

磁石触覚の設計と応用 ——永久磁石を用いた力触覚フィードバック

尾形 正泰^{1,a)}

受付日 2019年4月19日, 採録日 2019年11月7日

概要: 磁石の間に生じる相互作用を用いて, パッシブな力触覚フィードバックを設計する手法を提案する. 磁石はこれまで有望な方法でありながらも, 数理的な方法で触覚デザインに用いられることはなかった. 本稿では, 数理モデルを導入することで, 磁力計算の複雑さを克服し, 可視化と直感的な設計を可能にする手法を説明する. また, 高速計算によって計算コストを抑えることで, 設計ツールにおけるリアルタイムプレビューとインタラクティブな設計が可能となった. 可視化された磁石触覚のパターンについて識別・感性評価を行い, 磁石触覚の有用性と制約を検証した. さらに, 磁石触覚を用いてタンジブルインタフェースとインタラクティブシステムを拡張するためのアプリケーションを示す.

キーワード: 磁石, 触覚, 電磁気学, ヒューマンインタフェース

Magneto-Haptics: Design and Applications of Haptic Feedback Utilizing Permanent Magnet

MASA OGATA^{1,a)}

Received: April 19, 2019, Accepted: November 7, 2019

Abstract: We present magneto-haptics, a design approach of haptic sensations powered by the forces present among permanent magnets during active touch with motion of magnet. Magnetic force has not been efficiently explored in haptic design because it is not intuitive and there is a lack of methods to associate or visualize magnetic force with haptic sensations, especially for complex magnetic patterns. To represent the haptic sensations intuitively, we formularized intuitive representation of actual sensation. We also provide a design tool with realtime preview by high-speed calculation with enhancing dipole method. We verify our approach by evaluating distinction and sensibility test with four different types of magneto-haptic. We further demonstrate applications of magneto-haptics through interactive system and tangible interface.

Keywords: magnet, haptics, electromagnetism, human interface

1. はじめに

力触覚フィードバックを設計することは, ヒューマンインタフェースを含む道具一般において重要な課題である [6]. 触覚と力覚をあわせた力触覚という知覚能力によって, ヒトは身体が受ける物理的な作用を知覚できるようになった. 道具の機能に合わせた力触覚フィードバックを設

計することは, 道具の使いやすさだけでなく, 円滑な身体的インタラクションを促すうえで重要である. そのため, 道具としての機能は保ちつつ, 力触覚フィードバックのための機構を設計する方法が必要だと考えられる. 本稿では, 強力かつ曲線的な力触覚フィードバックを与える機構として, 磁石を用いる方法を提案する.

これまでも力触覚フィードバックのための機構が実用されてきた. しかし, 力触覚フィードバックを実現するための設計と組み立ては, 空間的にも構造的にも難易度が高い. スイッチを含む産業用のメカニカル部品は, 目的に応じた形状を持つため汎用的に使えない. バネは個体ごとに

¹ 産業技術総合研究所人工知能研究センター
AI Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Koto, Tokyo 135-0064, Japan

^{a)} masa.ogata@aist.go.jp

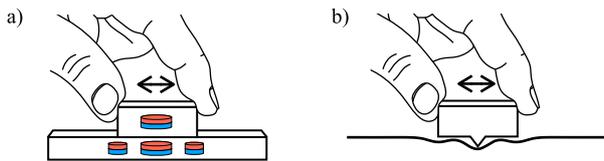


図 1 磁石触覚の例。(a) 2つのブロックに磁石を配置することで、(b) 上部のブロックが凹凸のある曲線の上を移動するように感じられる

Fig. 1 Example of Magneto-haptics. Movement of magnets creates force feedback.

機械的特性が決まっているため、道具の構造と組み合わせた設計が必要になる。物質性と応力構造を活かした機構を利用するメタマテリアルでは、特別な材料や加工が必要となる。電動振動子や電動モータによる振動触覚では、力覚を提示することはできない。リニアモータを用いて力覚を提示するには、フィードバック制御が必要となる。そもそも、フィードバックを受動的な仕組みにとらえれば、必ずしも電動装置や電気制御を要しない。

力触覚フィードバックの設計において磁石の物理的特性が持つ利点として、(1) 伝動装置・電気制御とそのための電源を必要としない、(2) 磁気力なのでヒトが感じる遅延がない*1、(3) 磁石の配置に応じてフィードバックを複雑化できる点がある。それ以外の機構設計の利点として、永久磁石、とくに産業に利用されるネオジウム磁石は、小さい体積でも大きな吸着力を提示する。また、軽度ながら磁石の磁力が経年劣化するが、磁石自体に機械的劣化は生じない。磁石を用いた力触覚フィードバックにはこうした利点がありながらも、後述する課題によって設計と応用が困難であった。

本稿では、それらの課題の解決手段として数理モデル、計算アプローチ、設計ツールを導入して、磁石を用いた力触覚フィードバックの設計を可能にした。その結果、図 1 に示すように磁力によって感じられる凹凸の形状を曲線で表現できることを発見した。この現象はこれまでは実験的・直感的に知られていたものの、数理的に説明できなかった。特筆する点として、力触覚という生理現象と磁力という物理現象を数理モデルで定式化できたこと、高速計算によってインタラクティブな設計が可能になったことがあげられる。

2. 関連研究

触覚を提示する手法は静電触覚 [1] や電気触覚 [2] が注目されているものの、力触覚フィードバックを構築するための手法は電動装置による手法が多い。電磁石による磁場生成もそのうちの 1 つの方法である。磁石が受ける遠隔作用の力は、磁場中の磁束密度の大きさによって決ま

る。電磁石に流れる電流をコンピュータで制御することで、磁束密度を変化させて触覚提示を行う手法がある。磁気浮遊によってハプティックインタフェースを構築する MaglevHaptics [4] が知られているほか、FingerFlux [11] では指先に貼り付けた磁石に対して、指の周囲の空間に設置した電磁石を制御して触覚フィードバックを与える。磁石の吸着力を応用した例として、dePENd [13] ではペン先をテーブルの紙に置いたときにテーブル下部の磁石がペンをひきつけ、磁石を動かす 2 次元プロッターによってペンの動きを 2 次元平面上で誘導する。磁力を応用した例として、ZeroN [5] は、フィードバック回路を用いて空中の磁石の重力と吸着力を均衡させて浮遊させる方法を応用して、触れる情報メディアを表現した。触覚提示以外の例では、Actuated Workbench [8] のように電磁石を用いる方法がある。これらは、情報提示するためのデバイスやモノを物理的に動かすために電磁石を用いている。FluxPaper [7] では、電磁石制御で薄い磁石層を持つ紙に触覚提示する例を示した。

