

ユーザ・専門家間のインタフェース機能を備えた ロボット視覚用エキスパートシステム†

松崎 吉衛^{††} 秦 清治^{††} 武市 謙三^{†††}
久我 豊和^{††††} 持田 幸一^{††††}

工業用ロボット視覚システムの開発効率向上を目的として、画像処理の方法と光学系を一体として設計するエキスパートシステムを構築した。ロボット視覚における画像処理の手順は、1枚の画像に対する逐次的な処理だけではなく、ロボットと同期しながら複数の画像を処理する複雑な流れになることが多い。そこで、エキスパートシステムは認識プログラムではなく、オブジェクト指向の表現モデルを用いた認識対象の記述データを出力する。物体認識は、エキスパートシステムに接続されたロボット視覚装置が、この記述データを参照して行う。認識対象記述データの設計は、認識作業の仕様をユーザから受け付け、それに基づき認識手法を決定し、認識対象記述データのフレーム構造、属性値、メソッド設定の順で行われる。設計に用いる知識の多くは作業種類に依存した形をとっているため、類似例のない新規作業に対して内蔵知識では設計できない場合が生じる。この場合、エキスパートシステムはユーザの要求仕様を受け付ける要求仕様定義ツールのモードになり、ユーザから入力された認識対象の画像、仕様をファイルとして保持する。これを専門家が調べて知識ベースのメンテナンスを行うことにより、知識ベースが不十分な時点でも実システムに適用できる。本論文では、このロボット視覚エキスパートシステムの構成と設計方法について述べ、本システムの実用性について考察する。

1. はじめに

フレキシブルな生産設備を実現するための1つの重要な要素として、高機能、低価格、かつ応用システム開発の容易な工業用ロボット視覚装置（以下、単にロボット視覚と呼ぶ）が望まれている。ここで、高機能、低価格化の要求に対しては、最近の画像処理LSIの発達により、かなり満足できる状況になってきたが、プログラム開発を中心とするシステム開発費用は増大傾向にあり、ロボット視覚の適用拡大を図る上で大きなネックとなっている。

このようなシステム開発効率向上要求に対する1つの方法として、最近、盛んに開発されている画像処理エキスパートシステム^{1),2)}の利用が考えられる。画像処理エキスパートシステムは、画像処理に関する知識を備え、与えられた画像から目的とする結果を得るための画像処理手順を生成するものである。

このアプローチは、医用画像処理³⁾や粒子画像解析⁴⁾の分野では、良好な結果を得ているが、ロボット

視覚においてはこの枠組みでは不十分である。なぜなら、ロボット視覚では、入力された画像を処理するだけでなく、良好な画像を得るための照明方法やセンサ制御方法が極めて重要であり、画像処理の方法を設計するだけでは、システム開発ができないからである。すなわち、不適切な照明と光学系で得られた不鮮明な画像に対して、どのような処理を加えても良好な認識結果は得られない。また、画像処理の手順も、1枚の画像を逐次的に処理する単純な流れだけでなく、センサを制御しながら複数の画像を取り込み、それを組み合わせて処理する複雑な流れになることが多い。

そこで、画像処理の方法と照明や光学系を一体として設計するエキスパートシステムを開発した。本エキスパートシステムは、照明や光学系の設計結果をユーザに提示すると共に、オブジェクト指向の表現モデルを用いた認識対象記述データを生成し認識モジュール⁵⁾に送る。認識モジュールは、この記述データに基づき、センサ制御を行いながら物体認識を行う。

このようなエキスパートシステムを実用化する上で問題は、ロボット視覚が行う仕事の種類は極めて広く、近い将来、十分な知識ベースを構築することが難しいことである。さらに、ロボット視覚が行う仕事は、製造プロセスの進歩により変化することから、長期間かけて知識ベースを充実させていくという開発方法もとれない。

そこで、本エキスパートシステムの開発にあたって

† Industrial Robot Vision Expert System with Interface Capability between User and Human Expert by KICHIE MATSUZAKI, SEIJI HATA (Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.), KENZOU TAKEICHI (Tochigi Works, Hitachi, Ltd.), TOYOKAZU KUGA and KOUICHI MOCHIDA (Hitachi Keiyou Engineering, Ltd.).

†† (株)日立製作所生産技術研究所

††† (株)日立製作所栃木工場

†††† 日立京葉エンジニアリング(株)

は、知識ベースが不十分な状態でも使用できることを試みた。すなわち、本システムを視覚応用設備の開発を行うユーザとロボット視覚の専門家の仲立ちをするものとして構成し、蓄積された知識ベースで回答できるロボット視覚の仕事に対しては、ユーザに設計結果を出力する設計支援システムとなるが、蓄積された知識ベースでは不十分な場合は、ユーザの要求仕様を受け付ける要求仕様定義ツールとなるようにした。この場合、専門家はその要求仕様を参照して、そのロボット視覚の仕事を理解し、人手で設計を行い結果をユーザに渡す。このように、難しい問題に対してはユーザの要求仕様を専門家に伝えるだけなので、本システムは真のエキスパートシステムではなく、エキスパート支援システムと言うべきものである。このような使い方を可能にするためには、ユーザおよび専門家に対するインタフェース機能が重要である。本システムは、この機能を画像情報を用いたインタフェースにより充実させると共に、システムが処理できないユーザと専門家間の情報については、文字列データの形で交換できるようにした。

