

# 超低電力な指輪型無線マウス

高橋 亮<sup>1,a)</sup> Li Yifan<sup>1</sup> 福本雅朗<sup>2</sup> Mohamed Kari<sup>3</sup> 山本 英昂<sup>1</sup> 野田 聡人<sup>4</sup> 石田 繁巳<sup>5</sup>  
横田 知之<sup>1</sup> 染谷 隆夫<sup>1</sup> 川原 圭博<sup>1</sup>

**概要：**指輪型無線マウスは、親指の微小な動きでさえ高い精度で検知できるウェアラブル入力インタフェースである。しかし、小さな指輪に搭載できるような 27mAh 以下の小型バッテリーでは、指輪の連続使用時間がわずか 1~10 時間に制限される。これは、低消費電力な無線通信モジュール（例、BLE）でさえ数十 mA を消費するため、連続使用が前提の指輪型マウスのデータをリアルタイムで送信すると小型電池をすぐに使い切るからである。このような指輪マウスの短い動作制限では、頻繁な充電が必要となり、ユーザーのマウス使用を頻繁に中断させる。本論文では、超低電力な指輪-リストバンド間無線通信を利用して、指輪型無線マウスを長時間連続使用できる、picoRing mouse を紹介する。picoRing mouse は、セミパッシブなインダクティブテレメトリと呼ばれるコイルベースのインピーダンスセンシングを用いて、リストバンド型コイルが近くの指輪型コイルのユニークな周波数応答を、コイル間の磁気結合を介してセンシングする。指輪型コイルは、ユーザの指輪内のマウスへの入力をユニークな周波数応答に変換し、最大 449  $\mu$ W のセンシングシステムを通じてデータを送る。ゆえに、picoRing mouse の連続使用は、27mAh バッテリーの 1 回の充電で約 600 時間（1 日 8 時間使う場合）から 1000 時間（1 日 4 時間使う場合）を達成できる上に、公共の場で、親指を使った目立たないマウス入力ができる。

**キーワード：**指輪、リストバンド、インダクティブテレメトリ、超低電力、マウス、コイル、ウェアラブル

## 1. はじめに

コンピュータマウスは、コンピュータとシンプルで迅速なポイント操作を行うための基本的なツールである。マウス機能をリストバンド、眼鏡、指輪（例：Apple Watch、Galaxy Ring）といったウェアラブルデバイスへ内蔵することは、ウェアラブルコンピューティングにとっての常時利用可能な基本的なインタラクションが期待できる。特に、指に装着するワイヤレスリング型の入力デバイスは、リストバンドや眼鏡とは異なり、微細でプライバシーが保たれた親指と人差し指の入力を確実に検出する [5, 9, 15]。しかし、小さなリング構造の物理的制約により、数十 mAh の小型バッテリーを装備する必要があり、数十 mW クラスの電力を消費するワイヤレス通信モジュールの連続動作が課題となる。例えば、従来のワイヤレスリングは、Bluetooth Low Energy (BLE) を用いた連続ワイヤレス通信を 1~10 時間未満でサポートしており、リングの通信使用を断続的

なデータ送信に制限している [5, 12, 22]。このような動作は、リング周辺の定期的なヘルスケアモニタリング（例：Oura Ring、Galaxy Ring）には適しているが、他のウェアラブル（例：スマートウォッチ、HMD）との長期的でリアルタイムの通信を必要とするリングベースの入力インターフェースには適していない。

本論文では、リストバンドコイルから指輪コイル間へのインピーダンスセンシングを用いた超低消費電力のリング型ワイヤレスマウスである picoRing mouse を紹介する（図 1）。picoRing mouse は、パッシブインダクティブテレメトリ（PIT）と呼ばれるコイルベースの感度の高いインピーダンスセンシングに着想を得ている [13, 15]。BLE や RF バックスキップのような長距離の電磁通信とは異なり、PIT はリングコイルとリストバンドコイルのペア間で短距離だが超低電力の磁界結合を構築する。リングコイルは、リストバンドコイルから生成される磁界を負荷変調することでセンサ情報をリストバンドコイルに送信するため、電力を大量に消費する通信モジュールを用いたアクティブな信号送信は必要ない。PIT とリングベースのマウスモジュールを組み合わせることで、picoRing mouse は、最大消費電力が約 449  $\mu$ W の超低電力の指輪型マウスを実

<sup>1</sup> 東京大学/The University of Tokyo

<sup>2</sup> マイクロソフト/Microsoft

<sup>3</sup> プリンストン大学/Princeton University

<sup>4</sup> 高知工科大学/Kochi University of Technology

<sup>5</sup> 公立はこだて未来大学/Future University Hakodate

<sup>a)</sup> takahashi@akg.t.u-tokyo.ac.jp



図 1 picoRing mouse の概要 (https://youtu.be/07E\_RQ8KSLQ)。

表 1 ワイヤレスな指輪型入力デバイスの性能比較。

	構成要素	無線技術	指輪の最大消費電力 (mW)	入力インタフェースの種類	通信チャネルの安定性
ElectroRing [4]	Ring	BLE	220	Finger press	✓
Ring-a-Pose [20]	Ring	BLE	148	Finger pose	✓
OmniRing [22]	1-5 rings	BLE	40/ring	Finger pose	✓
IRIS [5]	Ring	BLE	26	Vision	✓
MouseRing [12]	Ring	BLE	-10	Finger slide	✓
FingeRing [2]	5 rings & wristband	人体通信	1.8/ring	Finger tap	△ 電磁ノイズに弱い
Nenya [1]	Ring & wristband	静磁場	0	Finger scroll	× 磁気ノイズに弱い
AuraRing [10]	Ring & wristband	磁気結合	2.3	Finger pose	✓
TelemetRing [13]	5 rings & wristband	PIT	0/ring	Finger tap	✓
picoRing [15]	Ring & wristband	PIT	0	Finger press or scroll	✓
picoRing mouse [6]	Ring & wristband	Semi-PIT	0.45	Finger press and scroll	✓