同様の仕組みを無電源で示した方法に HapticCues [12] がある。ラバーマグネットシートの着磁パターンデザインを工夫した Magnetic Plotter [14] があげられる。磁石そのものの触覚提示をインタフェース設計に応用した例は Mechamagnets [16] で示されているが、電磁気学の計算から導かれたものではなく、複数のインタフェースのための磁石配置とデザインパターンにフォーカスしている。

こうした磁石と電磁石を用いて物理的な作用力を制御する手法に対して、磁石から生じる力を計算する方法も提案されてきた。磁気回路は電磁気学の学問分野であり、計算機科学よりも長い歴史を持っているものの、近似計算による高速な計算や、複雑な制約条件での計算が可能になったのは最近のことである。我々が磁石の相互作用を計算するために用いたのは、後述するダイポール法 [15] という近似計算手法である。ダイポール法はすでに CG アニメーション内で磁石の動きを再現する目的 [9] のために用いられている。

磁石の遠隔作用力は、すでに心理学の実験でも注目されてきた。Heyward [3] は、2 つの磁石が接近・離隔したときに生じる特徴的な力について、人間がどのように感じるかを装置を用いて実験した。装置のレバーを左右に動かしたときに固定された磁石とレバーに埋め込まれた磁石が生じる感覚を Bumping と呼び、あたかも物理的な高さのある曲面を移動したかのような感覚が得られることを明らかにした。しかしながら、この感覚を誘起する際の正確な理論は示されず、また磁石を用いた際に生じる触覚を設計すること、目的とする触覚を実現するための磁石の配置や構成については数理的に示されていない。

*1 磁力は電磁相互作用であるため、磁石の相互作用も理想的には真空中の電磁波の速度（光速）で行われる。

3. 磁石触覚

「磁石触覚」を、磁石から生じる磁力によって得られる力触覚のことを指し、磁力の相互作用によって設計された力触覚フィードバックを含めた意味として定義する。磁力が作用する対象は力覚と触覚だが、簡便のために磁石触覚という表現を用いる。本稿において磁石は永久磁石を前提とする。本稿では扱わないが、磁石と強磁性体の間に生じる磁力も磁石触覚に含まれる。これまでも、磁力が力触覚を提示する方法として利用されてきた。電磁気学の発展によって、磁石の間に生じる磁力は解析的に計算可能になった。こうした状況の中で、磁力による力触覚フィードバックの設計と応用を妨げていたのは、次節にあげる3つの課題であった。本稿は課題に対してそれぞれ、(1) 磁石触覚の定式化と数理モデル (3章)、(2) 高速で柔軟な計算アプローチ (4章)、(3) インタラクティブな設計ツール (5章)を導入して解決した。

3.1 磁石触覚の課題

第1に、磁力が非直感的という課題がある。力と距離の関係を見れば、バネの弾力 $F = kx$ はバネ係数 k によって線形であり、摩擦力 $F = \mu N$ は摩擦係数 μ と垂直抗力 N によって一定である。しかし、磁石間に生じる力は磁石の距離が近づくと非線形に増大する。これは、磁石を磁極としてとらえることで理解できる。磁極は電場における電荷に相当し、クーロンの法則が適用できる [17]。そのため、磁極 q, Q の間に生じる力 F_{q-Q} は、磁極間の距離の2乗に反比例する (式(1)*2)。また、実際の磁石を想定して、磁気モーメント m_α *3が遠隔にある他の磁気モーメント m_β によって作られた磁場 B に置かれたときに生じる力 F は、式(2)に式(3)を代入した形で表される。これらが、磁石間に働く磁力が非直感的である理由である。

$$F_{q-Q} = \mu \frac{qQ}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$F = \nabla(m_\alpha \cdot B) \quad (2)$$

$$B = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{m_\beta}{r^3} - \frac{3(m_\beta \cdot r)r}{r^5} \right) \quad (3)$$

第2に、計算手法の課題がある。一般に電磁気の計算は複雑であり、また解析的な計算手法の柔軟性は低い。磁気回路設計において、単体の磁石から得られる磁場を解析的に求めるには積分法を用いる [18]。磁石から生じる磁界は磁石のすべての領域における積分で求まるが、積分可能な磁気回路でなくてはならない。複雑な位置関係にある円柱型磁石に対応した積分法の手法 [10] もあるが、限定的である。積分法では計算が複雑になるうえに、磁化方向の共有軸と並行軸にある磁石以外には適用できない。また、磁石

の配置の自由度を担保する高速な計算手法がない。有限要素法 (FEM) では2次元または3次元における領域と材質を自由に設定できる。しかし、磁石を移動する操作を行うごとに空間分割と微分方程式の計算が必要となる。よってこれらの方法では、本稿が想定する自由な配置の磁石どうしにおいて生じる磁力を高速に計算するのは困難である。

第3に、設計方法の課題がある。従来のシミュレーションソフトウェアでは、たとえば有限要素法を用いて個別の領域に生じる力を計算するのみである。また、電磁気シミュレーションとして CAE*4と呼ばれる設計ツールが存在するが、これは電動モータの設計や基板設計のための高周波回路解析に使用される。そのため、既存の設計ツールは磁石の相対運動を前提とした設計機能を有していない。また、本稿では磁石配置を変えながらインタラクティブに設計することを想定する。目的とする磁石触覚のための磁石配置を決定するためには、複数の試行を通して最適な磁石配置を決定する作業が必要である。こうした機能を提供する設計ツールやソフトウェアはこれまで存在しなかった。よって、従来の設計ツールを用いて磁石触覚を設計することは不可能である。

3.2 磁石触覚の定式化

磁石触覚を設計するには、まず磁石触覚を人間が理解できる形式で表す必要がある。本稿では、磁石触覚の曲線的なフィードバックを説明するものとして「触覚ポテンシャル」を定義する。ここでいう曲線的なフィードバックとは、図1に示される凹凸の形状と同等である。定義と算出方法を下記に示し、評価実験 (6章) においてヒトの感覚との対応を明らかにする。

磁石どうしが接近すると、それぞれのN極とS極が引き寄せあって極どうしが接近または接触することで力学的に安定する。実際には、お互いの磁石がつくる磁場において最も安定する位置に移動している。この安定状態への移行は、重力場における物体について位置エネルギーが最低となる位置で安定することと同様である。一般に、点 P_A から点 P_B を移動するときの位置エネルギー U は式(4)で表される。

$$U = - \int_{P_A}^{P_B} F dx \quad (4)$$

重力場と同様に静磁場*5も保存力場である。空間に固定された磁石が作る磁場も静磁場である。静磁場中を移動する磁石には、静磁場から受ける磁力 F について位置エネルギーが保存される。磁石が移動した場合、磁石の位置エネルギーは変化する。このときの位置エネルギーの変化が仕事 W であり、磁石を動かすときの手指が行う仕事と同

*2 μ は透磁率、 r は磁極間距離を表す。

*3 ベクトル量をボールド体で表記する。

*4 Computer Aided Engineering

*5 時間方向に磁束密度が変化しない磁場

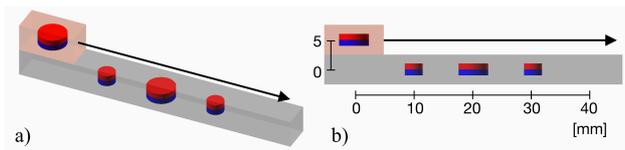


図 2 (a) 斜めと (b) 正面から見た磁石群 A (赤色) と F (灰色). 円柱型磁石 (直径 × 高さ) 5 × 2 と 3 × 2 mm を 10 mm ごとに配置した. 矢印の向きに磁石群 A を 40 mm 移動する

Fig. 2 Two groups of magnet in red and gray.

