

学位論文題名

葡萄園除草ロボットのための葡萄樹のロバストな触覚認識

(Robust Tactile Recognition of Grape Stems for Weeding Robot)

学位論文内容の要旨

大規模ワイナリでは様々な作業が機械化されているが、除草作業などは技術的にも自動化が困難であり作業コストも高い。これに対して、除草作業の省力化を図るために、トラクタのアタッチメントとして接触センサベースの除草専用機がある。しかし、その多くは葡萄作りが盛んな欧州で作られており、北海道の気候条件で育成した樹木に対して使用した場合、樹木の形状の違いから接触センサが正常に動作せず、誤刈りが少なからず生じるため、手動で操作されることが多い。そのため樹木周りの除草は作業者による刈払機を用いた作業が中心となっているが、雑草の生育が著しい夏季の除草作業は非常に過酷な労働であり、人的ミスによる葡萄樹の誤刈りが少なくない。これらの問題を解決するためにもロボットによる除草作業の自動化が求められている。そのためには、葡萄樹の位置を正確に知ることは必要不可欠である。

近年計算機の高機能化、低価格化に伴い容易に高機能な視覚センサを導入することが可能になった。作物と雑草の識別に関する視覚センサの研究として、RGB 3次元データを用いたものや、ハイパースペクトルを用いたものなど、数多く報告されている。しかし、これら育成物の位置情報を取得する視覚センサは、測定条件やノイズなどの影響による計測誤差が発生する。葡萄樹の周囲には雑草が繁茂しているため、視覚認識を行う際に雑草がノイズとなり計測結果に大きく影響を及ぼす。このような環境で視覚センサで取得した位置情報を元に除草作業を行う場合、除草機構が誤って葡萄樹に衝突する可能性は高い。ここで、人間が対象物を把持する際の対象物の知覚と運動について考えてみたい。通常、我々は視覚や触覚などの感覚器を通じて外界情報を取得し、その情報をフィードバック信号として利用することで、対象や環境の認知、運動計画や運動制御を実行していると考えられている。つまり、無意識の内に視覚で対象物の位置、形状、硬さなどを予測し、手でアプローチする際の力加減を調節していると言える。このように、目的となる対象物の硬さを視覚と触覚の両方で認識することで、周囲に障害物を有する環境においても、それらの硬さの違いから対象物の確実に精度の高い把持を可能としている。このような人間の知覚特性を模倣し、ロボットでも視覚と触覚とを融合する研究はビジュアルフィードバックを主として数多く報告されている。ロボットと対象物間の接触点位置の推定法には、指先に取り付けられた力覚センサによる力覚情報や、外部カメラによる視覚情報などを用いるものなど、ロボットと対象物間の相対運動などを組み合わせて接触点位置を求める事が多い。しかし、外力に対して変形する対象物に関する研究や、雑草の様な対象物以外のものがリンクに接触することは想定した研究は報告されていない。

本研究では、葡萄樹と雑草の硬さの違いに着目し、不確かさを持つ視覚情報を用いて触覚認識のロバスト性向上を実現した。実応用に向けて、再現性の高い実験的な検証を行うために、認識対象となる葡萄樹および雑草をモデル化し、シミュレーション環境を構築した。開発した実機による環境情報計測から、葡萄樹は一端が水平な地面に固定され、鉛直方向に立てた棒状弾性体として近似できること、また、雑草も同様に弾性体として扱えることを確認した。

視覚計測誤差を解析した結果、誤差分布は正規性をもっていることが分かった。視覚認識の誤差分布が正規分布であることから、葡萄樹の存在確率を正規確率密度関数で表すことが可能であると考え、葡萄樹領域の設計を行った。正規分布の特性として平均値においてもっとも高い確率を有することから、葡萄樹領域中心に近づくにつれ葡萄樹の存在確率は高くなる。このことから、葡萄樹領域をコンプライアンス場として見なすことで、葡萄樹の存在確率に応じたマニピュレータの力制御を行う。つまり、葡萄樹の存在確率が低い位置ではマニピュレータの剛性を高くすることで雑草の影響を受けにくくし、存在確率が高い位置では剛性を低くすることで葡萄樹へ与える力を抑制する。しかし、存在確率が高い位置ではコンプライアンスが高くなるので雑草の影響を受けやすく、葡萄樹の触覚認識を行う際に、誤って雑草を認識することによる誤報を検出する可能性が高くなる。そこで、雑草のマニピュレータへの影響をモデル化し、葡萄樹を接触認識するための接触判定条件を設定した。この条件を設定することにより、ノイズとしての雑草の影響を低減することが可能となり、触覚認識の精度向上を実現した。触覚認識の有効性の検証は誤報、欠報および誤認識率により評価を行った。誤報は葡萄樹との接触前に葡萄樹以外を認識する状態を示し、欠報は葡萄樹に接触してもなお認識しない状態を示す。これら、誤報および欠報を検出する確率を誤報率と定義した。誤認識率は葡萄樹の推定誤差に対する触覚認識の失敗度を表す。つまり、誤報および欠報を検出した誤差区間における確率密度関数の面積を求めると同義となる。提案手法の検証における比較対象は高コンプライアンス一定、低コンプライアンス一定とし、提案手法の有効性の確認をシミュレーションにより行った。

