MagneTrack: 磁力線分離に基づくぬいぐるみの動作トラッキング手法

安部 武宏*

概要. スマートデバイスと磁石を用いてぬいぐるみの各部位の動作をトラッキングする手法を述べる.本 手法は広く利用されているスマートデバイスと磁石を利用したパッシブセンシングであるため,特殊なデ バイスを必要としない.さらに,磁石のバッテリー充電は不要であり,スマートデバイスはぬいぐるみの胴 体の外側に取り付けられるため,メンテナンスが容易である.本手法はぬいぐるみを引き裂いたり,複雑な 手順を要求せず,ありふれたぬいぐるみに適用できる.一般的なスマートデバイスはひとつの地磁気セン サーしか有しないため,ぬいぐるみの各部位から生じる磁力線は混合されて観測される.この混合された 磁力線をぬいぐるみの各部位に対応した磁力線に分離するために,我々は NMF に基づく分離アルゴリズム を開発した.評価において本手法の精度を算出し,デモアプリケーションを作成して有効性を確かめた.

1 はじめに

ぬいぐるみは柔らかい感触と愛くるしい姿から, 子どもから大人まで多くの人たちに最も親しまれて いるおもちゃのひとつである.その形状は動物やア ニメの登場人物をコミカルにデフォルメしたものが 多く愛着を感じられる.この性質に着目して,ぬい ぐるみを入力インターフェースとして利用する研究 がいくつか提案されている [11] [18] [15].

我々の研究の目標は,ユーザーがお気に入りのぬ いぐるみを使って,腕を動かす,抱きしめるといっ たぬいぐるみへの作用をゲームの入力とする手軽な 方法を開発することである.これを実現するために は以下の要求を満たさなければならない.

- 1. ぬいぐるみの腕などの複数の部位の位置情報 を独立してトラッキングできる.
- 2. ぬいぐるみを引き裂いたり特殊なデバイスを 用いることなく適用できる.

我々はこれらを満たすために,ぬいぐるみの任意の 部位に磁石を取り付け,スマートデバイスに備わっ ている地磁気センサーから読み取られた3軸の磁力 線からぬいぐるみの各部位の動作を検出する.例え ば,図1に示すように,ぬいぐるみの胴と両腕にそ れぞれスマートデバイスと磁石を取り付けることで, 各腕の位置を推定できる.

これを実現するためには,複数の磁石に対して1 つの地磁気センサーしか利用できない課題を扱う必 要がある.我々は磁力線を分離することによってこ れを解決する.磁力線の分離には非負値行列因子分 解 (NMF) をベースとした教師あり機械学習を用い る.NMF は音声や画像の様々なタスクで使われ,こ れらに性質が近い磁力線にも同様に有効である.



図 1. ぬいぐるみの各腕の高さのトラッキングの様子

2 関連研究

2.1 ぬいぐるみインターフェース

ぬいぐるみを介した入力インターフェースが提案 されている [11] [18]. 彼らのぬいぐるみには加速度 センサーなど様々なセンサーが取り付けられ, センシ ングを付与するコストは考慮されていない. Sugiura らはフォトリフレクタモジュールをぬいぐるみのよ うな柔らかい対象にいれて作用される圧力を検出し ている [15] が,対象を引き裂いてモジュールを埋め 込む必要があり,ユーザーお気に入りのぬいぐるみ へ適用する心理的ハードルが高い. その後,彼らは ぬいぐるみの腕のような突起物に装着することで曲 げ角度を取得できるクリップ状のデバイスを提案し ている [16]. これはぬいぐるみを引き裂かずに適用

地磁気センサー以外のスマートデバイスに備わる センサーを使ってぬいぐるみの動作を検出すること も検討できるが、それぞれに特有の課題がある.カ

Copyright is held by the author(s).

