

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H04063

研究課題名(和文)分散型制御による麻痺治療を実現するサイバネティクス技術開発

研究課題名(英文) Development of cybernetics technology based on decentralized control for paralysis treatment

研究代表者

平田 仁(Hirata, Hitoshi)

名古屋大学・予防早期医療創成センター(医)・教授

研究者番号：80173243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：脊髄損傷や筋萎縮性側索硬化症などの外傷・疾患では脳機能が正常に維持される中で広範な神経原性筋萎縮が進行し、生命維持が困難な高度な障害へと発展していく。本研究は、このような難治性麻痺状況に対して、(1)末梢神経幹内神経幹細胞移植による麻痺筋近傍での脊髄様構造の神経節誘導、(2)新たに開発をする複数制御可能な埋め込み型電気刺激装置、(3)脳の制御信号を予測し、暗黙知による制御を可能とする人工知能、という独自に開発した3つの基盤技術を適用して、自立した生活が可能なレベルの機能回復を実現するサイバネティクス技術を開発している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

神経障害や加齢により低下した身体能力を、人工的センサーやアクチュエーターによる代償ではなく、再生医療技術により患者自らの神経・筋機能を復活・増強して機能回復させる。そのため、情報処理と制御系のみを工学技術に依存するためエネルギーの大半が摂取する食物から得られる。さらにこの技術は、歩行や把持動作などの運動機能を回復させるだけでなく、嚥下や呼吸、腸の蠕動運動といった自律神経系の支配が強く、生命維持の根幹に関わる機能を回復させることもできる。

研究成果の概要(英文)：Injuries and diseases such as spinal cord injury and amyotrophic lateral sclerosis maintain normal brain function, but extensive neurogenic muscle atrophy progresses to severe, life-threatening disorders. In this research, we are developing a cybernetics technology that achieves functional recovery to a level where independent living is possible by applying three originally developed basic technologies for such intractable paralysis.
(1) Ganglionic induction of spinal-cord-like structures near paralyzed muscles by transplantation of neural stem cells into peripheral nerve trunks. (2) A newly developed multiple controllable implantable electrical stimulator. (3) Artificial intelligence that can predict brain control signals and control them with implicit knowledge.

