

「PFC令和元年度共同等研究成果発表会」 2020年6月

植物工場生産安定化技術への 概日時計制御理論の組み込み

大阪府立大学・植物工場研究センター・植物成長予測研究室

工学研究科・機械系専攻

福田 弘和

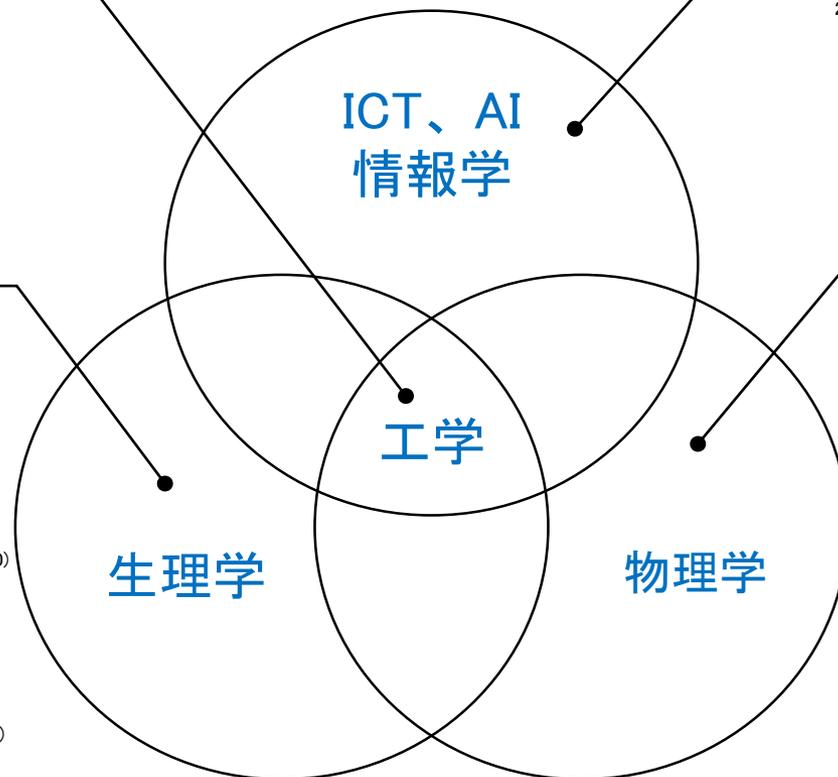
概日時計研究と植物生産システムの最適化

生産システムの最適化

生産の安定化
環境の最適化
成長の予測

システム同定・解析

人工光植物工場レタスのトランスクリプトーム解析(Higashi, 2016)¹⁵⁾
太陽光植物工場トマトのトランスクリプトーム解析(Tanigaki, 2015)¹³⁾
サーカディアン共鳴現象(Dodd, 2005)¹²⁾
分子時刻表(Ueda, 2004)¹¹⁾
細胞リズムの計測(Nakamichi, 2004)¹⁰⁾
トランスクリプトーム解析(Harmer, 2000)⁹⁾
時計遺伝子同定(Wang, 1998)⁸⁾
光周性(Bunning 1930s)⁷⁾
概日リズム観察記録(de Mairan 1729)⁶⁾



生産現場における予測

育苗室成長予測(Nagano, 2019)²⁷⁾
優良苗診断技術(Moriyuki, 2016)²⁶⁾
トランスクリプトーム予測(Nagano, 2012)²⁵⁾

