



ムーンショット目標 1

2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から
解放された社会を実現

実施状況報告書

2025 年度版

生体内サイバネティック・アバターによる

時空間体内環境情報の構造化

新井 史人

東京大学 大学院工学系研究科



【目 次】

生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化	1
PM：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA の駆動技術	3
課題推進者：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）	
協調遠隔操作による生体内 CA の機能デバイス技術	5
課題推進者：芳賀洋一（東北大学大学院医工学研究科 教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA のバイオマテリアル技術	7
課題推進者：伊藤大知（東京大学工学系研究科 教授）	
分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術	9
課題推進者：新津葵一（京都大学大学院情報学研究科 教授）	
分散遠隔操作による生体内 CA の位置計測技術	11
課題推進者：安在大祐（公立大学法人大阪 教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA の時空間体内環境情報の構造化技術	13
課題推進者：森健策（名古屋大学 教授）	
協調遠隔操作による生体内 CA の遠隔操作技術	15
課題推進者：青山忠義（名古屋大学 教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA の機能評価技術	17
課題推進者：丸山央峰（名古屋大学 准教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA のシステム設計と実証評価	19
課題推進者：藤城光弘（東京大学医学部附属病院 教授）	
分散・協調遠隔操作による生体内 CA の投薬モニタリングと実証評価	21
課題推進者：川嶋啓揮（名古屋大学大学院医学系研究科 教授）	
分散遠隔操作による生体内 CA の実用化技術	23
課題推進者：吉田慎哉（芝浦工業大学 教授）	

分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術の実証評価	25
課題推進者：大西弘二（大塚製薬株式会社 ポートフォリオマネジメント室 CNS デジタルソリューション推進プロジェクトリーダー）	
協調遠隔操作による生体内 CA の実証評価サポート	27
課題推進者：小澤聡（富士フイルム株式会社 メディカルシステム事業部 メディカルシステム開発センター 統括マネージャー）	
生体内 CA の基礎研究・技術	29
課題推進者：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）	
生体内 CA の抗体応用技術	31
課題推進者：新藏礼子（東京大学定量生命科学研究所 教授）	

2025 年度研究開発プロジェクト実施報告書

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」】

生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化

PM：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

生体内 CA が拓くヘルスケアおよび新しい医療を目指し、生体内 CA を、分散遠隔操作による生体内 CA（以後、分散 CA）と、協調遠隔操作による生体内 CA（以後、協調 CA）に分類し、研究開発を行った。

・分散 CA では、体内環境を時空間的に計測、モニタリングし、必要に応じてピンポイントに投薬するために必要な、デバイス、計測、通信、加工、材料等のハードウェアと、情報を呈示して体内環境マップを構築する情報呈示に関する基礎技術を開発した。世界最小クラスのサイズ・消費電力での温度・pH・画像センシング技術の開発に成功した。カプセル型生体内 CA は、FIH に向けて製造技術を開発し、量産化工程の目途を立てた。個人の生体情報と診療、服薬他の履歴情報が紐づいた、“時空間体内環境情報”を提示する基礎技術を開発した。IgA 抗体を用いて特定の細菌を蛍光で可視化した。健康モニタリングだけでなく、炎症の検出やごく早期の癌を検出して治療する「新しい医療」を拓く可能性を示した。

・協調 CA では、通常では採取が困難な組織・細胞の生体組織診断のための機構、計測、通信、エネルギー供給、材料などに関して基盤的な技術を開発した。採取する組織のトラクション制御と視野拡張によって、操作性を向上する技術を開発した。医師による評価を企業メンバーと協力して進め、E³LSI の課題を整理した。生体と物理特性が類似する評価用の患者モデルを独自に開発し、研究開発を加速した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

・生体内 CA の体内での位置推定技術を確立した。基礎実験環境において 1 cm 以下の推定精度を達成した。複数の生体内 CA の同時位置計測においても 1 cm 以下の推定精度を達成した。

・検診における画像情報から、体内環境情報を時空間体内環境情報上にマッピングする手法を開発した。

・ボタン電池を搭載した生体内 CA を用いたブタへの適用実験を実施し、服用後 3 日以内に全個体から安全に排泄されることを確認した。これにより、安全性に関する重要な知見が得られた。

・マウス腸管において、W27 IgA 抗体が集積する部位に粘膜接着腸内細菌が集積する傾向があることを見出した。また、臨床現場から提供されたサンプルの解析から、早期がん患者では患者由来の IgA 抗体も異常があることを見出した。早期がん可視化技術の可能性など、新しい診断につながる知見を得た。

・生体内 CA の体内通信技術を開発し、生体ブタを使った実験によって、体内通信の有効性を実証した。

2) 代表的な論文

・Y. Wu, et al., "A 1.4-V 260-pW 1-mm² 65-nm CMOS Temperature/pH Sensing IC Featuring Voltage-Stacking Timer and Wireless Transmitter for Stomach-Acid-Charged Tablet-Type Digital Pills with Long-Term In-Body Monitoring", IEEE Nordic Circuits and Systems Conf., Oct. 2025.

体内における長期センシングを目的としたタブレット型デジタル錠剤用 IC を提案。電圧スタッキング技術を採用することで、高電圧充電と充電リサイクルを実現し、動作寿命を延長。65nm 低消費電力 CMOS 技術で製造された試作チップの面積は、温度・pH センサ、タイマー、無線送信器を含めて、1 mm² である。測定結果から、1.4 V 電源下での消費電力が 260 pW であることが確認された。

3) 代表的な特許

・PCT/JP2025/033184 「生体内装置」

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散・協調遠隔操作による生体内 CA の駆動技術

課題推進者：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、分散・協調遠隔操作による生体内 CA（以下 CA）の駆動技術に関連した研究開発を推進し、当初のマイルストーンを全て達成し、本プロジェクト後半5年に向けた重要基盤となる成果が得られた。

