

平成 16 年度戦略的基盤技術力強化事業

研究開発成果報告概要

事業管理法人名 (代表者氏名)	財団法人四国産業・技術振興センター (山下 一彦)		所在地	〒760-0033 香川県高松市丸の内 2 番 5 号 (Tel:087-851-7081)	
技術分野	ロボット部品分野 (ビジネス支援分野)	技術区分	画像認識関連技術	研究開発課題	認識・提示の高精度技術
テーマ名	バイオ苗生産のための高速 3 次元形状認識センサーと柔弱物ハンドリング機構の開発		研究開発期間	平成 16 年 4 月 1 日から 平成 17 年 2 月 28 日	
<p>1. 委託業務の概要</p> <p>農業分野へのロボット応用は、1990 年前後にいくつか試みられたが、不定形で密生した植物の画像認識や、幼芽のような柔弱物ハンドリング能力が十分でなかったこと等から普及するには至らなかった。しかし、最近のバイオ技術を応用したクローン苗の生産技術の進展と広範な採用により、植物工場が大きく展開していく中で、植物の幼芽を認識・ハンドリングするロボット技術に対する必要性が増大してきている。このため、本研究開発ではクローン苗の植物工場の中で、今なお人海戦術に頼っている幼芽の分離と植え付け工程にロボット技術を導入することで、大幅な作業効率の向上と、無人化によるクローン苗生産の無菌化、高品質化を目指す。</p>					
<p>2. 技術目標値</p> <p>) 高速 3 次元形状認識センサーの開発</p> <p>本センサーでは、相対ステレオ法により、画面内に見える一点からの相対位置を高速に計測する。このことにより、ガラス容器内の対象物の相対 3 次元位置を計測可能にする。また、スリット光光学系の付加により、スリット光が当たった点の空間位置計測、その点を基準点とした相対位置計測が可能である。光学系設計によりサイズ、認識範囲を変更可能であるが、本開発では以下の性能目標値を設定する。本事業の初年度に、ユーカリ苗分離・植込ステーションを対象に位置センサー機能を開発、次年度に調整ステーション向けに形状抽出センサーを開発、3 年次にてガラス容器内シンビジウムの形状認識機能を完成させる。</p> <p>技術目標：高速 3 次元形状抽出範囲、50x50x50mm 以上 (対象幼芽の茎長観察範囲 30mm)、茎位置認識精度 $\pm 0.1\text{mm}$、形状認識精度 $\pm 0.5\text{mm}$、検出時間 0.5 秒、撮像部サイズ 50x60x90mm</p> <p>) 把持力制御付き深底容器内複合ハンドリング機構の開発</p> <p>ベースとなる複合作業ハンドと、小口径で、深底ガラス容器内での密集幼芽の分離作業、植え付け作業の可能な作業ハンドを開発する。初年度に、ベースとなる複合作業ハンドを開発、次年度に深底容器内複合作業ハンドを開発する。</p> <p>技術目標：容器口径 80mm、深さ 200mm のガラス容器内で、力制御付き植え替え作業実施能力を実現。把持位置と作業位置間の可変ストローク範囲 15mm、植え付け操作時の挿入ストローク 8mm / 回で繰り返し操作可、把持力制御範囲：0 ~ 100g</p> <p>) 形状認識センサーと複合作業ハンドリング機構の応用ユニットの開発</p> <p>対象クローン苗の全体形状を抽出し、個々のクローン苗の下葉を除去し外形を調整する、また、分離・植え付けする等の動作が可能な、形状認識センサーと複合作業ハンドリング機構を統合した応用ユニットを開発する。</p> <p>技術目標：調整タクトタイム 6 秒 / クローン苗、寸法調整精度目標値 $\pm 5\text{mm}$ (クローン苗生産からの要求)</p>					

3. 目標値を達成するための解決策と具体的方法

技術課題は、個々の部品開発である) 高速 3 次元形状認識センサーの開発、) 把持力制御付き深底容器内複合ハンドリング機構の開発、とそれらを直接組み合わせた制御機能の実現である) 形状認識センサーと複合作業ハンドリング機構の応用ユニットの開発、そして、その実証ラインである) ユーカリ苗分離・植込ラインの開発、シンビジウム苗分離・植込ラインの開発、に分けて考えることができる。

