

並進型 EMR スタイラスシステムによる 3D 入力範囲拡張と遭遇型触覚提示

垣見 大輝^{1,a)} 伊藤 雅充² 小堀 武² 朝倉 僚² 高嶋 和毅^{1,b)}

概要:

XR 環境においては、ペン型デバイスを用いた精密な 3 次元入力が求められる場面が多い。しかし既存の XR 向けペンデバイスでは、計測範囲は広い一方で十分な精度が得られない場合があり、また 3 次元空間内でペンを用いた筆記作業を行う際に、所望の位置に筆記面やその触覚を提示することが難しいという課題がある。本研究では、これらの課題を解決するため、並進型 EMR スタイラスシステムを提案する。EMR (Electro-Magnetic Resonance) スタイラスは高精度な 3 次元入力が可能である一方、デジタイザ (センサ) 平面からスタイラスが離れるにつれて磁場の減衰により計測精度が低下するという制約を有する。そこで本研究では、デジタイザをリニアアクチュエータ上に設置し、スタイラスの位置に応じてデジタイザ自体を自動的に並進させる機構を導入することで、スタイラスの高精度計測範囲を拡張する。さらに、本機構を応用することで、3 次元空間内の任意の位置にデジタイザを固定することが可能となり、スタイラスに対して高精度な筆記面および遭遇型触覚面を動的に提示することができる。本発表では、提案システムを医療用 3 次元臓器モデルの断層可視化アプリケーションに実装し、100 mm × 100 mm × 100 mm 程度のボリュームデータに対する連続的な 3 次元操作と、任意の位置におけるアノテーション用筆記面の提供を実現した事例について報告する。

1. はじめに

近年、医療トレーニングや工業デザインの分野において、XR (VR/AR) 環境での精密な 3 次元操作が求められている。特に、EMR (Electro-Magnetic Resonance) 技術 [10] を用いたスタイラスは、遮蔽に強く、サブミリメートルの精度で筆圧や傾きを取得できることから、歯科教育システム [2] などでの活用が進んでいる。EMR 方式は、光学式トラッキングに比べて堅牢性が高く、小規模の計測環境において高精細な作業に適した入力手法といえる。

しかし、既存の EMR 方式を 3 次元インタラクションに応用するには、原理的な制約が課題となる。最大の問題は、磁場の減衰により高精度な計測可能距離がデジタイザ表面から約 30 mm 程度に制限される点である [2]。これにより、深部への刺入や奥行きを伴う連続的な操作において精度が保証できない。また、本来平面入力に特化しているため、3 次元空間内の任意の位置で物理的な反力を伴う書き心地 (触覚) を提供することが困難である。既存研究では光学

センサの可動化による範囲拡張 [1] などが提案されているが、EMR 特有の高精度入力と広範囲な奥行き操作、そして触覚提示を同時に満たす手法は確立されていない。

そこで本研究では、デジタイザ自体をリニアアクチュエータで奥行き方向へ動的に追従させる並進型 EMR スタイラスシステムを提案する。ユーザのスタイラス操作に合わせてデジタイザ位置を高速に制御することで、スタイラスを常に高精度に計測可能な範囲内に維持し、従来の EMR スタイラスの計測範囲を超える 3D 入力範囲を実現する。同時に、この並進機構を応用し、空間内の任意の位置に物理デジタイザを動的に配置することで、遭遇型触覚提示 (Encountered-type Haptics) [4] や筆記に適した安定的な面を提供する。

2. デザイン案

2.1 目的とコンセプト

(1) 人間運動特性に基づいた計測空間の動的拡張: 単に物理的な計測限界 (高さ約 35 mm) を超えるだけでなく、人間の手指による精密な入力動作にアクチュエータが追従することで、計測範囲を動的かつ滑らかに拡張する。これにより、ユーザはセンサの物理的な狭さを意識することなく、解剖モデルや機械部品の実寸サイズ

