

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05864

研究課題名（和文）有線ドローンの風圧を利用した施設栽培環境下における作物の群落内計測手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Canopy Monitoring System Using Tethered Drones and Their Downwash in Horticultural Environments

研究代表者

深津 時広（FUKATSU, Tokihiro）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業機械研究部門・グループ長

研究者番号：40355483

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ドローンは広域にわたり作物の様子を効率的かつ詳細に把握するのに有効であるが、施設内はワイヤなど障害物が多くGNSSが不安定なため安全に飛行させることは難しい。一方で、ドローンが飛行するさいに発生する風圧を利用することで、詳細な作物計測などの実現が期待される。特にイチゴ栽培では、群落内に作物の生長状態を把握するのに重要な新葉が隠れているため、ドローンの風圧を利用してこれを計測できれば収量予測や生育診断を高精度に行うことができる。そこで本研究では、施設内を安全に飛行できる有線ドローンの実現や、ドローンの風圧を利用した群落内の新葉や葉の裏などの計測を行うための課題解決方法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、これまで施設内で利用できなかったドローンを使用できるようにするための一つの解決手法を提示しており、施設内でのドローンを用いたモニタリング等における基盤的な研究成果である。またドローンの風圧を利用した群落内のモニタリング手法は学術的なだけでなく現場の生産農家に対しても有用な知見を与えており、施設園芸におけるスマート農業の実現に向けた重要技術として、社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：Drones are effective for monitoring crop conditions because they can efficiently and precisely measure large areas. However, in greenhouse environments, obstacles such as wires and unstable GNSS reception cause a risk of drone flight. On the other hand, utilizing the wind pressure generated by drone flight can support detailed crop measurements and cultivation management tasks such as pollination. This is particularly beneficial in strawberry cultivation, where new leaves, crucial for assessing crop growth, are often hidden within the canopy. By using drone-generated wind pressure to measure these new leaves, we can achieve high-precision yield predictions and growth diagnostics. Therefore, this study examines the implementation of tethered drones that can safely navigate controlled environments and investigates solutions for using drone wind pressure to measure new leaves and the undersides of leaves within the crop canopy.

研究分野：農業情報

キーワード：有線ドローン 群落内計測 風圧モニタリング 施設栽培

## 1. 研究開始当初の背景

農業生産を効率的に進めるためには、栽培環境情報、作物生育情報、病虫害情報、農作業情報といった、栽培作物を取り巻く**各種情報を取得することが重要**である。これらの情報はさまざまな農業予測モデルに利用されるほか、最近では深層学習を用いることで効率的な栽培管理の支援が可能となっている。施設栽培では、露地栽培と異なり長期に渡り開花・収穫などが施設内の各所で繰り返される。そのため**常に施設全体で、特に作物の状態を把握**することが、作物の収量増加や品質向上、労務管理の効率化などを実現するうえで重要となる。

これまで屋外における大規模な土地利用型農業などでは、近年ドローンによる効率的な広域モニタリング技術や、農業センサネットワークによる高精度定点観測技術などの研究開発が行われ、実用化が進んできた。一方施設栽培においては、定点による環境計測技術や作物計測技術などは研究開発・実用化が行われていたものの、施設内を広域にモニタリングする技術の研究開発については、**課題も多くあまり行われていなかった**。また栽培管理を行ううえで重要な病斑・害虫・生長点付近などの情報は、**通常の状態では見えない群落内や葉の裏まで観測**しなければならず、これを広域で簡単に計測する手法は確立していない。施設栽培の主要作物のひとつであるイチゴについては、新葉の生長状態の把握が栽培管理上非常に重要であることが明らかになっているものの、**新葉は群落内部に隠れて外から様子が見えない**ことが多く、既存の装置では作物の群落内部を自動で計測するのが難しいといった課題をかかえていた。

## 2. 研究の目的

生育～収穫が長期にわたり繰り返される施設栽培において、作物の生育状態を施設内全域にわたり効率的かつ詳細に計測することが重要である。施設栽培環境下にて、安価で簡単に栽培作物全体の生育状態を、群落内も含め詳細に自動計測することができれば、栽培管理の効率的支援や農業ビッグデータの蓄積による新たな知見の抽出などが期待できる。

