

ToolShaker：電磁石を用いて日用品自体を駆動する 情報提示手法の提案

道貝 駿斗¹ 沖 真帆^{2,a)} 塚田 浩二²

受付日 2018年4月23日, 採録日 2018年11月7日

概要：近年、日常生活における情報提示手法の1つとして、日用品を活用する取り組みが行われている。これらの研究では、日用品にセンサやアクチュエータ等を組み込み、日用品自体をロボット化/ディスプレイ化することで、日用品の用途/機能に合わせた適切な「情報提示機能」を付加することができる。しかし一方で、サイズ/重量への影響が大きく、特に小型の日用品では使い勝手が悪くなるという問題があった。本研究では、食器や工具等の「磁性を持つ日用品」に着目し、日用品自体に手を加えることなく「情報提示機能」を付加する手法を提案する。具体的には、壁面や机上に収納/設置されたこれらの日用品に対して外部から磁力を加え、日用品を物理的に「動かす」ことで様々な情報提示を行うシステム「ToolShaker」を提案する。

キーワード：日用品, 電磁石, ツールキット, 存在感

ToolShaker: Presentation Technique Using “as-is” Daily Commodities by Physically Controlling Them Using Electromagnet

HAYATO DOGAI¹ MAHO OKI^{2,a)} KOJI TSUKADA²

Received: April 23, 2018, Accepted: November 7, 2018

Abstract: Recently, many research projects proposed presentation techniques in daily environments using commodities. These projects provide proper presentation techniques for daily lives, by embedding sensors and actuators to daily commodities and using them as a robot or a display. However, in particular small commodities, such projects have difficulty to keeping the usability of daily commodities because these projects have significant influence to size and weight of them. In this study, we focus on ferromagnetic commodities, and propose a presentation technique using “as-is” daily commodities while keeping size and weight. Specifically, we propose a new display system “ToolShaker” that physically controls ferromagnetic commodities placed on wall surface using magnetic force from external electromagnets.

Keywords: daily commodities, electromagnet, tool-kit, presence

1. はじめに

近年、日常生活における情報提示手法の1つとして、日用品を活用する取り組みが行われている [1], [2], [3], [4], [5], [6]. これらの取り組みでは、日用品自体をロボット化/ディス

プレイ化することで、日用品の用途/機能に合わせた適切な「情報提示機能」を付加している。このように、「日用品を用いた情報提示」を行うことによって、日常生活の中でも、ユーザにとってより印象的な情報提示を行うことができたり、ユーザが直感的に対象物を想起できたりするような情報提示を行うことができる、というメリットがある。

しかし、こうした研究の多くは、日用品にセンサやアクチュエータ等を組み込むため、日用品のサイズ/重量への影響が大きく、特に小型の日用品では使い勝手が悪くなったり、そもそも組み込みが困難となったりするという問題

¹ 株式会社日立製作所
Hitachi Ltd., Chiyoda, Tokyo 100–8280, Japan

² 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041–8655,
Japan

a) oki@fun.ac.jp



図 1 本提案のコンセプト。壁面等に収納された工具/食器等を外部から動かすことで、情報提示機能を付加する

Fig. 1 The basic concept of the ToolShaker.

があった。

本研究では、上記の問題を解決するために、日用品自体に手を加えることなく、日用品の新しい機能として「情報提示機能」を付加できる手法を提案する。我々はまず、日用品の中から、食器/工具等の「磁性を持つ日用品」に着目した。また、これらの「磁性を持つ日用品」が、壁面等に整然と収納されている状況にも着目した。本研究では、壁面や机上に収納/配置されたこれらの日用品に対して、外部から電磁石で磁力を発生させて、日用品を物理的に「動かす」ことで、様々な情報提示を行うシステム「ToolShaker」を提案する（図 1）。

2. 関連研究

本章では、本研究に関する研究事例について、「日用品を用いた情報提示手法」「電磁石を用いたインタラクション」「道具を拡張したスマートツール」の領域から紹介する。

2.1 日用品を用いた情報提示手法

PotPet [1] は、センサや車輪を搭載した植木鉢型ロボットである。たとえば、植物に必要な水分が不足してきた際に、植木鉢自体が動き回ることで、ユーザに対して水分不足の情報提示を行う。SyncDecor [2] は、室内のゴミ箱や照明等の日用品の挙動を、遠隔地にある日用品の挙動と同期させることで、遠隔地間でユーザの活動状況を共有するシステムである。Lover's cup [3] は、センサや LED、振動モータ等を組み込んだコップ型デバイスである。コップに残っている飲み物の量や、コップの動作状況等を、遠隔地にある同様のコップデバイスに提示する。Peek-A-Drawer [4] は、タンスの引き出しの中身を、2 点の遠隔地間で共有する情報共有システムである。ユーザが引き出しの中に物を収納した際に自動で写真を撮影し、そのデータを遠隔地にある同様のタンスの引き出しの中へ出力することで、引き出しの中身を共有する。Webmo [5] は、Wi-Fi 経由で JavaScript による制御が可能なステッピングモータであ

る。応用として、ものづくりレシピと連動して、次に使う材料をユーザに提示する電子工作部品ケースを提案している。Phybots [6] は、日用品にモータを装着して動き回らせることが可能なツールキットであり、ハードウェアやソフトウェア、デバッグツール等一括りで扱うことができる。応用例として、ユーザから逃げるように動き回る目覚まし時計や、指定したオブジェクトの周囲を自動で動き回りながら撮影するロボット等を提案している。

これらの研究で提案されたデバイスやシステムでは、日用品自体にセンサやアクチュエータを組み込んでいるのに対し、本研究では日用品自体に手を加えることなく、日用品に情報提示機能を付加する。

2.2 電磁石を用いたインタラクション

Actuated Workbench [7] は、テーブルトップ状に配置した電磁石を制御することで、机上の物体移動を可能にした。The proactive desk [8] では、テーブルトップ状に配置した電磁石が、ユーザの手に装着した金属片に対して磁力を発生させることで、机上のユーザの手に対して力覚提示を行った。ZeroN [9] は、三次元空間上での磁性物体の物理的な動きの制御が可能である。FluxPaper [10] は、裏面に磁性パウダを薄く塗布した「紙媒体」と、壁面型の「電磁石制御装置」を組み合わせることで、壁面上での紙の「移動」や「貼付」等の制御を可能にした。

