

Spherical and Flat Surface Motion Sensing using Laser Mouse Sensors

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2015-10-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 熊谷, 正朗, Ralph L, Hollis メールアドレス: 所属:
URL	https://tohoku-gakuin.repo.nii.ac.jp/records/431

マウス用センサを用いた球面および平面の高分解能運動計測

Spherical and Flat Surface Motion Sensing using Laser Mouse Sensors

正 熊谷正朗 (東北学院大学) ラルフ・ホルリス (カーネギーメロン大)

KUMAGAI Masaaki, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi

Ralph L. Hollis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, USA

This paper describes a sensing method for motion of a spherical surface. The method uses two or more optical mouse sensors, detects circumferential speeds of the surface, and transforms those speeds into angular velocity of the sphere. It can be also applied to a flat surface sensing by assuming that the radius is infinity. With weighted average of multiple combinations of sensor outputs, the experimental result showed only 1% error in sensing. A particle filter based absolute estimation method was also introduced. It compensates the position error by using pattern-filled surface and reflection sensing of mouse sensors. The method was examined through simulation on a flat surface, which showed effectiveness of the improved method.

Key Words : Motion detection, Spherical surface, Laser mouse sensor, Particle filter

1 はじめに

著者らは球体を移動輪としたロボット *ballbot*⁽¹⁾ や *BallIP*⁽²⁾ を開発している。球体利用ロボットは他にも開発事例が知られているが、制御方式や球の駆動方式に違いはあるものの、モータで駆動するローラや車輪の回転を摩擦で球に伝達する点で共通している。そのため、様々な要因で大小の滑りが生じ、制御に悪影響を及ぼす場合があり、最悪の場合は転倒につながる。よって、実用性を考慮すると球そのものの回転を直接計測する必要がある。

そこで著者らは、レーザーマウス用のセンサを複数用いて球体の角速度・回転角を計測する手法を開発した⁽³⁾。マウスのセンサで球体の運動を測定する手法は複数提案されているが⁽⁴⁾、我々の方法はセンサの配置の自由度が高く、演算が単純で、かつ複数のセンサを用いた信頼性の向上が特徴である。また、式の変形により平面運動の計測も可能である。

ただし、速度計測手法であるため、角度、位置を得るには数値積分が必要で、僅かな計測誤差が後に大きな誤差となる弱点があった。多数のセンサと複雑なパターンを付加した球で角度を直接計測する手法⁽⁵⁾もあるが、少数のセンサで実現できれば有用性がより高い。そこで、上述の手法にパーティクルフィルタを併用することで絶対計測も可能とする手法を検討した。

本論文では、マウスのセンサを用いて球体の運動計測する手法の既報を簡略化して紹介するとともに、新たに試みた絶対計測の案とシミュレーション結果について述べる。

2 マウスセンサによる球面・平面の運動計測

本節では、レーザー光学式マウスのセンサを用いた球面と平面の運動計測の概要を述べる。文献⁽³⁾にて詳述している。

光学式マウスのセンサは少画素の撮像センサ(実験で用いたものは900画素)とその処理部からなる。マウスの滑走面(机、マウスパッドなど)の画像を高フレームレートで取得して、その移動を検出する。この移動量を積算して保持しており、外部の指示で出力する、相対変位センサである。検出軸は直交する2方向であり、独立した計測値が得られる。これを一定時間間隔で得れば速度となる。

レーザーマウスは光源にレーザーダイオードを用いた比較的性能の高い品種で、最大検出速度3.8m/s、分解能5 μ mといった性能を有するものもある。

2.1 球面の運動計測

球面の運動計測の目的は、球面の回転角度変化(3自由度の姿勢)の計測である。まず、複数のセンサから得られる速度

を球の角速度ベクトルに変換し、同ベクトルから回転角に変換する。以下では、その手順を述べる。

2.1.1 センサの配置と角速度の計算

角速度ベクトルは3自由度であり、独立した3個の速度計測値があれば求められる。一般的なマウスセンサは2軸の出力を持つため、センサの最少必要数は2個であるが、より多い場合にも後述の手法で平均化して計測の信頼性を高められる。