研究分野：人間拡張

キーワード：同種細胞移植治療 サイバネティクス 中枢神経再生 分散型制御 人工知能 暗黙学習 筋萎縮性側索硬化症

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

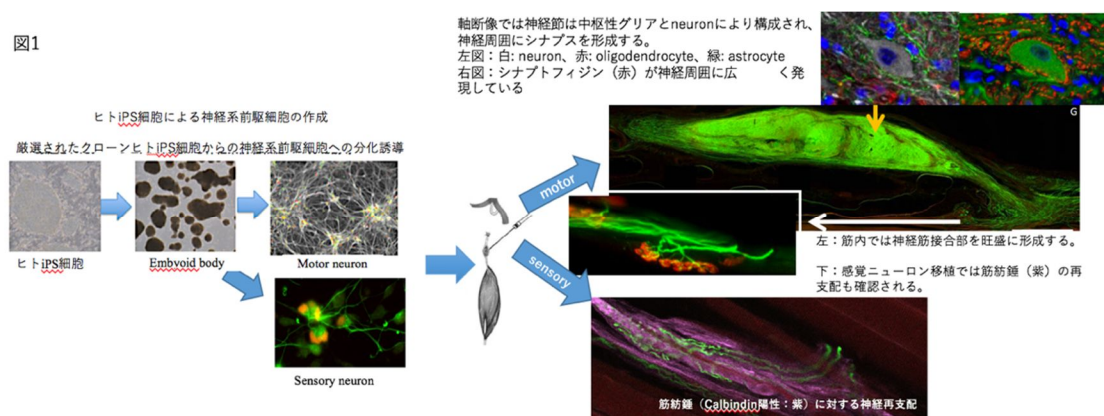
1. 研究開始当初の背景

cybernetics とは通信工学と制御工学を統合的に扱い生物と機械における情報処理を統一的に扱う学問であり、派生語の cyborg はこの技術を用いた身体改造物である。各種センサー、蓄電池、多様なアクチュエーターなどの工学技術開発に加え、IoT や人工知能(AI)を活用するネットワーク型統合制御技術も急速に進歩し、身体機能を機械により代償する運動支援技術が活発に開発されている。筑波大学の山海らが開発するパワースーツ HAL は代表例であるが、これらの技術では患者は本当の自立生活を送れない。生体とは異なる動作・制御機構に依拠する支援機器を患者が身体の一部と自然に感じる embodiment を実現することは難しく、難易度も機能を高度化するほど高くなるという問題もある。機械による代償は病態の根本原因に訴求しないため、治療に結び付きにくく、それ自体が力学負荷の減少による骨格筋の弱体化を招き、病態を悪化させる危惧すらある。更には、ATP を基本エネルギー源とする人体とは異なり、現存する人工的のセンサーやアクチュエーターは電気をエネルギー源とするため患者は活動するためのエネルギー補充を食事と充電の双方に求める必要がある。このため、パワースーツに典型的に認めるように、患者は充電電池を含む重く嵩張る支援機器を身につける必要があり、装着にも支援がいるなど自立には程遠い生活を強いられる。これに対し、我々が構想する cybernetics 技術は独自の再生医療技術により機能低下・消失した神経・筋システムを復活・増強し、情報処理と制御系のみを工学技術に依存するためエネルギーの大半が摂取する食物から得られる。我々が独自開発する tacit learning と neural network の併用による AI は neural network 単独のものより演算処理が単純であり、従来の AI が苦手とする多様で突発的な環境変化への対応も可能で、エネルギー問題を最小化しつつ多様な原因による身体障害者に対処できる次世代 AI 技術である。

2. 研究の目的

神経・筋機能増強型 cybernetics 技術の実現には 1. 神経系前駆細胞を活用する分散制御型運動機能再建技術と、2. 生体内ネットワークと独自の AI により Waller 変性神経片内に誘導したガングリオンを患者の脳活動と連動させて統合的に制御する cybernetics 技術、の二つを実現する必要がある。我々はこれまでの研究で運動神経系前駆細胞の末梢神経内移植により麻痺筋を再支配し、機能的電気刺激(FES)により制御する motoneuron integrated striated muscle (MISM) 技術を開発した。当初運動ニューロンが末梢神経内に単純に生着し軸索伸長していると考えていたが実際には図1に示すように移植神経前駆細胞は astrocyte, oligodendrocyte へも分化し、末梢神経片内に我々が神経ガングリオンと呼ぶ中枢神経構造を構築して骨格筋へと軸索を送っており、ガングリオン内のニューロンはシナプスを形成し神経ネットワークを構築していることも明らかとなった。更に、同様の手法で感覚神経系前駆細胞を移植するとガングリオン内に生着した感覚ニューロンは筋の固有感覚を司る筋紡錘のメカノレセプターを再支配することも確認した(図1)。

図1



生体では協調筋・拮抗筋間の筋活動は単シナプス反射である脊髄反射を基本に調整し、その上位ニューロンによる制御が重畳され巧みな動作制御を実現している。この際末梢から齎される姿勢や筋緊張に関する固有感覚が小脳を中心に処理され、統合的動作制御に活用される。固有感覚を障害されると感覚性失調の状態となり姿勢制御や巧遅運動に支障を生ずる。このためシナプスを介した筋紡錘による筋活動制御と固有感覚情報の統合処理による上位の運動制御を実現することが円滑な運動機能を再構築する上で不可欠である。今回の研究では iPS 細胞から誘導した運動神経系前駆細胞と感覚神経系前駆細胞を Waller 変性神経片内に同時移植することでシナプスを介した末梢反射弓を実現できることを実証し、また、複数の神経ガングリオン内の感覚ニューロン活動を生体内ネットワークと、独自の AI 技術により統合制御して小脳機能を補完し、患者の脳機能と自然に連動させて再建部位の embodiment を高度に実現できる機能修復技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) iPS細胞分化制御技術開発

