組立システムにおける画像処理技術*

野村省三**

Image Processing Technology for Assembling System / Shozo NOMURA

Key words: assembling system, image processing, sensing system, 3D object, vision system

1. はじめに

海外生産の進展や人件費高騰に伴って、国内の生産工程には今まで以上に自動化、高精度化、変種変量生産対応等の実現が求められている。このために生産ラインのインテリジェント化、フレキシブル化がますます必要になってきており、組立工程に対しても同様に、知能的で、フレキシビリティを持った生産システムが要求されている。

組立システムにおける画像処理技術は、対象物の状態・品質の知能的なセンシングと制御のための代表的手段として、この動向に対応するための重要技術である。

画像処理の技術的側面の大きな動向はCPUの高速化と立体計測技術開発の進展であろう。CPUの急激な高速化によって、従来は専用ハードウェアの開発によってしか実現できなかった多様な計測・認識アルゴリズムが、ソフトウェアだけで容易に実行できるようになってきて、画像処理の知能化に拍車がかかってきている。同じ画像処理でも外観目視検査の自動化のような高速性が要求されるものに比べて、組立動作を伴う組立用視覚計測・認識は、相対的にやや遅くても実用できる側面があり、特にCPUの高速化効果が大きな影響を与えて行くだろう。立体計測技術については最近非常にバラエティに富んだ色々な方法が提案・実用されており、組立の対象となる立体物の効果的な状態計測が可能になってきている。

本稿ではこれらの動向と事例を述べてみたい。

2. 動 向

組立や加工を行うシステムへの要求項目の中で最近特に目立つのは次のような項目であろう。

- (1) 高機能化、高精度化
- (2) 変種変量生産に対応できる柔軟性
- (3) 国際的なコスト競争に勝てるローコストシステム

この三つはいずれも、国際分業体制が急激に進展する中で、わが国が果たすべき技術開発の方向性を示しており、存在価値を示せる分野・方向性であろう。各々の項目はおおむねトレードオフの関係になっていて、解決が難しいが、国際分業下で生き残るためには避けて通れない課題である。

この三つの方向性を組立システム用の画像処理の観点から見ると、次のようになる。

(1) は、とりもなおさず視覚センサ・画像処理装置の獲得・処理すべき情報の高機能化・高精度化であり、2値化画像から濃淡画像へ、濃淡画像からカラー画像へ、平面(2D)画像から立体(3D)画像へ、静止画像から動画像へというニーズである。またこれらの画像を多数枚組み合わせる複合処理するケースも多くなっているし、1視野の画像の画素数を増やして精度を上げるトレンドもある。一方、処理時間が限られている以上、当然これらの傾向は画像処理の高速化要求を意味している。これらのニーズの高度化は、一つには単純な対象や組立動作の自動化が進み、今後は、自動化が難しい対象物(変形するもの、複雑形状物など)や自動化が難しい組立動作(器用な動き、センサコントロールによる組立など)が自動化対象になってくることにもよる。

(2) は対象物の形状の変化や認識内容の変更にスムーズに対応でき、また対象物形状や認識内容が容易に、短時間でティーチングでき、確認できるというニーズであり、ひ

* 原稿受付 平成9年8月11日

** 松下電工(株)生産技術研究所(門真市門真1048)

1966年大阪大学工学部電気工学科卒、同年松下電工(株)入社。制御部品の開発、視覚システムの開発等に従事。技師長、電子情報通信学会・人工知能学会会員、計測自動制御学会パターン計測部会委員

いては色々な形状のさまざまな認識アルゴリズムが簡単にプログラミングできるというフレキシビリティや知能化へのニーズである。

(3) はグローバルに見たときに、世界のどこで生産したときを考へてもコスト面で勝てる組立システム、少なくともパフォーマンス/コスト指標で勝てるシステムでなければならぬというニーズであり、柔軟性と裏腹にむだな機能を排したローコストが要求されている。搭載ソフトウェアについても(2)と同様にローコストで作成できることが望ましい。

