This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2025 年 9 月）

空間知能化ロボティクスに基づく身体動作支援プラットフォームの基礎検討

太田雅啓 [1, 2)]，吉田貴寿 [2)]，佐々木智也 [2, 3)]，森田迅亮 [2)]，新居英明 [2)]，南澤孝太 [2)]
Masahiro OHTA, Takatoshi YOSHIDA, Tomoya SASAKI, Jinsuke MORITA,
Hideaki Nii, Kouta MINAMIZAWA

1) 東京大学 工学部精密工学科（〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, ohta-masa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp）
2) 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科
（〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, masaohta, yoshida, t.sasaki, jinsuke.morita, nii, kouta@kmd.keio.ac.jp）
3) 東京理科大学 先進工学部（〒 125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1, tomoya@rs.tus.ac.jp）

概要:
生活空間にロボティクスが統合されたロボティックルームは，ユーザの状態や行為に応じて動的に反応する環境を実現する，空間知能化に向けた有望なアプローチである。そこで本研究では，空間知能化の考え方に基づいて，様々な身体性を有するユーザの動作支援を行うプラットフォーム ROomBOT を提案する．ROomBOT はケーブル駆動パラレルロボットのペイロードと速度を活かしてユーザの位置・意図に適応し，物体操作の支援の実現を目指す．本稿では本システムの設計原理と試作したプロトタイプを示し，応用例と初期評価結果を報告する．

キーワード： 空間知能化ロボティクス，ケーブル駆動パラレルロボット，空間コンピューティング

1. はじめに

私たちが日常生活の大半を過ごす「部屋（room）」は，単なる静的な構造物ではなく，人間の知覚や行為に働きかけるメディアとして機能している．建築家 Louis I. Kahn は「The room is the beginning of architecture. It is the place of the mind.」と述べており，room とは構造や光，空間の質を通じて精神や経験に作用する存在であると捉えられている [1].

このような部屋空間のメディア的側面に着目し，デジタル技術によってそのインタラクティブ性を拡張する試みが HCI の分野でも数多くなされてきた．たとえば，視聴覚による環境情報の提示 [2]，プロジェクションによる空間のインタラクティブ拡張 [3]，床振動による触覚提示 [4] などが挙げられる．これらは知覚レベルで空間をインタラクティブにする有力な手法である一方で，ユーザの身体動作が空間の構成要素に直接影響を与えるような，物理的な操作性を伴うインタラクションの実現には課題が残されている．

このような背景から壁 [5]，床 [6]，パーテーション [7] などの空間構成要素に可動性を持たせることで，ユーザの行為に応じて空間自体が動的に変化する「再構成可能な部屋空間」の設計が提案されている．こうした部屋スケールの物理空間の動的制御を実現するための技術として，ケーブル駆動型パラレルロボット（Cable-Driven Parallel Robot: CDPR）は，高ペイロード・高速応答・スケーラビリティといった特性から特に有望視されている．これまでにも CDPR を用いたインタラクションは提案されているが [8, 9]，高負荷かつ高速応答が可能な部屋スケールのシステムは未だ実現されておらず，CDPR の潜在能力を活かしきれていない．

図 1: ROomBOT の概要

そこで本研究では，CDPR を用いた部屋スケールのロボットシステム「ROomBOT」を提案する (図 1)．ROomBOT は，天井に設置された複数のウィンチモータと，それに接続されたケーブルおよびエンドエフェクターから構成される．モータを空間側に固定する構成とすることで，高いペイロード性能と応答性を両立し，物体を三次元空間内で精密に制御することが可能である．

たとえば，天井から吊るされたロボットハンドをユーザの身体動作と連動させることで，ユーザは自身の身体の延長として部屋全体に手を伸ばし，離れた物体を自在に操作できるようになる [10]．このシステムは，身体機能に制限のある人や寝たきりの人にとって，他者の手を借りずに物を手元に持ってくることができるようになるなど，有望な

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

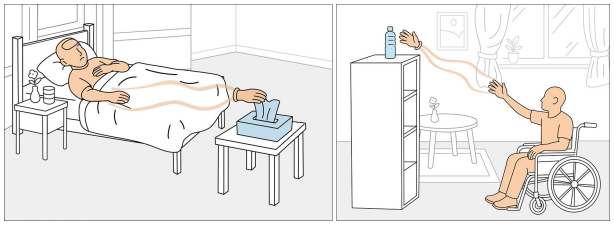

図 2: ROomBOT のコンセプトスケッチ: 病室で寝たきりのユーザ (左) や自宅で車椅子のユーザ (右) に対する生活動作支援のシナリオを示している.

自立支援技術となる可能性を持っている (図 2). また, ロボットハンドに限らず, ユーザの身体を接続することで動作の教示に用いたり, 家具を接続して空間構成を動的に変化させたり, 他者の動作を反映する遠隔ロボットアバターとして活用したりと, 部屋空間の機能性を拡張する多様な応用が考えられる.

本稿では, ROomBOT の構成と設計原理を述べたうえで, 具体的な応用シナリオおよび技術評価を通じて, 本システムの有効性と可能性を検討する.