- 1) 磁気センサによるカプセル型 CA の位置計測データと、光学センサによる人体モデルの位置計測データを同期させて時空間的に統合し、時空間体内環境マップ上に CA の位置を表示する手法を示し、実験的に有効性を得た。IEEE MHS2025 Best Paper Award 受賞（新井 PM、安在 Pf 連携成果）。
- 2) カプセル型 CA を外部磁場によって腸の表面に固定し、回転ブラシによって腸内細菌を採取する機構を開発した。川嶋 Pf と連携し、生体ブタの小腸を使った実験で、回収した腸内細菌の 16S rRNA 遺伝子解析で、未同定の配列の割合は 1%未満にとどまり、分類学的同定の信頼性が高いことを示した。
- 3) 金井プロジェクト関谷 Pf との連携により、形状記憶ポリマー（SMP）ヘリカル構造体表面に柔軟導電性材料を付加し、導電部のインピーダンス変化による CA 変形検出の原理検証結果を得た。
- 4) 内視鏡的粘膜下層剥離術(ESD)を想定した遠隔操作システムの開発を進め、藤城 Pf ら医師の操作による検証実験を実施した。腸管モデル内に設置した粘膜モデルを用いて、ESD モジュールにより切除部位の別視点観察および切除部位端部のワイヤ牽引補助を行うと同時に、内視鏡を介した電気メスで患部切除を行う協調操作に成功し、内視鏡と CA からなる協調操作システムの有効性を確認した。
- 5) 内視鏡を体内無線通信の中継局とし、通信によって CA を遠隔操作するシステムを開発した。松村プロジェクトと連携し、体内無線通信用アンテナは、Bluetooth の 2.4 GHz 帯域内で反射係数が-10 dB 以下(信号の反射が 10%未満)となるように、インピーダンス整合を行った。人の誘電特性を模擬した体内モデル内で評価し、通信距離 7 cm 以下で遅延時間が 200 ms 以内に動作することを確認した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

- ・分散遠隔操作による生体内 CA では、時空間体内環境マップ上に CA の位置を表示する手法を示した。これは、本プロジェクトが目指す体内状態をわかりやすく呈示する概念の実証に大きく貢献した。また、カプセル形状の CA によって腸内細菌叢を非侵襲的に採取することに成功した。これは、脳腸相関をはじめとする腸内細菌叢に関わる体内の未解明な現象を明らかにするための基盤技術として大きく貢献した。
- ・協調遠隔操作による生体内 CA では、体内通信の概念を提案して特許出願し、生体ブタの大腸を使った動物実験によって、体内通信の有効性を実証した。これは、本プロジェクトが目指す CA を用いた超早期診断や、ESD などの消化器系疾患に対する新しい医療の基盤技術として大きく貢献した。

2) 代表的な論文

- ・T.Yamanaka, et al., "Deployable and Stiffness-Variable Miniature Actuator with Water Circulation Channel and Shape Memory Polymer." Soft Robotics, 21695172251413435, 2026

形状記憶ポリマー梁を有する分離式 ESD モジュールを用いて、腫瘍牽引補助の実現可能性を検証した。

- ・武田健嗣ほか、「内視鏡の中継局とした体内無線通信システム用アンテナの評価」, 第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2025. SI2025 優秀講演賞を受賞。

内視鏡先端の中継アンテナを用いた体内無線通信システムを提案し、通信性能を評価した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

協調遠隔操作による生体内 CA の機能デバイス技術

課題推進者：芳賀洋一（東北大学 大学院医工学研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、課題「協調遠隔操作による生体内 CA の機能デバイス技術」において、腸内に安全に挿入、展開固定、および安全に回収される、らせん形状およびリング形状のバルーン型足場と、足場に搭載の各種 CA について求められる要求仕様の実現と腸内への安全な挿入、固定、留置を目標として研究を推進した。

牽引 CA において安全に体内に挿入留置および回収可能な形状と大きさにて、牽引力を測定しながら手術部位の牽引操作を行えるようにした。力センサー搭載を病変部と牽引ワイヤー端の間に配置することで $0 \sim 45^\circ$ の範囲で傾きが生じても出力に影響を受けずに正しい牽引力を計測でき、これによりフィードバック制御などにより牽引力を $0.05 \sim 0.66 \text{ N}$ の範囲にて適切な値で維持し安全かつ効果的な内視鏡手術手技が可能になることを示した。また、らせん形状の足場に CA を搭載し内視鏡オーバーチューブを用いて挿入、展開固定できることを実現した。さらに、腸内の特定の場所で長時間計測および投薬などの機能を果たすことを目指したリング形状足場を試作評価した。内蔵されるコイルは拡張して径を 30 mm 以上に大きくでき、内壁固定により蠕動などによる移動がないことから、体外のコイルとの効率的かつ安定的なワイヤレス給電などが実現できる。この足場を小さく折り畳んだ状態で包埋処理し、所定の場所で展開し腸内に固定できる機能の確認を行った。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

らせん形状足場に搭載される力センサーを搭載した牽引デバイス開発により、腸内の内視鏡治療における協調遠隔操作の有効で具体的手段を提供したこと、およびコイルを内蔵したリング形状足場の提案と試作評価により体内局所に固定される比較的径の大きいコイルを用いた効率的かつ安定的なワイヤレス給電とワイヤレス通信、および安定した体内位置の把握を可能にする道筋を拓いた。これらによりプロジェクト全体の進捗に寄与した。

2) 代表的な論文

・T. Tanada et al., "Air-driven spiral scaffold mechanism for a group of mini-robots working together in the intestine", *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2025.

内視鏡とオーバーチューブを用いて腸内に挿入、拡張し、各種生体内 CA デバイスを腸内局所に保持固定するらせん形状バルーン型足場の開発。牽引デバイスの牽引力の負荷に耐える固定力を示すと共に、作業後はオーバーチューブを介して安全に回収できる構成と手技を提案した。

・X. Gao et al., "Traction Microsystem with Force Sensing for Colon Endoscopic Submucosal Dissection", *Sensors and Materials*, 2025.

