

特集 多機種の製品に適用可能な高速検査ロボットシステムの開発*

Development of a High-speed Vision Robot System Suitable for Many Product Models

木村 博志

Hiroshi KIMURA

榊原 聡

Satoshi SAKAKIBARA

松岡 博

Hiroshi MATSUOKA

森 芳弘

Yoshihiro MORI

近藤 禎樹

Yoshiki KONDO

We developed a high-speed vision robot system that can be applied to various types of products. The system developed consists of a robot with cameras and lights, and a computer for teaching and image processing. In the system many points on any face of the product can be inspected without stopping with the help of the developed robot path planning, and a synchronous method between the robot path and image input. Moreover, we developed standard inspection algorithms and unified environment for robot and vision teaching. Therefore the teaching operation can be done without programming. This system is currently in use in our plants helping to maintain high quality products.

Key words : Appearance inspection, Vision robot, Path planning, Programming-less teaching

1. はじめに

企業間の激しい競争に勝ち残るためには、高品質化が非常に重要である。一方、近年の製品は、製品改良や製品の世代交代の間隔が短くなり、生産ラインはより多機種の製品に対応する必要がある。これらのニーズに対し、生産ラインの要所要所に検査工程を設け、目視作業者または自動検査機で対応している。しかし、人はヒューマンエラーが避けられないため高品質化には限界がある。また、検査工程を自動化する研究は多く、実用化例も多いが^{1)~5)} 検査部位が三次元的に分布している製品で、かつ多機種を生産する検査工程を自動化した例はない。

そこで本研究では、ロボットにカメラを持たせ、多機種で、検査部位が三次元的に分布する製品に対応でき、かつ高速に検査が可能で新しい検査システムを開発した。そして、本システムの実用化上の課題となる、多くの検査部位を高速に検査するためのロボット経路生成技術を開発し、また、ロボット及び視覚ティーチングをプログラミングレスで行うことができるティーチング技術を開発した。これにより、従来困難であった多機種の製品に対応する必要がある検査工程の自動化を可能にしたので報告する。

2. 外観検査自動化への課題

生産ラインでは一般的にすべての部品が組み付けられた最終検査工程が最も多くなる。また、最終検査工程は、あらゆる品質保証の取り組みの中で最後の砦であるため、最も重要な検査工程と位置づけられてい

る。そこで、最終検査工程を例に取り、実用化に必要な技術課題を抽出する。Fig. 1に最終検査工程の特徴を示す。これより、検査部位が製品全体に三次元的に分布している10~150箇所の検査を0.3s/箇所~0.6s/箇所

Example of inspection points and items

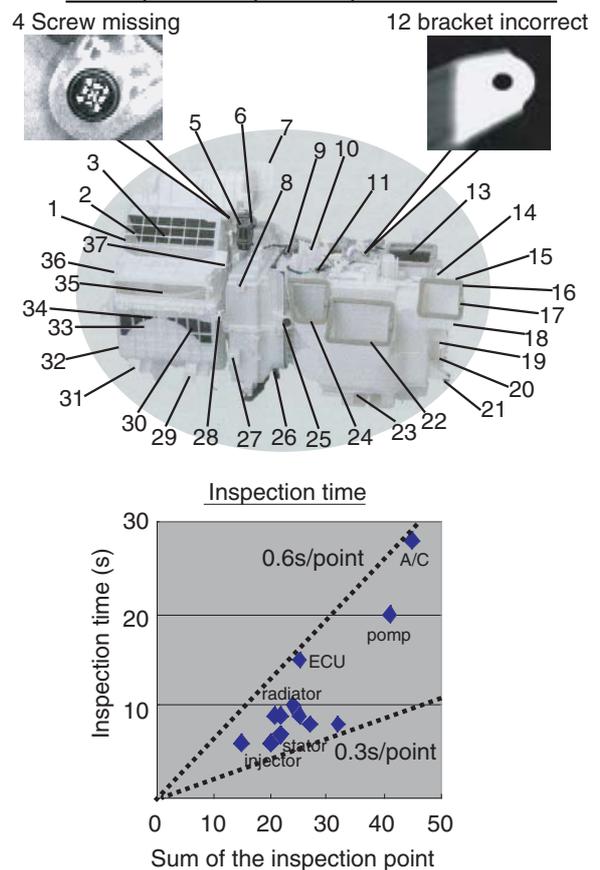


Fig. 1 Example of inspection

* (社) 日本ロボット学会の了解を得て、「第21回学術講演会講演予稿集 (2003)」より一部加筆して転載

所の速度で検査しなくてはならない。そのため、検査システムには様々な方向から高速に検査できる柔軟性が必要である。さらに、当社製品の自動車部品は、多くの車種が存在する上に、同一車種であっても、グレードや供給国等によって細かく仕様が分かれており、品番数も50~1000品番と多く、稼動後の品番追加も頻繁なため、ティーチングが簡単に行えるシステムが必要である。

