

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18097

研究課題名（和文）永久磁石の磁気力を用いた力触覚フィードバック機構の設計手法

研究課題名（英文）Design method of force feedback mechanism using magnetic force of permanent magnet

研究代表者

尾形 正泰（Ogata, Masayasu）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：60783818

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：永久磁石の磁気力を用いた力触覚フィードバック（磁石触覚）を実現するために、工学的な計算手法および人間の感覚器との関係性を明らかにした。また、デジタルファブリケーションとの組み合わせによって、磁石触覚のための設計および組み立てが可能になった。実現したい磁石触覚のための磁石配置を決定するためには複雑な電磁気計算が必要となるが、これを容易に行うための計算手法と、設計のためのフレームワークを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一概に感触といっても人間の感覚器は振動や剪断力などを個別に受容しており、触覚や力覚として分類される。モノの設計においても、これらを合わせた触力覚を複合的に提示する方法が必要である。本提案での目標は、個人がパーソナルファブリケーションを用いて物質的なコンテンツを作り出せる時代において、今までよりも簡単に、また今まで実現されなかった力触覚を提示する機構を設計する方法と、これらを効果的に組み立てる方法を見つけることである。技術的な方法として、容易に入手可能な永久磁石を筐体に組み込むことで、3Dモデルでの設計を可能としながら、力触覚フィードバックを設計できるようにした。

研究成果の概要（英文）：In order to realize magnetic force feedback (magneto-haptics) using the magnetic force of permanent magnet, an engineering calculation method and the relationship with human sensory organs were clarified. Also, the combination with digital fabrication has allowed the design and assembly for magnetic force feedback. As complicated electromagnetic calculation is required to determine the magnet arrangement for the desired magnetic force feedback, we established the framework for the calculation method and design.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：触覚 ヒューマンインタフェース

1. 研究開始当初の背景

世の中に溢れるもののなかで、人が触れるために設計されたものには触ったときの感触が存在する。この感触はものによって初めから設計されていたり、試行錯誤の中で最適なものに落ち着いたりしている。一概に感触といっても人間の感覚器は振動や剪断力などを個別に受容しており、触覚や力覚として分類される。モノの設計においても、これらを合わせた力触覚を複合的に提示する方法が必要である。本提案での目標は、個人がパーソナルファブリケーションを用いて物質的なコンテンツを作り出せる時代において、今までよりも簡単に、また今まで実現されなかった力触覚を提示する機構を設計する方法と、これらを効果的に組み立てる方法を見つけることである。ここではファブリケーションを応用例の一つとして示すが、他の手法にも応用できる方法である。

パーソナルファブリケーションを実現するための基本的な製造機器(3Dプリンタなど)や3D設計ツール(CADソフトウェア)はこれまでプロ向けの高価なものであったが、アマチュア向けの製品が発売され急速に発展した。ところが、ファブリケーションにおいて実用的で機能的なものを制作するには乗り越えるべき3つの問題がある。(1)制作された製造物は単体、または複数の場合であっても組み立てなければ、そのままでは機能的ではない。(2)複数の製造物を組み立てには、ネジやボルトの径や種類、バネやボタンの形状や種類について、工業的な知識が必要である。(3)製造物をインタラクティブなシステムで用いたり、製造物に制御機構を加えるには、センサやアクチュエータを追加する必要がある。これらの問題に対しては、プロ向けのCADソフトウェアを用いて複雑な設計および組み立てを行うことで解決される。しかしながら、これらのプロセスはユーザが根気強く学習と試行錯誤の時間をかけることで実現できるが、すべてのユーザ行えるわけではない。

また、ヒューマンインタフェースやタンジブルインタフェースの設計では、ものを触れたときに起きる感触の提示が重要である。なぜなら、製造物が大きくなればユーザが操作する際に与える力も、手で動かす可動範囲も大きくなる。ユーザが操作する際の触覚提示の有無がユーザ体験に大きく影響する。ユーザ入力やコンピュータ制御を伴う製品のプロトタイプのような用途も同様である。ところが、ファブリケーションにおける触覚提示のための設計はこれまで見過ごされてきた。