内視鏡的粘膜下層剥離技術（ESD）において適切な力を維持し手術部位を牽引することで、切除手技を安全かつ確実に行う牽引 CA を開発した。内部には電磁モーターと病変部を牽引するワイヤーを有し、力センサーを搭載することで牽引力を計測し適切かつ安全なフィードバック制御を可能とする。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散・協調遠隔操作による生体内 CA のバイオマテリアル技術

課題推進者：伊藤大知（東京大学 工学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発課題 1-4「分散・協調遠隔操作による生体内 CA のバイオマテリアル技術」に関して、(1)ヘリカルリング型 CA 用の組織粘着性材料の開発、(2)ステント型分散 CA の温度応答性ナノドラッグの開発とステント CA への実装、(3)協調 CA が用いる消化管保護材料、そして(4)協調 CA が用いる抗体を基盤とした腸内細菌を識別する抗体 CA の開発を目指し研究を実施した。

ヘリカルリング型ステント CA の表面修飾や協調 CA の消化管保護材料として実装可能な材料として、ベンズアルデヒド修飾アルギン酸 (AL-ABA) の開発成果を報告した。本材料はアルギン酸由来の高い生体適合性を持ち、ベンズアルデヒド基により組織接着性を持ちながら、カルボン酸と水酸基によるアルギン酸固有のカルシウムゲル化も持っている。後半 5 年において、FIH を目指して、優れた消化管保護材料の開発を設計する基盤技術を確立した。またヒアルロン酸とゼラチンから成る HA/GL ゲルについては、ゼラチン誘導体 (GL-CDH) に代わってデンドリチックポリイミン (DPI) を導入したハイドロゲルを開発し、組織接着性やシアシニング性を改善する検討を行った。

ステント型 CA においては、柔軟性と物質透過性をあわせもつ、新たなステント被覆膜の開発にも成功した (特許出願準備中)。新たに小型の無線給電装置を導入し、ステント CA プロトタイプとしてドキソルビシンを封入した温度応答性リポソームを膜型デバイスにアSEMBルしたステント被覆膜を、小型動物腹腔内に移植し、磁場誘導加熱による OnDemand 薬物放出試験を実施した。大阪・関西万博の展示会場では、ステント型 CA のプロトタイプを展示した。さらにプロトタイプステント型 CA は、森謙二 Pf が新たなステントデリバリーシステムを開発し (森謙二 Pf により特願 2026-050440 として出願)、川嶋 Pf・藤城 Pf によって大型動物実験による投与研究を実施した。

抗体 CA の開発においては、あらたに生体適合性の高いナノ粒子の合成や、点変異を導入したタンパク質の設計と発現を行い、抗体を修飾する基盤技術を構築した (特許出願準備中: 東京大学承継決定・受付番号: 25-0287-001)。この技術を用いて、新藏 Pf・藤城 Pf と連携し、実際に抗体 CA の最初のプロトタイプを作成した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

後半 5 年において基盤となる新たな消化管保護材料 AL-ABA の開発に成功した。

2) 代表的な論文

・Inagaki, Ito et al. "In Situ Ionically Cross-Linkable Benzaldehyde-Modified Alginate and Its Bilayer Structure as a Tissue Sealant for Dural Closure", *Biomacromolecules*, 2025, 26(9), 5888-5902

昨年度に報告した食道狭窄防止材料として潜在的に期待されるアルギン酸に組織接着性を付与した、ベンズアルデヒド修飾アルギン酸を開発した。Ames テストで変異原性がないことも確認し、中型動物の皮下包埋試験によってアルギン酸と変わらない高い生体適合性も示されている。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術

課題推進者：新津 葵一（京都大学 大学院情報学研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発課題 1-5「分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術」に関して、分散遠隔操作可能な生体内センシング応用半導体集積回路試作を実施した。分散遠隔操作可能な生体内 CA のセンシングに応用可能な半導体集積回路について、回路アーキテクチャの設計と試作による実デバイス検証を実施した。さらに、超小型・超低消費電力の無線接続機能付き超小型カメラを実現する CMOS イメージセンサを開発した。

先端 CMOS プロセス(22nm 超低消費リーク電流 CMOS プロセス)で製造した 0.00028mm^2 の半導体集積回路チップを用いて、 1pW 以下の消費電力での温度・pH センシングを達成した。

半導体集積回路を搭載した、生体内で分散遠隔操作なサイズの生体内 CA のプロトタイプ試作を実施した。さらに、生体内を模擬した環境において、温度・pH・画像センシングの可能性について検証した。先端 CMOS プロセス(22nm 超低消費リーク電流 CMOS プロセス)で製造した半導体集積回路チップを用いて、ステントや内視鏡先端に搭載可能なサイズ(0.017mm^2)の電子モジュールを実装した。この電子モジュールを用いて、温度・pH・生体分子・画像センシング、ならびに、体外への無線データ送信を実現した。

先端 CMOS プロセス(22nm 超低消費リーク電流 CMOS プロセス)で製造した 0.5mm 角以下の半導体集積回路チップを用いて、 1mW 以下の消費電力で 256 ピクセルでのカラーイメージングを実現した。フォトダイオードの出力を、自己発振型 2 倍昇圧回路へと接続する回路アーキテクチャの採用により、待機電力ゼロでのイメージングを実現することに成功した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

生体内に於ける長期センシングを可能とするタブレット型デジタル錠剤用 IC の回路アーキテクチャを確立した。胃酸で発電した電力を集積回路チップ内のコンデンサに蓄電し、その蓄電された電力を用いて腸内環境モニタリングを行うタブレット型デジタル錠剤用 IC チップの原理実証に世界で初めて成功した。

2) 代表的な論文

・Y. Wu, I. Yamane, K. Ohnishi, F. Arai, K. Niitsu et al., "A 1.4-V 260-pW 1-mm^2 65-nm CMOS Temperature/pH Sensing IC Featuring Voltage-Stacking Timer and Wireless Transmitter for Stomach-Acid-Charged Tablet-Type Digital Pills with Long-Term In-Body Monitoring", IEEE Nordic Circuits and Systems Conf. (NorCAS 2025), Oct. 2025.

