

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11413

研究課題名(和文) 圧縮センシング・スパースモデルを用いたBCIによるマルチコプターの飛行制御

研究課題名(英文) Multicopter flight control by BCI using compressed sensing sparse model

研究代表者

伊藤 利明 (Itoh, Toshiaki)

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：60201927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：脳波制御の基礎とし、脳波発生メカニズムに関する神経細胞の電気信号発生の数学モデルを提案した。またドローン制御装置に関する色々な機械的インターフェイスとそれに伴うソフトウェアの、現在可能な技術を調べ今後の進展となる基礎知識と技術を得た。ドローン制御の安全性を担保するため、ドローンの位置情報を取得し安全圏内から逸脱した際に自動的にドローンを着陸するためのシステムを開発した。協調系とし脳波による身体動作を伴わない仮想空間での制御は、利用者の空間への没入感が深まると制御の信頼性も高まる。この協調システムの提案とし、仮想空間内でアバターに体の感覚を転移させるという方法での制御の研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

BCIの応用は今後必須の技術だが、未だ信頼性が必要となる制御対象に応用できない。従来のEEG(BCI)制御は脳活動の一部情報だけを受動的に用いるため、制御での信頼性が確保できない。当研究はBCI制御系を、周辺装置と人との協調系ととらえなおした制御システムの開発を進めた。また高度先端技術を国際的競争力の資源とすべき日本でのドローン技術は遅れたが、関連周辺技術の開発にはまだ余地がある。BCIを用いた安全・信頼性のあるドローン飛行制御技術は、人が密集する場所が多い日本での克服すべき研究課題である。先端的装置(BCI)による障がい者サポート用自立機器などへの福祉分野への応用でも意義がある。

研究成果の概要(英文)： We proposed a mathematical model of electrical signal generation in nerve cells regarding the mechanism of EEG generation as the basis of EEG control. In addition, we investigated the currently available technologies for various mechanical interfaces related to drone control devices and the software associated with them and obtained basic knowledge and technologies that will be used in the future. To ensure the safety of drone control, we have developed a system that acquires the position information of the drone and automatically lands the drone when it deviates from the safe area. As a good cooperative system for the drone control in a virtual space without real body movements by brain waves, we have developed the reliable control system by user's sense of immersion in the space deepens. As a proposal for this collaborative system, we proceeded with research on control by transferring body sensations to avatars in virtual space.

研究分野：応用数理，自然科学，情報数理

キーワード：脳波による制御システム BCI EEG 信号処理 ドローン飛行制御 脳波解析 協調系

1. 研究開始当初の背景

BCIの応用は近未来の技術が進んで挑むべき課題であるが、未熟であり特に信頼性が
必要となる制御対象に応用できない。例えば、身障者用車いすの脳波による移動制御の
際に、横断歩道をわたる判断の安全性に保障がない。横断歩道では、人は横断できる・
する、という判断のための総合的な情報分析を事前に行う。現在のBCI応用研究は脳か
らの内部情報分析結果の直接的な応用だけに注目しすぎている。従来のEEG(BCI)制御
は脳活動の先の総合的な情報分析活動の一部情報だけを受動的に用いるだけのため、こ
の信頼性が確保できない。学術的背景でないが、高度先端技術を国際的競争力の資源と
すべき日本でのドローン技術は遅れをとったことが明白な現在、巻き返しとして関連周
辺技術の開発にはまだ余地がある。BCIを用いた安全・信頼性のあるドローン飛行制御
技術は、人が密集する場所が多い日本での克服すべき研究課題である。ドローン研究が
日本で敬遠されこの研究が遅れた1つの理由でもある。また同様に先端的装置(BCI)に
よる手足が不自由な身障者サポート用自立機器などへの福祉分野への応用でも意義あ
る研究課題である。以上の課題克服に少しでも貢献したいというのが研究背景である。

