



# X線CT スキャナを用いた 3次元CADデータに基づく内部形状評価\*

大滝 誠\*\* 伊澤昌敏\*\*\* 森重功一† 浅川直紀†† 竹内芳美†

Evaluation of Workpiece Inside Using X-ray CT Scanner Tomogram Based on 3-Dimensional CAD Data

Makoto OOTAKI, Masatoshi IZAWA, Kouichi MORISHIGE, Naoki ASAKAWA and Yoshimi TAKEUCHI

The study deals with X-ray CT technology to inspect the inside parts of workpiece without destroying them. At present, there is few softwares capable of processing X-ray CT scanned data. Therefore, the function was developed to treat the data to evaluate geometric elements such as straight lines, circular arc and others, based on 3-dimensional CAD data as the standard of inspection. After the coordinate system of scanned data is automatically related with the 3-dimensional CAD data, the system evaluates geometric elements considering that a workpiece contour consists of a cluster of segments. Thus, the system cuts the contour of 3-dimensional CAD data on the appointed cross-sectional planes and classifies them into geometric elements. To compare 3-dimensional CAD data with the X-ray CT scanned data, the system calculates the straightness, angle deviation from the direction vector, length and its error of a straight line, and, roundness, deviation of center point, radius and its error. In addition, the system offers a visualization interface to display them so that the users utilize the evaluated result comfortably. As a result, the system is found effective to evaluate 2-dimensional geometric elements.

**Key words:** X-ray CT scanner, 3-dimensional CAD data, non-destructive inspection, geometric elements, GUI

## 1. はじめに

鋳物工場において、内部形状を含む製品の3次元形状測定は、製品を分割しノギスなどを用いることによって行われている。しかし、検査工程におけるこのような破壊検査は非常に低効率であり、コストを押し上げる原因となる。また、小さい製品を分割すると、内部応力が解放され、寸法変化を引き起こすという問題も生じる。

3次元形状の測定方法としては、三次元測定機<sup>1)</sup>やCCDカメラを用いた方法<sup>2)</sup>、光切断法<sup>3)</sup>などが提案されている。しかし、これらの方法では、測定物の内部形状を測定することは極めて困難である。これらの測定法に対し、内部空間の有無が判別可能な超音波診断法<sup>4)</sup>も提案されているが、測定物の内部形状を測定することは不可能である。

そこで、測定物が内部形状を含む複雑な3次元形状でも非破壊で外部形状だけでなく、内部形状も3次元測定が可能なX線CTスキャナの利用が考えられる<sup>5)</sup>。X線CTスキャナを用いて基準面に対して平行な面の数枚の断面像を取得し、それらをコンピュータ上で平行に積層して再構成することにより、測定物の3次元形状を測定できる。しかし、断面像を扱うソフトウェアは少ないのが現状である。

一方現在では、製品をCAD/CAMシステムを用いて生産することが一般的であり、製品の3次元CADデータを容易に利用することができるようになっている。3次元CADデータは、形状を

中実な3次元物体として表現しているので、実際の物体と非常に近い取扱いが可能である。そのため、1つの製品の設計工程から製造工程まで、1つの3次元CADデータが一貫して統一的に用いられている。しかし、計測工程への導入は少なく、3次元CADデータは測定基準としてはほとんど用いられていない。実際の測定基準としては破壊・非破壊検査に区分なく、2次元図面が使用されることが多く、測定データが図面上のどの幾何学的要素に対応するのか判然としないという問題が生じ、計測工程の効率低下の一因となっている。

そこで、前述した3次元CADデータの特徴を活かし、これを測定基準として利用することによって、測定データと幾何学的要素の対応を容易に判断でき、計測工程の高効率化が見込まれる。

以上のような背景から本研究では、X線CTスキャナで取得した数枚の断面像を再構築した測定物を、3次元CADデータを基に評価する非破壊検査システムのソフトウェア開発を目指している。研究の第一段階として、X線CTスキャナで取得した断面像の輪郭形状を、3次元CADデータから算出した同位置における断面の稜線を測定基準として評価することを目的とする。具体的にはまず、測定物と3次元CADデータの同位置に基準面を設置し、この面からある距離における平面を測定対象面とする。そしてこの面における断面像をX線CTスキャナで取得し、輪郭を表す点群データを作成する。同様に3次元CADデータにおいても測定対象面の断面形状を算出し、これを幾何学的要素の集合体としてとらえ、個々の要素を取り出す。次いで、測定により求めた点群から、これらの要素に対応する点の集合体を関連付ける。