2. 研究の目的

これまで、リアクティブな力触覚を持つ機構を設計する手法は素材構造、バネ機構などで実現されてきたが、それぞれ高精度な製造機器の要求、バネを組み込む設計の煩雑さの点で、設計と組み立ての両方におけるユーザの敷居が高かった。磁石を利用することでそれぞれの欠点を解消し、かつ簡単な設計と組み立てで強力な力触覚を提示する手法を実現する。本研究の最終的な目的は、永久磁石の磁気力を用いた力触覚(磁石触覚)を実現するために、工学的な計算手法および人間の感覚器との関係性を明らかにするものである。磁石触覚を、人の手の動きによってリアクティブに生じる磁石間力による力触覚フィードバックとして定義する。デジタルファブリケーションとの組み合わせによって、磁石触覚のための設計および組み立て、複雑な力触覚フィードバックとセンシング手法の設計を容易な方法で行うための手法を実現する。最終的に、これらの計算手法について、再利用可能なフレームワークとしてまとめる。

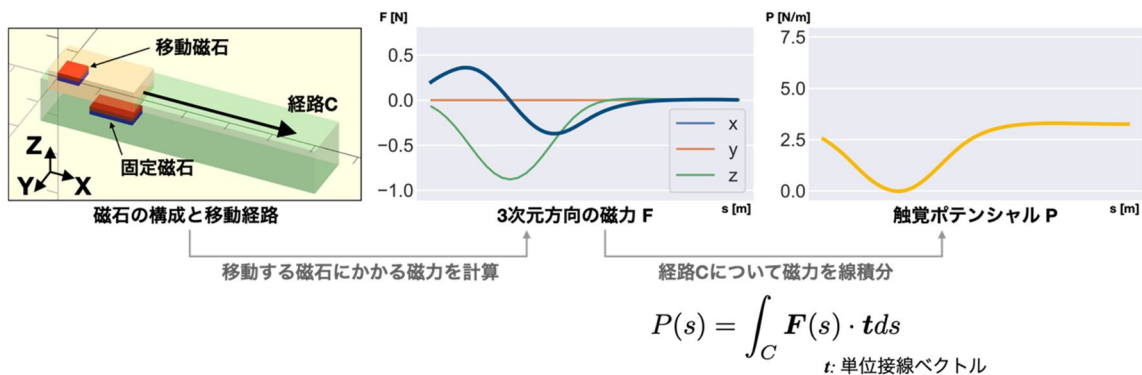
3. 研究の方法

研究開始当初の背景と目的を踏まえながら、磁石触覚の理論と計算を確立すること、またこれを扱うためのソフトウェアフレームワークを整備することを重要な課題として、次の方法で研究を行った。

(1)磁石触覚の定式化

磁石触覚とは、人の手の動きによってリアクティブに生じる磁石間力による力触覚フィードバックについて、物理的な関係性として定式化された触覚のことであると定義した。技術的方法として、磁石を細分化された磁極として扱い、複数の磁石の間に生じる磁気力について、リアクティブな操作を行う軌道においてそれぞれ計算を行うことで、軌道全体での力触覚を計算する。

ダイポール近似と呼ばれる磁力の近似式を用いて、磁石の領域を細かい磁気ダイポールの領域として分割して個別に計算することで、高速に複雑な配置の磁石同士の磁力を求める。また、これを磁石の経路において個別に計算して、経路上のそれぞれの地点における3次元方向の力Fを算出する。【下図参照】