そこで本研究では、これらを実現するひとつの手法として、GNSSの受信が不安定な施設内で安全・簡単に飛行が行うことが期待される**有線ドローンによる施設内計測システム**を提案し、これを実現するための手法を明らかにする。また本研究では、施設内を安全に飛行できる有線ドローンが開発された場合、**ドローンの風圧を利用して群落内や葉の裏などを計測**できるモニタリングシステムの実現可能性について明らかにする。有線ドローンによる作物の生育状態を詳細に計測する手法を確立することができれば、栽培管理の効率的支援や新たな情報蓄積に伴う新知見の発見に繋がる、基盤的な技術を提供することが期待される。

特に本研究では**イチゴ栽培を対象**とし、イチゴ栽培ハウス内にて有線ドローンをはじめとするドローンによる広域モニタリングシステムを実現するための手法について検討を行い、その有効性や実現性を明らかにする。また有線ドローン飛行時に発生するダウンウォッシュによって、イチゴ作物群落内の詳細計測がどこまで行えるかを明らかにし、ダウンウォッシュを用いたモニタリング手法やその応用・拡張について検討をすすめる。

## 3. 研究の方法

本研究では、施設内で栽培されている作物を広域にわたり、葉の裏や群落内部などを詳細かつ効率的に計測できる新たな手法として、施設内で安全・簡単に利用できる有線ドローンを提案し、その実現可能性や他のドローンシステムとの比較検討を行う。またドローンの風圧を利用して、葉の裏や群落内部などを詳細に計測できるかを明らかにし、ドローンのダウンウォッシュを用いたモニタリング手法の提案や、その応用・拡張について検討する。

有線ドローンについては、施設内上部にガイドとなるワイヤ等を敷設し、ドローンをワイヤに拘束しながら移動計測させることで、施設内を安全に飛行するための手法を開発する。またGNSSの受信が不安定な施設内で飛行可能な他のドローン手法についても検討・調査を行い、それぞれの特徴や課題などを明らかにする。群落内部などのモニタリング手法については、有線ドローンの風圧を積極的に利用し、対象作物に適切な風圧をかけることで作物の葉の裏や群落内部を露出させ、目的となる対象を明瞭に観測する計測手法を開発する。また従来のドローン計測における解析手法やツールを活用しつつ、提案計測手法を可能にするための諸条件の導出や実現に向けた課題などを明らかにする。

具体的には、有線ドローンの施設内飛行の実現の課題(深津)と、風圧を利用した群落内観測の実現の課題(坪田)に大別し、それぞれの内容に対して次の個別研究を行い、これらの研究成果を統合して提案手法の有効性を明らかにする(深津・坪田)。有線ドローンは、離着陸時の飛行が不安定になる・飛行時に完全に自重を補償する浮力は必要ない、など従来のドローンと異なるた

め、まずは有線ドローンの機体設計・制御アルゴリズムの開発を進める(2021-22)。また拘束状態で移動計測を実現するにあたり、風圧や移動速度などが計測側から制限されることがあるため、有線ドローンによる移動計測のための飛行計画を実現するための機能などの開発を進める(2021-22)。また施設内のワイヤ敷設やドローン側のワイヤ保持機構についても検討し、安全で簡単に施設内を広域にわたり移動できる仕組みなどの開発を進める(2022-23)。風圧計測については、群落内の対象を観測するのに適した風圧の調査や、取得した画像から対象を検出するアルゴリズムの開発を行う(2021~22)。また観察範囲や露出状態を調整するためのドローン制御手法や、対象を明瞭に観測するための手法について検討する(2022~23)。最後に、上記で開発した手法を統合し、実際の栽培環境下で実験を行いながら、提案手法の有効性や実現可能性について明らかにする(2022~2023)。

#### 4. 研究成果

有線ドローンについては、有線によって施設内の安全飛行が確保される一方で、離着陸・飛行時の制御手法が従来と大きく異なるため、様々な制御アルゴリズムを試験できる有線ドローン用制御コントローラの開発と、有線ドローン飛行のための実験装置の開発を行った(図1)。これを用いて幾つかのドローン制御手法を試した結果、有線飛行時には通常のドローン内部の姿勢センサのゲインを小さくし、進行方向後ろ側の回転数を高めにする静的な姿勢制御を組み込むことで有線ドローン飛行が行えることが明らかとなった。また、施設内のワイヤ敷設方法やドローンのワイヤ保持機構については、ワイヤの敷設本数(1, 2, 3本)および配置方法(ドローン上部・下部・平行・垂直など)を変えた幾つかのパターンを試験し、それぞれの敷設容易性、ドローン安定性、保持機構の簡便性などで評価を行った(図2)。現状ではドローンの安定性を確保するためには2本・垂直のワイヤ敷設が望ましく、保持機構の脱輪を防ぎながら脱着が容易な保持機構について設計・開発を行った。また試験的に、有線ワイヤにドローンの荷重がかかっているかどうかを判断するセンサを組み込み、荷重の有無でドローンの制御手法(通常飛行、有線飛行)を切り替えられることを確認した。これにより、有線飛行区間と通常の飛行区間を複合した飛行について、可能性を示唆することができた。本研究では1つの栽培列に沿った飛行までを対象としているが、ドローン本来の自由な飛行や複数の栽培列への適用を考えた場合の敷設ワイヤの乗り換えなどを実現する場合、本結果は有用な知見となる。また有線ドローンとともに非GNSS環境下で飛行可能なドローン手法について検討・調査を行った結果、トータルステーション(TS)方式および画像による自己位置推定手法のドローンが、施設内で飛行可能なものとしてあげられた。これらはコスト・自由度・安全性・環境適応性・設置労力などでそれぞれ有利・不利があることが明らかになった。