本論文では、体内に於ける長期センシングを目的としたタブレット型デジタル錠剤用 IC を提案する。電圧スタッキング技術を採用することで、高電圧充電と充電リサイクルを実現し、動作寿命を延長している。65nm 低消費電力 CMOS 技術で製造された試作チップの面積は、温度・pH センサ、タイマー、無線送信器を含めて、 1mm^2 である。測定結果から、1.4V 電源下での消費電力が 260pW であることが確認された。

3) 代表的な特許

・PCT/JP2025/033184 生体内装置

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散遠隔操作による生体内 CA の位置計測技術

課題推進者：安在大祐（公立大学法人大阪 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度の課題は「生体内 CA 位置計測技術の基本原理の確立」及び「生体内 CA の複数同時位置計測技術の実現」であり、生体内 CA 位置推定の基本原理を確立と複数位置推定への拡張を目標に研究を推進した。生体内 CA 位置計測の基本原理の確立において、体内で高精度に位置計測可能な磁界を基にした位置推定技術を確立した。各個人差に影響するパラメータを事前補正することなく位置推定可能な技術を確立し、基礎実験環境において 1 cm 以下の推定精度を達成した。また、磁界に基づく位置計測技術を複数 CA にも拡張し、同時に 2 台以上の複数の生体内 CA を計測可能な技術の確立にも取り組みを行った。拡散系列を利用した信号分離技術を磁界による位置計測技術に適用し、拡散系列長の設定により同時計測する生体内 CA を適切に設定可能であることを確認した。実験による測定データを用いた検証により、複数の生体内 CA の同時位置計測においても 1 cm 以下の推定精度の達成が確認された。以上より、本年度の課題を全て実施し、当年に設定されたマイルストーンも達成された。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

複数の生体内 CA にも拡張可能な磁界による位置計測技術の確立により、体内のカプセル型生体センサが取得した生体情報（深部温度や pH など）に対して計測位置の情報を付加可能となった。体内からの新しい健康管理に繋がる時空間生体内情報（体内の深部温度や pH がどこでどのように分布しているかを示すマップ）の構築において重要な成果であり、プロジェクト全体の進捗に大きく寄与した。

2) 代表的な論文

・T. Kobayashi, J. Hyry, M. Fujimoto, D. Anzai, “Weight optimization of MIMO-UWB distributed beamforming for implant communications,” Scientific Reports, vol. 16, no. 5920, Jan. 2026.

本論文では複数の生体内 CA を前提とした生体内通信システムに関する技術提案を行っており、複数の生体内 CA の協調動作により生体内通信の通信特性が大幅に向上する可能性を示した。本技術は複数の生体内位置計測へも拡張可能な要素技術であり、より多くの生体内 CA 同時計測の実現が期待される。

・R. Takano, J. Hyry, T. Kobayashi, D. anzai, “Performance Evaluation on Multiple Implantable Device Localization Based on Magnetic Fields,” 20th EAI International Conference on Body Area Networks, pp. 1-7, Dec. 2025.

本論文は、磁界に基づく生体内 CA の位置計測技術を複数の生体内 CA への位置計測に拡張可能な提案を行っており、拡散系列に基づく信号分離技術を適用することで任意の生体内 CA からの磁界信号を抽出し高精度な位置計測が可能であることを示した。

・T. Egusa, T. Kobayashi, J. Hyry, M. Fujimoto, S. Ata, D. Anzai, “Evaluation of 3-Dimensional In-Body Device Localization Using Machine Learning Algorithms with Reduced Training Data,” 20th EAI International Conference on Body Area Networks, pp. 1-12, Dec. 2025.

本論文は磁界に基づく生体内 CA の位置計測において機械学習モデルの適用を適用した方式を提案し、機械学習アルゴリズムの適用による精度の向上を示しただけでなく、学習モデル構築に必要なデータ数の削減手法も検討し、実環境における生体内 CA 位置計測の高精度化の実現可能性を示した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散・協調遠隔操作による生体内 CA の
時空間体内環境情報の構造化技術

課題推進者：森 健策（名古屋大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発課題では、個人と一緒に成長・進化する時空間体内環境情報の構築手法の実現を目指す。特に、日常の健康モニタリングにおいて、自らの体内環境をコンピュータ上の仮想空間内に構築し、その環境を日々モニタリングすることができるための技術の開発を進めてきた。本年度は、検診における画像情報から消化管に関する個人の形態に関する体内環境情報を統合的に構築ができる手法としての深度推定手法、生体内 CA から得られる複数のセンシング情報と位置情報を基にして体内環境情報を時空間体内環境情報上にマッピングする手法、消化管領域における CA 群の制御のために必要な情報を時空間体内環境情報から深度推定などを基にして取得する方法、消化管領域に関し 3 年間のスパンにおいて時空間体内環境情報を成長進化させる手法などについて開発を行うとともに、これらの手法によって生成される情報を VR 等の技術を用いて可視化する手法の開発を進め、2025 年日本国際博覧会（大阪・関西万博）にて展示を行った。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

体内 CA から得られる映像（現時点では内視鏡映像）から空間環境情報を再構築するための深度推定手法の開発に取り組んだ。これにより、本研究課題の大きな目標である、体内、特に消化管に関する時空間体内環境情報の構築に貢献した。

2) 代表的な論文

・M. Oda, J. Qiu, Y. Hayashi, T. Kitasaka, K. Mori, Fine-tuning Foundation Monocular Relative Depth Estimation Model to Metric Depth Estimation Model by Low-rank Adaptation for Colonoscopic Video, Computer Assisted Radiology and Surgery 39th International Congress and Exhibition, June 17 – 20, 2025, [P0-118]

基盤モデル DepthAnything V2 (DAM) を用いた、大腸内視鏡検査における単眼深度推定のためのリソース効率の良いファインチューニング戦略について調査する。Low-Rank Adaptation (LoRA) の適用を DINOv2 エンコーダの特定の層に限定していた先行研究 (SurgicalDINO 等) とは異なり、我々は DAM の複数のコンポーネントに様々なタイプの LoRA を適用した。

・X. Yu, W. Li, Y. Hayashi, M. Oda, T. Kitasaka, K. Mori, EndoRDE: Robust self-supervised monocular depth estimation with pseudo guidance for colonoscopic videos, Proc of SPIE, vol. 13927, 139270B-1, (2026) <https://doi.org/10.1117/12.3087311>

内視鏡下での深度推定はナビゲーションや 3D 再構築に重要だが、低照度・低テクスチャ環境や GT 不足が課題となる。提案手法 EndoRDE は、基盤モデルによる疑似ラベルと混合データ拡張を用いて自己教師あり学習の偏りと頑健性を改善する。2 系統の深度ネットの一貫性を保つことで汎化性能を高め、C3VD・SimCol3D で SOTA 性能を達成した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

