原著論文

広域・精細モニタリングのための移動作業型フィールドサーバの開発

深津時広^{*1)}・遠藤 玄^{2,3)}・伊藤祐太³⁾・小林一樹⁴⁾・斉藤保典⁴⁾

- 1) 農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター 〒305-8666 茨城県つくば市観音台 3-1-1
2) 東京医科歯科大学生体材料工学研究所 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 2-3-10
3) 東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1
4) 信州大学学術研究院理工学域工学系 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1

要旨

本研究では広域・精細なモニタリングを実現する手法のひとつとして、移動作業型フィールドサーバを用いたモニタリングシステムを提案した。移動作業型フィールドサーバとは、これまでのフィールドサーバに計測位置を変更できる移動機構ユニットと柔軟なモニタリングを実現するマニピュレータを搭載したものであり、周囲のフィールドサーバとこれが連携することで効率的な操作・管理を行うことができる移動計測システムを構築した。本論文では高積載量を実現し、搭載面を水平に保ちつつ不整地を安定して歩行できる移動機構ユニットと、軽量・省電力で広範囲の作業領域をもつマニピュレータを備えた移動作業型フィールドサーバを開発し、幾つかの評価実験を行うことで提案システムの有効性や実現可能性について検討した。特に圃場現地試験では、遠隔地の利用者が必要に応じて圃場群落内を移動させながら目的作物の詳細な生育情報を取得できることを確認した。実験結果から、提案システムが高度で汎用的なモニタリングシステムを構築し、より有用な情報の取得が可能であることを示すとともに、提案システムの実現に向けた今後の課題について明らかにした。

キーワード

センサネットワーク，圃場モニタリング，軽作業アーム，歩行ロボット，フィールドサーバ

はじめに

21世紀型農業では、圃場環境情報・作物生育情報・農作業情報などを蓄積し、これらを利用して効率的な農業経営を行うことが期待されている。農業現場で必要とされる情報を取得する方法のひとつとして、センサネットワーク (Akyildiz et al. 2002) が近年脚光を浴びている。筆者らはこれまでに農業用のセンサネットワークとして、フィールドサーバ (深津・平藤 2003, Fukatsu and Hirafuji 2005) の研究を行ってきた。フィールドサーバはインターネットを通じて圃場を遠隔モニタリングできるシステムであり、管理プログラムであるエージェントシステム (Fukatsu et al. 2006) を用いて多様なセンサや画像データを効率的に収集・解析・表示することができる。一方でフィールドサーバは設置した周辺の様子しかモニタリングできないため、

1) 圃場における面的な情報をいかに取得するか、2) 観測しづらい場所にある対象をいかに把握するか、3) そのままでは搭載が難しい繊細で複雑な計測機器をいかに利用できるようにするか、が次のステップとしての重要な課題となる。

1) に関しては、設置台数を単純に増やすという解決方法が考えられるが、実際にはコストや設置・管理の労力などの点から現実的でない場合が多い。2) に関しては、対象作物などに近接して機器を設置できれば問題ないが、農作業や作物生育などに支障をきたすことも多く特に長期計測では実現が難しい。3) に関しては、例えば葉をめくる・挟む・果実に触れるといった動作を必要とする計測は、今のフィールドサーバでは実現できない。またラボベースで行われる精密計測機器などを利用した測定を圃場でも行うことが期待されるが、これらの機器は一般に計測までに複雑な手順を必要とするほか、大型で繊細な機器はフィールドサーバに内蔵して野外環境で利用するのが難しい。

そこで本研究ではこれらの課題を解決する方法のひとつ

* Corresponding Author
E-mail: fukatsu@affrc.go.jp

として、移動作業型フィールドサーバを用いたモニタリングシステムを提案する(図1)。移動作業型フィールドサーバは、これまでのフィールドサーバに計測位置を変更できる移動機構ユニットを追加し、作業性を向上するためのコンピュータを搭載したものである。移動機構ユニットを用いることで、単に1台で複数の地点を計測できるだけでなく、利用者の望む場所に必要な時だけ移動して計測できるため、農作業を妨げることなく詳細な情報を取得することができる。またコンピュータを備えることで、計測機器の物理的な操作や計測対象の保持・姿勢変更などが行えるだけでなく、先端にセンサや計測補助具を取り付けてより高度な計測を実現することができる。さらに従来の定点フィールドサーバと連携することで、移動作業型フィールドサーバの操作・管理を効率的に行うことができる。

本論文では提案システムの有効性や実現性について検討を行うため、まず関連する他の計測システムとの比較を行いつつ、移動作業型フィールドサーバが持つ特徴や利点について述べる。次に実際に移動作業型フィールドサーバを開発し、その基本性能を評価するとともに幾つかの圃場で実験を行う。特に今回は「地域農産物ブランド化を支援する分光型クラウドセンサネットワークの農圃場「現場」実証試験」プロジェクトと関連し、遠隔地の利用者が必要に応じて圃場群落内を移動させながら目的作物の詳細な生育情報を取得する状況を想定する。実験結果から提案システムが高度で汎用的なモニタリングを構築し、より有用な情報の取得が可能であることを示すとともに、提案システムの実現に向けた今後の課題などについて述べる。