このように抽出した点の集合体から、各要素における真直度や真円度などの形状精度を算出し、評価する。ここで、評価の対象となる点群と稜線の関連付けは、幾何学的要素の属性を取り出すことにより行う。本研究では、幾何学的要素として直線要素と円弧要素を取り上げ、また、その属性を直線要素では稜線の端

\* 原稿受付 平成11年5月10日

\*\* 学生会員 電気通信大学大学院(東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)  
(現、(株)東芝生産技術センター)

\*\*\* 日産自動車(株)(横浜市鶴見区大黒町6-1)

† 正会員 電気通信大学

†† 正会員 金沢大学(金沢市小立野2-40-6)

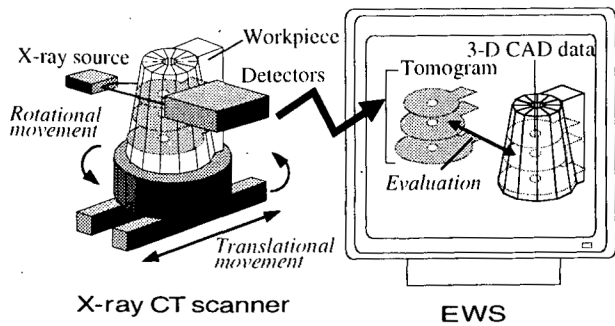


Fig. 1 System configuration

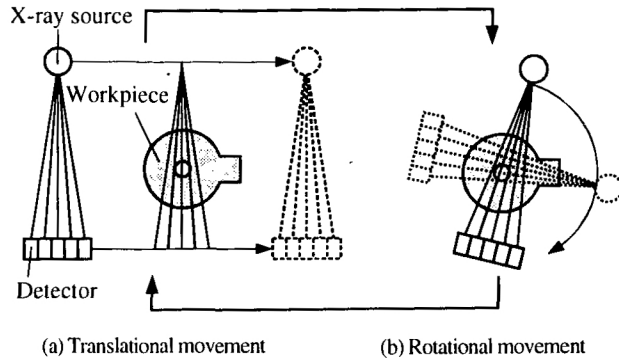


Fig. 2 Concept of X-ray scanning

点の座標値を、円弧要素では中心点座標、半径、両端点の座標値としている。

本報では、このような手法を用いて実際に評価実験を行い、システムの有効性を確認し、同時にユーザにとって評価結果が認識しやすいインタフェースを作成したのでこれを報告する。

## 2. システム構成

システムの概略を図1に示す。まず、ワークステーションで測定物の3次元CADデータの定義を行う。このデータをもとに測定物を工作機械で加工する。この測定物に基準面を設定し、この面からある距離にある測定対象面における断面像をX線CTスキャナで取得する。その後、ワークステーション上で断面像の輪郭の形状を、断面像と同位置における3次元CADデータの断面の稜線を基準として評価する。ここでは3次元CADシステムとして、(株)リコー製DESIGNBASEを使用した。

使用したX線CTスキャナは、東芝FAシステムエンジニアリング(株)製TOSCANER-20000AVである。測定範囲は $\phi 150\text{mm}$ 、高さ最大400mmである。画像再構成マトリックス数は $512 \times 512$ のため、画素サイズは $0.293\text{mm} \times 0.293\text{mm}$ である。画素サイズの制約から、JIS規格2種の鋳物を本研究の測定対象とした。

このX線CTスキャナは二世世代型のT-R方式<sup>9)</sup>である。X線管と検出器は測定物と向かい合って配置され、広がり角 $30^\circ$ をもつX線が測定物を透過して176個の検出器に到達する。

撮影にあたっては、図2(a)に示すように、X線管と検出器が一体になって測定物に対して直走走査を行い、通常1回の直走走査で4096個のX線吸収係数を得る。X線吸収係数とは便宜上、水を0、空気を-1000として割り当て、その間を1000段階に分割して表現した材質によって決まる係数で、CT値と称される。

