様 式 C－19、F－19－1、Z－19 (共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04208

研究課題名（和文）システム同定法による二酸化炭素測定値からの植物単細胞リズム分離とその実験的検証

研究課題名（英文）Modeling and Experimental Validation of CO2 Uptake of Multi-Cells in Crassulacean Acid Metabolism

研究代表者

末光　治雄（Suemitsu, Haruo）

大分大学・理工学部・客員研究員

研究者番号：50162839

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，数理モデルベースの実用的計測法として，比較的リアルタイム測定の容易な植物全体の二酸化炭素取り込み量を計測値とし，このデータは単一細胞の時間遅れ信号の線形和として植物全体の二酸化炭素取り込み量が合成されるという数理モデルから各細胞の状態を推定するソフトセンサ手法を提案する．このため，提案した数理モデルを，単一細胞振動子をカーネルとした周期カーネルモデルと見なし，植物全体の二酸化炭素取り込み量から単一細胞の二酸化炭素取り込み量への信号分離法をシステム同定法から提案した．この手法の有効性の検証のため，二酸化炭素取り込み量を測定する実験システムを構築し，最適化器による推定性能を検証した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
CAM植物とよばれる植物は乾燥環境に適応した光合成機構を備えるため,これらの制御法の確立により砂漠の緑化や食料生産の最大化，二酸化炭素削減効果,植物工場の実現などが期待されている.本研究ではCAM植物制御に必要な,植物の外気からのCO2取り込み量に関して,その信号分離問題と精密な計測のための植物実験装置の構築した．さらに，細胞同期の状態を検証するために，データ駆動型最適化器を提案した.

研究成果の概要（英文）：In this research, the momentum method using the adaptive differential filter is extended for a measurement-based optimization of an objective function with multivariable decision variables. Thus, we propose a switching optimizer with single variable optimizers to obtain the partial derivatives of the objective function. To evaluate the performance of the switching optimizer, we perform a numerical simulation of a time-varying quadratic objective function in two decision variables. Finally, we apply the proposed switching optimizer to the signal separation problem of the CAM plant. Our main contribution in this paper is to propose a switching law that allows us to apply the adaptive velocity estimator to estimate a gradient with respect to multiple decision variables. The simulation results of the time-varying quadratic objective function and the signal separation problem of the CO2 uptake show the switching optimizer converges to the optimal decision parameters.

研究分野：制御工学

キーワード：CAM plants　circadian rhythms　real-time optimization　momentum method

※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

植物は動物と異なり，動物の脳のような中枢は存在しないため，細胞間の同調機能がどのようになっているのかは，長い間未解決の問題であったが，最近，Takahashi ら(2015)により維管束と葉肉の概日時計が階層的にカップリングしていることが C3 植物であるシロイヌナズナの実験により示されている．本研究は，CAM（ベンケイソウ型有機酸代謝）型光合成を対象に，制御工学者，機械工学者，脳科学者の各分野の協力により遂行される．まず，植物の細胞間同期状態を評価する指標を，周期カーネルモデルを用いた信号分離問題の解として提案する．ついで，植物細胞の信号分離問題と脳波信号の分離問題の相違点を明らかにする．また，実験装置を作製し，植物の二酸化炭素取り込み量のみの測定データを用いて提案手法の有効性を検証するとともに，植物の健康状態と提案指標を関連付ける．