風圧モニタリングについては、作物を傷つけずに群落内の対象を観測するのに適した風圧の条件について試験するとともに、加えた気流の強さと葉の投影移動量についての関係式を明らかにした。葉が上方から受ける風荷重を算出し、葉柄のヤング率等の物理特性値などを実験から求めた結果、葉が損傷せずに加えることができる風速の上限は10m/s程度であることが予測された。一方、イチゴの株に上方から加わる気流速と葉の動きの関係を調べた結果、風速4~6m/s程度で葉が生長点から外側に30mm程度動き、生長点近傍の露出空間(隙間率)が60%程度まで増加することから、イチゴ株の上方から気流を加えながらカメラで撮影することで、株にダメージを与えずに通常は死角にある生長点近傍を露出させて、若い葉、発生直後の蕾などの生体情報を省力的に観測できることが示された(図3)。また有線ドローンで作物列上を移動観測した時系列画像データから各作物個体に新葉が新たに発生したか否かを自動で識別するために、作物個体に普遍的IDを付与して識別する画像処理手法を開発した。株の個体識別アルゴリズム(図4)は、カメラを備えたドローンなどの移動体が作物列に沿って連続撮影した画像を使用し、画像中の株を検出、数をカウントし、前後の株数の違いから株を個体識別する。作物列内に定植した株数に至るまで本処理を繰り返すことで、列内の全ての株に固有のIDを付与した個体単位での画像を記録できた。本アルゴリズムでは、株間が概ね一定である場合、各処理画像中で少なくとも1株以上の株を正しく検出できれば、株間を基準にその上下や間に株があることを推定・株を正しく検出しなかったことを判定することができる。また、特定の画像中に株を全く検出できない場合においても、前画像の個体ID、検出座標と移動速度から、画像中で検出されなかった株の範囲を推定することで、画像処理で株を安定して検出することが困難な場合においても推定により株を識別できることが確認された。

また、それぞれの研究成果から、本研究で提案した有線ドローンによる風圧を利用した群落内等をモニタリングするシステムの実現性を明らかにすることができたとともに、研究課題の応用・拡張として、風圧を利用した受粉などの栽培管理支援の可能性が示唆されたことから、本研究課題をベースにした研究プロジェクト(NICT)の応募を行い、採択された。

```

feedback2 | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
Select Board

feedback2.ino
91
92 /* Update all the values */
93 while (I2CRead(0x38, I2CData, 14));
94 accX = (int16_t)((I2CData[0] << 8) | I2CData[1]);
95 accY = (int16_t)((I2CData[2] << 8) | I2CData[3]);
96 accZ = (int16_t)((I2CData[4] << 8) | I2CData[5]);
97 tempRaw = (int16_t)((I2CData[6] << 8) | I2CData[7]);
98 gyroX = (int16_t)((I2CData[8] << 8) | I2CData[9]);
99 gyroY = (int16_t)((I2CData[10] << 8) | I2CData[11]);
100 gyroZ = (int16_t)((I2CData[12] << 8) | I2CData[13]);
101
102 double dt = (double)(micros() - timer) / 1000000; // Calculate delta time
103 timer = micros();
104
105 // Source: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf
106 // atan2 outputs the value of -x to y (radians) - see http://en.cppreference.com/w/cpp/math_constants/atan2-function.html
107 // It is then converted from radians to degrees
108 #ifdef RESTRICT_PITCH // Eq. 25 and 26
109 double roll = atan2(accY, accZ) * RAD_TO_DEG;
110 double pitch = atan(-accX / sqrt(accY * accY + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
111 #else // Eq. 28 and 29
112 double roll = atan2(accY, sqrt(accX * accX + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
113 double pitch = atan2(-accX, accZ) * RAD_TO_DEG;
114 #endif
115
116 double gyroRate = gyroX / 331.0; // Convert to deg/s
117 double gyroRate = gyroY / 331.0; // Convert to deg/s
118
Ln 1 Col 1 No board selected

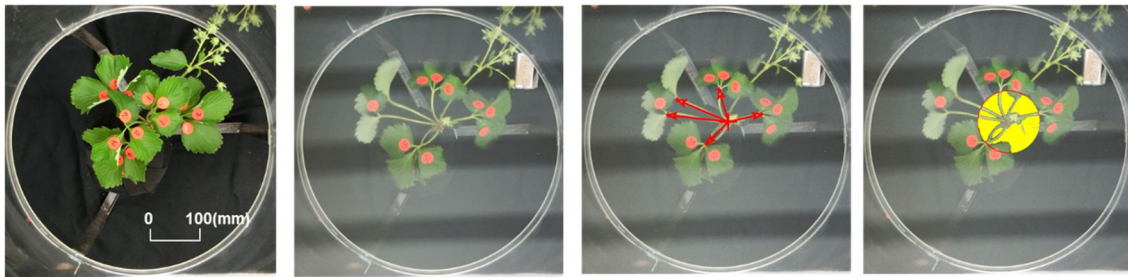
```