直走走査が終了すると、図2(b)に示すように、X線管と検出器が一体になって測定物に対して $30^\circ$ だけ回転する。以後、両動作が交互に繰り返され、最終的にX線管と検出器が一体になって測定物に対して $180^\circ$ 回転したところで撮影が終了する。

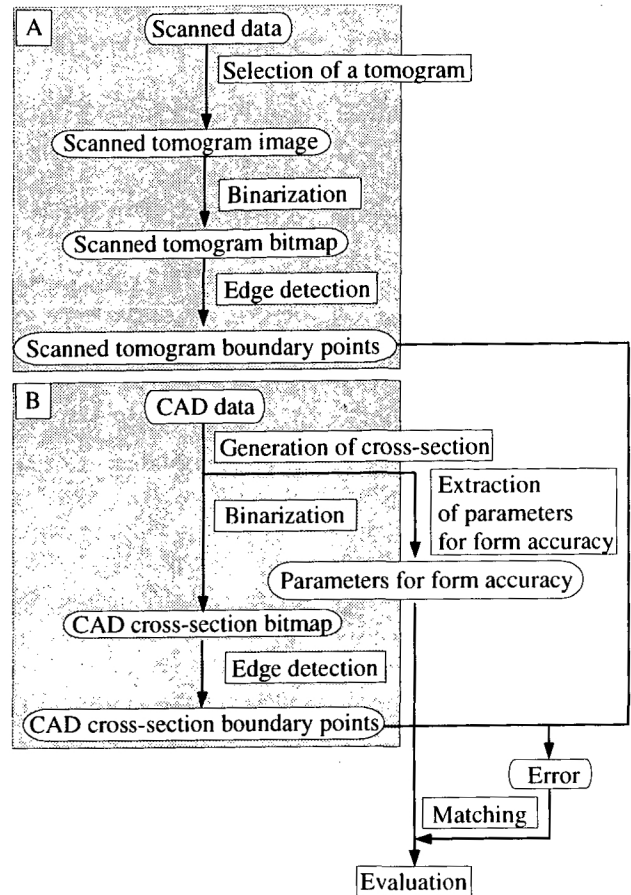


Fig. 3 Data processing flows for shape evaluation

## 3. 評価方法

### 3.1 評価に必要なデータの作成

図3にシステムの評価までの流れを、図3におけるX線CTによる断面形状生成プロセス(A)と3次元CADによる断面形状生成プロセス(B)のそれぞれの手順を図4に示す。

図中Aに示すように、測定物を基準面に置き、それに対して平行で距離 $h$ における平面を考える。この平面上で、測定範囲を再構成マトリックスに分割した各画素にCT値を記録したデータをスキャン断層イメージ(Scanned tomogram image)と呼ぶ。これらを距離方向の測定ピッチと測定範囲によって決定する枚数分合わせたデータを単にスキャンデータ(Scanned data)という。

また、スキャン断層イメージを2値化してできたデータをスキャン断層ビットマップ(Scanned tomogram bitmap)と呼ぶ。このデータはCT値に対し、モード法を用いてしきい値を設け2値化し、ノイズ除去のために収縮、膨張処理を施して生成される。

さらに、スキャン断層ビットマップに境界線追跡法<sup>6)</sup>を適用して作成されたデータをスキャン断層境界点群(Scanned tomogram boundary points)という。このデータは、断面像の輪郭を近似する点群の集合体である。境界線追跡法とは、図形境界がつくる閉曲面を、すべての成分について抽出する処理である。

図中Bに示すように、3次元CADデータにも同様に基準面を考え、その面からの距離 $h$ の断面をCAD断層データ(CAD cross-section data)と呼ぶ。このCAD断層データを2値化したデータをCAD断層ビットマップ(CAD cross-section bitmap)という。具体的には、CAD断層データ上に画像再構成マトリックス数の格子点を設置し、点が測定物の内にある場合、“1”を、それ以外の場合、“0”を点上に記録して生成される。

