研究論文

大型鋳鍛造品自動ケ引きシステムに関する研究

(第1報)*

——素材形状認識のための非接触距離センサおよび5面測定機の開発——

横内弘宇** 早川 保*** 菊地千之** 金井 理† 岸浪建史†

A Study on an Automatic Marking System for Large Castings and Forgings (1st Report)
—Development of Non-contact Distance Measuring Sensor and 5-Directional
Measuring System for Recognition of Workpiece Shape—

Hirota YOKOUCHI, Tamotsu HAYAKAWA, Kazuyuki KIKUCHI, Satoshi KANAI
and Takeshi KISHINAMI

The paper proposes a computer-aided 3-dimensional shape measuring system which consists of 5-directional measuring machine installed with a newly developed non-contact distance sensor, and processors provided to transform the measured distance data to coordinates then also to construct entire mesh point data of the object workpiece. The distance sensor is based on an astronomical telescope typed optical system, equipped with laser tube and one dimensional CCD set horizontally on the optical axis. The device has following features: (1) wide range of measuring distance, (2) high measuring rate, (3) linear measuring characteristics, (4) less hidden effect and (5) compact size. The system is one of the sub-systems in a more comprehensively computer-aided marking system which, also having been realized in the same period, executes automatically all processes concerning to marking operation for large sized workpiece produced by casting and/or forging. Some test results of the measurement are presented constructing mesh point data model of the entire surface for a few typical workpieces.

Key words : 3-dimensional shape measuring system, range finder, non-contact distance sensor, marking system, CCD, castings, forgings

1. ま え が き

与えられた素材形状空間内に製品形状が適当な削り代で納まることを確認し、機械加工に必要な基準軸、基準面等を機械作業者に伝えるために、個々の素材表面に所要の線等を描画(けがき)する手作業をケ引きという。特に船用エンジンのクランクシャフト、水車のランナブレードのような大型機械構造用鋳鍛造品の場合には、対象が大型であることのほかに多種一品加工であるため、この作業の手順や治工具の標準化が困難であり、経験と高度のパターン認識能力を持った熟練技術者によってさえ、多くの時間と労力を要する試行錯誤の作業である。

この問題を大型機械部品製作の全体の生産性の問題に含めてとらえるならば、様々な見地からこれに接近しうる。すなわち、次のようなことが考えられる。

(1) NC プレスマシンの導入及びジグや工具の標準化¹⁾：作業自体の高い生産性に加えて、その過程において用いられた幾何学的データを後の過程に役立てることができる。しかしながら、この作業及びデータの精度を機械加工のレベルまでひき上げるために、現状では技術的な不確定性が多い。

(2) ケ引きの手作業をコンピュータ支援ケ引きシステムに置き換えること：加工物を工作機械に設置するときの基準面や基準軸の割出しを自動処理で得ることができ、大きな時間節約が可能となる。

(3) 特殊な工作物保持装置をもった一つの機械に形状測定と機械加工を集積すること：ケ引き作業を省くことができる。大きな初期投資が必要となり、大型鋳鍛造品の場合にはかなりの危険を伴う。

以上の検討の結果、(2)の方法が目標として現実的

* 原稿受付 昭和63年1月29日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62年3月27日)および6th ICPE(昭和62年10月10日)にて発表

** 正会員 室蘭工業大学(室蘭市水元町27-1)

*** 正会員 (株)日本製鋼所(室蘭市茶津町4)

† 正会員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 1 Background of the shape measuring system, the overall scheme of proposed manufacturing system for large product

であると見なし得る。

大型部品のケ引きに関するすべての作業を自動的に遂行するオフライン計算機支援のケ引きシステムを実現するためには、非接触プローブを用いた三次元形状測定システムを開発することが必要となる。

この報告は上述の統合的なケ引きシステムに適用可能な、計算機支援の形状測定システムを提案するものである。図1はここで提案されている大型部品生産システムの全体の構成を示し、形状測定システムを含む自動ケ引きシステムとCAD/CAMシステム²⁾との関係を示している。

2. 三次元形状測定システム

このシステムは、新しく開発された非接触距離測定センサを備えた5面形状測定機と、参照面から対象工件物表面上の多数の点までの距離の測定値を座標に変換し、さらに全体形状の格子点(網目点)データを構成するために準備されたプロセッサとから成っている。

2.1 5面測定法

素材外形形状はその形状の包絡6面体の各平面に対して1箇の曲面の組合せで構成されていると考えられる。すなわち、素材外形形状は包絡6面体の各境界面を参照基準とした高さ情報の集まりで表現できる。直交座標系を用いるならば各軸に直交する6面を採用するのが最も自然である。しかしながら、1面は支持面として使用されるので、実際には、図2に示すように5面形状測定が可能となる。