これらの研究では、電磁石から磁力を発生させ、机上/壁面上の磁性物体を駆動させることで、磁性物体との新しいインタラクションを実現している。本研究では、電磁石で駆動させる対象を、磁性を持つ日用品に限定し、新たな情報提示手法を提案する。

2.3 道具を拡張したスマートツール

ものづくりや創作活動に用いる「道具」を拡張するシステムが多く提案されている。Drill Sergeant [11] は、DIY における作業支援を目的として、ドリル等の工具にセンサやプロジェクタを搭載し、加工時に作業を補助する指示情報を提示している。The Wise Chisel [12] では、過去に国際会議等で発表されたスマートツールについて、分野（例：医療、創作活動）や作業対象の属性（例：デジタル/フィジカル）、認識技術（例：センサ/画像認識）等を比較/分類している。これらのスマートツールは、道具にセンサ/アクチュエータを搭載したインタラクティブデバイスが中心であり、追加した装置によって道具の使い勝手には一定の影響が出る。ToolShaker は、収納具側に電磁石を組み込むことで磁性を持つ日用品を駆動させる仕組みのため、日用品にセンサ/アクチュエータを取り付ける必要がなく、日用品自体の使い勝手は変わらない。

環境側にセンサ/アクチュエータを組み込んだ情報提示例として、TouchCounters [13] や AffordanceLight [14] があ

る。TouchCounters は、道具や素材の整理箱に取り付けるデバイスであり、出し入れを検出してその回数を LED マトリクスで表示する。AffordanceLight は、Fab 施設等のものづくり環境において、光を用いてユーザを誘導するデスクライト型のシステムである。たとえば、ユーザが使用した道具を認識し、次に使う可能性の高い道具の位置を提示する。ToolShaker も据置型の収納具にアクチュエータを組み込んでいるが、日用品自体の動きを用いた新たな情報提示手法の構築を目的としている。

3. ToolShaker

提案システムのコンセプト、システム設計、およびシステム構成について述べる。

3.1 磁力を用いた日用品の駆動方式

本研究では、日用品の従来のサイズ/重量/形状を維持したまま、日用品に「情報提示機能」を付加することを目指す。その実現手段として、日用品自体には手を加えずに、環境側から日用品に外力を加える手法が考えられる。

我々は食器や工具等の「磁性を持つ日用品」を対象とし、電磁石を用いて駆動することで情報提示に活用できるのではないかと考えた。これらの日用品の収納状態として、棚上/机上/壁面等が考えられるが、その多くはケースやフック等を使って整理/収納されている。本研究では、こうした収納具に電磁石を取り付け、環境側から磁力を発生させて日用品を物理的に「動かす」ことで、日用品自体を用いた新たな情報提示手法を提案する。

電磁石を用いて日用品を物理的に動かすためのモデルを図 2 に示す。まず、電磁石を駆動すると磁力の力 (F_1) で日用品の磁性体部分を引き寄せせる。次に、電磁石が停止すると、重力等の異なる向きに働く力 (F_2) で磁性体部分を初期位置（電磁石から一定距離離れた位置）に戻す。この繰返しによって、継続的な動きを生み出す。このモデルでは、日用品の磁性体部分が電磁石の磁界範囲内（図 2 の黄色い点線）にある必要がある。ここで、磁性体部分が電磁石に近づくほど F_1 は強くなるが動きが小さくなり、電磁石から離れるほど F_1 は弱くなるが動きは大きくなり視認性が上がる。すなわち、日用品の磁性体部分は、 F_1 の力で電磁石に引き寄せ可能な範囲で、電磁石からできるだけ離れていることが望ましい。

3.2 対象とする日用品と特性

前述のモデルで駆動可能な日用品とその収納形態の検討について述べる。

まず、著者らが所有する小型の日用品 81 種を対象に、磁性の強さと収納形態を調査した。磁性の強さは、日用品に磁石を近づけた際の吸着力を磁力なし/弱/中/強に分けた。なお、同じ日用品でも樹脂製/金属製の場合があるも

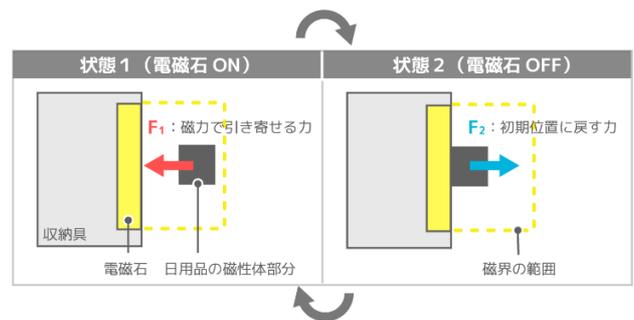


図 2 電磁石を用いた日用品駆動の基本モデル

Fig. 2 Basic model for moving daily commodities.

の（例：トンガ、定規）は、今回は金属製（磁性あり）として示した。また、スマートフォンや電子部品等の磁力が悪影響を及ぼす日用品は除外した。

収納形態としては、フック等に掛ける「吊下収納」、机上やトレイに横たえる「平置収納」、同種の小さな日用品をまとめる「小物入れ収納」に大きく分類できた。図 3 に、これらの日用品の分類と、本研究の対象となる日用品の範囲を示す。縦軸を磁性の強さ、横軸を収納形態（吊下収納と平置収納）としてプロットした。なお、小物入れ収納はケースを机上やトレイ上に置くことが多いため、ここでは平置収納して分類した。

一定の磁性を持つ小型の日用品を対象として、吊下収納/平置収納/小物入れ収納ごとに、日用品を駆動させるためのモデルを設計/検討する。詳細は次に述べる。

3.3 各収納形態の駆動モデル

3.1 節で紹介したモデルを、吊下収納/平置収納/小物入れ収納に適用したものを図 4 に示す。吊下収納は、電磁石 1 つを固定具の側面に配置し、フックに掛けて日用品を吊り下げる。ここで電磁石を駆動すると、日用品は磁力で電磁石方向に引き寄せられ、磁力が消えると振り子の復元力で初期位置に戻る。平置き収納は、電磁石 2 つを固定具下に組み込み、固定具には支点となる突起を用意する。支点到日用品を載せ、電磁石を交互に駆動することで、日用品の両端がシーソーのように上下運動を繰り返す。小物入れ収納は、電磁石 1 つを側面やや上方に配置する。ここで電磁石を駆動すると、収納具の底にたまった複数の小さな日用品は磁力で電磁石側（上方）に引き寄せられ、磁力がなくなると重力により落下する。

