

仮想書道のための9軸IMUと深度センサを用いた手書き入力デバイスの試作

金山知俊

南山大学 理工学部 ソフトウェア工学科

概要

仮想書道システムに用いられる手書き入力デバイスを、9軸IMUと深度センサを用いて実際の毛筆の筆記動作を計測することで実現する手法を提案する。毛筆に取り付けた9軸IMUから得られる加速度、ジャイロ、方位の各センサの値から姿勢を計測し、同じく毛筆に取り付けたLEDの位置を深度センサで計測することで筆記中の筆の位置・姿勢を推定し、得られた毛筆の穂の位置と仮想空間内の紙面の交差から筆跡を生成する。この手法を用いた仮想書道の仮システムを試作し、実際の書道と同様に毛筆を用いた仮想書道の筆記が実現可能であることを確認した。

1 はじめに

MEMS(Micro Electro Mechanical System)技術の発達により、以前は大きく高価であった加速度センサやジャイロセンサは微小な半導体チップの形で安価かつ大量に供給されるようになり、デジタルカメラやスマートフォン等のさまざまな電子機器に搭載されるようになった。これらのセンサはIMU(Internal Measurement Unit: 慣性計測装置)ともよばれ、自動車の自動運転やドローンの制御などに欠かせない装置となっている。また、実世界の3次元情報を計算機に取り込む機器として撮影物体の距離を取得可能な深度センサ付きカメラも小型化、低廉化が進んでおり、自動運転、AR、VR用機器に用いられるようになっている。本研究はコンピュータ上で書道体験を可能とする仮想書道システムの実現を目指しており、その入力デバイスとして実際の毛筆を用いる手法を検討している。コンピュータで手書き入力を実現する代表的な機器にペンタブレットがある。ペンタブレットは筆記面の位置情報に加えて筆圧を取得できるものが多く、ペンの傾きや回転を取得可能な機器もあり、手書き文字入力やデジタルペインティングの入力デバイスとし

て広く普及している。ただし、ペンタブレットは一般に固いペン先を持ち、毛筆のように柔軟な穂先をもつ筆記具の書き味を再現することはできない。また、ペンタブレットの筆記面は平面であり、立体物への絵付け等の動作を取得することはできない。実際の毛筆の筆記動作をセンサを用いて取得することができれば、毛筆の書き味をもつ筆記デバイスが実現できると考えた。我々の提案手法では加速度センサ、ジャイロセンサに加えて地磁気を感知できる方位センサを加えた9軸IMUを搭載した小型マイコンを実際の毛筆に取り付け、その姿勢を計測する。また、小型マイコンに搭載されたLEDの発光位置を深度センサ搭載USBカメラで撮影し、毛筆の位置を計測する。計測された位置・姿勢をコンピュータに取り込み、仮想空間内に配置した筆記面と毛筆の穂の接触から筆跡を生成する。本報告では紙面と穂の交差の大きさに比例した太さで筆跡を生成するシンプルな手法で仮システムを試作し筆記テストを行なった。実際の書道と同様の筆跡を生成するには毛筆の穂の変形の再現や墨液の伝搬についても検討が必要であるが、仮システムの状態でも手書き入力デバイスとして実際の毛筆を用いた仮想書道の筆記が実現可能であることが確認できた。なお、本稿は

既発表の成果 [12, 13, 11] をまとめたものである。

2 関連研究

実際の筆や紙を用いずにコンピュータ上で筆記や絵画を制作するシステムは多数存在し、その多くは入力デバイスとしてペンタブレットを用いている。ペンタブレットはコンピュータの入力機器として広く普及しており、筆記デバイスとして十分な精度を持つが、1節で述べたようにそのペン先は固く、柔軟な穂を変形させながら筆記する毛筆の書き味は再現できない。

Baxter らが提案した、変形する3次元ブラシモデルによる描画システムでは多関節のリンクで構成されたハapticデバイスを使用している [1]。ハapticデバイスは力覚提示（フォースフィードバック）を可能とする入力機器であり、筆と紙面の接触や摩擦を擬似的に再現することができる。その一方で、筆記動作が可能なのはリンクの動作範囲に制限される、機器が高額で導入にコストがかかる等の問題がある。