2.2 5面測定機と制御ユニット

図3(a)に開発した試作測定機を示す。これはギャントリタイプのボール盤を基にして改造したものである。機械システムの主な仕様は次のとおりである。

機械外形寸法：3 000×4 000×2 500 mm

可動範囲：2 200×2 000×2 000 mm

送りの分解能：10 μm

最大可載重量：5 000 kg

各軸の最高送り速度：3 m/min

また図3(b)は関節A, B, Cを持つ姿勢制御ユニットであり、その先端に測定装置(距離測定センサ)が取り付けられる。測定システムは5面測定以外に輪郭追従モード等での測定の可能性を考慮して、同時6軸制御である。制御ユニットは16 bitのパーソナルコンピュータ(PC 9801 E/NEC)と6組のDCサーボユニットとから構成されている。システムソフトウェアはFORTRAN-77及びマクロアセンブラを用いて記述されている。

2.3 測定手順

5面測定モードでは、各測定参照面の位置、測定点数及び測定範囲等が会話形式で指定される。この作業の後、測定のための機械の動作プログラムは自動生成される。

測定は距離測定センサまたは加工物の連続した掃引動作によって実行される(測定点において一時停止はしない)。なお、一つの測定点に許される掃引移動量(レーザビームスポット移動量)は0.5 mm以内に限定している。この量はレーザビームのスポット径の約半分であり、測定分解能にもほぼ一致している。

3. 非接触距離センサ

大型鋳鍛造品の形状測定においては、以下の理由で非接触型距離センサを開発しなければならない。すな

Fig. 2 Principle of 5-directional measuring

Fig. 3 Structure of 5-directional measuring machine (a) and structure of attitude control unit (b)

Fig. 4 Principle of non-contact measuring device

わち接触型プローブを用いた市販の装置では、

- (1) 測定掃引速度が小さいので、広範囲かつ大規模な測定を妥当な時間内に遂行できない。
- (2) 大型鋳鍛造品の凹凸形状および表面粗さは接触型プローブの使用範囲の限界を越えている。

提案されている測定システムのための距離測定センサに要求される仕様は次の通りである。

測定範囲（測定距離 L の最大値）：約 1000 mm

測定分解能：1 mm 以下

測定誤差： $\pm(2.5 + 0.0025L)$ mm 以下

最大表面傾斜角： $\pm 75^\circ$

測定頻度（測定速度）：65 times/s 以上*

3.1 測定原理

提案する非接触距離センサは図4(a)に示すように天体望遠鏡型の光学システム³⁾に基づいている。

レンズ L_1 の前焦点 F_{11} から測定対象物表面上のレーザビームスポットまでの距離およびレンズ L_2 の

後焦点 F_{22} からスポット実像までの距離を各々 Z_1 および Z_2 とする。また、レンズ L_1 および L_2 の焦点距離は各々 f_1 および f_2 とする。

Newton の方程式によれば、レンズ L_1 と L_2 の間の距離を $f_1 + f_2$ に設定した場合 Z_1 と Z_2 の間に次のような線形関係がある。すなわち、

$$Z_1 = -(f_1/f_2)^2 Z_2 \quad (1)$$

Z_1 と Z_2 の間に成り立つ線形関係は、この測定法のキャリブレーションを容易にしている。式(1)によって距離 Z_1 を知るためには、距離 Z_2 が検出されねばならない。この目的のために図4(b)に示すように、レーザビーム軸を光学系の軸に合致するように設定すると共に、CCD (charge coupled device) の画素配列軸もまたこれに合致するように水平に置いて Z_2 を検出するという独自の設計⁴⁾を提案した。

3.2 非接触距離センサの設計

図5に設計された光学系の構成、選定されたレンズおよび CCD の仕様を示す。測定対象表面を鋳肌または鍛造表面として、設計された光学系の条件において、CCD の光量感度を満たすのに 2 mW 程度のレーザビーム出力があれば良いことがあらかじめ解析的に見積られた。

この測定系の特徴である光軸上に水平設置された CCD によって Z_2 を測定するという方法の妥当性を確認するために、オプティカルベンチ上で予備試験を行った。その結果 Z_1 と CCD 出力の最大値を与える画素番地 P_x との間に極めて良い線形関係があることが確認された。

この測定装置は次のような特徴を持っている。すなわち、(1) 広い測定範囲：1397 mm、(2) 高い測定速度：355 times/s、(3) 十分な分解能：0.521 mm/

* 1 点の測定に許されるスポット移動量を 0.5 mm と定めているので、測定掃引速度 2 m/min にて 1 点 1 測定となる。

No.1 Lens : Tamron model O63 SP 350 mm F5.6 82 mm ϕ
 H1 : L1=554.27 mm H2 : L2=213.34 mm
 focal length : $f=350.21$ mm