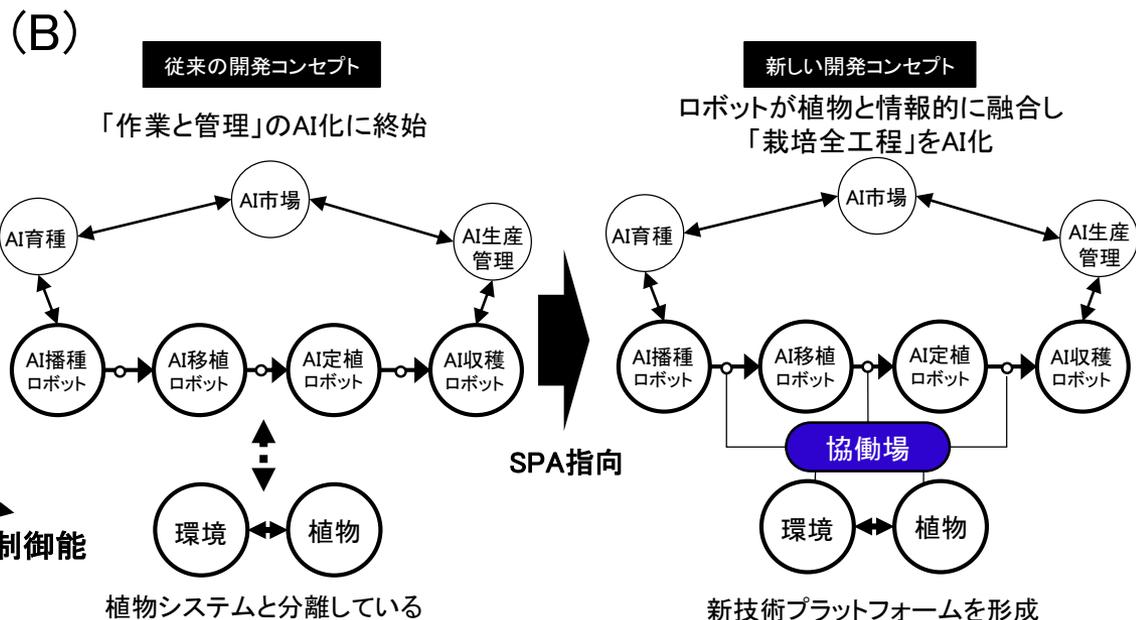
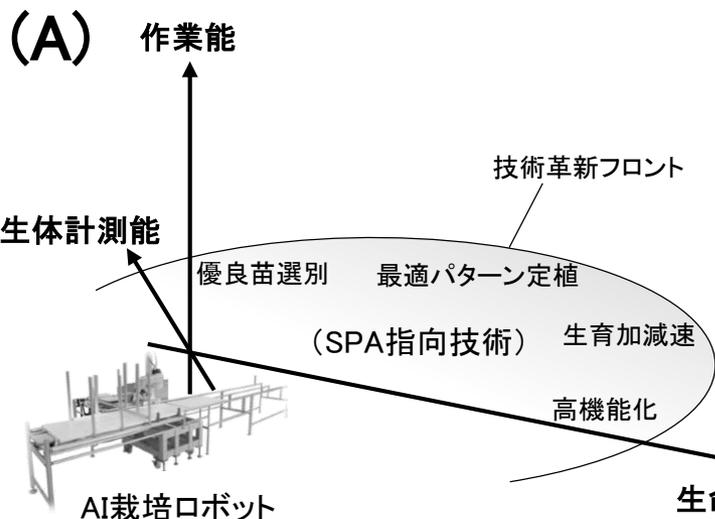
システム制御

位相応答関数(Masuda, 2017)²⁴⁾
階層構造(Takahashi, 2015)²³⁾
組織特異性(Endo, 2014)²²⁾
同期制御(Fukuda, 2013)²¹⁾
細胞間結合強度(Wenden, 2012)²⁰⁾
根の数理モデル(Fukuda, 2012)¹⁹⁾
葉の数理モデル(Fukuda, 2007)¹⁸⁾
時計遺伝子発振モデル(Locke, 2005)¹⁷⁾
細胞集団リズム計測(Millar, 1995)¹⁶⁾

2017年のノーベル生理学・医学賞は、「概日時計のメカニズム解明に関する研究」に贈られた。概日時計は、24時間周期の昼夜サイクルの下、生物の活動を最適化する重要な生理機構である。その応用分野は健康・医療、スポーツ、労働管理、農林水産業など多岐に渡る。

農業においては、植物の成長、ストレス応答、花成など、農作物の収量に直結する生理現象の制御に関わっており、概日時計の利用に注目が集まっている。植物における概日時計の研究は、「生理学」、「物理学」、「情報学」、「工学」へと徐々に分野を広げ発展してきた。近年では、「工学」に関する研究に注目が集まっている。例えば、植物工場が産業システムとして十分に成熟してきた現在、生産フローの最適化が重要課題となっている。特に、最適な栽培環境条件の算出だけでなく、生長量のロット単位での揺らぎ予測や、天候等に由来する外部ノイズや作業者等による内部ノイズを捉えた生産安定化など、時間軸上での最適化問題が課題となっている。