次に、技術シーズの面からみた主な動向は、

(A) CPU の高速化・低価格化

(B) パソコン・CG 等の非 FA 分野のソフト・ハードの充実

(C) 立体計測技術開発の進展と高速化

などであろう。

(A) は、この 10 年で 10 倍という高速化を達成した CPU によって、従来は専用ハードウェアを開発しなければ実用できなかった高度な計測・認識アルゴリズムがソフトウェアのみで要求時間内に実行できるケースが増えてきたという傾向である。画像処理の中でも、人の目の機能と直接にスピードを競わなければならない目視検査の自動化に比べて、例えばロボットの動作時間中にも画像処理が可能な組立用画像処理の場合には、特に CPU の高速化の効果が効いてくる。今までより多数の画像を処理して認識の信頼性を上げたり情報のレベルを上げたりすることも可能になってきている。

(B) は上記の(2)、(3)のニーズに対する武器として効果がある。汎用パソコンに画像入力ボードを入れて特別な CPU ボードなしで対象物認識をし、標準搭載されている GUI 等のヒューマンインタフェースソフトを有効に利用して、ローコストでプログラミングやティーチングの容易な、かつロボット制御にも適したシステムを作り上げる例がだんだん増えてくるであろう。

(C) については、従来、組立用視覚システムとしては主に平面画像処理システム、特に 2 値化画像処理システムが多用されてきた。理由は画像処理時間とコストであり、この双方の観点から情報を圧縮して処理せざるをえなかった。ただしこの数年は濃淡画像処理を使ったシステムも多用されるようになってきており、特に正規化相関法を使った精密位置認識用の濃淡処理は非常に多く使われている。

しかし、組立の対象物はほとんどが立体物であり、できれば立体認識が望ましい場合が多い。ただし立体計測の方法が難しく、また平面画像処理における TV カメラのようにレンズ交換だけで計測精度が選択でき高速読出しのできる汎用ツールがないせいで、3D 計測機能付き組立システムはあまり多くはなかった。しかし最近、必要な精度、速度、距離に対応してさまざまな方式の立体計測法が開発されつつあり、だんだん実用例が増えてくると思われる。

例えばレーザのスポット光や平面光走査と同期した三角測量による色々な立体計測法、各種ステレオ法による 3D 認識法、焦点検出法による立体認識などである。上記(1)で述べた難自動化組立では立体計測が特に重要な役割を占めることになるであろう。

以上のような動向の具体例として、以下にいくつかの開発例を、実用的実地的なもの、将来期待できるものを取り混ぜて挙げてみたい。

3. 最近の技術開発例

3.1 組立システムへの部品供給用ビジョンシステム

多くの組立工程がロボット化されているが、部品の供給はパーツフィーダか人手による「配膳」によっていることが多い。前者は特殊形状部品には使いにくく、形状に合わせた整列部設計が必要で、また部品つまりによるトラブルがある。後者は人手によるためコストがかかる。これに対応するため、循環式コンベヤを用いてロボットの前に少量ずつ供給された部品を、ロボットが認識してつかみ、組立てる部品供給・組立システムを実用化した。部品はある程度離散して重なりが少ない状態でロボットの視覚ステージに供給される。これらの部品の位置・姿勢をハフ変換処理を用いて認識するアルゴリズムを開発した¹⁾。対象部品に歯車を使用した例を示す。

図 1 は微分処理で求めた部品の輪郭部の画像である。まずこの画像を $1/n$ に圧縮した画像に対して粗い角度分解能で粗サーチを行い、次に最終角度分解能で 2 回目の粗サーチを行う。求められた位置と角度をもとに、圧縮前画像に対してサーチを行い、図 2 のようなアキュムレータ配列を算出して各部品の位置・角度を求めた。