2. 研究の目的

安定・信頼性のある脳波コントロール制御(BCI)達成のため、周辺システムからの情
報も含め脳波自身の思考制御も含む総合的な制御システムとして構築する。周辺システ
ムとは、脳に情報を与える非人的機器・センサー等であり、脳波とこれら周辺システム
からの情報を同期・協調させたBCI制御を考案する。例えば横断歩道の横断には、横断
歩道の信号の色(画像情報)、車のエンジン音や信号音(音情報)などの周辺計測システム
からの情報の補償と伴に、「横断する」という動作欲求を「前に行く」という脳波発生
のみにして補助機器(例：自立車椅子)の動作制御の安全性・信頼性を高める。本研究で
は、ここで脳波情報は「前にいく」という簡潔なパターン発生だけに絞られていること
に注目する。つまり脳が「前にいく」という思考のパターン波だけを確実に発生しやす
いよう、周辺からの色々な外乱で乱れないようにされた外部情報が同期・協調的な形で
脳(思考過程)に与えられるシステムを考える。これによりBCI制御の安全性・信頼性が
高くなる。ところで現在色々な学習システム技術が開発されている。この学習システム
をこの総合的な情報発生への支援に用いる。この際に情報の有効処理(学習)には圧縮セ
ンシング・スパースモデリングを用いる。ところでハード面での日本のドローン技術は
国際的に遅れたが、周辺技術は開発の余地がある。従い最も社会的にインパクトもあり、
安全・信頼性に高度な制御技術が要求されるBCIによるドローン飛行制御を本研究の
対象とする。現在の市販の安価なドローンにさえビデオカメラが備わり、そのFPV(First
Person View)機能は飛行鑑賞用途として人気がある。本研究では、この機能を視覚的
外部情報入力元とみなし、BCIによる統合的制御情報として有効に用いる。生画像をモニ
ター画面に動的に写し、この画像情報を目で見て脳に情報を与えるのではなく、画像情報
を事前に学習制御システムで処理した後に、思考への外乱が低減される確実な情報を脳

に送る手段をとる。また赤外線センサーや圧力センサーからの情報も同様である。周辺システムは、その多くを脳が明確に特定波形を作り出せるよう情報を送る。

以上のように脳波を計測利用する BCI の信頼性を向上させる、脳と外部情報の同期・協調システムの研究推進を目的とした。

3. 研究の方法

EEG による BCI の信頼性を向上できるよう、脳と外部情報の同期・協調システムの基礎技術構築を行う。とくに重要な点は外部情報の同期・協調システムによる扱いである。このシステムは外部情報を、その時々に対応する特性の脳波の信頼性の高い発生に寄与する情報への変換システムでもある。この情報変換システムには近年発達した機械学習の手法を導入する。外乱の多い外部情報は特定の脳波の高い信頼性での発生の障害となる、従い外乱の無い有効な情報に変換する必要がある。事前に外部情報の外乱を除くための特殊なフィルターとなる機械学習を考案利用する。この場合に圧縮センシング・スパースモデリング手法を適用する。スパース・モデリング手法は脳波データの処理にも使い、学習による辞書行列の扱いになじむ。また外部擾乱が入りにくい特性の脳波の信頼性の高い発生に寄与する情報への変換に関しては、例えば横断歩道での実画像データ(学習システムにより、信号や横断歩道マークより横断歩道を自動認識させる)から、利用者には単に「物が止まっている」簡潔なアニメ画像と「物が前に動いている」簡潔なアニメ画像を表示して、脳波が必要な動作に対応する特定の脳波を発生しやすいように画像変換表示する。これにより利用者は「前に動く」という脳波パターンを鮮明に発生でき、結果として EEG による BCI の動作が安定する。飛行体のドローンにおいてはより動的で安定した特定脳波パターンの発生が必要となる。そのために最も適した同期・協調のために情報変換システムの研究を行う。研究の取り掛かりとして、Emotiv 社 EEG の BCI による Parrot 社ドローンの制御プログラムの理解と拡張を開発の入り口とする。そのために Emotiv 社 EEG データ処理プログラム開発環境である SDK を用いる。拡張開発のための基礎実験とし、この BCI システムによるドローン飛行制御実験の大会も企画開催する。これは国内では初めての大会となる。これにより広く国内の関係研究機関との本研究テーマに関する共同研究環境を立ち上げる。以上を基に問題点解決の改良・拡張を引き続き行う。研究の半ばでは、周辺外部情報機器(ビデオ・マイク・センサーなど)からの情報も取り込んだ同期・協調システムの基礎研究を行う。ここでは圧縮センシング・スパースモデリング手法を導入し現代的な機械学習システムと EEG の関係づけを詳細に調べる。加えて他の既存の優れたマン・マシンインターフェイスと脳波の信頼性のある協調可能性についても調べる。また毎年度 BCI システムによるドローン飛行制御実験競技大会を開催することで、この競技大会での情報交換や成果は、関係分野の研究技術振興に大きく貢献するものと思われる。研究最終年度では総合的な BCI 制御のための外部情報入力機器との同期・協調システムの構築を考案していく。さしあたりマルチコプターでの簡単なパターンの飛行が EEG (BCI) 制御で安全・信頼性のある飛行となるレベルを目指す。