名古屋大学(平田、木山)と愛知医科大学(岡田)が連携して行う。

名古屋大学では手外科と個別化医療開発学講座により胎児由来運動神経系幹細胞移植を用いたMISMの技術開発を行ってきており ex vivo モデルでの分化制御機序解析や、歩行解析を用いた研究を実施している。岡田は慶応大学岡野栄之教授のもとで iPS 細胞による脊髄損傷治療の研究に携わり神経系前駆細胞への分化制御技術開発を担当し、この分野で日本を代表する研究者である。岡田の下には3年前より名古屋大学より2名大学院生が派遣され、運動神経系前駆細胞への分化誘導と、それを用いたMISM技術の開発を行ってきている。このため運動神経系前駆細胞を用いる部分の技術開発はすでに完了している。多能性幹細胞からの感覚ニューロン分化誘導に関しては Kleber らの方法に準じて岡田により既に基本的な分化誘導技術は開発されている(図3:Okada Y. Stem cell 2008)。後根神経節の感覚細胞はサイズにより2つのクラスに分けられるが、今回は固有感覚を司る大型感覚ニューロンへの分化誘導技術を確立する。万一 iPS 感覚神経細胞への分化誘導技術の確立が困難な時は、ヒトへの異種臓器移植が前臨床段階にあるブタの胎児神経前駆細胞を用いた異種移植技術を用いる。

(2) 神経ガングリオン形成誘導と機能検証実験

我々はMISM技術開発の過程で培養液中に浮遊させた神経・筋ユニット内で運動神経系前駆細胞移植により異所性神経ガングリオンを誘導し、骨格筋を再支配する ex vivo モデルを完成させている。ex vivo 環境でも3ヶ月に亘り神経節は生存し、骨格筋支配も維持されたが、基本的には iPS 細胞由来感覚神経系前駆細胞でも同様の状況が想定され、詳細な分化機序の解析や、機能解析を行うことができるものと考えている。万一 ex vivo モデルが機能しない際にはより移植細胞の生存に有利な in vivo モデルを用いてこの段階を実施することもできる。今回は運動・感覚神経系前駆細胞を末梢神経系内2箇所に分けて移植し、運動ニューロン系と感覚ニューロン系の神経ガングリオンを別々に誘導する。筋紡錘の神経再支配は calbindin 染色により確認する。

(3) 運動系・感覚系双方向インターフェースによる生体信号応用技術

in vivo モデルを用いて実施する。運動神経系前駆細胞と感覚神経系前駆細胞を移植する。神経再支配が完了する移植2か月以降に神経活動電位を効率的に検出し、パターン解析により筋紡錘より齎されるシグナルを効率良くピックアップする技術を開発する。栗本はMISMの研究において末梢神経にステンレス電極を設置して筋活動を制御する技術を開発しており、無麻酔下に神経や筋の活動を長期間モニタリングすることができる(Kurimoto S. J Tissue Eng Regen Med. 2013.)。信号解析に必要な情報が得られた後、埋め込み可能なセンサーの開発を行う必要があるが、この段階は栗本が講座長を務める産学共同研究講座のパートナー企業であるニプロ株式会社の技術支援を得て開発を進める。