この中で、本論文ではまず、吊下収納に焦点を当て、提案手法の実現可能性/表現力を検証する。吊下収納を選択した理由としては以下の 3 点である。

- (1) 1 つの電磁石でシンプルに実装できる。
- (2) 振り子運動を利用するため動きが相対的に大きくなり視認性が高くなる。
- (3) フック部と電磁石の距離を調整することで多様なサイズの日用品に対応できる。

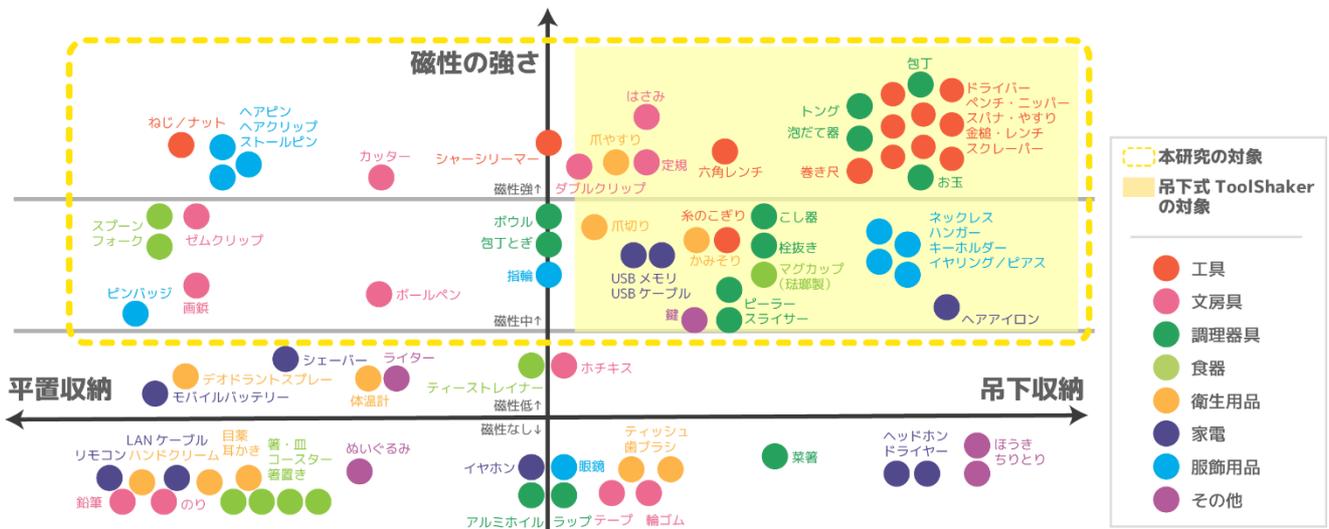


図 3 本研究の対象とする日用品
 Fig. 3 Target daily commodities of our research.

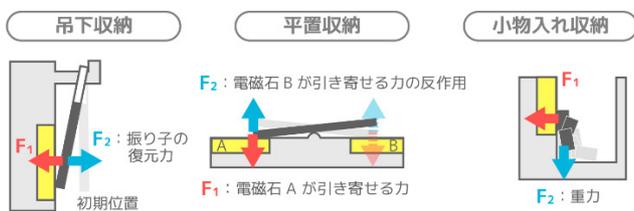


図 4 収納形態ごとの駆動モデル．電磁石の磁力 F_1 と外力 F_2 によって往復運動を生み出す
 Fig. 4 Models for moving daily commodities in three storages.

3.4 日用品の動きを利用した情報提示

吊下収納に対応したシステムについて、図 5 に模式図を示す。本システムでは、壁面上でフックに吊り下げた日用品の下部に電磁石を設置し、この電磁石を駆動させることで、フックを支点として振り子状に日用品を動かす。こうした日用品の振り子状の動きを用いて、視覚的な情報提示を行う。さらに、予備的なプロトタイプを構築して動作を観察したところ、電磁石に日用品が衝突する際の接触音や、(磁力を発生させつつ)日用品を取り付ける/取り外す際の吸着感を発見した。単一のアクチュエータで複数モダリティの情報提示ができれば、表現の幅が広がり利点となる。よって、本研究では、視覚に加え、聴覚/触覚による情報提示の可能性についても検討する。次に、各情報提示手法について紹介する。

3.4.1 視覚的な情報提示

本システムでは、電磁石を駆動させることで、日用品を振り子状に動かすことができる。この「日用品の動き」を利用して、ユーザに対して視覚的な情報提示を行う。たとえば工具に応用した場合、ユーザが行うものづくりの過程に合わせて、「次に使うべき工具」を動かすことで、直接的に提示することができる。

また、電磁石の駆動周波数を調整することで、日用品の

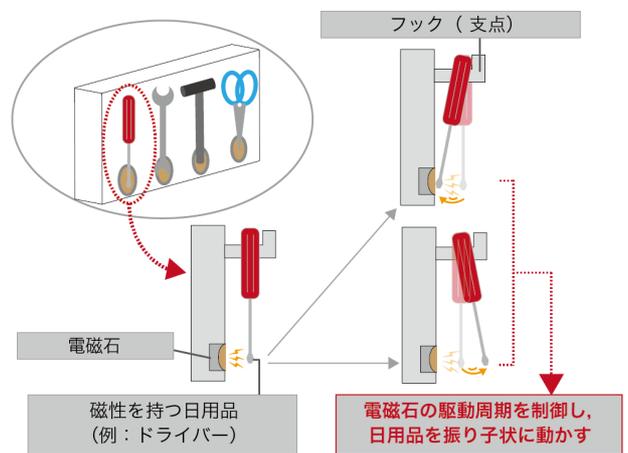


図 5 ToolShaker の情報提示手法
 Fig. 5 Configuration of the ToolShaker.