本論文では、このロボット視覚エキスパートシステムの構成と設計方法について述べ、本システムの実用性について考察する。

2. システムの概要

2.1 システム構成

本ロボット視覚エキスパートシステム (VEA: Vision Expert Assistant) は図1に示すように、オブジェクト指向の汎用認識モジュール (GOR: General Object Recognizer) に接続され、ロボット視覚のシステム開発に使用される。VEA は、ユーザの抱えている視覚作業の種類を決定し、それに適した認識手法を選択した後、光学系および認識アルゴリズムの仕様

を設計する。光学系の設計結果は仕様書の形でユーザに提示し、認識アルゴリズムはオブジェクト指向の表現モデルを用いた認識対象記述データの形で GOR に送る。この認識対象記述データは、複数の要素から構成される物体を記述するため、全体-部分の関係を階層的に表現する形式をとっている。VEA は、エキスパートシステム構築シェルを用い、ルールおよびフレームで記述されており、ワークステーションで実行される。

VEA の生成した認識対象記述データに基づいて認識を行う GOR は、認識処理モジュールと認識モニターから構成される。認識処理モジュールは、画像入力、前処理、判別処理、計測処理、干渉チェックを行う複数のモジュールから構成され、シーンの中から対象を認識するため画像信号を処理する。認識モニターは、ロボット等の外部機器からの認識実行命令を受け、階層的に定義されている認識対象記述データを参照して、下位の認識対象要素から順に認識を行うように認識処理モジュールの実行シーケンスを制御し、その認識結果を外部機器に返す。ここで、階層的に定義されている個々の認識対象要素ごとに使用するセンサの種類が指定されているので、複数のセンサを切り替えながら認識を行う処理の流れも実現できる。GOR は、マイクコンピュータに画像処理回路を付加した視覚装置⁹⁾で実行され、C言語で記述されている。

システム開発フェーズでは、このワークステーションと視覚装置はシリアル通信で結合され、ワークステーションが生成した認識対象記述データや、視覚装置が入力した画像データの伝送が行われる。システム開発が完了した後は、ワークステーションは切り離され、視覚装置単独で生産ラインで運転される。この時、視覚装置は、パラレルおよびシリアルポートを介して接続されたロボット、プログラマブルコントローラ等の機器からの命令で認識を行いその結果を返す。

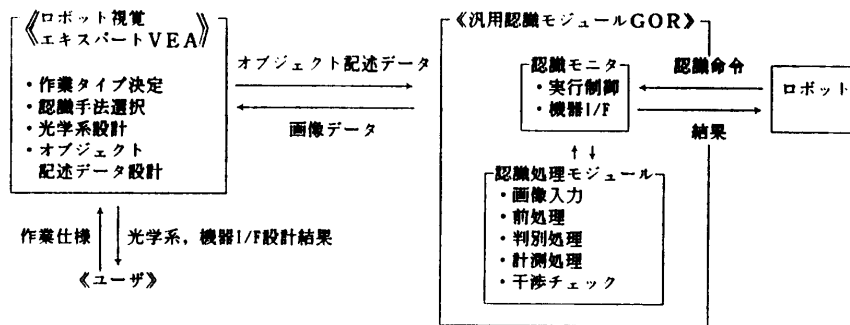


図1 ロボット視覚システムの構成

Fig. 1 System configuration of the robot vision system.

2.2 認識対象表現モデル

本システムにおいて、設計モジュール VEA の出力は、オブジェクト指向モデルを用いた認識対象記述データであり、これを参照して認識モジュール GOR が認識を行う。従来の認識プログラムを出力する方式の画像処理エキスパートシステムでは、複数のセンサから画像を取り込み、それらを組み合わせて処理するような複雑な手順の視覚システムを実現することは困難であるが、本システムでは、このような実行手順管理は GOR の認識モニタが行うので、VEA の負担が軽くなり、複雑な視覚システムの構築も可能となる。

認識対象記述データで表現するモデルには、前報⁵⁾で述べたように認識対象の属性と位置が含まれる。これは、ロボット視覚の基本的機能が、認識対象の判別と位置検出だからである。本認識対象表現モデルは、認識対象の属性として認識対象の種類、輪郭形状、前処理方法、幾何学的特徴量、判別方法、計測項目、干渉チェックの範囲等を含む。また、認識対象の環境はジョブ座標、ステージ座標、ウィンドウ座標の3階層で表現され、その中で認識対象の位置が定義される。ここで、ジョブとは作業環境全体のことであり、ステージとはセンサにより1回に撮像される範囲であり、ウィンドウとは撮像範囲における特定の着目部分のことである。このように認識対象記述データには、その対象の認識に必要なパラメータと手続きの種類が一括して記述されている。

3. 視覚エキスパートシステム

3.1 使用環境

(1) 想定するユーザ

VEA が想定するユーザは、視覚機能を備えた自動機械の開発、計画者である。このようなユーザは、視覚機能に対する要求仕様、例えば、位置検出における必要な計測精度や外観検査における欠陥パターンの種類等は把握しているが、視覚機能の光学的、ソフトの実現方法がわからず、技術的支援を望んでいる。ユーザが VEA に期待するのは、要求仕様が既存の視覚技術で容易に実現できるか否かの判断をし、実現できる場合は光学系の方式とプログラムを与えてくれることである。