Nelson らは3次元ブラシモデルによる東洋風ペインティングシステムを提案している [5]。彼らのシステムでは超音波センサとジャイロスコープを用いて毛筆の動きを取得しており、本研究と同様に実際の毛筆を使用している。ただし、彼らのシステムは大掛かりでコストがかかるものであった。

我々が以前に取り組んだ手法として、ARで用いられるマーカを取り付け、Webカメラで撮影することで毛筆の動きを取得する方法がある [8]。Webカメラは比較的安価に入手することができ、マーカも紙に印刷して作成できるので、他の手法と比較して低コストで容易に実現可能である。その一方で、得られる位置姿勢の精度に課題があり、手書き入力デバイスとしての利用は困難だと判断した。

IMUによる位置姿勢の計測手法は自己位置推定と呼ばれる技術の一つとして自動車の自動運転やドローンの制御等でも使用されている。布施らはモバイル機器に搭載されたセンサと画像を併用した自己位置推定手法を開発している [5]。この手法では加速度、ジャイロ、方位センサに加え、GPSと画像

データから得られた特徴点の追跡により自己位置を推定している。本研究ではIMUによる姿勢計測に関してこの布施らの手法を参考にしている。但し、仮想書道システムは屋内の狭い領域で使用することを想定しているので、GPSによる位置計測は使用できない。そこで、本研究では筆の位置を深度センサを用いて計測することにした。

3 位置姿勢の推定手法と筆跡生成

本節では9軸IMUと深度センサを用いた位置姿勢の推定手法を説明する。まずIMUによる姿勢の推定について、次に深度カメラによる位置の推定について説明する。最後に毛筆の穂先位置の計算と筆跡生成について説明する。

図1は本研究における位置・姿勢推定の流れである。

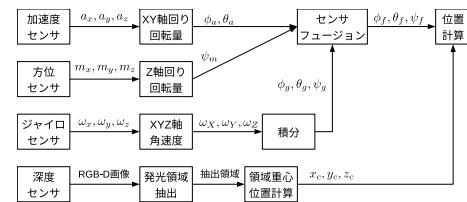


図1 位置・姿勢推定の流れ

3.1 座標系

本研究では毛筆に取り付けるIMU内蔵小型マイコンとしてM5 Atom Matrixを、深度センサ付きカメラとしてIntel RealSense D415を用いる(図2)。M5 Atom Matrixには加速度、ジャイロセンサが搭載されており、単体で6軸IMUとして利用できる。ここに方位センサを搭載した環境センサモジュールENV.II Hatを接続することで9軸IMUを構成している。また、M5 Atom Matrixは5×5個のRGB-LEDモジュールを搭載しており、それぞれのLEDは任意の色で発光させることができる。Intel RealSense D415はRGBカメラと深度センサを搭載しており、カラー画像の取得と同時にカメラからの距離を深度画像として計測することができる。

IMUと深度センサで得られるデータはそれぞれ

の機器固有の座標系に基づくので、毛筆の位置姿勢を管理するには各機器のデータを单一の座標系に基づく値に変換する必要がある。具体的には、IMU を基準とするセンサ座標系で得られる姿勢データと深度センサ付きカメラを基準とするカメラ座標系で得られる位置データを、筆記対象の紙面を基準とする絶対座標系(筆記面座標系)に変換することで、毛筆の位置姿勢を求める。

センサ座標系は IMU の重心を原点とし、LED を搭載した面を垂直上方向 z_s 軸、方位センサの接続方向を y_s 軸、右方向を x_s 軸とする。カメラ座標系は正面方向を z_c 軸、下方向を y_c 軸、向かって左方向を x_c 軸とする。絶対座標系(筆記面座標系)はカメラ正面から距離 d_c の机上位置を原点とし、鉛直上方向を Z 軸、右方向を X 軸、カメラ方向を Y 軸とする(図 3)。また、カメラ座標系の軸回りの回転はそれぞれ ϕ, θ, ψ とする。