動きの速度を調整することもできる。さらに、フック部の設計を工夫することで、安定した動き/不安定な動きを作れる可能性がある。

なお、水平方向への振り子状の駆動も検討したが、電磁石が複数個必要になったり、筐体の機構が複雑になったりする可能性があるため、採用を見送った。

3.4.2 聴覚的な情報提示

本システムでは、電磁石に日用品が接触する際に接触音が発生するため、ユーザは日用品を直視しなくても、情報を取得できる。たとえば、この音を利用して、タイマやリマインダのような音を用いた情報提示を行える可能性がある。また、日用品の種類や、電磁石の駆動周波数、および電磁石表面の素材等を調整することで、音の種類(音の大きさ、リズム、音色)をある程度変更できる可能性もある。

3.4.3 触覚的な情報提示

電磁石を駆動した状態で日用品を収納/取り外すと、磁力により吸着感が生まれる。電磁石を適切なタイミングで駆

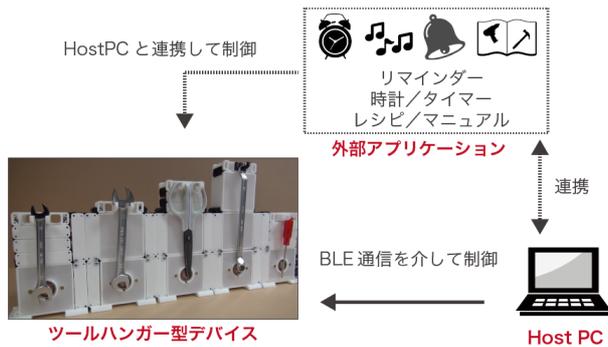


図 6 システム構成

Fig. 6 System architecture.

動することで、日用品を壁面の特定の場所に固定しやすくしたり、取り外しにくくしたりできる可能性がある。たとえば、使い終わった日用品を元の場所に返却する際、収納場所に近づけたときに電磁石を駆動することで、どの場所に返却すべきかを誘導するような活用方法が考えられる。

以上の検討/要件を考慮して設計したシステムについて、次の節で述べる。

3.5 システム構成

本システムは、実際に日用品を駆動させるツールハンガ型デバイス、ツールハンガ型デバイスを制御するホスト PC、およびホスト PC と連携してツールハンガ型デバイスを外部から制御する外部アプリケーションから構成される。システム全体の構成を図 6 に示す。ツールハンガ型デバイスは、電磁石/マイコン等を組み込んだ「電磁石モジュール」と、日用品を固定するための「フックモジュール」から構成され、1つのツールハンガ型デバイスにつき、1つの日用品を駆動させることができる。ツールハンガ型デバイスに組み込まれているマイコンおよび電磁石の制御は、ホスト PC 上のホストプログラムから統括的に行う。

4. 実装

ツールハンガ型デバイスのプロトタイプを実装した。ハードウェアとソフトウェアについて述べる。

4.1 ハードウェア：電磁石モジュール

電磁石モジュールは、70 mm × 70 mm × 25 mm の立方体とし、電磁石と基板を組み込んだ (図 7)。電磁石は立方体の表面に、基板は立方体の内部に固定した。電磁石は、TMN-2613S ($\varphi 26 \times 15$ mm, 60 N~175 N, ギガテコ) を使用した。基板上には、マイコン/モータドライバ/電磁石用コネクタ/電源用コネクタを搭載した。マイコンには、BlendMicro を使用し、ホストプログラムとの BLE 通信や、モータドライバを介した最大 2 つまでの電磁石の制御を行う。モータドライバには、NJM2670D2 (最大出力電流 1.3 A, 2 チャネル) を使用した。電源は、DC15 V, 0.8 A

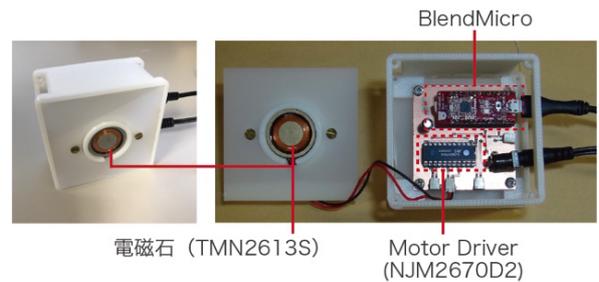


図 7 電磁石モジュールの構成図

Fig. 7 Architecture of the electromagnet part.

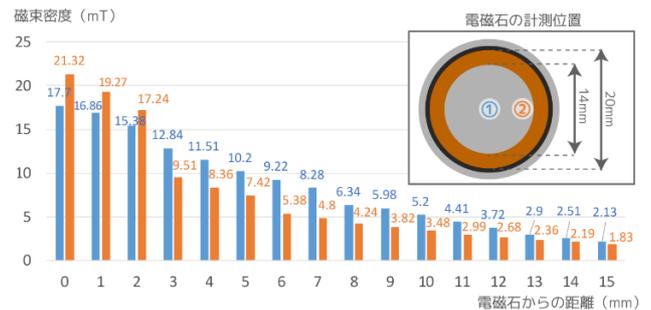


図 8 電磁石の磁束密度の実測値

Fig. 8 Measured value of magnetic flux density of the electromagnet.

の AC アダプタを使用した。また、電磁石モジュール本体の側面には、マイコンおよび電磁石の電源ケーブルを通すための穴を開けた。なお、3D プリントを用いて ABS 樹脂で外装を作り、アクリルの天板をはめ込んで作製した。

本モジュールの磁束密度をテスラメータ (MG-3003SD) で実測した結果を図 8 に示す*1。日用品を吊り下げた際の磁性体の位置に幅があることを考慮し、電磁石の (1) 中央部、(2) 端部の 2 点に対して、0-15 mm の距離で計測した。距離が離れるほど、磁束密度はなだらかに降下するが、8 mm 程度の距離ではスプナ等の日用品を引き付けることができることを確認した。

4.2 ハードウェア：フックモジュール

フックモジュールでは、フックに吊り下げるようにして日用品を固定する (図 9)。また、多様な日用品に対応できるように、フック部を取り外し可能な設計とし、高さ調整のためのパーツを 2 種類 (小パーツ：高さ 175 mm, 大パーツ：750 mm) を作製した。こうすることで、吊り下げた日用品の磁性部分が、下部の電磁石モジュールの電磁石の正面に配置され、十分な磁力を加えられるように設計した。

現在のプロトタイプでは、合計 4 種類 5 個の工具に対応したフックモジュールを作製した。各デバイスを相互に連結できるように設計しており、工具ボードのように並べて

*1 メーカーからも磁束密度は公開されているが、駆動電圧/磁性体との距離が本プロトタイプとは異なるため実測した。

表 1 予備実験結果. ○駆動を確認できた, △駆動することもあったが不安定だった, ×駆動が確認できなかった. 結果欄のフォーマット…「動き/音」

Table 1 Result of the preliminary experiment.