) 高速 3 次元形状認識センサーの開発

ここでは、大きく 3 つの開発課題がある。その内容と、理由、解決策を以下に示す。

・高精度光学系の開発

これまで、「特願 2002-353136 号：相対距離計測装置、TL0 出願」の相対ステレオ視を認識原理とした光学系の開発を行ってきた。しかし、ここで通常のレンズ系を用いた場合、対象を見るためにレンズを傾けなければならず、それがひずみとなって、計測精度を悪化させることが、これまでの実験で分かっている。これに対し、“あおり光学系”を導入することで、ひずみの発生を抑え、高精度計測を実現する。あおり光学系は、撮像面での幾何ひずみが発生しない光学系である。

・ガラス容器内不定形物体の形状認識技術の開発

相対ステレオ法は、注目点からの相対的な距離関係を基に形状計測を行う。このため、センサーからの絶対距離計測を基本原理とする従来の認識よりも、原理的に形状計測精度に優れている。更にロボットのハンド部も同時に認識することで、ロボット制御も高精度化できる。

・認識センサーとしてのモジュール化

ロボット部品としての販売を可能にするためには、コンポーネントとしてモジュール化を図っていかなければならない。そのため、既存の画像認識システム、パッケージと提携し、その高機能付加センサーとして構成する。併せて、画像認識システムの高速画像処理機能の使用により、高速処理を実現する。既存のモジュール化手法の導入による部品化である。

) 把持力制御付き深底容器内複合ハンドリング機構の開発

ここでは、大きく 2 つの開発項目がある。その内容と、理由、解決策を以下に示す。

・熱処理や消毒液への浸し処理が可能な複合ハンド構造の開発

バイオ生産用のロボットは、従来の工業用ロボットと大きく異なる点がある。それは、ハンドリング対象物がウェットで、雑菌に弱いということである。このため、操作ハンド部は、水洗いしても、熱を加えても問題のないことが必要である。このため、機構部を根本に集め、ステンレスの 3 重パイプ構造で駆動力を伝えるヘッドを、分離可能なアタッチメント構造で構成することで、先端に駆動系やセンサーを持たないハンドを実現する。

・柔らかい幼芽を保持するための把持力制御機能の実現

幼芽のような柔らかい対象を把持する場合、把持力の制御を行わなければ、傷つけてしまう、などの問題を発生する。しかし、先端に力センサーを付けることは、殺菌処理などの点で問題がある。そこで、先端にはセンサーなどを付加せず、把持部の外形を視覚センサーで認識、それに基づいてハンドの開き幅と把持力を計算、柔軟なチャックと組み合わせて、必要十分な把持力を得ることが出来ることが、シミュレーション実験により得られている。

) 形状認識センサーと複合作業ハンドリング機構の応用ユニットの開発

ここでは、大きく 2 つの開発項目がある。その内容と、理由、解決策を以下に示す。

・幼芽全体の 3 次元形状の認識

幼芽全体の 3 次元形状を、一回の 3 次元形状認識センサー処理で得られないことは、各種の研究の例からも明らかである。本研究で開発する応用ユニットでは、幼芽を回しながら計測し、3、4 回の計測結果を総合することで、全体 3 次元形状を得るが、不定形対象物に対してこのような処理を行った例はない。今回は、葉の枚数を整えるため、全体形状を得る必要があり、センサー、ハンドおよびそれらを総合的に制御する応用ユニットが密接に動作協調を行いながら、幼芽をセンサーの前で回転させ、3 次元形状認識を実施しなければならない。

切除するプログラムである。現在、茎を検出するアルゴリズムを開発中であり、広い葉部と茎部を分離しているので、その応用技術として開発する。

・幼芽調整動作生成プログラムの開発

3 次元形状を得た後、そこから切断する葉を決定、調整ロボットで葉の形状を整えるために、調整動作生成プログラムを開発しなければならない。これは、計測された幼芽の 3 次元形状から、