¹ 芝浦工業大学 システム理工学部

² 株式会社ワコム EMR テクノロジー Wacom Co., Ltd. EMR Technology

a) bp22043@shibaura-it.ac.jp

b) takashim@shibaura-it.ac.jp

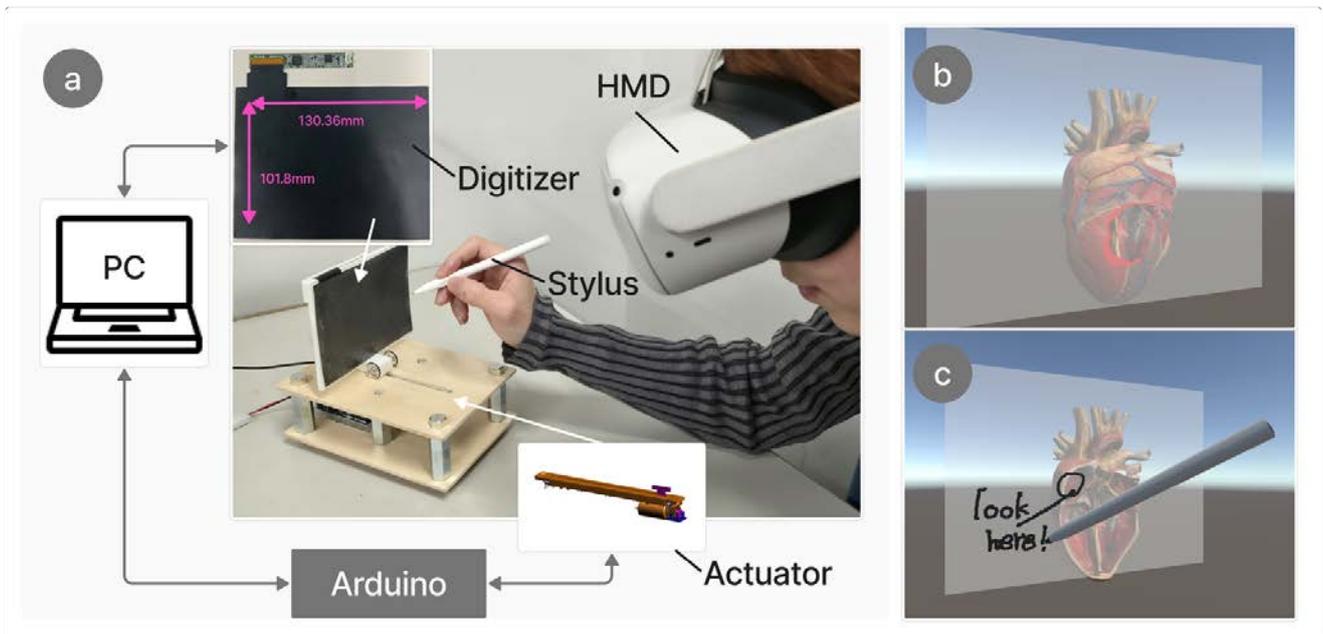


図 1 (a) システム概要図 (b) 3D ボリュームデータを奥行き方向へ断面スライス (c) 任意のスライス面を筆記面としてアノテーション入力

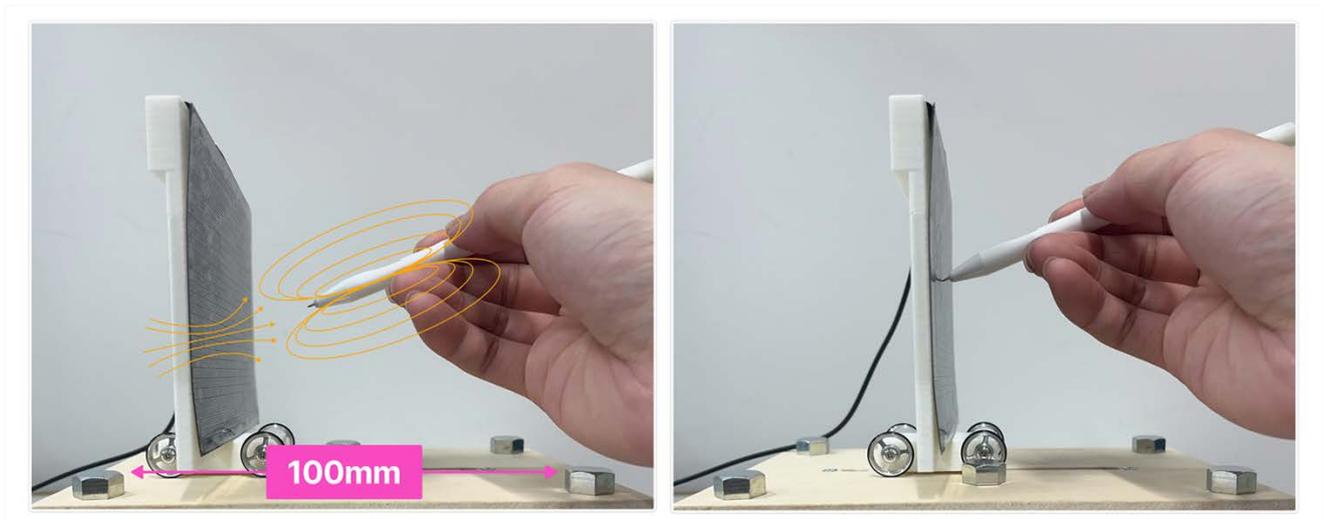


図 2 システム概要図：(左) リニアアクチュエータ（1軸）によりデジタイザをスタイラスの距離に応じて前後させ、常に高精度な計測範囲を維持する。(右) デジタイザを任意の奥行き位置で固定し、動的に触覚面および高精度筆記面を提供する。

(100 mm) の空間全域で連続的な高精度操作を行うことを可能にする。

- (2) 探索と筆記のシームレスなモード転換: スタイラスのボタン操作（押下中は追従による範囲拡張、離すと位置固定）をトリガーとして、3次元空間を自在に移動する探索モードと、物理的な平面に対して安定した記述を行う筆記モードを滑らかに切り替える。これにより、ユーザは断面を探す動作からその場書き込む動作へ、直感的に移行できる。

この実現のため、本システムではデジタイザを固定する

のではなく、ユーザの正面において奥行き方向に配置するデザインを採用した。