現し (表 1)、27 mAh の小型リポバッテリー 1 回の充電で約 7 日 (1 日 24 時間使用) から 44 日 (1 日 4 時間使用) の連続動作を可能にする [6, 7]。

## 2. 設計と実装

### 2.1 システム概要

picoRing mouse は、2 つの主要なコンポーネントから構成されている (図 2a)：1) 親指と人差し指の入力に基づいて周波数応答を変化させるマウスモジュールを備えたリングコイル、および 2) リングの共振によって生成される周波数応答のユニークなピークを検出するリストバンドコイルである。picoRing mouse の動作原理は以下の通りである。まず、リストバンドコイルが弱い磁界を生成し、近くのリングコイルと結合する。ユーザーがリングに取り付けられたマウスモジュールをスクロールまたは押すと、マウスモジュールに接続された MCU が磁石またはタクトイルスイッチを介してスクロールまたは押下を検出し、電圧制御可変コンデンサを通じてマウス入力をユニークな周波数応答 (すなわち、リングの共振周波数の変化) に変換する (図 2b)。磁界結合のおかげで、感度の高いインピーダンス

測定モジュールに接続されたリストバンドコイルが周波数応答を取得する。リングの周波数応答は、リストバンドのインピーダンスの周波数特性において、リングの共振周波数で鋭い周波数ピークとして現れるため、リストバンドコイルはマウス入力 (すなわち、押下および 2D スクロール) をユニークなピーク出力として認識することができる。

### 2.2 Semi-PIT

picoRing mouse は、半受動的な方法で PIT システムを拡張している。従来の PIT は、タクトイルスイッチで構成される全受動変調回路を用いてリングからリストバンドへの誘導フィールドを変更する全受動設計が特徴であった。それに対して、picoRing mouse は、バッテリーアシストの電圧制御可変コンデンサで構成される低電力のデジタル変調回路を用いた半受動変調アプローチを採用している。半受動変調アプローチは、アクティブな信号送信回路を使用しないことに注意が必要である。全受動変調とは異なり、半受動変調はセンサー情報をデジタル信号として送信することができる。具体的には、picoRing mouse は、電圧制御可変コンデンサに基づいてマルチモーダルなマウス入力を