No.2 Lens : Cannon model FD 50 mm F1.2 52 mm ϕ
 H1 : L1=46.9 mm H2 : L2=38.3 mm
 focal length : $f=49.983$ mm

CCD : Toshiba TCD-103C
 2592 pixel (11x11 micron meter)
 sensitive 0.8V/lx.s
 Max. exposure 1.25 lx.s

Resolution : 0.539 mm Magnification : $Z1=(-49.09)Z2$
 Measuring Range : 1397 mm

Fig. 5 Optical configuration of non-contact measuring device and specifications of the main components

Fig. 6 Over-view of non-contact measuring device

pixel, (4) 線形更正特性, (5) 表面傾斜および粗さに関して本質的に非感応, (6) 投受光系間における極めて小さい遮蔽効果, (7) 室内照明下で使用可能, (8) 構造が単純で小型, である. なお, 測定精度に関しては後述する.

図6及び図7は非接触距離測定センサ(距離検出装置)の構成と概観を示す.

CCDの出力はピークディテクタによって処理される. ピークディテクタは最高強度の光の照射を受けたCCD画素の番地番号Px(この番号は直接距離 Z_1 に対応する)を実時間出力するものであり, ビームスポットが測定点に達したときパソコン(PC 9801 E/NEC)の要求に応じて, 直ちに同機に送られ記憶される. 例えば, 測定中の許容スポット移動量を0.5 mm(又は1 mm)と定めた場合, 測定装置の測定掃引速度が2.16 m/minのとき, 測定速度(あるいは測

Fig. 7 Non-contact measuring device fixed on an optical bench

定頻度)が355 times/sであることは, 1測定点に対して5つ(又は10)の距離測定値を獲得できることを示している. 必要なら, それらの平均値を得ることも出来る.

4. 測定装置の静止試験

物体の形状測定においては, このような距離測定が対象表面の傾斜, あるいはスポット径に比較して十分小さな不規則性や粗さによって影響を受けない, すなわち非感応であるということが非常に重要である.

種々の表面試料(鑄造, 鍛造, およびガス切断表面)が試験された. これらの種々の試料に対する Z_2 vs. Z_1 特性にはほとんど試料による違いが生じなかった⁵⁾. 一方, 表面傾斜(ヨウ角およびピッチ角について, 各々 $0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ$)に対する非感応性は $Z_1=600$ mmよりも近い測定範囲に関しては $\pm 75^\circ$ まで十分良好である⁴⁾. しかしそれより遠い側ではCCD上のスポット像の光強度が落ち込んでくるため表面傾斜に対する非感応性は損なわれる.

4.1 測定装置の安定性

装置が機械に取り付けられた場合, 装置は振り回しや振動を受けることになるので, これらに対して十分な耐性がなければならない. 取付状態での試験を繰り返し, 出来るだけ頑丈になるように改良された. 軽い耐衝撃試験, 振り回し試験, 温度試験, 温風試験等が行われた. CCD位置調節機構が固定されアクリルボンドで固められてからは装置の安定性はかなり改善され, 機上での使用に耐えるようになった.

4.2 測定精度

図8は, $Z_1=0.0$ mmに置かれたビームに直交する静止表面(#600 エミリーペーパー)に対して得られた約1.4 sの間の連続500測定値のヒストグラム(区間

Fig. 8 500 measurement histogram (a) and CCD output (b) for distance $Z_1=0.0$ mm

幅：1画素）の一例を示す。また同図(b)は同条件において、メモリスコープによって得られたCCD出力のローパスフィルタ（16 kHz cutoff）前後の状態を示す。

同様のヒストグラムは図9(a)の Z_2 vs. Z_1 特性直線の対応する点のそばに示されている。同図におけるヒストグラムの横軸スケール（10 pixel/div）は Z_2 軸のその4倍に拡大されている。直線に沿った点はヒストグラムの最大頻度区分（モード区分）のピクセル番地番号にプロットしてある。

図9(b)に、ヒストグラムの存在位置の直線からの偏差 E （ $0.521 \cdot Px$ mm）によって変換）を Z_1 スケールに対して、ヒストグラムの全区間に対応する長さのIマークを用いて示している。明らかに、これらはある曲線に沿って散在している。曲線に沿う成分については再現性があるので、系統誤差であると考えられる。この誤差は、レンズの配置、CCDの姿勢や位置をより正確に位置決めすることにより、小さく出来る。

$Z_1=-250$ mm から 600 mm までの測定領域において、Iマークが散在する幅は、設定された精度仕様すなわち同図の破線の二直線、 $\pm(2.5+0.0025L)$ の幅の中にほぼ納まることが確認できた。