工具 周期	スパナ (小)	スパナ (大)	はさみ	レンチ	ドライバ
1.0 [s]	○(視)/○(聴)	○/○	○/○	○/○	○/○
0.5 [s]	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○
0.1 [s]	×/○	×/○	△/△	△/×	△/△
0.05 [s]	×/○	×/○	△/×	×/×	△/△
0.01 [s]	×/○	×/○	×/×	×/×	×/×
0.005 [s]	×/×	×/×	×/×	×/×	×/×



図 15 料理レシピに合わせて, 使用する調理器具を揺らしたり調理時間を通知する料理支援への応用例

Fig. 15 Application of supporting system of cooking.

ものづくり支援と同様に, 料理レシピサービス等と連動することで, 次に使用する調理器具を揺らして指示したり, 器具の接触音で調理時間を通知したりするような使い方もできると考える (図 15)。

6. 予備実験

ToolShaker の視覚/聴覚による情報提示の実現性を確認するために, プロトタイプと工具を用いて情報提示可能な駆動周期を調査する。

6.1 手法

工具を ToolShaker に吊るした状態で電磁石の駆動周期を変化させ, 振り子状の動き/接触音の発生を観察する. スパナ 2 サイズ (小: 長さ 15 cm 重さ 64 g, 大: 長さ 17.3 cm 重さ 110 g), はさみ (長さ 17 cm 重さ 38 g), レンチ (長さ 21 cm 重さ 63 g), ドライバ (長さ 13.5 cm 重さ 14 g) の 4 種類 (計 5 個) を用意した (図 10). これらの工具は, 磁性体を含みつつ, フックに吊るすための突起や穴があることを前提として, 長さ/形状/重さ等が異なるものを選択した. なお, 工具の磁性部分が適切に電磁石の正面に来るよ

うに, フックモジュールで高さを調整した。

駆動周期は, 1.0 秒, 0.5 秒, 0.1 秒, 0.05 秒, 0.01 秒, 0.005 秒, の 6 段階とし, 工具ごとに 1 分間駆動し続ける作業を 1 回ずつ行った。

6.2 結果/考察

結果を表 1 に示す. 実験結果について, 電磁石の駆動周期が 1.0 秒および 0.5 秒のケースでは, すべての工具で動きと接触音を確認できた。

しかし, 0.1 秒以下の周期では, 工具ごとに結果が異なった. スパナ (小・大) では, 0.01 秒~0.1 秒の周期で接触音は確認できたが, 動きは確認できなかった. はさみは, 0.1 秒の周期から動きと接触音がともに不安定になり, 0.01 秒の周期では, どちらも確認できなかった. レンチは, 0.1 秒の周期で動きが不安定/接触音がしなくなり, 0.05 秒の周期ではどちらも確認できなかった. ドライバでは, 0.05 秒~0.1 秒の周期で動き/接触音ともに不安定になり, 0.01 秒の周期では, どちらも確認できなかった。

以上をまとめると, 0.5 秒以上の駆動周期で安定した視覚的情報提示, 個体差はあるが 0.01 秒以上の駆動周期で聴覚的情報提示に利用できると考えられる。

7. 評価実験

ToolShaker の情報提示手法/ディスプレイとしての性能を確認するために, 他の情報提示手法との比較実験を行う. 一般的に利用されている情報提示装置として, LED/プロジェクタと比較した際の性能を検証し, 本手法の利用可能性を調査する. 具体的には, ToolShaker, LED, プロジェクタの 3 種類の情報提示を行い, 対象物の認知のしやすさとユーザへの印象を調査する。



図 16 評価実験の実験環境
Fig. 16 Setting of the evaluation.

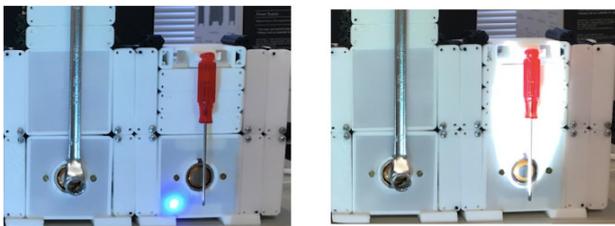


図 17 LED の点灯による情報提示 (左), プロジェクタの投影による情報提示 (右)
Fig. 17 LED notification and projector notification.

7.1 手法

被験者は大学生 11 名 (20~23 歳) とした。本実験環境を図 16 に示す。手順は、以下のとおりである。

- (1) 被験者は動画を閲覧する。その際に、被験者の視野内に入るように設置した工具ボードで情報提示を行う。なお、工具ボードは、ToolShaker にスパナ、はさみ、レンチ、ドライバの 4 種類を吊り下げたものとした。
- (2) 被験者は、提示された工具を認識したら、その提示対象を指さす。
- (3) 被験者は印象調査アンケートに記入する。
- (4) 実験後、被験者にインタビューを実施する。

情報提示は、「ToolShaker の電磁石駆動による工具の動き」「LED の点灯」「プロジェクタの投影」の 3 種類用意した (以下、ToolShaker/LED/プロジェクタと記述)。LED とプロジェクタによる提示方法を図 17 に示す。なお、実験の様子はすべてビデオカメラで記録している。

ToolShaker を用いた実験では、電磁石の駆動周期の違いによる影響を調査するために、駆動周期を「1.0 秒」「0.5 秒」の 2 パターンで実施した。そのため本実験では、4 種類の工具につき、3 つの手法で情報提示を行い、それを 2 セット実施したため、前述した手順 (1)~(3) を合計で 12 パターン × 2 セット行った。(1) における情報提示は、順序効果を考慮して、工具ごとに提示刺激の順序をほぼ均等に入れ替えた。

表 2 認識速度の結果：ToolShaker の駆動周期ごとの平均 (単位は秒, 括弧内は SD, **は駆動周期 1 秒との比較で $p < .01$ で有意差あり)

Table 2 Result of time from notification to pointing at the tool.

