

弦駆動型力覚ディスプレイ **SPIDAR** の開発 沿革と技術的進展の多角的研究報告

序論： **SPIDAR** の基本原理と力覚提示の技術的パラダイム

バーチャルリアリティ（VR）空間における高度なグラフィックス表示に対し、物体の質量、硬さ、摩擦、表面形状などを操作者の手指にリアルタイムでフィードバックする力触覚提示技術（Haptic Feedback Technology）は、人間と計算機との相互作用を深める上で不可欠な技術的要素である。東京工業大学の佐藤誠教授らによって 1989 年に提唱・開発された「**SPIDAR**」

（SPace Interface Device for Artificial Reality）は、弦（ワイヤ/ストリング）の張力を利用した独自の力覚提示メカニズムであり、従来のハプティックインタフェースが抱えていた物理的限界を打破する革新的なアプローチであった¹。

従来の剛体リンク型力覚提示装置（例えばロボットアーム構造を持つデバイス）は、自重による質量や関節部の不快な慣性・摩擦が操作者に直接負荷として伝わり、微細な力触覚の再現性を損なうという課題が存在した。これに対し **SPIDAR** は、自然界のクモが網を通じて微細な振動や力を感知・伝達する構造に着想を得て設計された²。基本構造は、操作空間を取り囲むフレーム、モータ、プーリ、ロータリーエンコーダ、および操作部（エンドエフェクタ）とモータを結ぶ軽量な弦によって構成されている⁴。

SPIDAR の制御システムでは、操作者がエンドエフェクタ（指環やグリップなど）を動かす際、各モータ軸に直結されたロータリーエンコーダが各弦の引き出し量を高精度に計測する⁴。これらの長さの変化から幾何学的計算（三角測量原理）に基づき、操作点の 3 次元位置や姿勢がリアルタイムで算出される¹。同時に、仮想空間内で物体との接触・衝突や物理的相互作用が発生した際には、計算機側で発生すべき反力ベクトルが生成され、各 DC モータが制御された張力を弦に与えることで、合成された正確なベクトル力覚が操作者に提示される³。

この弦駆動メカニズムは、1) 機構自体の慣性・摩擦が極めて小さく、操作時の自重負荷がほぼ零である軽量性、2) 細い弦を用いることで作業空間を視覚的に遮らない透明性

（Transparency）、3) 外枠フレームのスケールを変更するだけでデスクトップ型から部屋全体に及ぶ広域空間型までフレキシブルに適應できるスケーラビリティ、という 3 つの決定的な技術的優位性を備えている³。

年代別に見る **SPIDAR** の開発史と主要モデルの変遷

1980 年代末～1990 年代：力覚提示の基礎理論確立と基本モデルの多様化

SPIDAR の研究開発は 1980 年代末に始まり、1989 年に最初期のプロトタイプシステムが構築された³。この時期の研究背景には、計算機上での 3 次元形状モデリングや仮想空間内での直

感的な物体操作を実現するための新しい入出力デバイスへの強いニーズが存在していた⁸。

1991 年、佐藤誠、平田幸広、河原田弘らによって発表された原著論文「空間インタフェース装置 SPIDAR の提案」は、弦張力制御に基づく位置計測と力覚提示の数学的定式化を確立した¹¹。初期モデルは、主に指先 1 点の 3 次元並進位置（3 自由度）を追従し、仮想物体の表面形状や衝突力、重量感を提示するシステムであった¹⁰。

1990 年代半ばにかけて、SPIDAR の適用範囲を拡張する試みが拡大した。1994 年には、通信ネットワークを介して離れた場所にいる複数の操作者が、同一の仮想作業空間で視覚・聴覚・力覚情報を共有しながら協調作業を行える「Networked SPIDAR」が開発された¹⁰。また同年に、左右両手による仮想物体の把持や押し引きといった人間工学的な両手協調動作を可能にする「両手操作型 SPIDAR (Bimanual SPIDAR)」の理論とシステムが構築された¹⁰。