4 . 研究成果

年度 項目	H30	H31 (R1)	H32 (R2)
実験	Emotiv 社 Epoc Emotiv+14 (EEG)等による BCI の基礎実験およびドローン飛行基礎実験	Emotiv 社 Epoc Emotiv+14(EEG)等による BCI によるドローン飛行制御基礎実験．外部入力機器情報と EEG 情報の同期・協調基礎実験	簡単な同期・協調システムでの効果評価実験，簡単なドローン飛行パターンでの制御評価実験
開発	GitHub, Epoc 社 SDK による EEG のデータ採集・基礎処理プログラム開発	ドローン飛行制御プログラムの改良・拡張．圧縮センシング・スパースモデリング手法による BCI 情報学習システム．同期・協調システムの基礎研究	統合的な BCI 制御補償システムのスモールモデル開発
活動	BCI(EEG)ドローン飛行競技大会開催，研究会学会参加・発表	BCI(EEG)ドローン飛行競技大会開催，研究会学会参加・発表	BCI(EEG)ドローン飛行競技大会開催・大会継続審議，研究成果発表

本研究プロジェクトの第 1 グループは，脳波制御のため，基本的な脳波発生メカニズムを理論的な背景からの基礎研究とし，従来の神経細胞の電気信号発生の数学モデル，脳内の神経細胞のネットワーク的視点からのコネクトームとの関係を述べた基礎研究について調べた．その結果，巨大な数の神経細胞の共同現象として発生する脳波の頭蓋表皮での電気信号モデルの数値解法について色々な問題点があることを発見し学会で報告した．

ドローン制御装置(コントローラ)に関する色々な機械的インターフェイスとそれに伴うソフトウェアの，現在での可能な導入技術を調べた．種々の航空法に触れない小型のマルチコプター(ドローン)の制御可能性が獲得でき今後の研究に結び付ける基礎知識と技術を得た．

本研究プロジェクトの第 2 グループは，ドローンの基本制御技術を低電力かつ高精度に実行するため，FPGA を用いた飛行制御の実装に着手し，(1)SBUS 規格で送信される制御情報の取得，(2)ジャイロ・地磁気センサーからの情報の取得，(3) (1)，(2)を用いてモーター出力を決定する、効率の良い PID 回路，(4)(2)を補完するための、画像に写る水平線を用いて機体の絶対角を求める回路の実装を行った．また，(5) 脳波で制御するドローンの安全性を担保するため、ドローンの位置情報を取得し，安全圏内から逸脱した際に自動的にドローンを着陸するためのシステムを開発，(6) 脳波を用いて遠隔から意志決定をするための基本システムとして、車両を用いたプロトタイプを作成を行った．(7)ドローンからの画像を取得し，自動的に経路上にとどまるような自動操縦を実装することを前提として，CNN ベースの自動運転，VSLAM の性能解析，Spiking Neural Network の学習の実装を行うまで研究として発展させた．

本研究プロジェクトの第 3 グループは，脳波による制御はある意味で，身体の動作を伴わない仮想空間での制御となる．そのためこの仮想空間への没入感が深まると，脳波の信号の信頼性も高まる．このような協調システムの提案として，身体の動作を伴わない脳波による制御に適した仮想空間を考える．この仮想空間内ではアバターに体の感覚を転移さ