	ToolShaker(1s)	ToolShaker(0.5s)
スパナ	2.63 (1.14)	2.00 (0.46)
はさみ	3.95 (1.16)	2.37 (0.57) **
レンチ	4.50 (1.94)	2.35 (0.49) **
ドライバ	2.12 (0.39)	2.26 (0.55)
平均	3.30 (1.6)	2.25 (0.54) **

表 3 認識速度の結果：全試行の平均。(単位は秒, 括弧内は SD, **は ToolShaker との比較で $p < .01$ で有意差あり)

Table 3 Result of time from notification to pointing at the tool.

	ToolShaker	LED	プロジェクタ
スパナ	2.31(0.92)	3.90(4.80)	2.06(0.62)
はさみ	3.16(1.21)	5.78(11.03)	1.92(0.64) **
レンチ	3.43 (1.78)	2.03(0.62) **	2.01 (0.53) **
ドライバ	2.19(0.48)	2.22(0.92)	1.93(0.64)
平均	2.77(1.31)	3.48(6.23)	1.98(0.61) **

実験者は、ToolShaker/プロジェクタ/LED の情報提示を事前に被験者に紹介した。さらに、通常時は正面の動画を視聴し、情報提示に気づいた時点で対象を指さすように指示した。実験中は、被験者が動画閲覧を始めて一定時間 (25 秒以上) 経過してから、実験者が手で情報提示を開始した。このとき、動画の内容と情報提示の内容/タイミングは関係しない。実験者は著者の 1 人が担当し、被験者に対して工具を提示してから被験者が工具を指さすまでの時間を、ビデオをもとに計測した。閲覧用動画には、音声や工具音を含むものづくりの解説動画を使用した。

なお、ToolShaker では、動きに付随して自然に接触音が発生するのに対し、プロジェクタや LED では音は発生しない。これは情報提示装置としての特性であるが、ToolShaker の接触音が目立ちすぎないように、音声や工具音、雑音等が多く含まれた動画を再生することにした。また、プロジェクタ/LED は十分に高輝度な光刺激を提示した。

7.2 結果と考察

7.2.1 工具を認識するまでの速さ

提示された工具を被験者が認識し指さすまでの早さについて、ToolShaker の駆動周期別の結果を表 2 に、全試行の結果を表 3 に示す。それぞれの表に、平均値と標準偏差、および両側 t 検定の結果 ($p < .01$) を記載する。

ToolShaker の駆動周期別の結果 (表 2) では、1 秒周期の



図 18 印象評価の結果. 全試行の各情報提示における平均 ± 標準偏差. ToolShaker と LED, ToolShaker とプロジェクタの両側 t 検定の結果を** (p < .01), * (p < .05) で示す

Fig. 18 Result of impression of each notification.

全体平均が 3.30 秒 (SD1.6), 0.5 秒周期の全体平均が 2.25 秒 (SD0.54) となり, 0.5 秒周期の方が有意に早かった.

全試行の結果 (表 3) では, プロジェクタが全体平均 1.98 秒 (SD 0.61) と最も早く, 次に ToolShaker が 2.77 秒 (SD 1.31), 最後が LED の 3.48 秒 (SD 0.62) となった. プロジェクタはどの工具/配置でも 2 秒前後だったが, LED はスパナとはさみで 3.9~5.7 秒, ToolShaker ははさみとレンチで 3.1~3.4 秒と, 他の工具よりも認識に時間がかかっている. 全工具の平均値を t 検定で比較すると, ToolShaker はプロジェクタよりも有意に遅く, LED とは有意差はなかった.

LED の結果の要因としては, 工具の配置が認識しやすさに影響を及ぼしたと考えられる. スパナやはさみは動画の画面から離れた場所に設置されており (図 16), 被験者の視野の端側に位置していたため, LED の点灯を認識しにくかったと考えられる. ToolShaker については, はさみとレンチの振り子状の動き (揺れ幅/速度) が他の工具よりも小さい傾向にあった. この提示の強さの違いが要因となり, 他の手法よりも認識までに時間がかかってしまったと考えられる.

7.2.2 各提示手法のユーザへの印象

各情報提示手法に対する印象評価アンケートの結果について, 全回答の平均値, 標準偏差, 両側 t 検定の結果 (ToolShaker-LED, ToolShaker-プロジェクタ間で比較) を図 18 に示す. アンケートは 7 段階のリッカート尺度を採用し, たとえば「面白さ」では, 面白い (7)~つまらない (1) となる. 「分かりやすさ」の項目の結果は, ToolShaker が 5.77 (SD1.28), プロジェクタが 6.02 (SD0.87) とともに高い評価を得た. 「面白さ」「心地良さ」「好ましさ」「自然さ」の項目では, ToolShaker が最高値となった. この中で, 「心地良さ」において, ToolShaker は LED (p < .01) とプロジェクタ (p < .05) より有意に高い評価を得た. 「面白さ」においても, LED/プロジェクタの双方に対して有意に高い評価を得た (p < .01). 「好ましさ」「分かりやすさ」の項目では, LED に対して有意差があった (p < .01).

7.2.3 インタビュー結果

インタビューを実施し, 各情報提示の分かりやすさと印象を確認した. ToolShaker は「音で通知に気づく」という意見を多く得た (7 名). 「音の小さいレンチやはさみが分かりにくい (3 名)」, 「スパナの音の響きが良く分かりやすい (各 1 名)」, 「周期が速い方が分かりやすい (1 名)」という指摘があり, 駆動周期や工具の種類にともなう音の種類による通知力の差が示唆された. また, 「プロジェクタと同じくらい分かりやすい (2 名)」とする被験者もいた. 印象については「音が優しくて好き」「プロジェクタより新鮮で面白い印象を受けた」「それ自身が動くと思を持っているように感じる」 (各 1 名) という意見を得た.

LED とプロジェクタについて, 全体的には LED は分かりにくく, プロジェクタは分かりやすいという回答傾向だった. 一方, 両者とも見せ方に関して否定的な意見も見られた. LED は「小さくて目立たない. 筐体パネル一面が光った方が分かりやすい」「工具自身ではない場所が光るのでやや人工的に感じた」 (各 1 名), プロジェクタは「主張が強い (2 名)」「露骨 (1 名)」等があがった.