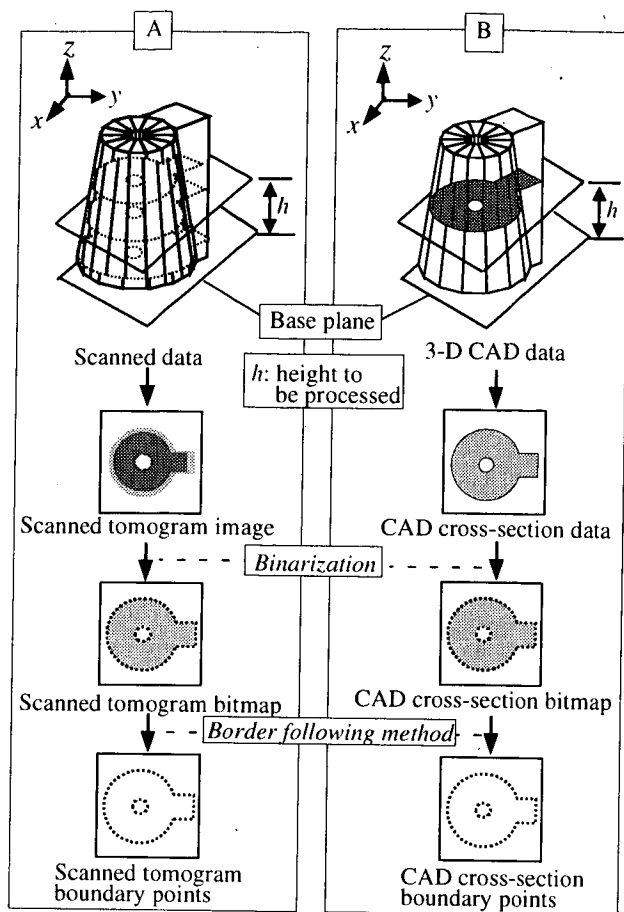


Fig. 4 Processing of data derived from scanned data and 3-D CAD data

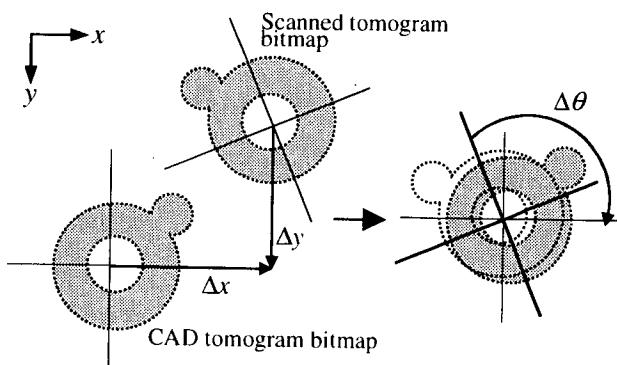


Fig. 5 Over view of matching

CAD断層境界点群(CAD cross-section boundary points)は、スキャン断層境界点群の生成と同様に、境界線追跡法をCAD断層ビットマップに適用して作成したデータである。

### 3.2 座標系のマッチング

データ作成後、図3に示すように、評価のためにはスキャン断層イメージ系の座標系とCAD断層データ系の座標系のマッチングを行う必要がある。本システムでは、図5に示すように、スキャン断層イメージ系の $xy$ 平面は、CAD断層データ系の $xy$ 平面と平行であるため、両座標系のマッチングは、並進移動量 $\Delta U(\Delta x, \Delta y)$ と $z$ 軸回りの回転角度 $\Delta\theta$ を求めることによって行われる。 $\Delta U$ と $\Delta\theta$ もCAD断層データ系の座標系を基準とし、以下の手法を用いて求めた。

まず、 $\Delta U$ は式(1)のように、スキャン断層ビットマップの重心 $G_s(x, y)$ とCAD断層ビットマップの重心 $G_c(x, y)$ から求めた。