3. 開発システムの概要

Fig. 2に開発システムの概要を示す。本システムは主に、カメラと照明が取り付けられたカメラロボットと、ティーチングの簡単化を可能とした画像処理装置で構成されている。カメラロボットに関しては、様々な検査部位を全方向から撮像するために、天吊り型の多関節ロボットを新たに開発した。また、高速な検査を実現するために、新しいノンストップ検査技術を開発した。これにより、各検査箇所を停止することなく、高速に検査を実行することができる。さらに、多機種かつ多部位の検査を簡単にティーチングするために、標準検査アルゴリズムを開発し、ロボットと視覚の統合ティーチング環境を構築した。これにより、ティーチング作業は、ロボット・視覚共にプログラミングレスで行うことができ、新たな機種の追加や変更が迅速に行うことが可能である。以下、各構成部分の要素技術について述べる。

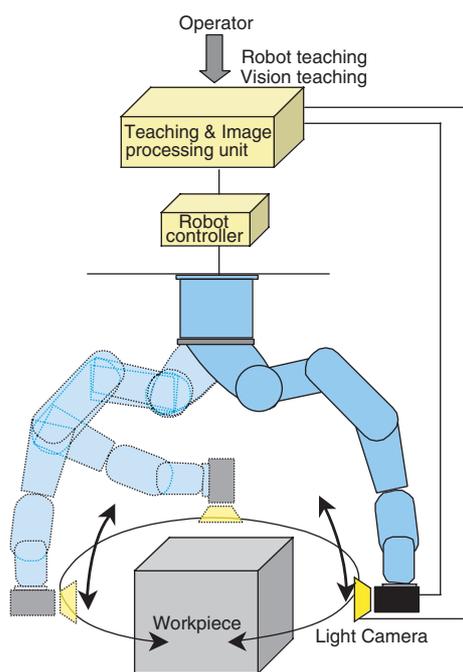


Fig. 2 System structure

4. 各構成部分の要素技術

4.1 カメラロボット

本システムに必要なカメラロボットは、三次元的に分布する検査部位を任意の方向から撮像可能な可動範囲を有することが必要である。今回、(株) デンソーウェーブと共同し、天吊り型6軸多関節ロボットを新たに開発した。Table 1に諸元を示す。ロボットの制御軸数は、任意の姿勢をとることができる、すなわち6自由度を持った6軸多関節とした。また、当社の代表的な製品のサイズ100mm~800mmに対応できるようリーチ長は1000mmとした。また、今回は多くの部位を検査対象にするため、ロボットは高速に動作する必要があるが、高出力のモータを使用した場合、剛性を高めるためにロボットが大型化し、設備面積も増大する。これにより、ロボット本体のコストを押し上げるのはもちろん、現状目視検査を行っている工程に導入するためには生産レイアウトの大幅な変更を行わねばならず、多額のコストが発生し、実用化は到底困難である。そのため、モータは小型ロボットでの標準的な出力のものを使用した。ロボットの高速化については、システム面の工夫により実現しており、これについては4.2節で詳述する。

カメラについては、様々なサイズの検査対象に対応するために、異なる分解能を持ったカメラを最大4台まで搭載可能とした。照明は、応答性・高輝度・高寿命を考慮し、LEDストロボリング照明とした。なお、照度は検査対象の材質違い等に対応できるように、検査部位ごとに256階調でレベルを制御できるようにした。開発したカメラロボットの外観をFig. 3に示す。

Table 1 Item

Axis	6 axis
Arm length	1000mm
Load capacity	10kg
Maximum speed	2552mm/s
Camera	Max. 4 cameras
Light	LED stroboscope (Light intensity : 256 level)

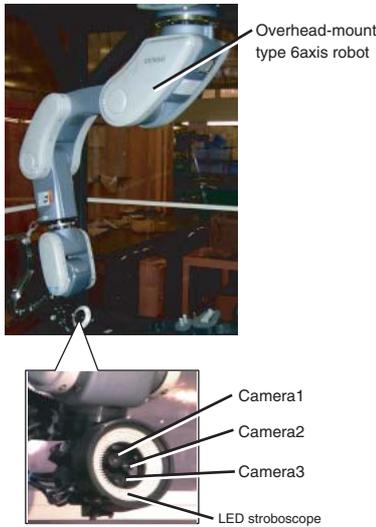


Fig. 3 Camera robot

4.2 多くの検査部位を高速に検査可能なロボット技術

従来、ティーチングした位置（教示点）で撮像するためには、ロボットを各教示点で停止してから画像入力する必要があった。しかし、最終検査の場合、検査箇所が多いため、各教示点で停止後に撮像するとサイクルタイムオーバーになってしまう。よって、ロボットが高速移動中に撮像する機能が必要である。以下、この機能を実現するために不可欠な技術について詳述する。

4.2.1 ノンストップ検査が可能なロボット経路生成技術

各教示点でロボットが停止せずに移動する機能は、従来から「パス動作モード」と呼ばれるモードで実現されている。これは、Fig. 4に示すように、教示点 P へ向かう速度指令パターンと終点 P_{END} へ向かう速度指令パターンを重ね、教示点 P への減速開始と同時に終点 P_{END} への加速を開始するものである。その結果、ロボットは合成速度で動作するため、教示点 P では止まらない。

