ロボットマニピュレータのコンプライアント接触による 葡萄樹根元位置の検出*

井川 久** 田中孝之*** 金子俊一*** 多田達実** 鈴木慎一† 大村 功**

Detection of Grape Stem's Base Position by Compliant Contact Using Robot Manipulator

Hisashi IGAWA, Takayuki TANAKA, Shun'ichi KANEKO, Tatsumi TADA, Shin'ichi SUZUKI and Isao OHMURA

To remove weeds around a grape vine without damaging the stem, we propose a contact recognition technology in this paper. The developed technique can reliably determine the position of the vine's lower stem, which may be deformed under sufficient force and may be buried in the weeds. We have developed a new method to detect the position of grape stems as objects in which its deformation is considered. By calculating the deformation from the relations between the geometry and mechanics of manipulator's link postures before and after contact point detection, the position of the object can be determined with high accuracy. Because stem position detection commences after tactile recognition has been performed, any deformation of the object has already occurred. The effect of this initial deformation on the detection accuracy cannot be ignored. Therefore, position detection of object is divided into two operations: reducing the object deformation and detecting the object position. In this way, highly accurate recognition of its position is achieved. The paper continues by giving a detailed explanation of the proposed method.

Key words: weeding robot, manipulator, tactile recognition, position detection, compliance control

1. はじめに

本論文では、雑草に埋もれていて力を加えると変形を生ずる葡萄樹の根元位置を確実に認識し、樹幹を傷つけずに除草を行うことを目的として、一端が地面に固定された棒状弾性体のための、ロボットマニピュレータのコンプライアント接触による固定位置検出方法を開発する。

本論文における除草作業のフローチャートを図1に示す。前報¹⁾では、視覚認識による位置情報には誤差が含まれているため、その情報を元に葡萄樹を破損させることなく除草作業を行うことは困難であることを説明し、マニピュレータをロバストに葡萄樹へ接触させる手法について報告した。その手法は、視覚情報の誤差分布を利用し、葡萄樹の存在確率を考慮した葡萄樹領域を生成するものである。この領域をコンプライアンス場としてマニピュレータの関節剛性の調整を行い、雑草を誤認識する確率、及び葡萄樹に過負荷を与える確率を低減する触覚認識を実現した。本報では、触覚認識後の動作として、葡萄樹の根元位置認識を実現する手法を提案する。安全な除草作業の実現には、除草機構の構造上 10 mm 以下の誤差で葡萄樹の位置を検出することが求められている。そのため、その精度を実現する接触認識技術の開発を目的とする。

これまでにロボットと対象物間の接触点位置の推定法は様々な方法が提案されており、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手法が多い²⁾³⁾⁴⁾。長瀬らの、力のみが接触点に発

Fig. 1 Flow chart of weeding

生する状況において、測定ノイズを考慮した接触点位置の推定手法⁵⁾、Gordon らの、関節トルクセンサを利用し、リンクと対象物との接触点を検出することによる対象物の触覚認識手法⁶⁾、田中らの、柔軟対象物に空気噴流を加え、対象物の形状に変化が生じた場合でも非接触で剛性をセンシングする手法⁷⁾などが提案されている。また、金子らは、自己姿勢変形動作 (Self-Posture Changing Motion : SPCM) と呼ばれる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接触点を検出する方法を提案している⁸⁾。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。我々の提案手法

* 原稿受付 平成 24 年 7 月 30 日
** 正 会 員 北海道立総合研究機構 工業試験場
(札幌市北区北 19 条西 11 丁目)
*** 正 会 員 北海道大学大学院情報科学研究科
(札幌市北区北 14 条西 9 丁目)
† 北海道立総合研究機構 工業試験場

Fig. 2 Grape stem

Fig. 3 Experiment environment

Fig. 5 Relation between forth and deformation

は SPCM を基盤として葡萄樹の根元位置を求めるが、SPCM は外力に対して変形する対象物には適応していない。また、葡萄樹の周りにはある硬さをもった雑草が生えているが、SPCM では対象物以外がリンクに接触することは想定していない。

本研究の目的は、雑草が対象物の接触認識のノイズとなる環境下において、除草のためのロボットマニピュレータにより葡萄樹の根元位置を検出することである。実应用到に向けて、再現性の高い検証を行うために、認識対象となる実際の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する。実機による環境情報計測から、葡萄樹および雑草がそれぞれ弾性特性を有する棒状弾性体として近似できることを示す。

