

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.

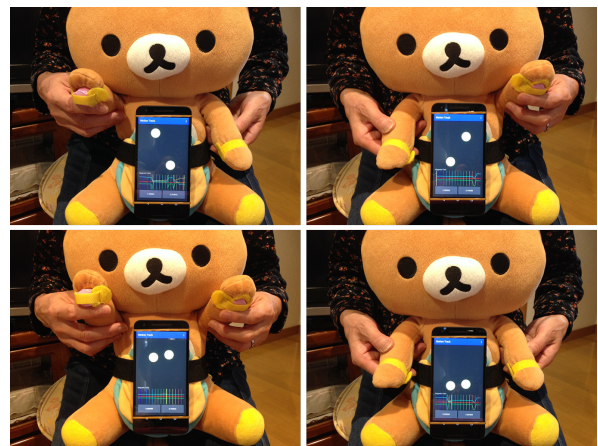


図 1. ぬいぐるみの各腕の高さのトラッキングの様子

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できるが, 依然として特殊なデバイスを必要とする.

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

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]。空气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、単一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、不安定になりがちで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值と負値を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-

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、

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

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。

$$M_{i,\phi} = H_i X_{i,\phi} \quad (2)$$

H_i は $0 \leq H_i$ 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、

$$Y'_\phi = \sum_i M_{i,\phi} + C_\phi + \epsilon_\phi \quad (3)$$

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。

$$Y_\phi = \sum_i M_{i,\phi} + \epsilon_\phi \quad (4)$$

実数である3軸の磁力線に NMF を適用するために、

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

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

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。よって、 s を値の符号のインデックス (i.e., $s \in \{(+), (-)\}$) とすると、磁力線の変化モデルと観測データはそれぞれ

$$M_{i,\phi}^s = H_i X_{i,\phi}^s \quad (7)$$

$$Y_\phi^s = \sum_i M_{i,\phi}^s + \epsilon_\phi^s \quad (8)$$

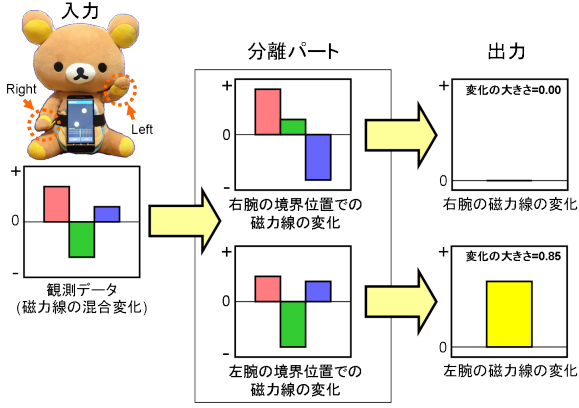


図 2. 磁力線分離の概要

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

$$J(Y, M) \equiv \sum_{\phi} D(Y_{\phi}, M_{\phi}) + 2\lambda_L \sum_i |H_i| \quad (9)$$

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

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

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．

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

$$|H_i| \leq \frac{|H_i|}{2} H_i^2 + |\hat{H}_i| - \frac{|\hat{H}_i|}{2} \quad (12)$$

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

$$J^+(Y, M) \leq \sum_{s,i,\phi} \frac{(\hat{Y}_{i,\phi}^s - H_i X_{i,\phi}^s)^2}{\beta_{i,\phi}^s} + \lambda_L (|\hat{H}_i|^{-1} H_i^2 + |\hat{H}_i|) \quad (13)$$

とすれば， $J(Y, M) \leq J^+(Y, M)$ が成り立ち，

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

$$\hat{H}_i = H_i \quad (15)$$

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，

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

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，

$$H_i = \frac{\sum_{s,\phi} (\hat{Y}_{i,\phi}^s X_{i,\phi}^s / \beta_{i,\phi}^s)}{\sum_{s,\phi} ((X_{i,\phi}^s)^2 / \beta_{i,\phi}^s) + \lambda_L |\hat{H}_i|^{-1}} \quad (17)$$

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 1.2cm 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	
A2	右上下, 左中段固定	
A3	右上下, 左上段固定	
B1	右下段固定, 左上下	
B2	右中段固定, 左上下	
B3	右上段固定, 左上下	
C1	両腕交互上下	
C2	両腕同時上下	

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对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

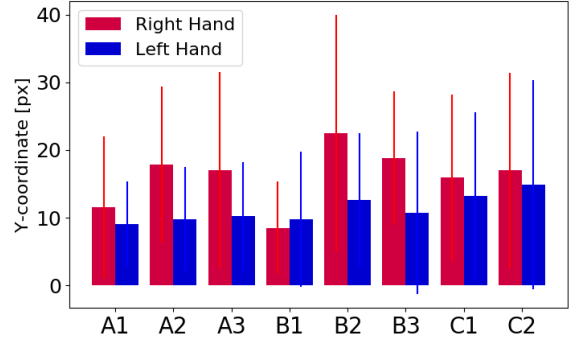


図 3. モーションキャプチャと本手法からそれぞれ得られた y 座標の二乗誤差 (平均と標準偏差)

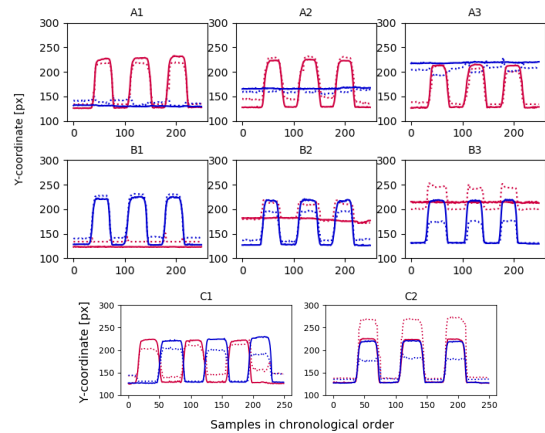


図 4. 被験者のトラッキング結果. 赤と青はそれぞれぬいぐるみの右腕と左腕, 実線と点線はそれぞれモーションキャプチャと本手法でトラッキングした結果

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は変化するが、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を考えると、この仮定はかなり大胆である。それに関わらず、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本数は理論的には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

- [1] 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 Accessories. 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 Photorefectivity 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.