さらに 1990 年代後半には、没入型大画面映像（CAVE システム等）と連動した大規模空間用の「Scalable-SPIDAR」（Human-Scale SPIDAR）が提案された³。例えば 27 立方メートル（3m×3m×3m）に及ぶ大型立方体フレームを備えた実験用プロトタイプでは、操作者がフレーム内を徒歩で移動しながら、全身運動を伴う広域な力覚相互作用を体感することが可能となり、建築デザインや大型機器の検証環境へ応用された¹⁵。

2000 年代：6 自由度制御の達成と産業・学術応用の開拓

2000 年代における SPIDAR 技術の最大のブレイクスルーは、エンドエフェクタの位置（並進 3 軸）だけでなく姿勢（回転 3 軸）の計測および力（3 軸）とトルク（3 軸）の提示を同時実現する「6 自由度（6-DOF）力覚提示技術」の完成であった。

2000 年に発表された「SPIDAR-G」は、グリップ型のエンドエフェクタに対して 8 本の弦を配置し、8 台の DC モータで張力を個別に制御する幾何学的構成を採用した⁴。8 本の弦長データから姿勢角（Roll, Pitch, Yaw）と位置座標を高精度に導出し、同時にモータ張力の最適化問題を解くことで、回転方向のトルク提示を実現した⁴。SPIDAR-G の登場により、医療手術シミュレータにおける執刀アタッチメントや 3D CAD における精密工具の操作など、捻りや傾きを伴う複雑なタスクの力覚再現が可能となった⁵。

また、手指の繊細な技巧的操作に対応するため、親指およびその他の指に独立した力覚を与える多指用モデル「SPIDAR-U」や、実寸法スケールでの作業領域を確保する「SPIDAR-GS」が開発された⁹。さらに、静電相互作用や分子間力を手に感じながら分子構造を組立て・観察できる化学教育支援システム「HaptiChem」など、分野特化型の学術応用アプリケーションが開拓された¹⁷。

この時期には産業界への技術移転も進み、ARACHNOFORCE 社や販売代理店（日本バイナリー等）を通じて、標準モデルの SPIDAR-G、高トルクコアレスモータを搭載した SPIDAR-G(s)、および制御基板（Haptic Controller）を内蔵してハードウェアレベルで高速エンコード処理を行う「SPIDAR-G2」などの商業用モデルが市場へ供給された⁴。

2010 年代：小型化・モバイル化・多指操作およびウェアラブル化

2010 年代に入ると、モバイル端末や頭部装着型ディスプレイ（HMD）の普及、ならびに Web 技術の進展に伴い、SPIDAR の構造形態は著しい多角化を遂げた。

2010 年に提案された「SPIDAR-mouse」は、従来の力覚提示装置が高価格で普及が困難であった課題を解決するため、ハードウェア構成を大幅に簡略化・低コスト化したモデルである¹⁷。Web ブラウザ（Flash/ActionScript）や Unity、Processing といった一般的な開発環境から手軽に制御できるようにオープン化され、一般ユーザーや Web コンテンツ制作者への力覚技術の普及を図った¹⁹。

2011 年から 2012 年にかけては、構造概念を根本から刷新した内蔵弦型力覚装置「SPIDAR-I」（Inner Strings Haptic Device）が構築された¹。従来モデルが必要としていた外側の大型フレームを撤廃し、弦、モータ、プーリ、機構部をすべて掌に収まるグリップ内部に集約配置することに成功した¹。高精度な位置・姿勢・力覚計算アルゴリズムの再構築により、高い計算忠実度を維持しながらパームサイズの超小型化を実現し、2012 年には英国 BBC の技術番組『Click』で世界に向けて報道された¹。

モバイル端末や教育現場への展開として、タッチパネル表面で力覚を与える「SPIDAR-Tablet」や、スマートフォンなどの 3.5mm イヤホンジャックから出力される音声信号で 1 自由度の弦張力を直接駆動する極小デバイス「SPIDAR-S」（2015 年）が登場した¹⁰。SPIDAR-S は 1 本の糸、1 台のモータ、イヤホン端子のみで構成され、モバイルアプリや初等教育（滑車や力学の学習支援環境）における直感的な力覚体験をローコストで実現した²²。