葉の大きさを計算、上から何枚葉を残すかを決定し、切断する葉について、その茎との接続部を切除するプログラムである。現在、茎を検出するアルゴリズムを開発中であり、広い葉部と茎部を分離しているので、その応用技術として開発する。

）ユーカリ苗分離・植込ラインの開発、シンビジウム苗分離・植込ラインの開発

基本的には、ロボット部品として的高速3次元形状認識センサー、把持力制御付き複合作業ハンド、応用ユニットの機能検証・実用試験のためのラインである。不定形であるバイオ苗を扱う場合、工業製品のように対象がある規格範囲に入っている事が期待できない。このため、実証ラインを開発して、機能検証し、不具合点を直していかなければならない。また、このシステムそのものが、具体的な応用システムとしての大きな市場性を持っている。

現時点で、これらのラインにおけるシステムとしての課題が十分把握できているわけではないが、情動的、そして物流としての課題が沢山存在するものと考えられる。本開発、1年目にシステム設計による課題の検証を行い、2年目以降で解決方法の案出とその実現を図っていく。

4. 当該年度における技術目標値の達成状況と意義

本研究開発全体における技術目標値は、前述2.に記載のとおりである。その内、今年度は以下の成果を上げることができた。

）高速3次元形状認識センサーの開発

技術目標：・透明容器内計測（容器内反射対策、速度0.5秒）

- ・あおり光学系による相対ステレオ形状センサーの開発（撮像範囲80×80×50mm以上、形状認識精度0.5mm、検出時間0.5秒）
- ・対象物回転型3次元形状計測機能実現
- ・ユーカリ調整アルゴリズム開発（葉の位置、形状検出、切断位置決定）

[達成状況]

- ・透明容器内計測（容器内反射対策、速度0.5秒）

プラスチック製の透明容器の表面においてレーザー光および照明光が反射を起こさないような光学系を設計することを目標とし、レーザー光および照明を、容器に対して斜め前方から当てるように取付具を試作し、反射による影響をなくした。また、各種波長のLED光源による撮像を実施し、茎のみを選択的に認識するために好ましい波長を持つ光源を試作した。

- ・あおり光学系による相対ステレオ形状センサーの開発（撮像範囲80×80×50mm以上、形状認識精度0.5mm、検出時間0.5秒）

レーザーや照明が点灯するまでの待機時間内に画像処理を施すことにより、苗1本あたりに要する処理時間を0.33秒に抑えることができた。撮像範囲X90×Y70×Z50mm、カメラ間隔80mmのステレオカメラを試作した。センサーについては、世界座標での基準格子チャートを撮像することにより得た左右の各カメラの格子点認識位置のカメラ間誤差を最小にするよう配慮した設計を行い、中心格子点位置認識で1ピクセル以内、画像内で最大3ピクセル以内、10回異なるタイミングで認識した同一格子点の左右の認識ピクセル位置誤差の標準偏差が0.1~0.5であるセンサを試作した。（収差補正機能は含ず光学系としての評価、VGA）

また、格子チャートの直交3軸微細移動可能な精度評価用ジグを試作し、10回計測での平均値での評価でXYの最小認識精度が50μ以下、Zの最小認識精度が200μ以下であることを確認した。

- ・対象物回転型3次元形状計測機能実現

対象物の回転と傾斜による姿勢変換機能を持つ実験用ジグとカメラを試作し、幾つかの方向から苗画像に対して二値化画像を作成し、苗の中心点群データを求めるアルゴリズムとした。その際、得られる中心群データは、茎と葉の領域を区別したものであり、各方向間における不足データの補間を考慮した。さらに、得られた各方向の中心群データを統合し、苗の3次元形状構成のためのアルゴリズム開発を行い、調整ステーション用センサコントローラへの組込を行った。

- ・ユーカリ調整アルゴリズム開発（葉の位置、形状検出、切断位置決定）

細線化した苗のエッジ画像に基づき各画素間の方向ベクトルを求め、ベクトルの傾きにより葉と茎を区別するアルゴリズムを開発した。それにより、葉と茎の位置を明確にし、葉と茎の切断を行うための切断点抽出を可能とした。