^{*} 無所属

メラを使ったモーションセンシング [17] [5] は,視野 角に限りがあるため、所望するぬいぐるみの部位の トラッキングに不向きである.1つの近接センサー しか持たないスマートデバイスでは、近接センサー アレイを用いたアプローチ [4] は適用できない.ぬ いぐるみの柔らかな性質上, ぬいぐるみを媒体とし た周波数解析も期待できない [14]. 空気中を伝導 する音の識別ではノイズとの戦いに陥りやすく、単 ーマイクでは音源定位も難しい [7].一方,加速度, 角速度センサーは大局的なぬいぐるみの動作検出に 向いており, Wii リモコンをぬいぐるみ内部にいれ ての入力操作が提案されている [6]. さらに小さい Nintendo Switch の Joy-Con を使えば、より小さ なぬいぐるみに適用したり,大きなぬいぐるみに複 数の Joy-Con を割り当てることもできる. しかし, 動作検出したい部位の数だけセンサーが要求される.

2.2 磁石を用いたインターフェース

磁石を利用した様々なスマートデバイスへの入力 インターフェースが提案されている. Harrison ら は指にとりつけた磁石の磁力線の変化を地磁気セン サーで読み取ることでアプリをトリガーする方法を 提案している [8]. Ketabdar らも同様に磁石を使っ たジェスチャー入力を提案している [13]. これらは 1つの磁石だけの利用を想定している. Bianchi ら や Hwang らは磁石のついたタンジブルを提案して いる [2] [9]. 後者の Hwang らは複数のタンジブル の同時利用を示しているが、磁力線の変化に線形性 を仮定しているにも関わらず混合された磁力線の変 化を包括して扱う手法であるため、不安定になりが ちなぬいぐるみの各部位の動作を独立して検出する ことは難しい. 彼らは決定木を用いても動作検出を 試みている [10] が,トラッキングではなく静的な状 態識別までしか扱えていない. 前者の Bianchi ら は後にこの問題を解決する方法として、磁石を回転 させるタンジブルを利用して、磁力線の周波数成分 から複数のタンジブルを識別する方法を提案してい る [3]. この手法はタンジブルの数が増えても頑健に 働くが,磁石を回転させる特殊なデバイスを要する.

2.3 音源分離

磁力線には加法性があり,複数の磁石から混合された磁力線は線形モデルによって各々に分離できる. この性質は音声の複素スペクトルにもあてはまるため,実部と虚部の2軸のスペクトル成分を3軸の磁力線に拡張することで,音源分離等で使われている手法を磁力線の分離に適用できる.その手法の候補として,Kameokaらが提案している複素スペクトルを基底モデルで表現した複素 NMF [12] や,Ahujaらの複素スペクトルの正値と負値を2つの非負値行列に分けてそれぞれを NMF によって分解する手法が挙げられる [1].本手法では,これら手法をベー スとしたアルゴリズムを用いて磁力線を分離する.

3 トラッキング手法

本手法ではスマートデバイスをぬいぐるみの胴体 にくくりつけ,ぬいぐるみの各部位に取り付けた複 数の磁石から生じて混合された磁力線を分離するこ とで,ぬいぐるみの各部位の位置を推定できる.

図 2 に示すとおり、磁力線の分離において、入力 は磁力線の混合変化であり、出力は各磁石からの磁 力線の変化の大きさ H_i である (i は磁石のインデッ クス).分離に先立って、各磁石が基準位置 $\mathbf{r}_i^{(b)}$ にあ るときの磁力線と、トラッキングを所望する範囲の 境界位置 $\mathbf{r}_i^{(e)}$ までぬいぐるみの各部位を動作させた ときの磁力線を事前に登録する、端点となる両位置 を各磁石の磁力線の変化の大きさで補間、すなわち、

$$\mathbf{r}_i = (1 - H_i)\mathbf{r}_i^{(b)} + H_i\mathbf{r}_i^{(e)} \tag{1}$$

によって、ぬいぐるみの各部位の位置 \mathbf{r}_i を推定する. ϕ を3軸のインデックス (i.e., $\phi \in \{x, y, z\}$) と

すると、各磁石から生じる磁力線の変化モデル $M_{i,\phi}$ は磁石を基準位置から境界位置まで移動させたときの磁力線の変化 $X_{i,\phi}$ と、現時点での変化の大きさ H_i の積で表現できるとして以下のように定義する.