２．研究の目的

我々のグループでは，これを非線形システムのリズム制御問題として，Blasius らの単細胞モデルを用いて周波数制御系と位相シフト制御系を構成し，その制御性能を数値シミュレーションにより確認した．さらに，複数細胞の同期状態は光強度のパルス信号によりリセット可能であることをシミュレーションにより示している．ただし，実際の植物では，葉肉，茎，根の概日リズムはスパイラル波になることが実験的に知られているが，これら全体を模擬する数理モデルは与えられていないし，フィードバックに応用できるモデルの構築は困難である．そこで本研究では，実用的計測法と数理モデルとして，比較的リアルタイム測定の容易な植物全体の二酸化炭素取り込み量を計測値とし，このデータは単一細胞の時間遅れ信号の線形和として植物全体の二酸化炭素取り込み量が合成されるという数理モデルを提案した．ついで，この数理モデルを，単一細胞振動子をカーネルとした周期カーネルモデルと見なし，植物全体の二酸化炭素取り込み量から単一細胞の二酸化炭素取り込み量への信号分離法をシステム同定法から提案した．このことは，ちょうど脳細胞の全体の活動が脳波となって観測されることと同じ状況にある．脳波の場合には，ニューロン信号は確率的な発火をすることから，各々のニューロン信号を確率的に独立な信号を見なした独立成分分析法が提案されている．しかし，植物の概日リズムは連続信号であり，確率信号と見なすことには無理があるため，独立成分分析法は用いることができない．そこで，推定誤差を目的関数として最適化計算を行うことにより，パラメータである線形結合の係数と信号の時間遅れ列を推定した．これはマルチカーネル線形予測モデル推定の一種となるが，カーネルが 4 次元微分方程式から構成される細胞振動子であるため，カーネル勾配を解析的に導出することができないことから，従来，我々が提案してきた適応微分推定器を応用した勾配推定則を最適化計算に適用した．この手法の有効性は，実験データが必要不可欠なため，二酸化炭素取り込み量を測定する実験システムを構築し，実験データを用いて，最適化器を用いた信号分離を行った．

３．研究の方法

研究は，つぎの 3 部で遂行された．

（１）モデリング：維管束と葉肉の概日時計が階層的にカップリングしているという実験事実から，(a)細胞の大きさが均一ではないため，個々の二酸化炭素取り込み量はスカラー倍異なる，(b)細胞間が均一同期していないため，植物全体の二酸化炭素取り込み量は各細胞の時間遅れの和となる，との 2 つの仮定を置き，マルチカーネル線形予測モデルにより外部二酸化炭素取り込み量を定式化し，そのモデルの有効性を実験データから検証する．

（２）信号分離法の提案：測定が容易な植物全体の外部二酸化炭素取り込み量から単一細胞の外部二酸化炭素取り込み量を分離する手法をシステム同定の立場から提案する．また，脳波の信号分離問題との相違点を検証し，植物細胞の場合の特徴を明らかにする．

（３）実験装置の製作：実験装置は，あらゆる温度域の湿度を再現することが可能な２温度分流式光合成・呼吸測定装置およびパルス変調を利用した調光制御システムにより構成されている．シーケンサープログラムにより任意の波長変動を与え，高精度赤外線ＣＯ２測定器で変動を記録する．また，シーケンサーにはアナログ入出力機能もあり，ＣＯ２測定値により光源をフィードバック制御することも可能である．

４．研究成果

まず，計算機シミュレーションにより，提案した最適化器による信号分離法の有効性を検証した．CAM 植物を制御するためには植物の単細胞のＣＯ２取り込み量を計測する必要があるが，これは実際に計測することが難しいため，計測可能な植物全体のＣＯ２取り込み量から単細胞のＣＯ２取り込み量を信号分離する必要がある．これまでの研究で植物全体のＣＯ２取り込み量を「細胞の大きさが均一ではないため，個々のＣＯ２取り込み量はスカラー倍異なる」「細胞間が均一同期していないため，植物全体のＣＯ２取り込み量は各細胞の時間遅れの和となる」と仮定し，細胞の大きさの線形和の係数と時間遅れを決定変数とする最適化問題に帰着し，適応オブザーバを用いたスイッチング最適化器による細胞の大きさと遅れ時間の推定を行っている．図１はCAM の 2 セグメントモデルによるシミュレーション結果である．

