



3次元触覚情報を活用する電磁場バーチャル空間の
インタラクションシステムの開発

(課題番号 13650308)

平成13年度～平成14年度
科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))
研究成果報告書

平成15年5月

研究代表者 ヤマシタ ヒデアキ 山下 英生

(広島大学大学院工学研究科教授)



3次元触覚情報を活用する電磁場バーチャル空間の
インタラクションシステムの開発

(課題番号 13650308)

平成13年度～平成14年度
科学研究費補助金(基盤研究C(2))
研究成果報告書



平成15年5月

研究代表者 山下 英生
(広島大学大学院工学研究科教授)

はしがき

高機能グラフィックワークステーションの出現により、物理現象のシミュレーション結果や本来不可視な現象を可視化するための種々の可視化手法の開発がさかんに進められている。このような可視化は、(1)研究者の感性へのフィードバックを可能とし、(2)研究者や観察者が予期しなかった発見につなげることができ、また、(3)研究者同士が研究を進めるうえで有力なコミュニケーション手段を提供するものであり、人間の感性に訴えて、直感的に現象を理解できるようなシステムでなければならない。これまでは主に可視化、すなわち、視覚情報により現象を理解させるものであった。すなわち、種々の可視化手法の複合利用、メガネによる立体視法、バーチャルリアリティを利用した可視化法などであり、著者らは、これまでにこれらに関する研究を実施し、その有用性を実証してきた。このように、現状のシステムは視覚情報のみを駆使するものである。一般に電磁現象は、その空間の中に鉄心などを挿入すると電磁力が働く。また、3次元空間中に表示した磁束線に沿っても力が働いており、これらを観察者が触覚により認識できるようであれば、視覚情報、触覚情報の両面から電磁現象を体感できることになり、研究者への感性の刺激はさらに向上する。

本研究では、観察者の感性を視覚、触覚の両面から刺激するインタラクションシステムをバーチャルリアリティ空間に実現するために下記の研究開発を行った。

(1) 3次元触覚機能を活用した3次元分布情報のインタラクションシステムの開発：バーチャル電磁空間内における電磁力を観察者に感知させるために、観察者のアクションが触覚にリアルタイムで応答するシステムを開発した。今までの視覚情報に加えて、触覚を利用することにより、観察者への刺激を高め、より高度な観察システムを開発した。

(2) 電磁力計算アルゴリズムの開発：3次元空間に分布する電磁場内に挿入された鉄心や電流には電磁力が働く。この電磁力計算とそのベクトルにより触覚センサーを動作させるアルゴリズムを開発した。

(3) リアルタイム応答を実現するためのアルゴリズムおよびデータ構造の開発：(2)の電磁力を観察者が触覚により認知するには、バーチャル3次元空間内で観察者のアクションに応答して、リアルタイムに反応しなければならない。すなわち、インタラティブに空間にアクセスしながら、思考の中断が起きないように高速度でかつ正確に応答する必要があり、そのためのアルゴリズムとデータ構造の開発を行った。

(4) インタラクションシステムのGUIの開発：3次元空間に分布する物理量の観察において、視覚による情報のみでなく、触覚による情報を加味したインタラクションシステムを開発するには、観察者に親切なユーザーインターフェースが完備されることが必要である。すなわち、グラフィカルユーザーインターフェースの開発を行った。

解析結果を有効に活用し、新しい発見につなげるためには、観察者の感性に訴えて観察することのできるインタラクションシステムが必要であり、種々の表示法による種々の角度から検討する必要がある。このためのシステムは、操作性が優れていることが要求される。本研究において開発したインタラクションシステムはこの点を十分に考慮しており、次の特色がある。

(1) 人工現実感を活用した立体表示手法により、観察者の意思、動作を3次元空間に

- 反映できるので複雑な形状、現象が観察者にとって非常に理解しやすい。
- (2) ベクトル量の大きさ、方向を、その形状や色の視覚情報を活用して観察するので、人間の感性に訴えて認識しやすくなる。
- (3) 視覚情報のみでなく、触覚情報を活用することにより、より現実感のある電磁現象観察、応答システムとなる。したがって、人間の感性を刺激することになり、電磁現象の理解度が格段に向上する。

研究組織

研究代表者：山下 英生（広島大学大学院工学研究科・教授）
研究分担者：金田 和文（広島大学大学院工学研究科・助教授）
研究分担者：野口 聡（広島大学大学院工学研究科・助手）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 13 年度	2,700	0	2,700
平成 14 年度	800	0	800
総計	3,500	0	3,500

研究発表

〔1〕学会誌等

- (1) S.Noguchi, H.Yamashita, Y.Matsubayashi, E.Okayama, "A New Interpolation Method for Interactive Visualization System," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.15, No.1-4(ISEM 01 PartIII), pp.417-422, 2002

〔2〕国際会議等

- (1) S.Noguchi, H.Yamashita, Y.Matsubayashi, E.Okayama, "A New Interpolation Method for Interactive Visualization System," Proceedings of 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM-Tokyo), May 13-16, 2001, Tokyo, Japan, JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 9, pp.703-704, 2001
- (2) Y.Matsubayashi, S.Noguchi, H.Yamashita, "A New Interactive Visualization System with Force Feedback for Education in Electromagnetics," The Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Perugia, Italy, June 16-19, 2002, P3-23, p.89, 2002
- (3) Y.Matsubayashi, S.Noguchi, H.Yamashita, "A New Interactive Visualization System with Force Feedback for Education in Electromagnetics," Proceedings of 11th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM-Versailles), May 12-14, 2003, Versailles, France (採録決定)

〔3〕口頭発表

- (1) 松林 豊、野口聡、山下 英生、「物体の回転を考慮した 2次元電磁場インタラクティブ可視化システムの開発」、平成 13 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, No. 200418, p. 529, 2001
- (2) 松林 豊、野口聡、山下 英生、「電磁力フィードバック電磁場インタラクティブ可視化システム」、第 14 回「電磁力関連のダイナミックスシンポジウム」講演論文集, No. 6A12, pp. 631-634, 2002
- (3) 松林 豊、野口聡、山下 英生、「触覚インターフェースを用いた電磁力知覚および電磁場可視化インタラクティブシステムの開発」、電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-03-10、RM-03-10, pp. 19-24, 2003

研究成果

物理現象のシミュレーション結果や本来不可視な現象を可視化するための種々の可視化手法の開発がさかんに進められている。しかし、現状の可視化システムは視覚情報のみを駆使するものであった。一般に電磁現象は、その空間の中に鉄心などを挿入すると電磁力が働く。観察者がこの電磁力を触覚により認識できるようであれば、視覚情報、触覚情報の両面から電磁現象を体感できることになり、研究者への感性の刺激は向上する。本研究では、観察者の感性を視覚、触覚の両面から刺激するインターラクティブシステムをバーチャルリアリティ空間に実現するために、下記の研究開発を行った。

1) 3次元触覚機能を活用した3次元分布情報とのインターラクティブシステムの開発：

第一ステップとして、バーチャル電磁空間内における電磁力を観察者に感知させる一方法として、2次元空間中の鉄心を3次元触覚フィードバックデバイスにより操作することにより、鉄心に受ける電磁力をそのデバイスで受信するシステムの開発を行った。第二ステップとして、3次元空間中の鉄心を取り扱うようにシステム全体を完全3次元版に拡張した。すなわち、立体視アルゴリズムの開発を行い、さらにシステム全体の構築を行った。

2) 電磁力計算アルゴリズムの開発：

3次元空間に分布する電磁場内に挿入された鉄心や電流には電磁力が働く。この電磁力計算とそのベクトルにより触覚センサーを動作させるアルゴリズムを開発した。

3) リアルタイム応答を実現するためのアルゴリズムおよびデータ構造の開発：

2)の電磁力を観察者が触覚により認知するためには、バーチャル3次元空間内で観察者のアクションに応答して、リアルタイムに反応しなければならない。すなわち、インタラクティブに電磁空間にアクセスしながら、思考の中断が起きないように高速度でかつ正確に応答する必要があり、そのためのアルゴリズムとデータ構造の開発を行った。

以下に本研究の詳しい成果報告を掲載し、研究発表を行った論文のコピーを掲載する。

3次元触覚情報を活用する電磁場バーチャル空間の インターアクションシステムの開発

目次

Introduction	iii
第1章 序章	1
1.1 研究の背景	2
1.1.1 可視化の現状とこれまでに提案されている可視化システム	2
1.1.2 触覚インターフェース	6
1.2 研究の目的	8
第2章 提案インタラクティブシステム	9
2.1 提案インタラクティブシステムの概要	9
2.1.1 インタラクティブシステムの構成	9
2.1.2 補間手法	12
2.1.2.1 磁場分布算出手法	13
2.1.2.2 電磁力算出手法	17
2.1.2.3 補間手法に関する検討	19
2.2 物理量算出手法	22
2.2.1 磁束密度分布	22
2.2.2 電磁力	28
2.2.3 物理量算出に関する検討	30
2.2.3.1 磁束密度(磁場分布)算出に関する検討	30
2.2.3.2 電磁力算出に関する検討	33
2.2.3.3 事前準備解析の位置に関する検討	34
2.3 本章のまとめ	37
第3章 適用例	40
3.1 用意する解析結果位置に関する検討	41

3.2 計算時間および精度に関する検討	45
3.3 本章のまとめ	50
第4章 結論	52
参考文献	57

Introduction

Numerical solution of electromagnetic field problems usually results with a large amount of data, which is impossible to interpret correctly without using a good visualization system. In our laboratory, it has been already proposed several visualization tools for electromagnetic field computation with main aim to facilitate grasping of the physical behavior in electromagnetics [1][2][3]. Additionally, if such visualization system can provide interaction with the computed data in real time, then these systems can be very useful as an analysis tool for education and design purposes in electromagnetics. Recently, for an educational or design tool in electromagnetics, it has been developed the interactive system to visualize the computational results in 2D electromagnetics [4]. The previous interactive system can instantly visualize the field distribution, when a user changes position or size of an object in analysis domain. Two main features of the previous interactive visualization system are:

- 1) Using several data sets, which consist of the computational results for few user-defined model configurations, the previous system can compute and interactively visualize field distributions for any other configuration by utilizing a simple interpolation technique.
- 2) The previous system can visualize interactively the magnetic vector potential distribution, the magnetic flux density distribution, the magnetic flux lines and the magnetic flux density vector or any combination of them.

From the interactive visualization using the previous system, the students who study to electromagnetic field problems can understand intuitively and use for education in magnetic or electric field, the designers can explore the position and size of the object filling designer's demands.

On the other hand, in the common electromagnetic field visualization systems or the previous interactive system, the magnetic force is represented by the size and the direction of arrow or cone. However, in reality, we surely recognize force through a part of our body, such as hand. It is the reason why it is proposed a new system that makes a user feel the magnetic force in electromagnetic field by using the haptic interface [5] on real time. This system provides understandings of the physical phenomenon deeper than by using only the graphical visualization. Accordingly, the proposed system is very useful for an educational tool.

The previous system helps us to understand the physical behavior in 2D electromagnetic field.

However, an actual or realistic electromagnetic field should be represented in 3D, whose physical behavior is more complicated than that of 2D. Therefore, it is necessary to consider the 3D electromagnetic field in order to make more practical tool for education and design. It is proposed a 3D interactive visualization system with force feedback device based on the previous 2D system [4], due to dealing with more realistic models. Surely, the newly proposed system can not only visualize the field distribution map, but also make a user feel the magnetic force in 3D electromagnetic field simultaneously. I am sure that the proposed system becomes more useful and more effective for education and design.

The main purposes of my master thesis are following two: (1) The first purpose is that the function which feedback magnetic forces to a user is added to the previous 2D system. (2) The second purpose is that the 2D previous system is extended to apply 3D electromagnetic field.

This master thesis is described the background and the purpose of my research in Chapter 1. In Chapter 2, it is described the proposal interactive system, whose contents are the outline and the construction of the proposed interactive system and the main feature of this system. And the method to obtain the unknown distribution and magnetic force is described. In Chapter 3, the results that the proposed interactive system is applied for 2D and 3D electromagnetic field problem are described. Finally the conclusion of my master thesis is described.

第 1 章 序章

本章では、研究の背景とその目的について述べる。研究の背景では、まず可視化の現状とこれまでに提案されている可視化システムについて述べる。次に、課題を克服したインタラクティブシステムについて、さらに課題を克服するためにインタラクティブシステムで用いた触覚インターフェースについて述べる。最後に、研究の目的について述べる。

1.1 研究の背景

1.1.1 可視化の現状とこれまでに提案されている可視化システム

可視化に関する研究は、1974年に H. Christiansen によって行われた機械応力の可視化[6]が先駆けの役割を果たし、その後、さまざまな分野において研究されてきた。これらの研究は、その後 1987年、B. H. McCormick らによる、“Scientific Visualization”の提唱 [7]により、その工学的な位置づけが明確にされた。この中で、McCormick は、インタラクティブな可視化が研究者にとって重要であることも指摘している。これは、対話的な可視化を行うことによって、研究者の感性が刺激されて、予期しない発見につながる、また現象に対する理解が深まる、という利点があるためである。このような流れの中で、当研究室においても電磁場の有限要素解析結果を対象としたスカラー量およびベクトル量をステレオ観察できるインタラクティブシステムを開発した[1]。このシステムを開発した当時は、市販のコンピュータの性能ではインタラクティブ性を満足することは難しく、非常に高価なワークステーションをプ

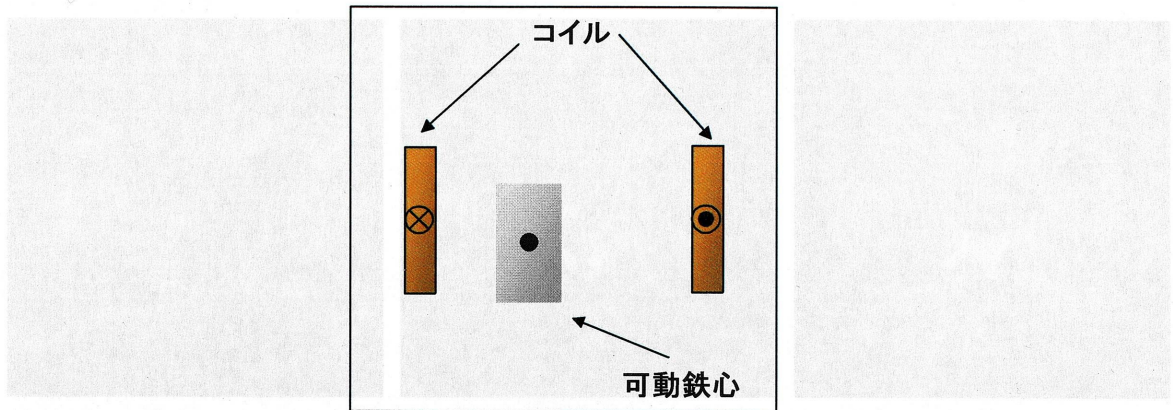
ラットフォームとして、システムのインタラクティブ性を確保していた。このシステムが開発されたのは、約 10 年前であり、現在は計算機性能が飛躍的に向上した。そのため、市販の汎用的な PC を用いてもインタラクティブな可視化が行えるようになっており、当研究室でも市販の汎用的な PC を用いてインタラクティブな可視化が行えるようなシステムを開発した[3]。

また、可視化の分野に Virtual Reality(以下 VR)技術を応用した可視化システムが登場している[8]。これらは特殊なインターフェースや、高価なワークステーションを用いることにより、仮想現実空間の中でコンピュータと人間の間における情報交換を実現している。そして、直接そういった情報交換を行うことで、人間に対して直感的に現象を把握させることを可能にしている。当研究室でも、VR 技術を応用した電磁場を対象とした可視化システムを開発した[9]。そのシステムは、1) 高価なグラフィックワークステーションを用いたものである、2) 3次元の電磁場を扱っている、3) 電気機器を構成する部品などの位置を変更しながら、そのときの磁場分布を表示可能である、といった特徴を有したものであった。3)は、観察者が電気機器を構成する部品の配置をコンピュータ上で変更し、そのときの磁場分布を観察することができることを示している。こういったシステムは、電気機器設計や電磁気学教育へ応用することが期待され、開発された。しかし、当時のワークステーションの性能においては、3次元電磁場において物体の配置を変更した際、そのときの物理量分布を表示するのに、約 18 秒をシステムは要しており、インタラクティブな観察とはいえない結果であった。また、電磁場現象を観察する際に重要な物理量である磁束密度分布の表示ができておらず、これら 2 つの課題が残っていた。

そこで、当研究室では、先の 2 つの課題を克服したインタラクティブ可視化システムを開発した[4]。このシステムは、2次元電磁場において、観察者がコンピュータ上で鉄心などの物質を任意位置に移動・変形させることができ、即座にその磁束密度分布や等電位分布などが観察できるようになっている。また、インタラクティブに磁気ベクトルポテンシャル分布、磁束密度分布、磁束線、磁束密度ベクトルを単独で表示、または同時表示することが可能で