(2) 想定する専門家

ここで専門家とは上記のようなユーザに対するロボット視覚設計の技術的支援を仕事とする者である。専門家は、ロボット視覚設計に関する知識ベースを

VEA に構築すると共に、VEA がロボット視覚構築を継続できなくなった場合、そのユーザの要求仕様を VEA を介して受け取り、その仕様の実現性を判断する。したがって、専門家はロボット視覚設計に関する経験とエキスパートシステム構築の能力を持つことが必要である。

(3) VEA によるロボット視覚構築の範囲

VEA がユーザの要求仕様を受けてロボット視覚を設計できるのは、視覚が行う作業の内容が VEA の知識ベースに蓄積されている作業タイプと類似の場合である。ここで、類似であるか否かの判断はユーザが行う。VEA はユーザの判断を助けるため、蓄積されている作業タイプに関する、3.3 節に示すような説明機能を備えている。なお、ユーザが類似でないものを類似と判断すると、結果として構築されたロボット視覚が認識テストに失敗するので、3.4 節に示すように専門家の介入となる。また、類似の作業タイプがあるにもかかわらず、ユーザがないと判断すると、やはり専門家の介入となる。

3.2 設計手順

VEA が、認識対象記述データおよび光学系の設計仕様を生成する過程を、組立ロボット用に VTR 部品の位置認識を行うロボット視覚⁶⁾を例として示す。この部分は、図2に示すように部品供給治具に整列供給され、接続部の角度にはばらつきがある。適切な認識方法は、この部品の特徴である2つの穴の周囲にそれぞれウィンドウを設定し、2つの穴の中心位置から部品の位置と接続部の開き角度を求めることであり、VEA によりこのような設計結果が得られることが期待される。

(1) 作業タイプの決定

作業タイプの決定は作業分類表の中から該当するタ

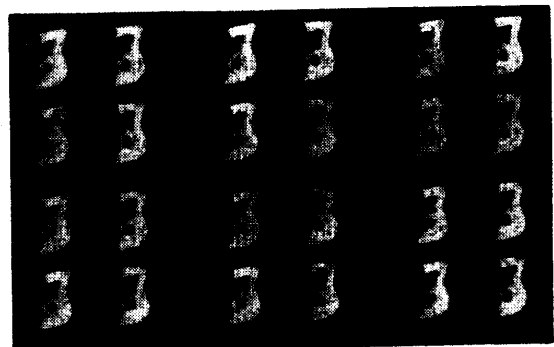


図2 認識対象部品例
Fig. 2 Example objects: Mechanical parts of a VCR.

タイプをユーザに指定させる方法で行う。この分類表は図3に示すように、ロボット視覚の作業事例等から作成されている。なお、この分類表の項目は、本システムの使用を通じて追加されていく。

(2) 認識手法の選択

認識手法の選択とは、先に決定したユーザの認識作業タイプに最も適している認識手法を、過去に使用実績のある認識手法の中から選択することである。現在、本システムが備えている認識手法は表1に示すとおりである。

図2の事例について、ユーザが作業タイプを、整列バラ置きされた平面状部品の位置認識と指定すると、次のように認識手法が選択される。

まず、この作業タイプに対しては、

- 全体形状比較
- 複合ウィンドウ位置認識

の認識手法が候補となるという知識が図4(a)に示すルールとして VEA に備えられている。

各認識手法には、長所、短所、適用の条件があるので、認識手法の長所/短所に基づく優先順序にしたが

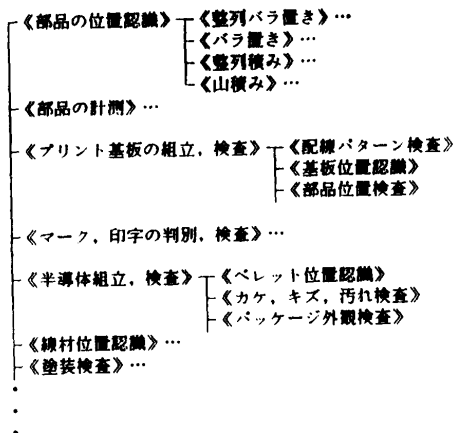
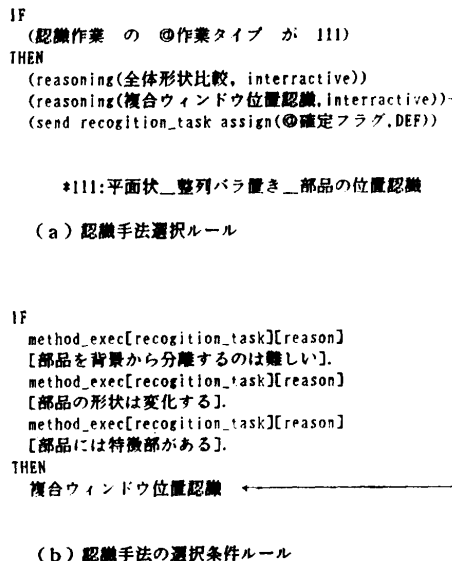


図3 作業タイプの分類データ
Fig. 3 Task classification data.