関連研究

圃場における面的な情報を取得する方法として広く用いられているもののひとつに、衛星画像を利用したリモートセンシング(秋山ら 2006)が挙げられる。近年では衛星センサの解像度や種類も改善され、陸域観測技術衛星「だいち」(2011年運用終了)では10 m分解能のマイクロ波を用いた合成開口レーダ(PALSAR)が搭載されている。衛星画像は主に広域に渡る作物収量や品質の推定に用いられ、小麦や水稻の蛋白含有率を求める研究などが行われている(安積・志賀 2003, 安積ら 2006)。人工衛星と共に航空機によるリモートセンシングも広く行われており、こちらは衛星画像より高精細な情報を取得することができる。搭載センサや撮影タイミングなどを比較的柔軟に変更できる利点があり、精密農法などにおいて作物の生育状態を推定し、圃場マップを生成する研究なども行われている(Haboudane et al. 2004, 岡田ら 2011)。また最近では無人ヘリコプタやラジコンなどのUAV(Unmanned Aerial Vehicle)を利用したリモートセンシングが注目されている。これらは人工衛星や航空機写真よりさらに高い空間分解能を有するほか、データをほぼリアルタイムに取得できるといった特徴を備える。搭載量の制限があるものの任意のセンサを利用でき、経路を設定することで自律的に飛行するため、手軽で機動力のある計測手法として研究が行われている(杉浦ら 2005, Nagai et al. 2012)。

一方で、これらのリモートセンシングは上空からの光学センシングであるため、取得できる圃場情報がどうしても限られてしまうという欠点がある。これに対し、トラクタ

図1 移動作業型フィールドサーバシステムの概要

などにセンサを搭載して対象作物や土壌などを高精度に計測する、車両ベースのリモートセンシングの研究が国際的に行われている（柴田ら 2002, Noh et al. 2005）。これらは作物や土壌の状態を計測する様々なセンサを用いることができ、主に収量や品質に影響を与える局所的な地力ムラや生育ムラの計測が行われる。また GPS の位置情報と統合して地力マップや収量マップを生成し、可変施肥機などと連動して圃場状態に合わせた精密な肥培管理を行う技術なども開発されている。一方で、このようなトラクタなどの大型機械を用いた計測は大掛かりなものとなり、圃場の種類や条件、作物の背丈や生育状態などによって走行できないため、圃場群落内の様子を定期的にモニタリングするには向かない。これに対し、圃場にガイドレールなどを敷設して計測装置を移動させ、定期的にモニタリングする研究（藤川ら 2013）なども存在するが、敷設の手間や任意の場所で計測ができない、などの問題が残る。

移動作業型フィールドサーバの特徴

圃場群落内の作物の様子を広域・精細にモニタリングすることを考えた場合、先に述べた方法はどれも不十分である。特に農業現場では、定期的に圃場全体の生育を計測するだけでなく、必要なときに気になる箇所を詳細に調べられる機能が望まれる。そこで本研究では、これらを実現するひとつの方法として移動作業型フィールドサーバを利用したモニタリングシステムを提案する。移動作業型フィールドサーバは、これまでのフィールドサーバに移動機構ユニットとマニピュレータを備えることで、次のような特徴を持つ。

移動機構ユニットによるメリット

まず移動機構ユニットを備えることで、1 台のフィールドサーバで様々な地点の計測を行うことができる。これは多数のフィールドサーバを複数の地点に設置する場合と異なりどの地点も同じセンサで計測されるため、センサ間の補正などを考慮しないで済むという利点がある。またフィールドサーバを複数台設置する場合はそれぞれにセンサを搭載する必要があるが、移動作業型フィールドサーバの場合は 1 つで済むため高価なセンサを用いる場合に有効となる。他にも常時屋外で使用するには難しい繊細な計測機器の場合、普段はドックなどの安全な場所で待機させ、天候が良く計測機器に負担がかからないときのみ移動させて測定を行う、といった利用が可能となる。また、測定を行うときのみ目的の場所に移動することができるため、これまで農作業などの邪魔となるため難しかった作物に近接した定点観測なども可能となる。

マニピュレータによるメリット

マニピュレータを備えることで、次のような柔軟なモニタリングが実現できる。まず先端にセンサを取り付けるこ

とで、移動機構ユニットだけでは難しい作物群落内や対象への超近接計測、回り込んで裏側を計測するといった様々な方向からのモニタリングが可能となる。また長期に渡り計測を行っているとき対象物が枝葉などで遮られてくる場合があるが、このような場合でもマニピュレータによって観測を妨げるものを除去しながら計測するといったことが可能となる。