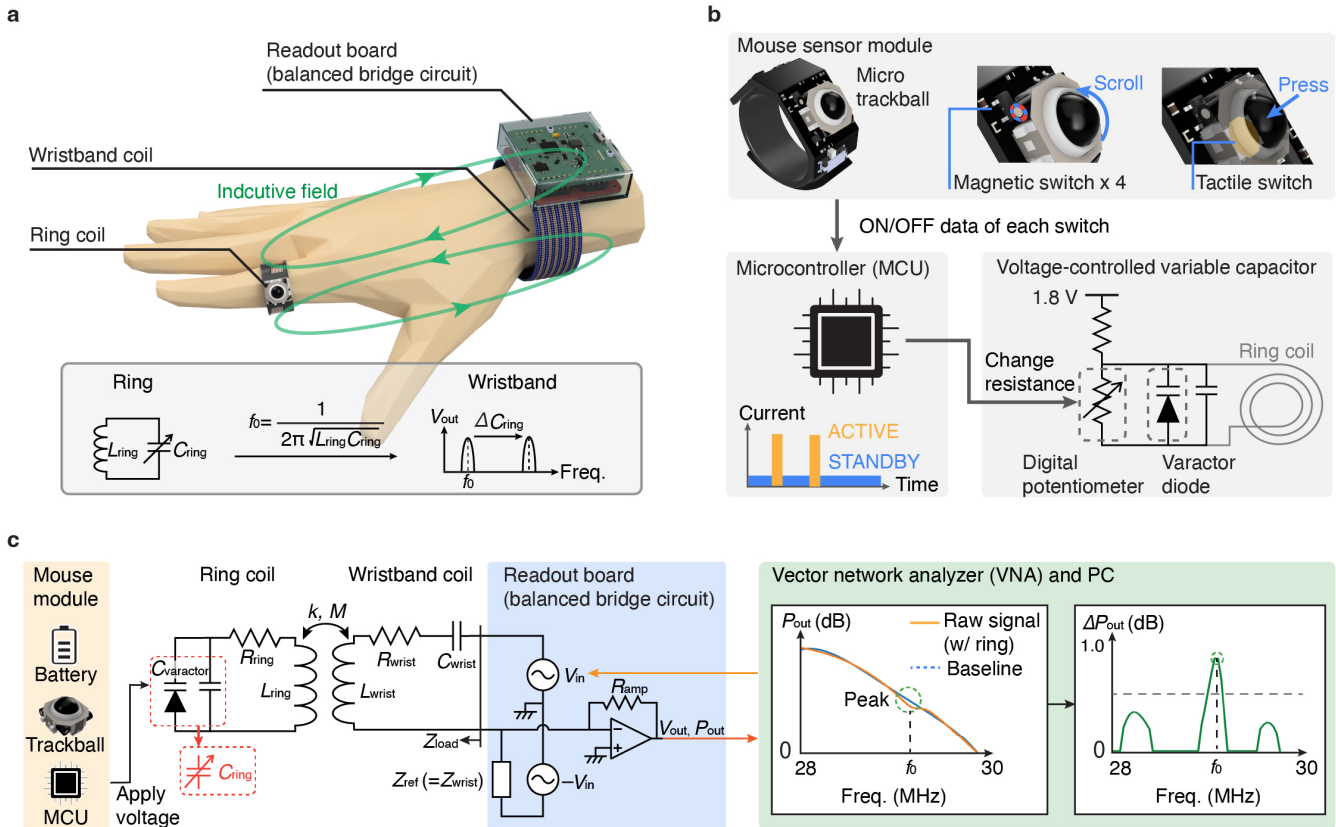


図 2 picoRing mouse のシステム図。

対応する周波数シフトにエンコードする単純な周波数シフトキーイングを使用している。

## 2.3 リストバンド

リストバンド型コイルは、3D プリントされた柔軟なリストバンドに取り付けられた 6 巻の柔軟な共振コイルと、モバイルベクトルネットワークアナライザ (NanoVNA-H4) に接続されたリーダ基板で構成されている。指輪型コイル内蔵のマウス状態を認識するために、リストバンド型コイルは入力電力 0.2mW、周波数帯域幅 4kHz、サンプリング数 101、サンプリングレート 20fps で、27.0MHz から 28.5MHz の周波数スイープ信号を監視することにより、指輪の周波数ピーク ( $f_0$ ) を検出する。TPU フィラメントを用いた FDM 3D プリントで作成されたリストバンドは、中型の成人の手にフィットするように、幅 6.2cm、高さ 5.2cm、長さ 1.9cm の楕円形に設計されている。リストバンド型コイルは、2つの 6 ピン磁気コネクタ (DIY Magnetic Connector, Adafruit) を介してリーダアウトボードに接続されている。リーダアウトボードは、6つのアンプ (LTC6228, Analog Devices) で構成されるブリッジ回路、磁気コネクタ、外部 PC (Macbook Air) で構成されている。NanoVNA は、周波数応答のパワースペクトルを接続された外部 PC に送信し、外部 PC はそのパワースペクトルの周波数ピークを分析する。これは、picoRing と同様のピーク検出アルゴ

リズムを使用している [15]。総じて、18 個の 150 pF の値の分散コンデンサと 47  $\Omega$  の抵抗を直列に接続したリストバンドコイルの共振周波数、インダクタンス ( $L_{wrist}$ )、抵抗 ( $R_{wrist}$ ) はそれぞれ 27 MHz、4.2  $\mu$ H、49  $\Omega$  であり、ブリッジ回路と NanoVNA の測定された消費電力はそれぞれ 0.33 W (= 3.3 V  $\times$  0.1 A) と 1.0 W (= 5 V  $\times$  0.2 A) である。柔軟な PCB と TPU ベースのバンドで作成された現在のリストバンドコイルは、着用性と伸縮性に課題がある。伸縮性のあるテキスタイルコイルの使用 [3, 11] は、皮膚に対する高い生体適合性において有望である。

## 2.4 指輪

リングコイルは、分布容量を持つ 8 巻の共振コイルと、上下左右のスクロールおよび押下操作をサポートする小型トラックボール (EVQWJN007, Panasonic) を備えたマウスモジュールで構成されている。ユーザーがマウスモジュール内のトラックボールをスクロールまたは押すと、トラックボールは i) トラックボールのスクロール回転を交互の極性分布を持つ円筒形磁石の回転に変換するか、ii) トラックボールを押すユーザーの動作に反応してタクトイルスイッチをオンにする (図 2b)。各磁石の下にある磁気スイッチ (CT8132BL, Allegro MicroSystems) は、磁石の回転データを超低消費電力 MCU (STM32L011F4U6, STM) にタクトイルスイッチの ON/OFF データと共に送信し、入力



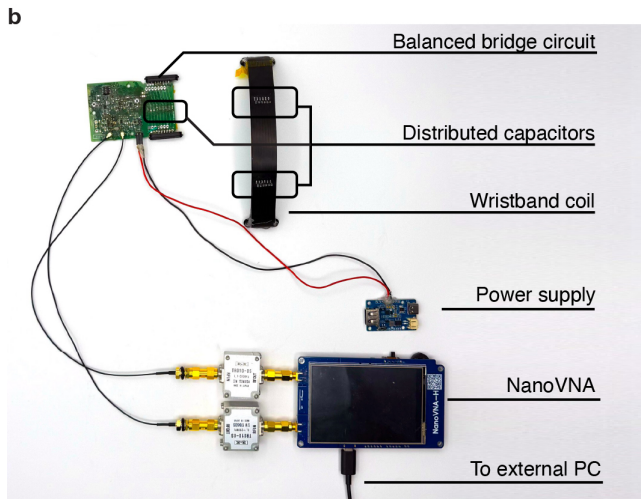
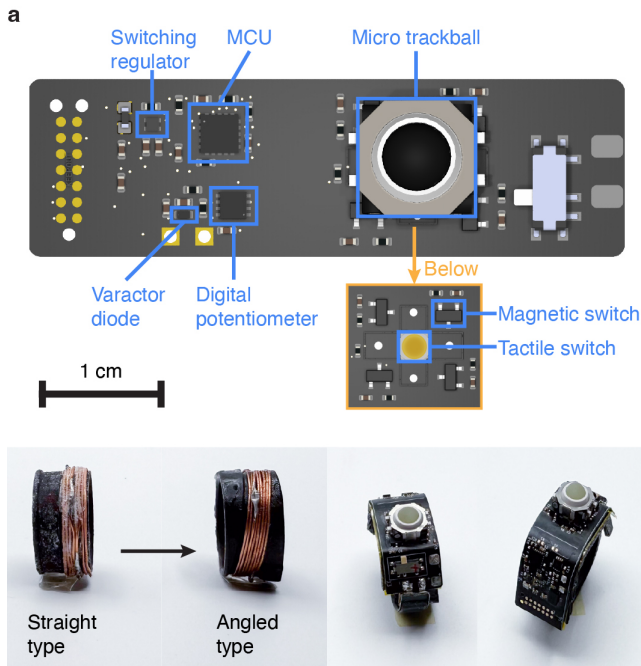