って後ろ向き推論を開始するようにルールが記述されている。

上記認識手法に関しては、認識の安定性に優れるという点から、優先順序が“全体形状比較”、“複合ウィンドウ位置認識”となっている。そこで、まず、“全体形状比較”の適用条件について質問を出し、その条件が満足されれば、認識手法は“全体形状比較”に決定されるが、この場合条件が満足されないとユーザが回答すると、次に、“複合ウィンドウ位置認識”の適用条件について、図4(b)に示すようなルールにより質問が出され、条件が満足されると回答すると、認識手法がこれに決定する。

このように、認識手法の選択は、ユーザの認識作業に関する定性的回答を用いており、認識対象の画像は用いていない。この理由は、画像の状態は光学系の方式に依存するところが大きく、認識対象に対して適切



(a) 認識手法選択ルール

(b) 認識手法の選択条件ルール

図4 認識手法選択の手順

Fig. 4 An example of recognition method selection process.

表1 認識手法の種類

Table 1 Object recognition methods using in this system.

認識手法	概要
全体形状比較	幾何学的特徴量の比較, パターンマッチングによる物体の判別, 位置認識.
部分形状比較	コーナ等, 部分的な輪郭形状による物体の判別, 位置認識.
特徴組合せ	認識対象の中から, 穴等複数の特徴を検出し, その位置パターンによる物体の判別と, 位置認識.
複合ウィンドウ判別, 検査	複数のウィンドウを設定し, ウィンドウ内の単純パターンの組合せを用いた物体の判別, 検査.
複合ウィンドウ位置認識	複数のウィンドウを設定し, ウィンドウ内の特徴部の位置関係から全体の位置を認識.
マーク, 印字読取り	パターン認識によるマーク, 文字の判別.
マーク, 印字検査	標準パターンとの比較によるマーク, 印字のカスレ等の検査.

か否かわからない光学系で撮像された画像を解析することの意味があまりないからである。したがって、VEA は光学系の方式と認識手法を合せて決定する必要があり、これはユーザの認識作業の内容から行わざるをえない。

ここで問題となるのは、ユーザが回答を誤ると適切な認識手法が選択されないことである。ユーザの誤回答は、このフェーズに限らず VEA との対話全般で起こりうるが、いずれの場合も VEA による設計が継続できなくなり、3.4 節に示すような専門家の介入となる。

(3) 光学系の設計

光学系の設計項目は、照明方法（落射照明、斜光照明、透過照明等）と、レンズ倍率である。照明方法は、適切な照明方法に関する表 2 に示すような作業タイプごとの知識を用いて設計される。

撮像倍率は、必要な計測精度と認識対象のサイズから設計する。まず、ユーザが必要な計測精度を指定すると、その精度が得られる 1 画素に投影される物理寸法を求める。この寸法と撮像素子 1 画素のサイズの比がレンズ倍率となる。なお、必要な計測精度と 1 画素に投影される物理寸法の関係は、画像処理の方法に依存する。例えば、2 値画像処理では一般に 1 画素以下の計測精度を出すことは難しいが、濃淡画像の統計処理を用いれば 0.1~0.3 画素の計測精度を出せる⁷⁾ことが知られている。この光学系の設計を行う時点では、認識手法は決定されているので、認識手法と計測精度の関係として表 2 に示すような知識を用いて精度計算を行う。この関係では、認識対象の形状、画像の安定性等は考慮されていないので、得られた計測精度は正確なものではないが、撮像倍率決定の基準にはなる。

次に 1 画素に投影される物理寸法とカメラの画素数から視野サイズを計算する。この視野内に認識対象が入れば、そのレンズ倍率でよいことになる。視野内に認識対象が入らない場合は、必要計測精度を下げるか、認識対象を複数の視野で分割して見ることを VEA が提案する。必要計測精度を下げられると回答すれば、新たな計測精度の値を入力させ再度計算を行う。また、視野分割が可能であるとユーザが回答すれば、複数のステージを用いた認識対象記述データの設計に進む。いずれの方法もできないと回答すれば、ユーザの仕様は満足できないという結論になり、VEA

表 2 光学系設計知識

Table 2 Knowledge for optical system design.

照明方法	<ul style="list-style-type: none"> ● 対象物と背景の濃度が大きく違う→落射照明 ● 対象物の裏側から照明できる→透過照明 ● 対象物と背景のエッジに段差がある→斜光照明 ● 対象物と背景が鏡面と乱反射面→偏光照明 ● プリント基板とパターンコントラスト不鮮明→蛍光検出照明 ● 外光の影響が強い→レーザと透過フィルタ ● ……
倍率	<ul style="list-style-type: none"> ● 対象物が 2 値化された領域→計測精度は 2 画素 ● 対象物が濃淡エッジ→計測精度は 1 画素 ● 対象物に特徴部が n 個→計測精度は 1 個の $1/\sqrt{n}$ ● ……

による設計はそこで終了する。

図 2 の例に対しては、照明方法は部品と背景の色、部品形状、部品供給治具が不透明であることから落射照明に決まる。また、“複合ウィンドウ位置認識”手法を用い、ウィンドウ内の認識対象が 2 値化された 1 つの領域であるということから、画素上の計測精度が求まる。この画素上の計測精度と物理寸法上の必要計測精度から視野サイズが決まり、この視野サイズと、ユーザの指定した部品供給治具の縦横サイズから、1 視野に部品供給治具全体を入れることができないという結果が出される。VEA からは条件緩和の提案が出されるので、視野分割ができると回答すると、ユーザの指定した部品の縦横サイズと配置ピッチから、適切な視野の分割数が決まる。

