

9軸IMUと深度センサを用いた手書き入力デバイスの開発 Development of Handwriting Input Device Using 9-DoF IMU and Depth Sensor

金山 知俊[†]
Chishun Kanayama

1 はじめに

MEMS(Micro Electro Mechanical System) 技術の発達により加速度センサ、ジャイロセンサで構成されるIMU(Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)は微小な半導体チップとして安価に供給されるようになり、スマートフォンをはじめとする様々な電子機器に搭載されている。本研究は加速度、ジャイロセンサに加えて地磁気を感知する方位センサを加えた9軸IMUを実際の毛筆に取り付け、深度センサを搭載したUSBカメラを併用することで、書道などの筆記動作をコンピュータに取り込む筆記デバイスの実現を目指している。筆者は以前に9軸IMUのみを用いた場合の筆記デバイス実現の検証を行っており、IMUの出力データから姿勢を計測できることを確認した[2]。その一方で、毛筆の位置はIMUから得られた加速度を2回積分することで求めるので、ドリフトによる誤差の蓄積を抑制することが困難である。そこで本報告では撮影画像の画素毎の距離を計測可能な深度カメラを併用し、IMUの位置姿勢を計測する方法を試みた。

2 位置姿勢の推定手法

2.1 座標系

今回使用した機器(M5Atom Matrix, Intel RealSense D415)と、機器の座標系(センサ座標系, カメラ座標系)を図1に示す。M5Atom Matrixには加速度、ジャイロセンサが搭載されており、方位センサを別途追加している。これにより9軸IMUを構成している。センサ座標系ではIMUの重心を原点とし、垂直上方向を z_s 軸、方位センサを取り付けた方向を y_s 軸、右方向を x_s 軸とする。 x_s, y_s, z_s 軸回りの回転は左回りを正方向とし、それぞれ ϕ_s, θ_s, ψ_s とする。なお、センサの出力は x_s, y_s 軸が逆方向になっているので、この2軸は正負を反転させる必要がある。カメラ座標系はカメラの正面方向を z_c 軸、カメラの下方向を y_c 軸、カメラ正面に向かって左方向を x_c 軸とする。また、絶対座標系(世界座標系)として鉛直上方向を Z 軸、IMUの初期 x_s, y_s 方向を X, Y 軸とする。軸回りの回転はそれぞれ ϕ, θ, ψ とする。なお、回転は $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ の順に適用するものとする。

IMUより得られるデータから ϕ, θ, ψ を求め、次式を適用することで姿勢を決定することができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_Z(\psi)R_Y(\theta)R_X(\phi) \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

なお、 $R_X R_Y R_Z$ は絶対座標系の各軸回りの回転行列である。また、IMUから得られるデータは事前に校正を済ませておくものとする。

2.2 加速度、方位センサによる姿勢の計算

加速度センサの出力データ a_x, a_y, a_z には重力加速度が含まれている。重力加速度は絶対座標系において鉛直

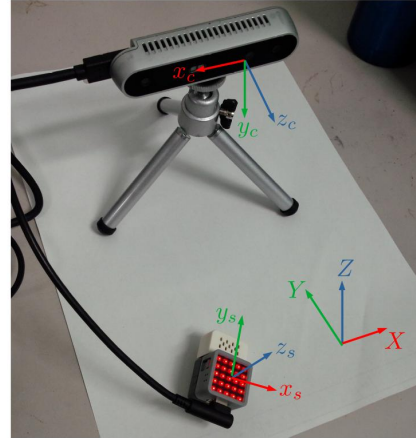


図1 機器と座標系

上方向になるので、絶対座標系における軸回りの回転角 ϕ_a, θ_a が式2で得られる[3]。

$$\phi_a = \arctan \frac{a_y}{a_z}, \quad \theta_a = \arctan \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad (2)$$

Z 軸回りの回転角は方位センサの出力から求める。初期状態の方位センサの出力の水平成分 m_x^0, m_y^0 から初期回転角を式3で求める。

$$\psi^0 = \arctan \frac{-m_x^0}{m_y^0} \quad (3)$$

姿勢が Z 軸回りに変化したときの回転角 ψ_m は式4で求める。なお、 m_x, m_y, m_z は方位センサの出力データである。

$$\psi_m = \arctan \frac{-m_x \cos \theta + m_y \sin \theta \sin \phi - m_z \sin \theta \cos \phi}{m_y \cos \phi + m_z \sin \phi} - \psi^0 \quad (4)$$

2.3 ジャイロセンサによる姿勢の計算

ジャイロセンサの出力データ $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ はセンサ座標系の軸周りの角速度である。これを式5で絶対座標系の軸周りの角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ に変換する。

$$\begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

[†] 南山大学理工学部ソフトウェア工学科

これを式6のように時間に対して積分することで姿勢データ ϕ_g, θ_g, ψ_g を求める。

$$\begin{pmatrix} \phi_g \\ \theta_g \\ \psi_g \end{pmatrix} = \int \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} dt \quad (6)$$

2.4 センサフュージョン

加速度、方位センサから得られた姿勢データはノイズが多く安定しない。また、ジャイロセンサから得られた姿勢データはドリフトにより誤差が蓄積する。複数のセンサの結果を統合することでこれらの問題を低減する手法はセンサフュージョンと呼ばれている。今回は簡易な手法として相補フィルタを用いた。