2. ROomBOT

本章では, ROomBOT の全体像を示すために, まずそのコンセプトと設計方針を述べた上で, プロトタイプシステムの構成について説明する.

2.1 コンセプト

ROomBOT は, 部屋空間に CDPR システムを統合することで空間の機能性を高める, 新しい空間インタフェースのコンセプトである. 本システムは, 天井に設置された複数の高出力ウィンチモータとケーブルによって構成され, 空間内に吊られたエンドエフェクタを三次元的に駆動することで, ユーザの身体動作に応じた即時応答を可能にする (図 3 左).

ROomBOT の設計は, 空間そのものをインタラクティブな媒体とすることを主眼としており, 装着型デバイスを用いずに, 身体動作を通じて空間内の物体や構成要素を操作できる点に特徴がある. エンドエフェクタには, ロボットハンドのようなアクティブな物体やボールなどのパッシブな物体など多様な対象を接続可能であり, 操作方法も自律制御・身体動作との同期制御・複数ユーザによる共有制御など様々な方式を許容する. 図 3 右に実際に作成したエンドエフェクターの一例を示す.

2.2 システム構成

ハードウェア

図 3 s は ROomBOT システムの実装を示している. 空間構造は足場パイプを用いて 2.5 × 2.5 × 2.5m のフレームを構築し, 4 台のウィンチモータ (MOKA SFX MK-LB01) を専用ブラケットで取り付けた. これらのモータは本来舞台照明用に設計されており, 高速かつ応答性の高いケーブル巻取りが可能である.

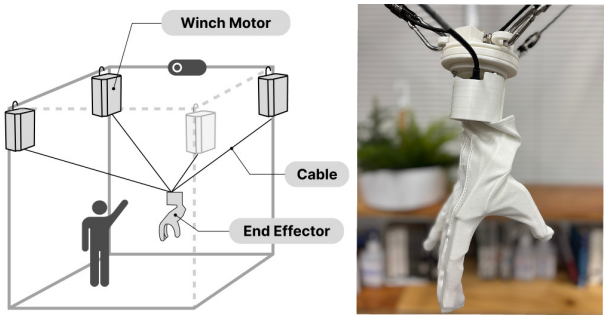

図 3: システム構成: 概要 (左) とエンドエフェクターの例 (右)

モーションセンシングには, 天井梁に取り付けた 2 台の Azure Kinect を用い, 上方配置によって遮蔽のない非装着全身トラッキングを実現している. 取得した位置情報はホスト PC にリアルタイムで送信され, モータ制御に用いられる. ウィンチモータは DMX512 で制御されており, USB 接続されたインタフェース (eDMX2 Pro) を介して通信される. エンドエフェクタにロボットハンドなどのアクティブ部品を搭載する場合は, 追加で Arduino を用いてシリアル通信による制御を行った.

ソフトウェア

ROomBOT のソフトウェアは TouchDesigner で実装されており, リアルタイムのモーションセンシングデータを統合し, エンドエフェクタの目標位置とウィンチモータとの距離から, ケーブルの長さを制御する.

身体動作との同期制御では, ユーザの胸と右手の位置ベクトルを用いて手の動きをトラッキングし, ユーザごとの腕の長さに応じて正規化することで, 最大到達時にロボットハンドが部屋の隅まで届くようにスケーリングされている. また, 開閉などの細かな手の動きについては, MediaPipe による機械学習ベースの画像処理でセンシングし, 動作をエンドエフェクタと同期させている.

3. 応用シナリオ

本章では, ROomBOT が実現する多様な身体–空間インタラクションの応用可能性について述べる.

身体動作に不安を抱える身体機能に障がいを持つ人や寝たきりの人の多くは, 日常生活における身の回りの作業を自力で完結することが困難であり, 他者による継続的な支援を必要とする. ROomBOT システムによる身体動作の拡張はこのようなユーザに対して自助的な生活動作の支援に役立つ可能性があり (図 2), 車椅子ユーザを想定したデモンストレーションを実施した.

デモでは, 車椅子に着座した状態のユーザが ROomBOT を自身の手の延長として操作し, 高い棚の上に置かれた日用品を自力で取得する動作を再現した (図 4a). この結果, ユーザが身体の移動を伴わずに, 空間内の遠方の物体を直接操作できる可能性が確認された. 本アプリケーションは, ROomBOT がアクセシビリティを目的とした身体動作支援

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

に有効である可能性を示唆している．

図 4: ROomBOT の応用例のデモンストレーション．車椅子ユーザを想定した使用例（a），遠隔地におけるロボットアバターとしての使用例（b），動作シミュレーションによるスポーツ練習への応用（c）．

今回のプロトタイプを用いて，他にも多様な応用例のデモンストレーションを実施した．たとえば，ROomBOT が遠隔地にいる他者の身体動作をリアルタイムで反映することで，離れた空間をつなぐロボットアバターとして機能し，身体動作の共有や遠隔コミュニケーションの支援を実現できる（図 4b）．また，CDPR の高い応答性を活かし，エンドエフェクターに取り付けたボールを動的に制御することで，スポーツにおけるトレーニング支援といった用途にも応用可能である（図 4c）．