協調遠隔操作による生体内 CA の遠隔操作技術

課題推進者：青山忠義（名古屋大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本研究開発項目では、生体内 CA の協調遠隔操作基盤の構築に向けて、頭部・手指動作を用いた没入型操作インターフェースと、単眼深度推定に基づく自動パン・チルト制御を開発してきた。没入型操作インターフェースでは、モータとロボットアームにより内視鏡のパン・チルト、ロール、抜去操作を遠隔から制御し、操作者はヘッドマウントディスプレイを介して頭部角度および手指動作により直感的に操作できる構成を実現した。未経験者 6 名を対象とした大腸モデルでの評価では、10 個の腫瘍モデルを探索する課題において、腫瘍検出率が従来操作の 45.0%から 62.2%へ向上し、完了時間は 364 秒から 276 秒へ短縮した。精神的負荷を示す NASA-TLX WWL のスコアは 76.6 から 56.8 へ低下し、SUS のスコアは 34.6 から 58.8 へ向上しており、提案する遠隔操作方式が、検出性能、作業効率、心理的負担、操作性の各面で有意な改善をもたらすことを示した。

加えて、生体内 CA の遠隔操作をさらに簡便化するため、単眼深度推定基盤モデル Depth Anything を用いた自動パン・チルト制御を構築した。本方式では、内視鏡画像から大腸管腔の最遠点をリアルタイムに推定し、その方向に先端姿勢を自動追従させることで、術者によるアングルノブの手動調整を不要とする。大腸モデルを用いた挿入実験では、操作者が挿入部のみを保持した状態で、パン・チルト角度を手動で調整することなく最深部方向への挿入が可能であることを確認した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

本研究の成果は、生体内 CA を協調遠隔操作するための基盤技術として位置づけられる。生体内 CA を直感的に操作しやすくする遠隔操作インターフェースと、医師側の大きな負担となっているスコープ先端姿勢を自動調整する技術を開発した。大腸モデルを用いた検証では、観察性能、操作効率、操作者負担の面で改善が確認されており、遠隔操作でも扱いやすく実用性の高い操作基盤となる可能性を示した。また、画像に基づいて進行方向を推定し、先端の向きを自動調整する仕組みにより、人とシステムが役割分担しながら協調して操作するという、生体内 CA プロジェクト全体の方向性に沿った基盤技術を示した。すなわち、本研究成果は生体内 CA を実用化へ近づけるうえで重要となる、遠隔から安全かつ扱いやすく操作するための土台を示したものである。

2) 代表的な論文

・K. Yokoe, Y. Funabara and T. Aoyama, “Intuitive Hand Positional Guidance Using McKibben-Based Surface Tactile Sensations to Shoulder and Elbow,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3254-3261, 2025. (Presentation of RA-L)

本研究は、生体内 CA を協調遠隔操作するための基盤技術の構築を目的とし、直感的な遠隔操作インターフェースと、画像に基づく先端姿勢の自動調整技術を開発した。大腸モデルによる検証を通じて、観察性能、操作効率、操作者負担の改善可能性を示し、人とシステムが役割分担しながら安全かつ扱いやすく操作するための土台を示した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散・協調遠隔操作による生体内 CA の機能評価技術

課題推進者：丸山央峰（名古屋大学 准教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、分散遠隔操作および協調遠隔操作の生体内 CA の機能評価基盤の確立に向け、複数の Pf が共通の物性指標および設計条件の下で機能評価を実施できる三次元ゲル臓器モデル群からなる評価プラットフォームの構築を目標として研究を推進した。

従来の含水系ハイドロゲル臓器モデルに代えて、不揮発性溶液を内部相とするゲル臓器モデル構築技術確立した。3D プリンタ造形およびモールド法で作製したモデルに対する内部溶液置換プロセスを確立し、内部溶液量の調整により、同一材料系で弾性率 20 kPa~8 MPa の制御を可能とした。少なくとも 1 か月大気中に保持した後も乾燥に起因する明らかな形状・弾性変化を生じないことを確認し、従来の含水系ゲルモデルで課題であった乾燥に伴う物性変化を抑制した。内部溶液に第四級アンモニウム塩を 50 wt%で溶解した導電性内部溶液を設計し、約 0.2 S/m (1 MHz) の生体軟組織と同一オーダーの導電率を有する導電性ゲルを実現した。これにより、モデルの一部を別材料に置換する追加工程なしに高周波電気メスによる切開が可能なゲル臓器モデルを構築した。加えて、この導電性ゲルは臓器モデルへ統合可能なひずみセンサとしても機能し、ゲージ率 3.5、破断伸び 200 %以上を示した。

分散 CA 評価プラットフォームとして、小腸・十二指腸・大腸の各ゲル臓器モデルを統合し、消化管全体モデルを構築した。透明大腸モデルを用いて安在 Pf の位置検出機能の評価実施可能性を確認し、分散遠隔操作の生体内 CA による時空間体内環境情報の構造化を評価できる基盤を構築した。協調 CA 評価プラットフォームとしては、3D プリンタで造形した大腸モデル（弾性率 1.7 MPa、膜厚 1.6 mm）の内壁に、粘膜下層（弾性率 100 kPa、厚さ 1.0 mm）および粘膜層（弾性率 20 kPa、厚さ 0.5 mm）を有し、模擬腫瘍を包埋したゲルパッチを実装した。直径 10 mm の模擬腫瘍に対し高周波電気メスによる粘膜切開および切除が可能であることを示し、部分大腸モデルおよび大腸全体モデルを新井 PM、芳賀 Pf、青山 Pf に供用して、CA 機能評価、内視鏡挿入および操作インタフェース評価の実施可能性を確認した。以上により、分散 CA について消化管全体モデルを用いた評価基盤を、協調 CA について大腸モデルを用いた評価基盤をそれぞれ構築し、年度マイルストーンを達成した。複数の医療系展示会で医師から触感および電気メス切除性に関する定性的所見を収集し、今後定量化すべき評価項目と改良方針を整理した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

複数の Pf が共通の物性指標および設計条件の下で機能評価を実施できる評価基盤を構築した。不揮発性溶液を内部相とするゲル臓器モデル構築技術により、長期安定性、導電性、電気メス切開性、ひずみセンサ機能を実現し、分散 CA および協調 CA の体外評価基盤の確立に寄与した。