) 把持力制御付き深底容器内複合ハンドリング機構の開発

技術目標：シンビジウム用ハンド

- ・口径 60mm 以下、深さ 180mm の透明容器内作業実現
- ・柔弱物の把持力制御機能
- ・把持力制御範囲 0 ~ 100g
- ・密集幼芽の分離作業・植え込み作業を可能にする切断、把持機能

[達成状況]

- ・口径 60mm 以下、深さ 180mm の透明容器内作業実現：透明容器内で定まった位置に存在しない密集したシンビジウム苗を取りだすため、培地や他のシュートとの固着性を調査し、さらに相対ステレオ画像認識手法に必須である苗近傍への接近が行えるピンセットを応用したハンドを試作した。
- ・柔弱物の把持力制御機能：軽量高速化したハンドを目標としてマニピュレータ仕様との整合性を有する、サーボモータ別置き、テンションワイヤーによる駆動、把持部に取り付けた減速機構や揺動機構を選択的に採用し、高精度な把持力制御可能な把持力制御駆動装置を試作した。
- ・把持力制御範囲 0 ~ 100g：把持部の弾性把持部に与える力、ワイヤー引張力を発生させる駆動部等制御し、把持力の範囲が 0 から 100g まで可能な把持システムのシリーズを試作した。
- ・密集幼芽の分離作業・植え込み作業を可能にする切断、把持機能：ユーカリの分離植込のためのハンドを容器内密集苗に対応させるための先端セラミックピンセット応用ハンドを試作し、容器からの取り出しと植込を自動で行い評価した。
また、前年製作の 8 複合 3 自由度作業ハンドによる把持機能と切断機能確認後、今年度 4.5、複合 3 自由ハンドを試作し、複合作業ハンドの応用範囲を広げた。なお、切断機能については、シンビジウムロックワール培地用ハンドと調整ハンドでメスを利用した把持切断システムを試作した。

) 形状認識センサーと複合作業ハンドリング機構の応用ユニット

技術目標：ユーカリ調整ステーション

- ・ユーカリ分離・調整・植え込みの各ステーションの協調動作
- ・シンビジウム分離・植え込みステーションの単独動作

[達成状況]

- ・ユーカリ苗用の調整ステーションの試作を完成させた。また、ステーションの各構成部品において、それぞれ設計仕様に対する動作を確認した。
- ・平成 15 年度開発の分離ステーションの実苗・容器を用いた協調動作の評価を実施した。
- ・同様に植込ステーションでも協調動作の評価実施した。
- ・シンビジウムについては、技術調査、仕様検討を基に、次年度開発予定の調整ユニットを考慮し、分離・主体の 6 軸多関節ロボットステーションと植込み主体の 3 軸直交ロボットステーションの試作を完成させ、単独動作確認を行った。

) バイオ苗生産実ラインによる評価試験（プレックス、香川大学農学部）

技術目標：ユーカリ全体制御における協調動作

[達成状況]

- ・ユーカリ調整ステーションの追加により、統合コントローラの役割分担を最適化した。その結果、分離、植込ステーションの統合コントローラと調整ステーションの制御を行うシーケンサの全体のステータス監視を行うように変更し、試作した。
- ・ユーカリ分離ステーションから調整ステーションへの受け渡し、及び調整ステーションから植込みステーションへの受け渡し動作を行い、搬送系全体の動作確認を行った。

5. 事業化の目標と当該年度に把握した事業化を取り巻く環境変化

1) 事業化の目標

本研究での技術領域で開発した“高速3次元形状認識センサー”、“柔弱物ハンドリング機構”等のロボット部品およびそれを活用した応用システムの事業化においては、商品化後2年で設備売上を2億円としている。そして本研究で得たコア技術を植物培養苗生産分野において対応可能な市場領域を拡大できるように継続的製品開発を実施し、4年で4～10億円を目標とし、5～6年で30～50億を中期目標としている。