$$M_{i\phi} = H_i X_{i\phi} \tag{2}$$

 H_i は $0 \le H_i$ を満たす.地磁気センサーから計測される磁力線 Y'_{ϕ} と磁力線の変化モデル $M_{i,\phi}$ と全ての磁石が基準位置にあるときの磁力線 C_{ϕ} との間には,

$$Y'_{\phi} = \sum_{i} M_{i,\phi} + C_{\phi} + \epsilon_{\phi} \tag{3}$$

が成り立つ. ϵ_{ϕ} はモデルの誤差やノイズによるエ ラーである. C_{ϕ} は各磁石の磁力線の他に地磁気も 含むが,全ての磁石が基準位置にあるときに計測し て定数とする.すなわち,以下のように各磁石からの 磁力線の混合変化 Y_{ϕ} を観測データとして得られる.

$$Y_{\phi} = \sum_{i} M_{i,\phi} + \epsilon_{\phi} \tag{4}$$

実数である3軸の磁力線にNMFを適用するために,

$$X_{i,\phi}^{(+)} = \max(0, X_{i,\phi}) \quad X_{i,\phi}^{(-)} = \min(0, X_{i,\phi}) \quad (5)$$
$$Y_{i,\phi}^{(+)} = \max(0, Y_{i,\phi}) \quad Y_{i,\phi}^{(-)} = \min(0, Y_{i,\phi}) \quad (6)$$

$$I_{\phi}$$
 = $\operatorname{Imax}(0, I_{\phi})$ I_{ϕ} = $\operatorname{Imax}(0, I_{\phi})$ (0)
と正の成分と負の成分に,登録した磁力線の変化と
観測データをそれぞれ分割する トゥて 。た値の

観測データをそれぞれ分割する.よって,sを値の 符号のインデックス (i.e., s ∈ {(+),(−)}) とする と,磁力線の変化モデルと観測データはそれぞれ

$$M_{i,\phi}^s = H_i X_{i,\phi}^s \tag{7}$$

$$Y^s_{\phi} = \sum_i M^s_{i,\phi} + \epsilon^s_{\phi} \tag{8}$$



図 2. 磁力線分離の概要

と書き直せる.理論的には観測データのエラー ϵ_{ϕ}^{s} は ゼロとなり、これを最小化する問題はコスト関数

$$J(Y,M) \equiv \sum_{\phi} D(Y_{\phi}, M_{\phi}) + 2\lambda_{\rm L} \sum_{i} |H_i| \qquad (9)$$

を H_i に関して最小化することに等しい. ここで第 二項は H_i の過学習を防ぐ正則化項であり, λ_L には 経験的な値を割り振る.第一項は β ダイバージェン スである. β ダイバージェンスは β の値によって多 様に形状を変えられる凸関数であるが,特に,本手 法では $\beta = 2$ のときに得られる Euclid 距離

$$D(Y_{\phi}, M_{\phi}) = \sum_{s} (Y_{\phi}^{s} - \sum_{i} M_{i,\phi}^{s})^{2}$$
(10)

を用いる.補助関数法により,式(9)のコスト関数 の補助関数を次の2つの不等式を用いて導く.

$$(Y_{\phi}^{s} - \sum_{i} M_{i,\phi}^{s})^{2} \leq \sum_{i} \frac{(\hat{Y}_{i,\phi}^{s} - H_{i}X_{i,\phi}^{s})^{2}}{\beta_{i,\phi}^{s}} \quad (11)$$

$$|H_i| \le \frac{|H_i|}{2} H_i^2 + |\hat{H}_i| - \frac{|H_i|}{2} \tag{12}$$

ただし,式 (11) は $\sum_{i} \hat{Y}^{s}_{i,\phi} = Y^{s}_{\phi}$ の条件下で成り立 つ.また, $\beta^{s}_{i,\phi}$ は $0 \leq \beta^{s}_{i,\phi} \leq 1$, $\sum_{i} \beta^{s}_{i,\phi} = 1$ を満 たす任意の値である.これらより,

$$J^{+}(Y,M) \leq \sum_{s,i,\phi} \frac{(\hat{Y}_{i,\phi}^{s} - H_{i}X_{i,\phi}^{s})^{2}}{\beta_{i,\phi}^{s}} + \lambda_{\rm L}(|\hat{H}_{i}|^{-1}H_{i}^{2} + |\hat{H}_{i}|)$$
(13)