(4) 認識対象記述データの設計

認識対象記述データの生成ルールは認識手法に依存しない共通ルールと、認識手法に依存するルールに分類されており、認識手法が決まると、共通ルールおよびその手法用のルールだけが評価されるようにメタルールで制御する。認識対象記述データは VEA の内部では、インスタンスフレームとして扱われており、認識対象記述データの設計とはこのフレームを生成しスロットに値を設定することである。

この設計は 2 つの段階で行われる。第 1 の段階は、認識対象の環境を表すステージフレームとウィンドウフレーム、および認識対象自体を表すオブジェクトフレームの個数および関係を得ることである。

ステージは 1 回の撮像範囲のことであり、先に求めた視野の分割数がステージ数になる。各ステージに対するウィンドウ数は、着目する部分の数から決まる。認識対象は階層的なオブジェクトフレームとして表現され、オブジェクトフレームに記述される項目のタイ

プは認識対象によって異なる。この階層構造は表3に示すように認識手法に対応して決められている。また、オブジェクトフレームの主な記述項目には、前処理属性、特徴量属性、判別方法属性があり、各項目には表3に示すようなタイプがある。したがって、オブジェクトフレームの生成は、認識手法ごとの階層構造に基づき、階層の数、各階層における認識対象要素の数、および認識対象記述項目のタイプをユーザの指定した対象物の属性に基づいて設定することにより行う。

図2の例に対する認識対象記述データの構造は図5のようになる。まず、視野の分割数からステージ数が6となり、1ステージあたり4つの部品が入るとい光学系の設計結果と、部品には着目部分である穴が2つあるというユーザ指定からウィンドウ数が1ステージあたり8、合計で48となる。認識対象である部品のオブジェクトフレームは、“複合ウィンドウ位置認識”という認識手法が選択されており、部品の特徴部が穴2つであるというユーザの指定から、2つの下位認識対象要素を持つ2階層構造となる。さらに、穴と周囲の明るさの違いが大きいというユーザの指定から、前処理タイプは“領域検出”、特徴量タイプと判別方法タイプは“幾何パラメタ表現”となる。

第1の段階により、認識対象記述データの構造が決まると、第2の段階で、各フレームのスロットに値を設定する。この段階では、認識対象の画像が必要となる。ユーザは光学系の設計結果に基づき、指示された照明方法と、倍率の光学系を設定し画像を撮る。スロットの設定方法は、スロットの性格に応じて3種類ある。以下に、図2の例におけるオブジェクトフレームのスロットの設定方法を示す。また、図6はこの部品内の1つの穴を表すオブジェクトフレームのスロット種類と設定方法を示したものである。

(a) VEA の内蔵知識による設定

認識手法と認識対象に依存するスロットに対し VEA が設定する項目と知識には以下のようなものがある。

- 前処理の仕様：段階1で前処理タイプが“領域検出”型と決定されているが、2値化の方法は未設定である。2値化方法の選択知識には、物体と背景の照度差が大きければ固定閾値2値化でよいが、明るさ変動が大きければ参照点の明るさで補正する方

表3 オブジェクトフレームの階層パターンと属性タイプ
Table 3 Hierarchy patterns and attribute types of object frame.

認識手法	階層パターン
<ul style="list-style-type: none"> ●全体形状比較 ●部分形状比較 ●特徴組合せ ●マーク、印字読取り ●マーク、印字検査 	単一階層オブジェクト
<ul style="list-style-type: none"> ●複合ウィンドウ判別、検査 ●複合ウィンドウ位置認識 	多階層オブジェクト (オブジェクト)---(オブジェクト)--- (オブジェクト)--- ●
オブジェクト属性	属性タイプ
前処理属性	領域検出, エッジ検出
特徴量属性, 判別方法属性	幾何パラメタ表現, 輪廓表現, 2値パターン表現, 繰返しパターン表現, 文字列表現, 専用 (IC リード等)

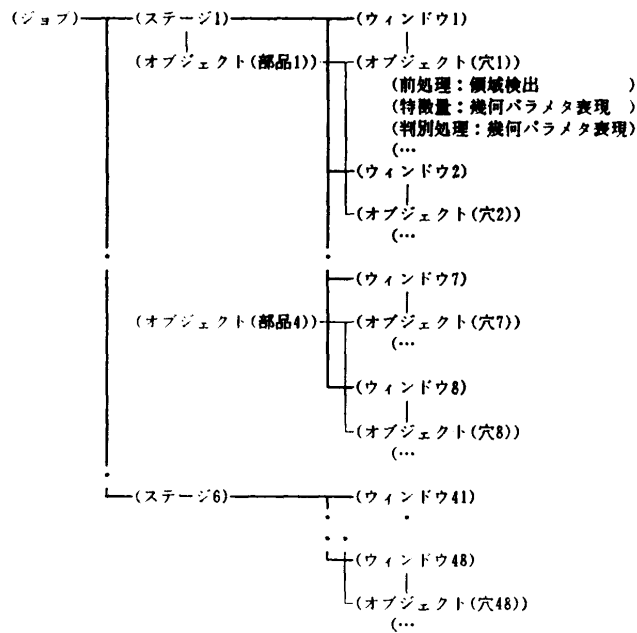


図5 生成したオブジェクト記述データ：図2のシステムに対する例

Fig. 5 Generated object description data for example of Fig. 2.