7.2.4 まとめ

認識速度の観点では, ToolShaker はプロジェクタより有意に遅く, LED との有意差はなかった. 一方, 印象評価の観点では, ToolShaker は「面白さ」「心地良さ」の項目でプロジェクタ/LED の双方より優位に高い評価を得た. インタビューでは, (声や生活音等を多く含む動画を再生していたにもかかわらず) ToolShaker の接触音による通知性能を評価する声が多く, 「道具自体が動くと思を持っているように感じる」といった意見も聞かれた. 一方, LED には「小さくて目立たない. 筐体パネル一面が光った方が分かりやすい」, プロジェクタには「主張が強い」「露骨」といった意見が聞かれた.

こうした結果を総合すると, LED/プロジェクタ等の光を用いた提示では, 情報提示を行う範囲や照度を高めることで, 通知の認識しやすさや認識速度は高まるが, ユーザが生活空間で違和感を感じる可能性も高くなる. こうしたトレードオフを考慮した設計には手間がかかり, 時に困難である. 一方, ToolShaker では特別な配慮をしなくても, 一定の通知性能と違和感の少なさを両立させられる可能性があると考えられる.

今回は認識速度と印象評価に注目したが, プロジェクタを用いて任意の道具を照らす手法と比較すると, 本システムは 1 つの日用品につき 1 つのデバイスが必要となるため, 大規模化等には不向きな面があるが, 道具自体を連想させやすかったり, コンピュータの存在感を感じさせない表現につながる可能性があると考えられる. こうした ToolShaker での情報提示の持つ特性について, 「8.4 節 生活環境での特性」で議論する.

8. 議論

8.1 筐体設計の課題

予備実験の結果から、同じ電磁石の駆動周期でも、工具の種類によって、動きの精度に差が生じることが分かった。現在の筐体では、工具の長さやフックへの掛け方の違いしか考慮しておらず、工具の形状によっては動作が不安定になっていたためだと考えられる。具体的には、工具を吊り下げるフック部の奥行き方向にあそびが大きい場合があった。1分間工具を駆動させ、振り子状の動きを繰り返しているうちに、工具がフックの先端の方に徐々に移動してしまい、電磁石と磁性部分の距離が変化してしまうことがあった。今後は、工具の動きを考慮したうえで、工具が奥行き方向にずれないようにフックの形状を調整することで改善を図りたい。

8.2 異なる収納形態への対応

3章で述べたとおり、ToolShakerは「吊下式」「平置き」「小物入れ式」の3種類への適用を想定しており、今回の論文では「吊下式」に焦点を当ててきた。今後は、「平置き」や「小物入れ式」への展開も準備しており、小物入れ式のプロトタイプについてはすでに試作を進めている(図19)。ネジ/キーホルダ/クリップ等を電磁石部の前に設置して駆動したところ、電磁石に吸い付く/離れる周期的な動きや、微細な接触音等の、基本的な動作が確認できた。こうした多様な収納形態に対応したデバイスを用意することで、生活空間への導入範囲を広げていきたい。

8.3 情報提示手法の可能性

ここでは、ToolShakerの情報提示手法の潜在的な可能性について議論する。

まず、視覚的な振り子状の動きについて、安定した動き(振れ幅の大きい動きの繰返し)を作るためには、日用品の初期位置(電磁石からの距離)が重要になる。前述したように、日用品の初期位置は、図2の F_1 の力で電磁石に引き寄せ可能な範囲で、電磁石からできるだけ離れた状態が望ましい。一方、適正な初期位置よりやや遠くなると、電磁石の磁力が弱いため、日用品が初期位置付近で微かに揺れる状態が起こる。こうした日用品がかすかに動くような動きは他の手段では実現しにくいと考えられ、さりげない情報提示として有効に活用できる可能性がある。

次に、聴覚的な接触音については、日用品の種類や駆動周期、電磁石表面の素材等を調整することで、音の種類(音の大きさ、リズム、音色)をある程度変更できる可能性がある。提示音の大きさは、接触する日用品の重量が重く、接触時の速度が速いときに音量が大きくなる傾向があった。たとえば、スパナのような重量のある工具はよく通る音を鳴らす傾向があった。リズムは、電磁石の駆動周期や待機



図19 左：ネジ/キーホルダ/クリップへの試験的な適応。矢印方向への周期的な動きを確認した。右：小物用固定具のプロトタイプ

Fig. 19 Left: Moving a screw, a key holder and a clip. Right: clip holder prototype.

時間を調整することで、たとえばメトロノームのような一定間隔のリズム、目覚まし時計のような連打音、三三七拍子のようなリズムを作ることができる。ただし、振り子状の動作にともなう遅延が発生するため、設定可能なリズムには制限がある。音色については、日用品の磁性体部分が電磁石の鉄芯に接触すると高い金属音が発生する。一方、電磁石の上に薄いプラスチック板を挟むともった音になり、柔らかい厚みのある布を挟むと衝撃が吸収され、聞き取れなくなるほど音が小さくなることを確認している。

このように接触音については多様な可能性があるが、音の大きさ/リズムについては日用品や電磁石の駆動周期(=視覚的な動き)と連動しており、お互いの影響を考慮する必要がある。一方、音色については独立して設定できるため、電磁石表面に薄い素材を挟み込む機構の設計を進めていく。

最後に、触覚的な情報提示については、日用品を収納/取り外し時に電磁石を駆動することで、吸着感が発生することを試験的に確認した。具体的には、スパナやドライバを収納具に近づけたときには吸着感が、収納済みの工具を引き離すときには若干の抵抗感が生じる。ここで、RFID等のセンサと組み合わせることで、収納支援システム等に活用できる可能性がある。まず、RFIDタグを日用品に、RFIDリーダを収納場所に取り付ける。日用品が収納場所に近づいたことをRFIDで認識し、正しい収納場所に近づけば電磁石を駆動して吸着力を発生し、収納しやすいように誘導する。逆に、誤った場所に収納してしまった場合は、道具を激しく駆動させて動きや音で間違いを通知することができる。ただし、RFIDタグは超小型とはいえ、日用品の使い勝手に影響が出る場合もありうるため、実用性と日用品の取り回しのバランスを考慮した設計を行う必要がある。

8.4 生活環境での特性

ここでは、ToolShakerでの情報提示の持つ本質的な特性について、日常生活環境での利用を前提に「直接性」「透明性」の観点から、評価実験結果をふまえて議論する。