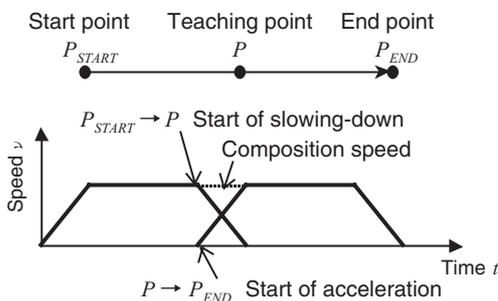


Fig. 4 Path mode

しかし、任意の位置でティーチングした教示点間を動作させた場合、ロボットの軌道はFig. 5 (a)のように教示点上を通ることはなく、手前でUターンしてしまう。そこで、Fig. 5 (b)に示すように、動作点と呼ばれる新たな点を各教示点付近に設け、動作点間をパス動作させた時にちょうど教示点を通る軌道を生成することを考える。

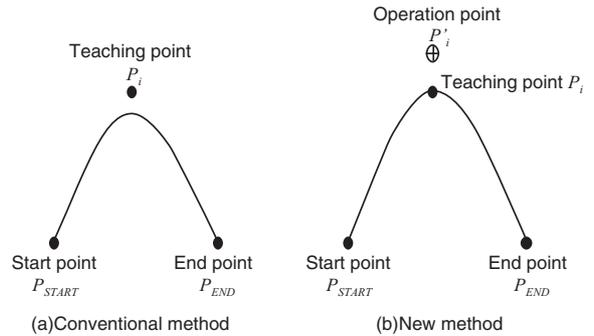


Fig. 5 New robot path planning method

この考えを実現するためには、動作点の位置の決め方が問題となる。これに関しては、各教示点付近に仮動作点を設定した後、計算機内部でロボット軌道をシミュレーションして教示点とのずれ量を求め、そのずれ量が一定以下になるまで仮動作点を繰り返し動かしていくこととした。

Fig. 6を用いて具体的に説明する。まず、仮動作点を P'_{ij} と表すことにする。これは、 i 番目の教示点に対して j 回目のシミュレーション用に設定された仮動作点を表している。なお、初期値 P'_{i1} は教示点上、すなわち、

$$P'_{i1} = P_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

となるように設定する。

次に、すべての P'_{ij} をパス動作させたときの軌道をシミュレーションによって求め、各教示点 P_i に最も近くなる最近傍点から各教示点 P_i へのずれベクトル \vec{d}_{ij} を計算する。そして、このずれベクトル \vec{d}_{ij} があるしきい値 TH 以上の場合、

$$P'_{ij+1} = P'_{ij} + \alpha \cdot \vec{d}_{ij} \quad (\alpha \text{ は重み係数}) \quad (2)$$

のように仮動作点を再設定する。このシミュレーションを繰り返し、ずれベクトル \vec{d}_{ij} がすべてしきい値 TH 未満になった時の P'_{ij} を動作点とする。

本手法を用いてロボット動作経路を生成することにより、ロボットが停止せずに各教示点上を通るようになった。

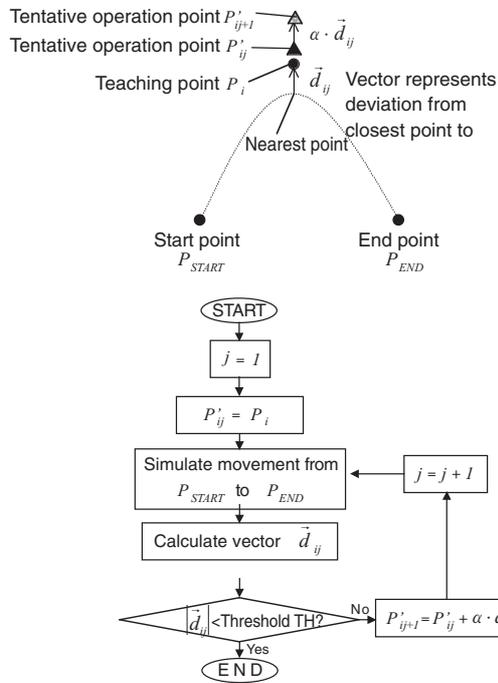


Fig. 6 Procedure for calculating operation points

4.2.2 移動中のロボット位置と撮像の同期

ロボットが教示点上を通過しても、カメラとの同期が取れなければ、ティーチングしたときと同じ画像を得ることはできない。本システムでは、Fig. 7に示すように、ロボットのエンコーダ情報を一定時間間隔で監視することによりロボット位置を取得し、検知エリアと呼ばれるあらかじめ設定しておいた領域に入ったときに、画像入力開始信号を出力するようにした。これにより、移動中のロボット位置と撮像の同期を取ることが可能となった。