4. 予備的評価

ROomBOT による空間知能化と身体拡張の可能性を検証するため，日本科学未来館の展示企画において，一般来場者向けの体験型デモを実施した（図 5）．本展示では，ROomBOT に接続されたロボットハンドがユーザの手の動きに連動して動作し，参加者は障害物を避けながら部屋の奥に配置された人形に触ったり，同行者と握手などの動作を行った．展示期間中には多様な年代の 43 名の来訪者のうち少なくとも 10 人以上が体験に参加した．

参加者からは，「部屋が自分の支配下にあるような感覚があった」「家族に実際に車椅子を利用している者がいるので，このような研究が進んでほしい」といった前向きなコメントが多く寄せられた．また，「とくに手のロボット操作の部分がとてもおもしろかった」といった，身体拡張的操作に対する強い関心も見られた．一方で，「操作中のハンドの揺れが気になった」といった意見もあり，インタラクションの質をさらに高めるためには CDPR としての制御精度や応答性の向上が求められることが示唆された．

5. おわりに

本研究では，空間知能化に向けた身体動作支援プラットフォームとして，CDPR を用いた部屋スケールのインタラクティブシステム「ROomBOT」を提案した．ROomBOT は，空間内における身体スケールの動作に連動し，物体操作や動作支援を可能とする新たな空間–身体インタラクションを実現するものである．

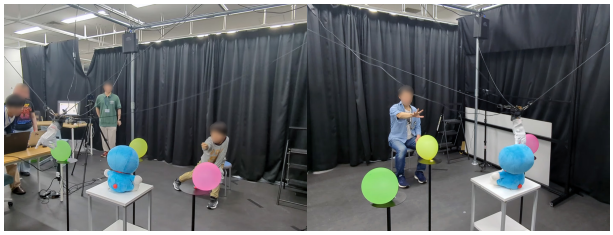

図 5: 日本科学未来館での体験展示の様子

本稿では，システムの設計方針および構成について述べるとともに，アクセシビリティ支援における応用可能性についてデモンストレーションを通じて検討した．また，エンドエフェクターや動作スキームのバリエーションによりさまざまな応用例が可能であることが示唆された．

今後は，安全性・操作性のさらなる向上に向けて複雑な制御・センシング機能を統合するとともに，多様なユーザによる長期的な使用を想定したユーザビリティ評価を行い，実環境への適用へ向けた検証と改善を進める予定である．

謝辞 本研究は JST ムーンショット研究開発プログラム（JPMJMS2013）および JST ACT-X（JPMJAX23KK）の支援を受けたものである．また，本研究の遂行にあたり貴重なご助言をいただいた長谷川晶一氏および Peng Hanrui 氏に深く感謝する．

参考文献

[1] Louis I. Kahn and Ann Mohler. *Louis I Kahn: Talks with Students – Architecture at Rice 26*. Rice University, 1969.

[2] Hiroshi Ishii, Craig Wisneski, Scott Brave, Andrew Dahley, Matt Gorbet, Brygg Ullmer, and Paul Yarin. ambientroom: integrating ambient media with architectural space. In *CHI 98 conference summary on Human factors in computing systems*, pp. 173–174, 1998.

[3] Brett R Jones, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D Wilson. Illumiroom: peripheral projected illusions for interactive experiences. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 869–878, 2013.

[4] Kiryu Tsujita, Takatoshi Yoshida, Kohei Kobayashi, Nobuhisa Hanamitsu, Kanghong Zhong, Arata Horie, and Kouta Minamizawa. Haptoroom: Designing spatial and reconfigurable haptic experience using vibrotactile floor interface. In *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 1–11, 2025.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

[5] Jesse T Gonzalez, Sonia Prashant, Sapna Tayal, Juhi Kedia, Alexandra Ion, and Scott E Hudson. Constraint-driven robotic surfaces, at human-scale. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–12, 2023.

[6] Ryo Suzuki, Ryosuke Nakayama, Dan Liu, Yasuaki Kakehi, Mark D Gross, and Daniel Leithinger. Lift-tiles: constructive building blocks for prototyping room-scale shape-changing interfaces. In *Proceedings of the fourteenth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction*, pp. 143–151, 2020.

[7] Yuki Onishi, Kazuki Takashima, Shoi Higashiyama, Kazuyuki Fujita, and Yoshifumi Kitamura. Waddlewalls: Room-scale interactive partitioning system using a swarm of robotic partitions. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–15, 2022.

[8] Lilith Yu, Chenfeng Gao, David Wu, and Ken Nakagaki. Aerorigui: Actuated tuis for spatial interaction using rigging swarm robots on ceilings in everyday space. In *Proceedings of the 2023 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–18, 2023.

[9] 金時学, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠. 7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 403–412, 2002.

[10] Masahiro Ohta, Takatoshi Yoshida, Tomoya Sasaki, and Kouta Minamizawa. Public hand: Proximity-aware manipulation of robotic hand shared with multi-user in robotic room. In *ACM SIGGRAPH 2025 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2025.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会