3次元方向の力Fは、各地点において磁石が存在しているときに周囲の磁石が作る磁場によって与えられる力(つまりポテンシャル)であり、空間において磁石を移動させたときの力の総和を触覚ポテンシャルPと定義した。実際には、移動距離の微分とある地点における力の積の総和として計算される磁気エネルギーの分布曲線である。このとき、磁石の移動経路は直線移動、回転移動、曲線移動などがあり、すべての条件に対応するため、経路の単位接線ベクトルtを掛け合わせる。触覚ポテンシャルPは、磁石を移動させたときに指が感じる力触覚のフィードバックを図式化したものと一致するので、これを視覚的な補助として、磁石触覚の設計を行うことができる。

(2) 近似計算と並列計算による高速化

近似計算としては既存のダイポール近似を採用し、既存手法に対して効率的に領域分割を行う手法を取り入れ、ダイポール近似における計算量を削減した。また、並列計算によってダイポール近似における電磁気計算の計算時間を削減した。ダイポール近似で求めるのは研究方法(1)で示した3次元方向の力Fであるが、空間的な離散度が高いと理想的な近似解は求められない。そこで、計算量を維持しながら、Fの曲線を線形補間することで、精度の高い触覚ポテンシャルを算出できるようにした。

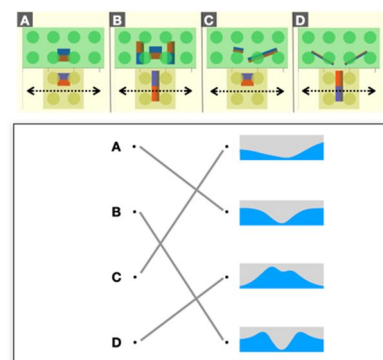
(3) 反復設計および自動設計のためのソフトウェアインターフェース

研究の当初の目標としては、研究方法(1)で示した定式を用いて反復設計によって、求めたい磁石触覚を実現できる最適な磁石配置をユーザが探索することであった。しかしながら、ユーザの探索だけでは複雑な電磁気計算の中で最適解をみつけることが難しい。そのため、反復設計のための3D視覚化ツールと、自動設計のためのソフトウェアインターフェースの両方を設計することにした。

4. 研究成果

(1) 磁石触覚の物理学的解釈の確立

手法(1)で用いた計算手法をもとに、磁石触覚のエネルギー曲線(触覚ポテンシャル)を用いて、ユーザ評価を行った。4種類の異なる力触覚を持つ磁石触覚のスライダー部品と、これをもとにしたエネルギー曲線のグラフ【右図参照】を作成し、それぞれの対応関係を識別できるかを評価した。



(2) ソフトウェアフレームワークの確立

磁石触覚の設計のためのソフトウェアは、Python言語で記述された配布可能なフレームワークとして作成した。また高速化のために、C言語を用いてOpenCLとCUDAというGPGPUフレームワークを用いて計算している。これにより、高速な計算が可能になった。

(3) 反復設計と自動設計のためソフトウェアインターフェース

反復設計のためのインターフェースとして、3次元CGを用いたインタラクティブな設計ツールを作成した。これにより、ユーザは目的の磁石触覚を得るために、3次元上の配置を考慮しながら磁石配置を設計することができる。

また、最適化計算を用いて、目的とする磁石触覚を得るための最適な磁石の配置を推定する方法を開発した。磁石の形状と個数があらかじめ与えられているという条件のもと、最適解の探索が可能であることを示した。磁石1つにつき、ユークリッド空間の座標3軸、回転ベクトル3軸の合計6軸のパラメータを設定した。複数の磁石では、磁石の個数の6倍のパラメータについて最適化計算を行う。手法(2)における計算の高速化によって、磁石3個のパラメータについて10分以内で計算を終えることができるため、性能として十分であると考えられる。

(4)その他

その中で、磁石触覚の計算と設計が重要課題であると認識し、センシング手法の開発については一般的に磁気センサを用いれば可能であることから除外した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogata Masa	4. 巻 1
2. 論文標題 Magneto-Haptics: Embedding Magnetic Force Feedback for Physical Interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2018)	6. 最初と最後の頁 737-743
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3242587.3242615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 尾形正泰	4. 巻 Vol.61, No.2
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 211-220
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----