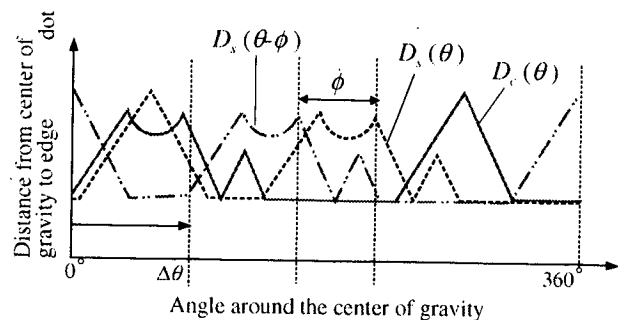


Fig. 6 Matching process

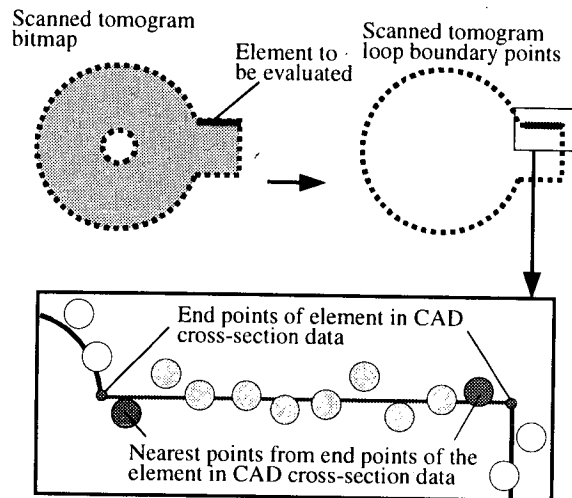


Fig. 7 Point extraction

$$\Delta U(\Delta x, \Delta y) = G_s(x, y) - G_c(x, y) \quad (1)$$

次に $\Delta\theta$ に関しては、スキャン断層ビットマップとCAD断層ビットマップそれぞれについて重心周りの角度と重心から外輪郭までの距離のヒストグラムを作成し、それぞれ $D_s(\theta)$ 、 $D_c(\theta)$ とする。次に、図6に示すように位相 $\phi$ を変化させながら $D_s(\theta)$ と $D_c(\theta)$ の差の積分値 $S(\phi)$ の絶対値を算出し、その値が最小となるとき位相を $\Delta\theta$ とする。これらは式(2)、(3)のようになる。

$$S(\phi) = \sum_{\theta=0}^{360} (D_s(\theta - \phi) - D_c(\theta)) \quad (2)$$

$$\text{Min } |S(\phi)| \text{ then } \phi = \Delta\theta \quad (3)$$

### 3.3 評価の対象となる点群の抽出とその評価

図7に評価対象となる稜線に関連付けられる点群の抽出について示す。以下に具体的な手順を示す。

- 1) CAD断層データの指定した稜線の両端点の座標を取り出す。
- 2) 稜線の両端点それぞれに最も近い点をスキャン断層境界点群から算出する。
- 3) 算出した2点を含むループに属する点群を抽出する。この点群をスキャン断層ループ境界点群とする。
- 4) 稜線の両端点それぞれに最も近い点をスキャン断層ループ境界点群から算出する。
- 5) 算出された点とその間の点群を抽出する。

関連付けられた点群の評価として、直線要素では真直度、方向ベクトル偏差、長さとその偏差を用いている。図8に示すようにまず、CAD断層データ上の指定した直線要素から角度 $\theta$ 傾いている直線 $l$ を作成する。そして、指定した直線要素に関連付けられた点群 $S_i$ から $l$ に垂線を下し、その交点を $T_i$ とし、 $S_i$ から $T_i$ までの距離 $L_i$ を求める。続いて $L_i$ の最大値 $L_{\max}$ と最小値 $L_{\min}$ を求め、