せるという方法があり，本研究のプロジェクトのこのグループでは OpenBCI(Open Source Brain Computer Interface)という BCI を用いアバターを操作した時の脳波を測定し，学習させ，その脳波を用いてアバターを操作する研究を行った．この研究では右手と左手を「動かす」という操作を行ったときの EEG データパターンを線形学習させ、右手と左手を動かしたとき EEG の入力に対して反応するように学習を行った．色々な課題が見出されたが，今後の研究に役立つ知見が多く得られた．

当研究プロジェクトは賢兎研究活動の全行的広がり・技術の発展を別の 1 つの目的としている．そのため計 4 回の脳波制御ドローン競技会を近畿(筑波大学),東北(会津大学),関西(同志大学),およびネット形式で全国規模で開催した．活動内容は，競技会 HP：<http://bcidrone.xsrv.jp/> を参照されたい．(HP 維持費の関係で，この大会の HP は近い将来には無くなる可能性があります)この競技会の最終的なドローンの脳波制御による飛行作業の難易度は徐々に高度にする予定であったが，最終年度はコロナウイルスの関係で対面での競技会の実施ができず，ビデオ録画によるリモート大会として実施したため，飛行作業の難易度を上げた大会の実施は残念ながら出来なかった．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Dong Ran, Chen Yang, Cai Dongsheng, Nakagawa Shinobu, Higaki Tomonari	4. 巻 34(5)
2. 論文標題 Robot motion design using bunraku emotional expressions - focusing on Jo-Ha-Kyu in sounds and movements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 229-312
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 該当する

1. 著者名 董 然, 蔡 東生	4. 巻 J102-D(12)
2. 論文標題 ヒルベルト - ファン変換を用いたダンスモーション解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌(D)	6. 最初と最後の頁 843-853
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 該当する

1. 著者名 Yaqub Mahmoud, Yuichi Okuyama, Tomohide Fukuchi, Iori Ando, Kosuke Tanaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Optimizing Deep-Neural-Network-Driven Autonomous Race Car Using Image Scaling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACM Chapter Proceedings on Educational Technology, Language & Technical Communication (ETLTC2020)	6. 最初と最後の頁 8
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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Chen Yang, Dong Ran, Cai Dongsheng, Nakagawa Shinobu, Tomonari Higaki, Nobuyoshi Asai
2. 発表標題 The Beauty of Breaking Rhythms: Affective Robot Motion Design Using JoHa-Kyu of Bunraku Puppet
3. 学会等名 SIGGRAPH 2019:ACM SIGGRAPH 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川麻衣子, 奥山祐市, Ben A. Abderazek
2. 発表標題 Hardware Implementation of Feature-based Image Alignment for Semi-direct Visual Odometry
3. 学会等名 第4回情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤利明
2. 発表標題 神経スパイクモデルの連立微分方程式の数値解法について
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maiko Arakawa, Yuichi Okuyama, Shunsuke Mie, Ben Abdallah Abderazek
2. 発表標題 Horizontal-based Attitude Estimation for Real-time UAV control
3. 学会等名 The 17th International Conference on Computer Applications (ICCA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嶺岸 金太郎, 弥栄 俊介, 奥山 祐市, 浅井 信吉
2. 発表標題 位置情報を利用した自動機械の動作制限システムの設計
3. 学会等名 第4回情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 伊藤 利明
2. 発表標題 ODEとコネクトーム
3. 学会等名 応用数理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke Mie, Yuichi Okuyama, and Hiroaki Saito
2. 発表標題 Simplified Quadcopter Simulation Model for Spike-Based Hardware PID Controller using SystemC-AMS
3. 学会等名 2018 IEEE 12th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

脳波でドローンを飛ばそう http://bcidrone.xsrv.jp/ 研究集会「常微分方程式の数値解法とその周辺」 http://www.cas.cmc.osaka-u.ac.jp/~paon/ODE-jp-2016/reference/ 脳波でドローンを飛ばそう http://bcidrone.xsrv.jp/

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	蔡 東生 (Cai Donsheng) (70202075)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

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	浅井 信吉 (Asai Nobuyoshi) (80325969)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授 (21602)	
研究分担者	松島 正知 (Matsushima Masatomo) (30755640)	同志社大学・生命医科学部・助教 (34310)	
研究分担者	奥山 祐市 (Okuyama Yuuichi) (90404897)	会津大学・コンピュータ理工学部・准教授 (21602)	

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