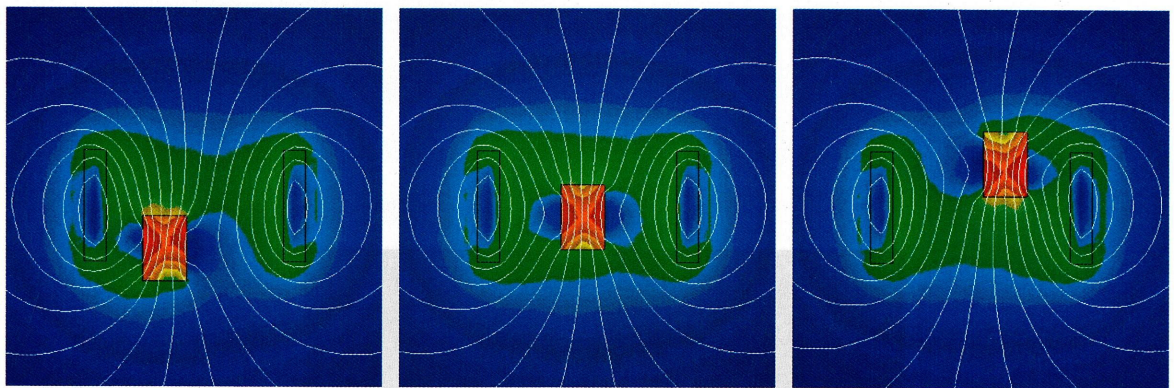
ある。このシステムは、市販の汎用的な PC を用いても 0.05 秒で磁場分布を計算・表示することを実現しており、インタラクティブ性を確保したものであった。また、このインタラクティブシステムに更なる機能の追加として、物体の回転機能が付加され、システムの拡張が行われた[10]。このように開発および拡張されたシステムを図 1-1 のモデルに適用し、そのときの磁場分布を表示した例を図 1-2 に示す。図 1-2 は、図 1-1 のモデルのコイルに電流を与え、その際に鉄心の位置やサイズ、または角度といった設計変数を変更した際の磁場分布を表示したものである。図 1-2 に示すようなインタラクティブな観察から、電磁気学学習者は、その時の磁場や電場がどういったものであるかを直感的に判断することができ、磁場や電場の理解に役立てることができる。一方、電気機器設計者は要求を満たす位置や形状を探ることができる。このような物体の位置、サイズ、形状、回転というような機能を持つシステムは、電磁気学教育や電気機器設計に有用であると考えられるが、次に示す課題が残されていた。開発されたインタラクティブシステムは、2次元の電磁場のみにしか対応しておらず、3次元の電磁場には対応していない。

一方、一般的な電磁場を可視化するシステムや上述の 2次元電磁場を扱うインタラクティブ可視化システム[4]では、電磁力といった力情報は矢印、またはコーンなどを用いて表示されているだけであり、その大きさや向きの情報を観察者は観察するだけであった。しかし、我々人間は力情報については視覚で認識するのではなく、手などの体の一部を用いて認識する。そのため、矢印などの表示では、観察者はどの程度の力が働いているのかを知ることは容易ではない。そこで、観察者が電気機器の部品の位置変更を行いながら、磁場分布を観察できることに加え、電磁場において生じた電磁力を感じることも可能なシステムを提案する。ここで、電磁力を観察者に提示するために、力をフィードバックすることができる触覚インターフェース(Haptic Interface)を用いる[5]。次節では、この触覚インターフェースについて言及する。

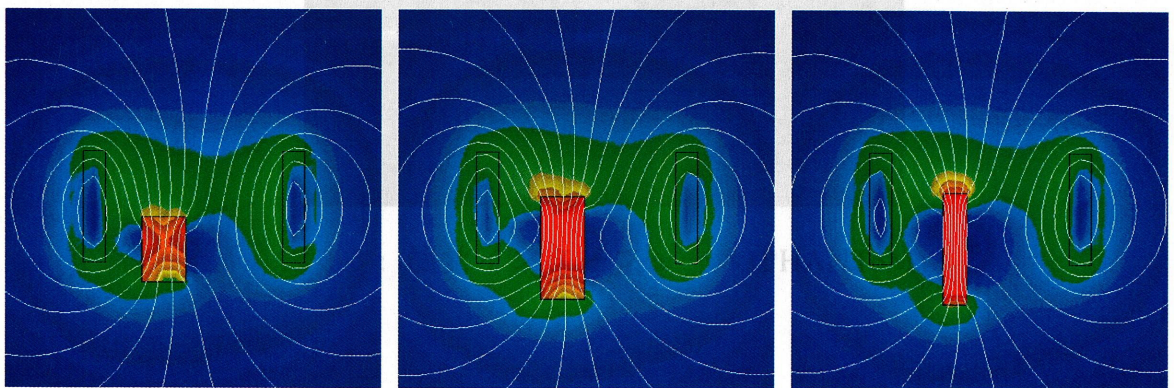


(3) 物体の角度 図 1-1: 適用モデル 密度分布と磁束線

図 1-2: 物体の位置やサイズ、角度を変更した場合の観察例

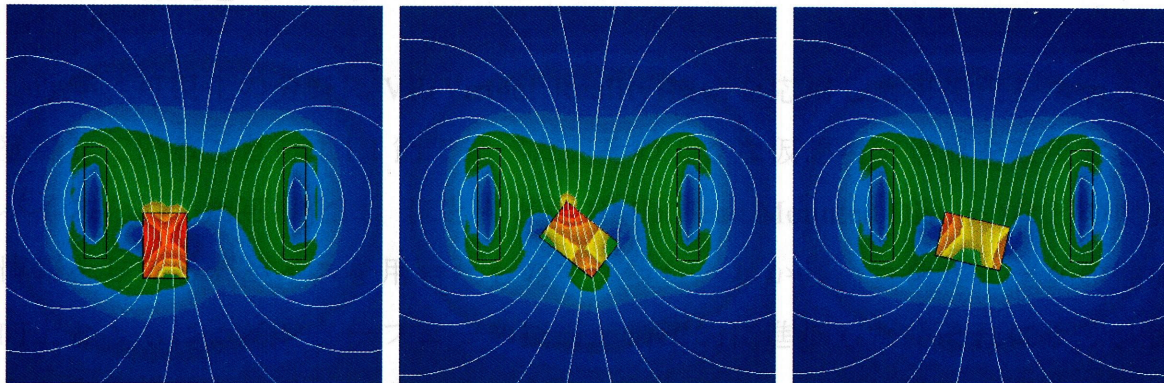


(1) 位置を変更した時の磁束密度分布と磁束線



(2) 物体のサイズを変更した時の磁束密度分布と磁束線

1.1.2 触覚インターフェース



(3) 物体の角度を変更した時の磁束密度分布と磁束線

図 1-2：物体の位置やサイズ、角度を変更した場合の観察例

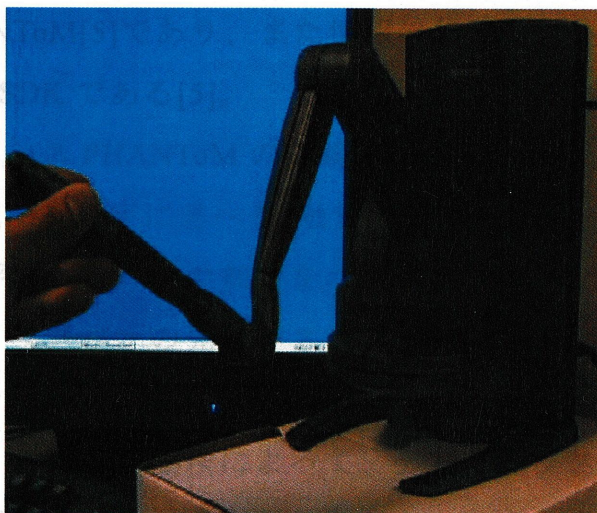


図 1-3：触覚インターフェース(PHANTOM)

医療分野・・・遠隔手術や仮想空間上においての手術シミュレーションなどのトレーニング

芸術分野・・・PC上で仮想的に絵画や彫刻が可能

1.1.2 触覚インターフェース

近年、可視化の分野に VR(Virtual Reality)技術を応用した可視化システムが登場していることを 1.1.1 節で述べた。そのような仮想現実世界を表現するデバイスを用いた可視化は、ほとんどが HMD(Head Mounted Display)などの視覚情報を与えるデバイスを用いたものであった。しかし、コンピュータの性能向上とともに、インターフェース技術が飛躍的に進歩した。それにより、従来非常に複雑な感覚であるために実現されていなかった触覚を表現するデバイス、Haptic Interface(触覚インターフェース)が現在では登場している[5][8](図 1-3 参照)。

1.1.1 節でも述べたが、本研究では、コンピュータ上において観察者が触覚インターフェースにより電気機器を構成する部品の変更を行い、それに伴い変化する磁場分布の観察、およびその際に部品に働く電磁力を感じることができるシステムを提案する。提案するシステムで使用する触覚インターフェースは PHANToM[5]であり、また情報の伝達を行うために使用するライブラリは GHOST SDK である[5]。

触覚インターフェース PHANToM の外観を図 1-3 に示し、触覚インターフェース PHANToM の説明を以下に述べる。触覚インターフェース PHANToM は、スタイラスペンと呼ばれるペンの部分をユーザがシャープペンのように持つことで、そのスタイラスペンの先にシステムがフィードバックする力をユーザは感じることができる。また、観察者はスタイラスペンによって 3 次元の座標入力を行える。これらの操作によって、提案するシステムでは、ユーザがスタイラスペンで物体の位置を変更しながら、そのときに生じる電磁力を感じることができる。触覚インターフェース PHANToM は、現在様々な分野で活躍が期待され、以下に示すような分野で応用されている[5][11][12]。

医療分野・・・遠隔手術や仮想空間上における手術シミュレーションなどのトレーニング

芸術分野・・・PC 上で仮想的に絵画や彫刻が可能

エンターテインメント・・・ゲームなどにおいて仮想世界とのやり取りが可能
ビジネス・・・コンピュータ上の仮想の商品を触ってもらい、実物を製作する前に商品を知ることが可能

数値データの可視化・・・分子の構造分析など

触覚インターフェースを使用することにより、ユーザは実際に物に触る、また力を感じるといったことができる。そのため、従来の視覚だけを用いた可視化よりも、触覚や力覚を用いた方が上述の分野(医療、芸術、エンターテインメント、ビジネス、可視化)においては、現象の理解や興味の促進につながる。例えば、医療分野においては、新人の医師が手術のトレーニングを行う際、実際の人間の体でトレーニングを行えば、非常に危険であり、失敗などは許されない。そこで、人間の皮膚の弾力性や内臓の情報をコンピュータ上で表現したもので新人医師が手術のトレーニングを行えば、実際に人間に手術をするわけではないので安全性が保障される。また、そのようなトレーニングの際に、医師がメスで皮膚などを切るといった時、人間の皮膚の感覚を力のフィードバックにより表現すれば、視覚だけの仮想手術のトレーニングよりもよりリアルになり、手術に臨場感を増すことが可能となる。また、分子の構造分析などにおいても、触覚インターフェースによって分子の間で働く力を模擬すれば、実際に分子に働く力を観察者は自分の手で感じるができる。それにより、観察者の分子構造に関する理解は、単に数値データを可視化したただけよりも深まることが期待できる。このように触覚インターフェースを用いて、ユーザが触覚で感じる情報を視覚によって得る情報に組み合わせれば、対象とする現象の理解をさらに深めることにつながる。

上述の理由から、触覚インターフェースを電磁場に応用し、仮想的に電磁力をユーザが感じる事ができれば、磁場分布を観察するだけよりも、不可視現象である電磁場に対してユーザの興味や理解を促進することが期待できる。

1.2 本研究の目的

1.1 節で述べたように、本研究室では、擬似カラー表示などを用いて電磁場を可視化するためのシステムを約 10 年前から開発してきた。そういったシステムは、電磁場の有限要素解析結果を対象とし、スカラー量およびベクトル量をステレオ観察でき、また高価なグラフィックワークステーションを用いたものであった。そしてその後、VR 技術を用いた可視化システムやその問題点を取り除いた電磁気学教育や電気機器設計に向けた 2 次元電磁場インタラクティブ可視化システムが開発されてきた。

上記の開発されてきたインタラクティブ可視化システムや一般的な電磁場を可視化するシステムでは、磁場分布は擬似カラーで表示され、電磁力といった力情報は矢印やコーンで表示されているだけであった。しかし、我々人間は電磁力などの力情報は、実際に体の一部を用いて認識する。そこで、1.1 節で述べたように他の分野で実践されている力のフィードバックシステムを電磁場の分野に応用し、観察者が電磁場において生じた電磁力を感じ、また同時に磁場分布を観察することが可能なシステムを本研究では提案する。そのようなシステムが完成すれば、観察者は場において生じる電磁力を自分の手で感じることができ、また同時に磁場分布を観察することができる。これにより、磁場分布を観察するだけよりも観察者の興味を促進でき、より電磁場に対する理解を深めることができると思われる。

ここで、従来のインタラクティブ可視化システム[4]は、2 次元の電磁場を対象としており、扱っていた物理現象は現実のものとは大きく異なっている。そのため、従来システムのような 2 次元場を扱ったものよりも、より実用的である 3 次元電磁場を対象としたシステムの開発が現在望まれている。

そこで本研究では、まず従来の 2 次元インタラクティブ可視化システム[4]に、触覚インターフェースを用いて電磁力を観察者にフィードバックする機能を追加することを第 1 の目的とする。そして、その 2 次元電磁場に対応したインタラクティブシステムを 3 次元電磁場に対応できるように拡張を行うことを第 2 の目的とする。この 2 つが本研究の主たる目的である。

第2章 提案インタラクティブシステム

本章では、2.1 節で提案インタラクティブシステムの概要、そして 2.2 節では、提案インタラクティブシステムで用いる物理量算出手法について述べる。

2.1 提案インタラクティブシステムの概要

本節では、提案インタラクティブシステムの概要について述べる。まず、2.1.1 節で提案インタラクティブシステムの構成について述べる。2.1.2 節では、提案システムで用いている物理量を算出する補間手法について 2 次元電磁場の例を用いて説明する。

2.1.1 提案インタラクティブシステムの構成

図 2-1 に示すように、提案システムは大きく分けて、磁場分布と電磁力を計算するパーソナルコンピュータ(PC)、ユーザに計算した磁場分布を表示するディスプレイ、計算された電磁力のフィードバックをユーザに伝える触覚インターフェース、およびイベント処理を操作するマウスから構成されている。ここで、触覚インターフェースとして PHANToM[5]を、そして PHANToM に力情報を送る、可動物体の座標値を送るといった情報の制御を行うライブラリとして GHOST SDK[5]を使用している。

次に、提案システムの処理手順を図 2-1 に示すシステムの構成とシステムの使用例(図 2-3,2-4 参照)を用いて説明する。適用したモデルを図 2-2 に示す。2 次元のモデルも 3 次元のモデルもコイルの中にある鉄心が移動できるモデルである。提案システムでは、まずユーザが PHANToM を用いて可動物体の位置を指定する。具体的には、ユーザが PHANToM のスタイラスペンを図 2-3,2-4

に示すようにペンを持つように持ち、そのユーザがスタイラスペンを移動させることにより可動物体の位置を変更する。そして、PHANToM から PC に指定した位置の座標情報が送られ、PC はその座標位置における電磁力と磁場分布をそれぞれ補間手法により計算する。この補間手法については、2.1.2 節で 2 次元場の場合について述べ、さらに 2.2 節で 3 次元場の場合について述べる。最後に、PC が計算結果である電磁力に関する情報を PHANToM に送り、また磁場分布をディスプレイに出力する。このようにして、ユーザは自分の要求する位置に可動物体(電気機器を構成する部品)を置き、そのときの磁場分布を自分の目で観ることができ、それと同時に電磁力を自分の手に感じるることができる。また、ユーザが表示したい磁場分布を変更する場合などのイベント処理は、マウスを用いてポップアップメニューにより決定する。図 2-3,2-4 においてユーザは、ディスプレイで電磁場における磁束密度分布を観察し、同時に右にある PHANToM でその時の可動鉄心に働く電磁力を感じている。また、3 次元の磁場分布の表示に 3D 裸眼ディスプレイ [13]を用いている。これにより、3 次元のステレオ画像を生成し、ユーザの空間に対する理解、つまり奥行きなどに対する理解を助けることができる。

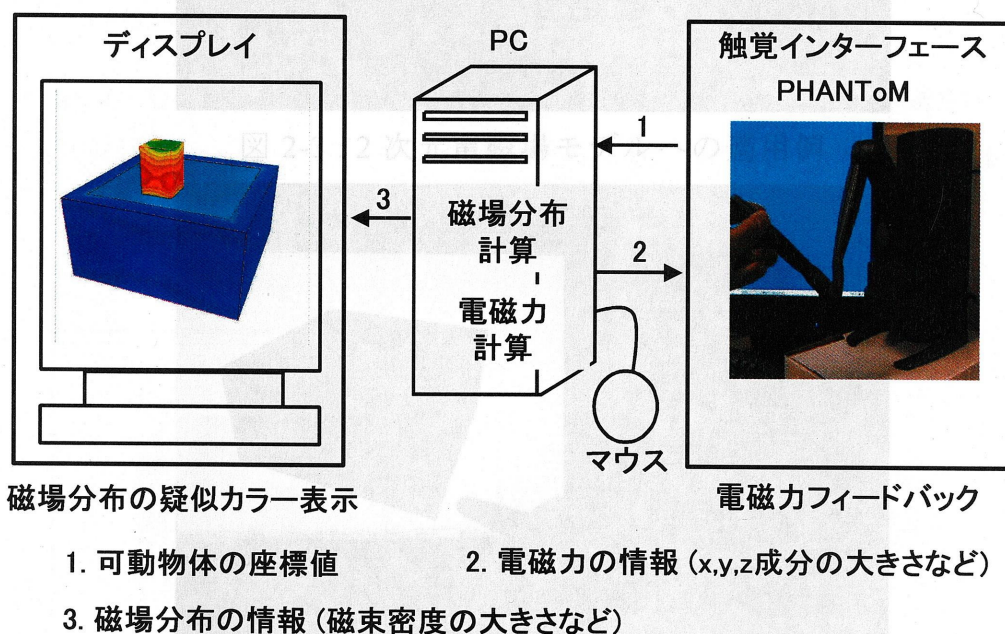
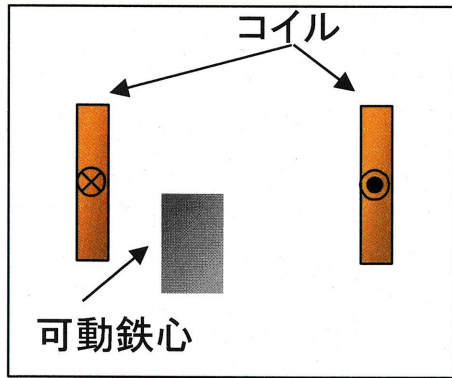
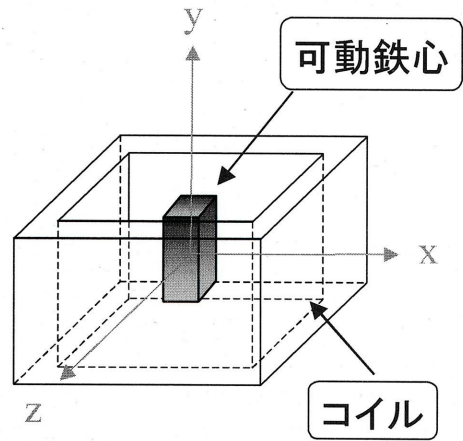