2.2 安全なシステム設計

提案システムは、EMR デジタイザモジュール、それを駆動するリニアアクチュエータ、および制御システムから成る。デジタイザはユーザに対し垂直に保持され、スタイラス動作に追従して前後移動する。

本システムのようにユーザ近傍で物体が高速移動する機構では、安全確保が最重要となる。特にデジタイザがユー

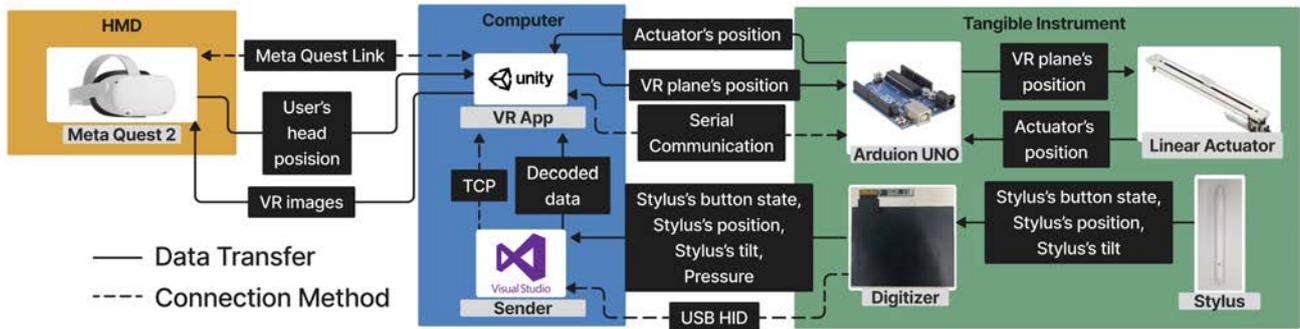


図 3 システム構成

ザへ向かう際の挟み込みリスクに対し、以下の対策を講じている。

- 物理的な可動域制限: ストローク端に制限を設け、暴走時の破損や過剰移動を防止する。
- 低トルク駆動: 手で容易に押し返せる程度のトルクを持つモーターフェーダを選定し、接触時の怪我を防ぐ。

3. 実装

3.1 ハードウェア構成

提案システムの構成を図 3 に示す。システムの中核となるリニアアクチュエータには、Alps Alpine 社製のモーターフェーダ (RSA0N11M9A0K, ストローク 100 mm) を採用した。このフェーダの操作ノブ部分に、Wacom 社製の EMR デジタイザモジュール (SUEE-06S05MU-00X) を 3D プリント製のアタッチメントを介して垂直に固定した。本モジュールは重量約 8g, 外形寸法 130.36 mm × 101.8 mm と小型軽量であり、122.36 mm × 90.58 mm の有効計測範囲 (読取可能高さ 35 mm) を有する。