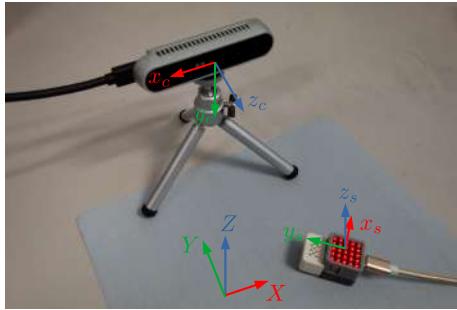


図 2 機器と座標系

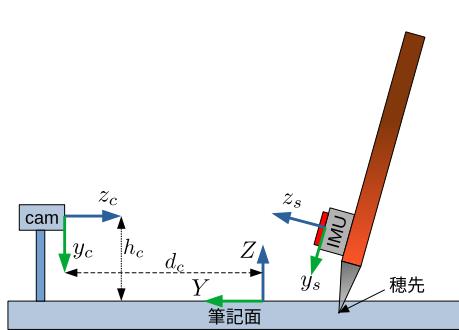


図 3 機器の配置と座標軸の方向

3.2 加速度、方位センサによる姿勢の計算

毛筆の姿勢変化は絶対座標系からセンサ座標系への座標軸の方向変化として求められる。加速度センサの出力 a_x, a_y, a_z には重力加速度が含まれているので、センサ座標系と絶対座標系の方向が一致するように IMU を配置すると $a_x = a_y = 0, a_z = -g$ となる。これを初期状態における IMU の姿勢とする。

a_x, a_y に重力加速度成分が含まれるように IMU の姿勢が変化したとき、センサ座標系の座標軸の方向変化を X, Y 軸回りの回転角 ϕ_a, θ_a として式 1 で求めることができる [14]。

$$\phi_a = \arctan \frac{a_y}{a_z}, \quad \theta_a = \arctan \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad (1)$$

重力方向は Z 軸と平行なので、 Z 軸回りの回転角 ψ_m は加速度センサで求めることはできず、方位センサの出力 m_x, m_y, m_z から式 2 で求める。

$$\psi_m = \arctan \frac{-m_x \cos \theta + m_y \sin \theta \sin \phi - m_z \sin \theta \cos \phi}{m_y \cos \phi + m_z \sin \phi} - \psi^0 \quad (2)$$

ここで ψ^0 は初期状態での Y 軸と北方向とのなす角度であり、式 3 で求める。

$$\psi^0 = \arctan \frac{-m_X^0}{m_Y^0} \quad (3)$$

3.3 ジャイロセンサによる姿勢の計算

ジャイロセンサはセンサ座標系の軸周り角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ を出力する。これを絶対座標系の軸周り角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ に式 4 で変換する。

$$\begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

これをさらに式 5 で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。

$$\begin{pmatrix} \phi_g \\ \theta_g \\ \psi_g \end{pmatrix} = \int \begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix} dt \quad (5)$$

3.4 センサフュージョン

加速度、方位センサによる姿勢データはノイズが多く、そのままでは安定した結果が得られない。一方、ジャイロセンサによる姿勢は数値積分を用いる

ことで誤差が蓄積し、真値からずれる。複数のセンサの値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ェュージョンと呼ばれている。今回は簡単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 6 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。

$$\begin{pmatrix} \phi_f \\ \theta_f \\ \psi_f \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \phi_g \\ \theta_g \\ \psi_g \end{pmatrix} + (1 - \alpha) \begin{pmatrix} \phi_a \\ \theta_a \\ \psi_m \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで α は相補フィルタに与える係数である。

3.5 深度センサによる位置計測

本報告で使用した深度センサ付きカメラ Intel RealSense D415 は RGB カメラと深度センサ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。本研究では M5 Atom Matrix に搭載された LED を赤色に点灯させ、深度カメラ Intel RealSense D415 で撮影したカラー画像の赤色領域を抽出し、その重心位置の画素に対応する深度画像の距離からカメラ座標系における IMU の位置 x_c, y_c, z_c を求める(図 4)。