図 2-1：提案システムの構成

図 2-4：3次元電磁場モデルへの適用例



(1) 2次元電磁場モデル



(2) 3次元電磁場モデル

図 2-2 : 適用した 2 次元および 3 次元の電磁場モデル

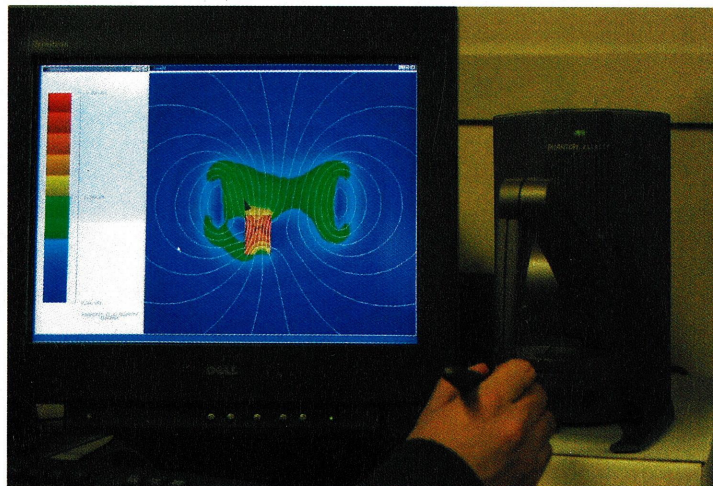


図 2-3 : 2次元電磁場モデルへの適用例

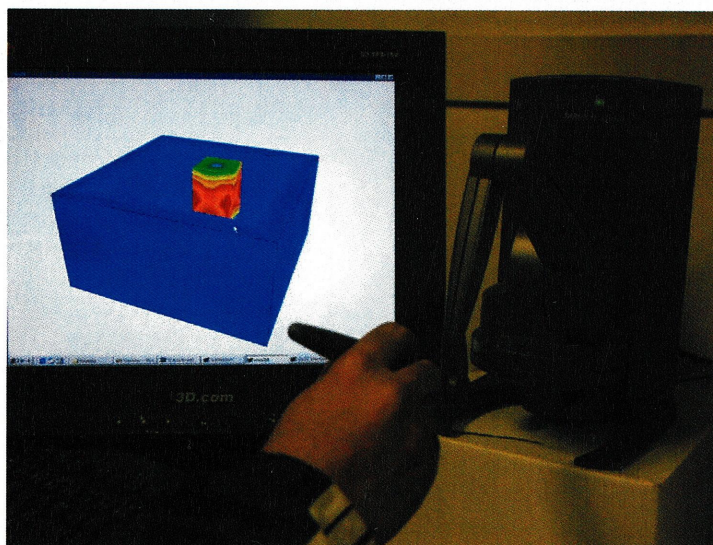


図 2-4 : 3次元電磁場モデルへの適用例

2.1.2 補間手法

提案システムでは、2次元電磁場の場合では、文献[4]で提案された補間手法を用いて磁場分布の算出を行っている。また3次元の場合の磁場分布の算出は、その補間手法を3次元モデルに対応できるように拡張して用いている。ここでは、提案システムで用いる物理量算出手法を説明するために、2次元電磁場の磁場分布および電磁力を求める手法について述べる。この2次元電磁場の場合に用いる算出手法は、文献[4]で提案された手法であり、従来システムで用いられているものである。本節で2次元場における処理を示した後に、2.2節で3次元場の場合の磁場分布および電磁力を算出する手法について詳しく述べる。

次節以降では、初めに、磁場分布を算出する手法について説明し、次に電磁力を算出する手法について説明する。説明は、可動物体が予め解析を行った位置ではなく、ユーザが要求する任意の位置に物体を置いたときの磁場分布を求める場合について行う。説明には、図2-2に示すようなコイルの中に鉄心があり、この鉄心の位置をユーザが変更できるモデルを用いる。前提として、本システムを使用する前に、補間に用いる解析結果として、可動物体(鉄心)がA, B, C, DおよびEのそれぞれの位置にある場合の有限要素解析結果が用意されているものとする。予め用意する各解析結果の鉄心位置と実際に補間により求める任意の位置Mを図2-5に示す。

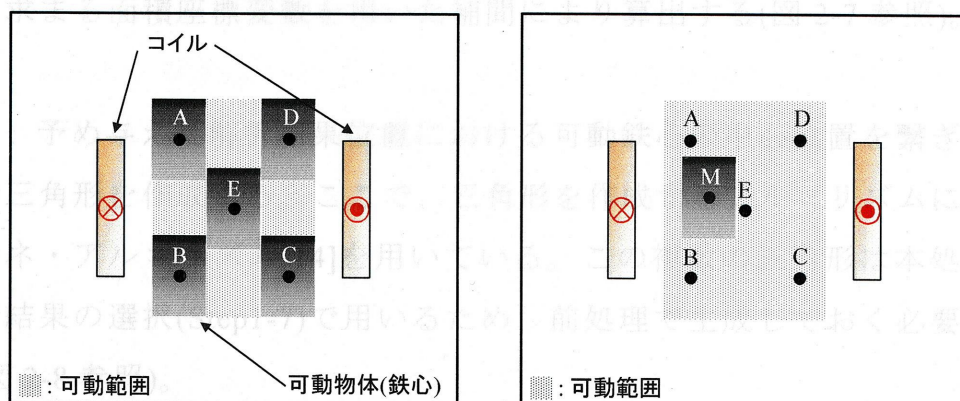


図 2-5： 予め解析を行っておく位置(鉄心の中心位置)A-E と任意物体位置 M

2.1.2.1 磁場分布算出手法

提案システムの磁場分布算出の処理は大きく分けて、補間用のデータを用意しておく前処理と物体の位置を変更するごとに物理量の補間を行う本処理から構成されている。まず、前処理について詳しく説明していき、その後、本処理について詳しく説明していく。

前処理

Step1-1 : 予め準備した各解析結果に対し、固定物体であるコイルと可動物体(鉄心)の位置関係から、図 2-6 で示すように 0~9 のブロックに分割する。その際、各々の解析結果間においてブロックの繋がり関係、すなわちブロック番号の対応付けが等しくなるように分割する。図 2-6(a)に解析結果位置 A でのブロック分割を示す。

Step1-2 : 0~9 の各ブロックを $i \times j$ のグリッドに分割する。予め準備した有限要素解析結果から、それぞれのグリッド頂点の物理量値 $V_{pa,ij}$ を算出する。ここで、添え字 p は予め用意した解析結果の鉄心位置を示す指標であり、この例では位置 A~E をとる。添え字 a は Step1-1 で分割したブロックを示す指標であり、この例では 0~9 までの値をとる。解析結果位置 A においてブロック 1 をグリッド分割した例を図 2-6(b)に示す。ここで、グリッド点の物理量は、グリッド点を含む要素に注目し、その位置関係から求まる面積座標変数を用いた補間により算出する(図 2-7 参照)。

Step1-3 : 予め与えた解析結果位置における可動鉄心の中心位置を繋ぎ、複数の三角形を作成する。ここで、三角形を作成するアルゴリズムにはドローネ・アルゴリズム[14]を用いている。この複数の三角形は本処理の解析結果の選択(Step1-7)で用いるため、前処理で生成しておく必要がある(図 2-8 参照)。

本処理

Step1-4 : ユーザがスタイラスペンなどで、可動範囲内の任意の位置 M に可動物体を移動させる。

Step1-5 : 可動物体が位置 M にある状態において、表示領域を図 2-6(a)で定義したブロック 0~9 と同じ対応付けでブロック分割する(図 2-6(c)参照)。

Step1-6: Step1-5 で構成した 0~9 のブロックに対して、前処理(Step1-2)で構成した 0~9 の各ブロックに施した分割と同じ分割数に各ブロックをグリッド分割する。そして、その時の各グリッド頂点上における物理量値を $V_{Ma,ij}$ と定義する(図 2-6(d)参照)。

Step1-7 : 補間計算に用いる解析結果の選択を行う。解析結果が 3 つ以上用意されているなら、用意されている解析結果から可動物体位置を含む三角形の 3 頂点における解析結果を選ぶ。この際に Step1-3 で予め作成した三角形を用いる(図 2-8 参照)。例えば、図 2-7 のように三角形 ABE に可動物体位置 M が含まれる場合、A,B,E の解析結果を選ぶ。

Step1-8 : Step1-7 において選択された三角形の 3 頂点と補間位置 M の位置関係から三角形の面積座標変数 $S_1 \sim S_3$ を算出する。三角形の面積座標変数を図 2-9 に示す。

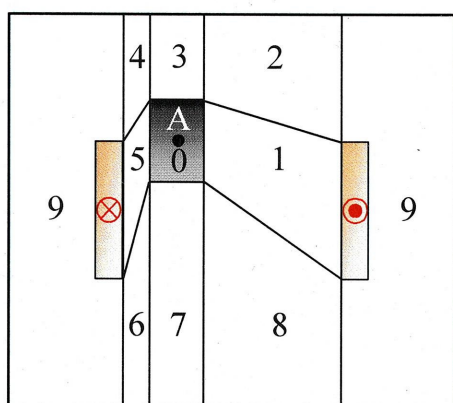
Step1-9 : Step1-6 で定義したグリッド頂点上の物理量値 $V_{Ma,ij}$ を前処理で算出した物理量値 $V_{pa,ij}$ と Step1-8 で算出した面積座標変数 $S_1 \sim S_3$ 、(1)式で示す面積座標変数を重みとした補間式により求める。

$$V_{Ma,ij} = V_{1a,ij} \cdot S_1 + V_{2a,ij} \cdot S_2 + V_{3a,ij} \cdot S_3 \quad (1)$$

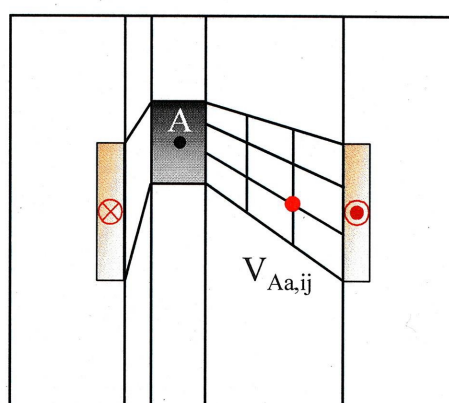
この処理を全グリッド頂点に対して行う。

最終的に全グリッド頂点上の近似物理量が求まり、近似物理量分布を得ることができる。このグリッド頂点の近似物理量を、ディスプレイ上に擬似カラーで表示することによりユーザは任意位置に鉄心を置いたときの 2 次元の磁場分布を観察することができる。

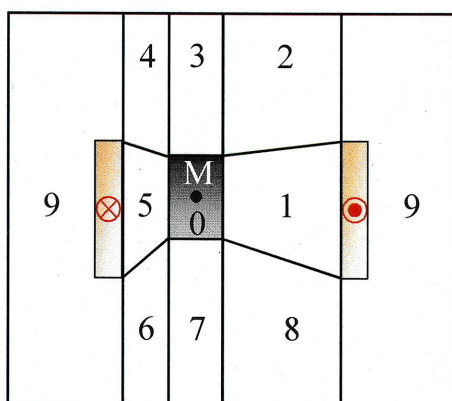
また、本節では前処理の前に有限要素解析結果を用意しておき、その結果を用いて補間しているが、他の解析手法により得られた解析結果を用いても、本節で示した手法により近似物理量分布を求めることができる。つまり、Step1-2 により得られたグリッド頂点上の物理量を他の解析手法を用いて算出しておけば、他の解析手法を用いて解析結果を与えた場合にも応用できる。



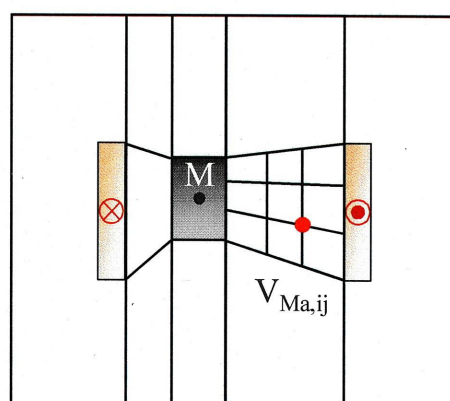
(a) A におけるブロック分割



(b) ブロック 1 のグリッド分割



(c) M におけるブロック分割

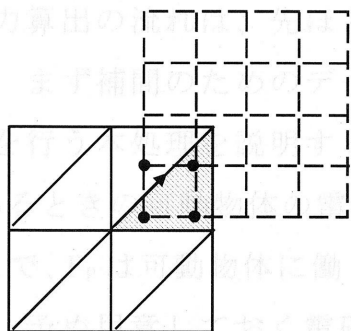


(d) ブロック 1 のグリッド分割

図 2-6：各鉄心位置におけるブロック・グリッド分割図

2.1.2.2 電磁力算出手法

提案システムの電磁力算出手法は、図 2-7 に示した磁場分布算出の流れと基本的に相同じである。まず補間位置 M の解析結果を用意しておく前処理について説明し、次に補間計算について説明する。ただし、前処理の前に、可動物体位置が A~E にあるときの電磁力 F_{Px} (F_{Py} , F_{Pz}) を節点法 [15] により求めておく。ここで、 F_{Px} は可動物体に働く電磁力の総和を示している。今回の説明の場合では、 F_{Px} は、用意しておく電磁力は、用意しておく解析結果



注目する要素 ●:グリッド点 点線:グリッド

三角形要素

図 2-7：有限要素解析結果からの物理量の算出

実際のシステムでは、共通処理は一度だけ実行するようにプログラミングしている。以下の処理説明中では、その共通処理を示すために、各処理説明の最初に(Step-に対応)と示す。

前処理

Step2-1：予め与えた解析結果位置を調べ、複数の三角形をドロップメニューシステム [14] を用いて作成する。この三角形は本処理の解析結果の選択

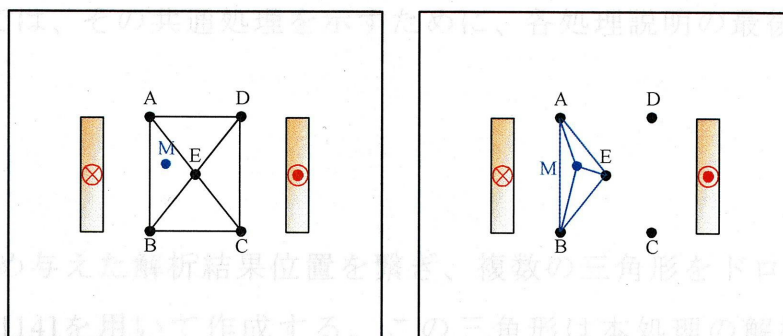


図 2-8：前処理で生成された三角形(左)と補間位置 M を含む三角形 ABE(中央)

本処理

Step2-2：ユーザがスタイラスペンが可動物体内の任意の位置 M に可動物体を移動させる。(Step1-4 参照)

Step2-3：補間計算に用いる解析結果の選択を行う。解析結果が 3 つ以上用意されているなら、用意されている解析結果の中から可動物体位置を含む三角形の 3 頂点における解析結果を選択する。この際に Step2-1 で予め作成した三角形を用いる(図 2-8 参照)。例えば、図 2-8 のように三角形 ABE に可動物体位置 M

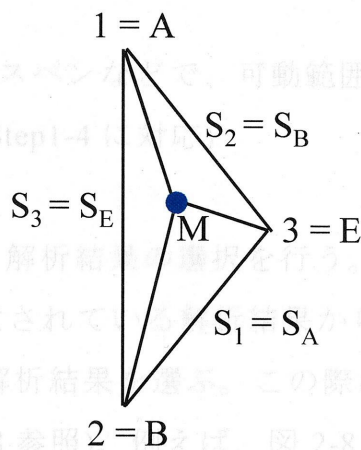


図 2-9：三角形の面積座標変数 $S_1S_2S_3$ (右)