まず、「直接性」については、日用品自体を直接動かす情報提示は、指示の対象が直接的で分かりやすいと考える。日常生活環境では多数の情報提示装置が存在するため、ある情報提示の示す対象が分かりにくくなる可能性がある。たとえば、スマートフォンでタイマが鳴り出した場合、その指示対象は所有者以外には（ときには所有者自身にも）不明瞭である。一方、ToolShakerは特定の日用品自体を駆動して動きや音で情報提示を行うため、周囲のユーザも含めて、情報提示の対象がその「日用品」や「関連作業」にかかわることを認識しやすく、「直接性」の高い情報提示手法だと考える。実際に、評価実験のインタビューでも「それ自身が動くと思を持っているように感じる」という意見があり、対象の分かりやすさや存在感への影響が示唆された。

次に、「透明性」については、電磁石を隠すことで、コンピュータの存在を感じさせないさりげない情報提示を行える可能性がある。日常生活環境では、コンピュータの存在感を感じさせない、生活に馴染んだ情報提示手法が重要である。たとえば、評価実験で比較したプロジェクタやLEDを用いた情報提示手法は、コンピュータ/デバイスの存在を隠しにくいため、一般の家庭環境に導入すると違和感が大きい可能性がある。実際に、評価実験のインタビューでもプロジェクタは「主張が強い（2名）」「露骨（1名）」という意見があがっていた。印象評価の結果では、「心地良さ」でLED/プロジェクタに対してToolShakerが有意に高い評価を得ていた。ToolShakerにおいても、現状のプロトタイプでは電磁石/デバイスがむき出しの状態なので違和感があるが、電磁石を薄い布等で覆っても動作に影響は少ないことを確認しており、駆動部を含めて完全に日用品等に内包することが可能である。今後は新たなプロトタイプの構築を通して、デバイスの存在感を隠した「透明性」の高い情報提示手法としての可能性を探っていきたい。

9. まとめと今後の展望

本研究では、日用品自体に手を加えることなく、日用品に「情報提示機能」を付加する手法に着目し、壁面に収納/配置された工具等に対して、外部から電磁石で磁力を加えて日用品を物理的に「動かす」ことで、視覚/聴覚/触覚的な情報提示を行うシステム「ToolShaker」を提案・試作した。

本提案システムは、実際に日用品を固定/駆動させる「ツールハンガ型デバイス」と、制御用のホストプログラム、および外部アプリケーションから構成される。現在作成したプロトタイプでは、ツールハンガ型デバイスとホストプログラムを作成し、4種類の工具に対して基礎的な動作を確認した。また、本システムの情報提示手法としての性能を確認するために、LED/プロジェクタを用いた比較実験を行った。その結果、本システムにも一定の通知性能があることを確認し、印象評価では「面白さ」「心地良さ」

等の項目で他の手法よりも高い評価値を得た。

今後は、現在のプロトタイプと外部アプリケーションを連携させ、前述した応用例の実装や、より多様な日用品に対応するツールハンガ型デバイスの作製等を行う。その後、それらのシステムの基礎的な性能の評価、および既存の日用品を用いた情報提示との比較実験等を行い、最終的には、ToolShakerの実際の日常生活への応用を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25700019 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Kawakami, A., Tsukada, K., Kambara, K. and Siio, I.: PotPet: Pet-like Flowerpot Robot, *Proc. TEI '11*, pp.263–264 (2011).
- [2] Tsujita, H., Tsukada, K. and Siio, I.: SyncDecor: Communication appliances for virtual cohabitation, *Proc. AVI '08*, pp.449–453 (2008).
- [3] Chung, H., Lee, C.-H.J. and Selker, T.: Lover's cups: connecting you and your love one, *CHI '06 Extended Abstracts*, pp.375–380 (2006).
- [4] Siio, I., Rowan, J. and Mynatt, E.: Peek-A-Drawer: Communication by Furniture, *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, *CHI EA '02*, pp.582–583 (2001).
- [5] 原 健太, 渡邊恵太: Webmo: Wifi と WebAPI をパッケージングしたステッピングモーター, *WISS '15*, pp.215–216 (2015).
- [6] Kato, J., Sakamoto, D. and Igarashi, D.: Phybots: A Toolkit for Making Robotic Things, *Proc. DIS '12*, pp.248–257 (2012).
- [7] Pangaro, G., Mayes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The actuated workbench: Computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces, *Proc. UIST '02*, pp.181–190 (2002).
- [8] Noma, H., Yanagia, Y. and Tetsutani, N.: The proactive desk: A new force display system for a digital desk using a 2-dof linear induction motor, *IEEE Virtual Reality 2003*, pp.217–222 (March 2003).
- [9] Lee, J., Post, R. and Ishii, H.: ZeroN: Mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation, *Proc. UIST '11*, pp.327–336 (2011).
- [10] Ogata, M. and Fukumoto, M.: FluxPaper: Reinventing paper with dynamic actuation powered by magnetic flux, *Proc. CHI '15*, pp.29–38 (2015).
- [11] Schoop, E., Nguyen, M., Lim, D., Savage, V., Follmer, S. and Hartmann, B.: Drill Sergeant: Supporting Physical Construction Projects through an Ecosystem of Augmented Tools, *Proc. CHI EA '16*, pp.1607–1614 (2016).
- [12] Zoran, A., Shilkrot, R., Goyal, P., Maes P. and Paradiso, J.A.: The Wise Chisel: The Rise of the Smart Handheld Tool, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.13, No.3, pp.48–57 (2014).
- [13] Yarin, P. and Ishii, H.: TouchCounters: designing interactive electronic labels for physical containers, *Proc. CHI '99*, pp.362–369, ACM (1999).
- [14] 白石晃一, 平塚晃美, 大島裕明, 山本岳洋: AffordanceLight: ファブ施設における How-to の誘導, *WISS '16*, pp.287–288 (2016).



道具 駿斗

1993年生。2016年公立ほこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。2018年同大学大学院システム情報科学研究科博士前期課程修了。



沖 真帆 (正会員)

1985年生。2013年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。同年より公立ほこだて未来大学特任研究員。



塚田 浩二 (正会員)

1977年2月神奈川県横浜市生。2000年慶應義塾大学環境情報学部卒業。2005年同大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士(政策・メディア)。同年独立行政法人産業技術総合研究所研究員。2008年よりお茶の水女子大学特任助教。2012年より科学技術振興機構さきがけ研究員(専任)。2013年4月よりはこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授。生活環境に適したユーザ・インタフェースの研究・開発に従事。2012年イグノーベル賞(音響学)受賞。