モータの制御には Arduino Uno を用い、モータドライバ (TB6612FNG) を介して DC モータを駆動する。デジタイザの位置 (フェーダの現在値) は、フェーダ内蔵のポテンショメータの値を Arduino のアナログピンで読み取ることで取得する。

3.2 ソフトウェアおよび通信アーキテクチャ

全体制御および VR コンテンツの描画は Unity で行う。各デバイス間の通信は以下のように構成されている。

- スタイラス計測: デジタイザ制御ボードと PC は USB (HID クラス) で接続し、スタイラスの座標データ ($x, y, z, xTilt, yTilt$) および筆圧などを 480 Hz で受信する。
- アクチュエータ制御: Unity から Arduino へはシリアル通信 (Baud Rate 115200 bps) を用い、目標位置 (0~1023 の整数値) または制御コマンドを送信する。

3.3 追従アルゴリズムとキャリブレーション

現在のプロトタイプでは、スタイラス先端とデジタイザ間の距離 z を監視し、閾値を超えた場合にデジタイザを移動させることで、常にスタイラスを計測可能なスイートスポットに収める追従制御を実装している。

また、本システムで使用したモーターフェーダは本来オーディオ用であり、内蔵ポテンショメータのリニアリティ精度には限界がある。予備実験において、ADC 値を単純に距離へ線形変換した場合、実際の物理位置との間に誤差が生じることが確認された。EMR スタイラス自体はサブミリメートルの精度を持つため、駆動系の誤差は致命的となる。そこで本実装では、ルックアップテーブル (LUT) を用いたキャリブレーションを実施した。事前にハイトゲージを用いてデジタイザを精密に移動させて ADC 値を計測し、テーブルを作成した。実行時にはこのテーブルを参照して補正を行うことで、安価なアクチュエータを用いながらもシステム全体として高い位置精度を実現している。

4. アプリケーションシナリオ：人体解剖モデルの断層可視化と物理的アノテーション面提示

提案システムの有用性を検証するため、二種類のアプリケーションシナリオを実装した。一つは医療教育を想定した心臓解剖モデルの断層可視化、もう一つは基礎的なインタラクション検証としての任意平面への遭遇型接触である。

4.1 滑らかな深部スライス探索

本アプリケーションでは、ユーザの手元に高精細な 3 次元心臓モデルが表示される。ユーザはデジタイザをスライサーのように見立て、手前から奥へと動かすことで、心臓の断面をリアルタイムに切り出して観察できる (スライシング操作 [3], [6])。成人の心臓は約 10 cm 程度の厚みを持つが、本システムは約 10 cm の物理的ストロークを持つため、倍率操作やカメラ移動をすることなく、一度の連続した動作で心臓の全深さをスキャンすることが可能である。これにより、血管の走行や心房・心室の繋がりといった 3

二次元的構造を直感的に把握できる。

4.2 触覚フィードバックを伴う精密な筆記アノテーション

観察中に気になった断面（例えば弁の異常箇所など）でスタイラスのボタンを離すと、デジタイザはその断面位置で停止・保持される。ユーザは、空中に浮かんだ映像に対してではなく、実在するデジタイザの硬い表面にペン先を押し付けながら、メモやマーキングを書き込むことができる。従来の空中描画（Mid-air drawing）では、支えがないため手振れが生じやすく、細かい文字を書くことは困難であった。これに対し、Gomi らが提案する UbiSurface[8]でも示されているように、空中で物理的な接触面を提供することは入力安定化に極めて有効である。本システムでは、物理的な書き心地（触覚フィードバック）が得られるため、実際の紙やタブレットに書くのと同等の精度で、正確な医療メモを残すことが可能となる。

4.3 任意平面への遭遇型接触

本システムでは、デジタイザ自体が動的に位置を変化する特性を活かし、VR 空間内の任意の位置に配置された仮想物体に対して、物理的な接触感を提示する機能を実装した。

遭遇型接触を実現するデバイスとしては、能動駆動ペンタブレット型デバイス [4] や、先端を伸縮させることで仮想物体への接触感を提示する ExtickTouch[7] が提案されている。これに対し本研究では、軽量のセットアップでスタイラス側ではなく計測面そのものを移動させることで、仮想面と一致した位置に広い接触面を提示する点に特徴がある。