両手・多指インタラクションの最高峰として、2014 年には両手 10 本の指すべてに独立した力覚を提示する「SPIDAR-10」が開発された¹⁷。左右の手に対して 1 つずつ配置された円筒形回転式フレームから合計 20 本のワイヤを伸ばし、両手全指を用いた複雑で技巧的な仮想物体操作を可能にした²⁵。

2010 年代後半には、身体装着型デバイスとしての進化が加速した。胸部装着フレームに両手用の 3 自由度機構を配置したウェアラブル力覚提示装置「SPIDAR-W」（2018 年）や、HMD の外枠にモータと弦機構を統合した「SPIDAR-HMD」（2018 年）が開発され、外部設置型フレームから完全に解放されたポータブル VR 環境が構築された¹⁷。

2020 年代：多感覚統合（触覚・摩擦・熱覚）と複合 XR 環境への進化

2020 年代における SPIDAR 研究の最前線は、単なる反力（筋運動感覚）の提示を超えた、多感覚統合型（Multi-modal Haptics）ハプティックインタフェースへの進化である。

2021 年に発表された「SPIDAR-Fr」は、HMD 一体型フレームに DC モータ、ロータリーエンコーダ、およびブレーキモジュールを配置し、硬質な物体への接触感や表面の摩擦感を精密に提示する構造を備えている¹⁷。さらに、ペルチェ素子等を組み込んだペン型デバイスを組み合わせた「SPIDAR-Tablet」拡張型などにより、仮想物体の剛性や摩擦だけでなく過渡的な温度変化（温熱感覚）を指先に同時提示する技術が開発された¹⁷。

また、SPIDAR-W と足踏み動作による無限歩行ロコモーションデバイス、および HTC Vive などの最新 VR HMD を統合し、視覚・歩行運動感覚・両手力覚を高度に融合させた複合 XR 体験環境の構築が進められている²⁹。

主要モデルの構造的仕様および技術的比較

以下の比較表は、SPIDAR の開発史において登場した主要なモデルの物理仕様、自由度、機構

的特徴、および主たる用途をまとめたものである。

モデル名称	登場時期	対応自由度 (位置計測 / 力 覚提示)	構造的・機構 的特徴	主な適用領 域・作業空間 スケール
初代 SPIDAR	1989 年-1991 年	3-DOF (並 進) / 1~3- DOF	外枠立方体フ レーム、指環 型エンドエフ ェクタ、基本 弦張力制御 ³	基礎的仮想作 業空間、3D 形 状モデリング 検証 ⁸
Scalable- SPIDAR	1990 年代後半	3-DOF / 3-DOF	超大型フレーム (27m ³ 等)、広域弦 架設、CAVE システム連携 ¹⁵	人間スケール VR、建築・大 型機器操作シ ミュレーション ¹⁵
SPIDAR-G / G2	2000 年	6-DOF (並進 3 +回転 3) / 6- DOF	8 本弦・8 モ ータ構成、グ リップ型操作 部、ハードウ ェア制御基板 内蔵 ⁴	高精度デスク トップ操作、 医療手術シミ ュレータ、産 業用商用モデ ル ⁵
SPIDAR- mouse	2010 年	2~3-DOF / 1~ 2-DOF	簡略化低コス ト構造、 Web/Flash/Unit y 向けオープ ン設計 ¹⁷	Web エンター テインメン ト、ソーシャ ルゲーム、イ ンタラクティ ブアート ¹⁹
SPIDAR-I	2011 年-2012 年	6-DOF / 6-DOF	インナースト リング構造 (グリップ内 部に弦・モー タ・プーリを	パームサイズ 可搬型操作、 外部外枠非依 存型デスクト ップ VR ¹