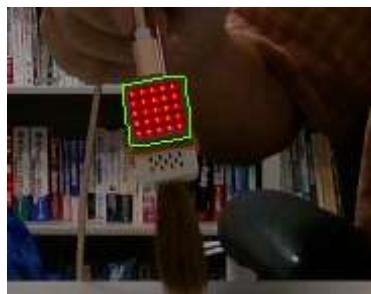


図 4 深度センサによる IMU の位置計測

3.6 穂先位置の計算と筆跡生成

IMU を取り付けた毛筆の穂先はセンサ座標系において位置 x_s, y_s, z_s で固定されているものとする。3.5 節まで IMU の位置・姿勢を推定できれば、絶対座標系(筆記面座標系)での穂先位置を式 7 で求

めることができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_Z(\psi_f)R_Y(\theta_f)R_X(\phi_f) \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -x_c \\ -z_c \\ -y_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ d_c \\ h_c \end{pmatrix} \quad (7)$$

$R_X R_Y R_Z$ は絶対座標系の各軸回りの回転行列、 d_c は原点から深度センサまでの距離、 h_c は紙面から深度センサ中心までの高さである。なお、回転は $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ の順に適用するものとする。

式 7 で求めた穂先位置が筆記面の下 ($Z < 0$) になったとき毛筆は紙面と接触し、筆跡が生成される(図 5)。本稿では式 8 で筆跡の太さを求める。

$$D = \min(1.0, -Z/l)D_0 \quad (8)$$

ここで D_0 は穂の最大太さ、 l は穂の長さである。

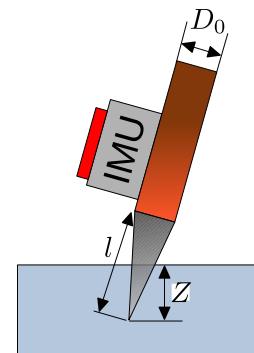


図 5 穂先位置の計算)

4 位置・姿勢の計測結果

3 節の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と Madgwick フィルタ [3] 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。

4.1 姿勢計測結果

9 軸 IMU による姿勢変化の計測結果を図 6,7 に示す。図 6 は IMU に回転させた場合の姿勢変化のグラフで、上から順に X 軸回り、Y 軸回り、Z 軸回りの姿勢変化である。初期設定時に Z 軸回りにこれが発生したことで、Madgwick フィルタの値に

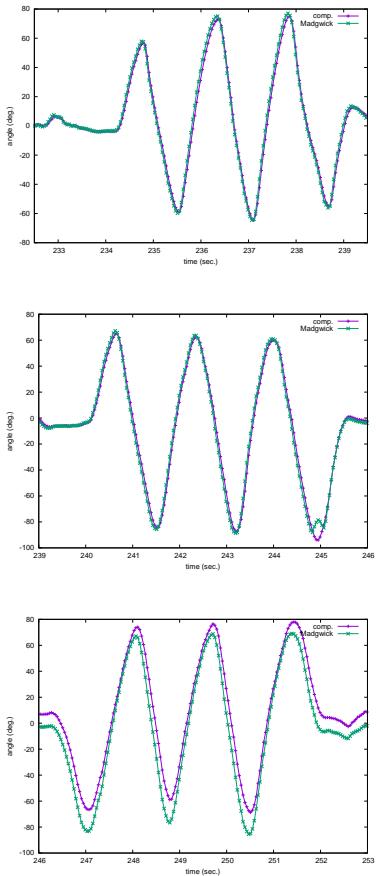


図 6 姿勢計測結果(姿勢変化がある場合:上から X 軸回り, Y 軸回り, Z 軸回り)

については Z 軸回りの結果のみ 10 度ほどずれているが、グラフの形はほぼ同等であり、どちらも姿勢の変化を計測できていることが分かる。図 7 は IMU を静止させたときのグラフで、こちらも上から順に X 軸回り, Y 軸回り, Z 軸回りの姿勢変化である。静止状態では相補フィルタより Madgwick フィルタの変動が大きいことが確認できる。