従来手法の SPCM では、対象物が弾性体である場合や対象物以外の接触は想定していないため、直接の適用では検出位置に誤差が生じる。そこで、対象物変形に伴う誤差を低減するために、変形量補正型自己姿勢変形動作 (Deformation-correction SPCM : D-SPCM) を開発する。本手法の処理手順は以下の 3 つのフェイズからなる。

[Phase 1] 対象物の触覚認識

[Phase 2] 対象物の初期変形量キャンセル

[Phase 3] 対象物の固定位置検出

[Phase 1] では対象物との接触状態を判定し、[Phase 3] では D-SPCM による固定位置検出を行う。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ている。そこで、対象物の初期変形量をキャンセルするフェイズ ([Phase 2]) を設けることにより検出精度の向上を実現した。前報¹⁾では [Phase 1] についての提案を行った。本報では [Phase 3] の手法を提案した後、[Phase 2] の有効性を示す。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。また、雑草が対象物固定位置の検出精度に与える影響についても検証し、その結果を利用して、各フェイズにおけるマニピュレータの関節コンプライアンスを設計する方法について述べる。最後に、実機により計測した実験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、提案した D-SPCM の有効性を示す。

Stem	k_G N/m	R^2
Stem1	4259	0.9964
Stem2	3873	0.9996
Stem3	2877	0.9872
Stem4	2478	0.9760
Stem5	1947	0.9843
Stem6	1573	0.9940
Stem7	1470	0.9803
Average	2640	0.9883

Fig. 6 Model of grape stem

2. 実環境モデリング

2.1 葡萄樹のモデリング

実機マニピュレータにより葡萄樹の実際の硬さを測定し、特性について北海道立総合研究機構中央農業試験場にて検証を行った。対象となる葡萄樹は、図 2 に示す様に樹幹が 45~60 deg の傾斜をもつ「片側コンドル仕立」で栽培されている。図 3 に実験環境として葡萄樹と 2 自由度シリアルリンクマニピュレータを示す。 θ_2 は第 2 リンクの角度、 r は葡萄樹までの距離を表す。図 4 に実験環境の模式図を示す。 F_G は葡萄樹の変形により第 2 リンクに与える力、 r_G は葡萄樹の変形量を表す。計測は葡萄樹 10 本に対して 20 試行を行った。葡萄樹直径の平均は 29 mm で、接触高さの平均は 163 mm であった。マニピュレータの動作は、葡萄樹に接触させた状態を初期姿勢として、第 1 リンクは固定、第 2 リンクは位置制御を行う。第 2 リンクを段階的に変化させたときの θ_2 とトルク N_2 を計測する。これらの計測値を r により F_G と r_G に換算し、近似した直線の傾きが葡萄樹の弾性係数 k_G となる。 k_G に関して 20 試行の結果を Stem1~7 までの 7 クラスに分け、各代表的な結果について F_G および r_G をプロットしたものを図 5 に示す。決定係数 R^2 は表 1 のように、この 7 例では全平均で 0.9883 であり、葡萄樹は高い線形性をもった弾性体であることを確認した。したがって、以下の式が成り立つ。

$$F_G = -k_G r_G \quad (1)$$

以上の葡萄樹の特性を利用し、図 6 のように葡萄樹を水平な地面に垂直に立つ、一端を地面に固定した棒状弾性体としてシミュレーション環境の構築を行った。ヤング率、断面 2 次モーメントが定数であり、接触面が地面と平行であれば、このような棒状弾性体は実際の葡萄樹と同様に接触力に対して線形な弾性を持つことが知られている。

2.2 雑草のモデリング

葡萄樹と同様に雑草の硬さを測定し、特性についての検証を鶴沼ワイナリーにて行った。図 7 に実験環境およびマニピュレー

Fig. 7 Experiment environment

Fig. 8 Torque and each angles

 Fig. 9 Within A_R

Fig. 10 Model of weeds

Weeds	K_w N/m	R^2
Weeds1	212	0.8990
Weeds2	175	0.9236
Weeds3	114	0.8815
Weeds4	74	0.8632
Weeds5	67	0.6580
Average	128	0.8451