2) 代表的な論文

・丸山央峰ほか、「3D プリンタブルハイドロゲルによる高伸張性ひずみセンサ」, 第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2025. (SI2025 優秀講演賞受賞)

本論文では、3D プリンタで造形可能な導電性ゲルからなるひずみセンサ（破断伸び 100%以上）を作製し、ゲル大腸モデルに貼り付け大腸内部の圧力を 0.057 mmHg の分解能で計測することに成功した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

【分散・協調遠隔操作による生体内 CA のシステム設計と実証評価】

課題推進者：藤城光弘（東京大学 医学部附属病院 教授）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発課題 3-1「分散・協調遠隔操作による生体内 CA のシステム設計と実証評価」に関して、協調遠隔操作および分散遠隔操作のいずれにおいても、生体内 CA に求められる機能要件並びに安全性を明確化することを目標として研究を推進した。

協調 CA について、求められるマルチタスク全工程における要素技術が概ね確立され、これを受けて、工学系研究者らが開発を進めている生体内 CA の有効性検証および改善点の抽出を目的とした実験を開始した。生体内 CA を模擬したモデルとして富士フイルム社の TRACMOTION™ の有効性を少数の動物モデルを用いて確認するとともに、人に対しての組織採取の際の安全性を確認した。得られた結果を踏まえて、改良版の制作を進めている。

分散 CA については、FIH 試験開始準備の一環として、安全性および環境配慮設計に関する実施要領の詳細な確認を完了し、その内容を工学系研究者らと共有した。FIH 試験実施準備も進めている、温度と pH を測定する生体内 CA の他に、医学的見知から測定すべき有望なマーカーの選定に向けた検討した。胃癌において有意に発現する代謝物の中から Prostaglandin E2(PGE2)および、その代謝に関連する酵素である 15-hydroxy prostaglandin dehydrogenase (HPGD)を、癌検出マーカーの候補として抽出した。

協調遠隔操作および分散遠隔操作に共通する取り組みとして、動物倫理に配慮し、1 頭の生体豚を用いて、協調・分散それぞれの開発段階にある複数の生体内 CA モデルの機能評価を実施し、各デバイスの開発を進める上で必要となる実験データの取得に成功した。

協調・分散遠隔操作による生体内 CA について、FIH において想定し得る E³LSI 課題の抽出及びその解決について引き続き検討を重ねたほか、大阪・関西万博の展示会場で来場者にアンケートを実施し、希望する利用目的や不安・懸念事項等に関する一般市民の意見を一定程度把握した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

牽引デバイスを併用した組織採取の際の有効性と安全性を確認した。デバイスの特性による改善すべき点も判明し、協調遠隔操作による生体内 CA の開発の進捗に寄与した。

2) 代表的な論文

・Miura, Fujishiro et al. "Effectiveness of a novel traction device (TRACMOTION) for endoscopic submucosal dissection using a scissor-type knife: An animal pilot study and clinical experiences", DEN Open 2025

生体内 CA を模擬した牽引デバイスの特性を動物実験で明らかにし、ヒトへの臨床使用にてそのデバイスの安全性と有効性を確認した。デバイスの特性から、有効的な使用には条件がある可能性があることが示唆され、今後改良品を開発する際の課題が判明した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散・協調遠隔操作による生体内 CA の投薬モニタリングと実証評価

課題推進者：川嶋 啓揮（名古屋大学大学院医学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、分散遠隔操作体内サイバネティック・アバター（CA）の開発を目的とし、CA が採取・測定可能なヒト由来検体と多様な健康状態（疾病）の関連情報の収集を推進した。具体的には、肝疾患 59 例の認知機能検査結果と腸内細菌叢の関連において、アンモニア産生菌や口腔由来細菌の増加と認知機能悪化の関連を示唆する結果などが得られた。基礎的検討として、膀胱癌モデルマウスを用いて腫瘍内 pH 中性化が免疫チェックポイント阻害剤のみならず、今後の治療の中心となることが予想される Kras 阻害剤の効果も増幅させる結果が得られ、今後背景の基礎的知見を集積する予定である。炎症性腸疾患の病態に関与する腸上皮細胞の防御機構に関与する PARD6B 遺伝子変異を世界初で見出し、作成した PARD6B 欠損マウスにおいて腸内細菌叢が乱れ自然腸炎を発症することなどの結果を得た。新井 PM チームが作成したカプセル型 CA に内包可能な腸管粘液採取ブラシを用い、ブタ小腸から採取された検体において通常臨床で使用しているブラシと同じ方法での細菌叢解析が可能であることを実証した。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

消化管内 pH を変化させるアンモニア産出菌の増加など腸内細菌叢変化が、腸内環境とは直接関係がないと考えられてきた認知機能という全身状態の一部と関連している結果が得られた。このことは開発を目指している消化管内 pH 測定 CA・腸管粘液採取 CA が人体応用されると、自宅などでも容易に全身状態の変化を把握することを可能として予防・治療に貢献しうること示唆し、CA 開発の社会的意義を担保する。

2) 代表的な論文

・Honda T, et al. “Gut microbes associated with functional cure of chronic hepatitis B.” Hepatol Int. 2025

慢性 B 型肝炎患者における機能的治癒（FC）と腸内細菌叢の関連を検討した。FC 群では腸内細菌叢の多様性に差は認めなかったが、酪酸などの短鎖脂肪酸を産生する細菌の相対的増加が特徴的であった。酪酸は HBV 産生を抑制する作用を示した。これらより、酪酸産生菌の増加が FC 達成に関与する可能性が示唆された。

・Takada Y, Kawashima H, et al. “Ampullary tumors exhibit increased Fusobacterium in both the tumor surface and surrounding duodenal mucosa during carcinoma progression.” Sci Rep. 2025

十二指腸乳頭部腫瘍における腸内細菌叢を解析した結果、癌では腺腫に比べ多様性が高く、Fusobacterium など特定菌の増加が認められた。特に Fusobacterium は腫瘍および周囲正常粘膜でも増加し、腫瘍進行とともにその割合が上昇した。これらの特徴的な細菌叢は腺腫との鑑別や腫瘍進展に関与する可能性が示唆された。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散遠隔操作による生体内 CA の実用化技術