5. 機上試験

装置を測定機械の姿勢制御ユニット（図3(b)参照）の先端に取り付

Fig. 9 Relationship between Z_1 and Z_2 with histograms (a) and deviation of histogram location from the line (b)

けた後、装置のレーザービーム軸（光軸）は機械系座標軸に正確に位置決めされ、そして機械系座標軸 X 、 Y 、 Z および A 、 B 、 C の原点はある定められた手順に従って決定された（続報にて詳述する）。

測定対象物は適当に、むしろ大雑把に位置決めしてテーブルに固定され、その後、5面測定の測定範囲を定めるための二、三のパラメータ、測定ピッチ、測定面の順序、および機械座標系に対するセンサ参照点の初期位置等は会話形式で入力される。ここで念のため

Fig. 10 Results of cylinder test

Fig. 11 Results of T-typed valve

に、あらかじめプログラムされている経路に従って、測定物表面の同一点に対する数個の距離測定を実行し、更正直線の勾配を提示させて装置の動作を確かめることが出来る。

5.1 円筒試験

センサの機械軸系に対する取付状態の正確さをみるために、灰色つや消し塗装した直径 $\phi 165$ mm の塩化ビニル円筒を採用して測定を行った。この塗装は光の正反射が極端に優勢となるような光沢平滑表面の場合に施すと有効である。

図 10 は掃引速度 2.16 m/min, 1 点に対して 5 測値平均によって得られた円筒の輪郭 (円筒軸方向に 3 行の測定からなる 5×5 mm ピッチのメッシュを同方向、すなわち Z 軸方向からみた図である) を示す。同図において (a) は +X, -X から、(b) は +Y, -Y からの合成であり、また、(c) はそれらすべての単純な重ね合わせによる合成である。(c) において、一点を除いた全点は $165 \pm \phi 3$ mm の同心円によってできる帯領域の中に入っている。なおこの誤差は、用いた測定距離 (およそ $L=300$ mm) に対するセンサの予想誤差の程度である。

このこととこれらの図の各方向からの測定において互いにずれや斜め向きが見られないことは、前述のビームおよび機械軸系のアライメントが十分であったことを示す。

5.2 T バルブ

次に T バルブといわれる $300 \times 200 \times 100$ mm の大きさの鍛造品が試験された。この場合も、前述の円筒と同様の表面処理を施してある。

図 11 (a) は +Y, -Y からの測定の合成であり、(b) は +X, -X からの測定に (a) の -Y を加えた合成である。(c) は、単独に示されていないが +Z からのものを加えて、計 5 面からの測定の合成である。

6. 結 論

大型鋳鍛造品自動ケ引きシステムのために、非接触距離センサを用いた三次元形状測定システムを開発して、以下の結論を得た。

- (1) 素材の全体形状測定方式として、非接触距離センサを用いた 5 面測定法を提案した。
- (2) 測定対象物表面上の光スポットの実像位置検出法として、センサの光軸上に CCD を水平設置する独自の検出方式を立案し、高いサンプリングレートの距離直接測定を可能にした。
- (3) 開発された距離測定センサは測定対象物表面の傾斜および表面粗さに関して本質的に非感応であり、物体形状測定に適することを確かめた。
- (4) 距離測定センサの精度に関しては、測定距離 L (mm) に対して誤差 $\pm (2.0 + 0.0025L)$ 以下を実現できることを確認した。

距離測定センサの開発にあたり、北海道大学・三好隆志助教授の助言を受けた。また、センサ製作にあたり (株) 工学社エンジニアリングの協力を得たことを感謝いたします。なお、本研究は精密工学会の昭和 59 年度産学協同研究テーマとして研究費の補助を受けたものであり、ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Lange: A Flexible Manufacturing System for Production of Stepped Shafts by Numerically Controlled Radial Forging and Turning, Proc. Int. Conf. Computer-Aided Production, (1985) 5.
- 2) T. Kishinami et al.: Development of Interactive Mold Cavity CAD/CAM System, Ann. CIRP, 32, 1, (1983) 5.
- 3) 三好隆志, 金子一郎, 齊藤勝政, 中村智彦: 光触針形状測定センサの特性, 昭和 60 年度北海道支部学術講演会講演論文集 (1985) 207.
- 4) 横内弘宇, 菊地千之, 大形鋳鍛造部品自動ケ引きシステム開発委員会: 三次元座標測定のための非接触距離センサ, 昭和 61 年度北海道支部学術講演会講演論文集 (1986) 106.
- 5) 精密工学会産学協同研究「大型中鍛造品自動削引きシステム開発研究報告書」, 昭和 62 年 3 月.