Fig. 11 Model data

タを示す。 θ_1 は第 1 リンクの角度を表す。 マニピュレータの動作としては、第 1 リンク、第 2 リンク共に位置制御を行い、第 1 リンクは 4 deg/s の等角速度運動、第 2 リンクは目標値 0 deg とした。 計測は 5 パターンの雑草環境に対して行った。 図 8 は代表的な例における θ_1 と N_2 の関係を表す。 区間 A_R では、 θ_1 の変化に伴い、 マニピュレータに接触する雑草量が増加するため、 N_2 も変化する。 区間 B_R では、 雑草は変形量の限界に達し、 マニピュレータから離れる雑草と新たに接触する雑草との数が一致し、 接触している雑草の数が一定となったため、 N_2 はほぼ定常状態になった。 ここで、 $\theta_2=0$ deg という条件において、 雑草による力 F_w が第 2 リンク重心 $L_g(=L_1+L_2/2)$ に作用するものと考えることにより、 計測値から $F_w(=N_2/L_g)$ と $r_w(=\theta_1 L_g)$ を算出する。 L_1 、 L_2 はそれぞれ第 1 リンク、 第 2 リンクの長さ、 r_w は雑草全体の変形量を表す。 区間 A_R において、 F_w および r_w についてプロットした 5 例を図 9 に示す。 これらに対して、 近似した直線の傾きを雑草全体の弾性係数 K_w とし、 解析結果を表 2 に示す。 このとき、 決定係数 R^2 は全平均で 0.8451 であり、 雑草は線形性をもった弾性体であることを確認した。 したがって、 以下の式が成り立つ。

$$F_w = -K_w r_w \quad (\theta_1 < \theta_c) \quad (2)$$

ここで、 θ_c は F_w が定常状態となった時の第 1 リンクの角度を表す。 この特性を基にして、 マニピュレータに力を及ぼす雑草の範囲を定めることにより、 雑草のモデル化を行った。

マニピュレータに力を及ぼす雑草範囲を考慮したモデル図を図 10 に示す。 雑草がマニピュレータにより変形し、 屈曲することでマニピュレータに及ぼす力が 0 となるまでの距離を雑草の限界変形量 d_w とし、 雑草の一本当たりの弾性を k_w とする。 雑草環境において、 種類および植生が同一であれば d_w 、 k_w に個体差はないものと見なすことができる。 また、 一様分布した雑草環境下の雑草密度を ρ_w とする。 雑草一本が及ぼす力を 0~ d_w の範囲で積分し、 マニピュレータに力を及ぼす雑草範囲 S_w および ρ_w を考慮することで、 式 (2) を基に雑草からうける力 F_w は次式のように表すことができる。

Weeds	k_w N/m	d_w m
Weeds1	29	0.2
Weeds2	18	0.2
Weeds3	17	0.1
Weeds4	7	0.2
Weeds5	9	0.2
Average	16	0.2

Fig. 12 Simulation environment

Position	$X_M=0.4$ m, $Y_M=0.7$ m
Elasticity	$k_G=2640$ N/m

Weeds area (uniform distribution)	$X_M=0-1.5$ m, $Y_M=0-1.5$ m
Elasticity	$k_w=16$ N/m
Density	$\rho_w=200$ weed/m ²
Limitation of deformation	$d_w=0.2$ m

$$F_w = -\frac{k_w \rho_w d_w}{2} S_w \quad (3)$$

S_w は次式により表す。

$$S_w = \begin{cases} \left(L_1 L_2 + \frac{L_2^2}{2} \right) \theta_1 & \left(\theta_1 \leq \frac{d_w}{L_1 + L_2} \right) \\ d_w (L_1 + L_2) - \frac{L_1^2 \theta_1}{2} - \frac{d_w^2}{2 \theta_1} & \left(\frac{d_w}{L_1 + L_2} < \theta_1 \leq \frac{d_w}{L_1} \right) \\ d_w L_2 & \left(\theta_1 > \frac{d_w}{L_1} \right) \end{cases} \quad (4)$$

L_1 、 L_2 は共に 0.7 m とした。 このようにして雑草モデルの構築を行った。

表 2 より、 K_w の平均に最も近い Weeds3 の測定データ (図 8) を基に雑草モデルの検証を行う。 雑草によるトルクの過渡状態における各係数を算出する。 ρ_w は計量の結果、 約 200 weed/m² であった。 $\theta_c=11.5$ deg としたとき、 d_w 、 S_w は式 (4) より $d_w=\theta_c L_1=0.1$ m、 $S_w=d_w L_2=0.1$ m² となる。 また、 式 (2) と式 (3) を等式とすることで $k_w=17$ N/m と算出できる。 以上の条件を設定し、 式 (3) により θ_1 と N_w の検証を行った結果を図 11 に示す。 図 8 と同様に、 区間 A_M では N_w が増加傾向にあり、 区間 B_M では N_w は定常状態となった。 これらの結果から、 構築した雑草モデルの妥当性を確認した。 Weeds1~Weeds5 についても同様に算出した k_w および d_w を表 3 に示す。