センサが N 個あるとし、各々に番号 l ($l = 0 \dots N - 1$) を振る。センサ l は2個の速度計測が得られ(合計 $n = 2N$ 個)、それぞれに $2l, 2l + 1$ の番号を付ける。それぞれの計測点 P_i ($i = 0 \dots n - 1$ ($= 2N - 1$)) の位置ベクトル p_i と、計測方向を示す単位ベクトル s_i は既知であるとする(構造の設計による)。図1に3個のセンサの配置例を示す。なお、一般的なマウスセンサであれば、 $p_{2l} = p_{2l+1}$ 、 $s_{2l} \cdot s_{2l+1} = 0$ であり、 s は測定対象面の法線に垂直(接線方向)である。

これら n 個の速度計測値の中から計測値の組 v_{si}, v_{sj}, v_{sk} を選択する ($i, j, k = 0 \dots n - 1$)。これらは当然異なるものであるが、同一のセンサから直交する2個を利用することは後述の条件を満たせば可能である。

球が角速度 ω で回転する場合、 P_i における周速度 v_i は

$$v_i = \omega \times p_i \quad (1)$$

で得られる。また、計測軸 s_i に添った成分は内積で得られ、

$$\begin{aligned} v_{si} &= s_i \cdot v_i = s_i \cdot (\omega \times p_i) \\ &= \omega \cdot (p_i \times s_i) \end{aligned} \quad (2)$$

となり、これらがセンサの測定値となる。同様に、 j, k についても求め、まとめて行列で表記する。

$$\begin{pmatrix} v_{si} \\ v_{sj} \\ v_{sk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_i \times s_i \\ p_j \times s_j \\ p_k \times s_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = A\omega \quad (3)$$

ここに、 $A(i, j, k)$ は角速度と計測周速度の間のヤコビ行列のような性質を持つ。

もし、 A の行列式がゼロでなければ、この式は解くことができ、速度組 $(v_{si}, v_{sj}, v_{sk})^T$ から、 ω を計算できる。

$$\omega(i, j, k) = A^{-1} \begin{pmatrix} v_{si} \\ v_{sj} \\ v_{sk} \end{pmatrix} \quad (4)$$

これが本手法の基礎式である。

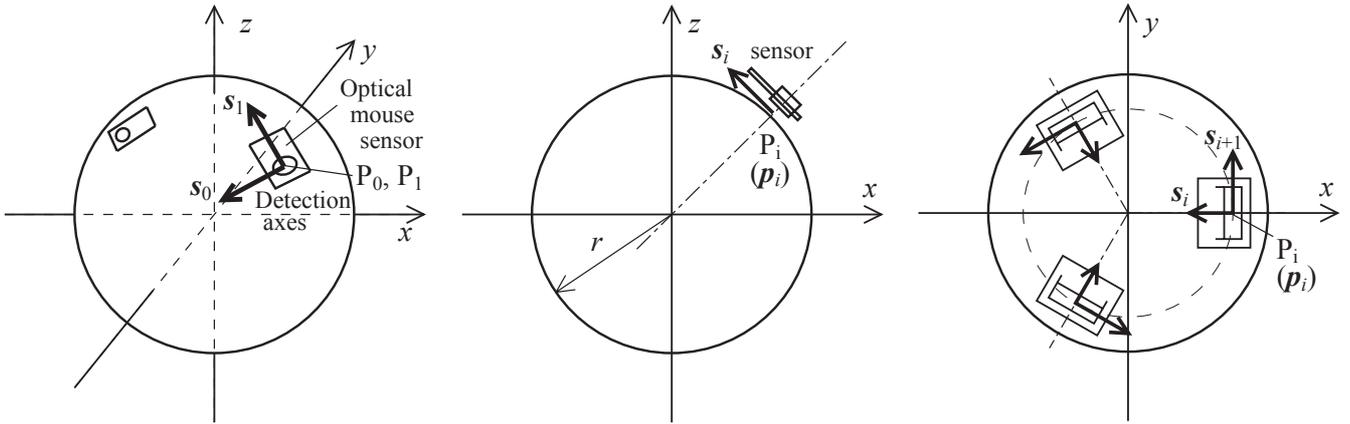


Fig. 1: Example arrangements of mouse sensors around a ball.