加速度、方位センサから得られた姿勢データ ϕ_a, θ_a, ψ_m と、ジャイロセンサから得られた姿勢データ ϕ_g, θ_g, ψ_g を式7で統合し、フィルタ適用後の姿勢データ ϕ_f, θ_f, ψ_f を求める。

$$\begin{pmatrix} \phi_f \\ \theta_f \\ \psi_f \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \phi_g \\ \theta_g \\ \psi_g \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} \phi_a \\ \theta_a \\ \psi_m \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで α は相補フィルタに与える係数である。

2.5 深度カメラによる位置計測

今回使用した深度カメラ Intel RealSense D415 は RGB カメラと深度カメラをともに搭載しており、カラー画像と深度画像を同時に取得することができる。今回は9軸 IMU として用いた M5Atom Matrix に搭載された LED を赤色に点灯させることでカラー画像中の IMU の領域を求め、その画素位置と、対応する深度画像の画素が示す距離によりカメラ座標系における IMU の位置を求める。

3 位置・姿勢の計測結果

本手法による位置姿勢の計測を確認するため、実験を行なった。姿勢推定については相補フィルタに加え、カルマンフィルタ、Madgwick フィルタ [4] による結果を比較した。なお、相補フィルタの係数 α は 0.9 を用いた。

3.1 姿勢計測結果

9軸 IMU による姿勢計測結果のグラフを図2,3に示す。図2は IMU を絶対座標系の軸ごとに回転させた場合の姿勢変化のグラフである。初期設定の問題で Z 軸回りの結果のみ Madgwick フィルタの値が 10 度ほどずれているがいずれの手法もほぼ同等であり、姿勢の変化を計測できていることが分かる。図3は IMU を静止させたときのグラフである。静止状態では Madgwick フィルタの変動が目立つが、パラメータの調整により同等の結果を得られる可能性はあると考える。

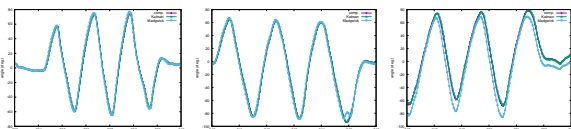


図2 姿勢計測結果 (姿勢変化がある場合)

3.2 位置計測結果

位置計測については IMU を深度カメラの視界内にかざし、LED の発光領域中心の画素の深度から求めている。カメラ手前 30cm から約 1m の範囲内では安定して

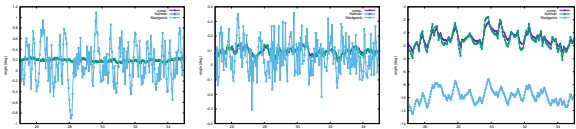


図3 姿勢計測結果 (静止状態の場合)

位置計測を行うことができた。IMU を固定した状態では位置の変動はほとんど発生しなかった。

1 辺 10cm の正方形をなぞるように IMU の位置を変化させたときのカメラ座標系における位置計測結果のグラフを図4に示す。手で持った状態で IMU は動かしているので細かい変動はあるが正方形をたどる軌跡を計測できていることが分かる。

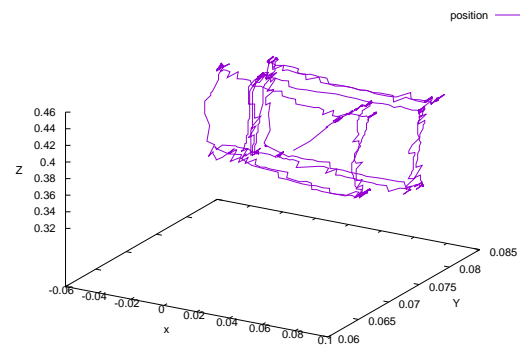


図4 位置計測結果

4 おわりに

本研究は筆に取り付けた9軸 IMU と深度カメラを用いて筆記中の動きを計測することで、実際の毛筆を用いて書道などの筆記動作をコンピュータに取り込む筆記デバイスの実現を目指している。以前の報告 [2] に引き続き、IMU から得られた加速度、ジャイロ、方位データを元に簡易な相補フィルタで姿勢を計測できることを確認した。また、IMU に搭載された LED の発光位置を深度カメラで撮影し、カメラ座標系における IMU の位置を計測できることを確認した。本報告の段階では IMU の位置と姿勢を計測した段階であり、実際に毛筆に取り付けた状態での計測の評価はこれから実施する予定である。また、本手法を筆者が別途作成している仮想書道システム [1] の入力デバイスとして用いることも検討している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JS19K12290 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 金山知俊, “穂先の広がりや分割を表現可能な仮想書道のための毛筆モデルの提案”, NICOGRAPH 2019, (2019/11/2).
- [2] 金山知俊, “9 軸 IMU を用いた筆記デバイスの開発”, 映像表現・芸術科学フォーラム 2021, (2021/3/8).
- [3] 布施孝志, 松本圭生, “モバイル機器搭載センサを統合した自己位置推定手法の開発”, 写真測量とリモートセンシング, 2015, 54 巻, 6 号, pp.290-299, (2016).
- [4] S. O.H. Madgwick, A. J.L. Harrison and R. Vaidyanathan, “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm”, Proc. Of the 2011 IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, pp. 1-7, (June 2011).