2) 事業化を取り巻く環境

大手製紙会社は、原材料自給自足の時代に入り、植林事業を拡大する為の調査を本格化しはじめた。さらに北京オリンピックを控えて中国の経済発展に伴い、原料輸入の激増による日本国内での素材の調達難が鉄鋼産業等で起こり、紙パルプ分野でもこれが心配されている。現在の中国の紙消費量は日本の1割程度であるが、増加は明らかなため、製紙会社においても自社供給のための植林計画面積を増加している。

単位面積当たりからのパルプ収量倍増可能なクローン材の優位性については、苗価格においては実生苗の数倍のコストという問題点があるが、植林後の経費は、樹形均一化による伐採、輸送コストの低下、チップ品質向上によるパルプ工場の収益向上に役立つことが判明し、クローン植林研究としては、「どのように普及させるか」という実用化開発の段階に入ったと考えられる。また、途上国からの苗輸入は生態系保護の観点から不可能であり、低価格クローン苗の中国等での生産と豪州への輸入は成立しない点で強みはある。

本事業での主たる地域的事業領域は、豪州に設定している。既に温暖化ガスを大量に排出する国や電力会社、石油精製会社を中心とした大手企業では、議定書による排出量削減義務の発生や社会的使命から温室効果ガスを減らすための豪州等での大規模植林を増加している。これ以外でも植林事業は投資事業として実施され、その様子を実際に平成15年度において、サブリーダーとメンバーがオーストラリアの植林状況を視察した。その時に確認したユーカリクローン林は更に成長し、地元実生苗生産者や植林事業への投資家達の間でも、クローン苗が益々注目されつつある。

中国や東南アジアにおける植林事業についても「クリーン開発メカニズム」の実施により増加すると考えられる。さらに優良クローン苗植林事業での2倍近いCO₂固定量を国連に認められればこの事業の優位性は増大する。もし、将来豪州が京都議定書に批准することになればCO₂固定化のための「共同実施」や「排出権取引」が日豪間で活発に行われることも予測される。

ユーカリ植林事業はライフサイクルの長い事業であるが、我々が関与する設備産業として成り立たせるためには、我々は人手に勝てる生産性を提供することで市場への参入が可能になると考える。そのため人件費の安い途上国では不利な状況ではあるがクローン苗生産においては、人の教育が重要であり機械化する強みは途上国でもある。先ず豪州の市場を押さえた後は植林関係の分野だけでもこのような地域市場がある。また、今年度の事業化調査で、他の分野でもユーカリ、シンビジウム移植技術の応用分野での市場が大きな事が分かった。具体的には獲得した苗の茎トレス形状認識技術と微細な把持、切断技術をさらに磨き上げれば、国内農業分野の中で中間投入額5兆円の内12%を占める種苗市場の中でユーカリ、シンビジウム以外でもイチゴ等、さまざまな品種で行われている培養組織の分離、植込作業に展開する可能性がでてきた。例えば、優良なクローン苺苗では、オランダだけでも年間6000万本の生産が手作業で実施されている。

本研究開発でも実用化を考え、シンビジウム用設備開発においては、無菌クリーンベンチ内に設置可能なコンパクトな移植ステーションを開発した。生産業者へ本研究開発成果をアピールするとともにリードユーザーとのコンタクトにより研究終了後の開発テーマとなる技術要求事項調査を行う目的でロボット産業マッチングフェア2005にシンビジウム用移植ステーション試作機出展やTVでの事業紹介を行った。

特許出願等を積極的に実施し、知財権を事業、技術のそれぞれの領域を明確化した権利化をしていくことで事業化をスムーズに行えるように環境を整えた。また、成果公開を進める上でクローンという言葉が遺伝子操作等に関連づけられる誤解を防ぐように配慮した。

以上のような環境を踏まえると、本研究事業の目的とする“高速3次元形状認識センサー”“柔弱物ハンドリング機構”というロボット部品とそれを活用した応用システムの開発の成功と研究開発継続による市場拡大は、今後更に重要な意味を持つものであると考える。