植物工場におけるAI栽培ロボットの開発指針

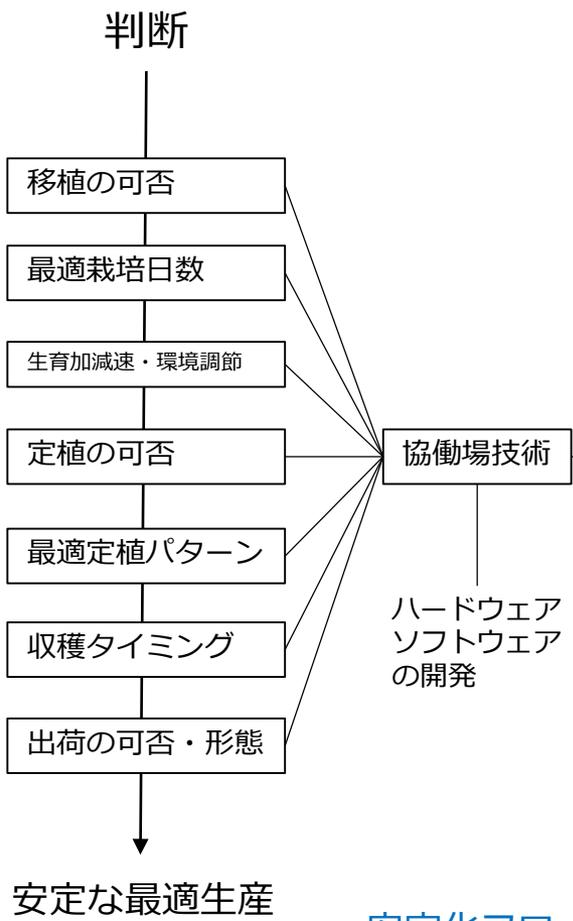


「AI栽培ロボットを起点とした新たな設計原理」とは何かの考察。

AI栽培ロボットが“人間の代わりとして同等の活動”を行うためには、「作業能」だけでなく人間と同じように「生体計測能」と「生命制御能」も有する設計とすべきである（図A）。これにより、ロボットが人間と同じように優良苗選別を行い、最適な定植パターンを判断し、生育を加速/減速し、植物の高機能化を目指すことができるようになる。もちろん、ロボットのセンサ（目や鼻）は栽培空間に分散させることができ、ロボットの情報処理サーバー（頭脳）は植物工場の外部に設置でき、幾らでも巨大化することができる。また、AI栽培ロボットは複数体存在し、それらは連結しているのが自然である。したがって、複数台のAI栽培ロボットが連結することにより集合知（メタ知性）が発生することを前提として、ロボットが「如何に“栽培”についての情報を得て、如何に“栽培”について考えて、如何に“栽培全体”を統括するか」を新たに設計することが望ましい。

さらに、植物環境工学の基本学理に基づいて考察を進めると、AI栽培ロボットは植物とも情報融合されているべきである（図B）。従来の栽培ロボットに関する開発コンセプトは“作業と管理のAI化”に終始している。しかし、新しい開発コンセプトは、“ロボットが植物と情報的に融合し「栽培全工程」をAI化する”とすべきである。そして、AI栽培ロボットと環境と植物が全て連結し最適化された「場」を想定し、これを技術化することが、新たな技術開発指針となる。本研究では、AI栽培ロボットと環境と植物が全て連結し最適化された「場」を「協働場（Cooperative Field）」と呼ぶことにする。複数台の栽培ロボットや環境調節システム、そして植物集団をもが協働し、利益の最大化とその安定化を目指すという目的性を冠した名称とした。協働場の技術は、AIによる情報処理プログラムであり、AI栽培ロボットやAI植物工場を駆動する基幹プログラムである。この協働場技術の開発において、概日時計は重要な役割を果たす。

自動化における時系列的なデータ処理



設計コンセプト

自動最適化アルゴリズム

- 最適解が満たすべき条件や性質
 - ・利益モデルに基づく最適解
 - ・非定常状態（過渡過程）を含んだ最適性
 - ・同調性（装置間、生物と環境、生物間、生産量と需要など）
 - ・ロバスト性、安定性
 - ・適応性、可変性
 - ・低コスト性、自律性
- 自動最適化の対象
 - ・「最適な生物値 y^* 」を実現する「最適な環境・作業 x^* 」
- 手段【技術】
 - ・リアルタイムで高品質な入力情報【センサ】
 - ・入力情報のクレンジング【画像データ処理】
 - ・広範囲のデータ領域の管理【多次元データベース】
 - ・高性能な特徴量エンジニアリング【概日時計の科学】
 - ・多段階の評価関数（利益、売上、コスト、効率、生物状態など）
 - ・最適化手法【ベイズ推定、機械学習】
 - ・予測【機械学習】
 - ・コントロール【生産計画、環境制御、作業ロボ】
 - ・安定化【制御理論、分岐理論】

安定化フローチャートは「福田, 植物環境工学,31(4):189-197,2019」に記載

（左図）AI栽培ロボットに要求される日々の定常的な判断。「播種すべき品種と数量の決定」、「苗診断による移植する幼苗の決定」、…、「出荷の可否・形態」。これらは、現在、人間（主に工場長）が生産フローの中で日々判断している項目である。AI植物工場では工場全体を統括するサーバーで自動処理され、AI栽培ロボットが多段階的に作業する。

（右図）一連の処理を最適化するための基本方針。最適解が満たすべき条件や性質は、「利益モデルに基づく最適解（利益の最大化）」「生産安定性（システムのロバスト性）」などが必要である。必要とされる自動最適化の対象や手段を鑑みると、植物工場のAI化・ロボット化に伴い、“時系列的なデータ処理と最適化”が今後一層必要となることが分かる。したがって、植物体内の時間的秩序を規定する概日時計の重要性は今後一層高まること分かる。