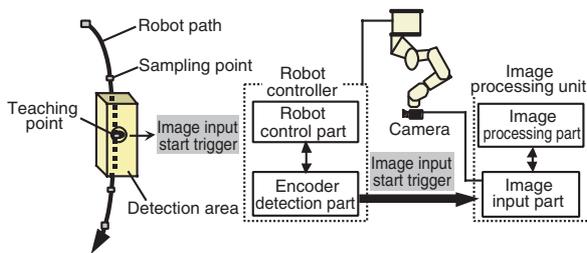


Fig. 7 The synchronous method between the robot path and image input

4.2.3 教示点間の最適速度制御技術

ロボット移動中に撮像する場合、隣り合う教示点間が近いと、前の教示点での画像入力が完了する前にロボットが次の教示点を通過してしまい、画像入力できないことになる。そこで、各教示点間のロボット移動

時間が、ある一定時間を下回らないようにロボット速度を最適に制御することとした。

隣り合う教示点間をロボットの最大能力 $R_{Max}=100\%$ で動かすと仮定し、そのときの移動速度を $v_{R_{Max}}$ 、教示点間の移動時間を $t_{R_{Max}}$ とする。また、画像入力を行うための処理に最低限必要な時間を T_{Min} とする。このとき、最適ロボット速度 v を、

$$\begin{aligned} \text{if } t_{R_{Max}} \geq T_{min} \quad \text{then } v &= v_{R_{Max}} \\ \text{else } v &= \frac{t_{R_{Max}}}{T_{min}} \cdot v_{R_{Max}} \end{aligned} \quad (3)$$

として、隣り合う教示点間が近い場合でも、 T_{Min} を確保できるようにロボット速度を制御することとした。なお、 T_{Min} は画像入力時間や4.2.2項で述べた検知エリアの設定時間等により、60ms程度である。

4.2.4 撮像テスト結果

今回開発した手法を用いてロボットを動作させた時のテスト結果をFig. 8に示す。(a)は、 P_{START} から教示点 P を経て P_{END} へと動作させた時の、ロボットの軌跡を表している。経路生成をしない従来の方法では、教示点よりも手前を通過しているのに対し、今回開発した手法では、教示点上を通過していることが分かる。(b)は、自動車用エアコンにおける検査箇所(45箇所)をロボット動作させた時の、教示点との誤差量を求めたものである。誤差量は、画像処理上問題ないレベル(視野サイズ80mm×80mmの10%以内)にする必要があるが、従来の方法では、最大で34mmもの誤差があり、大部分の検査箇所は検査不可能である。これに対し今回の方法では、最大でも8mm以内であり、すべての検査箇所で検査可能なロボットの軌跡を実現している。この手法では、各検査箇所をノンストップで通過するため、Fig. 9に示すように検査時間が従来比約1/3と、大幅に高速検査が可能となった。

4.3 ロボット・視覚の簡単ティーチング

ロボットとカメラを組み合わせたシステムでは、各検査箇所における撮像位置の教示(ロボットティーチング)と、視覚ティーチングが必要である。現状これらを簡単に行うことができないのは、検査対象ごとにプログラミングを行っていることと、ロボットと視覚を別々の環境でティーチングしていることが問題だと考えた。そこで、本システムでは、汎用性の高い標準プログラムを開発し、プログラミングレスでティーチング可能なシステムを目指すこととした。さらに、ロボ