とすれば, $J(Y, M) \leq J^+(Y, M)$ が成り立ち,

$$\hat{Y}_{i,\phi}^{s} = H_{i}X_{i,\phi}^{s} + \beta_{i,\phi}^{s}(Y_{\phi}^{s} - M_{i,\phi}^{s})$$
(14)

$$\hat{H}_i = H_i \tag{15}$$

のとき, $J(Y, M) = J^+(Y, M)$ となるため, $J^+(Y, M)$ は補助関数の定義を満たす. 前述の条件下で $\beta_{i,\phi}^s$ に,

$$\beta_{i,\phi}^s = \frac{H_i X_{i,\phi}^s}{\sum_n H_n X_{n,\phi}^s} \tag{16}$$

と磁力線の変化モデルの期待値を用いることで効率 的に解を求められる.更新式は $\partial J^+ / \partial H_i = 0$ を解 くことによって求まり,

$$H_{i} = \frac{\sum_{s,\phi} (\hat{Y}_{i,\phi}^{s} X_{i,\phi}^{s} / \beta_{i,\phi}^{s})}{\sum_{s,\phi} ((X_{i,\phi}^{s})^{2} / \beta_{i,\phi}^{s}) + \lambda_{\mathrm{L}} |\hat{H}_{i}|^{-1}} \qquad (17)$$

となる.式(14),(15),(16),(17)を反復計算す ることで解が収束する.

4 手法の評価

本手法の精度を調査するために評価実験をした.

4.1 セットアップ

図 1 に示すような,標準的な大きさ (40cm × 33cm × 20cm)のクマのぬいぐるみを利用した.利 用したスマートデバイスは Nexus 5x であり,本 体の右上部に地磁気センサーを有している.その機 構上,ぬいぐるみの左腕と比較して右腕の磁力線が 弱く観測されるため,左腕に直径 1.2.cm の磁石を アタッチメントしているのに対して,右腕には直径 2.0cm の磁石をアタッチメントしている.磁石のとり つけた各腕を赤と青のカラーボールでそれぞれ覆っ た.分離のサンプリングレートが 25Hz となるよう に反復計算の回数を調整した.

4.2 両腕の動作トラッキング

4人の被験者からデータを取得した.各被験者に は実験前にぬいぐるみの腕の位置のフィードバック を与えながら自由にぬいぐるみの腕を動かす数分間 のインストラクションを行った.これは実験で用い るぬいぐるみの腕の物理的に動かしやすい方法を把 握してもらい,動作を安定させるために行った.被 験者ごとに基準位置と境界位置での磁力線を登録 した.表1に示すような動作パターン(以下,表の 番号で呼称する)をしたときの時系列データを取得 した.データ取得時にはメトロノームで四分音符を bpm=50で鳴らし,2音で1往復動作させるよう指 示した.各動作パターンを3往復したものを1セッ トし,全動作パターンを3セットずつ試行した.

モーションキャプチャで取得した座標を正解デー タとして利用した.通常のモーションキャプチャで はキャプチャ対象の縦,横,奥行きの3軸の座標を 取得するが,本実験で用いる動作パターンでは横方 向と奥行き方向に大きな座標の変化がないため,1 枚の画像(640×480)から縦のy座標のみ取得する. モーションキャプチャにはぬいぐるみの両腕にとり つけたカラーボールを画像処理する方法を用いた.

各動作パターンにおけるモーションキャプチャと 本手法によるトラッキングによってそれぞれ得られ た y 座標の二乗誤差を図 3 に示す.また,実例と してある被験者のトラッキング結果を図 4 に示す.

#	両腕の動作パターン	動作イメージ
A1	右上下, 左下段固定	×3 1
A2	右上下, 左中段固定	X •×3
A3	右上下, 左上段固定	X ×3 Y
<i>B1</i>	右下段固定, 左上下	×3 2
B2	右中段固定, 左上下	×3 •
<i>B3</i>	右上段固定, 左上下	×3 1
C1	両腕交互上下	×3 1
C2	両腕同時上下	×3 T

表 1. 評価におけるぬいぐるみの両腕の動作パターン

図 3, 図 4 ともに縦軸の次元は画像の画素数である が,目分量では1 画素の距離は1mm 程度であった. 動作させない腕を下段で固定する *A1* と *B1* にお

いて誤差が小さくなった.これは動作させない腕か ら生じる磁力線の影響がなく,分離が容易になった ためである.一方,動作させない腕を上げた状態で 固定する A2, A3, B2, B3 と,両腕を同時に動作 させる C1 と C2 において比較的誤差が大きくなっ た.これは, A1 と B1 とは逆に,両腕から磁力線 の変化が混合して分離が難しくなったためである. 図 4 から動かしている腕に応じて動作させない腕の トラッキング結果にずれが生じていることがわかる.