2.1.2.2 電磁力算出手法

提案システムの電磁力算出の流れは、先ほど示した磁場分布算出の流れと基本的には同じである。まず補間のためのデータを用意しておく前処理について説明し、次に補間を行う本処理を説明する。ただし、前処理の前に、可動物体位置が A~E にあるときの可動物体の電磁力 $F_p=(F_{px},F_{py})$ を節点力法[15]により求めておく。ここで、 F_p は可動物体に働く電磁力の総和を示している。今回の説明の場合では、予め用意しておく電磁力は、用意しておく解析結果位置数に等しく、5 つである。ここで、 P は物体の位置を示す指標であり、 F_{px} 、 F_{py} は、物体位置 P における電磁力の x 成分、 y 成分である。ここで、電磁力算出と磁場分布算出で共通となる処理が含まれているため、実際のシステムでは、共通処理は一度だけ実行するようにプログラミングしている。以下の処理説明中では、その共通処理を示すために、各処理説明の最後に(Step~に対応)と示す。

前処理

Step2-1 : 予め与えた解析結果位置を繋ぎ、複数の三角形をドロネー・アルゴリズム[14]を用いて作成する。この三角形は本処理の解析結果の選択(step2-3)に用いる(図 2-8 参照)。(Step1-3 に対応)

本処理

Step2-2 : ユーザがスタイラスペンなどで、可動範囲内の任意の位置 M に可動物体を移動させる。(Step1-4 に対応)

Step2-3 : 補間計算に用いる解析結果の選択を行う。解析結果が 3 つ以上用意されているなら、用意されている解析結果から可動物体位置を含む三角形の 3 頂点における解析結果を選ぶ。この際に Step2-1 で予め作成した三角形を用いる(図 2-8 参照)。例えば、図 2-8 のように三角形 ABE に可動物体位置 M が含まれる場合、A,B,E の解析結果を選ぶ。(Step1-7 に対

応)

Step2-4 : Step2-3 において選択された三角形の3頂点と補間位置 M から三角形の面積座標変数 $S_1 \sim S_3$ を算出する。三角形の面積座標変数を図 2-9 に示す。(Step1-8 に対応)

Step2-5 : Step2-4 で算出された面積座標変数 $S_1 \sim S_3$ と予め求めておいた可動物体の電磁力 F_P を用いて、可動物体の任意位置における各物体に働く電磁力 F_{Mx} 、 F_{My} を(2)式により求める。

$$\begin{pmatrix} F_{Mx} \\ F_{My} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \end{pmatrix} \cdot S_1 + \begin{pmatrix} F_{2x} \\ F_{2y} \end{pmatrix} \cdot S_2 + \begin{pmatrix} F_{3x} \\ F_{3y} \end{pmatrix} \cdot S_3 \quad (2)$$

以上の処理により任意の物体位置において、可動物体に働く電磁力の補間値を求めることができる。ここで電磁力の算出は、ベクトルの大きさと角度を用いて補間するのではなく、各成分で補間を行うことにより鉄心に働く電磁力を算出する。これは、大きさと角度を用いて補間を行うと、物理現象と対応が取れなくなる場合があるためである。例えば、図 2-5 のモデルにおいて、A,B,C,D の位置に鉄心を置いたときの電磁力が用意されており、鉄心がコイルの内側の中心 E にある場合の電磁力を補間により算出することを考える。鉄心を E の位置に置いたときに、解析を行って求めた鉄心に働く電磁力は 0 になる。ここで、角度と大きさを用いて A~D の位置に鉄心を置いたときの電磁力を補間することにより E の電磁力を求めると、電磁力は 0 にはならない。従って、解析結果と違った結果となり、実際の現象を模擬できない。各成分を用いて A~D の位置に鉄心を置いたときの電磁力を補間すると 0 になる。このような結果から、提案システムでは、電磁力の各成分ごとに補間を行っている。本節で補間により求めた電磁力は、PHANToM のスタイラスペンを通じてユーザの手にフィードバックされる。

2.1.2.3 補間手法に関する検討

2.1.2.1 および 2.1.2.2 節に示すような手順で近似物理量の算出を行うことにより、ユーザは PHANToM を用いて任意位置に可動物体を移動させ、そのときの磁場分布を観察し、同時に可動物体に働く電磁力を感じる事ができる。2.1.2.1 および 2.1.2.2 節で示した前処理は、システムの起動時に一度行えばよい。そして、本処理は、鉄心の位置が変更するたびにを行う。次の 2.2 節では、提案システムで用いている 3 次元場において近似物理量を算出する手法の説明を行うが、その前に 2.1.2.1 および 2.1.2.2 節で説明した補間法についての検討を加えておく。

提案システムでは、2次元の場合は三角形の面積座標変数を用いて、3次元の場合は四面体の体積座標変数を用いて物理量の補間を行っている。これは、次に示す3つの理由からである。

1) 計算時間短縮の観点

物理量を補間する際、解析結果を予め多く用意しておき、それら全てを用いて補間を行うと計算時間がかかると考えられる。提案システムでは、インタラクティブ性を確保しなければならない。そこで、予め用意しておいた解析結果の幾つかを用いて補間を行うことにより計算時間を削減している。その際には、補間により求めた近似物理量に影響を及ぼさない、つまり可動物体を置いた位置から遠い位置の解析結果は、補間に用いないことが望ましい。

2) 物理量変化の連続性を保持する必要性

1)の理由から、可動物体を置いた位置に近い、つまりその解析結果が補間に大きく影響すると考えられる解析結果を用いて補間を行う方法が考えられる。そういった補間法として、解析結果をおいた位置と可動物体を置いた位置との距離を用いる方法、面積座標変数や体積座標変数を用いる方法などが考えられる。ここで任意の位置にある可動物体が、どこにあっても

その間で補間により求まる物理量の変化が連続になっていることが望ましい。ここで、図 2-10 を用いて物理量変化の連続性について説明する。図で、A,B,C,D は解析結果を用意した位置を示し、M はユーザが指定する任意の位置を示している。図の M から M' に位置を変更した場合、A,B,C,D の 4 つから 3 つを選んでその補間を行う場合には、(a) の距離を重みとした場合、(b) の面積座標変数を重みとした場合のどちらも、補間に用いる解析結果は A,B,D から B,C,D へと変化する。その際、(a) では重みに使用する解析結果位置の 1 つが A から C に突然変化する。従って、これら 2 つの位置の解析結果が大きく違っていれば、物理量が不連続に変化してしまう。(b) では、A に対する重みが徐々に消え、最終的には 0 になり、その後に C の重みが徐々に増加するためにその 2 つの解が大きく違っていても、物理量が不連続に変化することは無い。従って、物理量変化の連続性を保つために、提案システムでは、面積座標変数および体積座標変数を用いた補間を行っている。

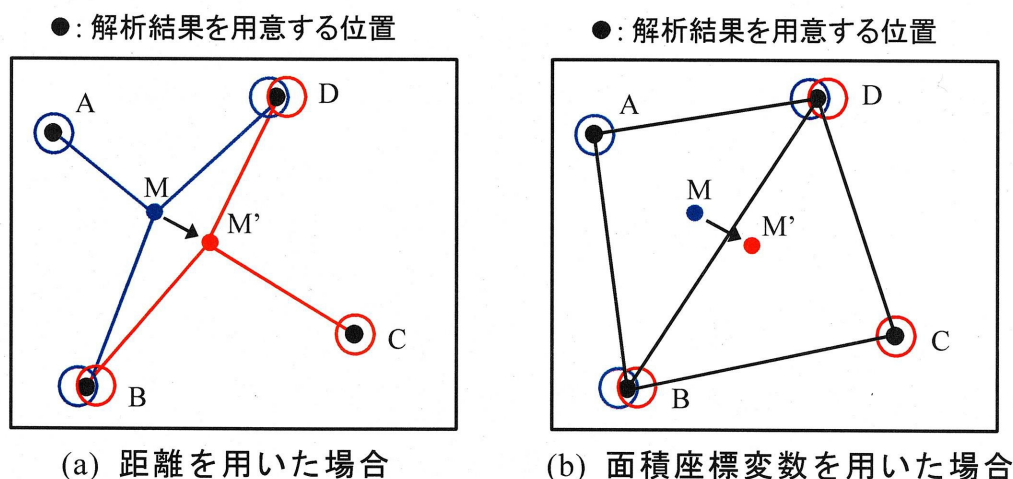


図 2-10：物理量変化の連続性

3) 任意数の解析結果にも対応可能

2) の理由から、2次元では、三角形や四辺形、3次元では四面体や六面体といった形状の面積座標変数および体積座標変数を補間に用いることが考えられる。ここで、補間により物理量を求める際には、任意数の解析結果を

用意した場合にも対応できた方がよい。三角形や四面体の形状は、ドローネ・アルゴリズム[14]があるために、任意数においてもその形状を作成することが可能である。しかし、四辺形や六面体では任意数においてはその形状を作成することができない。例えば、図 2-11(左)に示すように、5 点に解析結果を用意したとき、三角形ならば図 2-11(左)のように作成することができる。しかし、図 2-11(右)に示すように、四辺形ならば 4 辺の midpoint(図中赤丸で示す位置)にそれぞれ解析結果を与えなければならないため、任意数の解析結果を与えたときに対応することはできない。そこで提案するシステムでは、ドローネ・アルゴリズムによって、解析結果を与える位置を繋ぎ、2 次元では三角形、3 次元では四面体を生成する。これによって、任意数の解析結果を与えた場合にも対応できる。また、解析結果位置を繋いで生成する三角形や四面体は、解析結果を用意した際に生成しておけばよく、前処理に含むことができる。従って、本処理に含まなくてよいために、計算時間についても効率がよいという利点もある。

●: 解析結果を用意する位置

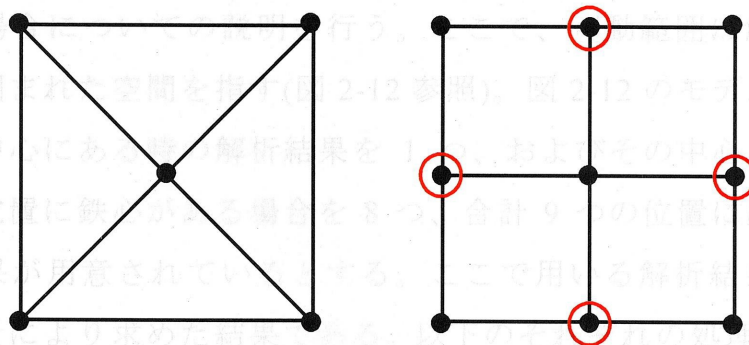


図 2-11：形状による解析結果位置の与え方の違い

前処理

Step3-1：予め準備してある各々の解析結果に対し、固定物体であるコイルと可動物体(鉄心)の位置関係から、図 2-13 で示すように表示領域を複数のブロックに分割する。その際、各々の解析結果間においてブロック

2.2 物理量算出手法

本節では、提案するシステムで用いている物理量算出手法について述べる。この手法は、2.1.2 節で 2 次元の例で説明した補間手法を 3 次元に拡張した手法である。3 次元の電磁場において、任意の位置に物体を置いたときの磁場分布および電磁力を算出する場合について説明を行う。まず 2.2.1 節では、提案する 3 次元電磁場において磁場分布を算出する手法について、2.2.2 節では、電磁力を算出する手法について述べる。

2.2.1 磁束密度分布

本節では、提案する 3 次元インタラクティブシステムにおける磁場分布算出の手法について説明する。提案する 3 次元インタラクティブシステムでは、磁場分布の算出には、2.1.2 節で示した 2 次元場で磁場分布を算出する手法を拡張したものをを用いる。基本的な処理の流れは 2 次元の磁場分布算出のものと同様である。まず可動物体(鉄心)が可動範囲内の任意位置にあるときの磁場分布を求める場合についての説明を行う。ここで、可動範囲は解析を行った複数の位置に囲まれた空間を指す(図 2-12 参照)。図 2-12 のモデルの場合、鉄心がモデルの中心にある時の解析結果を 1 つ、およびその中心を重心とする六面体の頂点位置に鉄心がある場合を 8 つ、合計 9 つの位置に鉄心を置いた場合の解析結果が用意されているとする。ここで用いる解析結果は、六面体辺有限要素解析により求めた結果である。以下のそれぞれの処理は、2 次元の磁場分布の算出処理と Step 番号で対応している(例えば Step1-1 と Step3-1 が対応している)。

前処理

Step3-1 : 予め準備してある各々の解析結果に対し、固定物体であるコイルと可動物体(鉄心)の位置関係から、図 2-13 で示すように表示領域を複数のブロックに分割する。その際、各々の解析結果間においてブロック

の繋がり関係が等しくなるように分割する。図 2-13 は鉄心がモデルの中心にあるときのブロック分割例である。

Step3-2：各ブロックを $i \times j \times k$ のグリッドに分割する。それぞれのグリッド頂点における物理量 $V_{Pa,ijk}$ を有限要素解析結果から算出する。ここで、添え字 P は予め用意した解析結果の鉄心位置を示す指標である。添え字 a はブロックを示す指標である。鉄心がモデルの中心位置にあるとき、1 つのブロックをグリッドに分割した例を図 2-14 に示す。ここで、グリッド点の物理量は、グリッド点を含む要素に注目し、その位置関係から求まる体積座標変数を用いた補間により算出する。算出の概念は 2.1.2.1 節のものと同じである(図 2-7 参照)。

Step3-3：ドローネ・アルゴリズム[14]により、予め準備しておいた各解析結果の位置(鉄心の中心位置)を繋ぎ、複数の四面体を生成する。ここで生成した四面体は、本処理で補間に用いる解析結果の選択(Step3-7)で用いる。生成した四面体の例を図 2-15(左)に示す。

本処理

Step3-4：ユーザがスタイラスペンなどで、可動範囲内の任意の位置 M に可動物体(鉄心)を移動させる。

Step3-5：可動物体が位置 M にある状態において、表示領域を前処理の Step3-1 で定義したブロックと同じ対応付けでブロック分割する。

Step3-6：Step3-5 で構成した各ブロックに対して、前処理(Step3-2)で各ブロックに施した分割と同じ分割数に各ブロックをグリッド分割する。そして、その時の各グリッド頂点上における物理量値を $V_{Ma,ijk}$ と定義する。

Step3-7：補間計算に用いる解析結果の選択を行う。前処理で生成された四面

体から任意位置 M を含む四面体を探索する(図 2-15 参照)。探索により見つかった四面体の 4 頂点の解析結果が磁場分布の補間計算に用いる解析結果として選択される。

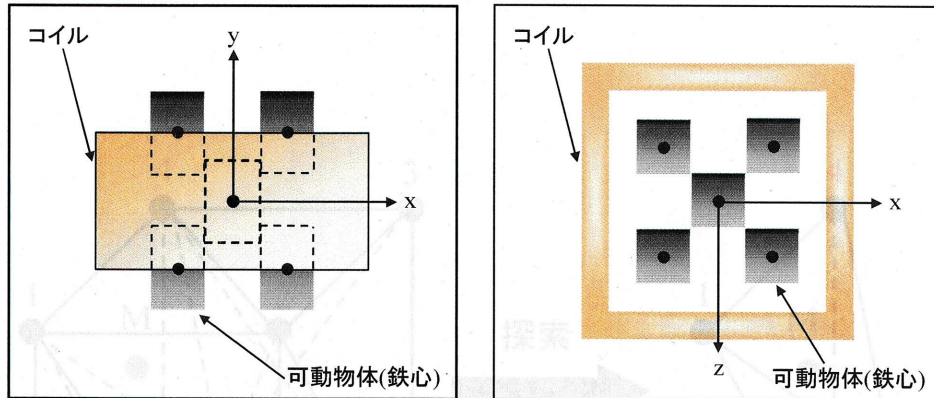
Step3-8 : 探索された四面体の 4 頂点と任意位置 M から四面体の体積座標変数を算出する。四面体の体積座標変数 $S_A \sim S_D$ を図 2-16 に示す。

Step3-9 : Step3-6 で定義したグリッド頂点上の物理量値 $V_{Ma,ijk}$ を前処理で算出した物理量値 $V_{Pa,ijk}$ と Step3-8 で算出した体積座標変数 $S_A \sim S_D$ から次式の体積座標変数を用いた補間式により求める(図 2-17 参照)。

$$V_{Ma,ijk} = V_{Aa,ijk} \cdot S_A + V_{Ba,ijk} \cdot S_B + V_{Ca,ijk} \cdot S_C + V_{Da,ijk} \cdot S_D \quad (3)$$

この処理を全グリッド頂点に対して行う。

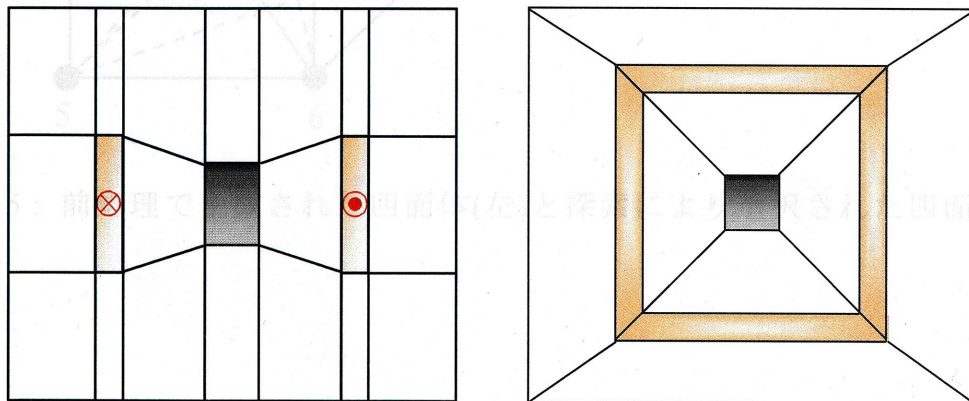
最終的に全グリッド頂点上の近似物理量が求まり、近似物理量分布を得ることができる。そのグリッド頂点の近似物理量を利用して、磁性体表面や断面の磁束密度分布を擬似カラーで表示する。それにより、ユーザは任意位置に鉄心を置いたときの 3 次元の磁場分布を観察することができる。