等である*6. 磁石の移動経路 C における位置エネルギーの分布こそが、磁石触覚における曲線表現であると考えられる. 力触覚フィードバックとして静磁場中の磁石が保存する位置 (ポテンシャル) エネルギー U_H は式 (5) で表される. これを短縮して「触覚ポテンシャル」と定義する. U_H は式 (2) の磁力 F_M (以後、磁力は明示的に F_M と書く) について経路 C を通る線積分, ds は経路 C の微小ベクトルである.

$$U_H = - \int_C \mathbf{F}_M \cdot ds = - \int_C \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{t} ds \quad (5)$$

触覚ポテンシャルの曲線は位置エネルギーの分布であるため、磁石が移動する経路 C に沿って積分する. エネルギーの単位はジュール J である. 式 (5) より、触覚ポテンシャルはニュートン (N) とメートル (m) の積のため、単位は $N \cdot m = J$ となる.

3.3 触覚ポテンシャル曲線の計算方法

具体的な構成を例示しながら触覚ポテンシャル曲線の計算方法を示す. 図 1 の構成を用いて、図 2 に示すように 3D 空間上に磁石を配置する. 計算に先立って、移動する (Active) 磁石群 A と固定された (Fixed) 磁石群 F を作成する. どちらの磁石群も 1 個以上の磁石を含む. 図 2 では、磁石群 A が赤いブロックに、磁石群 F が灰色のブロックに囲まれている.

磁石群 A は経路 C を移動することで、磁石群 F が作る磁場 B からの磁力 F_M を受ける. 磁石群 A が受ける磁力 F_M が触覚ポテンシャル U_H に寄与する磁力である. 磁場 B は保存力場のため、このときの仕事は経路にかかわらず一定である. つまり、触覚ポテンシャルの曲線の形状は、磁石群 A と F の磁石構成と相対位置、経路 C が変わらない限り一定である.

経路 C は連続の曲線を想定しているが、実際の計算では分割した地点ごとに F_M を求める. 経路 C の分割数を N とすると、経路上のある位置 s_i における触覚ポテンシャルを求める式は式 (6) となる. \mathbf{t} は移動経路の単位接線ベクトルであり、明示的に F_M を経路方向に正規化している. この式で求められる触覚ポテンシャルの曲線を図 3 に示す. このカーブが、図 1 で示した曲線と対応している

*6 エネルギー保存の法則

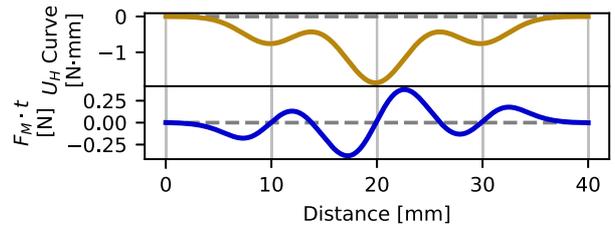


図 3 磁石群 A の移動距離における触覚ポテンシャル曲線と進行方向の磁力の分布

Fig. 3 Distribution of potential curve and magnetic force along movement of group A.

と考えられる.

$$U_H(s_i) = \int_{s_0}^{s_i} \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{t} ds \quad 0 < i < N \quad (6)$$

3.4 磁力が影響する摩擦力

指を用いて動かす場合の摩擦力のほかに、磁力による摩擦力も考慮する必要がある. 磁石の配置によって、経路 C の接線方向以外への磁力が生じることは避けられない. 経路 C の方向は移動する磁石とそれを包含する物質が通るので空間が空いているが、その周囲は物質で囲まれていると想定する. そのため、経路 C の接線について、その主法線*7と従法線*8への垂直抗力が考えられる. そのため、磁石を包含する物質どうしの摩擦力は、2つの法線への磁力によって計算できる. 式 (7) の第 1 項が経路 C の単位接線ベクトル \mathbf{t} の磁力であり、第 2 項が単位主法線ベクトル \mathbf{n} と単位従法線ベクトル \mathbf{B} における摩擦力である. 磁石触覚に寄与する磁力とどちらかの法線上の磁力が同等であった場合、磁石触覚と摩擦力の比率は摩擦係数 μ となる. そのため、磁石を包含する物質の摩擦係数 μ が小さい場合には、実質的に摩擦力の影響を無視できる.

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{t} + \mu(\mathbf{F}_M \cdot \mathbf{n} + \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{B}) \quad (7)$$

4. 計算アプローチ

磁石触覚の設計では、磁石の位置・回転・形状・サイズの 4 パラメータについて調整しながらインタラクティブに触覚ポテンシャルを計算する必要がある. こうした計算には有限要素法 (FEM) が多く用いられるが、本稿ではダイポール法 [15] と呼ばれる計算方法を採用する. 本稿では、ダイポール法について拡張し、磁石の分割数の自動決定、並列計算による高速化の手法を実施した. また、FEM との精度比較と計算速度の比較も行った.

4.1 FEM とダイポール法

ダイポール法と FEM はどちらも利点と欠点があるが、

*7 曲線が作る平面に平行な法線

*8 接線と主法線と直交する法線. 磁場ではないので注意.

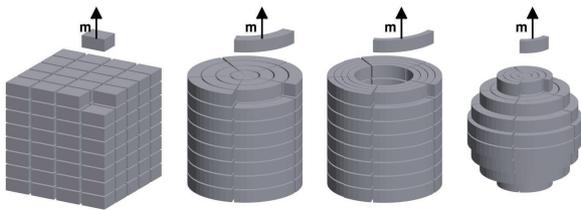


図 4 4 種類の形状の磁石 (角型, 円柱型, リング型, 球型) を磁気モーメントごとの領域に分割したイメージ図. それぞれの領域に磁気モーメント m が磁化方向に配置される

Fig. 4 Split image of four shapes of magnet with magnetic moment.

磁石触覚の設計にはダイポール法が有利である. FEM は, 閉空間をメッシュ状に分割して各領域における各種の物理問題 (今回は電磁気問題) を解く手法である. 空間領域を分割した有限要素において, 磁石が構成する磁気回路について計算する. 今回は閉磁路ではない磁気回路を扱うため, 磁石を設置する空間領域を十分に大きくしないと, 境界条件による影響が生じて磁力に計算誤差が生じる. また, 磁石の回転, 磁石どうしが接近した場合には, 磁気回路として最適なメッシュ分割は困難である. 分割された要素数に応じて精度が向上するが, 基本的には膨大な計算が必要である.

