

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00701

研究開発課題名 Beyond 5G を活用した安全かつ効率的なクラウドロボティクスの実現

(1) 研究開発の目的

人やロボットと安心して共存・協働できる安全性と既存ロボットを凌駕する作業効率を両立するロボット制御の実現に向け、令和 5 年度は、実世界に存在するあらゆるオブジェクトをデジタル化したデジタルツインを構築ならびに、デジタルツインを通じて実世界の分析、未来の予測を行い、その結果を活用し実世界のロボットへ指示を行う技術について、シミュレーション・実機実験を通して、有効性を確認する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

日本電気株式会社 (NEC) <代表研究者>  
国立大学法人大阪大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 748 百万円 (令和 5 年度 209 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 確率的時空間デジタルツイン構築の研究開発

1-a. 適応的 3D センシング・転送技術 (日本電気株式会社)

1-b. 脳のマルチモーダル処理に倣うオブジェクト認識 (大阪大学)

研究開発項目 2 確率的時空間デジタルツインを活用したロボット制御の研究開発

2-a. 確率的時空間デジタルツインに基づくエッジ/クラウド協調制御 (大阪大学)

2-b. リスクセンシティブロボット制御 (日本電気株式会社)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	4	1
	外国出願	18	13
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	20	11
	標準化提案・採択	1	0
	プレスリリース・報道	10	8
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 : 確率的時空間デジタルツイン構築の研究開発

1-a. 適応的 3D センシング・転送技術

適応的 3D センシングでは、複数のセンシングロボットを用いた協調型センシング経路生成手法を開発し、死角による搬送ロボットの速度低下を抑えつつ、天井敷設型と比較し、センシン

グデータ量を 1/4 に削減できることを実機検証にて確認した。

適応的 3D 転送技術では、受信端末でのメッシュ品質を維持するため、形状に合わせて点群データの間引、転送を行うことで、視聴品質を維持しつつ、転送量を 1/20 に削減できることを確認した。

3D データ圧縮技術では、デプス画像を H.264 で圧縮転送し、復号後、ディープラーニングによるデプス値復元・マスク処理により、1Mbps(約 1/200)の圧縮率で誤差 5cm の精度でデプス値を復元できることを確認した。

学習データ収集・生成技術では、少量の教師データから学習データを擬似生成する技術により、精度劣化を抑えつつ学習データの作成コストを 1/100 以上削減できることを確認した。

#### 1-b. 脳のマルチモーダル処理に倣うオブジェクト認識

脳のマルチモーダル処理モデルを用いたオブジェクト認識技術として、人の脳が行う観測と意思決定をモデル化したベイジアンアトラクターモデル (BAM) と、複数のモダリティにおける観測情報を統合した推定を行うベイズ因果推論 (BCI) モデルによって、単一オブジェクトを対象とするオブジェクト認識を開発した。また、同手法に対し、条件付き確率場 (CRF) を組み合わせることで、複数のオブジェクトの認識結果が、既知の制約 (例えば同じ種類の物体は 1 つしか存在しない) に対して整合性を持つよう認識されるように拡張を行い、4 オブジェクトの映った公開データセットに対する認識率が、93.8% から 98% にまで向上できることを示した。このマルチモーダル認識手法について、目標としていた 100ms 以内の実行が行えることを確認した。今年度はさらに、直前の認識結果は現在の認識結果と近いという時間的な制約を含めた方式へと拡張した。また、あらたに LiDAR を用いた位置モダリティでの認識手法を開発し、既存の手法との統合を行った。これらの手法をエッジ端末およびクラウド端末を想定した機器上に実装し、認識したオブジェクトをクラウド上にデジタルツインとして表現 (GUI 表示) するデモ環境を構築し、GUI の描画周期である 1 秒に対してリアルタイムに認識結果を反映可能であることを確認した。

### 研究開発項目 2：確率的時空間デジタルツインを活用したロボット制御の研究開発

#### 2-a. 確率的時空間デジタルツインに基づくエッジ/クラウド協調制御

2022 年度までに確率的時空間デジタルツインのアプリケーションとして、ロボットの周囲の移動する障害物位置の把握・予測方式を確立、さらに、エッジ側で各エッジが担当する狭い領域の状況について、確率的時空間モデルを構成・更新、クラウド側では複数のエッジが構築した確率的時空間モデルを束ね、広範囲の時空間確率モデルを構成・更新することにより、リアルタイムに障害物の状況を予測する手法の検討を進めた。2023 年度では、これまでに検討を行った方式について、実際のセンサーデータを入力とし、リアルタイムに状況を更新し、ロボット制御に情報を提供するシステムとして開発し、実際の倉庫環境においても、ロボット制御に必要な障害物の予測を行いつつ、情報の送出手がが必要な地点の数を 80% 以上削減できることを確認した。