2.1.2 計測値の加重平均

N 個のセンサを用いると計測値は $n = 2N$ 得られ、任意の 3 個を選ぶ組み合わせは $C(n, 3) = n(n-1)(n-2)/6$ 通りある。ただし、全ての計測の信頼性が等しいわけではなく、以下の二つの重みで加重平均を行った。

一つ目は $w_1(i, j, k) = \|A\|$ (行列式の絶対値) である。まず、 $\|A\| = 0$ は前述の通り、逆行列が求められないため角速度の計算対象外である。また、小さな $\|A\|$ は相対的に A^{-1} の要素を大きくするため、速度計測値の誤差やノイズへの感度が高まり、信頼性が低下する。そのため、この重みを導入した。これはセンサの配置のみに依存し、設計時にも検証できる。

もう一つは、 A^{-1} の要素の負号に着目した。式 (4) の各行は

$$\omega_{x(or y, z)} = a_1 v_{si} + a_2 v_{sj} + a_3 v_{sk} \quad (5)$$

と書き直せる (a_1, a_2, a_3 は A^{-1} の対応する要素)。この式を元に、

$$w_{2x(y, z)}(i, j, k) = \frac{|a_1 v_{si} + a_2 v_{sj} + a_3 v_{sk}|}{|a_1 v_{si}| + |a_2 v_{sj}| + |a_3 v_{sk}|} \quad (6)$$

を二つ目の重みとした。センサ配置の対称性が高いほど「大きな値から大きな値を引いて小さな値を算出する」ことが生じやすくなるが、これは計算精度の劣化に繋がりがやすく、やはり誤差やノイズの影響を受けやすい。そのため各項の負号が一致していれば 1、減算による相殺の程度が大きいほど 0 に近づくこの値を導入した。

以上二つの重みを用い、

$$\bar{\omega}_x = \frac{\sum_{i, j, k} w_1(i, j, k) w_{2x}(i, j, k) \omega_x(i, j, k)}{\sum_{i, j, k} w_1(i, j, k) w_{2x}(i, j, k)} \quad (7)$$

によって、加重平均を計算した ($\bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$ も同様)。

2.1.3 球の回転角度

この角速度ベクトルを積分すれば球の回転角度を得られる。

球体に固定し、ともに回転する直角座標系 (原点は球中心) の軸単位ベクトルからなる回転行列を R とし、上述の角速度算出を T_s 周期で行ったとして、以下の式で R を更新する。

$$R_{new} = R_x(\Delta\theta_x) R_y(\Delta\theta_y) R_z(\Delta\theta_z) R_{old} \quad (8)$$

ここで、 R_x, R_y, R_z は各々、測定基準の座標系の x, y, z 軸周りの回転変換行列、 $\Delta\theta_x = T_s \bar{\omega}_x$ 、 $\Delta\theta_y = T_s \bar{\omega}_y$ 、 $\Delta\theta_z = T_s \bar{\omega}_z$ である。この回転行列はそのまま各種演算に使えるほか、オイラー角などにも変換できる。なお、一般に回転は順序が重要であるが、 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ が十分に小さくなるように、 T_s を選べば問題ない。実機での検証によると、この周期よりも速度の量子化誤差の影響のほうが大きく見られた。

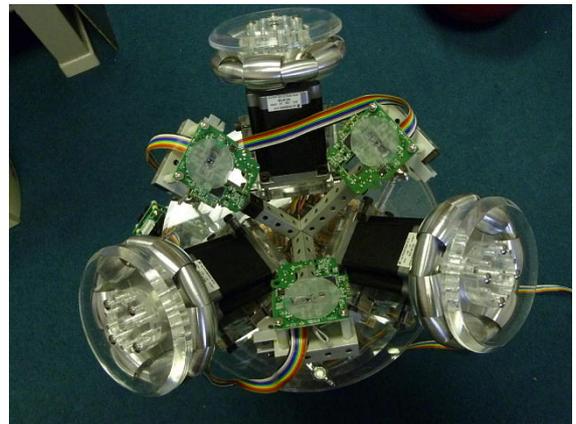


Fig. 2: Three mouse sensor boards with fixing frame and drive unit.