(a) 側面図

(b) 平面図

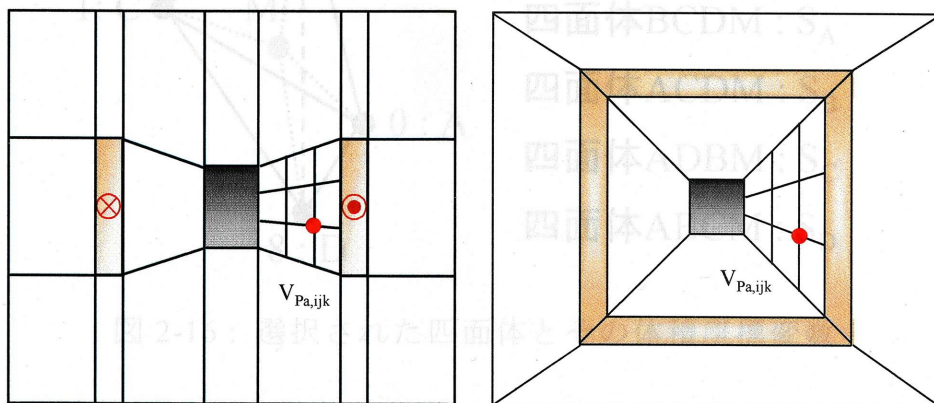
図 2-12： 予め用意する解析結果の鉄心の位置



(a) $z=0$ のときの断面

(b) $y=0$ のときの断面

図 2-13： 解析結果位置 $P(=0)$ のブロック分割



(a) $z=0$ のときの断面

(b) $y=0$ のときの断面

図 2-14： 一つのブロックをグリッド分割した例

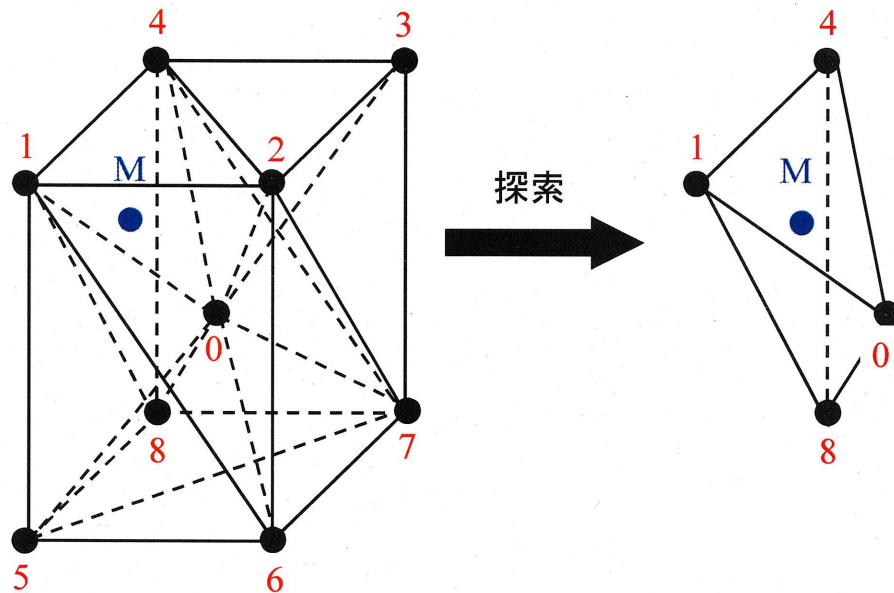
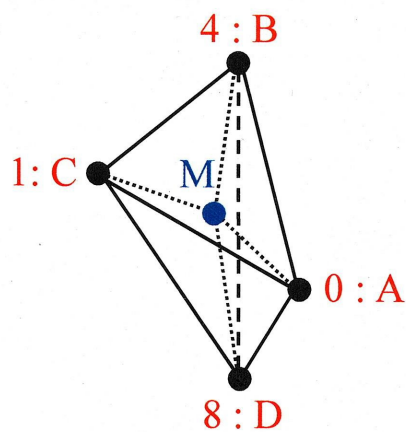


図 2-15 : 前処理で生成された四面体(左)と探索により選択された四面体(右)



四面体の体積座標変数

四面体BCDM : S_A

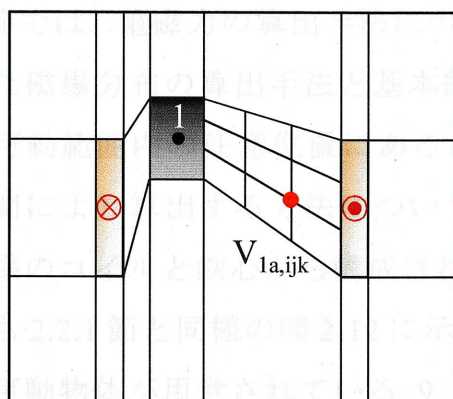
四面体ACDM : S_B

四面体ADBМ : S_C

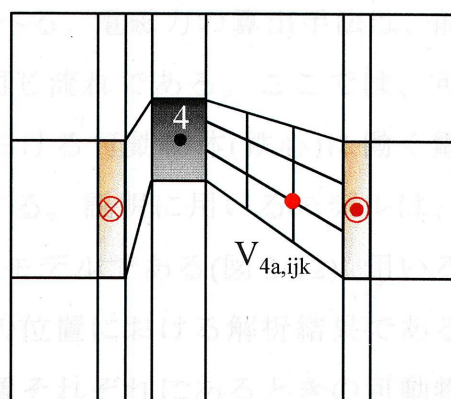
四面体ABCM : S_D

図 2-16 : 選択された四面体とその体積座標変数

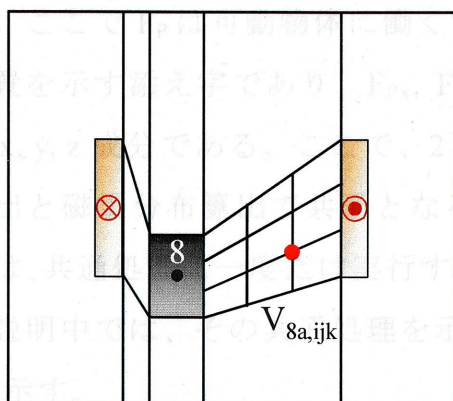
2.2.2 電磁力



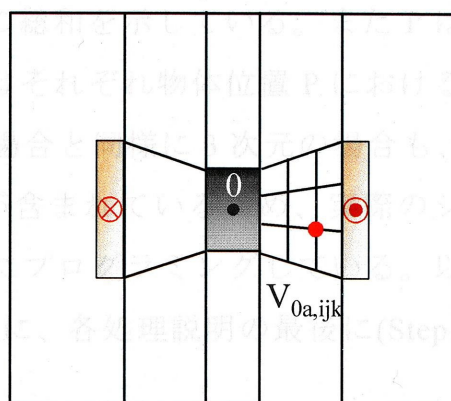
(a) 解析結果位置 A=1



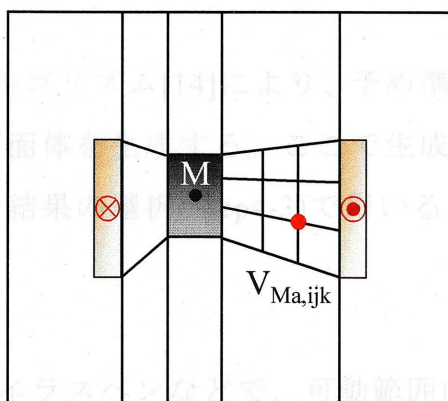
(b) 解析結果位置 B=4



(c) 解析結果位置 C=8



(d) 解析結果位置 D=0



(e) 補間位置 M

図 2-17 : 選択された解析結果位置 A-D (0,1,4,8)と補間位置 M におけるブロック・グリッド分割

Step4-3 ク・グリッド分割

解析結果の選択を行う。前処理で生成された四面体から任意位置 M を含む四面体を探索する(図 3-15 参照)。探索により見

2.2.2 電磁力

本節では、電磁力の算出手法について述べる。電磁力の算出手法は、前節で述べた磁場分布の算出手法と基本的には同じ流れである。ここでは、可動物体が可動範囲内の任意位置にある場合における可動物体(鉄心)に働く電磁力を補間により算出する方法について説明する。説明に用いるモデルは、前節と同様のコイルと鉄心から構成されているモデルである(図 2-12)。用いる解析結果も 2.2.1 節と同様の図 2-12 に示す 9 つの位置における解析結果であるとする。可動物体が用意されている 9 つの位置それぞれにあるときの可動物体に働く電磁力 $F_P=(F_{Px}, F_{Py}, F_{Pz})$ を有限要素解析結果から節点力法[15]により求める。ここで F_P は可動物体に働く電磁力の総和を示している。また P は物体の位置を示す添え字であり、 F_{Px} , F_{Py} , F_{Pz} はそれぞれ物体位置 P における電磁力の x, y, z 成分である。ここで、2次元の場合と同様に3次元の場合も、電磁力算出と磁場分布算出で共通となる処理が含まれているため、実際のシステムでは、共通処理は一度だけ実行するようにプログラミングしている。以下の処理説明中では、その共通処理を示すために、各処理説明の最後に(Step~に対応)と示す。

前処理

Step4-1 : ドローネ・アルゴリズム[14]により、予め準備しておいた各解析結果の位置を繋ぎ、四面体を生成する。ここで生成した四面体は、本処理で補間に用いる解析結果の選択(Step4-3)で用いる。(Step3-3 に対応)

本処理

Step4-2 : ユーザがスタイラスペンなどで、可動範囲内の任意の位置 M に可動物体(鉄心)を移動させる。(Step3-4 に対応)

Step4-3 : 補間計算に用いる解析結果の選択を行う。前処理で生成された四面体から任意位置 M を含む四面体を探索する(図 2-15 参照)。探索により見

つかった四面体の4頂点の解析結果が磁場分布の補間計算に用いる解析結果として選択される。(Step3-7に対応)

Step4-4: 探索された四面体の4頂点と任意位置Mから四面体の体積座標変数 $S_A \sim S_D$ を算出する。四面体の体積座標変数を図2-16に示す。(Step3-8に対応)

Step4-5: Step4-4で算出された図2-13に示す体積座標変数 $S_A \sim S_D$ と予め求めておいた可動物体の電磁力 F_P を用いて、可動物体の任意位置における各物体に働く電磁力 F_M を次式により求める。

$$\begin{pmatrix} F_{Mx} \\ F_{My} \\ F_{Mz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{Ax} \\ F_{Ay} \\ F_{Az} \end{pmatrix} \cdot S_A + \begin{pmatrix} F_{Bx} \\ F_{By} \\ F_{Bz} \end{pmatrix} \cdot S_B + \begin{pmatrix} F_{Cx} \\ F_{Cy} \\ F_{Cz} \end{pmatrix} \cdot S_C + \begin{pmatrix} F_{Dx} \\ F_{Dy} \\ F_{Dz} \end{pmatrix} \cdot S_D \quad (4)$$

以上の処理により、任意の物体位置における可動物体に働く電磁力の補間値を求めることができる。2.1.2.2節で述べたように、電磁力は大きさと角度で補間した場合には、物理現象を模擬できない場合があるため、各成分を用いて補間を行っている。

2.2.3 物理量算出に関する検討

2.2.1 および 2.2.2 節では、提案するシステムで用いる磁場分布および電磁力の算出手法について述べた。本節では、それらを算出する際に検討した内容について述べる。2.2.3.1 節では、磁場分布の算出に関する検討について述べる。その中では、観察する対象の物理量である磁束密度についての算出方法と磁束密度分布の表示について述べる。2.2.3.2 節では、電磁力の算出に関する検討について述べる。2.2.3.3 節では、物理量算出に関する検討として、提案システムの補間手法に関する検討について述べる。

2.2.3.1 磁束密度(磁場分布)の算出に関する検討

提案システムでは、磁場分布として磁束密度の大きさの分布を擬似カラーで表示している。擬似カラーで磁束密度分布を表示するためには、磁束密度を計算して求める必要がある。磁束密度を補間により求める際、次に示す 2 つの方法を用いることが考えられる。

- 1) 補間に用いる解析結果として磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用意しておく。そして、用意しておいた磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を補間することで、物体を任意の位置に置いたときの磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を求める。そして補間により求められた磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} から、 $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ により磁束密度 \mathbf{B} を求める。
- 2) 補間に用いる解析結果として磁束密度 \mathbf{B} を用意しておく。そして、用意しておいた磁束密度 \mathbf{B} を補間することで、物体を任意の位置に置いたときの磁束密度 \mathbf{B} を求める。

1)のようにして、補間して求めた磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} から磁束密度 \mathbf{B} を求めると、計算量が増加するので 2)よりも計算時間がかかる。また 2

次元電磁場において、1)と2)それぞれの手法で求めた磁束密度には、ほとんど差が無いことが文献[16]で述べられている。従って、提案システムではインタラクティブ性を確保する必要があることから、磁束密度を求める方法として2)の方法を採用している。

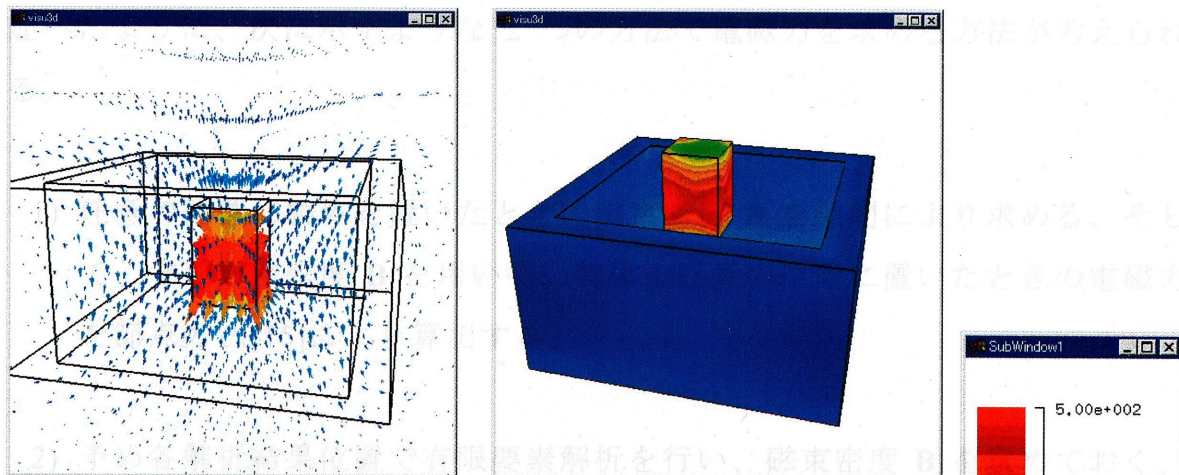
次に、磁束密度をベクトルとして表示するのではなく、その大きさを擬似カラーで表示した理由について述べる。ベクトル情報を可視化することを考えると、ベクトルは大きさと向きを持つので、矢印やコーンを用いて表示する方法が考えられる。ベクトル情報を矢印やコーンで表示した場合、2次元場においては、その向きと大きさがユーザにとって観察しやすいものとなる。しかし、3次元場においては、観察する際にベクトルが重なるなどといったことから分かりにくくなってしまう(図 2-18(a)参照)。

そこで、提案システムでは磁性体の表面や断面における磁束密度の大きさ(スカラー量)を表示できるようにした(図 2-18(b)(c)(d))。ユーザは、磁性体の表面を観察することによって、対象とするモデルにおける電磁場の振る舞いを大まかに把握することができる。また断面表示によってユーザが観察したい部分(磁性体の内部といった部分)を詳しく観察することができる。このような理由から、上記の2つの表示手法を用いることによって、電磁気学教育などにおいても有用であると思われる。

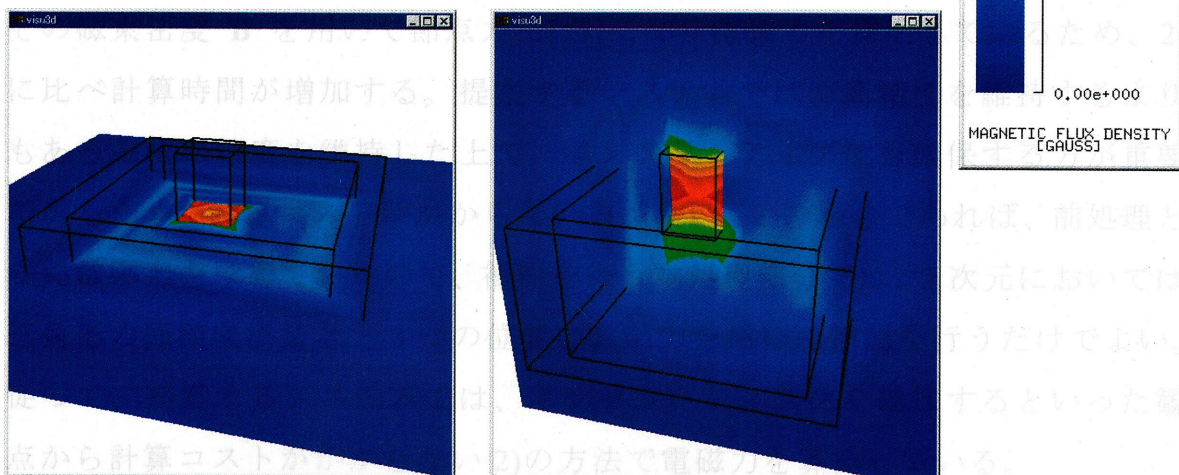
もし、磁束密度の向きを詳しく知りたい場合には、文献[4]で提案されているような2次元におけるベクトルの補間手法を拡張し、それを適用すれば、提案システムもベクトル情報にも対応できると考えられる。しかし、その際には対象となる現象をユーザに分かりやすく表示できているかを考える必要がある。例えば、空間上にベクトルを表示するのではなく、ある断面でのみ磁束密度ベクトルを矢印やコーンを用いて表示する、もしくは立体表現をするなどといった方法が挙げられる。このような3次元場に対するベクトル量の表示については、システムを使用する環境に応じて必要な表示手法を加えていくことで、提案するシステムの機能を拡張し、様々な場においても対応できるとと思われる。