法をとるとか、物体と背景の面積比率が一定ならば P タイル 2 値化方法がよい等がある。これらの条件に関するユーザの回答から 2 値化方法を選択する。

- 特徴量と判別方法の仕様：段階1でこれらのタイプが“幾何パラメタ表現”型と決定されているが、使

用する幾何パラメタの種類は設定されていない。これを決定するため、対象物以外の物体の存在、対象物の形状特徴（線対称、点対称、穴数等）をユーザに質問し、その回答から使用する幾何パラメタの種類を決定する。

(b) 実物画像処理からの設定

上で決定された、前処理、特徴量、判別方法のタイプに基づき、2値化閾値、幾何パラメタの辞書データ等を実際の画像を処理して求める。これらの値は、ユーザが画像を入力し、認識対象を指示することにより、VEA が求める。

(c) ユーザの判断による設定

個別認識対象に依存し、かつ画像情報からは自動決定できない以下のようなスロットに対し、ユーザの判断に基づいて設定する。

- ウィンドウ範囲：部品の機械的な位置決め精度の仕様から対象物の出現範囲を求め、その範囲を包含するウィンドウを設定する。ウィンドウ位置は画像に対し固定、あるいは他の対象物からの相対で定義できる。
 - 認識対象の指定：画像内に複数の領域がある時、どれが認識対象かを指定する。認識対象が各種あれば、各々指定する。
 - 位置基準点：物体のどの場所を位置検出結果として出力するかを指定する。
 - 干渉チェック範囲：ロボットが部品をつかむ時に障害物があってはならない範囲を指定する。
- 全スロットの設定が終了すると、認識対象記述データの設計が終了したことになり、このデータファイル

を GOR に転送して、認識を実行させることができる。

3.3 画像利用のインタフェース

本システムは、設計対象の記述に画像を用いた指示が不可欠であり、以下のような場合に画像を用いたユーザとの対話機能を使用している。

(1) 認識対象の例示

作業タイプの決定に使用するメニューの項目には言葉による説明では不明確なものがある。例えば平面状部品といっても、厚みを持たない物体はありえず、どの程度までを平面状というかはユーザの主観的な判断にゆだねられる。本システムは、ユーザが指定したメニュー項目の例を要求すると、その例を図7のような画像で表示することにより、形状のような言葉では明確に規定できない仕様を明確化している。この機能は、作業タイプの分類フレームに画像例を接続しておくことで実現している。

(2) 認識対象記述データの設計指示

VEA が認識対象記述データを設計する際、ユーザが実物画像上で指示する項目に、3.2 節(4)(c)で示したものがあり、画像処理の結果を見て確認する項目に以下のものがある。

- 2値化閾値決定：2値化処理した画像から、2値化閾値が適切であるか確認する。
- 領域抽出の確認：セグメンテーション処理により、認識対象の領域が分離できるか確認する。
- 姿勢軸の確認：位置検出の基準となる姿勢軸の安定な決定法は認識対象の形状（線対称、点対称、穴位置等）に応じて異なるので、システムが求めた姿勢軸が適切であるか確認する。

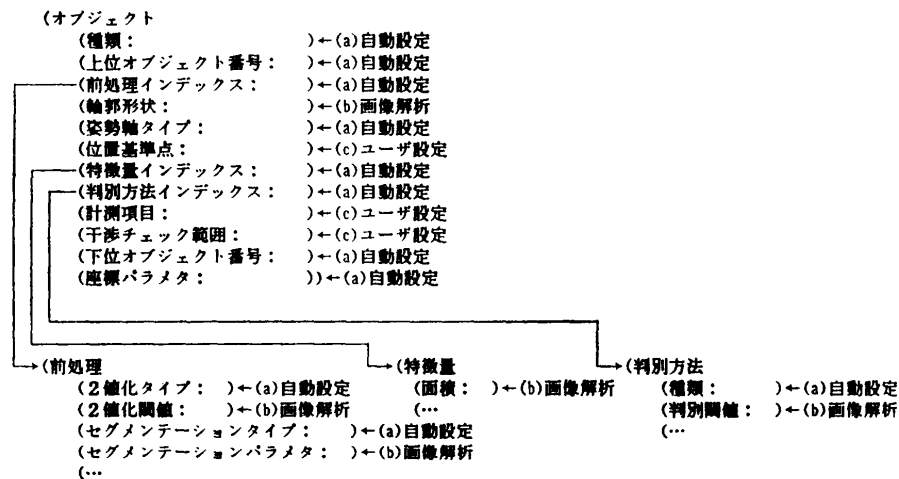


図 6 オブジェクトフレームの設定方法：部品穴の例
 Fig. 6 Object frame setting method for an example of a hole in a mechanical part.



図 7 認識対象の例示画面

Fig. 7 Help function showing task examples.

