

ビジュアルフィードバックを用いた
ロボット制御に関する研究とその応用

(Visual Feedback Control of Robot and its Application to Harvesting System)

平成9年1月

学位論文(工学)甲71

小林 孝 浩

氏名(本籍)	小林孝浩(岐阜県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第71号
学位授与年月日	平成9年3月25日
専攻	電子情報システム工学専攻
学位論文題目	ビジュアルフィードバックを用いたロボット制御に関する研究とその応用 (Visual Feedback Control of Robot and its Application to Harvesting System)
学位論文審査委員	(主査)教授 小鹿 丈夫 (副査)教授 山本和彦 教授 池田尚志

論文内容の要旨

本論文は、CCD テレビカメラを視覚センサとし、一定の把持力を得るための把持力制御機構を伴う、ロボットのビジュアルフィードバック制御システムの開発と、その果実収穫支援システムへの応用に関して述べている。

本システムでは、一台の小型カラーCCDカメラをエンドエフェクタに取り付け、これを能動的に動かすことによって果実位置の計測を行う方法を採用し、これにより、死角の回避、計測精度の向上を狙っている。また、実用化に際しては実時間での画像処理が本質的であると考え、果実収穫に特化した高速な画像処理ライブラリを構築し、ロボットの制御に必要な情報を得ている。さらに、果実を扱うエンドエフェクタはその性質上、果実に傷をつけることは許されないため、シリコンゴムチューブを圧搾空気で駆動する人工筋肉を採用した四指のハンドを作製している。

開発したシステムで果実の収穫実験を行った結果、速度の遅い汎用的なロボットを使用した実験システムであることを考慮すると、画像処理・認識において速度の面では十分実用化が可能であるとの見通しを得ている。また、三次元位置の計測誤差は、ハンドによって吸収される程度の誤差であり、実用上問題にはならなかった。ソフトハンドにおいては、果実把持に適したコンプライアンス特性を持ち、簡単な制御によりこれを駆動できることを示し、さらに、ハンドの把持力制御を行い、ターゲットの大きさに拘らず一定の力で把持するためのシステムの開発を行っている。

本論文は、本章を含め6章から構成されている。

第1章では、研究の背景と動向を踏まえ、本研究の動機とその目的について述べている。

第2章では、ビジュアルフィードバックに使用するための画像処理ライブラリの開発について述べている。本ライブラリを使用し動画像中の物体をトラッキングする実験を通し

て、ビジュアルフィードバック制御に十分使用できる処理速度を持つことを確認している。

第3章では、本システムにおいて必要となる座標変換、カメラキャリブレーション、位置計測理論、及びレンズの歪み補正方法について検討を行っている。

第4章では、収穫用エンドエフェクタとして開発したソフトハンドの構造と、人工筋肉を使用した指の構造、及びハンドの把持力の制御について述べている。ここで作製したソフトハンドは圧搾空気で駆動され、傷つきやすい果実でも傷をつけることなく把持することが可能である。また、把持するターゲットの大きさに拘らず、一定の把持力で把持するための制御機構の開発を行っている。なお、ハンドの中央部分にはカラーCCDテレビカメラが取り付けられており、ハンド前方の視覚情報を得ることができる。

第5章では、収穫システム全体の構造について述べている。果実の色分布についての考察を行い、ターゲットの学習、抽出にはHSV表色系を使用することが有効であることを示している。ここで得られた結果を使用することにより、収穫の対象とする果実の特徴を、カメラの映像から自動的に抽出することが可能となった。また、収穫実験により速度、精度、把持機構において、システムの実用への可能性を明らかにしている。

第6章では、本論文により得られた成果をまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文では、CCDテレビカメラを視覚センサとしたビジュアルフィードバック制御システムを開発し、生物生産技術における果実収穫システムへの適用を狙っている。ここでは、収穫システムに必要な要素技術を検討し、総合的なシステムの構築を行っている。実際に開発を行ったシステムは以下の特徴を有する。

(1) CCDテレビカメラを視覚センサとした本システムでは、対象とする自然環境に基づいた処理を行い、実時間動作を可能としている。ビジュアルフィードバック制御では、特定の画像処理を繰り返し実行するため、その処理速度がネックとなるが、一シーンあたり0.4秒程度と十分に高速である。また、対象とする果実の視覚的特徴は、カメラから画像を入力しこれを自動的に抽出処理することによって行っている。なお、特徴抽出処理に要する時間は、3~7秒である。

(2) ソフトハンドと称する、人工筋肉の動作を応用した収穫用エンドエフェクタを装着し、傷つきやすい果実でも品質を損なうことなく把持することを可能とした。人工筋肉は、圧搾空気により駆動され、空気圧と曲げる力がほぼ比例する。この特性のため、対象のおおよその大きさが判っている場合には、一定の圧力を出力するという操作のみで制御することができる。さらに、大きさの判らない場合や、ばらつきの多い場合、また、完熟トマトのように、非常に傷つきやすいターゲットを把持する場合を考え、把持力の制御を行うサブシステムを開発した。これにより、大きさによらない一定把持力の制御が可能となった。また、本システムの特徴として、ごく弱い把持（おおむね1N以下）を除いては、2.5秒以内に目標値の90%に達し、 $\pm 0.1N$ 以下の偏差での制御特性が得られた。

(3) ビジュアルフィードバック制御により、映像中に捉えた特定のターゲットを追跡するように制御を行っている。このため、立体視法による位置計測時に問題となる対応づけが不要である。また、固定カメラに比べ対象の隠れに強いといった特徴を持つ。ビジュアルフィードバックによる位置決め誤差はカメラの光軸方向に大きく発生するが、ハンドが把持を行ったときに物体が引き込まれる構造であり、これと光軸が一致するため、システムとして誤差に強い構造を持つといえる。

(4) カメラパラメータのキャリブレーションに、既知座標にマークを置きこれを自動的に抽出することによりおこなうが、10点の処理に約20秒要した。収穫動作としては、ターゲットを発見してから位置決めを完了するまでに15秒、また、ターゲットを脱離し格納するまでに15秒で完了した。速度の遅い汎用的なロボットを使用した実験システムであることを考慮すると、画像処理・認識において速度の面では十分実用化が可能であると判断できる。また、三次元位置の計測誤差はハンドによって吸収される程度の誤差であり、実用上問題にはならなかった。

これらをまとめると、本論文では多種多様な視覚環境を前提に、ビジュアルフィードバック制御を用いたロバストな果実収穫システムの開発を行った。また、果実を傷つけずに収穫するために、柔軟なソフトハンドを開発、制御して、十分に繊細な把持特性を得た。さらに、収穫実験を通して、本システムの有効性を明らかにしている。これらは、収穫システムとしての一技術であり、生物生産の機械化への一提案として学術上有意義である。よって、本論文は博士(工学)の学術論文として価値のあるものと認める。