画像計測では、明るさなどが異なる環境下で撮影された画像を規格化できるよう、カラーチャートなどを含めて対象を撮影する方法が開発されている（Hashimoto et al. 2012）。しかしながら、カラーチャートをそのまま屋外環境下に置いておくと紫外線で劣化して正しく規格化できなくなることがある。このような場合、マニピュレータを利用して計測時のみカラーチャートを取り出す、といった使用法を提案することができる。他にも、計測時に葉を挟む葉緑素計などのように対象をハンドリングする必要があるものや、測定を行うのにマニュアル操作が必要とされる機器を用いる場合、マニピュレータを備えることで実現可能となる。

定点フィールドサーバとの連携

本研究で提案する移動作業型フィールドサーバでは、周囲に設置された定点フィールドサーバと連携して利用するシステムを前提とする。このようにすることで、単体で動作させるのに比べ次のような利点を得ることができる。

移動計測を行う場合、自身の位置情報をいかに精度良く把握できるかが重要となる。安価な単独測位法の GPS ではおよそ 10 m 程度の大きな誤差を含むため、そのままでは利用できず高価な RTK-GPS など別の手法が必要となる。しかしながら定点フィールドサーバと連携して利用した場合、定点フィールドサーバが取得する画像情報などを利用することで移動作業型フィールドサーバの位置を把握することができる。また移動作業型フィールドサーバ本体やマニピュレータなどを目的の位置に操作する場合、内蔵のカメラやセンサでは死角となったり全体を把握しづらかったりすることがある。このような場合、周囲の定点フィールドサーバから得られた画像情報などを共有することで、より操作しやすいシステムを構築することができる。

他にも定点フィールドサーバで測定された環境情報を利用することで、移動作業型フィールドサーバや搭載計測装置の稼働に向かない雨や強風といった環境条件下では動作させないというように、どのタイミングで何をどこに動かして計測を行うかといったスケジューリングを効果的に行うことができる。また言うまでもないが、フィールドサーバシステムの持つネットワークインフラや管理システムなども利用できるため、移動計測システムを構築するうえでの負担を大幅に軽減することができる。

図2 移動作業型フィールドサーバシステムの構成

実験システム

全体構成

提案した移動作業型フィールドサーバによる圃場モニタリングシステムを評価するにあたり、図2に示す実験システムを構築した。まず基本システムは従来のフィールドサーバシステムとし、対象となる圃場に数台の定点フィールドサーバを設置する。これらは相互に通信してネットワークを構築するとともにインターネットに接続され、遠隔地に設置されたエージェントシステムによって管理される。本実験ではインターネット通信回線として、フィールドサーバに内蔵された3Gデータ通信カードを利用する。また各フィールドサーバは、移動作業型フィールドサーバに対し通信インフラを提供できるよう、周囲にホットスポットを構築する。移動作業型フィールドサーバは通常充電ステーションを含むドックに滞在し、必要に応じて定期自動運行または遠隔マニュアル操作で移動計測を行う。移動計測時には定点フィールドサーバの動作状況を変更し、移動作業型フィールドサーバの様子を随時モニタリングして操作支援情報を提供できるようにする。

移動作業型フィールドサーバは、無線通信モジュール、メインカメラ、計測装置といった従来のフィールドサーバが持つ要素のほか、移動機構ユニット、マニピュレータで構成される（図3）。全体の大きさは640 mm × 550 mm ×

920 mm（収納姿勢時）で、重量は63 kgである。無線通信モジュールによって定点フィールドサーバのネットワークに接続され、移動機構ユニットやマニピュレータは従来のフィールドサーバと同様にWeb上で操作することができる。なお本実験システムでは、インターネット通信回線の速度が実質1 Mbps以下（最大で数Mbps）であることから、各稼働軸に対して安定した遠隔リアルタイム制御が行えない恐れがある。そこで移動機構ユニットやマニピュレータの操作は、ある程度まとまったシーケンス動作コマンドや目標位置・速度などを送信し、細かな制御は内部で自律的に行えるようにする。メインカメラはマニピュレータの根元に設置して一緒に回転できるようにし、今回は移動作業型フィールドサーバの操作に用いる。計測装置は測定対象・項目に応じて搭載するものを変更できるような設計となっているが、今回は対象作物の表面反射スペクトルを分光情報として取得する携帯端末型分光デバイス（高平ら2013）をマニピュレータの先端に搭載した。

移動機構ユニット

今回製作した移動機構ユニットは、サスティナブルロボティクス社のHexaLegsをベースに開発を行った。HexaLegsはLANDMASTER-3（妻木ら2009）を基本構成とする2群3脚式ツインフレーム型の歩行ロボットで、これを圃場移動用に駆動系・制御系などを再設計したものである。開

図3 移動作業型フィールドサーバ

図4 開発した移動機構ユニット

開発した移動機構ユニットの概要を図4に示す。重量は58 kg, 搭載量は最大20 kg, 移動速度は最大2 m/minである。24V12Ahのバッテリーを搭載し、1回で約2時間の連続歩行が可能であり、非接触充電ステーションにて充電が可能である。本移動機構ユニットでは全駆動系をワイヤ駆動とし、

モータ類を中央に集約することで防水防塵を容易にした。また駆動系にはウォームギアを利用し、外力によりバックドライブされない機構とした。これにより同じ位置姿勢を保つ場合にアクチュエータはパワーを必要とせず、省電力で姿勢の保持が可能となった。