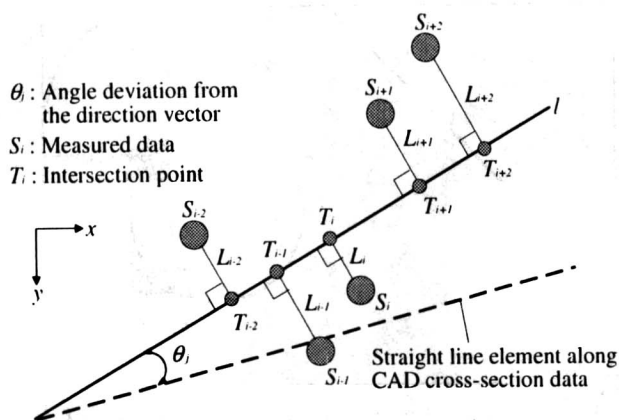


Fig. 8 Calculation of straight line form accuracy

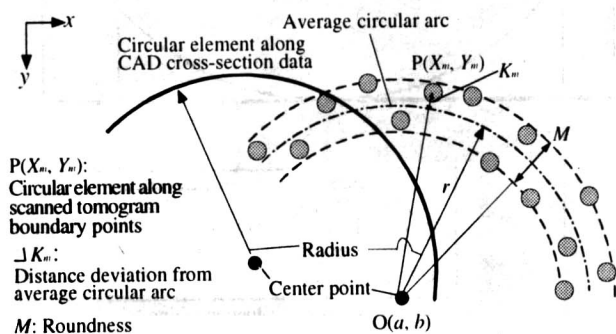


Fig. 9 Calculation of circular arc form accuracy

その差 $E_j$ を求める。これらを式で表すと以下のようになる。

$$L_{max} = \max L_i \quad (4)$$

$$L_{min} = \min L_i \quad (5)$$

$$E_j = L_{max} - L_{min} \quad (6)$$

$\theta_j$ の範囲は、方向ベクトル偏差の範囲を考慮して $\pm 20^\circ$ である。 $\theta$ を $-20^\circ$ から $0.2^\circ$ ずつ増加させながら各 $E_j$ を求め、式(7)のようにその最小値 $F$ を計算し、このときの $\theta_j$ の値が方向ベクトル偏差となる。ここで得られた $F$ が真直度となる。

$$F = \min E_j \quad (7)$$

図9に示すように、円弧要素では真円度、中心偏差、半径とその偏差を用いる。これらは最小自乗法を用いて求めている。最小自乗法では、図形との偏差の自乗総和が最小となる円、すなわち平均円を算出し、この円の中心から図形までの最長距離と最短距離の差で真円度を表す。

まず、平均円の中心座標を $O(a, b)$ 、半径を $r$ とし、

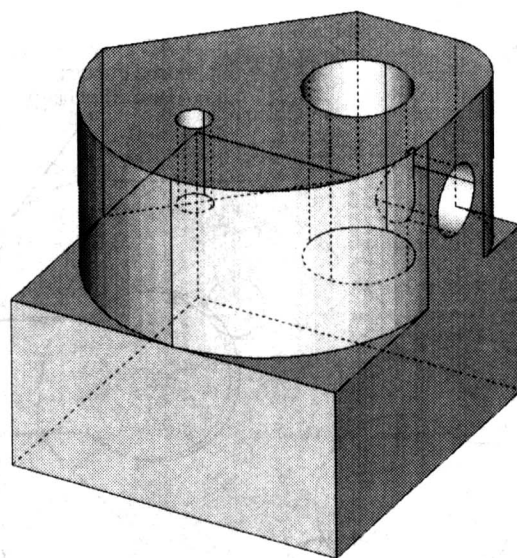
$$f(x, y) = x^2 + y^2 - 2ax - 2by - c \quad (8)$$

$$c = r^2 - a^2 - b^2 \quad (9)$$

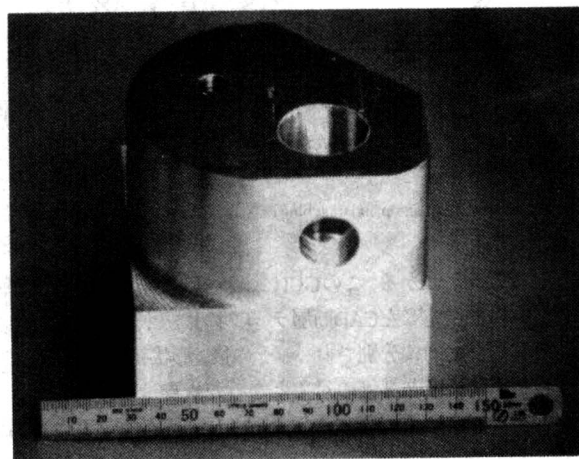
とおく。ここで点の個数を $N$ とすると、測定点 $P(X_m, Y_m)$ との自乗総和 $f^2(X_m, Y_m)$ は以下の式(10)で表される。

$$\sum_{m=1}^N f^2(X_m, Y_m) = \sum_{m=1}^N (X_m^2 + Y_m^2 - 2aX_m - 2bY_m - c)^2 \quad (10)$$