(4) AI技術開発

下田と林部は状況の変化に応じて行動を創発するAIのアルゴリズム Tacit learning system (TLS)の開発を行ってきている(Shimoda S, Hayashibe M. Front. Comput. Neurosci. 2013, 2014, 2015)。Neural network は脳の演算構造を模した多層構造の機械学習アルゴリズムであり deep learning は3層以上の多層化を実現した Neural network で、囲碁の世界王者に連勝した Google brain のニュースで一般にも広く知られるようになった。しかし、前述したように Neural network は高速シミュレーションなどを通じて反復学習することが可能なルールの比較的固定した状況では極めて上手く機能し学習を深めることで多彩な制御パターンを精度よく選択できる。しかし、周囲の状況が頻繁かつランダムに変化する際には学習効率が上がらず機能しない。兵庫リハビリテーションセンターの陳は広島大学と共同で Neural network 制御型多機能電動義手の開発を行ったが、選択可能な動作パターンをわずか6個以内に制限しないと誤動作確率が1割を超えてしまい機能しないと報告した。実際、現存するすべての Neural network 制御義手の自由度は6個以内となっており、従来型AIですべての動作を制御することはできない。一方で、tacit learning は短時間の学習から最も適切な行動を自ら創発できるが、過去の経験を通じて蓄積した制御情報を活用する点では Neural network には劣る。そこで、今回の研究ではそれぞれの特性を利用し、行動目的を Neural network を用いて探索し、詳細な行動を Tacit learning で調整することで状況に応じた適切な行動選択と環境に応じた柔軟な動作生成を並行して行うことが可能なAIアルゴリズムを開発及び検証を行う。

(5) 統合制御技術開発

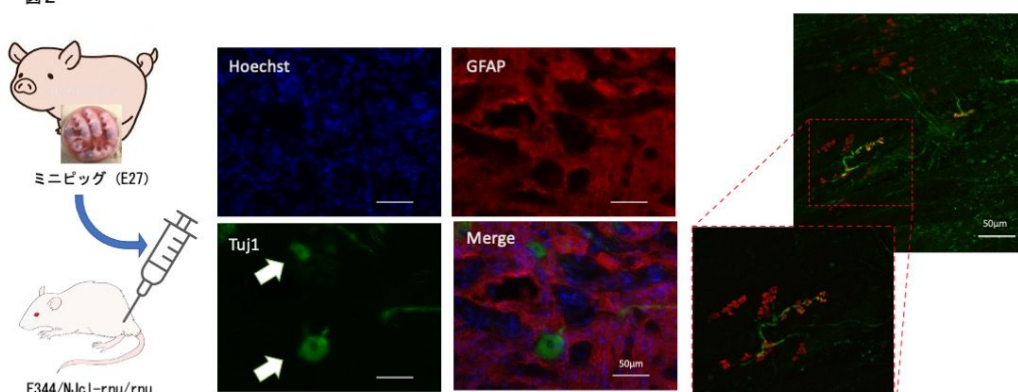
最終年度に当たる令和2年度には全ての研究チームが共同して愛知医科大学においてミニ豚モデルを用いた実証実験を行う。ミニブタは xenograft 実験用に RAG1/2 遺伝子をノックアウトした系統が国内外で樹立されつつある(Lee K. PNAS 2014, Ito PLoS One 2014, Haung J. Immunol. 2014)。これらの使用を目指す。入手困難な際はMISM研究ですでに実績のある免疫抑制剤投与下での移植実験を行う。また、歩行解析にはモーションキャプチャーに加え、我々が麻痺患者の研究ですでに実績を積んでいる脳機能解析を併用する研究手法を活用し、中枢の応答性の変化も評価に加えることで統合制御技術の最適化を行う。

4. 研究成果

(1) iPS細胞分化制御技術開発

これまでの研究では感覚神経細胞の特徴的な発現プロファイルを構成するいくつかのマーカーによる感覚神経細胞の成熟は確認できている。しかし、非常に複雑な相互作用を経て成長する感覚神経細胞を *in vitro* で完全に再現することは容易ではなく、本研究においても機能的な iPS 細胞由来感覚神経細胞の分化誘導には至らなかった。一方、近年の CRISPR/Cas9 などゲノム編集技術の発達により、機能的に成熟し免疫拒絶反応の少ない異種運動神経細胞移植が可能となっており、免疫拒絶を引き起こす抗原の抹消、補体活性や凝固亢進の制御により、その成績は向上してきている。ヒトへの異種臓器移植が前臨床段階にあるブタの胎児神経前駆細胞を用いて、異種末梢神経幹内に移植し、その生着を調べた。胎生 27 日目のミニブタからラットに移植した異種神経細胞移植を行い、免疫抑制剤の使用なしに神経細胞の機能的な生着を確認できた。末梢神経内環境は異種神経細胞においても適した環境を有しており、異種神経細胞は iPS 由来神経細胞と同様に cell source の一つとなり得る (図 2)。