図5 移動機構ユニットの歩行アルゴリズム

移動機構ユニットの歩行アルゴリズムを図5に示す。2組の3角形型ユニットにはそれぞれの頂点に伸縮脚が取り付けられ、各ユニット同士は並進・回転の自由度を持つ。歩行を行う場合は、1) 片方のユニットの脚を持ち上げる、2) ユニット間をスライドさせる、3) 持ち上げた脚を降ろす、4) もう片方のユニットの脚を上げる、5) ユニット間をスライドさせる、6) 持ち上げた脚を降ろす、を繰り返す。旋回を行う場合は、1) 片方のユニットの脚を持ち上げる、2) ユニット間を回転させ、持ち上げた脚を降ろす、3) もう片方のユニットを同じように回転させる、を繰り返す。また各脚裏には力センサが内蔵され、地面への接触を感知した脚は伸縮を停止するよう設定した。これにより、段差などがあっても移動機構ユニットは水平を保つことができる。

移動機構の形態としては、自動車やバギーなどを始めとする車輪型や、建設機械などに用いられるクローラ型なども存在する。これらは一般的に歩行型に比べ移動効率が高く最高速度も速いが、移動する際の圃場へのダメージや不整地の走破性などを考えた場合には歩行型が有効となる。特に今回の歩行機構の場合、他の形態に比べて対地適応性が極めて高く、障害物などがあっても安定して移動することができる。また凹凸のある地面を移動する場合でも、計測機器などを搭載する部分は常に水平に保つことができる。他にも最大積載量を大きく取れるにも関わらず、静止時には電力を消費せず安定して姿勢が保持できる、といった特徴を備える。

本移動機構ユニットでは、各駆動軸にこれを制御する

モータドライバ回路を用意し、その上位にこれらを統率する制御モジュール（Raspberry Pi を使用）を設置した。制御モジュールには Web サーバが内蔵され、これを通じて入力された目標値や歩行パターンなどを実現するよう、各モータドライバ回路の制御を行っている。Web サーバでは各駆動軸の動作を個別に指令できるほか、目標位置・速度での自動歩行、登録した歩行シーケンスの実行などを行うことができ、フィールドサーバの管理プログラムから制御可能である。

マニピュレータ

移動作業型フィールドサーバに搭載するマニピュレータは、1) 広い作業領域を備える、2) 低出力アクチュエータを利用し極力軽量である、3) 先端にある程度の重量物を取り付けながら省電力で駆動する、という仕様が要求される。1) は土壌などの地表面調査から果実や葉の計測など、様々な部位にアプローチしてモニタリングできるようにするためである。2) は JIS 規定により人が同じ環境で作業する場合は 1 軸 80 W 以内と規定されているほか、移動機構ユニットに搭載するためその最大積載量を超えないようにする必要がある。3) は先端に計測装置を取り付けた状態で動かすため姿勢によって負荷が大きくなるが、電力源は移動機構ユニットのバッテリーから賄われるため、1 回の稼働時間を長くするには低消費電力での駆動が求められる。

そこで本研究ではこれらの要求を満たすよう、図6に示すような 2 自由度 2 節リンク型アームに基部の旋回軸を追加した 3 自由度の軽作業用アームを開発した。アームリン

図6 開発した軽作業用アーム

ク部には軽量で強度のある CFRP 中空パイプを利用し、各軸の駆動は 20 W 小型モータをハーモニックドライブで高減速して使用した。可動範囲は半径 1,000 mm、重量は 5 kg であり、先端荷重は 0.5 kg を想定した。同等の可動範囲を持つ市販のマニピュレータはより出力の大きいモータを使用し重量も数十 kg あるが、本アームでは次のワイヤープーリ駆動および非円形プーリバネ系による自重補償機構によって軽量かつ低出力・低消費電力駆動を実現した。

ワイヤープーリ駆動により、リンク駆動の可動範囲を拡張するとともにアクチュエータを全て本体部に設置することができる。これにより、アクチュエータ自身の回転を防ぎ稼働時の負荷が軽減されるほか、大部分の重量（約 80%）がベースに集中され安定した重心を保つことができる。またワイヤや手先に取り付ける機器の配線などは全てリンクのパイプ内部を通して敷設できるため、防水防塵を容易に確保することができる。ワイヤープーリ駆動ではワイヤの強度や張力の保持などが問題となるが、ワイヤには高強度化学繊維であるダイニーマ・ケブラーを利用し、関節軸プーリにはワンウェイクラッチを内蔵して簡単にワイヤに張力を与えられるようにすることで、これらの問題を解決した。

消費電力を抑えながら駆動するには自重補償機構が必要であるが、一般的なカウンターウェイト方式では全体の重量が増してしまう。また一般的な線形バネによる補償では可動範囲全域で自重トルクを補償できない。そこで遠藤ら（2010）が提案した非線形プーリと線形バネを利用した自重補償機構を取り入れ、アームの自重や先端荷重による姿