			全内蔵) ¹	
SPIDAR-Tablet	2011 年-2018 年	2~3-DOF / 1~2-DOF	タブレット画面外枠装着、無線 (BLE) 対応、ペン型温熱提示アタッチメント ¹⁷	モバイル物理学習支援 (滑車・熱力学実験)、ポータブル VR 教育 ¹⁷
SPIDAR-10	2014 年	両手 10 指独立 (多指力覚)	左右 2 基の回転式円筒フレーム、20 本ワイヤ個別多軸制御 ¹⁷	両手多指による高度な技巧的操作、仮想物体の多点抱え込み操作 ²⁵
SPIDAR-S	2015 年	1-DOF (並進) / 1-DOF	単一弦・単一モータ、スマホ 3.5mm イヤホンジャック音声信号直接制御 ¹⁰	スマートフォン用超小型・ローコスト力覚インタフェース ¹⁷
SPIDAR-W	2018 年	両手各 3-DOF (計 6-DOF)	胸部装着型フレーム、ワイヤ駆動両手ウェアラブル構造 ¹⁷	ウェアラブル VR、歩行移動型ロコモーション装置連動環境 ²⁷
SPIDAR-Fr	2021 年	多軸力覚+接触・摩擦・温熱	HMD 一体型フレーム、DC モータ+ブレーキモジュール+ペルチェ温熱素子 ¹⁷	多感覚統合 (力・接触・摩擦・熱) 高度没入型 XR インタフェース ¹⁷

技術的進化メカニズムと多角的考察

SPIDAR の開発沿革を技術的・概念的な観点から分析すると、ハプティクス分野における 3 つの重要なパラダイムシフトが見出される。

第一のシフトは、「外部固定空間基準」から「身体内在・身体装着基準」への空間フレーム再

定義である。初期の SPIDAR は、作業空間の周囲に堅牢な立方体フレームを固定配置する必要があり、操作可能領域はフレームの物理的容積に拘束されていた⁴。しかし、計算アルゴリズムの最適化と機構の小型化により、SPIDAR-I での「グリップ内蔵型（インナーストリング）」や、SPIDAR-W および SPIDAR-HMD での「身体・頭部装着型」が実現した¹。これにより、空間座標の絶対的原点が「環境側」から「操作者の身体側」へと移行し、設置場所の制限を受けない自由な空間移動と力覚提示の両立が可能となった。

第二のシフトは、「単一の筋運動感覚（力覚）」から「皮膚感覚・環境物理特性を網羅する多感覚統合」への進化である。初期の SPIDAR が主に筋肉や関節に作用する反力・重力・衝突力の伝達に留まっていたのに対し、近年の SPIDAR-Fr に代表されるモデルでは、ブレーキモジュールによる接触摩擦の制動や、温熱素子による過渡的な熱移動の制御が組み込まれている¹⁷。人間の触覚知覚メカニズムに基づき、筋運動感覚と皮膚感覚（接触・摩擦・温度）を同一エンドエフェクタ上で同期して提示することにより、仮想物体の「質感」や「リアリティ」の認知閾値が著しく向上した。

第三のシフトは、「特殊実験設備」から「汎用・普及型インタフェース」へのオープン化である。高価格かつ専用制御 PC を要した初期装置に対し、SPIDAR-mouse や SPIDAR-S、SPIDAR-Tablet は、一般的な Web 規格、ゲームエンジン、スマートフォンの標準入出力（音声ジャックや BLE 無線通信）を利用して動作するよう設計された¹⁹。この汎用化へのアプローチは、力覚提示技術の導入ハードルを下げ、教育、エンターテインメント、ソーシャルコンテンツなど幅広い分野への波及効果をもたらした。

結論

東京工業大学の佐藤誠教授らによって創始された力覚ディスプレイ SPIDAR は、弦駆動というシンプルな力学原理に基づきながら、30 年以上にわたり絶え間ない技術革新を重ねてきた¹。1980 年代末の基礎理論の提示から、2000 年代の 6 自由度完全制御と産業展開、2010 年代の小型・ウェアラブル・多指化、そして 2020 年代の多感覚統合および複合 XR 環境への展開に至るまで、その進化の歴史はハプティックインタフェース領域の発展そのものを象徴している¹。

自重や摩擦を抑えた過渡応答性の高さ、空間的な透明性、自由なスケール可変性という SPIDAR の根本的な設計思想は、現代の空間コンピューティングやメタバース、遠隔医療・ロボティクス操作における身体性提示の根幹技術として、今後も重要な役割を果たし続ける。

引用文献

1. 力触覚を正確に再現するハプティックインタフェースを開発—バーチャルリアリティを身近に体感— | 東工大ニュース,
<https://www.titech.ac.jp/news/2012/025572>
2. U&C 3D フォーラムレポート, <https://www.forum8.co.jp/topic/3dforum114.htm>
3. SPIDAR and virtual reality - Semantic Scholar,
<https://www.semanticscholar.org/paper/SPIDAR-and-virtual-reality-Sato/98cb24c2ba2bb29245afa9213eb1bcb143d0a27c>