#### 2-b. リスクセンシティブロボット制御

2022 年度開発したリスクセンシティブ確率制御技術および上述の研究開発項目 2-a での確率的時空間デジタルツインによる移動障害物の存在確率予測を実機の搬送ロボット制御システムへと実装した。さらに、実際の倉庫環境で実機検証を行い、移動障害物 (歩行する作業員等) を安全に回避しながら効率的に搬送できることを実証した。既存搬送ロボットと搬送効率 (平均搬送速度) を比較検証した結果、提案技術によって搬送効率を 2 倍に改善できることを示した。これにより、本年度の目標である 1.5 倍を上回って達成することができた。

### (8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

研究開発成果の実用化として、NEC の関連事業で成果を活用して、社会実装していくことを計画している。NEC では倉庫内搬送に関して、協調搬送ロボットを提供しており、新たにフォークリフトの自律遠隔搬送ソリューションを開発している。研究開発項目 2 の成果を、これらの事業に適用す

ることを事業主管部門とも合意しており、既に製品への実装も進めている。これらは 2024 年度にも上市の計画である。研究開発項目 2 の成果で個別のロボットの導入が進むことで、倉庫現場全体のデジタルツインを構築して業務を効率化、省人化、ロバスト化していくニーズが高まるという想定は NEC の事業部門とも共有しており、研究開発項目 1 についても並行して実用化、社会実装を進めていく。ロボット制御に続いて 2025 年度に顧客現場での実証、2026 年に上市の計画である。事業化の節目では物流業界の DX を対象としたトレードショーへの出展や広報を実施する予定である。

標準化についてはすでに述べた通り、IOWN Global Forum での提案を継続する。機能仕様への入力だけでなく、2024 年度中に本研究で開発した実機デモを IOWN Global Forum で披露することも計画している。これらの活動は、本委託研究の受託者が設立、運営している大阪大学内に設置された NEC Beyond 5G 協働研究所に引き継がれて実施予定である。

実用化・社会実装の展望として、倉庫内搬送ロボット（協調搬送ロボット、自律遠隔フォークリフト）の導入が広がることで省人化を実現し、物流量の増加と労働人口減少の需給ギャップを埋めることに貢献する。特に 1 つの現場で多数台のロボットを運用する場合に、現場全体の状態を認識することで、多数台を安全かつ効率よく運用可能なデジタルツインが有効であると考えている。倉庫内業務の DX を進展させることは社会全体で現在の B2C、B2B の物流サービスのレベルを維持していくことへの一助となる。

本研究の成果の活用は倉庫内に留まらない。NEC Beyond 5G 協働研究所では倉庫より開放的で様々な人が生活する環境、例えば大学キャンパスや小売店舗でのサービスロボットの実現に活用することを計画している。そのようなサービスロボットでは本委託研究で実現しているような作業員とロボットが衝突しないという制御だけでなく、人をサポートするようなロボット制御や、人が安心や信頼を感じるようなロボット制御が必要になると考えており、新たな研究開発に取り組んでいくことを計画している。また同じく NEC Beyond 5G 協働研究所では確率的デジタルツインの対象を空間だけでなく人そのものに拡張することに取り組んでいる。現在はサービス付き高齢者住宅を運用する一般社団法人日本モンテッソーリケア協会とも連携し、介護が必要な認知症の方の心の状態の理解、予測に確率的デジタルツインを活用する[3]ことに着手している。心の状態の理解、予測は現在業界で課題になっている介護者の負担を減らすことだけでなく、被介護者がより豊かな生活を送ることに寄与できると考えている。

倉庫や大学キャンパス、小売店舗でのロボットの運用、介護施設での心の状態の理解・予測とも、Beyond 5G ならではの新たなアプリケーションとなる。多数台のロボットを安全に運用するための制御通信や、人の心の状態を行動や発言、表情から理解・予測するためのセンシングデータの収集には、エンドエンドで性能を保証できるような通信や多数のセンシングデバイスが容易に接続可能なネットワークが必要であり、Beyond 5G がこれらの基盤となりアプリケーションとともに社会実装が進むと考えている。