動作に関わらず右腕の動作誤差が全体的に大きく なった.これは、左腕の磁石より右腕の磁石のほう が地磁気センサーから離れているためである.変化 の大きい成分ほど特徴がはっきりして分離しやすく なるため、左腕の誤差が小さくなったと考えられる. なお、本実験ではこの影響を緩和するために左腕の 磁石よりも大きな磁石を右腕に取り付けたが、観測 される両者の磁力線の強さを完全に一致させる調整 ではない.磁力線の強さは磁石のぬいぐるみへの取 り付け方でも変わり、完全に一致させることは難し いため、ある程度揃えておくぐらいが現実的である.

5 デモアプリケーション

本手法の有効性を調べる一環として,いくつかの デモアプリケーションを作成した.

5.1 ぬいぐるみの腕によるアナログ入力

ぬいぐるみの両腕に一対の磁石をそれぞれとりつ けて,観測される磁力線を分離することで,各腕の 位置をトラッキングできる.ぬいぐるみの腕を動か すことは,ぬいぐるみとのインタラクションを考え る上で最もありがちな方法のひとつである.それに



図 3. モーションキャプチャと本手法からそれぞれ得ら れた y 座標の二乗誤差 (平均と標準偏差)



図 4. 被験者のトラッキング結果.赤と青はそれぞれぬ いぐるみの右腕と左腕,実線と点線はそれぞれモー ションキャプチャと本手法でトラッキングした結果

応じて,我々は 図1に示すような,ぬいぐるみの 両腕の垂直位置を表示するアプリケーションを作成 した.ぬいぐるみの腕の位置情報の典型的な応用例 はゲームコントローラーである.各腕の連続した位 置情報を取得できるため,従来のゲームコントロー ラーのボタンよりもよりユーザーの直感にあった入 力が可能である.さらに,連続値に基づいたジェス チャー入力への応用も期待できる.

5.2 抱きしめ入力

ぬいぐるみを抱きしめる行動もまた,ぬいぐる みの腕を動かすことと同様に,最もありがちなぬい ぐるみとのインタラクション方法のひとつである. 我々は 図 5 に示すような,ぬいぐるみを抱きしめ たときの力を記号の大きさによって提示するアプリ ケーションを作成した.ぬいぐるみの首と背中に磁 石を取り付けることで,ぬいぐるみの胴体の上部と 下部にかかる圧力をそれぞれ推定することができる. 抱きしめ入力はぬいぐるみロボットとのインタラク ションに応用できると考えられる.各部位ごとへの 圧力を連続値で推定できるため,圧力に応じてぬい ぐるみロボットの反応を細かく変えることができる.



図 5. ぬいぐるみを抱きしめたときに生じる圧力の検出



図 6. 弓で射抜くアプリケーション (©UTJ/UCL)

5.3 体感ゲームコントローラー

本手法はぬいぐるみだけでなく, 磁石の位置を変 化させる機構を持った対象全般に適用できる.一例 として、図6に示すような、弓型コントローラーの 入力に応じてキャラクターが歩いたり弓を射るアプ リケーションを作成した. このコントローラーは握 ることによって磁石を移動させるグリップと、糸を 引くことによって内部に仕掛けられた磁石を移動さ せる機構を持つ.力を与えないとき,それぞれの磁 石はバネとゴム糸の力で定位置に戻ろうとする. グ リップの強さからキャラクターの移動速度(歩く,走 る), 弓の糸の位置から矢の射出(飛距離, 射出取り やめ)を制御できる.また、角速度センサーでコン トローラーの傾きを計測して視点制御できる. コン トローラーを傾けると計測される地磁気が変化する が、この変化に比べて十分に大きい磁力線の変化を 計測できる機構にすることで影響を小さくできる.

6 議論

6.1 利点

本手法には以下に示すような重要な利点がある.