図 3 picoRing mouse のプロトタイプ。

タイプに応じて MCU はデジタルポテンショメータベースの電圧分圧回路 (AD5160, Analog Devices) を介してバラクタダイオード (SMV1253, Skyworks) に異なる対応する電圧を適用する。バラクタダイオードは、適用される電圧に基づいてその容量を 27 pF から 69 pF まで変化させ、リングコイル内の分布容量の 1 つと並列に接続されることで  $C_{\text{ring}}$  を変化させることができる。合計で、リングコイルは 5 つの物理入力を提供する：なし、スクロールダウン、アップ、左、右、および押下。各入力の共振周波数は、それぞれ 27.4 MHz、27.6 MHz、27.8 MHz、28.2 MHz、および 28.4 MHz に設定されており、インピーダンスバランスの取れた周波数帯内に収まっている。リングコイルのインダクタンス ( $L_{\text{ring}}$ ) と抵抗 ( $R_{\text{ring}}$ ) は、28.2 MHz でそれぞれ 2.6  $\mu\text{H}$  と 3.5  $\Omega$  である。リングコイルは約 20° 傾けられており、親指と人差し指の入力時にリングとリストバンドコイルのミスアライメントを軽減している。斜めにス

クロールすると、隣接する水平および垂直の磁石が同時にスクロールされることに注意が必要である。例えば、右上に斜めにスクロールすると、上と右の磁石が同時に動く。MCU はこの斜めスクロールを縦と横のスクロールに順次デコードする。

リングコイルには、ACTIVE モードと STANDBY モードの 2 種類の動作モードがある。ACTIVE モードでは、リングコイルはリストバンドコイルにデータを 200fps で連続的に送信する。対照的に、STANDBY モードでは、MCU が定期的に、接続された磁気スイッチからの受信データを確認する。picoRing は基本的に STANDBY モードで待機し、ユーザーがマウスモジュールに入力すると ACTIVE モードに移行する。磁気スイッチに 30 s 間信号変化がない場合、picoRing は STANDBY モードに戻る。ACTIVE モードと STANDBY モードでの MCU クロックは、それぞれ 524 kHz と 32 kHz に設定した。

### 3. 評価

#### 3.1 SNR 特性

まず、picoRing mouse のユーザーによるスクロールおよび押下操作、入力電力、リングとリストバンドの距離、指の曲げ、および公共環境における信号対雑音比 (SNR) を評価する。[15] に類似して、SNR は VNA の S21 の 100 出力を使用して次のように計算された：

$$\text{SNR} = \frac{\text{mean}(P_{\text{outw/ring}}) - \text{mean}(P_{\text{outw/oring}})}{\text{std}(P_{\text{outw/o ring}})}$$

ここで、SNR が 10 を超える場合、高忠実度の認識が 99% 以上の精度でサポートできると考えられる [15] を参照。また、共通接地を避けるために、RF トランス (T1-1-X65+, Mini Circuits) を用いてリードアウトボードを分離している。図 4a は、押下および 2D スクロール入力に対する時系列 SNR と平均 SNR を示している。平均 SNR は、ほぼ同じ手のサイズを持つ 3 人の参加者 (一人の女性と二人の男性、20 代) から 5 分間収集したデータを使用して計算された。結果は、各入力の平均 SNR が 10 dB を超え、変動が最小限であることを示しており、picoRing mouse が同様の手のサイズに対して親指からマウス指への入力の高忠実度認識をサポートできることを示している。

次に、リングコイルの距離と向きが picoRing mouse の SNR にどのように影響するかを測定した。picoRing [15] は、リングからリストバンドへの誘導結合が誘電体の影響を受けにくい頑健性を持つため、手の有無にかかわらずほぼ同じ SNR 特性を示す。このため、コイル間の距離と向きを容易に調整できるように、人の手を使わずにこの評価を行った。具体的には、3D プリンターを用いてリングコイルの距離と向きを変えるための治具セットを用意した (図 4b)。距離の範囲は 10 cm から 20 cm で、1 cm 刻みで変化