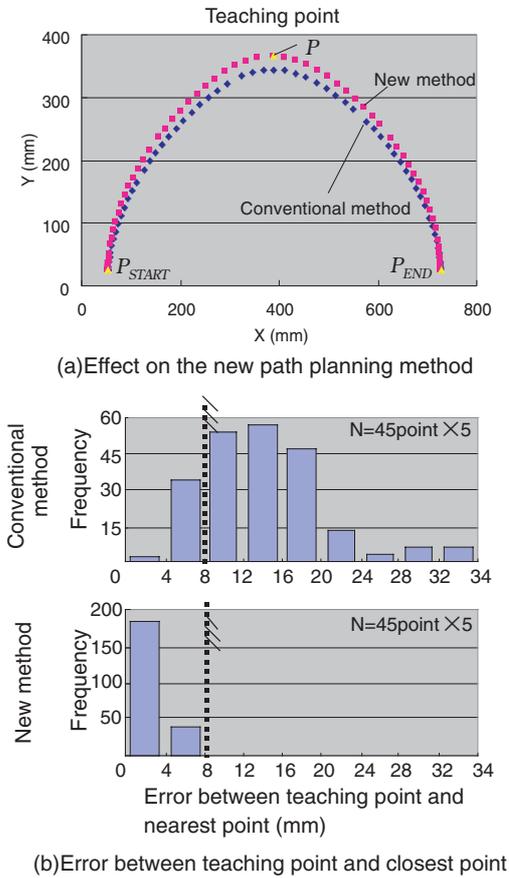


Fig. 8 Result of moving robot test

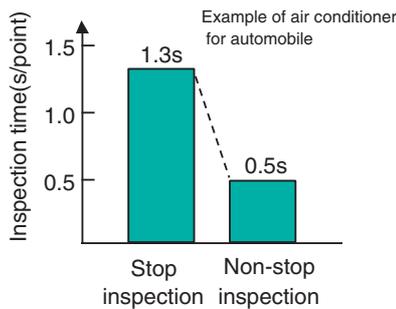


Fig. 9 Comparison of inspection time

ットと視覚のティーチングを同一の環境で行うことができるユーザインターフェースを構築することとした。

ここで、ロボット及び視覚ティーチングの内、ロボットティーチングに関しては、基本的に教示した位置へ移動する命令文の繰り返しであるため、標準プログラムの開発は比較的容易であり、今回の報告では詳細を割愛する。一方、視覚ティーチングでは、異欠品検査やキズ検査等、様々な検査が存在する上に、それぞれの検査の中でも様々な材質、形状が存在する。よって、視覚の標準検査アルゴリズムの開発がプログラミングレス化へのポイントである。本項では代表的な検査である異欠品検査の標準検査アルゴリズムの開発について説明する。

4.3.1 汎用異欠品検査の基本アルゴリズム

異欠品検査における良品・不良品画像の例をFig. 10に示す。これらの画像からも明らかのように、検査対象によって画像パターンの形状や明るさは様々である。しかし、キズ検査等とは異なり、良品画像パターンと不良画像パターンとの間には、比較的大きな差があることが分かる。そこで、良品の画像パターンをあらかじめ登録しておくことで、様々な検査対象に適用することが可能な正規化相関マッチング法を採用することにした。

正規化相関マッチング法とは、Fig. 11に示すように、マスター画像と呼ばれる良品の画像をあらかじめ登録しておき、検査時には入力された画像（被検画像）の左上から右下へ順にサーチし、各位置における相関値（マスター画像との一致度合いを表す評価尺度）を求めるものであり、相関値 $S(k, l)$ は、

$$S(k, l) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{M, N} \{x(i, j) - \bar{x}\} \cdot \{y(k+i, l+j) - \bar{y}\}}{\sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{M, N} \{x(i, j) - \bar{x}\}^2 \cdot \sum_{i=1, j=1}^{M, N} \{y(k+i, l+j) - \bar{y}\}^2}} \quad (4)$$

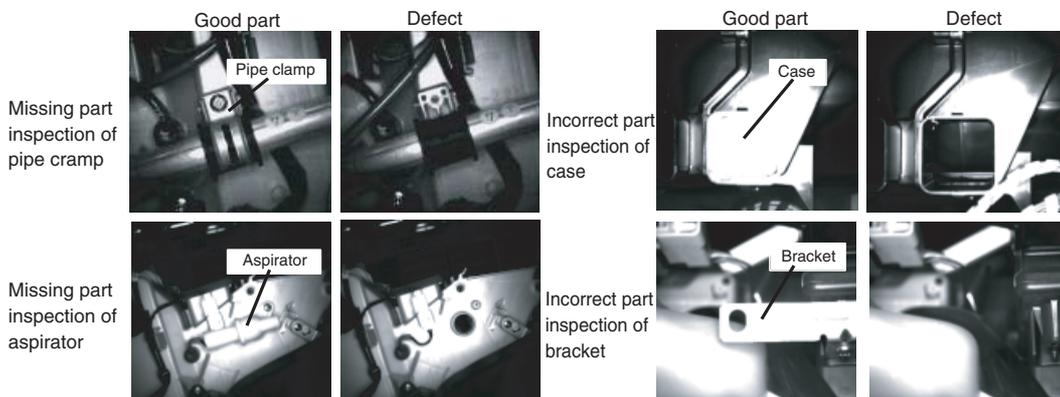


Fig. 10 Sample image of missing / incorrect part inspection

で表される。そして、求めた相関値の中で最大となる位置における相関値、

$$S_{MAX} = \underset{k=1,l=1}{\overset{U-M+1,F-N+1}{Max}} \{S(k,l)\} \quad (5)$$

がしきい値を超えるか否かにより、良否を判定する。

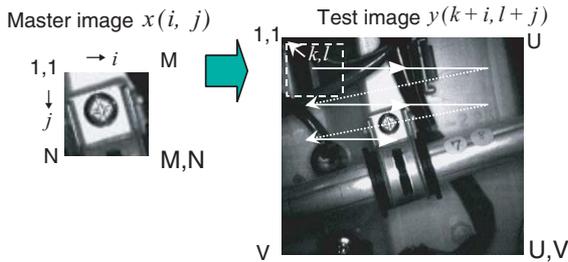


Fig. 11 Normalized correlation method

しかし、本手法は一致度を求める計算式が複雑な上に画面全体をサーチしなければならないため、計算量が膨大になるという欠点がある。例えば、100×100画素のマスター画像を512×512画素の画像上でサーチさせる場合、その計算量は乗算34億回、加算51億回となり、Pentium4 2.5GHzでも65.3sを要してしまう。そのため、実用化するためには高速化手法の開発が必要である。