- 認識テスト：設計した認識対象記述データが適切であるか評価するため、GOR が認識した物体と位置を確認する。
これらの機能を実現するため、VEA はステージフ

レームの設計を開始する時に、視覚装置を用いてそのステージの画像を取り込み、その画像データをステージフレームに接続する。また、各種の画像処理モジュールをまとめてシステムメソッドとして登録しておき、ユーザに画像処理の結果を確認するルールの中でこの画像処理メソッドを起動して画像データを処理し、その結果を表示したり、認識対象記述データとして設定する。

3.4 設計中断時における専門家の処理

VEA が設計を継続できなくなる場合の状況、原因、ユーザへの指示をまとめると表 4 のようになる。設計の中断は 3.2 節に示した各フェーズでおきる。中断の理由を大別すると、VEA にユーザの作業に対する知識がない場合と、VEA の質問に対するユーザの判断が不適切な場合がある。ユーザには真の原因はわからないので、VEA は中断の状況に応じてユーザに指示を出し、ユーザは指示にしたがって認識対象の画像や仕事等を入力する。このデータと途中までの認識対象記述データおよび操作ログファイルは中間設計結果ファイルとなり、後で専門家が参照する。

専門家による中間設計結果ファイルの分析と対策は以下のようなになる。

(1) 認識対象記述データの修正

ユーザ入力の誤り、あるいは VEA の知識ベースの不備により認識対象記述データが不適切になったと判

表 4 VEA の設計中断ケース
Table 4 Design termination case of VEA.

設計フェーズ	中断状況	原因	VEA の指示およびユーザ操作
作業タイプの決定	該当する作業タイプがメニューにない	<ul style="list-style-type: none"> ●VEA の知識ベースにない ●ユーザの作業タイプ誤判断 	作業仕様 (注 1) 要求 →作業仕様入力→中断
認識手法の選択	質問に回答していくと認識不可のメッセージが出る	<ul style="list-style-type: none"> ●適当な認識手法がない ●ユーザの誤回答 ●作業タイプ選択誤り 	同上
光学系の設計	要求計測精度が高すぎるといメッセージが出る	●ユーザ要求が高すぎる	精度下げを提案 →下げられれば精度値再入力 不可ならば必要理由入力 (注 2)→中断
	視野と計測精度の要求が両立せずのメッセージが出る	●ユーザ要求に無理がある	精度下げか視野縮小/分割を提案 →可能ならば仕様再入力 不可ならば必要理由入力→中断
オブジェクト記述データの設計	画像処理結果 (2 値化エッジ検出等)、認識結果、が不良だと認識不可のメッセージが出る	<ul style="list-style-type: none"> ●光学系不適切 ●適当な画像処理手法がない ●ユーザの誤回答 ●作業タイプ選択誤り 	別の光学系による画像入力指示 →結果良好なら光学系変更 だめなら各種光学系画像入力→中断

注 1: 作業仕様には対象物画像 (一様照明)、対象物および背景の説明、要求認識スピード等が含まれる。画像以外はテキスト入力される。本表に特記しないすべての中断ケースでユーザが入力する。

注 2: テキスト入力される。

断した時は、専門家はその認識対象記述データを修正する。これにより適正な認識結果が得られたら、その認識対象記述データが得られるように VEA の知識ベースを修正する。なお、1つの事例から抽出された知識が、他の事例に不適切となることを防ぐため、抽出されたルールは多くは作業タイプ別に適用されるように管理している。

この具体例として、図2の例において、ユーザが認識手法の選択に関する質問である、“部品の形状は変化するか？”に対して、“変化しない”と答えた場合を想定する。ユーザが、この部品は部品供給治具に粗位置決めされて置かれるので接続部の角度はほぼ一定であり、“変化しない”でよいと判断した場合である。この場合、VEA は認識手法として“全体形状比較”を選択する。続いて光学系の設計、認識対象記述データの設計に進み、部品の姿勢決定パラメータとして形状の主軸方向を選択する。この状態で認識テストを行うと、接続部の角度の違いが主軸方向に影響し、必要な精度が得られない。ここでユーザが、認識テストの結果はよいかという質問に対し、NO と答えると、VEA の設計は中断し、中間設計結果ファイルを専門家に送る。専門家はこの画像をチェックして、接続部の角度ばらつきが姿勢検出誤差の原因であり、認識手法が不適切であることを発見し、ユーザの操作ログを調べ、ルールあるいはユーザ回答の問題点を調べる。この場合、部品の形状変化に関する質問が正しく理解されなかったことがわかるので、以後誤解されないように質問のメッセージを改良する。さらに、認識手法を変更し認識テストした後、ユーザにその認識対象記述データを送る。ユーザがこれを用いて認識テストし、仕様を満足していればロボット視覚ができたことになる。

(2) 画像処理アルゴリズムの開発

その認識対象用に特別な画像処理が必要な場合は、GOR に新たな画像処理モジュールを追加し、その画像処理のタイプを選択する設計ルールを追加する。そして、新たな認識対象記述データと GOR をユーザに送る。

4. システム開発生産性の評価

本システムの使用形態には、対象とする作業の種類に応じて、以下に示す3種類がある。

第1は、VEA が備えている知識ベースだけでシステム構築ができる作業に対して適用する場合である。

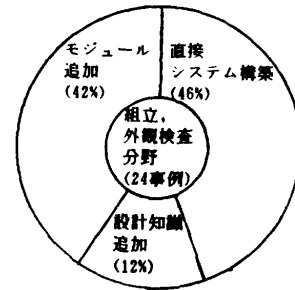


図8 本システムの使用形態
Fig. 8 Utilization types of the system.