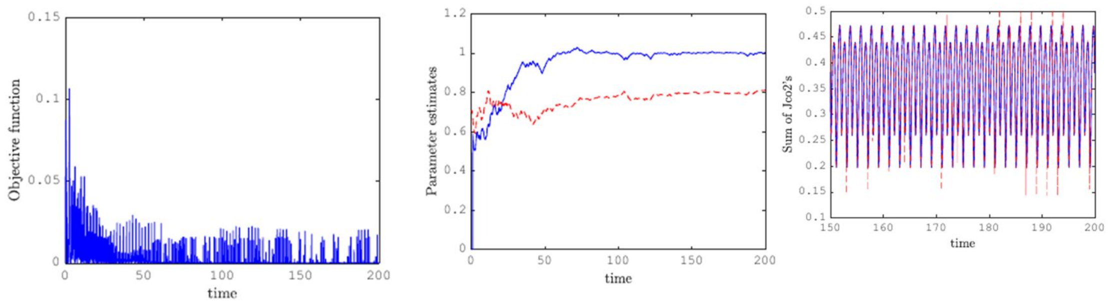

図１：最適化器の時間発展(左)目的関数,(中)決定変数,(右)CO_2取り込み量の和の推定値

つぎに，実験装置によるＣＯ２計測システムを構築した．このシステムでは，光・温度・外部ＣＯ２濃度を任意に設定し，高精度赤外線ＣＯ２計測器により植物のＣＯ２取り込み量を計測することができる．チャンバー内では温度・湿度・光量子センサにより内部の環境を計測し，チャンバー内から流出する空気の除湿のためにサンプリングシステムを装備している．
図２に実験システム構成と装置写真を掲載する．

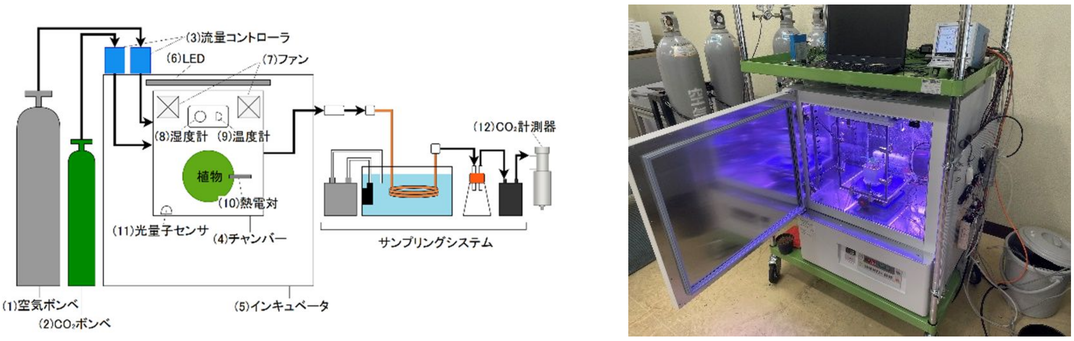

図２：実験装置の全体構成図(左)，実験装置外観写真(右)

実験条件は，以下のとおりである．
植物：シコロベンケイソウ　　実験期間：5 日間　　温度：25℃一定
湿度：5%以下　　照明：12h 周期で明暗繰り返し(光量子 315 μmol m-2 s-1)
空気流量：0.5L/min　　CO2 濃度：約 424ppm　　サンプリング：10 分周期
図３に，実験則物のシコロベンケイソウ(左)と光の強度の 12 時間でオンオフした場合のＣＯ２濃度(右)を示す．

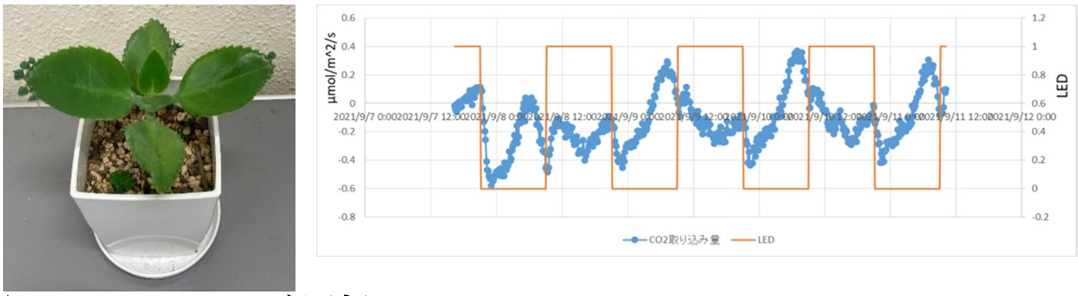

図３：シコロベンケイゾウ(左)，ＣＯ２取り込み量濃度(右)の時間経過図

ＣＯ２取り込み量濃度は以下のようにモデル化した，ここでは，CAM 植物を 2 つのセグメントに分けて，リズムが時間遅れを伴った和で表されている．ただし，k=1,2 としている．