いくつかの高速化の工夫によって実用的な時間内で画像処理ができ、また対象物の形状のティーチングが容易なシステムになっている。

3.2 ステレオビジョンによる 3 次元物体の認識

組立用ロボット用の立体視覚センサとしては測定レン

図 1 輪 郭 画 像

図2 アキュムレータ配列

図3 穴への挿入作業³⁾

ジ・必要精度・測定速度などに応じて色々な方法が提案されてきている。実用するためにはほかにも、対象物の反射率レンジの広さ、コストなどの問題がある。

TVカメラを使ったステレオ法はそのなかではやや低精度低感度の範囲の立体計測法であるが、光学系の構成が容易で小型な点や画面走査の高速性、コスト等の点では使いやすい。技術開発例としては、対象物のエッジセグメントを中心としたステレオ対応による計測、および境界表現モデルとの照合によって、重なり合った、自由曲線エッジを持つ対象物を認識できるアルゴリズムが開発されている²⁾。またこの方法を応用して対象物のハンドリング・組立を行う例が示されている³⁾ (図3)。

また、三次元物体の認識の際に実用的に問題になる金属・プラスチックなどの光沢への対応方法の提案もある⁴⁾。これは対象物の画像を特徴的な部分画像テンプレート (Eigen-Window) に分割し、対象物の画像をそれらの集まりで表す。このテンプレートを固有空間に投影することにより、光沢ノイズや、重なりによる隠れの問題に対して安定な認識アルゴリズムを開発し、また、いくつかの評価指標を使って画像テンプレートの位置を最適に配置するようにしている (図4)。

図5のような、家庭用電源コードを巻いて結束した、やや寸法・形状ばらつきのある、かつエッジ対応のとりにくい対象のピックアップのための画像処理例を挙げる⁵⁾。この対象物は丸みを帯びた電線で構成されているから、エッジの対応による直接のステレオ3次元位置計測は誤差が大きい。このため、まず対象物を同心楕円にモデル化し、左右の平面画像上のハフ変換によって中心点を求める。このようにするとエッジ検出誤差が緩和されて、同心楕円の中心

図4 実験結果⁴⁾

左画像

右画像

図5 入力画像と認識結果

心を物体の代表点として安定に検出することができ、物体認識と物体の2次元位置検出を同時に行うことができる。その後左右画像の対応する中心点間でステレオ計算を行って対象物の3次元位置を求める。2次元画像上において個別の物体認識を精度良くしたあとでステレオマッチングを行うため、ステレオ対応問題が軽減され、安定した3次元認識を行うことができる。

3.3 3次元計測・認識法^{6)~8)}

上記のステレオ法も最近リアルタイム (ビデオレート) で計測できるものが提案されている⁹⁾、アクティブに投光してステレオ計測をする方式も多数発表されている。またステレオ法以外の、焦点ずらし法¹⁰⁾¹¹⁾、光切断法、位相差法、等高線計測法、光レーダ法などでも最近様々な提案・実用化が行われている。光切断法を応用した3次元計測法については、光の走査時間パラメータを応用した高速な方式が各種提案されている^{12)~14)}。

また、計測法の開発と一体となって、CPUの高速化に伴う画像処理の高速化が、3次元計測・認識法の実用化拡大に拍車をかけている。

これらの3次元計測法の発展によって、従来2次元の画像処理で無理をして認識していた立体対象物が立体画像として直接取り込まれ、精度の高いインテリジェントな認識ができるようになってきている。また、3次元画像と、光切断計測やステレオ計測と同時に得られる2次元画像 (反射光像) とを有効に組み合わせて、安定度・精度の高い認識を行うことができる。

計測法の高速化に伴って3次元画像の処理法も高速性を指向したものが出てきている。例えば距離画像のエッジ認

図6 エッジ検出の処理過程¹³⁾

識に、平面閉曲線の折線近似のための反復法を応用して高速化を図っている例がある¹³⁾¹⁴⁾。図6のように距離画像(a)から輪郭抽出(b)し、この領域から距離画像中の物体の表面上で最遠点を検出し、これを頂点として各頂点間を線分で結んで得られた三角形セグメントごとに最遠点を求め、その値がしきい値より大きい時はこれを新たな頂点としてそのセグメントを分割する(d)。この後隣接するセグメント間の傾きを見ながら平面統合し、平面フィッティングを行って最終認識を得る。この方法は局所的な変動にあまり左右されず計算量が少ないので処理が速い。