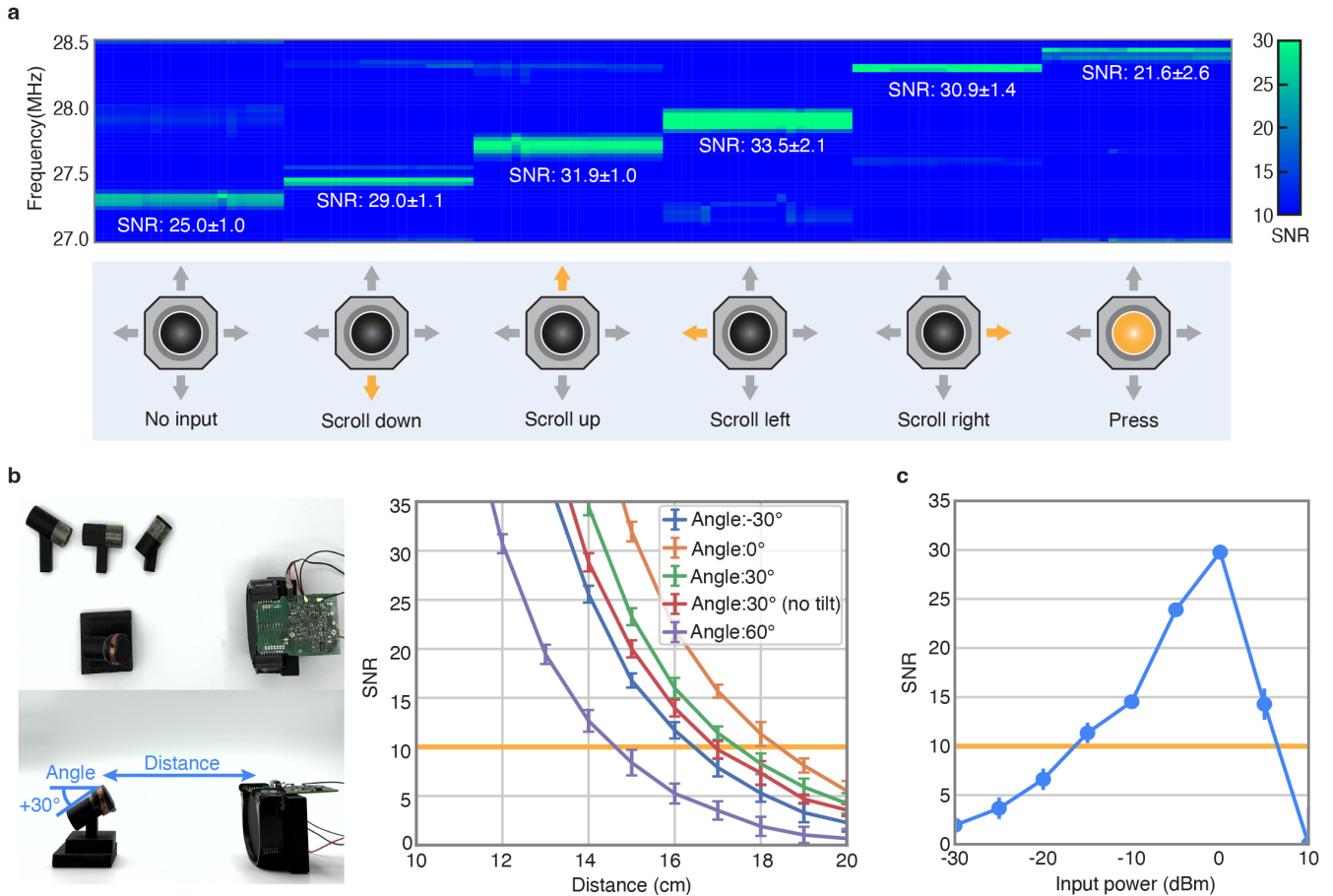


図 4 picoRing mouse の概要。

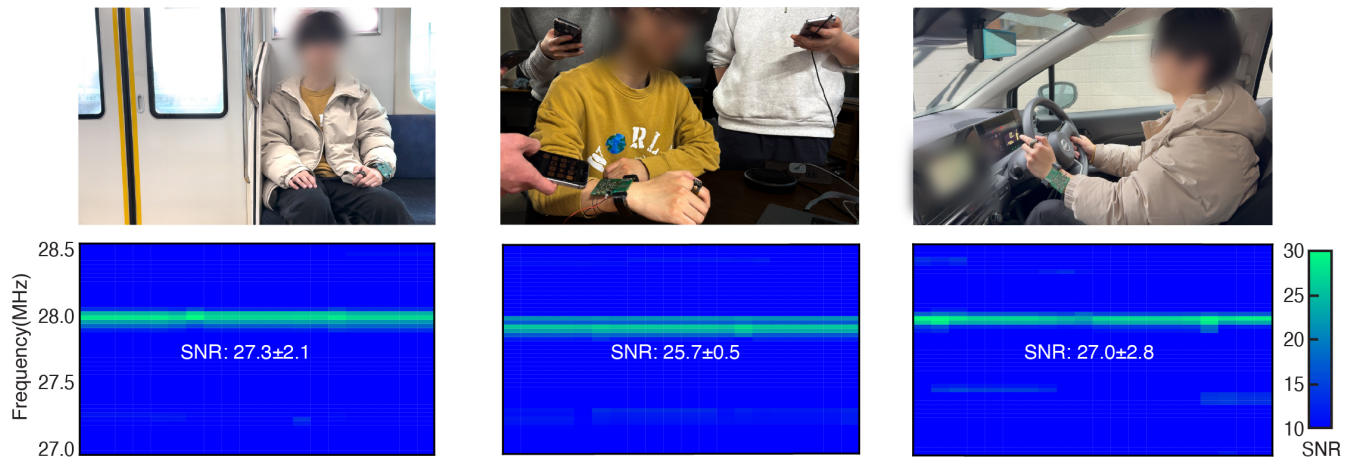


図 5 picoRing mouse の SNR の評価。

させ、リングコイルの角度は  $-30^\circ$  から  $60^\circ$  で、 $30^\circ$  刻みで変化させた。2 種類のリングコイルを用意し、直線型コイルと、コイルがリングの垂直軸に対して約  $20^\circ$  傾いた傾斜型コイルを使用した。通常、指が曲がった状態で行われる親指から人差し指への入力、リングとリストバンドコイル間のミスアライメントを引き起こし、磁気結合を弱める可能性があるため、垂直軸に対してコイルが傾いたリングは、アライメントを維持し、誘導結合を強化することができる。リングの共振周波数は 28 MHz に調整されている