勢保持トルクを効率的に補償した。非線形プーリにより広い可動範囲で各関節の自重トルクを補償できるため、関節軸 θ_1 、 θ_2 の可動範囲平均トルクは自重補償を行わない場合で約 80 mNm、47 mNm であったのに対し、自重補償を行うことで約 32 mNm、24 mNm と、それぞれ約 60%、49% のトルク（すなわち消費電力）削減を実現した。

また開発したマニピュレータは次のように制御される。各軸を制御するモータドライブ回路は小型 PC（Diginos Mini NUC-CN, Windows7）に USB 接続され、ここから指令動作コマンドが送信される。小型 PC 上ではモータドライブとの通信、順運動学・逆運動学の解析、アームの軌道生成、操作用 GUI の運用などが行われる。操作用 GUI では入力した目標点・移動時間でアーム位置を制御できるほか、事前に軌道を設定したタイムテーブルを読み込ませて行うプレイバック動作、アーム先端位置を簡単に微調整するワンクリック操作などが行える。これらの機能は小型 PC 内に遠隔操作ソフトをインストールして利用するか、GUI のラッパーとなる Web サーバを内部に起動させることで遠隔操作が可能となる。

システム評価

歩行実験

開発した移動機構ユニットによって安定した歩行を提供できるかどうかを評価するため、次の歩行実験を行った。実験ではフィールドサーバシステムを通じて歩行指令を送り、指令した通りに歩行できるかを確認した。指令は指定

図7 移動機構ユニット歩行時の様子および消費電流の変化

した距離の前進・後退および旋回を組み合わせたもので、これを5回実行した。また移動機構ユニットに0 kg から20 kg まで5 kg 刻みに重りを搭載し、そのときの挙動の変化やバッテリーの消費電流などについても確認した。なお実験では安全を見て移動速度を1 m/min とした。

実験を行った結果、歩行指令を Web 上で入力してから遅滞なく歩行動作が開始され、歩行指令に従って目測の範囲（数 cm 以内）で誤差なく歩行することを確認した。実験結果の一例を図7に示す。動作開始前の消費電流は約0.7 A で、これは主に無線通信モジュールや制御モジュールで消費されている分である。搭載面があるユニットの脚上げ後、搭載荷重によって消費電流が大きく異なることが確認された（開始後4～7秒）。これは脚上げによって荷重バランスが変化し、移動機構ユニットが若干傾くのを補正しているためである。よって搭載荷重が増えるにつれ、補正のための負荷が増大しているのがグラフに表れている。搭載面があるユニット脚下げ後の踏み替え部分（開始後12～14秒）でも、同様な現象が確認された。なお歩行時の位置・速度変化については、搭載荷重に関わらず同じように推移していることが確認された。

マニピュレータ遠隔操作実験

開発したマニピュレータの先端を、フィールドサーバシステムによって目的の位置に適切に遠隔操作できるかを評価するため、次の実験を行った。マニピュレータ自体は先端の座標位置または各関節角度を入力することで目標値通りに動作することが確認されている。ここでは実際の使用状況を想定し、周囲に設置した定点フィールドサーバのカメラ画像やマニピュレータ根元に設置されたメインカメラ画像を参考に、目標位置に先端をぶつけることなく移動できるか実験した。実験では細かな操作が行えるよう、遠隔操作ソフト（TeamViewer を使用）で小型 PC 内の操作 GUI（Visual Studio で作成）を利用した。実験時の通信速度は上り約 600 kbps、下り 800 kbps であり、カメラ画像（どちらも AXIS M1014、100 万画素）は1秒間に1枚更新で使用した。定点フィールドサーバは、マニピュレータから約2 m 離れた位置に設置した。

実験の様子の一例を図8に示す。操作 GUI ではマニピュレータの状態が3D グラフィックで表示され、視点を変更することができる。そのため定点フィールドサーバのカメラ画像と同じ視点に調整することで、精度良く先端を目標位置に操作することができた。実験では目標物を置いた任意の地点への操作を5回行い、到達までの平

操作用GUI

カメラ画像

図8 マニピュレータ遠隔操作実験の様子

図9 画像による位置推定実験の結果

均操作回数は2.8回、操作時間は16.2秒、先端の衝突は1回（初回時）であった。また遠隔操作ソフトを利用したため、コマンド送信から実際に動き始めるまで実験中2～3秒の遅延が定常的に確認された。

フィールドサーバ画像による位置推定

本システムでは移動作業型フィールドサーバを動かすにあたり、周囲の定点フィールドサーバより移動作業型フィールドサーバの様子を撮影した画像情報が支援情報として送信される。そこでこの画像情報を用いて対象の位置をどの程度推定できるか次の実験を行った。実験では2台の定点フィールドサーバ（AXIS M1014, 100万画素を内蔵）を8m離して設置し、両方のカメラ画像に映る範囲で移動作業型フィールドサーバを動かした。実験では対象を容易に画像認識できるよう、移動作業型フィールドサーバにピ