図 2



胎生27日ブタ神経前駆細胞を坐骨神経切断後のヌードラット末梢神経幹内へ移植。免疫抑制剤の使用なく、神経細胞は生着し、3ヶ月間以上末梢神経内で生存。

機能的な神経筋接合部形成を確認。

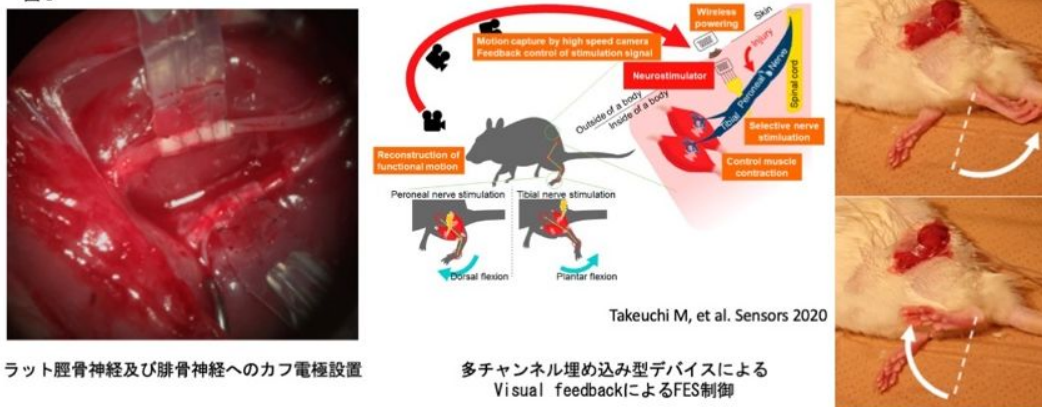
(2) 神経ガングリオン形成誘導と機能検証実験

今回は運動・感覚神経系前駆細胞を末梢神経系内に移植し、運動ニューロン系と感覚ニューロン系の神経ガングリオンを別々に誘導した。感覚系の神経細胞移植では表在感覚系と深部感覚系の二つのサブモダリティを支配する神経ガングリオンを作成した。皮膚のメカノレセプターであるゆっくりとした振動に反応するマイスネル小体と静的な歪みに反応するメルケル細胞は、移植した感覚神経系前駆細胞により神経支配され、足部の刺激による誘発電位が測定可能であった (Asano K. J Tissue Eng Regen Med. 2021)。また、筋枝に移植した感覚神経前駆細胞が筋紡錘を神経支配し、さらに脱神経後は徐々に変性消失していく筋紡錘の形態を再神経支配により維持できることがわかった (Asano K. Cell Prolif.2019)。センサーを装着しなければ得ることができなかった感覚情報を、生体内で感覚細胞移植により得ることができた。

(3) 運動系・感覚系双方向インターフェースによる生体信号応用技術

表在感覚からの活動電位の検出と FES による運動を可能とする多チャンネル埋め込み型デバイス、さらに神経インターフェースの開発を行った。末梢神経への侵襲性が低いシリコン製の表面カフ電極を開発した (図 3)。また、この多チャンネル埋め込み型デバイスは送電周波数の違いにより、一つの埋込型デバイスで体外から複数の神経を選択的に刺激することができる。ラット後肢を visual feedback により、制御可能であることを明らかにした (Takeuchi M. Sensors 2020)。