図1 試作した実験装置



図2 有線ドローン実験の様子



- 1) 上方から見たイチゴ株
- 2) 気流を受けて生長点が露出した株の様子
- 3) 移動した葉の位置の計測の様子
- 4) 葉の移動によって生じた隙間領域

図3 気流作用時のイチゴ株の様子

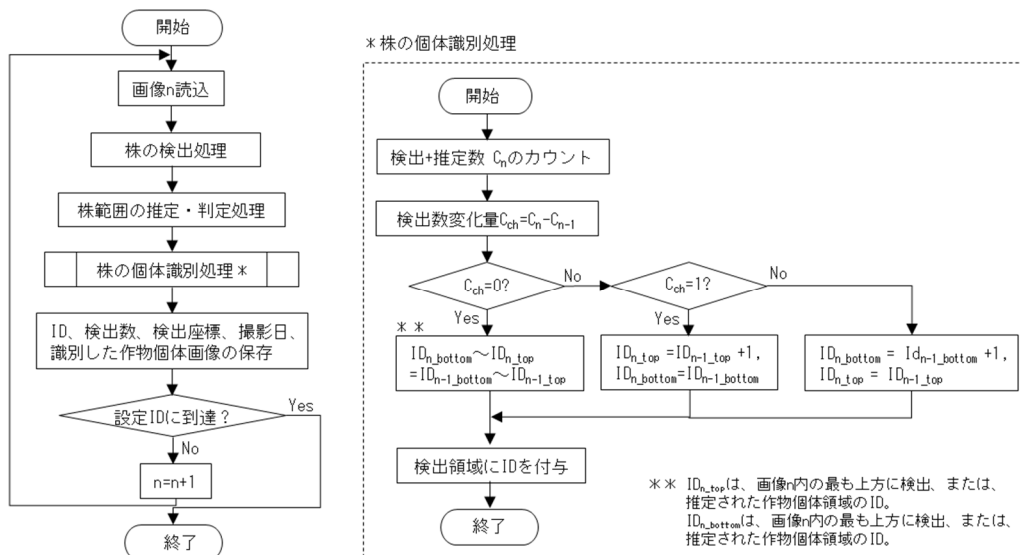


図4 移動撮影画像を用いた株の個体識別アルゴリズム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 坪田将吾, 難波和彦, 深津時広	4. 巻 84(5)
2. 論文標題 促成栽培イチゴの生育診断に資する生体計測手法－生長点の露出に必要な気流条件の検討－	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 321-331
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0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 イチゴの株の情報取得システム	発明者 坪田将吾, 深津時広	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-119051	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 イチゴの株の情報取得システム	発明者 坪田将吾, 難波和彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-119050	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 イチゴの株の情報取得システム	発明者 坪田将吾, 深津時広, 難波和彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-119049	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 作物体識別システム及び作物体識別プログラム	発明者 坪田将吾, 難波和彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-051197	出願年 2023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	坪田 将吾  (TSUBOTA Shogo)  (90643388)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業機械研究部門・主任研究員    (82111)	

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
---------	---------