ダイポール法は磁石を磁気双極子^{*9}と見なす計算方法である. ダイポール法の特徴は, ダイポールごと, つまり分割された磁石の磁気モーメントごとに, それぞれの磁気モーメントから受ける磁力を計算する点である. 磁石を細かい磁気モーメントに分割して, 磁気モーメントが空間中の任意の位置に作り出す磁束密度を計算する. また, それぞれの磁気モーメントが空間の磁束密度によって受ける磁力を計算する. 無限遠の計算が可能であるため空間領域はなく, それによる計算誤差が発生しない. また, 磁力を算出する式は微分方程式による近似式であり, 高速計算が可能である. ダイポールの分割数に応じて精度が向上するが, 基本的には少ない計算量で済む.

4.2 磁石の形状と分割数の自動決定

本稿では, 4 種類の形状の磁石 (角型, 円柱型, リング型, 球型) を扱えるようにする. 磁石の着磁方向についてダイポールの分割を行った. 磁石を分割した際のそれぞれの領域の体積に応じて, 磁気モーメントの比重が均等になるように配分した (図 4). 磁石の磁化方向への分割を工夫することで, 磁石の相対運動における誤差を少なくする狙いがある. この方法を導入することで, 仮に磁石の分割数が少ない場合でも, たとえばボクセルのように単位領域ごとに分割してしまう手法よりは, 磁石が持つ磁気モーメントの理想的なモデルに忠実であると考えられる. また, 磁気モーメントごとに磁化の方向を設定できるので, 単一

磁石に異なる方向の着磁を施した磁石を用いて計算可能である.

また, ダイポール法 [15] では, 磁気モーメントの半径 ρ (隣り合う磁気モーメントの距離の半分に相当) に対する磁石間の磁気モーメントの最小距離 r (式 (8) の $|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i|$ に相当) の比 ρ/r が, $\rho/r \leq 1/7$ になることを推奨している. 磁石の分割数によっては, この比が推奨値を超えてしまうことがある. こうした場合を防ぐために, 磁石分割における最大の磁気モーメント距離を定義して, それを超えないように自動分割する機能を搭載した. またこれとは別に, ユーザが分割数を入力することもできる.

4.3 磁力の総和の計算

ここからは, 2 つの磁石 α と β を想定して, その 2 つの磁石の間の磁力について計算する. 磁力 \mathbf{F}_M は, 磁石 α が β から受ける磁力として考える. どちらの磁石も, ダイポール分割によって磁石 α が M 個, β が N 個の磁気モーメントに分割されたものとする. まずは, 磁石 α のある磁気モーメント \mathbf{m}_k が受ける磁力について考える. ダイポール法では磁気モーメントが受ける磁力について, 先の式 (2) と式 (3) を展開し, 高次解を除いた微分方程式の近似解として求める. 磁気モーメント \mathbf{m}_k が, N 個に分割された磁気モーメント \mathbf{m}_i から受ける磁力 \mathbf{F}_k は式 (8) となる. そのため, 実際に磁石 α が磁石 β の磁場から受ける磁力 \mathbf{F}_M は, 磁石内のすべての磁気モーメントにおける \mathbf{F}_k の総和となる. ここでは先行研究 [9] にならい, 正規化ベクトルを $\mathbf{n} = (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i)/|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i|$ とする.

$$\mathbf{F}_k = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{1}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i|^4} [-15\mathbf{n}((\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n})(\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{n})) + 3\mathbf{n}(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{m}_i) + 3(\mathbf{m}_k(\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{m}_i(\mathbf{m}_k \cdot \mathbf{n}))] \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k^M \mathbf{F}_k \quad (9)$$

これと同様の操作を, 磁石群 A と磁石群 F の磁石の組合せについて行うことで, 空間に置かれたすべての磁石の相互作用から磁石群 A が受ける磁力の総和が計算できる.

4.4 行列計算による高速化

ダイポール法は, 有限要素では解決が難しい微小な隙間の計算は得意であるが, 計算上の効率がいい手法ではない. FEM はメッシュの分割数によって計算量が $O(n)$ のオーダで増大するが, ダイポール法は磁気ダイポールの分割数に応じて計算量が $O(n^2)$ のオーダで増大する. FEM よりも高速で精度の設定についても扱いやすいが, ダイポールの分割数を誤ると余計に計算時間がかかってしまう. そのため, ダイポールの分割数を実用的な範囲にすると, CPU に

*9 Magnetic dipole

よる計算では並列計算を用いても数秒以上の時間がかかってしまう。本稿では、GPGPUを用いて高速に処理する手法も提示する。効果的な方法としては、ダイポール近似法の基本式を、GPUの並列計算に適した行列形式に変換することである。

ダイポール法をベースにした式に基づいて計算するにあたり、行列計算はCuPy^{*10}を使用した。CuPyはNumPyと互換性のあるライブラリであり、NumPyと同等の行列計算の関数が用意されている。しかし、今回の計算にはCuPyで用意された関数では一定の高速化でとどまってしまうことが分かった。さらなる高速化のため、CUDAの機能であるカーネル関数を利用して、GPUのスレッドごとに並列実行されるC言語の関数を記述した。

4.5 行列式への変換

本稿では、式(8)に示した単体のダイポールについての方程式を、行列計算の方程式に組み直した。式(8)を行列式で表すにあたり、単体の磁石に含まれる複数の磁気モーメントを式(10)の形式に変換する。このとき、 α を動かす磁石、 β を固定する磁石とする。次に、正規化ベクトル \mathbf{n}_i を式(11)の形式 \mathbf{R} に変換する。最終的に式(8)の式は、行列式を用いて式(12)と式(13)の \mathbf{F}_M として表現される。このとき、 \cdot はドット積、 \otimes は直積を意味する。すべての磁石の組合せにおける磁力の最終的な解は、式(13)の \mathbf{F}_M の、すべての磁石の組合せを入れ替えたものの総和として求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_\alpha &= \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{\alpha_1} & \mathbf{m}_{\alpha_2} & \dots \end{pmatrix} = (\mathbf{m}_{\alpha_i})_{1 \leq i \leq N} \\ \mathbf{M}_\beta &= \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{\beta_1} & \mathbf{m}_{\beta_2} & \dots \end{pmatrix} = (\mathbf{m}_{\beta_k})_{1 \leq k \leq M} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{r}}_{11} & \hat{\mathbf{r}}_{12} & \dots & \hat{\mathbf{r}}_{1M} \\ \hat{\mathbf{r}}_{21} & \hat{\mathbf{r}}_{22} & \dots & \hat{\mathbf{r}}_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{\mathbf{r}}_{N1} & \hat{\mathbf{r}}_{N2} & \dots & \hat{\mathbf{r}}_{NM} \end{pmatrix} = (\hat{\mathbf{r}}_{ik})_{\substack{1 \leq i \leq N \\ 1 \leq k \leq M}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= 3\mathbf{M}_\alpha \cdot (\mathbf{M}_\beta \otimes \mathbf{R}) + 3\mathbf{M}_\beta \cdot (\mathbf{M}_\alpha \otimes \mathbf{R}) \\ &\quad + 3\mathbf{R} \cdot (\mathbf{M}_\beta \otimes \mathbf{M}_\alpha) - 15\mathbf{R}((\mathbf{M}_\beta \otimes \mathbf{R}) \cdot (\mathbf{M}_\alpha \otimes \mathbf{R})) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_i^N \sum_k^M \frac{(\mathbf{X})_{ik}}{|\mathbf{r}_{\beta k} - \mathbf{r}_{\alpha i}|^4} \quad (13)$$