ことに注意が必要である。結果として、SNR が  $60^\circ$  までの指の曲げに対して 10 を超えるため、利用可能な距離は約 14 cm と推定された。picoRing mouse によって提供されるこれらの利用可能な距離と角度は、典型的な中型の手の動きにおける信頼性の高い親指から人差し指への入力に適している。さらに、指が約  $30^\circ$  曲がった場合、傾斜したリングは SNR を約 3 dB 増加させることができた。これは、測定された誘導結合係数 ( $k$ ) が 0.0031 から 0.0039 に増加したためである。

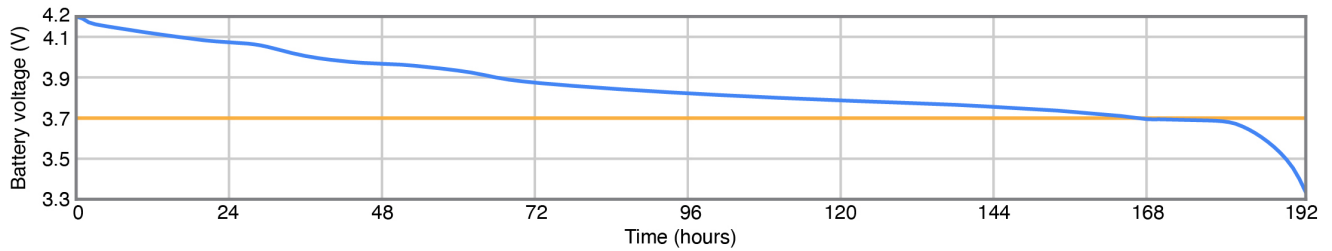


図 6 picoRing mouse の概要。

表 2 指輪型マウスの消費電力。

Component	STANDBY ( $\mu$ W)	ACTIVE ( $\mu$ W)
マイコン	1.8	252
マウス用センサ	7.9	7.9
デジタル電圧制御	1.8	36
電源制御	0.63	0.63
合計値 (推定)	> 12	> 296
合計値 (測定@4.2 V)	25	449

表 3 2 種類の電池による指輪型マウスの動作時間。

ACTIVE (hrs/day)	動作時間 w/ 20 mAh (hrs)	動作時間 w/ 27 mAh (hrs)
24	167 <sup>1</sup>	225
8	451	609
4	784	1058

<sup>1</sup>: このケースのみ、実際に動作時間を計測。

次に、リストバンドコイルの入力電力を  $-30$  dBm ( $=1 \mu$ W) から  $10$  dBm ( $=10$  mW) まで  $5$  dB 刻みで変化させた際の SNR を評価した (図 4c 参照)。リングとリストバンドの間の距離と角度は、それぞれ  $14$  cm と  $30^\circ$  に設定した。結果は、入力電力が  $-15$  dBm ( $=30 \mu$ W) から  $5$  dBm ( $=3.2$  mW) の範囲で SNR が  $10$  を超えることを示しているが、残念ながら  $10$  dBm ( $=10$  mW) を超える高い入力電力は、ブリッジ回路内のアンプの変動により SNR の低下を引き起こす。ブリッジ回路の動作電力を節約するために、NanoVNA の利用可能な電力オプションから  $-7$  dBm ( $=0.2$  mW) を NanoVNA の入力電力として選択した。

最後に、日常使用時の SNR を測定した。picoRing [15] では、金属製品や電気機器に近接した場合の SNR が頑健であることが示されているが、我々の焦点は、実際のウェアラブルコンピューティングシナリオにおける電磁ノイズの多い状況に対する SNR の測定である。ここでは、次の 3 つの状況を考慮した：1) 電車に座っているとき、2) 混雑した場所に立っているとき、さらに複数のスマートフォンに囲まれているとき、3) 車を運転しているとき。これらの状況で測定されたノイズレベルは、通常的环境よりも約  $20$  dBm/Hz 高いことに注意が必要である。図 5 は、これらの状況における時系列 SNR スペクトルと平均 SNR を、単一のユーザー (20 代、男性) のデータに基づいて示している。結果は、picoRing mouse が金属製品 (例：ハンドル) や電気機器 (例：ノートパソコン、スマートフォン、車や電車の電子制御ユニット) に近接しているにもかかわらず、 $28$  MHz での鋭いピークを十分な SNR ( $25$  以上) で検出することに成功したことを示している。

### 3.2 動作時間

次に、picoRing mouse がどのくらいの時間動作できるかを測定した。使用中の予想バッテリー寿命を計算するために、まず picoRing mouse のバッテリー端子をデジタルマルチメータ (34410A, Keysight) に接続した。ACTIVE モードと STANDBY モードでの  $4.2$  V での消費電力は、それぞれ約  $449 \mu$ W ( $= 4.2$  V  $\times 107 \mu$ A) および  $35 \mu$ W ( $= 4.2$  V  $\times 8.4 \mu$ A) と測定された。その後、picoRing mouse の異なる ACTIVE 動作時間の 3 種類について、バッテリー寿命時間を推定した。参考として、picoRing mouse が ACTIVE モードで連続して動作する場合のバッテリー寿命時間を測定した。バッテリー寿命は、LiPo バッテリーが  $4.2$  V で完全に充電されてから、 $3.7$  V 未満に低下するまでの時間から計算される (図 6)。ACTIVE モードを維持するために、MCU はデジタル電圧分圧器を ON に保つよう指示されており、つまりリング型コイルの共振周波数を  $27$  MHz (デジタル電圧分圧器が OFF の場合) から  $29$  MHz へする。測定された時間は約  $167$  時間、つまり完全に充電された  $20$  mAh の Lipo バッテリー (UFX150732) で  $7$  日である。