課題推進者：吉田慎哉（芝浦工業大学 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、カプセル型生体内サイバネティックアバター（CA）の実用化に向けた基盤技術の確立を目的として、体温特化型および多機能型の双方について研究開発を推進した。その結果、当初設定したマイルストーンは達成され、実用化に向けた重要な技術的進展が得られた。

まず、体温特化型生体内 CA に関して、企業と連携して製造プロセスの有力候補を見出した。試作したデバイスを用いたブタへの適用実験を実施した。その結果、服用後 3 日以内に全個体から安全に排泄されることを確認した。これにより、生体内滞留に関する安全性の重要な知見が得られた。臨床研究や医療機器承認を見据えた非臨床試験における評価項目を体系的に整理した。各評価項目に対するデータ取得を開始し、一部について、基礎的な安全性データが得られた。性能評価の観点では、既存の海外のカプセル型深部体温計との比較試験を実施し、開発した生体内 CA が同等の測温精度を有することを確認した。

一方、多機能型生体内 CA に関しては、消化管内 pH の測定が可能なカプセルサイズの小型デバイスの試作に成功し、ブタの消化管内において正常動作を確認した。温度と pH の同時測定機能を有する統合型デバイスの開発にも着手し、基本動作の検証を完了した。これにより、生体内の複数生体情報を同時取得するための技術基盤が構築された。位置推定技術の高度化を目的として、MEMS 慣性センサおよび磁気コンパスを搭載した CA の試作を行った。姿勢、アンテナ特性、距離、方位、送信磁場強度に関する実験データの取得を進め、大規模データセットの整備を開始した。これにより、今後の高精度位置推定アルゴリズムの開発に向けた基盤を整えた。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

今年度は、ヒト適用に向けた大きなハードルの一つを乗り越えた。具体的には、加熱に弱いボタン電池電源を搭載した生体内 CA を、飲んでも安全な生体適合性樹脂で密封する製造工程に目処を立てることに成功した。製造のプロである企業とタッグを組むことで、研究室で一つひとつ手作りの段階を卒業し、いよいよ製品としての形が見えてきた。より安全で、安価に、誰もが健康管理に生体内 CA を使える未来に向けて、社会実装への準備は着実に進んでいる。

2) 代表的な論文

[1] ポリアニリンを用いた飲み込み型コンダクトメトリック pH センサの実現可能性の検討、菅澤伊吹樹、宮口裕、吉田 慎哉、電気学会論文誌 E（センサ・マイクロマシン部門誌）145(8)、170–176、2025 年 8 月

本論文は、pH 値に応じて導電率が変化するポリアニリン（PANI）を利用した pH 測定用 CA の実現可能性を報告した。本デバイスは、参照電極や複雑な回路を排除した簡易なセンサを採用する。独自の超低消費電力カスタム IC の使用と組み合わせることで、電源となるボタン電池数を削減する。これらは、デバイスの低コスト化と小型化に貢献する。実験の結果、提案するシステムは、小型ボタン電池一つで、6 秒に 1 回の測定を 5 日間継続できる低消費電力性を有していることを実証した。

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術の実証評価

課題推進者：大西 弘二 （大塚製薬株式会社 ポートフォリオマネジメント室 CNS デジタルソリューション推進プロジェクトリーダー）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発課題 3-4「分散遠隔操作による生体内 CA のセンシング技術の実証評価」に関して、TSMC 22 nm ULL CMOS プロセス サブ平方mm角・サブ 100 pW温度・pH・生体分子センシングを評価する方法を示した。

生体分子センシングを評価する方法として、生体内環境を模擬し、得られる電力を正確に評価する手法を確立した。具体的には、米国内において製品化済みのタブレット型服薬管理デジタル錠剤における胃酸発電出力を正確に取り出すための、ピンセット型専用治具を用いる手法を確立した。製品化済みのタブレット型服薬管理デジタル錠剤内に搭載されている半導体集積回路の負荷インピーダンスの影響を排除するための胃酸発電用金属電極のみで構成されるダミーシリコン基板を用いる手法を確立した。

これにより、デジタル錠剤内の半導体集積回路が温度・pH・生体分子センシングを行う際の、動作条件を正確に見積もることが可能となり、デジタル錠剤内に搭載される半導体集積回路の開発を加速させることに成功した。

上述の技術的な貢献に加えて、社会実装に向けたアプリケーション面の開拓にも貢献した。生体内 CA のセンシング技術を搭載したタブレット型生体内センシング機能付きデジタル錠剤における必要となるセンシング機能について、温度・pHに加えて、体内で生成される代謝産物がセンシング対象として期待されることを明らかにした。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

タブレット型生体内センシング機能付きデジタル錠剤の実現において、技術的課題となっている安定電源の確保の手段として、胃酸発電で得られた電力の半導体集積回路内オンチップキャパシタへの充電を提案し、世界で初めて原理実証に成功した。胃酸発電で得られた電力を昇圧することで、動作時間を延ばす回路アーキテクチャを提案した。当該技術について、PCT 出願を行った。

2) 代表的な論文

・Y. Wu, I. Yamane, K. Ohnishi, F. Arai, K. Niitsu et al., "A 1.4-V 260-pW 1-mm² 65-nm CMOS Temperature/pH Sensing IC Featuring Voltage-Stacking Timer and Wireless Transmitter for Stomach-Acid-Charged Tablet-Type Digital Pills with Long-Term In-Body Monitoring", IEEE Nordic Circuits and Systems Conf. (NorCAS 2025), Oct. 2025.