4.6 磁力の正規化

磁石の磁力は計測装置や設備によって得られる結果が異なる。また、2つの磁石間の吸着力のデータは提供されていない。そのため、鉄板への吸着力を参照して、プログラムからの出力がそれに合致するようプログラムの設定を調整した。本稿では、ネオマグ社^{*11}が提供する磁石に関する

データを用いて、磁力の計算結果を正規化した。具体的には、円柱型磁石(N40)の直径10mm、高さ10mmの吸着力3.81kgを参照値として利用した。本稿のプログラムで同様の構成を作成し、そこで得られた磁力の数値が参照値に合うように磁気モーメントの数値を調整した。

5. 設計ツール

5.1 設計ツールとプレビュー

磁気触覚のリアルタイムな設計を行ううえで、GUIをとともなう設計ツールが必要となる。設計ツールは、基本となるソフトウェア部分をPythonで記述し、GUI部分をPyQt^{*12}を用いて設計した。また、パラメータを設定した磁石と、それを包含するための3Dオブジェクトの視覚的な表示は、OpenSCAD^{*13}を用いた。OpenSCADは単独のGUIソフトウェアだが、本稿の設計ツールに組み込むために、3Dモデルの表示部分とスクリプトの解析部分だけを取り出して使用した。実際の設計ツールの画面を図5に示す。

5.2 データ形式と操作の指定

設計ツール上では磁石についてのパラメータを設定できる。計算に与える入力データは、おおまかに磁石と移動操作の2つである。まず、磁石をActiveとFixedという2つのグループに分ける。前提として、ActiveもFixedも複数の磁石があるものとして扱う。Activeは手によって動かされる磁石を指し、Fixedはそれ以外の磁石を指す。具体的には、ActiveとFixedにグループ分けされた磁石について、形状、サイズ、位置、回転と、Activeに対して行う3種類の移動操作とそのパラメータである。入力データはJson形式のため、Jsonファイルとして指定することもできる。ユーザは入力時のJsonファイルを編集するか、読み込んだJsonデータをアプリケーション上で編集することで、磁石と移動操作のパラメータを変更できる。アプリケーション上での変更は、そのつどプレビュー画面に表示される。また、触覚ポテンシャルは、Jsonデータの編集ごとに計算することができる。

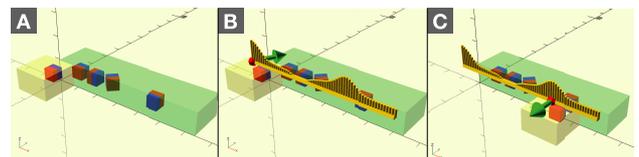


図5 設計ツールにおいて (A) 動かす磁石のオブジェクトを黄色、固定を緑色として (B) 触覚ポテンシャルの計算結果を黄色のポールで示している。 (C) アニメーション表示中には、緑色の矢印が動かす磁石にかかる3次元の力の方向を示す

Fig. 5 Visualization on the design tool.

^{*10} NVIDIA社GPU用並列計算プラットフォームCUDAをPythonから利用するライブラリ

^{*11} <https://www.neomag.jp>

^{*12} GUIツールキットQtをPythonから利用するバインディング

^{*13} CGレンダリングライブラリOpenCSGをベースとして独自のスクリプト言語で3Dモデルを記述できるソフトウェア

5.3 計算とデータの出力

触覚ポテンシャルの計算においては、Active の磁石が受ける力 F_M をもとに計算する。回転の場合、Active の磁石は回転行列による回転操作を適用したあと、Fixed の磁石から受ける力 F_M を計算する。また、回転にともなってテコの原理が適用されるので、指が触れる箇所を作用点として登録しておくことで、作用点と回転の中心をもとにしてテコの原理による調整を行う。ユーザの編集作業によって目的とするポテンシャルを提示する磁石の位置が決定される。設計ツールは、モデルデータを STL 形式で出力する OpenSCAD の機能を用いて、STL ファイルを出力する。その際、OpenSCAD スクリプトの機能を用いて、磁石を挿入する空間を切り抜いたオブジェクトのデータを作成することができる。

5.4 Jupyter を用いた設計

Python のインタラクティブな実行環境 Jupyter を用いて、プログラムから磁石触覚を設計する方法を実装した。これに先立ち、磁石触覚の計算プログラムを Python モジュールとして利用できるようにした。磁石のパラメータを変数として扱いながら触覚ポテンシャル曲線を出力する。触覚ポテンシャル曲線を Matplotlib で表示できるほか、OpenSCAD のプレビューも Jupyter の画面において表示できる。これによって、ユーザは GUI だけではなく、コード上からもインタラクティブに磁石触覚を設計できる。また、パラメータを変えながら新しい触覚ポテンシャル曲線を提示する磁石の組合せを探索できる。

6. 評価と実験

6.1 FEM との比較

FEM による結果を比較するために、オープンソースの FEMM^{*14}を用いて求めた結果と照らしあわせた。FEMM は 2.5 次元シミュレーションのため、2 次元平面に設計図を描き、2 次元平面について Depth を設定して 2.5 次元空間を定義する。有限要素法では無限遠の空間を設定できないため、空間の境界には磁束が吸収されてしまう。これを避けるために、磁石が配置される領域のまわりに、20mm の余白を設定した。

また、FEMM での計算結果では本稿で正規化した磁力よりも大きい磁力を示した。そのため、FEMM が求めた磁力の値を本稿での計算結果に合うように正規化した。3mm 四方の角型磁石を用いて同じ構成 (図 7) を作成し、FEM と本稿のアプローチでの計算結果の比較を行った。その結果を図 6 に掲載する。磁力のグラフでは 2 つのアプローチの差分が分かるものの、触覚ポテンシャル曲線では差がほぼ見られなくなる。そのため、本稿のアプローチは FEM

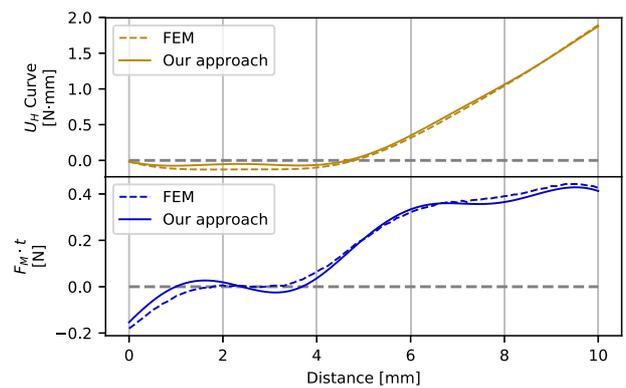


図 6 磁力とポテンシャル曲線について FEM と本手法の比較
Fig. 6 Comparison in magnetic force and potential curve.