$$J_{co2}^{all}(t) = \sum_k \alpha_k J_{co2}^{k}(t - L_k)$$

この推定モデルを次式とした．

$$\hat{J}_{co2}^{all}(t) = \sum_k \hat{\alpha}_k J_{co2}^{k}(t - \hat{L}_k)$$

ここで，次式のように目的関数をこの 2 つの差の 2 乗として，最適化を行った．

$$P(\hat{\alpha}_2, \hat{L}_2) = (J_{co2}^{all}(t) - \hat{J}_{co2}^{all}(t))^2$$

その結果，実験データを用いると，以下のように目的関数の最適化とＣＯ２取り込み量濃度の推定値が得られたが，シミュレーションと比較すると，推定性能はあまりよくなかった．これは，セグメント数を増やしたり，最適化器のアルゴリズム改善をする必要があるという結論に至った．

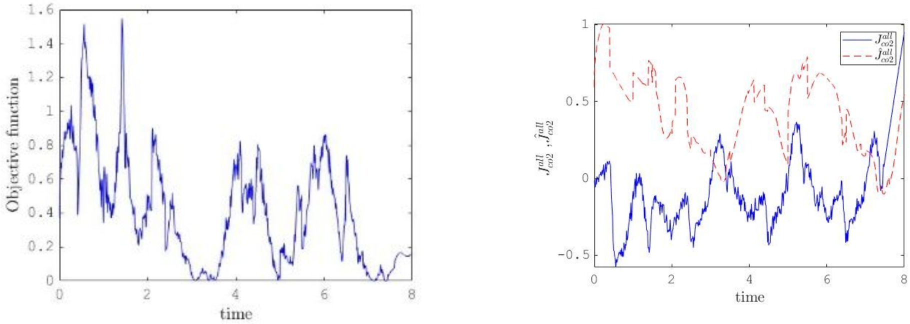

図４：目的関数の最適化応答(左)，ＣＯ２取り込み量濃度の実データ：青，と推定値：赤(右)の時間経過図

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計6件（うち査読付論文　6件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名	４．巻
Yi Shan、Ueno Shohei、Suemitsu Haruo、Matsuo Takami	1
２．論文標題 Adaptive Fault-Detector of Power Systems Using Active Electrical Power Dynamics	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Proc. of SICE2020 (Online)	６．最初と最後の頁 1850-1855
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE48898.2020.9240459	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	４．巻
Tomoyuki Moriyama、 Shohei Ueno、Haruo Suemitsu、 Takami Matsuo	1
２．論文標題 Time-Varying Parameter Estimation Using Nonlinear Parameterization and Application to Disturbance Estimation of Quadrotor Control	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Proc. of SICE2020 (Online)	６．最初と最後の頁 245-248
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	４．巻
Masaya Matsushita、Shohei Ueno、 Kotaro Murakami、 Takami Matsuo	1
２．論文標題 Repeated Replay Attacks and Detection Monitor for Adaptive Cruise Control System Control	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Proc. of SICE2020 (Online)	６．最初と最後の頁 1912-1915
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	４．巻
Keisuke Kawasaki, Haruo Suemitsu, Shohei Ueno, Takami Matsuo, Tadashi Konishi	1
２．論文標題 Modeling and Identification of CO2 Uptakes of Multi-Cells in Crassulacean Acid Metabolism Using Momentum Optimization Method	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Proceedings of the 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Kusatsu, Shiga, Japan, August 26 - August 28	６．最初と最後の頁 102-107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICAMechS.2019.8861661	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 Haruo Suemitsu, Shohei Ueno, Tadashi Konishi and Takami Matsuo	4．巻 16-3
2．論文標題 Real-Time Optimization with Adaptive Velocity Estimator and Application to Signal Separation of Cell Oscillators	5．発行年 2022年
3．雑誌名 ICIC Express Letters	6．最初と最後の頁 317-325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24507/icicel.16.03.317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Hayato Ueno, Takami Matsuo	4．巻 -
2．論文標題 Online and Offline Detections of Arrhythmia from ECG Signal Using Malthusian Parameter and Recurrence Plot	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Proc. of AROB27th, ISBC7th, and SWARM5th	6．最初と最後の頁 152-156
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14件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