4.3.2 計算量低減のためのアルゴリズム

そこで今回、輪郭線周辺の画素に着目した新しい正規化相関マッチング手法を新たに開発した。本手法では、マスター画像で用いる画素の数を減らすことを考える。正規化相関マッチングは、最も相関値が高くなる位置におけるその値の大きさによって良否を判定する、すなわちマスター画像と同じ画像パターンの位置を決定する処理であることにほかならない。よって、マスター画像の中から位置決めに必要な画素のみを抽出するという観点から、輪郭線の画素に着目した。ただし、輪郭線の画素を用いる際には、考慮すべき重要な問題がある。それは、対象の形状変動に対して弱いことである。例えば、当社製品で多く使われている樹脂成型部品やゴム部品などでは比較的形状変動が大きいため、正しく認識することができない場合がある。

そこで、本手法ではFig. 12に示すように輪郭線そのものは用いず、輪郭線の両側の画素（以下マスター点と呼ぶ）を用いることとした。こうすることで、Fig. 13に示すような対象の形状変動があった場合でも、マスター点は影響を受けない。さらに、隣り合う

マスター点は一定間隔以上離れた点とし、少ない画素数で対象の形状全体を表現することとした。

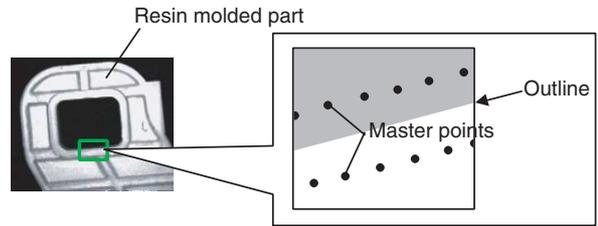


Fig. 12 New idea about master image

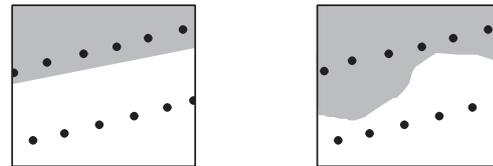


Fig. 13 Effect on shape change

実際に画素を抽出する処理の流れをFig. 14に示す。まず、マスター画像全体を画像微分し、各画素における微分強度 $G(i, j)$ と方向 $\theta(i, j)$ を求める。画像微分は、一般的なソーベル法と呼ばれる次式を用いて求める⁶⁾

$$G(i, j) = \sqrt{\{(\Delta_x x(i, j))\}^2 + \{(\Delta_y x(i, j))\}^2} \quad (6)$$

$$\theta(i, j) = \tan^{-1}\{(\Delta_y x(i, j) / \Delta_x x(i, j))\} \quad (7)$$

ただし、

$$\Delta_x x(i, j) = x(i-1, j-1) + 2x(i-1, j) + x(i-1, j+1) - \{x(i+1, j-1) + 2x(i+1, j) + x(i+1, j+1)\}$$

$$\Delta_y x(i, j) = x(i-1, j-1) + 2x(i, j-1) + x(i+1, j-1) - \{x(i-1, j+1) + 2x(i, j+1) + x(i+1, j+1)\}$$

ここで、微分強度とは、各画素における輪郭線らしさを表す値であり、方向とは、輪郭線に対して垂直の方向を表している。

次に、微分値の大きい順にソートする。

$$\underset{i=1,j=1}{Sort}^{MN} \{G(i, j)\} \rightarrow \{G(i_1, j_1), G(i_2, j_2), \dots, G(i_{MN}, j_{MN})\}$$

(Sort () はソートを表す)

$$\text{ただし、} G(i_1, j_1) \geq G(i_2, j_2) \geq \dots \geq G(i_{MN}, j_{MN})$$

そして、Fig. 14 (b) に示すように微分値の大きい点から順に、その点から一定距離 d だけ離れた2点、

$$P_h = (i_h \pm d \cos \{ \theta (i_h, j_h) \}, j_h \pm d \sin \{ \theta (i_h, j_h) \})$$

$$(h = 0, 1, 2, \dots, MN) \tag{9}$$

をマスター点候補として抽出する。マスター点候補は、Fig. 14 (c) に示すように半径 d の領域に既に登録済みのマスター点がないときに限り、マスター点として登録する。この処理を、登録されたマスター点が n 点になるまで繰り返し、最終的にFig. 14 (d) のようなマスター点群を求める。なお、微分方向からの距離 d は、検査対象の形状変動量及び画像分解能によって決定するパラメータであり、例えば当社の樹脂部品の場合には $d = 3$ 程度である。また、マスター点の個数 n は、検査対象の形状の複雑さによって決定するパラメータである。一般的には、 $n = 50 \sim 200$ 程度であり、ティーチング作業者が画面を見ながら容易に設定できるようになっている。