低い設置コスト ぬいぐるみを引き裂くことを要求 しないため、多くの既製のぬいぐるみに適用でき る.ぬいぐるみの素材にも依存しない.また、プラ スチック製など磁力線に干渉しない素材であれば、 ロボット玩具などにも適用できる可能性もある. 特殊なデバイスを用いない 広く利用されるハード ウェアのみ要し,特殊なデバイス (小型基盤にセン サーを有するもの)を必要としない.磁石はどこで でも入手できる.昨今スマートデバイスの販売台 数が従来の携帯電話のそれを上回っており,多くの 人々が何らかのスマートデバイスを所持している.

磁石のバッテリー充電無用 磁石はバッテリーを必 要とせず機構が小さくシンプルになるため,特殊な デバイスに比べて衝撃にも強い.スマートデバイス 側と比較して磁石側は激しく動されるユースケース が想定されるが,この利点は相性が良い.

ノイズへのロバスト性 磁力線はノイズの発生源が 音声や加速度などに比べるとほとんどなく十分な S/N 比で計測される.ユーザーの腕やぬいぐるみ 自身の布素材によって磁力線が遮られることもない.

6.2 トラッキング精度

本手法ではぬいぐるみの各部位の動作に対して磁 力線が線形に変化することを仮定している.ぬいぐ るみの各部位を動かしたときに磁石の向きも変わり えることを考えると,この仮定はかなり大胆である. それにも関わらず,本稿の評価実験では大きなトラッ キングの誤差はみられなかった.この傾向は予備実 験でも見られ,図1の撮影時にはぬいぐるみの肉球 と水平になるようにボタン型の磁石を取り付けたが, 概ね正しくトラッキングできたことを確認している. この仮定下でどの程度実用的に本手法を適用できる かを調査するために,磁石の取り付け方とトラッキ ング精度に関する実験を今後予定している.

本実験の被験者に精度について話を伺ったところ、 4人全員の被験者から「ゲームコントローラーとし て使うには十分な精度」という意見を得られた.し かし,これは全ユーザーにとって十分な精度が得ら れていることを意味しない.予備実験にて,左右な ど登録していない方向へ腕を動かした場合、反対側 の腕が上下するなど意図しないトラッキング結果が 得られることがあることがわかっている. そのため, 本実験では、実験の前にインストラクションを実施 することで被験者のぬいぐるみの動作の安定性を高 めた. 全員が数分で安定して腕をあげられるように なったため、ぬいぐるみの腕を安定して上げること に高い技術は要さないとはいえるが、子どもなどぬ いぐるみへの作用が安定しないユーザーにとって, この偽陽性の高さは使い勝手が良くない.これを改 善する手段としては登録するデータを増やしたり事 前分布を用いるなどが考えられるが、具体的なアル ゴリズムの開発は今後の課題とする.

6.3 基準位置と境界位置の登録コスト

本手法では利用の直前に各位置での磁力線を登録 することが望ましい.再登録はユーザーにとってコ ストであるが、2箇所のトラッキングであれば、両 磁石が基準位置にあるときと各磁石が境界位置にあ るとき合計3箇所の登録だけで済む.従来の混合さ れた磁力線を包括して分類する手法 [10]でも、登録 データを水増しすれば同じ登録数で済むが、水増し データでは従来手法が本来出せる精度で分類できな い可能性がある.なお、図6に示したようなゲーム コントローラーの場合、磁石の軌道と向きが安定す るため、再登録なしで本手法は十分に動作する.

6.4 手法の限界

磁力線の強度は距離の2乗に反比例するため,ス マートデバイスから離れすぎた部位に取り付けられ た磁石の磁力線を観測することは難しい.この磁力 線の観測範囲は強力な磁石を使うことである程度改 善できるが,安全面や実用面を考慮すると,ぬいぐ るみの部位ごとに重ねられる磁石の数はせいぜい3, 4 個である.このため,大きすぎるぬいぐるみに本 手法を適用することは難しい.

ぬいぐるみの両腕以外に別の部位 (e.g., 両足 etc.) を同時に動かしたいという特殊な要望に応えること は難しい.多くのスマートデバイスで観測できる磁 力線は3軸であるため,分離できる磁力線の数は理 論的には3つまでである.