ンクボールのマークを取り付けた。2枚のカメラ画像から位置情報の推定にはエビポラ幾何を利用し、実験前にキャリブレーションを行ってパラメータを算出した。

実験の様子および位置情報の推定結果を図9に示す。位置情報の推定はシステムの都合上4秒毎に行われ、推定結果は定点フィールドサーバおよびメインカメラの画像と共に支援情報としてWebページで表示した。実験ではマークの認識率は100%であり、実測値と推定位置との平均誤差は8cmであった。ただし、実測値は移動作業型フィールドサーバと並行に撮影したビデオ映像から読み取った値であり、直線に歩行するよう指令したためY方向の移動は実測値では0とした。また、2台のカメラに対し撮影信号は同時に発信したものの、通信状態などによって必ずしも即座に撮影されなかった可能性もあり、これらが誤差に影響を与えているものと思われる。

図 10 ナシ園での圃場実地試験の様子

圃場実地試験

作成した移動作業型フィールドサーバを評価するため、長野県小布施町のナシ園にて動作試験を行った。本農園では神奈川県農業研究センターが開発した「樹体ジョイント仕立て（柴田・川嶋 2012）」を導入しており、ときおり専門家から本手法の技術指導を受けている。そこで、専門家が遠隔地からの技術指導を行う際の遠隔モニタリングツールとして移動作業型フィールドサーバを使用することを想定し、次のような圃場実験を行った。実験では、マンピュレータの先端に携帯端末型分光デバイスを取り付けた移動作業型フィールドサーバをナシ園内で移動させ、指定した複数のナシ果実表面の分光データを取得できるか試みた。

実験の様子の一例を図 10 に示す。移動機構ユニットに載せたマンピュレータ先端の可動領域は、地表面から 2 m 超までカバーできる。果樹園内の果実は約 1.5 ～ 1.6 m 程度の高さにありモニタリング範囲としては問題なかったが、逆に果樹園内を移動するときはマンピュレータをたたまいと衝突する恐れがあることが判明した。そこで実験では、目標地点まで移動・マンピュレータを展開・先端の分光デバイスを対象果実に近接・計測データをサーバに転送・マンピュレータを収納・次の目標地点まで移動、を繰り返した。果樹園内はやや凹凸のある地面であったが安定して移動を行うことができ、複数の対象果実のデータを問題なく取得できることが確認された。

考察および今後の課題

本研究では広域・精細なモニタリングを実現する手法のひとつとして移動作業型フィールドサーバによるモニタリングシステムを提案し、開発した移動作業型フィールドサーバを用いて行った実験から提案システムの有効性や実

現可能性について示した。移動作業型フィールドサーバは、重量のある機器が積載可能で積載面を水平に保ちながら不整地を安定して歩行できる移動機構ユニットと、軽量・省電力で先端にある程度の負荷を搭載しながら広範囲の作業が行えるマンピュレータを備える。また既存のフィールドサーバシステムと連携し、インフラや管理システムを共有するとともに動作時に様々な支援情報を受けることで、汎用性が高く効率的で高度な移動計測システムの構築が可能となった。

歩行実験では、開発した移動機構ユニットによって 20 kg までの機器を搭載しながら安定して目的の場所に移動できることを示した。移動時の消費電力は、理論上では搭載量にほとんど影響されないが実際には大きく変化することが確認された。これは機器の剛性および歩行する足場環境の影響で姿勢が傾くのを補正する際に生じており、補正タイミングやアルゴリズムを変更することで改善されるものと思われる。また歩行速度は、実験では 1 m/min で最大速度でも 2 m/min と遅い。これは、現時点では脚の周囲に障害物を検知するセンサを備えておらず、衝突を回避するため脚を十分に上げてからスライドしているのが主な要因である。よって脚上げ量を減らし、脚上げが終了する前からスライドを開始できるようにすることで、歩行速度は大幅に改善されるものと思われる。ただ本システムの場合、移動しながらの計測を実施したり繊細で高価な計測機器を搭載したりする使い方も考慮すると、必要以上に歩行速度を上げる必要はないと考えられる。

マンピュレータの遠隔操作実験では、フィールドサーバシステムを利用して適切に遠隔操作を行えることが確認された。フィールドサーバシステムは通常のセンサネットワークと異なり双方向性を備えているため、このような遠隔操作を行うシステムの構築に適している。しかしながら

図 11 Crop-Field-View アプリケーションの表示例

通信速度や遠隔操作ソフトの都合上、今回の実験では数秒の遅延が定常的に発生し操作性に若干の影響を及ぼした。これは通信回線やソフトを改善する解決策もあるが、遠隔操作ロボットなどの分野でこれらの遅延問題や操作性などの研究が古くから行われており、その成果をうまく取り入れることで改善するものと思われる。