連続 ACTIVE モードでの消費電力とバッテリー寿命の結果に基づき、表 3 は異なる動作時間 (すなわち、1 日あたり  $4$ 、 $8$ 、または  $24$  時間) に対する予想バッテリー寿命を示している。寿命時間は、 $20$  mAh と  $27$  mAh の 2 種類のバッテリー容量に基づいて推定されており、どちらも市販のスマートリング製品で広く使用されている。腱鞘炎を引き起こさないマウスの実際の使用時間に基づくと、1 日あたり約  $4 \sim 8$  時間である [18]、picoRing mouse は、 $20$ – $27$  mAh のバッテリー 1 回の充電で、約  $451$  時間 (1 日  $8$  時間使用) から  $1058$  時間 (1 日  $4$  時間使用)、つまり数週間から 1 か月以上動作する可能性がある。





図 7 picoRing mouse のアプリケーション例。

#### 4. アプリケーション例

picoRing mouse は、一回の充電で長期間の連続操作を提供しながら、微細な親指と人差し指の入力を確実に検出するという大きな利点を持っている。そのため、主な応用は、特に拡張現実 (AR) グラスやヘッドマウントディスプレイ (HMD) と統合された場合の、普遍的な指ベースのインタラクションシステムである。AR グラスや HMD は、多くの場合、スクロール操作に動的な手のジェスチャーを頼るが、これは時間とともに疲労を引き起こす可能性がある。それに対して、picoRing mouse は、ユーザープライバシーを保ちながら、快適で長時間のインタラクションを可能にする微細な指の入力を提供する。これにより、デジタルコンテンツとのシームレスなエンゲージメントに最適なソリューションとなる。また、デバイスの効率的な電力管理により、バッテリー寿命を気にすることなく頻繁かつ自然に使用でき、日常の AR および HMD アプリケーションでの実用性が向上する。図 7 は、picoRing mouse のアプリケーション例を示している。リング入力の控えめな性質は周囲に気づかれにくく、近くの人々に対する妨害を最小限に抑える。例えば、飛行機や電車の中で、ユーザーは picoRing mouse を使って個人用スクリーンと控えめにインタラクションし、近くの乗客を邪魔することなくプライベートな操作を可能にする。都市の混雑した空間でも、ユーザーは picoRing mouse を使って大きな公共ディスプレイや AR マップを操作し、デジタルコンテンツとシームレスにインタラクションする。

#### 5. おわりに

本論文では、超低電力な指輪型入力デバイス、picoRing mouse を紹介した。semi-PIT に基づく指輪からリストバ

ンドへの低電力ワイヤレス通信と、低消費電力のマウスモジュールを組み合わせることにより、picoRing mouse は約 600 時間 (1 日 8 時間使用) から 1000 時間 (1 日 4 時間使用) の長時間の動作を実現するだけでなく、信頼性の高いマルチモーダル入力をサポートする。評価の結果、ウェアラブルコンピューティングの分野における異なるユーザー、手の姿勢、および電磁ノイズが強い状況に対して、指輪—リストバンド間の無線チャンネルの安定性が示された。以上、picoRing mouse が長時間使用できるウェアラブル入力インタフェースの礎になると期待できる。

現在の picoRing mouse はまだプロトタイプの段階であり、解決すべき課題が残されている。まず、現在のリーダ基板には、ブリッジ、VNA、および外部 PC が含まれており、スマートフォンサイズの NanoVNA が必要である。しかし、このボードはスマートウォッチに収まるように小型化することが可能である。VNA の代わりにカスタマイズされた NFC プロトコルを使用し [14,17,19,21]、NFC プロトコルのリスニングモードのみをアクティブにして、NFC 対応の指輪型コイルからの周波数応答をとらえることで、総消費電力を 50 mW 未満に減らすことができる。

次に、ウェアラブルデバイスは、使用していないときに自然に充電されることが多く、例えば、専用の充電ケースに入れられたイヤホンなどが挙げられる。しかし、指輪やリストバンドは通常連続して着用されるため、これがより困難である。5000 mAh 級の給電機能を備えた電子服 [8, 16] を着ることで、使用中の picoRing mouse への電力供給が同時に実現でき、picoRing mouse を日常生活の中で継続的に利用しやすくなる。

謝辞 本研究は、JST ACT-X JPMJAX21K9、JSPS KAKEN 22K21343、JST ASPIRE JPMJAP2401、旭硝子財団の支援のもと遂行された。