2.3 シミュレーション環境

図 12 はシミュレーションにおけるマニピュレータ、 葡萄樹、 および雑草の位置関係を表す。 表 4 は葡萄樹の位置、 弾性を表す。 表 5 は雑草領域の範囲、 葡萄樹一本の弾性、 密度、 および限界変形量を表す。 これらの値は実験結果の平均値を用いている。 葡萄樹、 雑草と共に棒状弾性体とすると、 第 2 リンクに及ぼすトルクは以下の式で表すことができる。

$$N = J_G^T F_G + J_w^T F_w \quad (5)$$

ここで、 F_G 、 葡萄樹による力を表し、 式 (1) から求める。 F_w は雑草による力を表し、 式 (3) から求める。 また、 J_G 、 J_w はそれぞれ葡萄樹、 雑草による外力が作用する際のヤコビ行列を

Fig. 13 Movement trajectory of object and relation between SPCM and D-SPCM

表す。この様に、実環境からモデル化した葡萄樹と雑草を扱うシミュレーション環境の構築を行った。

3. 対象物の変形量を考慮した固定位置検出

3.1 変形が生じる対象物の固定位置検出手法

対象物位置検出手法として用いる SPCM は、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。そのため、弾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、弾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 D-SPCM を提案する。図 13 にマニピュレータの動作に対する対象物、SPCM および D-SPCM の位置関係を示す。図 14 に SPCM および D-SPCM の概要図を示す。\$t_{d0}\$ を D-SPCM の開始時刻、\$t_d\$ を D-SPCM 動作時の任意の時刻とした場合、第 2 リンク上の点 \$P'_{td}\$ は次式の様に表すことができる。

$$P'_{td} = r_{L1td} + j_{td} r_{L2td} \quad (6)$$

同様に、点 \$P'_{td0}\$ は次式で表す。

$$P'_{td0} = r_{L1td0} + j_{td0} r_{L2td0} \quad (7)$$

ここで、\$j_{td}\$、\$j_{td0}\$ はスカラー一定数である。\$r_{L1td}\$、\$r_{L2td}\$、\$r_{L1td0}\$、\$r_{L2td0}\$ はそれぞれの時刻における第 1 リンク、第 2 リンクのベクトルを表し、これらは角度センサにより測定できることから、\$P'_{td} = P'_{td0}\$ とおくことにより交点の座標を算出することができる。この交点の座標 \$P'_{td}\$ に、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 \$r_{Dtd}\$ および実位置と固定位置との誤差ベクトル \$r_{Gtd}\$ を考慮することで対象物の固定位置 \$P_{td}\$ を算出することができる。

$$P_{td} = P'_{td} + r_{Dtd} + r_{Gtd} \quad (8)$$

このように、サンプリングタイムごとではなく、時刻 \$t_{d0}\$ と \$t_d\$ 間のリンク姿勢により \$P_{td}\$ 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。

3.2 対象物変形量および対象物固定位置の算出

式 (8) を用いた際の第 2 リンク接線方向の誤差 \$r_{Dtd} = |r_{Dtd}|\$ および対象物変形量 \$r_{Gtd} = |r_{Gtd}|\$ の具体的な算出方法について述べる。ここで、以下の前提条件を設定する。

- ・対象物は接触リンクの法線方向に変形する。
- ・対象物と接触リンク間の摩擦、すべりによる影響は考慮しない。
- ・対象物の弾性は線形性である。

Fig. 14 Initial and final link postures during computation of object's position

ここで、接触リンクは第 2 リンクを示しており、実フィールドでは対象物が第 2 リンクの可動範囲内に入るよう移動体の制御を行うものとする。図 15 は対象物の固定位置検出の際、時刻 \$t_{d0}\$ と \$t_d\$ におけるそれぞれのリンク姿勢における幾何学的および力学的関係を表す。これより \$r_{Gtd}\$ を次式の様にモデル化した。

$$r_{Gtd} = \frac{N_{td}}{r_{Mtd} k_G} \quad (9)$$

ここで、\$r_{Mtd}\$ はモーメントアーム、\$N_{td}\$ は計測した第 2 リンクの外モーメント、\$k_G\$ は対象物の弾性を表す。\$r_{Mtd}\$ は以下の式で与える。

$$r_{Mtd} = j_{td} L_2 + r_{Dtd} \quad (10)$$

ここで、\$j_{td} L_2\$ は SPCM で得られた第 2 リンク上の接触点候補までの長さを表す。式 (9) と同様に \$r_{Dtd}\$ を次式の様にモデル化した。

$$r_{Dtd} = \frac{r_{Gtd0} - r_{Gtd} \cos \Delta \theta_{td}}{\sin \Delta \theta_{td}} \quad (11)$$