2.2.3.2 電磁力の算出に関する検討

電磁力をユーザにフィードバックする場合、可動物体に働く電磁力が重要となる。この可動物体の電磁力を算出する際にも、前節の磁場分布の算出で



(a) 磁束密度ベクトル表示 (b) 磁性体の表面表示



(c) 断面表示(高さ方向) (d) 断面表示(横方向)

図 2-18：磁束密度分布表示の例

2.2.3.2 電磁力の算出に関する検討

電磁力をユーザにフィードバックする場合、可動物体に働く電磁力が必要となる。この可動物体の電磁力を算出する際にも、前節の磁場分布の算出で述べたように、次に示すような 2 つの方法で電磁力を求める方法が考えられる。

- 1) 任意の位置に物体を置いたときの磁束密度 \mathbf{B} を補間により求める。そして、その磁束密度 \mathbf{B} を用いて、物体を任意の位置に置いたときの電磁力を節点力法[15]により算出する。
- 2) 予め各解析結果位置で有限要素解析を行い、磁束密度 \mathbf{B} を求めておく。その磁束密度 \mathbf{B} を用いて、予め用意する各解析結果位置で節点力法により電磁力を算出しておく。そして、予め求めておいた電磁力を補間することで、物体を任意の位置に置いたときの電磁力を求める。

ここで、1)の方法を用いた場合、まず補間により磁束密度 \mathbf{B} を求めておき、その磁束密度 \mathbf{B} を用いて節点力法[15]により電磁力を算出しているため、2)に比べ計算時間が増加する。提案するシステムでは、高精度を維持するよりもある程度の精度を維持した上で、インタラクティブ性を確保する方が重要であるため、計算コストはかからない方がよい。2)の場合であれば、前処理として電磁力を求めておくので、補間を行う本処理部分では、2次元においては三角形の面積座標変数と 3 つの位置の電磁力を用いて補間を行うだけでよい。従って、提案するシステムでは、インタラクティブ性を確保するといった観点から計算コストがかからない 2)の方法で電磁力を算出している。

2.2.3.3 事前準備解析の位置に関する検討

提案システムでは、インタラクティブ性を確保するために、簡単な線形補間を用いて近似物理量の算出を行っている。ここで、簡単な線形補間として、2次元では面積座標変数、3次元では体積座標変数を重みとして用いている。提案システムでは、物理量を線形補間で求めているため、補間のために用意する解析結果の位置や数が補間結果の精度に大きく影響を与える。つまり、予め解析結果を与える位置や数によっては、磁場分布や電磁力の精度が悪くなり、そのときの物理現象を模擬できない場合もある。

ここで、図 2-19 に示すようなモデルを用いて、用意する解析結果が精度に影響を与える様子を観察する。このモデルにおいて、鉄心を高さ方向に移動していった場合に、どの位置に解析結果を用意すれば、補間により求めた結果が実際の物理現象を模擬できるかを考える。

図 2-20 に鉄心を y 軸上で移動させていったときの電磁力の推移を示す。この図の電磁力は、鉄心を y 軸方向に移動させていった位置ごとで有限要素解析を行い、その結果から節点力法[15]により求めたものである。この図を見ると鉄心を 0mm、80mm に置いたときの解析結果を与えて補間を行った場合、ピーク値が無視されて、明らかに実際の物理現象とは違う補間結果が得られることが分かる。しかし、最初にシステムを構築する際には、これらの 0mm、80mm のものしか用意していなければ、線形補間により得られた補間結果が物理現象を模擬できていないこともある。このような物理現象を模擬できていないものを、電磁気学教育や電気機器設計に用いることはできない。

そこで提案するシステムでは、電磁気学学習を行う場合には、次のような手順でシステムを構築して、学習用としてシステムを提供する。まず、解析結果を準備する位置について検討を行う。ここで行う検討とは、解析を行い、図 2-20 のようなグラフを得て、対象とするモデルの特性を把握することである。

モデルの特性を把握した後は、線形に物理量を近似しても物理現象を模擬できるように、補間に用いる解析結果を効率よく、効果的に用意する。シス

テム提供者あるいは教師は、物理量を線形に近似できるように、図 2-21 のように予め解析結果を与える位置を増加させる。このようにしてシステムを構築した後で、教育を行う側(教師など)は、学習を行う側(生徒など)に構築しておいたシステムを提供することにより、学ぶ側に対して電磁気学の教育を行える。ここで、図 2-21 の赤丸は解析結果を用意する位置を示し、赤線は赤丸の位置に解析結果を用意したときに得られる結果を推定したものである。また、解析結果を増加させる場合のパターンの例を 2 つ示す。(a)は、用意する解析結果が少ないためにメモリをほとんど取らないが、現象をおおまかにしか模擬できなくなっている。(b)は用意する解析結果が多いためにメモリを多く取るが、現象を詳細な部分まで現象を模擬できるようになっている。基本的には、用意する解析結果を増加させて、つまり(b)のように、精度の良い結果を用いて教育を行うことが望ましい。しかし、メモリや計算時間との兼ね合いによっては、(a)のように大まかに現象を把握できるものでも良いことも考えられる。つまり、本システムを用いて電磁気学教育を行う場合には、予め解析を行うことで特性を把握し、実際に教育を行う側が必要な位置の解析結果を用意するといったことが必要となる。

また、電気機器設計に用いる場合には、設計者側が望む特性が得られる位置を本システムで探し出す。次に、その位置における物理現象を、実際に有限要素法などで解析を行い、その特性を再評価することが考えられる。補間結果と実際の解析結果を比較し、誤差が大きい、もしくは望む特性が得られていない場合は、その解析結果を新たに前処理に必要な解析結果として本システムにフィードバックする。これによって、設計の際に、設計者が特性を把握したい位置付近の精度を向上させることができ、2 回目以降も同様にすることで、ますます精度が向上し、最終的には、望ましい解が得られることになる。本システムを用いることで、事前検討せずに設計者が望む特性を得られる位置を探るよりは、はるかに高速にその位置を探せられると考える。

2.3 本章のまとめ

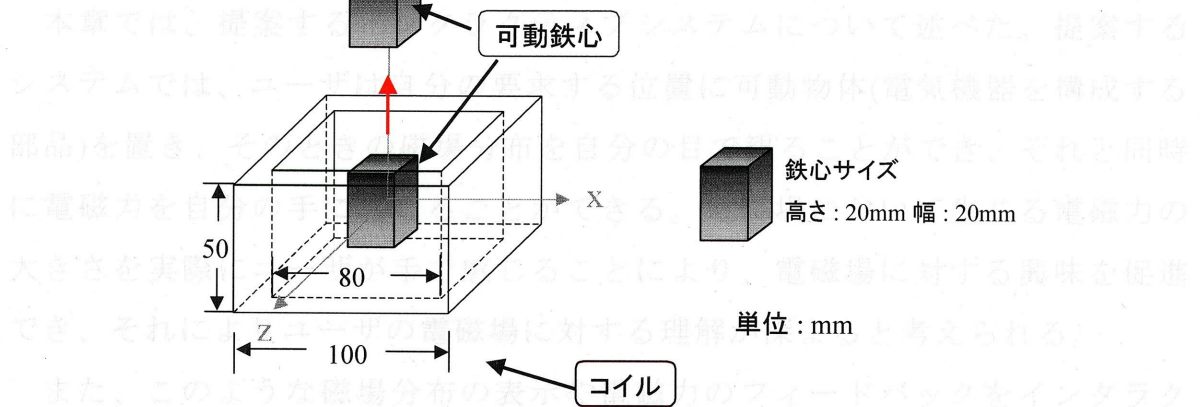


図 2-19: 鉄心の位置を変更した方向

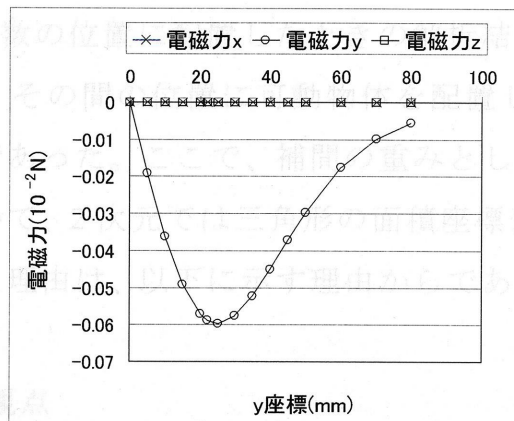
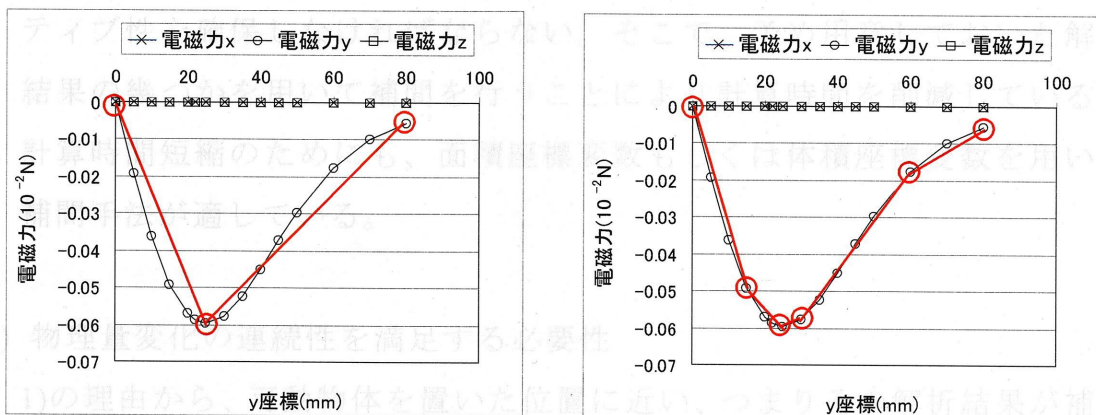


図 2-20: $x=0$ 、 $z=0$ における y 軸方向の電磁力の推移



(a) パターン 1

(b) パターン 2

図 2-21: 解析結果位置の取り方の違いにより求まる電磁力の違い

2.3 本章のまとめ

本章では、提案するインタラクティブシステムについて述べた。提案するシステムでは、ユーザは自分の要求する位置に可動物体(電気機器を構成する部品)を置き、そのときの磁場分布を自分の目で観ることができ、それと同時に電磁力を自分の手に感じるができる。電磁場において生じる電磁力の大きさを実際にユーザが手で感じるにより、電磁場に対する興味を促進でき、それによりユーザの電磁場に対する理解が深まると考えられる。

また、このような磁場分布の表示や電磁力のフィードバックをインタラクティブに行うために、物理量の算出に補間手法を用いている。その算出方法については、2.1.2で2次元場、2.2で3次元場のものを示した。そこで示した手法は、可動物体を複数の位置に配置したときの解析結果(磁束密度や電磁力)を予め用意しておき、その間の位置に可動物体を配置したときの物理量を補間により求めるものであった。ここで、補間の重みとして、3次元では四面体の体積座標変数を用いて、2次元では三角形の面積座標変数を用いている。このような重みを用いた理由は、以下に示す理由からである(詳細は2.1.2.3節参照)。

1) 計算時間短縮の観点

物理量を補間する際、解析結果を予め多く用意しておき、それら全てを用いて補間を行うと計算時間がかかる。提案システムでは、インタラクティブ性を確保しなければならない。そこで、予め用意しておいた解析結果の幾つかを用いて補間を行うことにより計算時間を削減している。計算時間短縮のためにも、面積座標変数もしくは体積座標変数を用いた補間手法が適している。

2) 物理量変化の連続性を満足する必要性

1)の理由から、可動物体を置いた位置に近い、つまりその解析結果が補間に大きく影響すると考えられる解析結果を用いて補間を行う方法が考えられる。そういった補間法として、解析結果をおいた位置との距離を用

いる方法、面積座標変数や体積座標変数を用いる方法などが考えられる。ここで、距離を重みとして物理量を補間した場合、物理量の変化が不連続になる。一方、面積座標変数を重みとして物理量を補間した場合、物理量の変化が不連続にはならない(説明の詳細については 2.1.2.3 節を参照)。従って、物理量変化の連続性を保つために、提案システムでは、面積座標変数および体積座標変数を用いて物理量を補間している。

3) 任意数の解析結果にも対応可能

2)の理由から、2次元では三角形や四辺形、3次元では四面体や六面体といった形状の面積座標変数および体積座標変数を補間に用いることが考えられる。ここで、補間により物理量を求める際には、任意数の解析結果を用意した場合にも対応できた方がよい。三角形や四面体の形状は、ドロネー・アルゴリズム[14]があるために、任意数においてもその形状を作成することが可能である。従って、任意数の解析結果を与えた場合にも対応できる。

上述のように、提案システムでは、物理量を面積座標変数および体積座標変数の重みを用いて補間している。このような線形補間を用いているために、補間のために用意する解析結果の位置や数が補間結果の精度に大きく影響を与える。つまり、予め解析結果を与える位置や数によっては、磁場分布や電磁力の精度が悪くなり、そのときの物理現象を模擬できない場合もある。このような物理現象を模擬できていないものを、電磁気学教育や電気機器設計に用いることはできない。そこで、提案システムを電磁気学教育や電気機器設計の分野で応用するための使用方法を以下に示す。

● 電磁気学教育への応用

- 1) システム提供者あるいは教師が解析などを行って対象とするモデルの特性を把握する。
- 2) 線形に物理量を近似しても、物理現象を模擬できるような解析結果を用意する。

3) 用意した解析結果を用いてシステムを構築し、教師は生徒などに構築しておいたシステムを提供することにより、電磁気学の教育を行う。

● 電気機器設計への応用

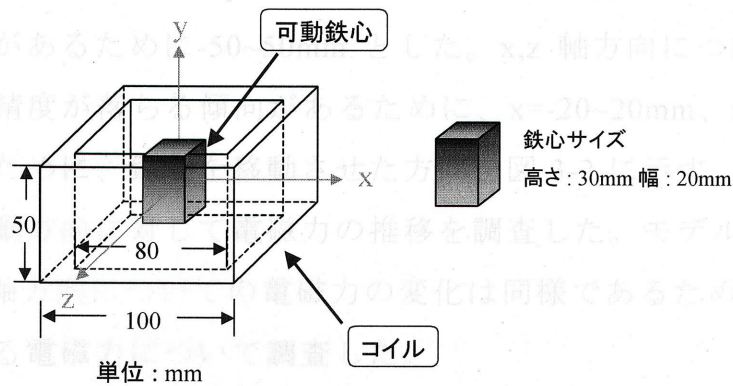
- 1) 設計者側が望む特性が得られる位置を提案システムで探し出す。
- 2) 得られた補間結果と有限要素解析などの解析結果を比較し、誤差が大きい、もしくは望む特性が得られていない場合は、その解析結果を新たに前処理に必要となる解析結果として本システムにフィードバックする。
- 3) 1),2)を繰り返すことにより、設計者が特性を把握したい位置付近の精度を向上させることができ、設計者が望む解を得ることができる。

最後に、提案システムを2次元場から3次元場に対応できるように手法の拡張したことにより、以前開発されたシステム[4]では扱えなかった実用的な3次元モデルを扱うことが可能となった。

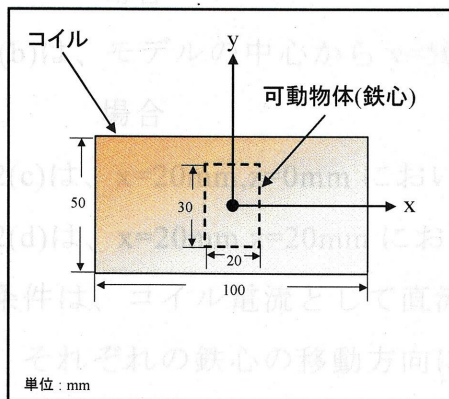
3.1 用意する解析結果位置に関する検討

第3章 適用例

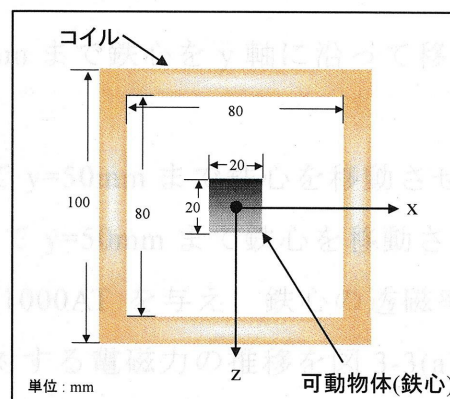
本章では、提案システムを図 3-1 に示すコイルと鉄心から構成されるモデルに適用し、その結果について検討を行う。2 章で述べたように、提案するインタラクティブシステムでは線形補間を用いているために、線形に物理量が変化していない場合には精度が悪くなる。そこで、計算時間および補間精度の検討を行う前に、適用するモデルに対して、予め解析結果を用意する位置についての検討を行う。その後提案システムの計算時間および補間の精度に関する検討を行う。