本論文では、体内に於ける長期センシングを目的としたタブレット型デジタル錠剤用 IC を提案する。電圧スタッキング技術を採用することで、高電圧充電と充電リサイクルを実現し、動作寿命を延長している。65nm 低消費電力 CMOS 技術で製造された試作チップの面積は 1mm² である。測定結果から、1.4V 電源下での消費電力が 260pW であることが確認された。

3) 代表的な特許

・PCT/JP2025/033184 生体内装置

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

協調遠隔操作による生体内 CA の実証評価サポート

課題推進者：小澤 聡（富士フイルム株式会社 メディカルシステム事業部 メディカルシステム開発センター 統括マネージャー）

1. 研究進捗状況と成果

研究開発課題 3-5「協調遠隔操作による生体内 CA の実証評価サポート」に関して、生体内 CA に求められる機能要件並びに安全性を明確化する実証評価サポートを推進した。

生体内 CA を模擬したモデルとして当社の TRACMOTION™ を提供し、その有効性を少数の動物モデルを用いて確認するとともに、人に対しての組織採取の際の安全性確認する実験をサポートした。得られた結果を踏まえて、改良版の制作を進めている。

上記の取り組みとして、動物倫理に配慮し、1 頭の生体豚を用いて、開発段階にある複数の生体内 CA モデルの機能評価を実施し、デバイスの開発を進める上で必要となる実験データの取得をサポートした。

協調遠隔操作による生体内 CA について、FIH において想定し得る E³LSI 課題の抽出及びその解決について引き続きサポートした。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

牽引デバイスとして当社の TRACMOTION™ を併用した組織採取の際の有効性と安全性確認する実験をサポートした。臨床使用の中で TRACMOTION™ の改善すべき点も判明し、協調遠隔操作による生体内 CA の開発の進捗に寄与した。また、改善すべき点について具体的な対応内容を当社内で詳細に検討し、TRACMOTION™ の改良を進めている。

2) 代表的な論文

該当なし

3) 代表的な特許

該当なし

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

生体内 CA の基礎研究・技術

課題推進者：新井史人（東京大学大学院工学系研究科 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、生体内 CA の基礎研究・技術に関して進めた。当初のマイルストーンを全て達成し、本プロジェクト後半5年に向けた重要な知見が得られ、社会実装に向けた研究計画を適切にアップデートした。

1) 本課題では、消化器系に限らず生体内 CA に関連する競合技術、新規技術の動向を把握し、現状の生体内 CA のコンセプト・計画をアップデートすること、および新規コンセプトを提示することを目的としている。生体内 CA の競合技術・新規技術の最新技術動向を把握するため、国内外問わず学会への参加や、最新の論文誌等の精査を進めた。その結果、本プロジェクトが提案している生体内 CA のコンセプトに類似するような研究事例や、本プロジェクトの計画を大きく変える影響を有するような研究事例は見つかっていないが、生体内 CA と関連するカプセル型デバイスにおいて、組織弾性[1]、血液[2]、血流[3]の検出など、高機能な検出・診断機能の付加が進められている。

昨年度は生体内 CA に不足している技術として、外部制御による移動機構を挙げた。そこで、今年度は外部磁場により腸管表面を移動する数 mm 以下の小型クローラー方式を採用した新規移動機構を考案した。プロトタイプを作製し、永久磁石を先端に固定したロボットアームを用いて生体内 CA の操舵や移動が可能であることを確認した。本成果に関連し、特許出願、および国内・国際学会で発表を実施した(2. 代表的な成果事例)。

[1] Kim, Kiyong, et al. "Mucosa - Interfacing Capsule for In Situ Sensing the Elasticity of Biological Tissues." *Advanced Materials Technologies* 10.6 (2025): 2401487.

[2] Palkawong-Na-Ayudhaya, Kamin, et al. "A Wireless Soft Optical Blood Sensor for Colonoscopy." *Advanced Sensor Research* 4.8 (2025): e00004.

[3] Chen, J., et al. "An ingestible capsule for luminance-based diagnosis of mesenteric ischemia." *Science robotics* 10.107 (2025): eadx1367.

2) 生体内 CA がソシオ CA と繋がり、連携するために必要な、ソシオ CA と生体内 CA の相互接続による機能拡張に関する関連動向調査を行った。生体内 CA がソシオ CA と繋がり、連携するために必要な、深部体温と生体代謝物計測の連動性計測に関する関連動向調査を行った。これらの結果、特に深部体温計測を対象としたターゲットユーザーを絞り込み、石黒プロジェクト河岡 Pf、吉田 Pf と 2026 年度から新規に参加する緒形 Pf との Cross Project を立案し、研究計画をアップデートした。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

生体内 CA に関連する競合技術、新規技術の動向を調査し、不足技術として新規な移動機構を提示した。現状の生体内 CA の適切なアップデート、および新規コンセプトの提示に貢献した。生体内 CA の社会実装に向けた着実な研究方針を立案し、本プロジェクトに適切な指針を与えることに貢献した。

2) 代表的な論文

・Toshiro Yamanaka, Fumihito Arai, "Motion demonstration of a magnetically movable mini-crawler for large intestine endoscopy." *MHS2025*, 2025/11/24

外部磁場により腸管表面を移動する数 mm 以下の小型クローラー方式を採用した生体内 CA の提案。

3) 代表的な特許

・出願番号 2025-143558 「内視鏡システム」

2025 年度実施状況報告書（成果）

【ムーンショット型研究開発事業・

目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」・
生体内サイバネティック・アバターによる時空間体内環境情報の構造化】

生体内 CA の抗体応用技術

課題推進者：新藏 礼子（東京大学定量生命科学研究所 教授）

1. 研究進捗状況と成果

本年度は、腸炎惹起菌に加えて、大腸がん関連細菌を選択的に認識し結合する IgA 抗体クローン候補(W27)を蛍光標識し腸管内での IgA 抗体の分布、すなわち腸炎惹起菌の分布を可視化するための基礎研究・技術の研究開発を行った。発がん物質(AOM)と炎症惹起物質(DSS)の反復経口投与による大腸発がん（ポリープ）誘導によりマウス腸管において IgA 抗体の腸管内分布を調査した。傾向として W27 IgA 抗体が集積する部位に粘膜接着腸内細菌が集積することを見出した。独立して臨床現場から提供されたサンプルの解析から、早期がん患者では患者由来の IgA 抗体も異常があることを見出した。これらの検討により、W27 IgA 抗体による早期がん可視化技術の可能性だけでなく、患者 IgA 抗体の測定も早期がんのバイオマーカー候補となりうる知見を得た。

2. 代表的な成果事例

1) 目標達成に最も寄与する成果

早期大腸がんにおける腸管 IgA 抗体の重要性が明らかになった。

2) 代表的な論文

今年度、この課題に関連する論文発表はない。

3) 代表的な特許

該当なし