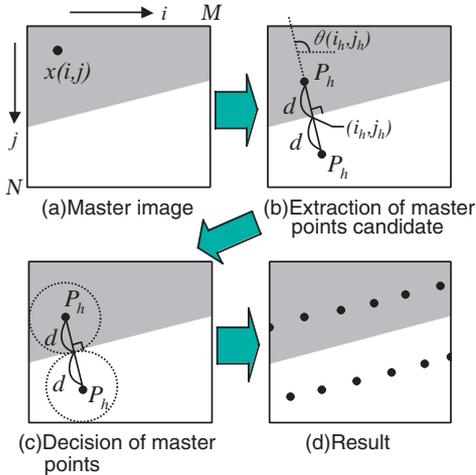


Fig. 14 Procedure for extracting master points

今回開発した正規化相関マッチング法での検査例とその時の処理時間をFig. 15に示す。良品と不良品を分離することができ、かつ処理時間は0.1sと大幅に短

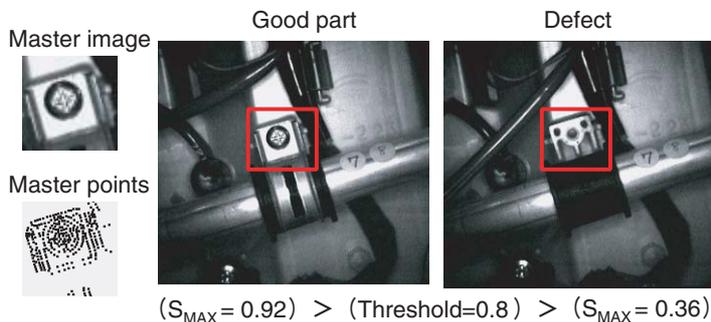


Fig. 15 Result of test

縮された。本手法により、実用的な汎用異欠品検査アルゴリズムが開発できた。

4.3.3 ロボットと視覚の統合ティーチング環境

従来では、ロボットと視覚は全く別々のユーザーインターフェースを用いてティーチングをしなければならず、ティーチング工数増大の要因となっていた。そこで今回、新たなユーザーインターフェースを整備した。具体的には、Fig. 16に示すように、ロボットと視覚のティーチングを統合し、同じ環境下で扱えるように設計した。ロボットの操作も、6自由度を1つのキーで操作可能なデバイス(3Dマウス)を用いて直感的な操作ができるようにした。

なお、ロボット・視覚のティーチングは、すべてグラフィカルなユーザーインターフェース上で行えるようになっている。実際の画面例をFig. 17に示す。これにより、ロボットと視覚は同一の環境からプログラミングレスでティーチングができるようになった。Fig. 18に示すように、ティーチング時間は従来比約1/5となり、多機種の製品にも迅速に対応することが可能となった。

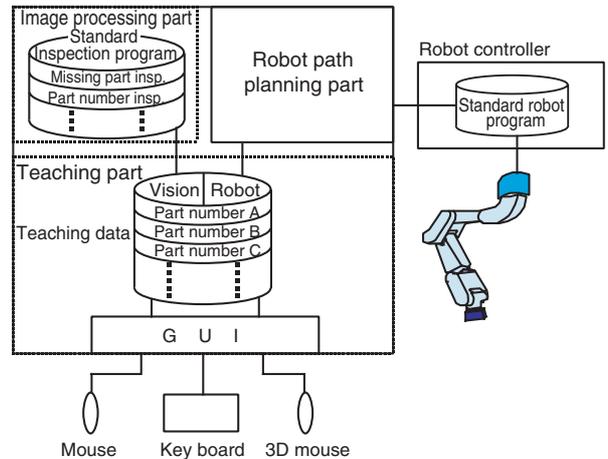
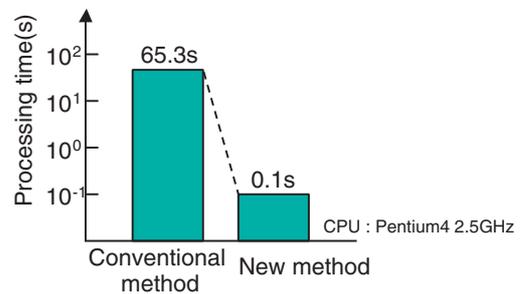