(a) 3次元モデル



(b) 側面図



(c) 平面図

図 3-1: コイルと鉄心から構成されるモデル

3.1 用意する解析結果位置に関する検討

本節では、図 3-1 に示すモデルに対して、予め用意する解析結果位置に関する検討について述べる。ここで、検討の際の規準とする物理量は電磁力にすることにした。これは、磁束密度分布については、その誤差は比較的小さいものであり、電磁力については比較的大きな誤差が出ていたことが文献[16]で報告されているためである。ここで行う検討とは、有限要素法などによって対象とするモデルに対して解析を行い、そのモデルの特性を把握することである。

ここで、検討は 3 次元場で行い、有限要素解析には六面体辺要素を用いた。今回は、鉄心の可動範囲を x 軸方向には-20~20mm、y 軸方向には-50~50mm、z 軸方向には-20~20mm とし、この範囲内において対象とする図 3-1 のモデルの特性を調べた。ここで、y 軸方向については、触覚インターフェースの可動範囲に制限があるために-50~50mm とした。x,z 軸方向については、コイルの近くで解析精度が落ちる傾向があるために、 $x=-20\sim 20\text{mm}$ 、 $z=-20\sim 20\text{mm}$ とした。検討のために、鉄心を移動させた方向を図 3-2 に示す。図 3-2(a)~(d)のそれぞれの移動方向に対して電磁力の推移を調査した。モデルの対称性から、x 軸方向と z 軸方向についての電磁力の変化は同様であるため、x 軸方向と y 軸方向に対する電磁力について調査した。

図 3-2(a)は、モデルの中心から $x=20\text{mm}$ まで鉄心を x 軸に沿って移動させた場合

図 3-2(b)は、モデルの中心から $y=50\text{mm}$ まで鉄心を y 軸に沿って移動させた場合

図 3-2(c)は、 $x=20\text{mm}, z=0\text{mm}$ において $y=50\text{mm}$ まで鉄心を移動させた場合

図 3-2(d)は、 $x=20\text{mm}, z=20\text{mm}$ において $y=50\text{mm}$ まで鉄心を移動させた場合

解析条件は、コイル電流として直流 1000AT を与え、鉄心の透磁率は 1000 とした。それぞれの鉄心の移動方向に対する電磁力の推移を図 3-3(a)~(d)に示す。図 3-3(a)~(d)から得られる結果について次に示す。

(a) x 軸方向に鉄心を移動させた場合(図 3-3(a)参照)

電磁力の x 成分は、 $x=0\sim 20\text{mm}$ でほぼ線形に変化している。従って $x=0\text{mm}$ と $x=20\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。

(b) y 軸方向に鉄心を移動させた場合(図 3-3(b)参照)

電磁力の y 成分は 25mm までほぼ線形に落ち込んで、その後、線形に上昇している。従って、 $y=0\text{mm}$ と $y=25\text{mm}$ と $y=50\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。

(c) $x=20\text{mm}, z=0\text{mm}$ のときに y 軸方向に鉄心を移動させた場合(図 3-3(c)参照)

鉄心を y 軸方向に移動させていくと、電磁力の x 成分は鉄心が 40mm の位置に移動するまで、ほぼ線形に落ち込んでおり、その後は一定となっている。従って、 $y=0\text{mm}$ と $y=40\text{mm}$ と $y=50\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。そのときの、電磁力の y 成分は $y=20\sim 25\text{mm}$ 付近までほぼ線形に落ち込んでおり、その後は、 $y=50\text{mm}$ までほぼ線形に増加している。従って、 $y=0\text{mm}$ と $y=20\sim 25\text{mm}$ 付近と $y=50\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。

(d) $x=20\text{mm}, z=20\text{mm}$ のときに y 軸方向に鉄心を移動させた場合(図 3-3(d)参照)

鉄心を y 軸方向に移動させていくと、電磁力の x 成分は鉄心が 30mm の位置に移動するまで、ほぼ線形に落ち込んでおり、その後はほぼ一定となっている。従って、 $y=0\text{mm}$ と $y=30\text{mm}$ と $y=50\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。そのときの、電磁力の y 成分は $y=22\text{mm}$ までほぼ線形に落ち込んでおり、その後は、 $y=50\text{mm}$ にかけてほぼ線形で増加している。従って、 $y=0\text{mm}$ と $y=22\text{mm}$ 付近と $y=50\text{mm}$ に解析結果を用意すればよい。

図 3-3(a)~(d)に示す結果から、線形に物理量を近似できるように、解析結果を用意する位置が推定できる。図 3-3 の(c),(d)から、鉄心を y 軸方向に移動させていくと、電磁力の y 成分が他の成分と比べて非常に大きくなるのが分かる。従って、電磁力の y 成分を基準に解析結果を用意する位置について検

討を行う。上記の(c),(d)より、 $x=20\text{mm},z=0\text{mm}$ と $x=20\text{mm},z=20\text{mm}$ において鉄心を y 軸方向に移動させた場合、 $y = 20\sim 25\text{mm}$ で電磁力の y 成分の絶対値が最大になっていることが分かる(図 3-3(c)(d)参照)。また、鉄心を $x=0,z=0$ において y 軸方向に移動させた場合には、 25mm で電磁力の y 成分の絶対値が最大になっていることが分かる(図 3-3(b)参照)。

以上から、 $y=0\text{mm},y=25\text{mm},y=50\text{mm}$ のそれぞれの高さにおいて、 $x=0\text{mm},z=0\text{mm}$ と $x=20\text{mm},z=0\text{mm}$ と $x=20\text{mm},z=20\text{mm}$ の位置にそれぞれ解析結果を用意すると良いと思われる。そして、モデルの対称性から、それぞれの位置で対称となる位置に解析結果を配置する。本節の検討から得られた解析結果を用意する位置は、次節の図 3-4(b)と図 3-5 に示す。

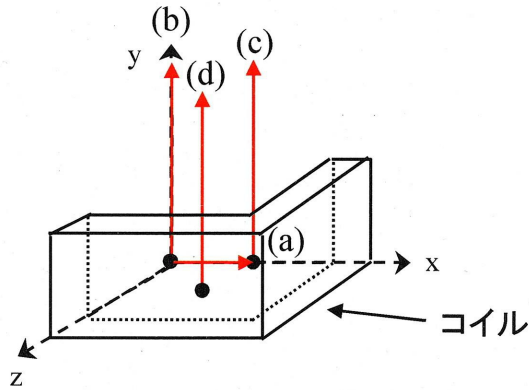
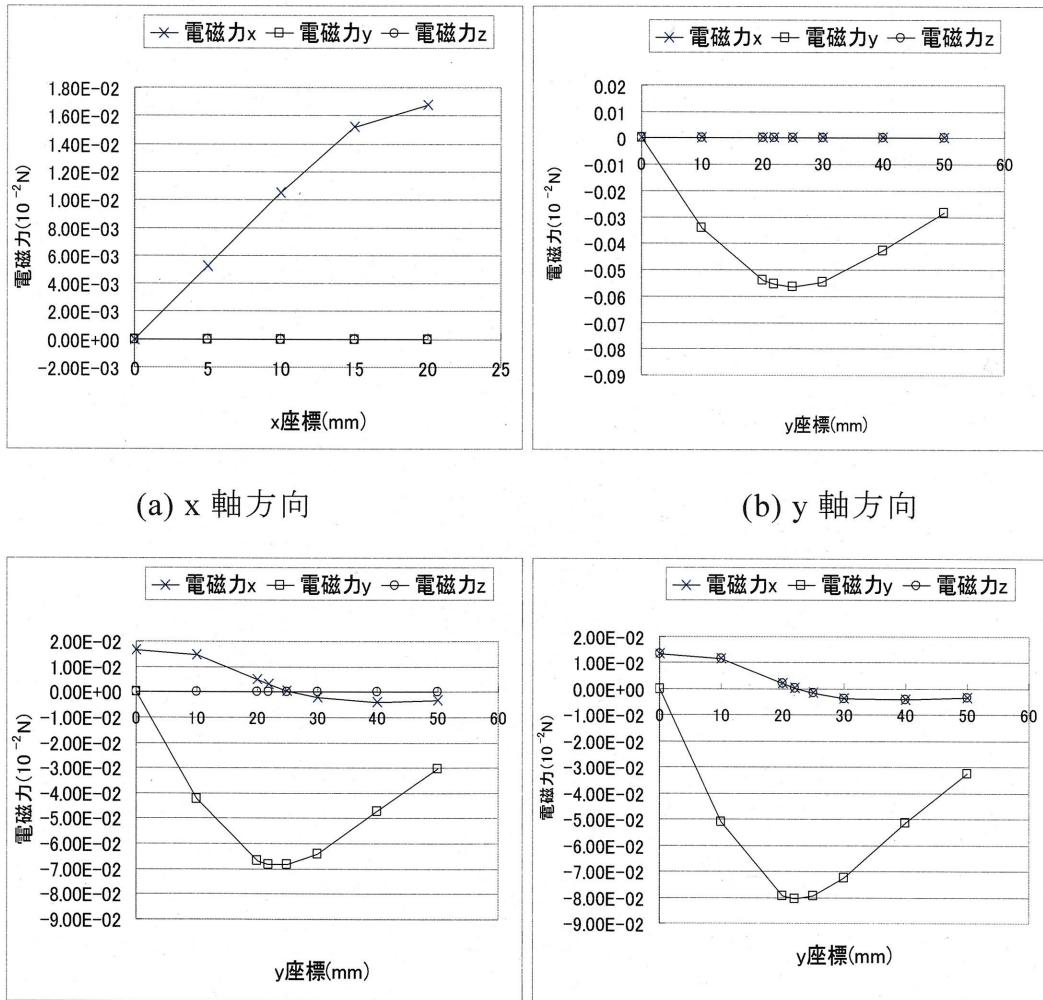


図 3-2 : 鉄心を移動させる方向



(a) x 軸方向

(b) y 軸方向

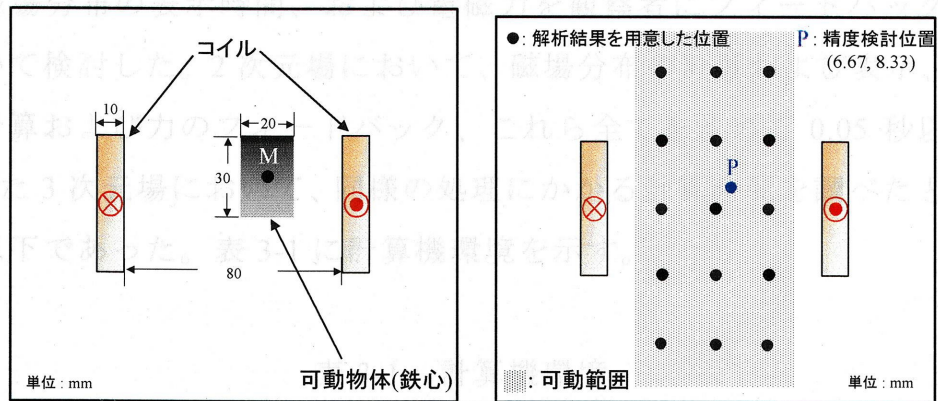
(c) y 軸方向(x = 20, z = 0)

(d) y 軸方向(x = z = 20)

図 3-3 : 電磁力の推移

3.2 計算時間および精度に関する検討

本節では、図 3-1 に示すモデルに提案システムを適用し、その際の提案システムの計算時間および補間の精度に関する検討について述べる。検討の順序は、まず計算時間について検討し、その後、精度に関する検討を 2 次元および 3 次元のモデルに対して行う。



(a) 適用モデル

(b) 予め用意した解析結果位置

図 3-4 : 2 次元モデル

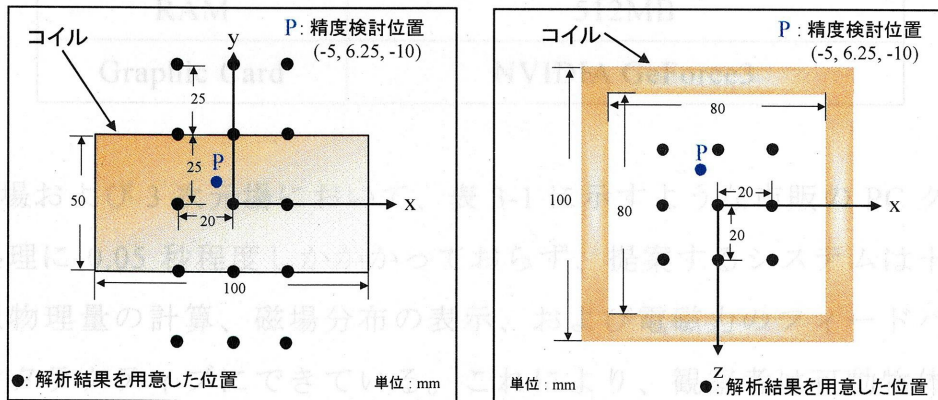


図 3-5 : 解析結果を用意した位置(3 次元モデル)

提案システムを、図 3-4 に示す 2 次元モデルに適用し、その時の計算時間および精度に関して検討を行った。このモデルは、一見すると図 3-1 に示すモデルの $z = 0$ の断面と同じに感じるが、実際はコイルと鉄心が奥行き方向に無限

に続いている仮定のもとで成り立っているモデルである。用意した解析結果位置は、3.1 節の検討から得られた図 3-4(b)に示す位置であり、その位置における有限要素解析結果を計 15 個用意した。また 3 次元場のモデルは、コイルと鉄心から構成される図 3-1 に示すモデルである。3.1 節の検討から得られた図 3-5 に示す位置であり、その位置における有限要素解析結果を計 45 個用意した。

まず、インタラクティブ性の観点から、提案システムの近似物理量の計算時間、磁場分布の表示時間、および電磁力を観察者にフィードバックする時間について検討した。2 次元場において、磁場分布の計算および表示、また電磁力の計算および力のフィードバック、これら全てを含めて 0.05 秒以下であった。また 3 次元場において、同様の処理にかかる計算時間を調べたところ、0.05 秒以下であった。表 3-1 に計算機環境を示す。

表 3-1：計算機環境

OS	Windows 2000 Professional
Compiler	Microsoft Visual C++ 6.0
CPU	Intel Pentium 4, 1.8GHz
RAM	512MB
Graphic Card	NVIDIA GeForce3

2 次元場および 3 次元場において、表 3-1 に示すような市販の PC クラスで全ての処理に 0.05 秒程度しかかかっておらず、提案するシステムは十分に速く、近似物理量の計算、磁場分布の表示、および電磁力のフィードバックが十分インタラクティブにできている。これにより、観察者は可動物体の位置を変更しながら、そのときに働く電磁力を PHANToM のスタイラスペンで感じ、そして同時に磁場分布を観察することができる。

次に、補間手法により求めた磁場分布と電磁力の精度についての検討を行う。ここで、精度の評価を行う対象の磁場分布として、電磁場を評価する際に重要となる磁束密度の分布に対して行った。また、可動物体(鉄心)に働く

電磁力についての精度検討も行った。

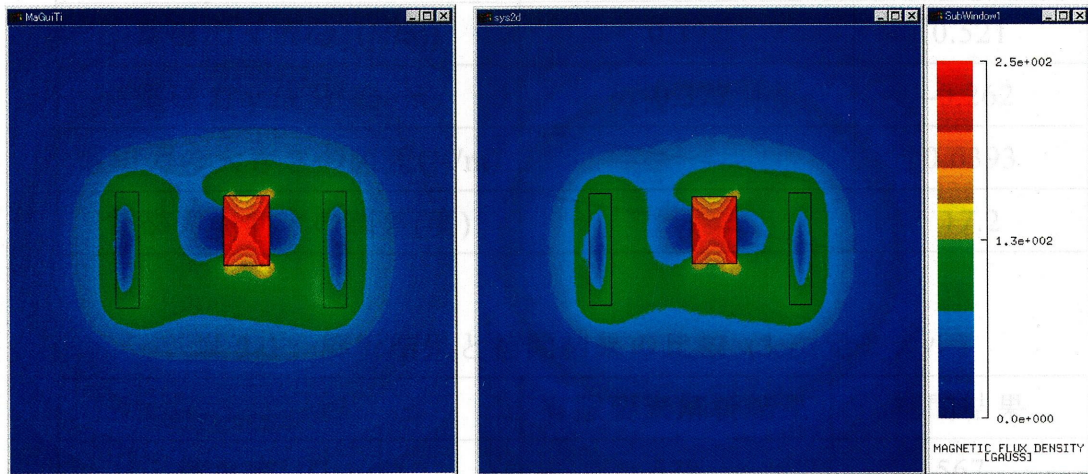
精度検討を行った位置は、2次元モデルに対しては、用意した15個の解析結果で構成される三角形のうちの1つの三角形の中心位置であり、図3-4に示す位置 $P(x,y)=(6.67\text{mm},8.33\text{mm})$ である。3次元モデルに対しても、同じ考え方から、用意した45個の解析結果で構成される四面体のうちの1つの四面体の中心位置 $P(x,y,z)=(-5\text{mm},6.25\text{mm},-10\text{mm})$ で検討を行った。その検討位置 P を図3-5に示す。図3-6、図3-7中で、(a)は精度検討位置 P に鉄心を置いたときの有限要素解析結果であり、(b)は補間により求めた結果である。磁束密度分布図を比較すると、2次元場および3次元場のどちらも、補間結果の方がやや小さい値が出ているものの、補間結果と有限要素解析結果は、ほぼ変わらないものであることが分かる。