## 参考文献

- [1] Ashbrook, D., Baudisch, P. and White, S.: NENYA: subtle and eyes-free mobile input with a magnetically-tracked finger ring, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver BC Canada, ACM, pp. 2043–2046 (2011).
- [2] Fukumoto, M. and Suenaga, Y.: “FingerRing”: a full-time wearable interface, *Conference companion on Human factors in computing systems - CHI '94*, Boston, Massachusetts, United States, ACM Press, pp. 81–82 (1994).
- [3] Kanada, A., Takahashi, R., Hayashi, K., Hosaka, R., Yukita, W., Nakashima, Y., Yokota, T., Someya, T., Kamezaki, M., Kawahara, Y. and Yamamoto, M.: Joint-Repositionable Inner-Wireless Planar Snake Robot, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 10, No. 5, pp. 4994–5001 (2025).
- [4] Kienzle, W., Whitmire, E., Rittaler, C. and Benko, H.: ElectroRing: Subtle Pinch and Touch Detection with a Ring, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Yokohama Japan, ACM, pp. 1–12 (2021).
- [5] Kim, M., Glenn, A., Veluri, B., Lee, Y., Gebre, E., Bagaria, A., Patel, S. and Gollakota, S.: IRIS: Wireless ring for vision-based smart home interaction, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Pittsburgh PA USA, ACM, pp. 1–16 (2024).
- [6] Li, Y., Fukumoto, M., Kari, M., Ishida, S., Noda, A., Yokota, T., Someya, T., Kawahara, Y. and Takahashi, R.: Ultra-low-power ring-based wireless mouse, *arXiv preprint arXiv:2504.03253* (2025).
- [7] Li, Y., Fukumoto, M., Kari, M., Yokota, T., Someya, T., Kawahara, Y. and Takahashi, R.: Demo of picoRing mouse: ultra-low-powered wireless mouse ring with ring-to-wristband coil-based impedance sensing, *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '25, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3706599.3721183 (2025).
- [8] Li, Y., Takahashi, R., Yukita, W., Matsutani, K., Caremel, C., Iwamoto, Y., Lee, S., Yokota, T., Someya, T. and Kawahara, Y.: Plug-n-play e-knit: prototyping large-area e-textiles using machine-knitted magnetically-repositionable sensor networks, *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '25, New York, NY, USA, pp. 1–7 (2025).
- [9] Ogata, M., Sugiura, Y., Osawa, H. and Imai, M.: iRing: intelligent ring using infrared reflection, *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '12, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 131–136 (2012).
- [10] Parizi, F. S., Whitmire, E. and Patel, S.: AuraRing: Precise Electromagnetic Finger Tracking, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, No. 4, pp. 1–28 (2019).
- [11] Sato, T., Watanabe, S., Takahashi, R., Yukita, W., Yokota, T., Someya, T., Kawahara, Y., Iwase, E. and Kurumida, J.: Friction Jointing Of Distributed Rigid Capacitors To Stretchable Liquid Metal Coil For Full-Body Wireless Charging Clothing, *2025 IEEE 38th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 181–184 (2025).
- [12] Shen, X., Yu, C., Wang, X., Liang, C., Chen, H. and Shi, Y.: MouseRing: Always-available Touchpad Interaction with IMU Rings, *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Honolulu HI USA, ACM, pp. 1–19 (2024).
- [13] Takahashi, R., Fukumoto, M., Han, C., Sasatani, T., Narusue, Y. and Kawahara, Y.: TelemetRing: A Batteryless and Wireless Ring-shaped Keyboard using Passive Inductive Telemetry, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, pp. 1161–1168 (2020).
- [14] Takahashi, R., Han, C., Yukita, W., Ho, J. S., Sasatani, T., Noda, A., Yokota, T., Someya, T. and Kawahara, Y.: Full-body NFC: body-scale near-field sensor networks with machine-knitted meandered e-textiles, *arXiv preprint arXiv:2503.13240* (2025).
- [15] Takahashi, R., Whitmire, E., Boldu, R., Ng, S., Kienzle, W. and Benko, H.: picoRing: battery-free rings for subtle thumb-to-index input, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, pp. 1–11 (2024).
- [16] Takahashi, R., Yukita, W., Yokota, T., Someya, T. and Kawahara, Y.: Meander Coil++: A Body-scale Wireless Power Transmission Using Safe-to-body and Energy-efficient Transmitter Coil, *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New Orleans LA USA, pp. 1–12 (2022).
- [17] Wang, J., Zhang, J., Li, K., Pan, C., Majidi, C. and Kumar, S.: Locating Everyday Objects Using NFC Textiles, *Commun. ACM*, Vol. 66, No. 10, pp. 107–114 (2023).
- [18] Wolff, B. S., Raheem, S. A. and Saligan, L. N.: Comparing passive measures of fatigue-like behavior in mice, *Scientific Reports*, Vol. 8, p. 14238 (2018).
- [19] Ye, H., Lee, C.-J., Wu, T.-Y., Yang, X.-D., Chen, B.-Y. and Liang, R.-H.: Body-Centric NFC: Body-Centric Interaction with NFC Devices Through Near-Field Enabled Clothing, *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, New York, NY, USA, pp. 1626–1639 (2022).
- [20] Yu, T. C., Hu, G., Zhang, R., Lim, H., Mahmud, S., Lee, C.-J., Li, K., Agarwal, D., Nie, S., Oh, J., Guimbretière, F. and Zhang, C.: Ring-a-Pose: A Ring for Continuous Hand Pose Tracking, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 8, No. 4, pp. 1–30 (2024).
- [21] Zhang, J., Balakrishnan, G., Srinidhi, S., Bhat, A., Kumar, S. and Bettinger, C.: NFCapsule: An Ingestible Sensor Pill for Eosinophilic Esophagitis Detection Based on near-Field Coupling, *Proceedings of the 20th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '22, New York, NY, USA, pp. 75–90 (2023).
- [22] Zhou, H., Lu, T., Liu, Y., Zhang, S., Liu, R. and Gowda, M.: One Ring to Rule Them All: An Open Source Smart-ring Platform for Finger Motion Analytics and Healthcare Applications, *Proceedings of the 8th ACM/IEEE Conference on Internet of Things Design and Implementation*, IoTDI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 27–38 (2023).