図 3



ラット脛骨神経及び腓骨神経へのカフ電極設置

多チャンネル埋め込み型デバイスによる Visual feedbackによるFES制御

(4) AI 技術開発、(5) 統合制御技術開発

前腕回内運動の制御を自動的にサポートする暗黙的学習システム TLS を備えた義手を作成した。この筋電義手は感覚フィードバックと柔軟な運動出力を可能にし、患者が最小のエネルギー負担で効率的に動くことを可能にした。本研究で、脳機能に対する TLS の補助機能の影響を分析するために脳波記録による検討を行った。肘下切断の筋電義手使用患者では、TLS 使用時と非使用時の条件を比較したとき、運動イメージ課題により発生した平均皮質電流に差を認め、Amplitude envelope correlation (AEC) 値は増加した。TLS は運動制御に加えて、感覚刺激認識を変化させる可能性があることが明らかとなった (Iwatsuki K. Front Synaptic Neurosci. 2020、Iwatsuki K. NeuroRehabilitation. 2019.)。また、免疫抑制剤投与下でのミニブタ後肢の運動制御を試みた。胎生 37 日のミニブタから神経幹細胞を濃度勾配により採取し、ミニブタ坐骨神経モデルの神経幹内に移植した。移植後 3 ヶ月で機能的な神経再支配を確認することができた (図 4)。

我々が目指す神経・筋機能増強型 cybernetics 技術は、パワードスーツなどの人工的センサーやアクチュエーターにより身体機能を代償させる cyborg 医療とは大きく異なり、再生医療により身体障害の病態

自体を修正・治療し、独自の AI 制御により患者の脳と自然に連動させて早期に自然な機能回復を実現する治療技術であり、今日治療困難な多様な原因による高度運動機能障害に柔軟に対応でき、完全に自立した機能回復を実現できる画期的な技術である。昨今活用が広がる neural network と呼ばれる AI 技術は、deep learning に代表されるパターン認識技術と統計解析を駆使した反復学習を通じて判断を自動学習するシステムである。囲碁や運転制御、定型文作成など一定のルールに基づく活動の判断ではシミュレーションに基づく短期集中学習を通じて予測精度を高めることで極めて上手く機能する。一方で、状況やルールが頻繁かつランダムに変化する状況では学習効果が期待できず、AI は機能しない。1969 年に McCarthy と Hayes により指摘され、未だに解決しないフレーム問題という AI の根本的な欠点である。これに対し脳は柔軟に状況を判断し、行動を創発する能力を有する。Tacit learning は環境との相互作用を通じてそこに適応する行動を創発するアルゴリズムである。Neural Network と組み合わせ、行動目的を Neural network を用いて探索し、詳細な行動を Tacit learning で調整することで状況に応じた適切な行動選択と環境に応じた柔軟な動作生成を並行して行うことが可能となる。これは AI の視点からもフレーム問題に挑戦する新しい視点である。我々はこれまでに tacit learning により歩行を自動学習する humanoid robot と上肢切断者支援用 robot arm を実現した。Tacit learning と Neural network を組み合わせた AI 制御による cybernetic 技術はフレーム問題を緩和し環境変化に富んだ実社会でも有用な自動制御技術を実現する画期的な技術革新であり本研究の意義は大きい。