次に、補間の精度に対する検討として誤差の比較を行った。精度検討位置において有限要素解析を行った結果と補間結果を比較した際の誤差などを2次元場に関しては表3-2に、3次元場に関しては表3-3に示す。表3-2、表3-3は、解析および補間により求めた磁束密度分布の解析領域全体の最大値、有限要素法の結果との最大絶対誤差、平均絶対誤差、平均相対誤差、鉄心に働く電磁力の各成分を示している。

2次元場においては、場の物理量分布の最大値に対して、最大の絶対誤差は約7%程度と小さな誤差である。この最大の誤差が出ている部分は、磁束密度が最大値を取る付近であり、見た目にはほとんど影響を及ぼさない範囲である。また、平均絶対誤差および平均相対誤差も十分小さい。従って、磁束密度分布については、検討した位置では、精度よく求まっていると思われる。しかし、電磁力については、大きさが0.0393(N)、角度で17度の誤差が出ており、大きさに関しては誤差が小さく、向きに関しては誤差がやや大きい結果となった。

3次元場においても、場の物理量分布の最大値に対しては、最大の絶対誤差が約10%程度と2次元のものよりも大きいのが、傾向を把握するには十分小さな誤差であると思われる。こちらも2次元と同様に最大の誤差が出ている部分は、磁束密度が最大値である付近であり、見た目にはほとんど影響を及ぼ

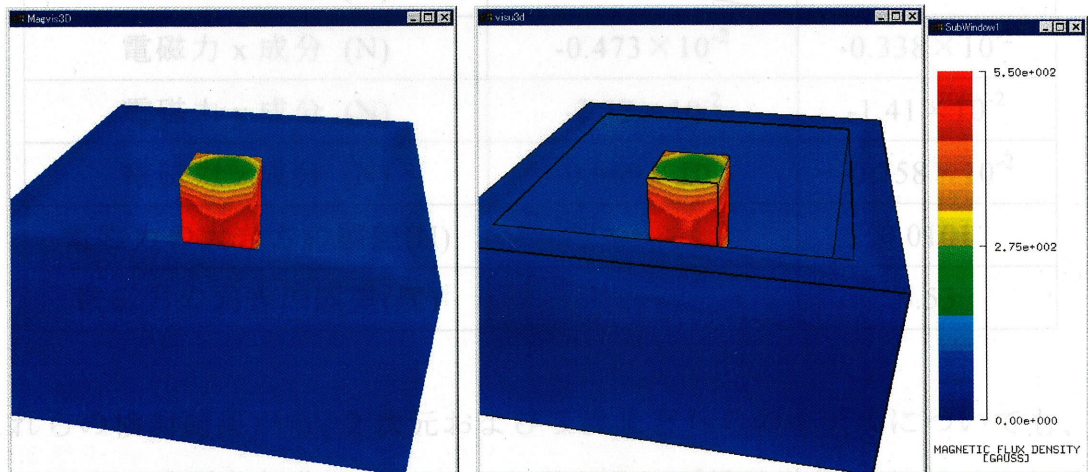
していない。また、平均絶対誤差および平均相対誤差も十分小さい。従って、磁束密度分布については、この検討した位置については、非常に精度よく求まっていると思われる。しかし、電磁力については、大きさを0.0101(N)、角度で6.5度の誤差が出ており、大きさに関しては誤差が大きく、向きに関しては2次元のものよりも誤差が小さく、精度良く求まっていることが分かる。



(a) 有限要素解析結果

(b) 補間結果

図 3-6：精度検討位置における磁束密度分布図(2次元)



(a) 有限要素解析結果

(b) 補間結果

図 3-7：精度検討位置における磁束密度分布図(3次元)

表 3-2：解析結果と補間結果の比較 (2次元モデル)

	有限要素解析結果	補間結果
最大値 (Gauss)	250	248
最大絶対誤差 (Gauss)		16.6
平均絶対誤差 (Gauss)		3.23
平均相対誤差 (%)		1.82
電磁力 x 成分 (N/m)	0.392	0.521
電磁力 y 成分 (N/m)	-0.377	-0.262
電磁力の大きさの誤差(N/m)		0.0393
電磁力の向きの誤差(度)		17.2

表 3-3：解析結果と補間結果の比較 (3次元モデル)

	有限要素解析結果	補間結果
最大値 (Gauss)	578	567
最大絶対誤差 (Gauss)		58
平均絶対誤差 (Gauss)		2.18
平均相対誤差 (%)		2.53
電磁力 x 成分 (N)	-0.473×10^{-2}	-0.338×10^{-2}
電磁力 y 成分 (N)	-2.42×10^{-2}	-1.41×10^{-2}
電磁力 z 成分 (N)	-0.969×10^{-2}	-0.758×10^{-2}
電磁力の大きさの誤差(N)		0.0101
電磁力の向きの誤差(度)		6.53

これらの検討結果から、2次元および3次元どちらのモデルについても、提案システムの重要な部分であるインタラクティブ性は確保できていると言える。また磁束密度分布については、誤差も少なく精度よく求まっていることが分かる。電磁力については、3次元モデルにおいて大きさに関する誤差が少し大きいですが、向きに関しては解析結果と同じ向きをほぼ表現できている。ま

た、3次元場にシステムを適用できるように拡張することによって、現実的ではない2次元場のモデルではなく、より現実に近い実用的なモデルを扱うことが可能となった。これにより、2次元場のモデルでは得られなかった新たな知見が得られるシステムが構築できた。今回のモデルであれば、2次元場のモデルでは表現できないコイルの角の部分などについてもその特性を把握することができる。今回は、解析結果を45点用意してシステムの精度や計算時間について検討し、その結果として、電磁力で誤差がやや大きい結果が得られた。さらに精度を向上させたい場合には、モデルに対してさらに検討を重ねて、解析結果をより効果的に精度向上させられる位置に追加すればよい。提案システムでは、解析結果を効果的に配置すれば、すなわち線形に物理量を近似できるように解析結果を配置すれば、その精度については保証できる。

3.3 本章のまとめ

本章では、2章で提案したシステムを2次元場および3次元場のモデルに適用した。その結果、提案システムは、2次元場および3次元場のどちらの場においても、近似物理量の計算、磁場分布の表示、電磁力のフィードバックを0.05秒程度と十分速く行うことが可能であった。これにより、提案システムを使用するユーザは、電気機器を構成する部品的位置を変更しながら、そのときの磁場分布を観察する、電磁力を感じるといったことが同時に行える。

2章で述べた補間手法の精度については、2次元および3次元ともに磁束密度分布に対しては誤差が小さく、精度の良い結果が得られた。電磁力については、大きさに関する誤差が大きく、向きに関しては教育などにおいて特性を把握するには十分であると思われる結果が得られた。特に、2次元モデルにおける電磁力は大きさに関して誤差が小さく、向きに関しては誤差がやや大きい結果となった。一方3次元場では、電磁力は、大きさについては誤差が大きく、向きに関しては2次元のものよりも誤差が小さくなるという結果が得られた。

今回は、解析結果を3.1節で検討したように、予め用意する解析結果につい

て調査し、物理量を線形に近似できるような解析結果を与えてシステムを構築した。その結果、磁束密度分布で誤差が小さく、電磁力で誤差が大きいという結果が得られた。さらに精度を向上させたい場合には、モデルに対してさらに検討を重ねて、解析結果をより効果的に精度を向上させられる位置に追加すればよい。提案システムでは、解析結果を効果的に配置すれば、すなわち線形に物理量を近似できるように解析結果を配置すれば、その精度については保証できる。

また、3次元場にシステムを適用できるように拡張したことによって、現実的ではない2次元場のモデルではなく、より現実に近い3次元場のモデルを扱うことが可能となった。これにより、2次元場のモデルでは得られなかった新たな知見が得られる可能性もある。例えば、2次元場のモデルでは表現できないコイルの角の部分などについてもその特性を把握することができる。このようなシステムは、電磁気学教育および電機機器設計の分野において、活躍が期待できると思われる。

第4章 結論

本研究では、ユーザが電気機器を構成する部品などの位置変更をコンピュータ上で行いながら、そのときの磁場分布を観察することができ、また同時に生じた電磁力を感じることもできるシステムを提案した。このようなシステムを用いれば、ユーザは磁場分布を観察するだけでなく、電磁場において生じる電磁力の大きさを手で感じることもできるために、電磁場に対する興味や理解を深めることができると考えられる。提案システムは、以前開発された2次元電磁場インタラクティブ可視化システム[4]を拡張したものである。拡張した点は、

- 1) 2次元電磁場において、触覚インターフェースを用いることにより、ユーザに電磁力をフィードバックする機能を追加した。
- 2) さらに1)のシステムを3次元電磁場にも対応できるように、物理量算出手法および表示手法を拡張した。

第2章では、提案するインタラクティブシステムについて述べた。提案するシステムでは、磁場分布の表示や電磁力のフィードバックをインタラクティブに行うために、物理量の算出に補間手法を用いている。この補間手法は、可動物体を複数の位置に配置したときの解析結果(磁束密度や電磁力)を予め用意しておき、その間の位置に可動物体を置いたときの物理量を求めるものであった。ここで、補間の重みとして、3次元では四面体の体積座標変数を用いて、2次元では三角形の面積座標変数を用いている。このような重みを用いた理由は、以下に示す3つの理由からである。

1) 計算時間短縮の観点

物理量を補間する際、多くの解析結果を予め用意しておき、それら全てを用いて補間を行うと計算時間がかかる。提案システムでは、インタラクティブ性を確保しなければならない。そこで、予め用意しておいた解

析結果の幾つかを用いて補間を行うことにより計算時間を削減している。計算時間短縮のためにも、面積座標変数もしくは体積座標変数を用いた補間手法が適している。

2) 物理量変化の連続性を満足する必要性

1)の理由から、可動物体を置いた位置に近い、すなわちその解析結果が補間に大きく影響すると考えられる解析結果を用いて補間を行う方法が考えられる。そのような補間法として、可動物体を置いた位置と予め準備した解析結果の可動物体の位置との距離を用いる方法、面積座標変数や体積座標変数を用いる方法などが考えられる。ここで、距離を重みとして物理量を補間した場合、物理量の変化が不連続になる。一方、面積座標変数を重みとして物理量を補間した場合、物理量の変化が不連続にはならない。従って、物理量変化の連続性を保つためにも、提案システムでは、面積座標変数および体積座標変数を用いて物理量を補間している。

3) 任意数の解析結果にも対応可能

2)の理由から、2次元では、三角形や四辺形、3次元では四面体や六面体といった形状の面積座標変数および体積座標変数を補間に用いることが考えられる。ここで、補間により物理量を求める際には、任意数の解析結果を用意した場合にも対応できた方がよい。三角形や四面体の形状は、ドローネ・アルゴリズム[14]があるために、任意数においてもその形状を作成することが可能である。従って、任意数の解析結果を与えた場合にもこの補間手法で対応できる。

また、提案システムでは、このような線形補間を用いているために、補間のために用意する解析結果の位置や数が補間結果の精度に大きく影響を与える。つまり、予め解析結果を与える位置や数によっては、磁場分布や電磁力の精度が悪くなり、そのときの物理現象を模擬できない場合もある。このような物理現象を模擬できていないものを、電磁気学教育や電気機器設計に用

いることはできない。そこで、提案システムを電磁気学教育や電気機器設計の分野で応用するための使用方法を以下に示す。

- 電磁気学教育への応用

- 1) システム提供者あるいは教師が解析などを行って対象とするモデルの特性を把握する。
- 2) 線形に物理量を近似しても、物理現象を模擬できるような解析結果を用意する。
- 3) 用意した解析結果を用いてシステムを構築し、教師は生徒などに構築しておいたシステムを提供することにより、電磁気学の教育を行う。

- 電気機器設計への応用

- 1) 設計者側が望む特性が得られる位置を提案システムで探し出す。
- 2) 得られた補間結果と有限要素解析などの解析結果を比較し、誤差が大きい、もしくは望む特性が得られていない場合は、その解析結果を新たに前処理に必要となる解析結果として本システムにフィードバックする。
- 3) 1),2)を繰り返すことにより、設計者が特性を把握したい位置付近の精度を向上させることができ、設計者が望む解を得ることができる。

また、提案システムを 2 次元場から 3 次元場に対応できるように手法の拡張したことにより、以前開発されたシステム[4]では扱えなかった実用的な 3 次元モデルを扱うことが可能となった。

第 3 章では、第 2 章で提案したシステムを 2 次元場および 3 次元場のモデルに適用した。その結果、提案システムは、2 次元場および 3 次元場のどちらにおいても、近似物理量の計算、磁場分布の表示、電磁力のフィードバックを 0.05 秒程度と十分速く行うことが可能であった。これにより、提案システムを使用するユーザは、電気機器を構成する部品的位置を変更しながら、そのときの磁場分布を観察する、電磁力を感じるといったことが同時に行える。

また、予め用意する解析結果について調査し、物理量を線形に近似できるような解析結果を与えてシステムを構築しておき、補間手法の精度に関して検討を行った。2 次元場および 3 次元場どちらにおいても、磁束密度分布で誤

差が小さく、電磁力で誤差が大きいという結果が得られた。ここで、さらに精度を向上させたい場合には、対象とするモデルに対してさらに検討を重ねて、より効果的に精度を向上させられる位置に解析結果を追加すればよい。提案システムでは、解析結果を効果的に配置すれば、すなわち線形に物理量を近似できるように解析結果を配置すれば、その精度については保証できる。

また、3次元場にシステムを適用できるように拡張したことによって、現実的ではない2次元場のモデルではなく、より現実に近い3次元場のモデルを扱うことが可能となった。これにより、2次元場のモデルでは得られなかった新たな知見が得られる可能性もある。このようなシステムは、電磁気学教育および電機機器設計の分野において、活躍が期待できると思われる。

最後に、今後の課題として以下に示すものが挙げられる。

- 他のモデルへの適用

他のモデルへ適用することにより、補間手法の精度やインタラクティブ性について検討を行い、提案システムの有用性を評価する。

- ブロック分割の自動化

提案システムでは、磁場分布を算出するために表示領域をブロックに分割するが、そのブロック分割は現在人手で行っており、ユーザの手間がかかる。よって、そのブロック分割を自動化する、またはユーザインターフェースによってブロック分割を対話的に制御することが望まれる。

- 補間に用いる最適な解析結果位置の自動決定

補間のために用いる解析結果配置については、現在は有限要素法などの解析を行って、その結果を見て人手により決定している。この部分を自動で行えれば、ユーザが対象とするモデルに対して、予め解析結果配置に関する調査をすることなく、システムを使用することも可能となり、システムの汎用性が広がる。

- ユーザによる提案システムの評価

様々なユーザに提案システムを使用してもらい、その際に得られる意見をシステムに反映させていき、さらにシステムを発展させる。

参考文献

- [1] H.Yamashita, T.Johkoh, S.Takita and E.Nakamae, “Interactive Visualization of Interaction between Magnetic Flux Density and Eddy Currents in a 3D Steady State Field,” IEEE Trans.on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1778-1781, 1992.
- [2] M.Oohigashi, V.Cingoski, K.Kaneda and H.Yamashita, “A New Method for 3-D Vector Field Visualization Utilizing Streamlines and Volume Rendering Techniques”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp.3435-3438, 1998.
- [3] H.Matsuda, V.Cingoski, K.Kaneda and H.Yamashita, “Extraction and Visualization of Semitransparent Isosurfaces for 3-D Finite Element Analysis”, IEEE Trans. on Magnetics, vol.35, No.3, pp.1365-1368, 1999.
- [4] E.Okayama, V.Cingoski, S.Noguchi, K.Kaneda and H.Yamashita, “Interactive Visualization System for Education and Design in Electromagnetics”, IEEE Trans. on Magnetics, vol.36, No.4, pp.995-999, 2000.
- [5] SensAble Technologies, 参考 URL: <http://www.sensable.com>
- [6] H.Christiansen, “Application of Continuous Tone Computer Generated Images in Structural Mechanics,” Structural Mechanics Computer Programs Surveys, Assessments, and Availability, University Press of Virginia, Charlottesville, pp. 1003-1015, 1974.
- [7] B.H.McCormick, T.A.DeFanti, and M.D.Brown,eds, “Visualization in Scientific Computing,” Computer Graphics, Vol. 21, No. 6, pp. 1-14, 1987.

- [8] 廣瀬道孝：“バーチャル・リアリティ”，産業図書出版.
- [9] 大東ら：“物体の移動を考慮した電磁場可視化のための VR システムの開発,” 日本シミュレーション学会, 第 18 回計算電気・電子工学シンポジウム, 2-I-9, pp.161-164, 1997.
- [10] 松林 豊：“物体の回転を考慮した 2 次元電磁場インタラクティブ可視化システムの開発”, 広島大学工学部 卒業論文, 2001.
- [11] J. Kenneth Salisbury, Mandayam A. Srinivasan, “Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects”, IEEE Computer Graphics and Applications, pp.6-10, September 1997.
- [12] R.M. Taylor II, "Haptics for Scientific Visualization," in Human and Machine Haptics, M.A. Srinivasan, Ed., (MIT Press) in press.
- [13] スリーディ.コム株式会社, 参考 URL: <http://www.j-3d.com>
- [14] D.N.Shenton et al., “Three-Dimensional Finite Element Mesh Generation Using Delaunay Tessellation”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 21, No. 6, pp.2535-2538, 1985.
- [15] A.Kameari, “Local force calculation in 3D FEM with edge elements”, Int. jour. of App. elec. in Mat, vol. 3, pp.231-240, 1993.
- [16] 岡山 英司：“電機機器設計および電磁気学教育へ向けた 2 次元電磁場インタラクティブシステムの開発”, 広島大学大学院工学研究科 修士論文, 2000.