フィールドサーバ画像による位置推定の実験では、移動作業型フィールドサーバの位置をある程度の誤差で推定できることが確認された。実験では認識を容易にするためマーカーを利用したが、適切な画像処理を用いることでこれは不要になるものと思われる。カメラ画像による推定を行う場合、対象が画角に入っていない・対象が精度良く推定できない位置に存在する、といった状況に対処する必要がある。本システムの場合、定点フィールドサーバのカメラがパン・チルト・ズーム機能を持つものであれば、これを制御して位置推定が最適に行えるような画像を取得する方法が考えられる。他にもフィールドサーバは無線通信を行っているため、無線を利用した位置推定の研究技術が利用できるほか、双方に電波や超音波などの受送信センサを取り付けて到達時間から位置推定を行うといった、様々な課題解決方法が考えられる。

圃場実地試験では実際に栽培が行われている農家のナシ園を利用し、遠隔地の利用者が提案システムによって目的の果実表面分光データを取得できることを示した。このような移動計測システムを用いて圃場農作物のセンシングを

行った事例は今回が初めてと思われる。実験では利用者が移動作業型フィールドサーバを遠隔操作する状況のみを想定し、定期的に自動運行させて多地点のデータをモニタリングする実験は今回行わなかった。自動運行を行う場合、特に果実などの農作物に近接して計測を行う場合、計測時に接触して傷つけないよう対象をどのように精度良く認識するか検討する必要がある。また自動運行のスケジューリングや動作時の安全性の確保など、解決すべき課題は多い。

他にも本論文では扱わなかったが、計測時に「どの場所からどのような状態で」データを取得したかという情報を記録するとともに、取得した情報をどのようにデータベースに格納し、どのようなアプリケーションで提示・利用するかなども検討する必要がある。まだ試作段階であるが、筆者らは移動計測によって取得された多数の画像データを表示するアプリケーションとして、Google StreetView のように圃場内の様子を 3 次元表示したうえに、さらに時間軸も追加して提示する Crop-Field-View の検討を行っている (図 11)。また本システムの利用例として今回は果実表面の計測を行ったが、他にもレーザ計測装置やハイパースペクトルカメラを搭載して圃場群落内の詳細データを取得する利用例なども検討している (図 12)。特にハイパースペクトルカメラは計測時に屋外光の強さを補正するため白色板でリファレンスを取る必要がある、このような場面でもマニピュレータを有効に利用することができる。

移動作業型フィールドサーバの現場での実地使用を考え

図 12 ハイパースペクトルカメラ搭載移動作業型フィールドサーバ

た場合、本論文では評価を行わなかったが次のような点についても考慮する必要がある。まず、本装置ではコンピュータやセンサなどの電源を移動機構ユニットに依存しているため、これらを頻繁に稼働させた場合には歩行時間が大幅に減少してしまう。そのため確実に充電ステーションに戻るよう、バッテリー残量に応じて利用者への警告や動作制限、強制帰還などを行う機能が必要となる。またソーラパネルを本体に装備し、バッテリー切れになったとしても後日自動的に復帰できるような機能も、遠隔システムでは有用かと思われる。稼働範囲についても同様に、装置が無線ホットスポットの範囲外に移動して操作不能に陥らないよう、通信状態に応じて警告や動作制限を行うほか、通信不能時には通信可能な範囲まで自動で引き返す・装置側の無線出力を一時的に上げる（通常は一段階低い無線出力で稼働させる）などの機能が求められる。また実際の使用場面では、ぬかるんでいる・傾斜している場所などで歩行が求められることもある。本論文で開発した移動機構ユニットは、構造上このような厳しい環境下での稼働が得意であり、その限界性能などを明らかにすることも今後の課題となる。

移動作業型フィールドサーバはまだ多くの課題があるものの、一方でこれまでのフィールドサーバでは限界であった作物の広域・詳細モニタリングの実現に大きく寄与するものであることが確認された。特に群落内における作物の詳細なモニタリングは、ニーズはあるものの多大な労力が必要とされたため、本手法は有効なツールになるものと思われる。今回開発した移動作業型フィールドサーバそ

のものは高価であるため、これがそのまま普及して多くの農家が利用するという可能性は低い。しかしながら、本システムによって実験室レベルで行われていた様々な研究を一気に圃場環境に持ってくるのが容易となり、これらの研究技術を現場に普及するための課題の明確化やこれまで得られなかった様々な新しい知見の獲得などを行うことができる。このように本システムは農業研究をより加速させる重要な役割を担うとともに、圃場モニタリングの更なる発展を推し進めるものとして、今後期待されるものである。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会「JSPS 科研費・若手 (B) 24780252, 基盤 (C) 25420214」, 総務省「SCOPE・地域農産物ブランド化を支援する分光型クラウドセンサネットワークの農圃場「現場」実証試験 (1304100)」の助成を受けて実施された。また移動機構ユニットの開発にあたっては、サステナブルロボティクス社のご協力を頂いた。また圃場実地試験では長野県小布施町的小林農園にご協力を頂いた。ここに感謝致します。

引用文献

- 秋山 侃・石塚直樹・小川茂男・岡本勝男・斉藤元也・内田 諭 (2006)「農業リモートセンシングハンドブック」, 佐藤印刷, 茨城, 512 pp.
- Akyildiz, I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci (2002) Wireless Sensor Networks: a Survey, Computer Networks, 38: 393–