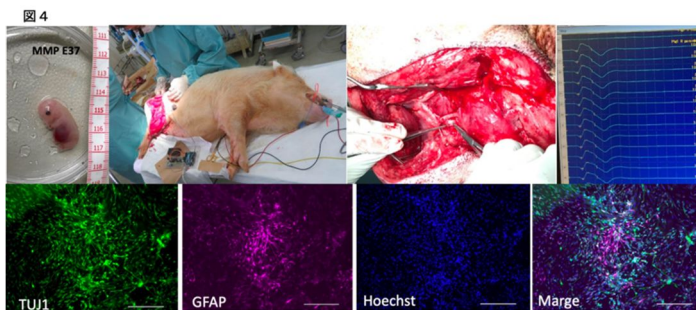


図 4
免疫抑制剤使用下に胎生37日ミニブタより神経細胞を採取し、坐骨神経切断モデルブタに移植。複合筋活動電位を導出。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwatsuki K, Shimoda S, Hirata H, et al.	4. 巻 44
2. 論文標題 Magnetoencephalographic evaluation for the myoelectric hand prosthesis with tacit learning system.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NeuroRehabilitation	6. 最初と最後の頁 19-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/NRE-182514.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asano K. Nakano T. Hirata H, et al.	4. 巻 52
2. 論文標題 Hirata H. Muscle spindle reinnervation using transplanted embryonic dorsal root ganglion cells after peripheral nerve transection in rats.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cell Prolif.	6. 最初と最後の頁 e12660.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/cpr.12660.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwatsuki Katsuyuki, Hoshiyama Minoru, Oyama Shintaro, Yoneda Hidemasa, Shimoda Shingo, Hirata Hitoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Electroencephalographic Functional Connectivity With the Tacit Learning System Prosthetic Hand: A Case Series Using Motor Imagery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Synaptic Neuroscience	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsyn.2020.00007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeuchi M, Hasegawa H, Hirata H	4. 巻 14
2. 論文標題 Visual Feedback Control of a Rat Ankle Angle Using a Wirelessly Powered Two-Channel Neurostimulator.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 E2210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20082210.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ando A. Imaeda N. Takasu M et al.	4. 巻 26
2. 論文標題 Genetic Association between Swine Leukocyte Antigen Class II Haplotypes and Reproduction Traits in Microminipigs.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cells	6. 最初と最後の頁 783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cells8080783.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itkonen M, Garcia AC, Shimoda S	4. 巻 6
2. 論文標題 Influence of bimanual exercise on muscle activation in post-stroke patients	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robomech Journal	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakano T, Kurimoto S, Hirata H, et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Complete adult neurogenesis within a Wallerian degenerating nerve expressed as an ectopic ganglion.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J Tissue Eng Regen Med.	6. 最初と最後の頁 1469-1480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 栗本秀、中野智則、平田仁ほか	4. 巻 92
2. 論文標題 神経筋接合部の制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本整形外科学会誌	6. 最初と最後の頁 1629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 新海宏明、岡田洋平、平田仁ほか	4. 巻 69
2. 論文標題 ES細胞由来運動神経細胞移植による末梢神経の運動機能再生	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 整形外科	6. 最初と最後の頁 1322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 栗本秀、中野智則、平田仁ほか	4. 巻 29
2. 論文標題 末梢神経尊重治療の将来展望 脱神経筋をターゲットとした末梢神経損傷治療	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 末梢神経	6. 最初と最後の頁 166-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asano Kenichi, Nakano Tomonori, Tokutake Katsushiro, Ishii Hisao, Nishizuka Takano, Iwatsuki Katsuyuki, Onishi Tetsuro, Kurimoto Shigeru, Yamamoto Michiro, Tatebe Masahiro, Hirata Hitoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Innervation of Meissner's corpuscles and Merkel cells by transplantation of embryonic dorsal root ganglion cells after peripheral nerve section in rats	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/term.3196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asin-Prieto Guillermo, Martinez-Exposito Aitor, Barroso Filipe O., Urendes Eloy J., Gonzalez-Vargas Jose, Alnajjar Fady S., Gonzalez-Altied Carlos, Shimoda Shingo, Pons Jose L., Moreno Juan C.	4. 巻 8