7 おわりに

我々は磁石とスマートデバイスを使ったぬいぐる みの動作トラッキング手法を開発した.本手法は特 殊なデバイスや複雑な手順なしに,既製のぬいぐる みに適用できる.複数の磁石から生じる磁力線を分 離することで,ぬいぐるみの各部位の動作を検出で きる.評価とデモアプリケーションの作成を通して 効果を確認し,実用性を議論した.

参考文献

- Ahuja, C., Nathwani, K., and Hegde, R.M. A Complex Matrix Factorization approach to Joint Modeling of Magnitude and Phase for Source Separation. *CoRR*, abs/1411.6741, 2014.
- [2] Bianchi, A. and Oakley, I. Designing Tangible Magnetic Appressories. In Proc. TEI '13, pp. 255–258.
- [3] Bianchi, A. and Oakley, I. MagnID: Tracking Multiple Magnetic Tokens. In *TEI* '15, pp. 61– 68.
- [4] Butler, A., Izadi, S., and Hodges, S. SideSight: Multi-"Touch" Interaction Around Small Devices. In Proc. UIST '08, pp. 201–204.
- [5] L. Chan, C.-H. Hsieh, Y.-L. Chen, S. Yang, D.-Y. Huang, R.-H. Liang, and B.-Y. Chen.

Cyclops: Wearable and Single-Piece Full-Body Gesture Input Devices. In *Proc. CHI '15*, pp. 3001–3009.

- [6] Dahlström, A. WeeWaa Wii Plushtoy Game. http://andersdahlstrom.com/games/ weewaa.html, 2010.
- [7] Gu, H. and Yang, S. A sound-source localization system using three-microphone array and crosspower spectrum phase. In *Proc. ICMLC* '12, pp. 1732–1736, 2012.
- [8] Harrison, C. and Hudson, S.E. Abracadabra: Wireless, High-precision, and Unpowered Finger Input for Very Small Mobile Devices. In *Proc. UIST '09*, pp. 121–124.
- [9] Hwang, S., Ahn, M., and Wohn, K. MagGetz: Customizable Passive Tangible Controllers on and Around Conventional Mobile Devices. In *Proc. UIST '13*, pp. 411–416.
- [10] Hwang, S., Ahn, M., and Wohn, K. Magnetic Marionette: Magnetically Driven Elastic Controller on Mobile Device. In *Proc. IUI '13*, pp. 75–76, 2013.
- [11] Johnson, M.P., Wilson, A., Blumberg, B., Kline, C., and Bobick, A. Sympathetic Interfaces: Using a Plush Toy to Direct Synthetic Characters. In *Proc. CHI* '99, pp. 152–158.
- [12] Kameoka, H., Ono, N., Kashino, K., and Sagayama, S. Complex NMF: A new sparse representation for acoustic signals. In *Proc. ICASSP '09*, pp. 3437–3440.
- [13] Ketabdar, H., Yüksel, K.A., and Roshandel, M. MagiTact: Interaction with Mobile Devices Based on Compass (Magnetic) Sensor. In *Proc. IUI '10*, pp. 413–414.
- [14] Ono, M., Shizuki, B., and Tanaka, J. Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing. In Proc. UIST '13, pp. 31–40.
- [15] Sugiura, Y., Kakehi, G., Withana, A., Lee, C., Sakamoto, D., Sugimoto, M., Inami, M., and Igarashi, T. Detecting Shape Deformation of Soft Objects Using Directional Photoreflectivity Measurement. In *Proc. UIST '11*, pp. 509–516.
- [16] Sugiura, Y., Lee, C., Ogata, M., Withana, A., Makino, Y., Sakamoto, D., Inami, M., and Igarashi, T. PINOKY: A Ring That Animates Your Plush Toys. In *Proc. CHI '12*, pp. 725– 734.
- [17] Wang, J., Zhai, S., and Canny, J. Camera Phone Based Motion Sensing: Interaction Techniques, Applications and Performance Study. In *Proc. UIST '06*, pp. 101–110.
- [18] Yonezawa, T., Clarkson, B., Yasumura, M., and Mase, K. Context-aware Sensor-doll As a Music Expression Device. In *Proc. CHI EA '01*, pp. 307–308.