Fig. 16 Software structure



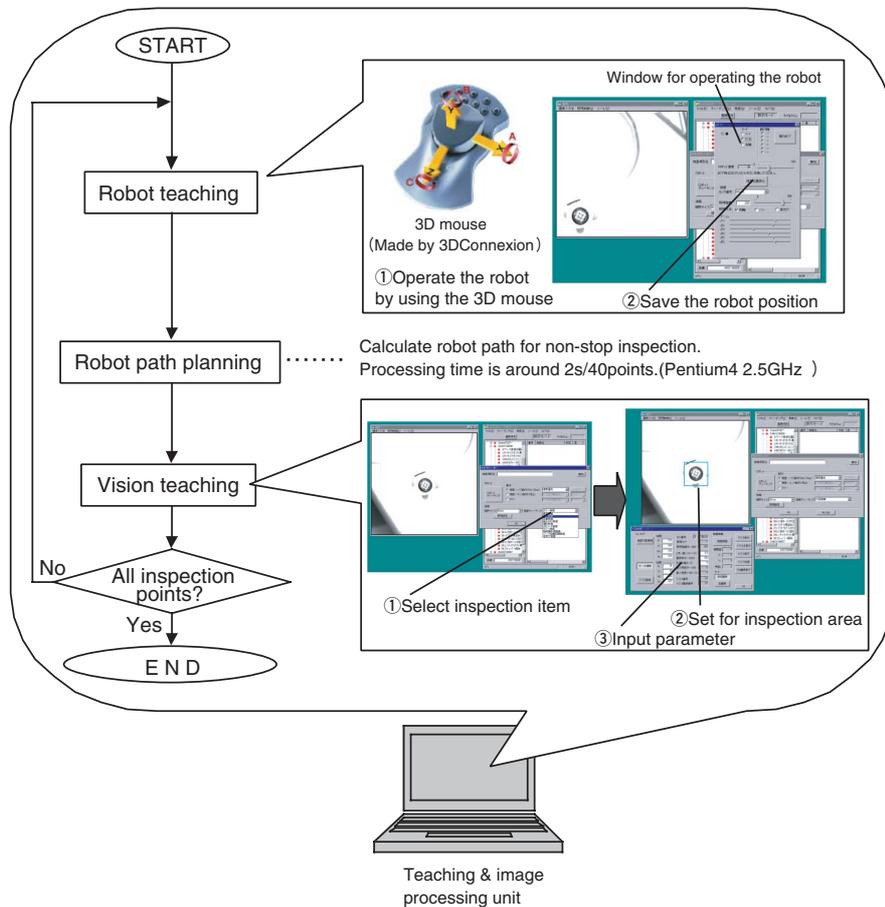


Fig. 17 Teaching procedure

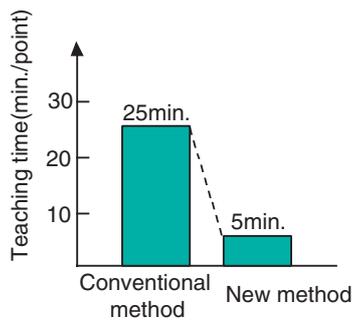


Fig. 18 Teaching time

5. 結果

今回開発した検査ロボットシステムを自動車用エアコンに適用した。設備の外観をFig. 19に、結果をTable 2に示す。35箇所の検査に対し、検査時間は17sとなり、各教示点で停止してから撮像する場合に比べて約3倍高速に検査を行うことができた。誤認識率は、見逃し率（不良品を良品と誤る率）は0%、過剰検出率（良品を不良品と誤る率）は1%と、従来の実用化事例と同等以上の性能を有している。また、ティーチング時間も5分/箇所で行うことができるようになり、

ロボットと視覚のそれぞれを個別にプログラミングしていた従来と比較して1/5程度に短縮された。

稼働後の製品改良や新機種の追加の際にも、従来のようにロボットや視覚の専門家でなくとも、現場の作業者がティーチングができるようになったため、効率も上がっている。ティーチングのユーザインターフェースは、現場作業者の生の声（意見や要望）も反映しながら、より使いやすいものへと進化させている。



Fig. 19 Appearance of inspection system for automobile air conditioner

Table 2 Result on automobile air conditioner

Sum of part number	200part types (Max.1000part types available)
Sum of inspection point	Ave. 35 points/product (Max. 200 point available)
Inspection time	Ave. 17s (1/3 of conventional camera robot)
Error ratio	Undetected error ratio : 0% Over-detect error ratio : Less than 1%
Teaching time	5min./point (1/5 of conventional method)

6. おわりに

多機種の製品に適用可能な外観検査システムを開発し、その有効性を確認した。本システムは実際の製造現場に導入され、安定した製品品質の確保に貢献している。今後は、コストダウンや、高精度寸法計測・官能検査等の高度な検査技術の開発を行っていく予定である。

<参考文献>

- 1) 横山良雄, 市橋栄二: 官能評価に対応した高速画像処理, 計測自動制御学会誌, 36, 4 (1997), pp.262-267.
- 2) 横山良雄, 川村成他: 規則性評価による欠陥候補検出技術を用いた外観検査自動化, 第8回画像センシングシンポジウム講演論文集 (2002), pp.149-152.
- 3) 目視検査の自動化技術調査委員会編: 画像処理による目視検査の自動化事例集, 新技術コミュニケーションズ (1991), pp.142-143.
- 4) 江尻正員監修: 画像処理産業応用総覧 (応用技術編), フジテクノシステム (1994), pp.401-408.
- 5) Rob Spencer: Machine Vision Makes Already Flexible Robots Even More Versatile, ROBOTICS WORLD, DOUGLAS PUBLICATIONS (2002), pp.18-19.
- 6) 高木, 下田: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会 (1991)



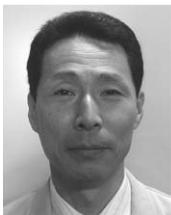
<著者>



木村 博志
(きむら ひろし)
生産技術部
外観検査の自動化技術の研究・開発に従事



松岡 博
(まつおか ひろし)
生産技術部
外観検査の自動化技術の研究・開発に従事



森 芳弘
(もり よしひろ)
生産技術部
視覚自動化技術の研究・開発に従事



近藤 禎樹
(こんどう よしき)
冷暖房製造2部
カーエアコン室内ユニットの組立工程設計に従事



榊原 聡
(さかきばら さとし)
(株)デンソーウェーブFA事業部技術部
産業用ロボットのシステムソフトウェア開発、アプリケーション技術開発に従事