4. 今後の動向

今後期待される動向を2項に付け加えて挙げると、その一番大きなものはCADと画像処理の結び付きであろう。すでに製品設計の多くがCADツールを使って行われており、この形状データをもとにしてCGによる組立シミュレーション・評価をバーチャルに行うシステムが普及するに伴って、「CAD VISION」として提案されている¹⁵⁾¹⁶⁾ような、視覚認識プログラムの自動生成やティーチングの省力化が検討されて行くであろう。図7は対象物の自動アスペクト分類の結果を示している。また、作業に関する知識をもとに、効率的な視覚認識戦略を自動生成するための方法の提案もなされている¹⁷⁾。これは、対象とする組立作業についての知識と視覚センサのモデルから、視覚認識作業モデルと呼ばれる、視覚認識戦略のテンプレートをあらかじめ生成しておくことにより、実際の認識戦略を効率的に生成しようとするものである。

また今後は画像処理ソフトウェアとロボット制御・ハンド制御のリアルタイム関係がますます重要になり技術開発が進むと共に、組立と外観検査の同時画像処理、および工場用以外のCG分野・マルチメディア分野等の画像処理技

図7 対象物のアスペクトグラフ¹⁶⁾

術の、工場への応用などが進展していくものと思われる¹⁸⁾。

参考文献

- 1) 浜田長生, 吉村一成, 安田朋広, 佐久間裕治: インテリジェント位置姿勢認識システム, 画像の認識・理解シンポジウムMIRU '96, (1996) II-361.
- 2) 角 保志, 富田文明: ステレオビジョンによる3次元物体の認識, 電子情報通信学会論文誌D-II, J 80-D-II, 5 (1997) 1105.
- 3) 松下俊夫ほか: トラッキング機能を持つステレオビジョンを用いた作業の誘導とモニタ, 第14回日本ロボット学会学術講演会, 1M1-8-2 (I) (1996.11) 275.
- 4) 大場光太郎, 池内克史: ビンピッキングのための金属物体認識アルゴリズム, 第14回日本ロボット学会学術講演会, 3A1-5-7 (II) (1996.11) 945.
- 5) 顧 海松, 中原智治, 荒木秀和: ステレオ視による巻かれた電線の位置姿勢計測, 第41回システム制御情報学会研究発表講演会, (1997.5) 253.
- 6) 井口征士: 3次元画像計測の高速化, 画像電子学会誌, 24, 5 (1995) 474.
- 7) 井口征士: 3次元形状計測の最近の動向, 計測と制御, 34, 6 (1995) 429.
- 8) 佐藤宏介, 横矢直和: 測定手法の種類と基本原理, 計測と制御, 34, 6 (1995) 435.
- 9) 金出武雄, 木村 茂: ビデオレート・ステレオマシン, 日本ロボット学会誌, 13, 3 (1995) 322.
- 10) S. K. Nayar, M. Watanabe and M. Noguchi: Real-time Focus Sensor, Proc. ICCV, June (1995) 995.
- 11) 野口 稔, 中川泰夫: Shape from Focus法の投影パターンの最適化, 第7回外観検査の自動化ワークショップ, (1995) 66.
- 12) 佐藤宏介: シリコンレンジファインダ, 日本ロボット学会誌, 13, 3 (1995) 315.
- 13) 佐藤幸男: アクティブレンジファインダと距離画像処理, 13, 3 (1995) 311.
- 14) レンジセンサの上手な使い方, テレビジョン学会誌, 48, 2 (1994) 150.
- 15) K. Ikeuchi: Generating an Interpretation Tree from CAD Model for 3D-Object Recognition in Bin-Picking Tasks, Int. J. Computer Vision, 1, 1, (1987) 145.
- 16) 佐藤宏介: CADベースドビジョン, システム/制御/情報, 36, 5 (1992) 315.
- 17) 三浦 純, 池内克史: 作業の目的を考慮した視覚認識戦略の生成, 日本ロボット学会誌, 14, 4 (1996) 574.
- 18) 福田和彦, 奥水大和: 新しい産業応用と新しいビジョンの課題, MIRU '96, (1996) I-223.