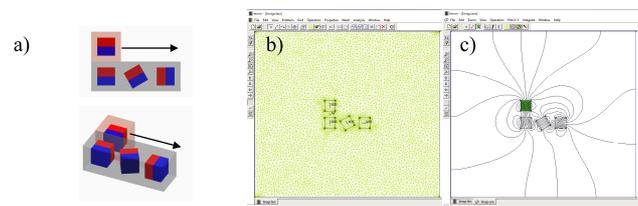


図 7 比較に用いた構成。(a) 本稿アプローチの CAD による表示と移動経路、(b) FEMM のメッシュ分割、(c) 1 つの磁石領域に掛かる力を計算

Fig. 7 Settings for comparison.

と同等程度の結果を出力できることが分かった。

6.2 計算速度の比較

ダイポール法を拡張した本手法について、FEM による計算との性能を比較した。FEM の計算速度の測定には、前節と同様に FEMM を用いた。磁石触覚を求めるタスクを次の 3 種類用意した。磁石群 A はつねに 1 個とし、磁石群 F が 1, 2, 3 個になる場合のタスクを用意した。磁石はすべて 3mm 四方の角型磁石を用いた。どのタスクでも、経路の分割数は 100 とした。FEMM を用いた場合の平均の要素数はそれぞれのタスクで 9,806, 9,825, 10,819 個であった。ダイポール法において、磁石 1 個あたりの分割数は 64 (1 辺あたり 4 分割) に設定した。FEMM と GPU を用いたダイポール法の計算は 100 回平均の時間を、CPU を用いたダイポール法では 10 回平均の時間を掲載した。結果を図 8 に示す。

6.3 経路分割およびダイポール分割と精度の関係

経路 C の分割数に応じて、触覚ポテンシャル曲線の形状が変化することが確認された。分割数が少ない場合、曲線の極小・極大値の位置が予想される位置からずれる。分割数が 100 以上の場合、こうした傾向は見られなくなる。これは、触覚ポテンシャル曲線の形状が、磁力 F_M の分布の精細度に依存しているためと考えられる。

また、ダイポール分割における分割数が精度に影響する

*14 <http://www.femm.info>

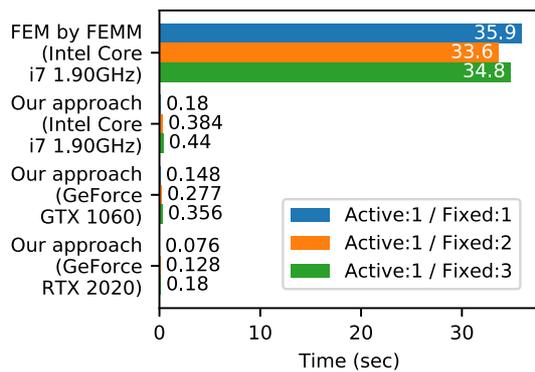


図 8 3種類のタスクについて、FEMをCPUで、本稿のアプローチをCPUとGPUの両方で実行した

Fig. 8 Three tasks by FEM on CPU and our approach on CPU and GPU.

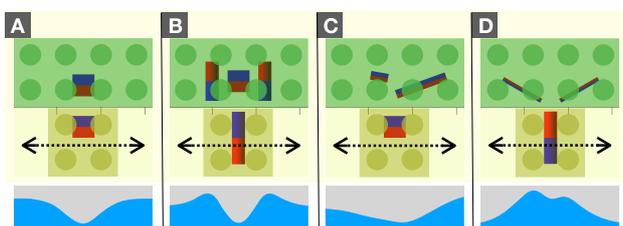


図 9 4種類の磁石触覚について、LEGOブロック内に埋め込んだ実際の磁石の構成と、それによって提示される触覚ポテンシャルの図を示す

Fig. 9 Arrangement and potential curve of four patterns.

かどうか調べた。磁石のそれぞれの形状のサイズごとの分割数を、4, 6, 8にしてFEMとの比較で用いた構成で計算した結果、ほとんど違いが見られなかった。触覚ポテンシャル曲線において、極小、極大値の部分において、最大で5%程度の差が確認された。そのため、分割数の高さが精度に寄与するのは、磁石どうしが接近している場合であると考えられる。

6.4 被験者実験

磁石触覚における触覚ポテンシャルの表現が、人が感じる力触覚フィードバックの感覚と一致しているかを確認する必要がある。ここでは、4種類の類似したポテンシャルを持つ磁石触覚のパターンについて、図9の下部に示した図式化した触覚ポテンシャルをそれぞれ用意した(表1に使用した磁石の形状、サイズ、位置、回転を記載した)。4つのパターンは、基準とするパターンに対して、若干の左右非対称な配置、パターンの反転、強弱の変更の3つを加えて作成した。LEGOで構成された磁石触覚を提示する4つのブロックには、AからDまでのアルファベットが割り振られている。被験者は著者の職場から15名を選出した。被験者1-9(平均年齢35.6歳)は事前に実験内容および研究内容を知らない状態で実験に参加し、その後実験を実施した被験者10-15(平均年齢24.2歳)は研究内容を知ったうえで実験に参加した。

表 1 4つのパターンに使用した磁石のパラメータ。サイズは角型で横幅・奥行き・高さ、円柱型で直径・高さを示す

Table 1 Size of magnets used for four patterns.