4.2 位置計測結果

IMU の位置計測は深度センサで行うので、LED の発光領域が撮影範囲から外れない範囲で IMU を深度センサにかざして動かした。深度センサからの距離が約 30cm から約 1m の範囲内では安定して位置計測を行うことができた。

筆記面に描いた 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位置計測結果の

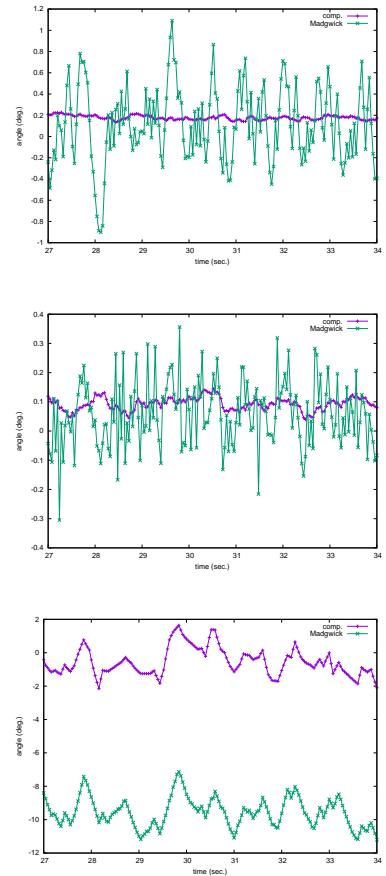


図 7 姿勢計測結果(静止状態の場合:上から X 軸回り, Y 軸回り, Z 軸回り)

グラフを図 8 に示す。IMU は手で持った状態で動かしているので細かい変動はあるが、ほぼ正方形をたどる軌跡を計測できていることが分かる。

なお、IMU を固定した状態では計測位置の変動はほとんど発生しなかったので、本報告では位置の計測結果にフィルタは適用していない。

5 筆跡の生成

本手法を実現する仮システムを作成し、テストを行なった。仮システムによる筆記中の様子を図 9 に、仮システムの構成を表 1 に示す。なお、本報告では位置姿勢計測を 25Hz で行なっている。

実際の毛筆に IMU を取り付けた状態で水書き用の半紙に筆記を行い、同時に仮システムを用いて筆跡を生成した。

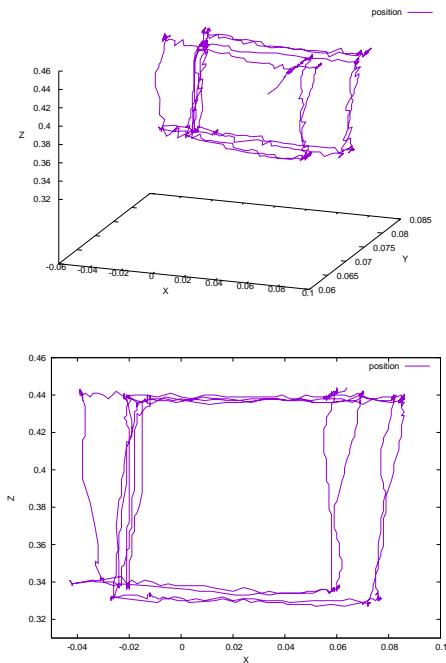


図8 位置計測結果(上:3次元グラフ, 下:XZ平面)



図9 仮システムによる筆記中の様子

文字「永」の筆記結果を図10に示す。上図は毛筆による実際の筆跡、下図は本手法による筆跡生成結果である。筆跡の太さに差異はあるが、ほぼ同形状の筆記が実現できていることが分かる。

「南山大学」の筆記結果を図11に示す。こちらは実際の筆跡と本手法の結果に差異が確認できる。本報告の仮システムでは毛筆をすばやく動かした場合、姿勢の計測結果が毛筆の穂先位置に反映されるまでに遅延が生じることがあり、その結果、穂先の紙面接触位置がずれてしまう。これが実際の筆跡と