時刻 \$t_{d0}\$ と \$t_d\$ における第 2 リンクが成す角 \$\Delta \theta_{td}\$ は角 \$\theta_{1td}\$、\$\theta_{2td}\$、\$\theta_{1d0}\$、\$\theta_{2d0}\$ それぞれを計測することにより求まる。

$$\begin{cases} \Delta \theta_{td} = \Delta \theta_{2td} - \Delta \theta_{1td} \\ \Delta \theta_{1td} = |\theta_{1td} - \theta_{1d0}| \\ \Delta \theta_{2td} = |\theta_{2td} - \theta_{2d0}| \end{cases} \quad (12)$$

式 (9), (11) を連立させて r_{Dt_d} について解くことで次式が得られる。

$$r_{Dt_d} = \frac{-b_{t_d} + w_{sign} \sqrt{b_{t_d}^2 - 4c_{t_d}}}{2} \quad (13)$$

ただし,

$$b_{t_d} = \frac{j_{t_d} L_2 \sin \Delta \theta_{t_d} - r_{Gt_{d0}}}{\sin \Delta \theta_{t_d}}$$

$$c_{t_d} = \frac{N_{t_d} \cos \Delta \theta_{t_d} - k_G j_{t_d} L_2 r_{Gt_{d0}}}{k_G \sin \Delta \theta_{t_d}}$$

ここで, 式 (13) の w_{sign} は b_{t_d} の正負によって切り替える関数であり, 次式で表す。

$$w_{sign} = \begin{cases} -1 & (b_{t_d} < 0) \\ 1 & (b_{t_d} \geq 0) \end{cases} \quad (14)$$

式 (9), (10), (13) から, r_{Gt_d} を算出することが可能となる。

次に, $\mathbf{P}_{t_d}$ の算出を行う。第 2 リンクの単位ベクトル $\mathbf{e}_{t_d}$ と法線ベクトル $\mathbf{v}_{t_d}$ により, $\mathbf{r}_{Dt_d}$ および $\mathbf{r}_{Gt_d}$ を次式で算出する。

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{Dt_d} = r_{Dt_d} \mathbf{e}_{t_d} \\ \mathbf{r}_{Gt_d} = r_{Gt_d} \mathbf{v}_{t_d} \end{cases} \quad (15)$$

これらを式 (8) に代入することで, 対象物変形量を考慮した対象物の固定位置 $\mathbf{P}_{t_d}$ を算出することが可能となる。

4. 対象物の固定位置検出の概要

前章で述べたように, D-SPCM では触覚認識時に対象物の変形を仮定している。式 (13) より, 対象物変形量の算出には D-SPCM における初期変形量 $r_{Gt_{d0}}$ を参照している。そのため, 触覚認識時の対象物変形量が大い場合, $r_{Gt_{d0}}$ も大きくなり誤差として蓄積され, D-SPCM の検出精度に大きく影響を及ぼす。本章では, 対象物の初期変形量をキャンセルするフェイズについて述べ, 図 16 に示すようなフェイズ毎の関節コンプライアンスの定義を行う。

4.1 触覚認識フェイズ

触覚認識を行う区分を触覚認識フェイズ S_{RP} (Tactile recognition phase : RP) と定義し, 図 16(a) に模式図を表わす。マニピュレータが対象物に接触するまでを S'_{RP} , 接触してから触覚認識するまでを S_{RP} とする。 S_{RP} の終了条件等, 詳細については前報を参照されたい。 S_{RP} の終了時刻を t'_r とする。 S_{RP} のコンプライアンス C_{RP} を次式で表す。

$$C_{RP}(d) = \alpha_{RP} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

ここで, σ は視覚認識誤差の標準偏差で, 実システムにより実験的に求め, $\sigma=0.135\text{m}$ とした。 α_{RP} は調整係数で, $\alpha_{RP}=1.0$ とした。

4.2 初期変形量キャンセルフェイズ

対象物に生じた初期変形量をキャンセルする区分を初期変形量キャンセルフェイズ S_{CP} (Initial deformation cancelling phase : CP) と定義し, 図 16(b) に模式図を表わす。 S_{CP} の開始時刻を t_{c0} とすると, $t_{c0} = t'_r$ となる。また, S_{CP} 動作時の任意の時刻を t_c , 終了時刻を t'_c とし, S_{CP} の終了条件は $t'_c - t_{c0} \geq t_{arb}$ とする。 t_{arb} は初期変形量が定常値となるまでの時間を表す。 S_{CP} のコンプライアンス C_{CP} は, 式 (16) の最大値 ($d=0$) を基として次式で表す。

$$C_{CP} = \alpha_{CP} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (17)$$