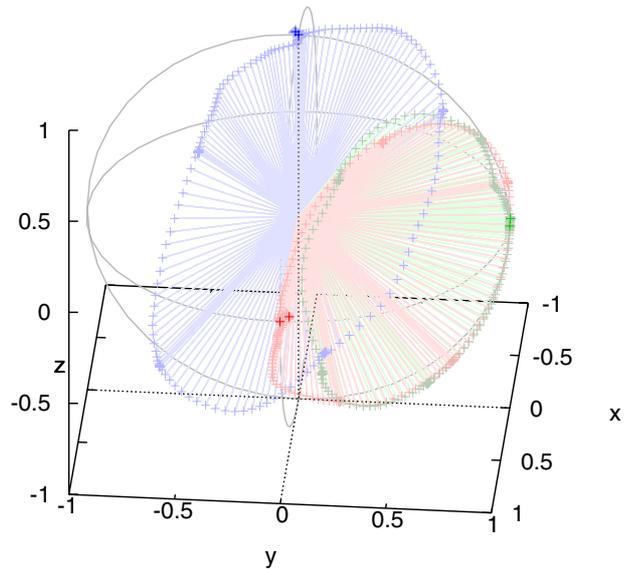


Fig. 3: Experimental result of ball motion sensing while the ball was rotated by hand. Points with lines indicate trajectories of unit vectors fixed at the center of the ball.

2.1.4 実験結果

図 2 に示すような実験装置を組立て、検証実験を行った。センサには、Microsoft 社製マウスから取り出した Avago 社

製 ADNS-6010 を 3 個用い、dsPIC マイコンを介してシリアルポートで PC に接続した。検出周期は 100Hz とした。また、球を支持し、実験時に再現性良く回転させるため、BallIP⁽²⁾ の駆動部を組み合わせている。球はこの上に載せるが、ball-bot⁽¹⁾ の直径約 200mm の球を使用した (ウレタンゴムの表層につや消しニス塗布)。図 3 に計測の代表例を示す (既報⁽³⁾ と添付映像には 3 種類の事例を示した)。これは、手で球を 1 回転させたときの、球に固定した軸 (R の 3 本の列ベクトル) の履歴を示したものである。実際の球の回転の始点と終点はレーザマーカによって誤差 0.5deg に押さえた。結果で各軸二つの濃い点は計測値の始点終点を表す。これらの差は、各々 3deg 未満で、誤差 1% に収まった。

2.2 平面の運動計測

球面の検出で、球の半径を無限大とした極限を考えると、平面の運動検出が可能である。半径 r の球の天頂 $(0, 0, r)$ 付近にセンサを配置し、そこでの運動のみを仮定する。このとき、並進速度は $v_x = r\omega_y$, $v_y = -r\omega_x$ で表せる。このとき、 ω_z は旋回の角速度をそのまま表すが、 ω_x と ω_y はほぼ 0 となる。極限の計算を回避するために、以下の書き換えを行う。まず、式 (3) を展開する。

$$\begin{pmatrix} v_{si} \\ v_{sj} \\ v_{sk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_i \times \mathbf{s}_i \\ \mathbf{p}_j \times \mathbf{s}_j \\ \mathbf{p}_k \times \mathbf{s}_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{iy}s_{iz} - p_{iz}s_{iy} & p_{iz}s_{ix} - p_{ix}s_{iz} & p_{ix}s_{iy} - p_{iy}s_{ix} \\ p_{jy}s_{jz} - p_{jz}s_{jy} & p_{jz}s_{jx} - p_{jx}s_{jz} & p_{jx}s_{jy} - p_{jy}s_{jx} \\ p_{ky}s_{kz} - p_{kz}s_{ky} & p_{kz}s_{kx} - p_{kx}s_{kz} & p_{kx}s_{ky} - p_{ky}s_{kx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

上の仮定では、 $p_{i(j,k)z} = r$, $s_{i(j,k)z} = 0$ である (センサの検出軸は水平方向)。これを代入し、 $-r\omega_x = v_y$, $r\omega_y = v_x$ で書き換えると、

$$\begin{pmatrix} v_{si} \\ v_{sj} \\ v_{sk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{iy}v_y + s_{ix}v_x + (p_{ix}s_{iy} - p_{iy}s_{ix})\omega_z \\ s_{jy}v_y + s_{jx}v_x + (p_{jx}s_{jy} - p_{jy}s_{jx})\omega_z \\ s_{ky}v_y + s_{kx}v_x + (p_{kx}s_{ky} - p_{ky}s_{kx})\omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{ix} & s_{iy} & p_{ix}s_{iy} - p_{iy}s_{ix} \\ s_{jx} & s_{jy} & p_{jx}s_{jy} - p_{jy}s_{jx} \\ s_{kx} & s_{ky} & p_{kx}s_{ky} - p_{ky}s_{kx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

