{A.2})$$

$$F \equiv \mathbf{p}_u \cdot \mathbf{p}_v = \cos \theta \quad (\text{A.3})$$

$$G \equiv \mathbf{p}_v \cdot \mathbf{p}_v = 1 \quad (\text{A.4})$$

ガウス曲率 K は E, F, G を用いて次のように表される。ここで $H^2 \equiv EG - F^2$ である。

$$K = \frac{1}{2H} \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{F}{EH} \frac{\partial E}{\partial v} - \frac{1}{H} \frac{\partial G}{\partial u} \right) + \frac{1}{2H} \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{2}{H} \frac{\partial F}{\partial u} - \frac{1}{H} \frac{\partial E}{\partial v} - \frac{F}{EH} \frac{\partial E}{\partial u} \right) \quad (\text{A.5})$$

式 (A.2) ~ (A.4) を代入することにより、次の θ に関する微分方程式を得る。

$$K = \frac{-1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 \theta}{\partial u \partial v} \quad (\text{A.6})$$

以上の結果にもとづいて「フロシキで西瓜をつつむ話」は以下のように解析される。布でしわがよることなく球を覆えたとすると、布上での各点における曲率は球と一致する。したがって、球の半径を R とすると、上式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial u \partial v} + \frac{\sin \theta}{R^2} = 0 \quad (\text{A.7})$$

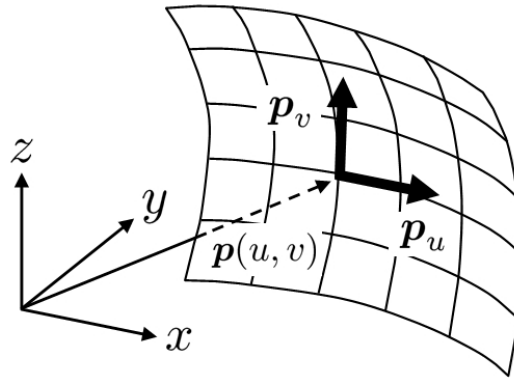


図 A.1 パラメータ表示された布.

$t \equiv uv/R^2$ において無次元化することにより, 最終的に次式を得る.

$$t \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = -\sin\theta \quad (\text{A.8})$$

いま, 図 A.2 のように布の中心 $(u, v) = (0, 0)$ に球 (スイカ) を置き, 四隅を中央に向かって持ち上げるように包む場合を考える. 境界条件は, 布の中心 $t = 0$ において $\theta = \pi/2, \theta_t = -1$ となる. このとき式 (A.8) の解は近似的に次のように書ける.

$$\theta \approx \frac{\pi}{2} - t + \frac{t^3}{18} \quad (\text{A.9})$$

これは布の中心から離れるにしたがって θ が減少 (すなわち単位格子の面積 $\sin\theta$ が減少) するような変形をしつつ, 布が球面に沿っていくことを表している. 現実の布は糸の太さや編み方などによって, とりうる θ に下限が存在する. θ がその下限よりも小さくなったとき, しわが現れることになる. (u, v) に対する交差角 θ の値を表 A.1 に示す. 糸に沿った方向では交差角 θ は変化せず, 糸に対して 45° の方向でもっとも激しく変化することがわかる. このように布上の位置によって異なる交差角をとることで, 布は平面から立体的な曲面へと変形できるのである.

また大域的性質としては「ガウス曲率の積分の絶対値が 2π を超える曲面を覆うようなチェビシェフネットは存在しない」ことなどが数学的解析により知られている [48].

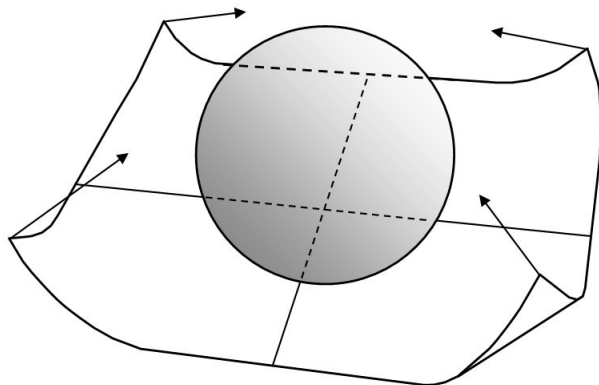


図 A.2 フロシキでスイカを包む方法.

表 A.1 布上の座標 (u, v) と交差角 θ [deg] の関係 (文献 [46] より転載).

	1.0	90.00	84.27	78.56	72.89	67.28	61.74	56.29	50.94	45.72	40.62	35.68
	0.9	90.00	84.84	79.70	74.59	69.52	64.50	59.55	54.67	49.89	45.20	
	0.8	90.00	85.42	80.84	76.29	71.77	67.28	62.84	58.45	54.67		
	0.7	90.00	85.99	81.99	77.99	74.02	70.08	66.16	62.29			
	0.6	90.00	86.56	83.13	79.70	76.29	72.89	69.52				
v/R	0.5	90.00	87.14	84.27	81.41	78.56	75.72					
	0.4	90.00	87.71	85.42	83.13	80.84						
	0.3	90.00	88.28	86.56	84.84							
	0.2	90.00	88.85	87.71								
	0.1	90.00	89.43									
	0.0	90.00										
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	

u/R

関連発表

- [P1] 星貴之, 篠田裕之: 三次元形状キャプチャシートによる柔軟触覚センサ, 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 464–465, 札幌, 12月, 2006.
- [P2] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda: Free-form tactile sensor using 3-dimensional shape capture sheet, Proc. 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2007), pp. 403–408, Tsukuba (Japan), Mar., 2007. [Poster]
- [P3] 星貴之, 尾崎沙世, 篠田裕之: 三次元形状計測シート, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 (ROBOMECH2007) 講演論文集, 1A2-A09(1–4), 秋田, 5月, 2007. [ポスター]
- [P4] Takayuki Hoshi, Sayo Ozaki, and Hiroyuki Shinoda: Three-dimensional shape capture sheet using distributed triaxial accelerometers, Proc. 4th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2007), pp. 207–212, Braunschweig (Germany), Jun., 2007.
- [P5] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda: Gravity-based 3D shape measuring sheet, Proc. SICE Annual Conference 2007, pp. 2126–2131, Takamatsu (Japan), Sep., 2007.
- [P6] Takayuki Hoshi and Hiroyuki Shinoda: 3D shape capture sheet based on gravity and geomagnetic sensing, Proc. IEEJ 24th Sensor Symposium, pp. 423–427, Funabori (Japan), Oct., 2007.
- [P7] 星貴之, 篠田裕之: 重力・地磁気計測メッシュによる三次元形状復元, 第24回センシングフォーラム論文集, pp. 119–123, 仙台, 10月, 2007.
- [P8] 星貴之, 篠田裕之: リアルタイムに形状計測可能な布状デバイス, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 977–978, 広島, 12月, 2007.