- 422.
- 安積大治・志賀弘行（2003）水稻成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定, 日本リモートセンシング学会誌, 23: 451-457.
- 安積大治・林 哲央・志賀弘行（2006）衛星観測 NDVI による秋まきコムギ子実蛋白含有率地図の作成手法, システム農学, 22: 89-98.
- 遠藤 玄・山田浩也・矢島 明・尾形 勝・広瀬茂男（2010）非円形プーリーバネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適用, 日本ロボット学会誌, 28: 77-84.
- 深津時広・平藤雅之（2003）圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発, 農業情報研究, 12(1): 1-12.
- Fukatsu, T. and M. Hirafuji (2005) Field Monitoring Using Sensor-Nodes with a Web Server, Journal of Robotics and Mechatronics, 17: 164-172.
- Fukatsu, T., M. Hirafuji and T. Kiura (2006) An Agent System for Operating Web-based Sensor Nodes via the Internet, Journal of Robotics and Mechatronics, 18: 186-194.
- 藤川祐也・小林一樹・大谷武志・斉藤保典（2013）多地点計測のためのモノレール型圃場モニタリングシステム, 第30回センシングフォーラム計測部門大会, 175-178.
- Haboudane, D., J. R. Miller, E. Pattey, P. J. Zarco-Tejada and I. B. Strachan (2004) Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, Remote Sensing of Environment, 90: 337-352.
- Hashimoto, A., K. Suehara and T. Kameoka (2012) Quantitative Evaluation of Surface Color of Tomato Fruits Cultivated in Remote Farm Using Digital Camera Images, SICE JCMSI, 5: 18-23.
- Nagai, M., A. Witayangkurn, K. Honda and R. Shibasaki (2012) UAV-Based Sensor Web Monitoring System, International Journal of Navigation and Observation, 2012: Article ID 858792, 7 pp.
- Noh, H., Q. Zhang, S. Han, B. Shin and D. Reum (2005) Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors, Transactions of the ASAE, 48: 393-401.
- 岡田泰明・菅原幸治・吉田智一・平藤雅之・淵山律子・太田 健・松尾和之・浅井元朗・三浦重典・中谷敬子・澁谷知子・中園江・大下泰生・渡辺好昭（2011）リモートセンシングにおける多時期、多センサの画像データを使用した作物生育解析手法の開発—コムギ生育診断での試み—, 農業情報研究, 20(4): 148-159.
- 柴田健一郎・川嶋幸喜（2012）樹木の樹体ジョイント仕立て法, 特許第4895249号.
- 柴田洋一・佐々木良治・鳥山和伸・荒木 幹・浅野 修・広川 誠（2002）水稻の局所栽培管理のための画像マッピングシステム, 農業機械学会誌, 64: 127-135.
- 杉浦 綾・野口 伸・石井一暢・寺尾日出男（2005）ヘリコプタベースリモートセンシングのための飛行モニタリングシステム, 農業機械学会誌, 67: 86-92.
- 高平晴佳・小林一樹・大谷武志・斉藤保典（2013）作物表面色評価のためのスマートフォン分光計測, 第30回センシングフォーラム計測部門大会, 2A3-3.
- 妻木俊道・小林洋司・中野栄二・内山研史・玉田 守（2009）急傾斜山林地用実大歩行ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 27: 470-480.

受付日 2014 年 7 月 4 日
受理日 2014 年 7 月 29 日
担当分野 工学分野

Mobile Robotic Field Server for Field-scale and Fruit-scale Crop Monitoring

Tokihiro Fukatsu^{*1)}, Gen Endo^{2,3)}, Yuta Ito³⁾, Kazuki Kobayashi⁴⁾ and Yasunori Saito⁴⁾

*1) Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization,
3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8666, Japan*

*2) Institute of Biomaterials and Bioengineering, Tokyo Medical and Dental University,
2-3-10, Kanda-Surugadai, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan*

*3) Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1, Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552, Japan*

*4) Institute of Engineering, School of Science and Technology, Academic Assembly, Shinshu University,
4-17-1, Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553, Japan*

Abstract

To achieve both broad and close monitoring of crop growth in fields, we propose a robotic Field Server consisting of a conventional Field Server with sensors and a wireless interface for remote monitoring, a locomotion unit, and a manipulator. It is designed to be controlled via the Internet and to interact with other Field Servers. It is intended to monitor crop growth both broadly and closely as needed, to monitor many targets flexibly, to approach targets from different directions and avoid obstacles, and to carry sensitive sensors. We have developed a prototype robotic Field Server mounted on a pair of three-legged platform which can stay level while walking on rough fields, with a light-weight, low-power, spring-balanced sensor arm with three degrees of freedom that offers a wide work space. We evaluated the prototype in a pear orchard. It was able to collect detailed data on many target fruits within the orchard under remote control. The results demonstrate the system's potential and reveal how it can be improved.

Keywords

sensor network, crop monitoring, light duty arm, walking robot, Field Server

---

* Corresponding Author
E-mail: fukatsu@affrc.go.jp