4. 6-DOF Wire-Driven Haptic Interface SPIDAR-G2 | NihonBinary Co.,Ltd. - 日本バイナリー, http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/SPIDAR/index_en.html
5. ARACHNOFORCE 社 力覚フィードバック装置 SPIDAR-G2 - 日本バイナリー, <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/SPIDAR/SPIDAR-G.html>
6. 90, <https://icat.vrsj.org/papers/98090.pdf>
7. スtring内蔵型ハプティックインタフェース SPIDAR-I の開発, <http://www.interaction-ipsj.org/archives/paper2012/data/Interaction2012/oral/data/pdf/12INT015.pdf>
8. (PDF) Space Interface Device for Artificial Reality – SPIDAR – - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/398951008_Space_Interface_Device_for_Artificial_Reality_-_SPIDAR_-_
9. ARACHNOFORCE 社 力覚フィードバック装置 SPIDAR-GS - 日本バイナリー, <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/SPIDAR/SPIDAR-GS.html>
10. Development of String-based Force Display: SPIDAR - Semantic Scholar, <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-String-based-Force-Display%3A-SPIDAR-Sato/edd233f0fd845c3f5d41854940336e9dc2db993a>
11. 論文 - 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=D&fname=j74-d2_7_887&lang=J&year=1991
12. Space Interface Device for Artificial Reality. SPIDAR. | Article Information - J-Global, https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902042763461315
13. 4-2 3D Space-shared Communications - NICT, <https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol48no3/toku4-2.pdf>
14. 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案 | 文献情報 | J-GLOBAL 科学技術総合リンクセンター, https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=200902042763461315
15. 没入型 VR 環境 D-vision と マルチモーダルインタラク - 立命館大学, <http://www.arc.ritsumei.ac.jp/archive01/jimu/publications/bunkazai/04/bunkazai-04.pdf>
16. Faculty Profiles - HASEGAWA SHOICHI, https://strdb.s.isct.ac.jp/html/100002065_en.html
17. Makoto SATO | Tokyo Institute of Technology, Tokyo | TITech | Materials and Structures Laboratory | Research profile - ResearchGate, <https://www.researchgate.net/profile/Makoto-Sato-8>
18. 3次元力覚デバイス / ソフトウェア - 日本バイナリー, <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/index.html>
19. 「SPIDAR-MOUSE」, http://shock-athon.org/2014/files/output/140706_shocktahon_SPIDAR-mouse.pdf
20. インタラクシオン 2010, <http://www.interaction-ipsj.org/2010/catalogue/catalogue3.html>
21. Development of Inner Strings Haptic Interface SPIDAR-I, https://icat.vrsj.org/ICAT2011_Proceedings/pdf/135-Zhu.pdf

22. 音声信号を用いた携帯端末に装着可能な力覚提示装置 SPIDAR-S の提案,
<https://www.interaction-ipsj.org/proceedings/2015/data/20150226/A04.pdf>
23. タブレット端末とポータブルな反力デバイスを用いた学習支援システム – SPIDAR-tablet による反 L,
<https://www.jsise.org/taikai/2013/program/contents/pdf/TE1-4.pdf>
24. KAKEN – 研究者をさがす | 佐藤 誠 (50114872) - NII,
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050114872/>
25. フレーム可動型両手多指力覚提示装置のフレーム制御に関する提案,
<https://www.interaction-ipsj.org/proceedings/2014/data/20140220/14INT016.pdf>
26. インタラクション 2014 - カタログ, <http://www.interaction-ipsj.org/2014/catalog.html>
27. ARACHNOFORCE 社 力覚フィードバック装置 SPIDAR-W - 日本バイナリー,
<http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/SPIDAR/SPIDAR-W.html>
28. KAKEN – 研究者をさがす | 山口 武彦 (50713442),
<https://nrid.nii.ac.jp/ja/nrid/1000050713442/>
29. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会,
<https://conference.vrsj.org/ac2018/program2018/>