となり、球回転の場合と類似の式となる。以下、加重平均を同様に行うことで、複数のマウスセンサの計測値から並進速度 (v_x, v_y) と旋回角速度 ω_z を得る。なお、これはセンサ群を基準とした計測であり、ロボットに搭載するなどしてセンサ群を移動させる場合は各項を単独では積分できない。

4 個のセンサを 40mm 間隔で同一直線上に固定した実験装置を試作し、実験を行った。机上で旋回を伴う運動を行っても、位置を原点に戻すと、計測値がほぼ 0 になることを確認している⁽³⁾。

3 パーティクルフィルタを用いた絶対位置検出

上述の球面と平面の計測手法は、計測値は速度であり、位置・角度とするためには積分が必要である。そのため、わずかな計測誤差が時間の経過とともに積算され、大きな誤差となる。短期の相対的な運動の計測に限れば 1% という精度は有

用であるが、連続した計測には不足する。そこで、マウスのセンサはレーザの反射強度から表面の明暗を検出可能であることを利用し、計測対象面に明暗模様を付加し、これを基準としてパーティクルフィルタ (PF)⁽⁶⁾ (または Monte Carlo Localization, MCL⁽⁷⁾) による補正を考えた。まずはモデルの単純な平面計測でシミュレーションにより実現性を検討した。

3.1 前提条件

まず、対象 (平面・球面) に付加する明暗模様は既知とする。あらかじめ設計したパターンの印刷、もしくは、適宜付加した模様をカメラで撮影するなどして、面上の座標と明暗の関係を用意する。計測値は、前述の手法により得られる、複数のセンサを固定した移動体の速度と角速度、およびマウスセンサの明暗計測 (2 値化) のみが得られるとする。つまり、絶対位置の補正に使える情報は瞬時には少数である。次に初期位置はある程度正しく与えられるとする。始動時の位置はある程度定めるか、手で指定するとする。ただし、初期姿勢は問わない。たとえば、球面に拡張した場合に、一点を指し示すことは容易だが、方向を指定することはより難しいため、運用を考慮して仮定した。

3.2 パーティクルフィルタによる検出手法

導入した PF は文献⁽⁶⁾ によった。粒子のモデルは位置 (x, y) と方位角 θ を持ち、入力される速度に処理周期を乗じた $(v_x\Delta T, v_y\Delta T, \omega_z\Delta T)$ を 1 ステップごとに

$$\begin{aligned} x_{new} &= x_{old} + v_x\Delta T \cos \theta' - v_y\Delta T \sin \theta' \\ y_{new} &= y_{old} + v_x\Delta T \sin \theta' + v_y\Delta T \cos \theta' \\ \theta' &= \theta_{old} + \omega_z\Delta T/2 \\ \theta_{new} &= \theta_{old} + \omega_z\Delta T \end{aligned} \quad (11)$$

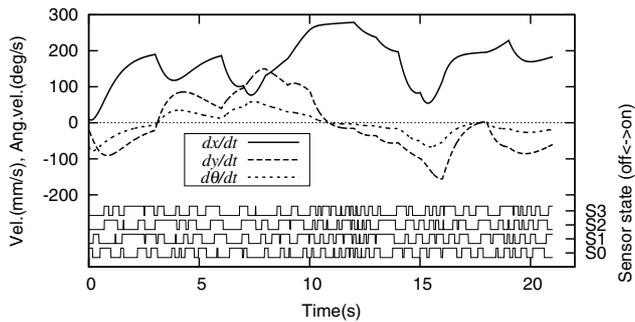
にて積算し、各々に正規分布に基づく揺らぎを加えた。

PF を適用するには、尤度の算出が必要であるが、若干数 (後述の検証では 4 個) の 2 値データのみでは、尤度の差を得にくく、かつ、計測のばらつきによる誤計測の影響を受けやすくなる。そこで、(1) 粒子ごとに点数を設定する (2) 明暗計測値と、粒子の位置姿勢に対応する既知のパターンデータから得る計測値を比較し、全て一致すれば粒子の点数を増加し、不一致が多いほど点数を減ずる (3) 再サンプリング時に元となった粒子の点数を引き継ぐこととした。つまり、粒子がたどった経路の履歴に応じて点数評価される。再サンプリングで複数の粒子ができた場合は、そこまでは同じ経路をたどった粒子、と見なす。適切な初期位置から、ほぼ正確にパターンをたどることができた粒子が主流となる。