ここで, α_{CP} は調整係数である。 S_{CP} では S_{RP} で生じた対象物の初期変形量を低減させるために, コンプライアンスを高めて $C_{CP} > C_{RP}$ となるように調整する必要がある。 C_{CP} を極限まで高めることで対象物の初期変形量を限りなく 0 に近づけることができ, D-SPCM の検出精度を高めることが可能となる。

4.3 固定位置検出フェイズ

D-SPCM を行う区分を固定位置検出フェイズ S_{DP} (Fixed position detection phase : DP) と定義し, 図 16(c) に模式図を表わす。 S_{DP} の開始時刻を t_{d0} とすると, $t_{d0} = t'_c$ となり, また, S_{DP} 動作時の任意の時刻を t_d , 終了時刻を t'_d とする。 S_{DP} の終了条件は第 2 リンク先端が対象物を外れた時, つまり対象物による外モーメントが 0 になったときとし, 条件式を $N_{t_d} \leq 0$ と設定する。 S_{DP} のコンプライアンス C_{DP} は, 式 (17) と同様に,

$$C_{DP} = \alpha_{DP} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (18)$$

ここで, α_{DP} は調整係数である。 S_{DP} では初期変形量と雑草が主に固定位置検出精度に影響を及ぼす。そのため, C_{DP} を高めることによる直接的な精度向上は望めない。 C_{DP} を高くしすぎると, マニピュレータの感度が高くなり, 対象物との接触状態を安定的に維持する事が困難になるという問題が発生するため, C_{DP} には上限を設ける必要がある。

4.4 制御フロー

第 1 リンク θ_1 は位置制御, 第 2 リンク θ_2 はインピーダンス制御を行い, 初期値は共に 0 deg とする。 θ_2 のインピーダンス制御を次式で表す。

$$\ddot{\theta}_2 + \frac{D_r}{\sqrt{C}} \dot{\theta}_2 + \frac{K_r}{C} \theta_2 = \frac{1}{I_r} N_2 \quad (19)$$

ここで, I_r は仮想慣性モーメント, D_r は仮想粘性係数, K_r は仮想バネ定数, N_2 はトルクを表す。 S_{RP} では θ_1 は 30 deg/s となるように制御し, θ_2 のコンプライアンス関数は $C = C_{RP}$ とする。 S_{CP} では θ_1 は停止させ, $C = C_{CP}$ とする。 S_{DP} では θ_1 は再び 30 deg/s となるように制御し, $C = C_{DP}$ とする。このようにマニピュレータの制御を行う。

5. アルゴリズムの検証

5.1 D-SPCM の有効性検証

D-SPCM では, 対象物の初期変形量 $r_{Gt_{d0}}$ をキャンセルして精度を高めるために S_{CP} を設けた。ここでは, SPCM との比較検証を行い, それぞれの有効性について述べる。なお, C_{RP} および C_{DP} はどの条件でも同様になるように設定した。

Fig. 16 Phases of proposed method

Table 6 Fixed position detection errors of the three detection methods

SPCM	29.3 mm
D-SPCM	35.5 mm
D-SPCM with S_{CP}	6.9 mm

5.1.1 自己姿勢変形動作 (SPCM) の検証

SPCM について, C_{DP} を $\alpha_{DP}=3.0$ という条件で固定位置検出を行った. 検証結果を図 17 に示す. それぞれの図において, (a) は対象物の固定位置検出の誤差 δ_{DP} を表し, (b) は対象物変形量 r_G を表す. 図 17(a) より, SPCM の δ_{DP} は $t_d=4.0$ で 29.3mm となり, 目標値の 10mm を越える結果となった. これは, 対象物の変形および雑草の影響が原因であると考えられる.

5.1.2 対象物変形量を考慮した固定位置検出手法 (D-SPCM) の検証

D-SPCM について, C_{DP} を前節と同じく $\alpha_{DP}=3.0$ という条件で固定位置検出を行った. 検証結果を図 18 に示す. 図 18(a) より, D-SPCM の δ_{DP} は $t_d=4.0$ で 35.5mm となり, 目標値の 10mm を越える結果となった. これは, D-SPCM が S_{RP} 開始時に $r_{G_{t_{d0}}}$ を参照していることが主な原因である. 図 18(b) より, $t_{d0}=2.2$ で $r_{G_{t_{d0}}}=26.0\text{mm}$ であった.