除草作業の自動化には、葡萄樹の根元位置を検出することが必要である。従来手法となる自己姿勢変形動作 (Self-Posture Changing Motion : SPCM) は、コンプライアント動作を通じて得られるリンクの姿勢変化を利用して、各姿勢におけるリンクとの交点を接点として検出するものである。この方法は、接点は位置センサの出力だけで算出されるため、高分解能のエンコーダを利用すれば、高精度で接点を算出することが可能となる。しかし、接触により対象物に変形が生じる状況を想定していないため、剛性を有する対象物の固定位置検出を行う際、変形量により検出結果に大きく誤差が生じる。この問題を解決するために、剛性が既知である対象物の変形量を考慮した位置検出手法として、変形量補正型自己姿勢変形動作 (Deformation-correction SPCM : D-SPCM) を開発した。これは、対象物の変形に伴う実位置とリンク上の SPCM による検出位置との誤差ベクトル、および実位置と固定位置との誤差ベクトルを考慮することで、対象物の固定位置を算出することができる。また、サンプリングタイムごとではなく、触覚認識時とのリンク姿勢により位置の算出を行うため、雑草の影響や対象物の変形に対してロバストに検出することが可能となる。

本手法の処理手順は、対象物の触覚認識、対象物の初期変形量キャンセル、対象物の固定位置検出の3つのフェイズからなる。触覚認識時に生じた対象物の変形量 (初期変形量) が、その後の固定位置検出時の精度に及ぼす影響は小さくないことを実験的に確認した。そこで、対象物の初期変形量をキャンセルするフェイズを設けることにより検出精度の向上を実現した。本手法は関節トルクと関節角度のセンシングのみで実現可能なシンプルなシステム構成のため、既存のシステムに組み込むことも容易である。実機により計測した実環境情報よりモデル化したシミュレーション環境において、葡萄樹の認識手法の有効性について検証した結果を報告する。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 田 中 孝 之
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 山 下 裕

学位論文題名

葡萄園除草ロボットのための葡萄樹のロバストな触覚認識 (Robust Tactile Recognition of Grape Stems for Weeding Robot)

大規模ワイナリでは様々な作業が機械化されているが、除草作業などは技術的にも自動化が困難であり作業コストも高い。現在、除草作業の省力化を図るために、トラクタのアタッチメントとして接触センサベースの除草専用機が導入されている。しかし、その多くは葡萄作りが盛んな欧州の環境に合わせて開発、製造されているため、北海道の気候条件で育成した樹木に対して使用した場合、樹木の形状の違いから接触センサが正常に動作せず、誤刈りが少なからず生じるため、手で操作されることが多い。そのため樹木周りの除草は作業者による刈払機を用いた作業が中心となっているが、雑草の生育が著しい夏季の除草作業は非常に過酷な労働であり、人的ミスによる葡萄樹の誤刈りが少なくない。これらの問題を解決するためにもロボットによる除草作業の自動化が求められている。そのためには、葡萄樹の位置を正確に知ることは必要不可欠である。

まず、本研究では、葡萄樹と雑草の硬さの違いに着目し、不確かさを持つ視覚情報を用いて触覚認識のロバスト性向上を実現した。実応用に向けて、再現性の高い実験的な検証を行うために、認識対象となる葡萄樹および雑草をモデル化することで、サイバーフィールド環境を構築した。開発した実機による環境情報計測から、葡萄樹は一端が水平な地面に固定され、鉛直方向に立てた棒状弾性体として近似できること、また、雑草も同様に弾性体として扱えることを確認している。