システムは VR 空間内で設定された壁の位置情報を保持しており、スタイラスがその面に接近すると、リニアアクチュエータを駆動して物理デジタイザを仮想面と同じ奥行き位置 (z) へ移動・待機させる。ユーザがそのままスタイラスを仮想面に接触させることで、振動フィードバック等の擬似的な触覚とは異なる、デジタイザ面による明確な接触感が得られる。

5. 今後の展望

本システムの更なる発展に向け、ハードウェアおよび入力インタラクション、アプリケーションの両面から改良を進める。

第一に、デジタイザ駆動機構の高自由度化である。現在は 1 軸のリニアアクチュエータを用いて奥行き方向の移動を行っているが、これを多軸化することで、より複雑な曲面を持つ対象物のスライジングや、曲面形状に沿った触覚提示を可能とする機構の実現を目指す。

第二に、入力デバイスである EMR スタイラスの機能拡張である。磁気計測による 6 自由度入力手法として IM6D[5]

が提案されているが、専用マーカ等が必要とする点で EMR の利点とはトレードオフの関係にある。そこで本研究では、EMR スタイラス内部に IMU を統合し、*Yaw, Roll, Pitch* を含む姿勢推定を実現することで、医療用ツール操作の忠実な再現を目指す。

また、デジタイザの小型軽量な特性を活かし、UltraBoard[9] に代表されるウェアラブル触覚インタフェースへの応用や、医療教育・トレーニング用途における実用的な手術シミュレーションシステムへの発展を目指す。

参考文献

- [1] Pascal Chiu, et al.: Pursuit Sensing: Extending Hand Tracking Space in Mobile VR Applications, Proc. ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '19), Article No. 3, pp. 1–10, 2019.
- [2] Yuhui Wang et al.: VirtuEleDent: XR Tooth-Cutting Training System, Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 749–758, 2025.
- [3] Ken Hinckley, Randy Pausch, John C. Goble, and Neal F. Kassell: Passive real-world interface props for neurosurgical visualization, Proc. ACM CHI '94, pp. 452–458, 1994.
- [4] Motoji Takagi, Jumpei Arata, Akihito Sano, and Hideo Fujimoto: A New Encounter Type Haptic Device with an Actively Driven Pen-Tablet LCD Panel, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 2453–2458, 2011.
- [5] J. Huang, T. Mori, K. Takashima, S. Hashi, and Y. Kitamura: IM6D: Magnetic tracking system with 6-DOF passive markers for dexterous 3D interaction and motion, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 34, No. 6, pp. 1–10, 2015.
- [6] Roberto A. Montano-Murillo, et al.: Slicing-Volume: Hybrid 3D/2D Multi-target Selection Technique for Dense Virtual Environments, Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 53–62, 2020.
- [7] 片岡 敬志郎, 山本 拓也, 大槻 麻衣, 柴田 史久, 木村 朝子: ExtickTouch: 仮想物体への接触感を提示する先端伸縮型デバイスの開発, WISS 2019 予稿集, No. 14, pp. 1–6, 2019.
- [8] Ryota Gomi, Kazuki Takashima, Yuki Onishi, Kazuyuki Fujita, and Yoshifumi Kitamura: UbiSurface: A Robotic Touch Surface for Supporting Mid-air Planar Interactions in Room-Scale VR, Proc. ACM on Human-Computer Interaction (PACMHCI), Vol. 7, No. ISS, Article No. 443, pp. 1–22, 2023.
- [9] Changhyeon Park, Yubin Lee, and Sang Ho Yoon: UltraBoard: Always-available Wearable Ultrasonic Mid-air Haptic Interface for Responsive and Robust VR Inputs, Proc. ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), Vol. 9, No. 2, Article No. 44, pp. 1–31, 2025.
- [10] Wacom Co., Ltd.: EMR Pen Technology, http://www.wacom.jp/jp/customercare/download/catalogue/pdf/0507_EMR_Pen_Technology_E.pdf (accessed Dec. 26, 2024).