5.1.3 初期変形量キャンセルフェイズによる対象物変形量を考慮した固定位置検出手法 (D-SPCM with S_{CP}) の検証

S_{CP} を考慮した D-SPCM について, C_{CP} を $\alpha_{CP}=10.0$, C_{DP} を $\alpha_{DP}=3.0$, S_{CP} の継続時間を $t'_c - t_{c0}=2.0$ という条件で固定位置検出を行った. 検証結果を図 19 に示す. 図 19(a) より, S_{CP} を考慮した D-SPCM の δ_{DP} は $t_d=6.0$ で 6.9mm となり, 目標値の 10mm を下回る結果となった. 図 19(b) より, $t_{d0}=4.2$ で $r_{G_{t_{d0}}}=3.7\text{mm}$ であった. これらのことから, S_{CP} により $r_{G_{t_{d0}}}$ を低減することで D-SPCM の性能を向上することが可能であると言える. 雑草環境において, 固定位置検出手法そのものに雑草の影響を考慮することで検出精度のさらなる向上が望める. これまでの δ_{DP} の結果を表 6 に示す. D-SPCM に S_{CP} を設けることにより誤差の低減を実現した.

5.2 コンプライアンス設計のための各フェイズの性能検証

対象物の固定位置を検出するために, 認識動作を 3 つのフェイズに分けた. ここでは, S_{CP} と S_{DP} の性能について検証を行い, コンプライアンスの設計方法について述べる.

5.2.1 初期変形量キャンセルフェイズの検証

S_{CP} では, S_{RP} 時に生じた $r_{G_{t_{d0}}}$ を 0 に近づける必要がある. S_{CP} の性能として, $r_{G_{t_{d0}}}$ に影響を及ぼす要因としては雑

草強度比 $H_{W/T}$ と S_{CP} のコンプライアンス C_{CP} が挙げられるため, それぞれを変化させた時の $r_{G_{t_{d0}}}$ の検証を行った. $H_{W/T}$ は以下の式で定義する.

$$H_{W/T} = \frac{\rho_w k_w}{k_G} \quad (20)$$

シミュレーションの条件として, $H_{W/T}$ の設定を行い, S_{RP} 完了後に θ_1 を停止し, θ_2 に C_{CP} を設定して定常状態の $r_{G_{t_{d0}}}$ を結果としてプロットする. 検証結果を図 20 に示す. $r_{G_{t_{d0}}}$ は $H_{W/T}$ に伴い増加し, S_{CP} に伴い減少することが確認出来る. この結果に対して, 曲面回帰によりモデル化を行った結果を図 21 に示し, 近似式を以下に示す.

$$r_{G_{t_{d0}}}^* = 0.091C_{CP}^2 + 0.003H_{W/T}^2 - 0.024C_{CP}H_{W/T} - 4.302C_{CP} + 0.049H_{W/T} + 56.033 \quad (21)$$

重相関係数は 0.908, 回帰誤差は最大 8.0mm, 最小-7.1mm であった. このように, 曲面近似が可能であることを確認した.

5.2.2 固定位置検出フェイズの検証

S_{DP} では, δ_{DP} を低減し, 10mm 以下の誤差で対象物の固定位置を検出する性能が求められる. S_{DP} の性能として, δ_{DP} に影響を及ぼす要因としては $H_{W/T}$ と $r_{G_{t_{d0}}}$ が挙げられるため, それぞれを変化させた時の δ_{DP} の検証を行った. この時, C_{DP} を $\alpha_{DP}=3.0$ とした. 検証結果を図 22 に示す. δ_{DP} は $H_{W/T}$ と $r_{G_{t_{d0}}}$ に伴い増加することが確認出来る. この結果に対して, 曲面回帰によりモデル化を行った結果を図 23 に示し, 近似式を以下に示す.

$$\delta_{DP}^* = -0.033r_{G_{t_{d0}}}^2 - 0.011H_{W/T}^2 - 0.047r_{G_{t_{d0}}}H_{W/T} + 1.835r_{G_{t_{d0}}} + 0.568H_{W/T} - 0.011 \quad (22)$$

重相関係数は 0.998, 回帰誤差は最大 0.6mm, 最小-0.5mm であった. このように, 曲面近似が可能であることを確認した. C_{DP} について, $\alpha_{DP}=1.0 \sim 3.0$ についても同じ環境で検証を行ったが, 同様の結果を得た. また, $\alpha_{DP}=4.0$ では, 感度が高くなり対象物とマニピュレータの接触状態を維持することが出来ず, δ_{DP} は増大した.