表1 仮システムの構成

IMU	M5 Atom Matrix
深度センサ	Intel RealSense D415
PC	Sony VAIO S SVS13A1AJ
OS	Ubuntu 20.04 LTS
開発言語	Python 3.8
ライブラリ	RealSense SDK 2.0 [2] OpenCV 4.2 [7] Numpy [6] vedo [4]

本手法の結果に差異を生じさせた要因と考えられる。遅延の発生を抑制するようにシステムを改良することでこの問題は解決可能と考えている。

6 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手書き入力デバイスの実現を目指している。本稿ではIMUから得られた加速度、ジャイロ、方位データをもとに簡易な相補フィルタによるセンサフェュージョンで姿勢の変化を計測できることを確認した。また、IMUに搭載されたLEDを発光させ、深度センサ付きカメラで撮影することでIMUの位置を計測できることを確認した。それらを組み合わせてIMUを取り付けた毛筆の穂先位置を求め、紙面との接触から太さ変化のある筆跡が生成でき、実際の毛筆を手書き入力のデバイスとして使用できることを確認した。今後は姿勢計測の遅延解消、現在有線ケーブルで接続しているIMUの無線化、LEDの配置変更等でより扱いやすい手書き入力デバイスとすることを検討している。

本報告の仮システムは毛筆の穂先位置と紙面との交差から式8で筆跡の太さを決定しているが、実際の毛筆は紙面に接触した穂が変形し、穂に含まれる墨が紙面に伝搬することで筆跡が生成される。実際の書道に近い筆跡を得るためににはこの穂の変形と墨の伝搬を実装する必要があり、我々が以前に取り組



図 10 筆跡「永」(上: 実際の毛筆による筆跡, 下: 本システムによる筆跡)



図 11 筆跡「南山大学」(上: 実際の毛筆による筆跡, 下: 本システムによる筆跡)

んでいる仮想書道のための毛筆モデル [9] やかすれ表現を可能とする筆跡生成手法 [10] 等を改良し組み合わせることで実際の書道に近い仮想書道システムの実現を目指す。

謝辞

故青山幹雄教授には教育・研究活動に関して多くのご助言を賜りました。ここに感謝の意を表すとともに、慎んでご冥福をお祈りいたします。

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] B. Baxter, V. Scheib, M. C. Lin, and D. Manocha. DAB: Interactive Haptic Paint-

ing with 3D Virtual Brushes. *ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 461–468, 2001.

- [2] Intel. Realsense sdk 2.0. <https://www.intelrealsense.com/sdk-2/>. 参照: 2022-3-21.
- [3] S. O.H. Madgwick, A. J.L. Harrison, and R. Vaidyanathan. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In *Proc. Of the 2011 IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, pp. 1–7, 2011.
- [4] M. et al. Musy. vedo, a python module for scientific analysis and visualization of 3d objects and point clouds. <https://vedo.org>.

- emb1.es/. 参照: 2022-3-21.
- [5] S. H. Chu Nelson and T. Chiew-Lan. Real-Time Painting with an Expressive Virtual Chinese Brush. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 24, No. 5, pp. 76–85, 2004.
 - [6] NumPy. Numpy. <https://numpy.org/>. 参照: 2022-3-21.
 - [7] OpenCV team. Opencv. <https://opencv.org/>. 参照: 2022-3-21.
 - [8] 金山知俊. マーカ認識とペンタブレット入力による運筆測定を利用した仮想書道システム. *NICOGRAPH 2011* 秋季大会, 2011/9/5.
 - [9] 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. In *NICOGRAPH 2019*, 2019/11/2.
 - [10] 金山知俊. 墨量の減少によるかすれ表現を可能とする仮想書道のための筆跡生成手法. FIT2020 第 19 回 情報科学技術フォーラム, 2020/9/1.
 - [11] 金山知俊. 仮想書道のための 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. In *NICOGRAPH 2021*, 2021/11/7.
 - [12] 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.
 - [13] 金山知俊. 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. FIT2021 第 20 回情報科学技術フォーラム, 2021/8/27.
 - [14] 松本圭生布施孝志. 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, Vol. 54, No. 6, pp. 290–299, 2015.