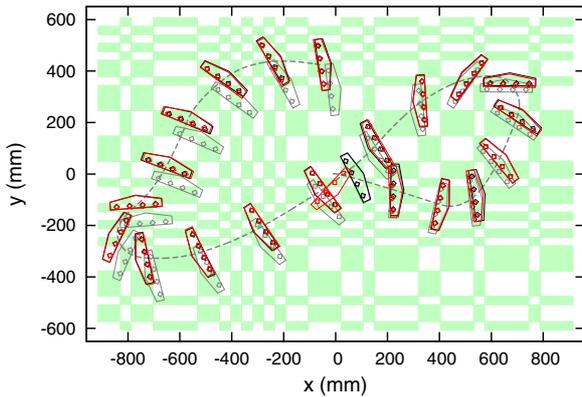
3.3 シミュレーションによる検証

以上を数値シミュレーションにより検証した。図 4 に示す結果を参照しつつ述べる。まず、センサは 4 個のマウスセンサを 50mm 間隔で直線的に配したものを想定した。これを図 (b) の破線に示すように 2 次元平面で移動させた (以下、真値という)。また、図 (b) には 1 秒ごとのセンサ組の位置を方位も含めて黒線で表した。がセンサ位置を表す。このときの、センサ組の速度、角速度を図 (a) 上部に示した (速度はセンサの座標系での値：センサ組の図でとがった方向がセンサ x 軸)。なお、車輪移動は仮定しておらず、横移動にあたる $v_y = dy/dt$ もゼロではない。また、PF による推定には、敢えて 2% の計測誤差を加えて入力した。この誤差を含んだ速度をただ積分すると (b) の灰色のセンサ組のように大きなずれが生じる。

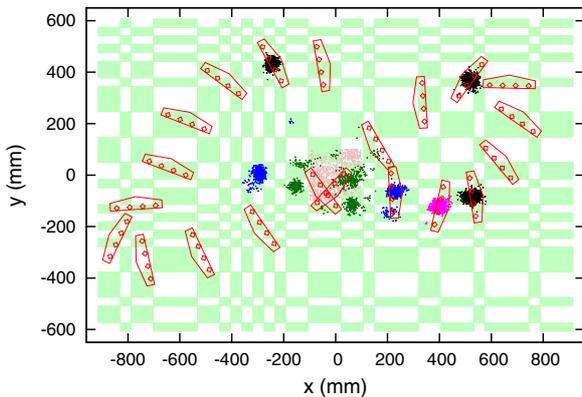
図 (b)(c) の背景に描かれた模様はセンサの検出するパターンである。 x, y 方向を、各々 (2000/47, 2000/61)mm に分割して M 系列で縞模様を作り、 x, y 方向の縞を xor 演算してパターンとした。2 方向の間隔を変えたことと、M 系列を用いたことで、模様の繰り返しを避け、曖昧さを低減した。真値経路



(a) Input for the estimation; (v_x, v_y, ω_z) and four sensor readings.



(b) Ideal trajectory (black outline with gray dashed line) and estimated (red outline).



(c) Distribution of particles (n=1000)

Fig. 4: Simulated results using particle filter for absolute measurement.