5.2.3 コンプライアンスの設計

5.2.1, 5.2.2 の結果を基に各フェイズのコンプライアンス設計の指標について説明する. まず, S_{CP} のコンプライアンス C_{CP} について述べる. 本手法の使用環境における $H_{W/T}$ を既知とし, 求められる検出精度が決定すると, 式 (21) および式 (22) から C_{CP} の範囲を設定することが可能である. 次に S_{DP} のコンプライアンス C_{DP} について, $\alpha_{DP}=1.0 \sim 3.0$ の範囲では検出精度に影響を及ぼさないことが分かった. 従って, 対象物とマニピュレータの接触を安定的に維持することができる範囲で C_{DP} を設定する必要がある. 提示した環境では $0.5 \leq \alpha_{DP} \leq 3.0$

(a) Fixed position detection error

(b) Deformation

Fig. 17 SPCM results

(a) Fixed position detection error

(b) Deformation

Fig. 18 D-SPCM results

(a) Fixed position detection error

(b) Deformation

Fig. 19 D-SPCM with S_{CP} results

Fig.20 Original data of initial deformation

Fig.21 Initial deformation model

Fig.22 Original data of fixed position detection error

Fig.23 Fixed position detection model

において安定的であり、適切な対象物検出を行えることを確認した。

6. 結 言

本研究では、接触認識においてノイズとなる雑草がある環境にて、接触により変形する葡萄樹の固定位置を正確に検出する手法として D-SPCM を開発した。

提案手法の有効性を、多数試行の再現性を確保した上で検証する必要があるため、実環境の計測データから葡萄樹および雑草のモデル化を行う事でシミュレーション環境を構築した。

対象物の初期変形量は固定位置検出精度に大きく影響を及ぼすが、初期変形量キャンセルフェイズ S_{CP} を設けることにより、触覚認識時に発生した対象物の初期変形量 $r_{G_{t_{d0}}}$ を低減し、D-SPCM の検出精度向上を実現した。また、SPCM、D-SPCM、 S_{CP} を適用した D-SPCM の 3 条件において、同等の雑草環境を設定し、シミュレーションにより検証を行った。その結果、 S_{CP} を適用した D-SPCM の固定位置検出誤差 δ_{DP} は 6.9mm であり、他の条件による結果を下回り、目標値の 10mm 以下を実現したことから本手法の有効性を確認した。また、 S_{CP} における雑草強度比 $H_{W/T}$ と C_{CP} に対する $r_{G_{t_{d0}}}$ の関係、固定位置検出フェイズ S_{DP} における $H_{W/T}$ と $r_{G_{t_{d0}}}$ に対する δ_{DP} の関係をシミュレーションにより検証し、モデル化を行う事で各フェイズにおける関節コンプライアンスの設計指標を示した。

雑草の影響による検出精度悪化に対して、 S_{CP} を設けることにより改善を行ったが、D-SPCM 自体に雑草の影響が考慮されている訳ではないため、今後の課題としたい。対象物の弾性、雑

草の弾性および密度について本報では既知として行ったが、実システムで応用する際はこれらを推定する必要がある。コンプライアンスに関しては、設計のための性能検証を行ったが、具体的にコンプライアンスを最適化する手法が今後求められる。前報で報告した視覚認識に対して、本報における位置検出結果をフィードバックすることにより、検出精度の向上が見込まれる。本研究における接触センシングは、接触高さ、力を与える方向、葡萄樹の個体差等、様々な要因により弾性にバラつきが生じる。実運用を考える際は、弾性の計測結果に対して GPS を用いたマッピング等により個体識別することで、個別に弾性の管理、運用することが望ましい。今後は、実機によるフィールド実験により本手法の有効性を確認する。

参 考 文 献

- 1) 井川久, 他 5 名: 葡萄園除草ロボットのための葡萄樹の視覚認識能力を考慮したロボタクト触覚認識, 精密工学会誌, **78**, 2, (2012) 160.
- 2) 永田和之, 他 2 名: 指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価, 日本ロボット学会誌, **14**, 8, (1996) 1221.
- 3) 坂根茂幸, 他 2 名: 視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定, 日本ロボット学会誌, **12**, 5, (1994) 677.
- 4) 堀江竜太, 他: 自動感度可変型触覚センサ, 日本ロボット学会誌, **21**, 8, (2003) 940.
- 5) 長瀬賢二, 他: 力とモーメントのノイズの偏りを考慮した力覚センサによる接触点位置の推定, 日本ロボット学会誌, **27**, 10, (2009) 1160.
- 6) S. J. Gordon, et al., : Integration of tactile-force and joint-torque information in a whole-arm manipulator, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1989) 464.
- 7) 田中知行, 他 2 名: 対象物変形に伴う流体力変動を考慮した非接触剛性センシング, 計測自動制御学会論文誌, **48**, 5, (2012) 295.
- 8) 金子真, 他: 自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出, 日本ロボット学会誌, **8**, 6, (1990) 12.