この場合に必要となるユーザの操作は、VEA の質問に回答するだけであり極めて容易にシステム構築ができる。現在、簡易視覚装置として、特定の対象物に対しては実物教示で認識を行えるものがあるが、これと同等の操作性で、広範な作業に対してシステム開発ができる。

第2は、VEA の知識追加が必要な作業に対して適用する場合である。この場合の開発工数は、専門家が知識追加を行うことである。従来、この種の作業に対しては、専門家がユーザ部門に向いて要求仕様を調べてプログラムの開発をしていた。本システムを使用すると、認識対象の画像を含むユーザの要求仕様がかなり正確にわかるのでユーザとの打ち合わせが減り、またプログラム開発を行わないので従来に比べかなり工数低減になる。

第3は、GOR のモジュール追加が必要な作業に対して適用する場合である。この場合必要となる作業は、専門家が新たな画像処理モジュールを作成してGOR に組み込み、さらに VEA に知識追加を行うことである。

以上3種類の使用形態の頻度を、図3に示した分野の事例について評価したものを図8に示す。このように、約半数の事例が本システムで構築することができた。これは、分野ごとに見れば実用システムに使用される認識手法は限られており、それらのモジュールを備えていればかなりの事例に有効であることを示している。なお、新規画像処理モジュールが必要な第3の使用形態においても、新規機能の部分だけを開発してGOR に付加すればシステムを完成することができる。

5. む す び

画像処理の方法だけでなく、光学系や、ロボットとの同期制御の設計機能を持つロボット視覚エキスパー

トシステムを開発した。本エキスパートシステムは、蓄積された知識ベースでは不十分な場合は、ユーザの要求仕様を受け付けて専門家に伝える要求仕様定義ツールとなる。この機能により、対象とする領域が極めて広く、かつ時代と共に変化するため、知識ベースを完成させることが難しいロボット視覚という分野において、ユーザおよび知識の提供者である専門家の双方にメリットのある実用的なシステムになった。

これまでに開発されたロボット視覚の設計知識とプログラムを組み込んだ経過によれば、新たな作業タイプのために付加せねばならない知識やプログラムは増減する傾向にある。これは、使用事例が増加するにつれ、生産性が向上することを意味している。今後、本システムの使用を通じて、知識とプログラムの蓄積を進めることにより、本システムの適用範囲をより広げることが課題である。

謝辞 本システムの仕様検討に御協力いただいた日立製作所栃木工場久富良一主任技師、工藤真士氏、本研究の機会を与えていただいた日立製作所生産技術研究所第一部長松本義雄博士、岡本啓一主任研究員に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 田村, 坂上: 画像解析エキスパートシステムのための3種の知識, 電子通信学会, PRL 83-49, pp. 27-40 (1983).
- 2) 特集: 画像処理エキスパートシステム, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 2 (1988).
- 3) 長谷川, 久保田, 高須, 鳥脇: 画像処理エキスパートシステム IMPRESS における画像処理手順集約化機能について, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 2, pp. 126-133 (1988).
- 4) 久保, 佐藤, 坂上, 田村: 粒子画像解析エキスパートシステム DIA-Expert'PA 1, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 2, pp. 209-219 (1988).
- 5) 松崎, 磯部, 秦, 武市: オブジェクト指向の工業用ロボット視覚システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 12, pp. 1119-1128 (1988).
- 6) Kohno, M., Miyakawa, A. and Hosoya, M.: Real Time Synchronization of Two Robots for Coordinated Assembly, *Proc 16th ISIR*, pp. 220-228 (1986).
- 7) 鈴木, 秦, 藤井, 中村: サーフェスマウンタ用高精度視覚アルゴリズム, 昭和61年度精密工学会春季大会論文集, pp. 109-110 (1986).

(平成元年5月30日受付)

(平成2年2月13日採録)



松崎 吉衛 (正会員)

昭和25年生。昭和50年慶応大学工学部電気工学科卒業。昭和52年同大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。生産技術研究所勤務。昭和60年7月～昭和61年7月カーネギーメロン大学客員研究員。シーケンス制御用言語、ロボット視覚の研究に従事。電子情報通信学会、電気学会、計測自動制御学会、人工知能学会、IEEE各会員。



秦 清治 (正会員)

昭和23年生。昭和46年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年(株)日立製作所生産技術研究所入社。NC自動プログラミング、オンライン制御システム等の研究を経て、現在パターン認識の産業応用の研究に従事。共著「サーボセンサーの基礎と応用」等。電気学会、精密工学会、人工知能学会、IEEE各会員。



武市 謙三

昭和16年生。昭和38年大阪工業大学電気工学科卒業。同年(株)日立製作所栃木工場入社。副技師長。組立ロボット・視覚認識装置・ロボットシステム開発設計に従事。



久我 豊和

昭和37年生。昭和60年武蔵工業大学工学部電気工学科卒業。同年日立京葉エンジニアリング(株)入社。ロボット視覚、画像処理のソフトウェア開発に従事。



持田 幸一

昭和36年生。昭和60年中央大学理工学部精密機械工学科卒業。同年日立京葉エンジニアリング(株)入社。ロボット視覚、画像処理のソフトウェア開発に従事。