次に式(10)を $a, b, c$ について偏微分して、それぞれ0とおいて整理する。この整理した式より連立方程式を解くことによって $a, b, c$ を求め、式(9)より $r$ を得る。算出された $a, b, r$ より平均円を求めることができ、各測定点と平均円との距離 $K_m$ は式(11)にそれぞれの座標値を代入して求め、その中の最大偏差を真円度 $M$ とする。これらを式で表すと以下のようになる。



(a) 3-dimensional CAD model



(b) Actual workpiece

Fig. 10 Workpiece shape used in the experiment

$$K_m = \sqrt{(X_m - a)^2 + (Y_m - b)^2} - r \quad (11)$$

$$M = \max K_m - \min K_m \quad (12)$$

#### 4. 評価実験

システムの有効性を確認するために評価実験を行った。測定物の3次元CADデータと実際の測定物を図10(a), (b)に示す。測定物の材質はアルミニウムで、寸法は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ であり、縦横の穴が交差している形状である。基準面を図10における底面とし、そこから距離75mmの平面を用いて評価を行った。

図11にマッチング前後のCAD断層境界点群とスキャン境界点群を示す。マッチングは3.2章で述べたように、CAD断層データ系の座標系を基準としている。提案した手法で算出した結果、マッチング前は $\Delta U(\Delta x, \Delta y) = (-36, -41) \text{ dots}$ ,  $\Delta\theta = 180.4^\circ$ であったが、マッチング後は $\Delta U(\Delta x, \Delta y) = (-4, 0) \text{ dots}$ ,  $\Delta\theta = 0^\circ$ となった。 $\Delta U, \Delta\theta$ ともに、マッチング後、かなり小さくなったことがわかる。マッチング後も $\Delta x = -4 \text{ dots}$ 、すなわち約1.2mmのずれが見られるが、このずれに関しては鋳物を対象にしているので問題はなく、本研究で用いたマッチングの手法は有効である。

図12(a), (b)に本研究で同時に作成した、結果が視覚的にわかりやすいインタフェースを使用して、直線要素と円弧要素を評価した結果をそれぞれ示す。結果が視覚的に理解しやすいGUIが構築

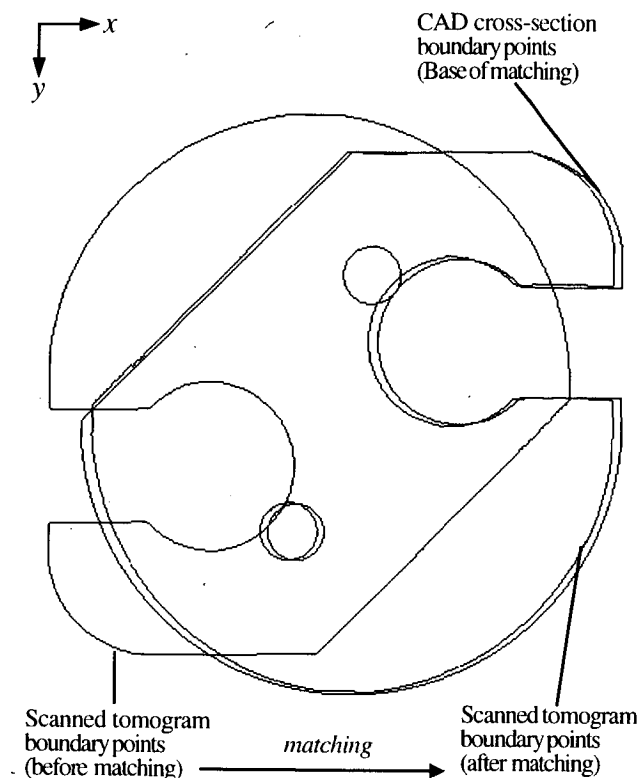


Fig. 11 Result of extraction and matching of X-ray CT image and CAD data

されていることがわかる。このGUIによって、まずオペレータがマウスを用いて指定したCAD断面データの稜線が直線、円弧、その他の要素に自動的に分別される。その後、形状精度を算出し、算出された形状精度と評価の対象となった点群は、グラフィック表示された形状に重ね合わせて表示され、オペレータは容易に判読できる。