1．発表者名 佐藤大和，上野尚平，末光治雄，松尾孝美
2．発表標題 クアッドロータの風外乱の適応推定とその補償法
3．学会等名 第 39 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会
4．発表年 2020年

1．発表者名 森山智之，上野尚平，末光治雄，松尾孝美
2．発表標題 基底関数展開を用いたクアッドロータの並進外乱と質量の同時推定
3．学会等名 第 39 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会
4．発表年 2020年

１．発表者名
易　杉，上野尚平，末光治雄，松尾孝美

２．発表標題
送電系のPMUデータによるパラメータ変動検出器の設計

３．学会等名
第 39 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
松下真也，上野尚平，松尾孝美

２．発表標題
協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃の性能評価

３．学会等名
第 39 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
松下真也，上野尚平，松尾孝美

２．発表標題
協調型車間距離維持支援システムに対するリプレイ攻撃と外乱オブザーバによる検出

３．学会等名
第63回自動制御連合講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
Taishi Kodama,Tomoyuki Moriyama, Yamato Sato and Takami Matsuo

２．発表標題
Time Varying Parameter Estimation via Basis Function Expansion and Application to Disturbance Estimation of Translational Movements in Quadrotor

３．学会等名
The SICE Annual Conference 2019（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Yamato Sato,Taishi Kodama,Tomoyuki Moriyama, and Takami Matsuo

２．発表標題
Noise-Robust Adaptive Observer of Driftless System and Application to Disturbance Estimation of Rotational Movements in Quadrotor

３．学会等名
The SICE Annual Conference 2019（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
川崎圭亮，末光治雄，上野尚平，松尾 孝美，小西忠司

２．発表標題
適応オブザーバを用いたリアルタイム最適化と細胞振動子群の信号分離への応用

３．学会等名
第 38 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会，宮崎大学

４．発表年
2019年

１．発表者名
佐藤大和，上野尚平，松尾 孝美

２．発表標題
適応オブザーバによるクアッドロータの外乱推定と軌道追従制御

３．学会等名
第 38 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会，宮崎大学

４．発表年
2019年

１．発表者名
森山智之，上野尚平，末光治雄，松尾孝美

２．発表標題
確率的勾配法を用いたクアッドロータの外乱と質量同時推定

３．学会等名
第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム,徳島大学

４．発表年
2020年

１．発表者名 易　杉，河野祐斗，上野尚平，末光治雄，松尾孝美
２．発表標題 有効電力動特性を用いた電力系統の適応故障検出器の設計
３．学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，徳島大学
４．発表年 2020年

１．発表者名 川﨑 圭亮，末光治雄，松尾 孝美，小西忠司，十時優介
２．発表標題 CAM植物のショ糖ホメオスタシスモデル
３．学会等名 第 37 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会，琉球大学
４．発表年 2018年

１．発表者名 川﨑 圭亮，末光治雄，松尾 孝美，小西忠司，十時優介
２．発表標題 CAM植物のショ糖ホメオスタシス調整機構のモデル化
３．学会等名 第 37 回 計測自動制御学会九州支部学術講演会，琉球大学
４．発表年 2019年

１．発表者名 田中俊介，小西忠司，末光治雄，上野尚平，松尾孝美
２．発表標題 実験データを用いたCAM植物の信号分離
３．学会等名 第40回 計測自動制御学会九州支部学術講演会学生発表会
４．発表年 2021年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

松尾研究室～Mat'sLab～大分大学福祉メカトロニクスコース https://onsen-mula.org/

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	小西　忠司 (Konishi Tadashi) (00225468)	大分大学・減災・復興デザイン教育研究センター・客員教授 (17501)	
研究分担者	星野　修 (Hoshino Osamu) (00303016)	茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授 (12101)	
研究分担者	松尾　孝美 (Matsuo Takami) (90181700)	大分大学・理工学部・教授 (17501)	

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