2. 論文標題 Haptic Adaptive Feedback to Promote Motor Learning With a Robotic Ankle Exoskeleton Integrated With a Video Game	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2020.00113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okajima Shotaro, Tournier Maxime, Alnajjar Fady S., Hayashibe Mitsuhiro, Hasegawa Yasuhisa, Shimoda Shingo	4. 巻 12
2. 論文標題 Generation of Human-Like Movement from Symbolized Information	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurobotics	6. 最初と最後の頁 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnbot.2018.00043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 浅野研一、中野智則、平田仁ほか
2. 発表標題 末梢神経切断後のラットにおける後根神経節細胞移植による皮膚の固有受容器の神経再支配
3. 学会等名 日本末梢神経学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野研一、中野智則、平田仁ほか
2. 発表標題 末梢神経切断後のラットにおける後根神経節細胞移植による筋紡錘の神経再支配
3. 学会等名 日本手外科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lu W, Owaki M, Hayashibe M
2. 発表標題 Textile-based Electrode Array for FES and sEMG Recording Fabricated by Screen Printing
3. 学会等名 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野研一、中野智則、平田仁ほか
2. 発表標題 末梢神経切断後のラットにおける神経細胞移植による筋紡錘の神経再支配
3. 学会等名 日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新海宏明、岡田洋平、平田仁
2. 発表標題 異種移植における末梢神経へのES細胞由来運動神経細胞移植による運動機能再建
3. 学会等名 日本手の外科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅野研一、中野智則、平田仁ほか
2. 発表標題 末梢神経切断後のラットにおける神経細胞移植による筋紡錘の神経再支配
3. 学会等名 日本整形外科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹羽智史、岡田洋平、平田仁
2. 発表標題 ヒトiPS細胞由来運動神経前駆細胞の末梢神経移植による運動機能の再建
3. 学会等名 日本整形外科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗本秀 平田仁
2. 発表標題 ネットワークを俯瞰した末梢神経損傷の治療戦略
3. 学会等名 第 47 回日本マイクロサージャリー学会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Niwa Satoshi, Masaomi Saeki, Hiroki Shinkai, Yohei Okada
2. 発表標題 RECONSTRUCTION OF MOTOR FUNCTION IN PERIPHERAL NERVES BY TRANSPLANTATION OF HUMAN IPS CELLS-DERIVED MOTOR NEURON PROGENITORS
3. 学会等名 International Society for Stem Cell Research Annual Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹羽智史, 佐伯将臣, 新海宏明, 栗本秀, 岡田洋平, 平田仁
2. 発表標題 ヒトiPS細胞由来運動神経前駆細胞の末梢神経移植における腫瘍化抑制への取り組み
3. 学会等名 第62回日本手外科学会学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平田仁
2. 発表標題 末梢神経再生について
3. 学会等名 第38回日本運動器再生・移植研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗本 秀, 大西 哲朗, 能登 公俊, 浅野 研一, 丹羽 智史, 中野 智則, 石井 久雄, 中川 泰伸, 岩月 克之, 建
2. 発表標題 脱神経筋を治療ターゲットとした末梢神経損傷治療
3. 学会等名 第29回日本末梢神経学会学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗本 秀, 中野 智則, 浅野 研一, 能登 公俊, 丹羽 智史, 佐伯 将臣, 徳武 克浩, 石井 久雄, 平田 仁
2. 発表標題 神経筋接合部の制御
3. 学会等名 第33回日本整形外科学会基礎学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平田仁
2. 発表標題 神経障害性疼痛
3. 学会等名 海部整形外科医会20周年記念講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平田仁
2. 発表標題 遠隔運動器診療の実際
3. 学会等名 日本整形外科超音波学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平田仁
2. 発表標題 手をつなぐ 手外科を繋ぐ
3. 学会等名 第64回日本手外科学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 竹内大，徳武克浩， 青山忠義，長谷川泰 久，栗本秀，平田仁	権利者 名古屋大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-71547	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高須 正規 (Takasu Masaki) (00503327)	岐阜大学・応用生物科学部・准教授 (13701)	
研究分担者	下田 真吾 (Shimoda Shingo) (20415186)	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・ ユニットリーダー (82401)	
研究分担者	岡田 洋平 (Okada Yohei) (30383714)	愛知医科大学・医学部・准教授 (33920)	
研究分担者	林部 充宏 (Hayashibe Mitsuhiro) (40338934)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	建部 将広 (Tatebe Masahiro) (60420379)	名古屋大学・医学系研究科・特任准教授 (13901)	
研究分担者	長谷川 泰久 (Hasegawa Yasuhisa) (70303675)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	栗本 秀 (Kurimoto Shigeru) (70597856)	名古屋大学・医学系研究科・特任講師 (13901)	
研究分担者	大山 慎太郎 (Oyama Shintaro) (80768797)	名古屋大学・医学部附属病院・特任助教 (13901)	
研究分担者	山本 美知郎 (Yamamoto Michiro) (90528829)	名古屋大学・医学系研究科・特任講師 (13901)	
研究分担者	岩月 克之 (Iwatsuki Katsuyuki) (90635567)	名古屋大学・医学部附属病院・講師 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関