パターン	形状	サイズ [mm]	位置			回転
			x, y, z	x, y, z	x, y, z	
A (Active)	角型	5, 5, 5	0.0, -4.5, 5.7	90, 0, 0	90, 0, 0	
A (Fixed)	角型	5, 5, 5	16.0, 5.0, 5.7	90, 0, 0	90, 0, 0	
B (可動)	円柱型	φ3, 12	0.0, -7.0, 5.7	90, 0, 0	90, 0, 0	
	角型	5, 5, 5	16.0, 6.0, 5.7	270, 0, 180	270, 0, 180	
	円柱型	φ3, 9	10.0, 6.0, 5.7	270, 0, 0	270, 0, 0	
C (可動)	角型	5, 5, 5	0.0, -4.5, 5.7	90, 0, 0	90, 0, 0	
	角型	12, 2, 2	22.0, 5.0, 5.7	270, 0, 200	270, 0, 200	
	角型	4, 4, 2	12.5, 7.0, 5.7	270, 0, 170	270, 0, 170	
D (可動)	円柱型	φ3, 12	0.0, -7.0, 5.7	90, 0, 180	90, 0, 180	
	角型	5, 10, 1	9.5, 4.0, 5.7	0, 90, 60	0, 90, 60	
角型		5, 10, 1	22.5, 4.0, 5.7	0, 270, -60	0, 270, -60	

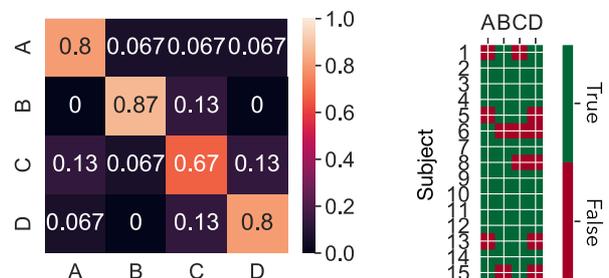


図 10 正答率の混同行列と正答の正否値で示した識別評価の結果

Fig. 10 Confusion matrix and binary answer of distinction test.

6.5 識別評価

識別評価では被験者1-15に対して、図9の4種類のパターンについて同時に提供し、磁石触覚を提示するブロックを触ってもらい、対応すると考えた触覚ポテンシャルの図を選んでもらった。最初に磁石が提示する触覚についての説明を与えた。また、十分な時間を与えて実際に4種類のパターンが違う触覚を提示することを体験してもらった。次に、被験者は解答用紙を与えられ、回答が終わったら知らせるように通知された。解答用紙に印刷された問題は、左側にブロックに割り振られたアルファベット、右側にランダムに並べ替えられた触覚ポテンシャルの図があり、その間を線で結ぶことで回答する。4つのパターンについての混同行列と、被験者ごとの回答の正否値を図10に示す。

6.6 結果と考察

識別評価の結果(図10)では、被験者の回答がすべて誤りになることはなく、A, B, C, Dの回答率は80, 87, 67, 80%となった。識別評価から、AとCの形状が類似することで混同しやすく、Bは他のパターンと区別しやすいことが分かる。このことから、触覚ポテンシャルの形状を識別することは場合によって容易ではないが、類似の形状でも

相対的な触覚の大きさを知覚しやすいことが分かった。

7. 応用

7.1 組み立て可能なブロックとしての磁石触覚

評価実験に使用した LEGO ブロックを用いて、側面に印刷された触覚ポテンシャルを参照しながら、ユーザが自由に磁石触覚について組み合わせて編集できるタンジブルデバイスを作成した (図 11)。設計ツールの機能を用いて、LEGO ブロックの筐体の 3D データから磁石の配置のための空洞を切り取る操作を行った。3D プリンタを用いて出力したプラスチックブロックの空洞に、設計ツール上で配置したものに対応する磁石を埋め込んで作成した。

7.2 インタラクティブシステムのための磁石触覚

インタラクティブシステムと触覚デバイスの融合を目的として、iPad の画面に表示された触覚ポテンシャルに対応する磁石触覚のデバイスを作成した (図 12)。このアプリケーションは、磁石が含まれた物理的なボールを指でスライドさせ、磁石触覚によって作られる触覚ポテンシャルが坂のように感じられるゲームとして制作した。はじめに設

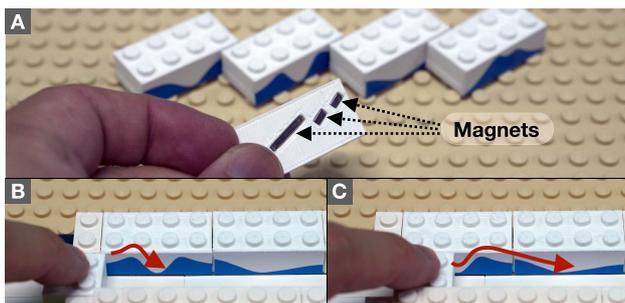


図 11 (A) LEGO ブロックに磁石を埋め込むことで、LEGO ブロック側部に印刷された触覚ポテンシャルを提示する磁石触覚のデバイスを作成した。(B, C) ラベルに対応する山谷の感覚と、ブロックを組み合わせたときの接続を示す

Fig. 11 LEGO-shaped modular blocks for building a pattern of haptics.

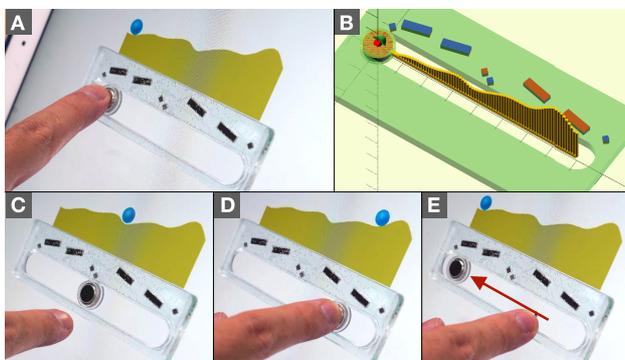


図 12 磁石触覚を活用したインタラクティブシステムの例。(A, C-E) iPad 上のアプリケーションと指の操作に対する動き。(B) 設計ツール上での磁石の構成と触覚ポテンシャルの表示

Fig. 12 Example of interactive system.

計ツール上で磁石の配置を行い、途中にくぼみがある坂道に見立てて触覚ポテンシャルを設計した。その磁石配置をもとにアクリル樹脂の板に穴あけ加工を行い、磁石を埋め込んで接着し、iPad の画面上に設置した。ボールに見立てた磁石を右まで持っていくと、一気に坂を落ちるように左側に戻るが、途中のくぼみに止めるとその位置で安定して動かなくなることが確認できた。

7.3 ヒューマンインタフェース設計のための磁石触覚

本稿のシステムでは、OpenSCAD と連携することで、3D CAD ソフトウェア上でヒューマンインタフェースの部品を設計することを想定している。図 13 では、スライダなどのタンジブルインタフェースへ組み込むための磁石触覚の例を示す。磁石群 F の円柱型磁石をリング型に変更し、位置をずらしていくことで、鋭角なノコギリ状の触覚ポテンシャル曲線を得ることができる。このように磁石の 4 つのパラメータ (位置、回転、形状、サイズ) を変更しながらインタラクティブな設計を経ることで、ヒューマンインタフェースのための新しい磁石触覚を設計できる。