視覚計測誤差を解析した結果、誤差分布は正規性をもっていることを確認した。視覚認識の誤差分布が正規分布であることから、葡萄樹の存在確率を正規確率密度関数で表すことが可能であると考へ、葡萄樹領域を設計した。正規分布の特性として平均値においてもっとも高い確率を有することから、葡萄樹領域中心に近づくにつれ葡萄樹の存在確率は高くなる。このことから、葡萄樹領域をコンプライアンス場として見なすことで、葡萄樹の存在確率に応じたマニピュレータの力制御をする。つまり、葡萄樹の存在確率が低い位置ではマニピュレータの剛性を高くすることで雑草の影響を受けにくくし、存在確率が高い位置では剛性を低くすることで葡萄樹へ与える力を抑制する。しかし、存在確率が高い位置ではコンプライアンスが高くなるので雑草の影響を受けやすく、葡萄樹の触覚認識を行う際に、誤って雑草を認識することによる誤報を検出する可能性が高くなる。そこで、雑草のマニピュレータへの影響をモデル化し、葡萄樹を接触認識するための接触判定条件を設定した。この条件を設定することにより、ノイズとしての雑草の影響を低減することが可能となり、触覚認識の精度向上を実現した。触覚認識の有効性の検証は誤報、欠報および誤認識率により評価を行った。誤報は葡萄樹との接触前に葡萄樹以外を認識する状態を示し、欠報は葡萄樹に接触してもなお認識しない状態を示す。これら、誤報および欠報を検出する確率を誤報率と定義した。誤認識率は葡萄樹の推

定誤差に対する触覚認識の失敗度を表す。つまり、誤報および欠報を検出した誤差区間における確率密度関数の面積を求めることと同義となる。提案手法の検証における比較対象は高コンプライアンス一定、低コンプライアンス一定とし、提案手法の有効性をサイバーフィールド環境にて確認している。

除草作業の自動化には、葡萄樹の根元位置を検出することが必要である。従来手法となる自己姿勢変形動作 (Self-Posture Changing Motion : SPCM) は、コンプライアント動作を通じて得られるリンクの姿勢変化を利用して、各姿勢におけるリンクとの交点を接触点として検出するものである。この方法は、接触点は位置センサの出力だけで算出されるため、高分解能のエンコーダを利用すれば、高精度で接触点を算出することが可能となる。しかし、接触により対象物に変形が生じる状況を想定していないため、剛性を有する対象物の固定位置検出を行う際、変形量により検出結果に大きく誤差が生じる。この問題を解決するために、剛性が既知である対象物の変形量を考慮した位置検出手法として、変形量補正型自己姿勢変形動作 (Deformation-correction SPCM : D-SPCM) を開発した。これは、対象物の変形に伴う実位置とリンク上の SPCM による検出位置との誤差ベクトル、および実位置と固定位置との誤差ベクトルを考慮することで、対象物の固定位置を算出することができる。また、サンプリングタイムごとではなく、触覚認識時とのリンク姿勢により位置の算出を行うため、雑草の影響や対象物の変形に対してロバストに検出することが可能である。

本手法の処理手順は、対象物の触覚認識、対象物の初期変形量キャンセル、対象物の固定位置検出の3つのフェイズからなる。触覚認識時に生じた対象物の変形量 (初期変形量) が、その後の固定位置検出時の精度に及ぼす影響は小さくないことを実験的に確認した。そこで、対象物の初期変形量をキャンセルするフェイズを設けることにより検出精度の向上を実現した。本手法は関節トルクと関節角度のセンシングのみで実現可能なシンプルなシステム構成のため、既存のシステムに組み込むことも容易である。

以上を要するに、著者は、葡萄園における除草作業の自動化を実現する際、不均一な雑草環境や葡萄樹の個体差によるバラつき等、様々な問題によりこれまで困難視されていたが、不確実な視覚認識情報を触覚認識に適応するアプローチで葡萄樹をロバストな認識、葡萄樹の変形量を考慮することで高精度な葡萄樹の位置検出、有効性検証のための再現性を確保したサイバーフィールド環境の構築に関する新たな手法を提案し、それぞれに対して有効であることを確認した。これらの手法は、自然物を対象とした過酷な環境下における認識手法の一提案であり、今後、農業機械等の自動化を行う上で有益となり得る。よって、著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格があるものと認める。