をたどった場合の、センサの計測出力を図 (a) 下部に示す (パターンの着色部を on とする)。この図 (a) のデータとパターンの参照のみで、真値を推定することがこの検証のゴールであり、(b) に赤線で示した推定結果は概ね一致が見られた。

PF における粒子は 1000 個とし、粒子の移動、評価、再サンプリングは 50ms ごとであり、その度に位置には $N(0,20)$ 、方位角には $N(0,(\pi/100)^2)$ の正規分布乱数を加えた。尤度のための点数は $[0, 100]$ とし、4 個の明暗比較において、不一致数 $\{0,1,2,3,4\}$ に対して点数変化を $\{+5, 0, -10, -25, -50\}$ とした。つまり、1 個の不一致までは許されるが 2 個以上は急速に減点され、0 点になればその粒子は複製されない。

PF の粒子分布の経過を図 (c) に示す。まず、前提に基づき、位置 $[-100, 100]$ 、角度 $[-\pi, \pi]$ の一様分布で初期粒子 (尤度 50 点) を生成した。ただし、センサ明暗が 2 個以上不一致な粒子

は最初から除外した。初期粒子は (c) にピンク色で示した。その後の粒子を、250ms (再サンプリングを 5 回)、1s (20 回)、2s (40 回)、3s、7s、19s の時点で、緑、青、紫、黒 (3s 以降) で示した。移動回数が少ないうちはパターンの局所的同一製による曖昧さにより複数の進行方向の候補が現れているが、3s 程度で真値に収束したことが確認できる。真値の移動経路を変えた場合も、収束時間は変化するが同じような傾向が現れた。

以上の結果によると、既知の明暗パターンをセンサで検出して、PF を用いることで絶対位置の補正を行うことが可能であることは確認できた。ただし、PF やパターンのパラメータは全て実験的に決めており、動作の確実さは断定できない。特に、粒子に加える乱数の分散を小さくすると、初期粒子群に適切な始点がない場合に迷走しやすくなる。一方で大きくすると真値の経路に引き込まれやすくなるが、観測時に乱数の広がりで見真値からの確率的な変位が大きくなる。その変位は短期的には PF を用いずに単純に積分した誤差より大きく、何らかの平滑化が必要と考えられる。今後の課題は (1) 球面への適用 (パターンの作成、データ化) (2) 初期状態を限定しない手法と追跡が外れた場合の対応 (3) 実機による検証である。

4 おわりに

本論文では、光学マウス用センサを利用した球体および平面の運動計測手法を報告した。本手法は比較的単純な手法による計算を用い、かつ複数のセンサの組み合わせによる計測結果を加重平均することで、誤差 1% の計測精度を得た。この手法の短期的な精度は有用であるが、角速度・速度から角度・位置を得るための数値積分による誤差が蓄積する。この問題を解決するため、センサの反射強度の強弱を測定する機能の活用を想定し、パーティクルフィルタの適用によって絶対位置の補正を試みた。平面におけるシミュレーションにより、手法が有効であることが確認できた。今後は実機による計測、球面での計測を行う。本手法は球体を移動に用いるロボットだけではなく、球面アクチュエータのフィードバックセンサとしても有用と考える。

最後に、本研究の一部はカーネギーメロン大学ロボット研究所 Microdynamic Systems Laboratory で動的安定ロボット (ballbot) プロジェクトの一部として行われ、著者熊谷は東北学院大学の在外研究制度の支援を得たことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) U.Nagarajan, M.Anish Mampetta, G.Kantor, R.Hollis, "State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot," *Proc. ICRA 2009*, pp 998-1003, 2009
- (2) M.Kumagai, T.Ochiai, "Development of a Robot Balanced on a Ball - First Report, Implementation of the Robot and Basic Control -," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.22 no.3, pp 348-355, 2010
- (3) M.Kumagai, R.L.Hollis, "Development of a Three-Dimensional Ball Rotation Sensing System using Optical Mouse Sensors," *Proc. ICRA 2011*, 2011 (発表予定)
- (4) K.M.Lee, D.Zhou, "A real-time optical sensor for simultaneous measurement of three-DOF motions," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol.9 issue.3, pp 499-507, 2004
- (5) D.Stein, E.R.Scheinerman, G.S.Chirikjian, "Mathematical Models of Binary Spherical-Motion Encoders," *IEEE/ASME trans. on Mechatronics*, vol.8 no.2, pp 234-244, 2003
- (6) 樋口知之, "粒子フィルタ," 電子情報通信学会誌, vol.88 no.12, pp 989-994, 2005
- (7) D.Fox, W.Burgard, F.Dellaert, and S.Thrun, "Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots," *Proc. AAAI'99*, 1999