8. ディスカッション

8.1 磁石触覚とその利便性

有限要素法との比較の結果 (図 6, 図 7) では、触覚ポテンシャルの結果がほとんど同等のものとなり、近似計算であるダイポール法でも有効な精度が得られることが分かった。また評価実験の結果 (図 10) から、触覚ポテンシャルの形状と傾きを目的に応じて調整することで、力触覚フィードバックの設計に実用できることが分かった。この 2 つから、触覚ポテンシャルの高速化計算のために拡張されたダイポール法の手法と、磁石触覚の視覚的表現としての触覚ポテンシャルの有用性が確かめられた。

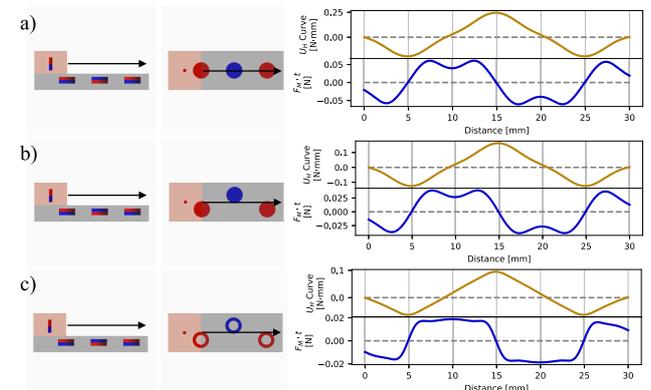


図 13 磁石の移動と置き換えによる力触覚の探索。a) 円柱型 ($\phi 5 \times H 2 \text{ mm}$) を直線に配置, b) リング型 (空洞 $\phi 3 \text{ mm}$) に変更, c) 中心から 2.2 mm 移動すると、磁石群 A 群の円柱型 ($\phi 2 \times H 4 \text{ mm}$) が受ける触覚ポテンシャル曲線が鋭角なノコギリ状になる

Fig. 13 Saw wave distribution by special arrangement.

8.2 設計ツールの制約と発展

設計ツールはPython から利用できる PyQt を用いて、その GUI 上で OpenSCAD のプレビューを表示できる構成にした。そのため、3D 設計ツールとしては機能が低く、一般的な 3D CAD ソフトウェアのような機能は搭載していない。今回は技術的な検証のために、磁石の配置に応じた触覚ポテンシャルのリアルタイムプレビューを最低限の機能として設計した。計算のためのモジュールは Python で記述されているので、将来的にはプラグインとして CAD ソフトウェアに組み込むことも可能である。

9. 結論

磁力を用いた力触覚フィードバックを磁石触覚と定義し、数理モデル、計算手法、設計ツールを示した。磁石触覚を表現する手段として、触覚ポテンシャルとその曲線を導入することで、設計の段階において実現される力触覚フィードバックを予測することができるようになった。また、本稿で示した触覚ポテンシャルの計算手法と応用事例が、今後のヒューマンインタフェースにおける磁石触覚の基礎と応用において貢献できることを示した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 18K18097 の助成を受けたものです。貴重な助言をくださった Kai Kunze 氏 (慶應義塾大学)、仲谷正史氏 (同左)、花光宣尚氏 (Enhance Inc.) に感謝します。

参考文献

- [1] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: Tesla-Touch: Electro-vibration for Touch Surfaces, *Proc. 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '10*, pp.283–292, ACM (online), DOI: 10.1145/1866029.1866074 (2010).
- [2] Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Palm Touch Panel: Providing Touch Sensation Through the Device, *Proc. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp.79–82, ACM (online), DOI: 10.1145/2076354.2076370 (2011).
- [3] Hayward, V.: A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store, *Brain Research Bulletin*, Vol.75, No.6, pp.742–752 (2008).
- [4] Hollis, R.: Maglev Haptics: Butterfly Haptic's New User Interface Technology, *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos, SIGGRAPH '08*, p.23:1, ACM (online), DOI: 10.1145/1401615.1401638 (2008).
- [5] Lee, J., Post, R. and Ishii, H.: ZeroN: Mid-air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp.327–336, ACM (online), DOI: 10.1145/2047196.2047239 (2011).
- [6] MacLean, K.E.: Haptic interaction design for everyday interfaces, *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, Vol.4, No.1, pp.149–194 (2008).
- [7] Ogata, M. and Fukumoto, M.: FluxPaper: Reinventing Paper with Dynamic Actuation Powered by Magnetic Flux, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp.29–38, ACM (online), DOI: 10.1145/2702123.2702516 (2015).
- [8] Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The Actuated Workbench: Computer-controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces, *Proc. 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '02*, pp.181–190, ACM (online), DOI: 10.1145/571985.572011 (2002).
- [9] Thomaszewski, B., Gumann, A., Pabst, S. and Straßer, W.: Magnets in Motion, *ACM Trans. Graph.*, Vol.27, No.5, pp.162:1–162:9 (online), DOI: 10.1145/1409060.1409115 (2008).
- [10] Vokoun, D., Beleggia, M., Heller, L. and Šittner, P.: Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.321, No.22, pp.3758–3763 (2009).
- [11] Weiss, M., Wacharamanotham, C., Voelker, S. and Borchers, J.: FingerFlux: Near-surface Haptic Feedback on Tabletops, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, pp.615–620, ACM (online), DOI: 10.1145/2047196.2047277 (2011).
- [12] Wolf, K. and Bennett, P.D.: Haptic Cues: Texture As a Guide for Non-visual Tangible Interaction, *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '13*, pp.1599–1604, ACM (online), DOI: 10.1145/2468356.2468642 (2013).
- [13] Yamaoka, J. and Kakehi, Y.: dePENd: Augmented Handwriting System Using Ferromagnetism of a Ballpoint Pen, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13*, pp.203–210, ACM (online), DOI: 10.1145/2501988.2502017 (2013).
- [14] Yasu, K.: Magnetic Plotter: A Macrotexture Design Method Using Magnetic Rubber Sheets, *ACM SIGGRAPH 2017 Studio, SIGGRAPH '17*, pp.6:1–6:2, ACM (online), DOI: 10.1145/3084863.3084866 (2017).
- [15] Yung, K.W., Landecker, P.B. and Villani, D.D.: An analytic solution for the force between two magnetic dipoles, *Physical Separation in Science and Engineering*, Vol.9, No.1, pp.39–52 (1998).
- [16] Zheng, C. and Do, E.Y.-L.: Mechamagnets: Tactile Mechanisms with Embedded Magnets, *Proc. 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '18*, pp.57–64, ACM (online), DOI: 10.1145/3173225.3173268 (2018).
- [17] 日本磁気学会 (編): 磁気便覧, p.3, 丸善出版 (2016).
- [18] 佐川真人: 永久磁石—材料科学と応用, p.352, アグネ技術センター (2007).



尾形 正泰 (正会員)

2016 年慶應義塾大学大学院博士課程修了。同年産業技術総合研究所入所。ヒューマンインタフェースの研究に従事。ACM 会員。

<https://masaogata.com>