## 5. お わ り に

X線CTスキャナで取得した数枚の断面像を再構築した測定物を、3次元CADデータを基に評価する非破壊検査システムの開発を目指し、測定物の基準面からある距離における断面像の輪郭の幾何学的要素を抽出し、3次元CADデータの同位置における断面を基準として評価を行い、以下の結果を得た。

- (1) 3次元CADデータの断面面の座標系と、断面像の座標系をマッチングすることができた。
- (2) 3次元CADデータの断面面の幾何学的な要素に対応する断面像の境界点列を自動的に関連付け、形状精度で評価を行うことができた。
- (3) 評価結果を視覚的に表現するインタフェースを構築することができた。

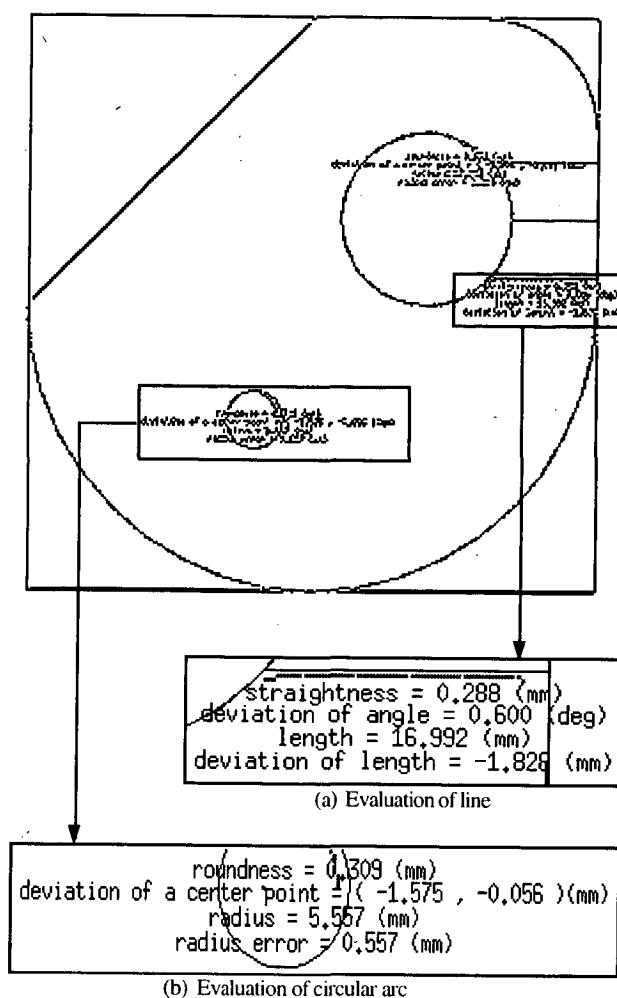


Fig. 12 Evaluated result of geometric elements of workpiece

本研究をすすめるにあたり、ご協力頂いた東芝FAシステムエンジニアリング(株)の山本輝夫氏に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 門脇聡一：三次元測定機(CMM)におけるデータ処理と形状評価, 精密工学会誌, **61**, 8 (1995) 1069.
- 2) 西川晃平：機械産業におけるマシンビジョン, Oplus E, **181** (1994) 113.
- 3) 新津 靖, 宮崎新一：光切断法を用いた非接触3次元全周形状計測システム, 精密工学会誌, **62**, 12 (1996) 1790.
- 4) 秦 清治：外観検査の自動化の現状と展望, 精密工学会誌, **56**, 8 (1990) 1368.
- 5) 岩井喜典ほか：CTスキャナ, コロナ社, (1979).
- 6) 長谷川純一, 奥水大和, 中山 晶, 横井茂樹：画像処理の基本技法, 技術評論社, (1986).
- 7) 庄司孝雄, 西出明, 藤井正司：高品位画像産業用CTスキャナTOSCANER-2000シリーズ, 東芝レビュー, **44**, 5 (1986) 406.
- 8) N. Asakawa, M. Izawa, M. Ootaki and Y. Takeuchi : Development of CAT System to Evaluate 2- Dimensional Geometric Elements, Using X-ray CT, Proc. 4th Japan-France Congress & 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, Volume 2, (1998) 562.