論説

Paper

三次元面取り制御装置の開発

布施直紀^{*1}, 中村 薫^{*2}, 小島 勉^{*2}, 遠藤敏夫^{*3}

Development of 3-Dimensional Edge Cutting Control System for Billets

Naoki Fuse, Kaoru Nakamura, Tsutomu Kojima, and Toshio Endo

Synopsis

When cutting up billets with hot saw, it is unavoidable for cut chips to develop into burr around billets edge. It is often that billets are cut slantwise with saw distorted owing to the increase in cutting resistance with operation. It has been therefore tried to cut edge 2-dimensionally for burr free. This method, however, has such problems as partially removed burr.

The authors have been successful in developing a 3-dimensinal control system for cutting the edge of not only round but also rectangular billet faces even with slantwise faces and no limit in shape of billets. The system has features that the equipment measures the gradient of billet faces and cross section profile and these data are used to extract the edge coordinate of billets face having no burr.

An optical 3-D shape measuring system is used to measure the gradient and also optical range finder to measure the profile. The optical measuring system has good feature to measure billet shape with little influence by the condition of billet surface.

As a result of the off-line test in which edge of round and rectangular billet faces were cut, the system has shown good effects as follows:

- (1) The rate of not removed burr is 0%.
- (2) It attains, with probability of more than 90%, that scatter of cut edge width is within 1mm.

1. 緒 言

鋼材を熱間ソーで切断する場合、『ブレードの厚み×切断面積』に相当する量の切削屑が発生する。切削屑の一部は切断面外周に付着し、冷間状態では大きなバリとなり検査工程の各装置や客先の加工機に多大な損傷を与える可能性がある。さらに、安全面でも問題があるため、バリ除去と端面コーナ面取りを目的とした二次元切削面取りが施されている。

一方、熱間ソーによる鋼材切断時にソーブレードが受ける切断抵抗は切断面の断面積増加さらには切断実績本数の増加に伴ない大きくなるため、切断中のソーブレードが歪み、必然的に斜め切断が発生する。

二次元切削面取り方式では、端面が斜め切断状態の鋼材

を面取りした場合、部分的に面取りが行われず偏面取りが生ずる、面取り量が非常に大きくなる部分が生じ過負荷となって切削機構部に損傷を与える可能性がある、などの問題があった。

そこで、筆者らは従来の二次元面取りを三次元に展開させた新しい発想の面取り装置を開発し、前述の問題を解決した。新たに開発した面取り装置は、鋼材の端面形状を光学式センサで三次元的に非接触計測し、その計測データから切削カッタホイールが面取り時に描くべき軌跡の座標を演算し、演算された座標を NC (Numerical Controller) を介してマシニングセンターに送ることにより三次元面取り制御を実現している。

光学式形状計測を用いた装置の開発においては、被測定対象面の光沢状態、あるいは、背景光などによる測定精度

2000 年 6 月 4 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.), * 2 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.), * 3 大同工業大学 工学部, 工博 (Dr., Eng., Daido Institute of Technology)

の劣化が常に問題となる。本装置においてはこれらの影響を受けにくい測定方式を採用している点に特徴があり、その結果として高精度のバリ除去と面取りを可能にしている。

以下では、研究開発のポイントである端面形状測定と面取り切削軌跡に重点をおいて述べる。本研究開発においては、切削関連装置は汎用の設備を導入しており、切削に関してとくに新しい技術を提案するものではない。よって、紙面の都合上、切削に関する項目に関しては割愛する。

2. 面取り制御の原理

本装置が対象とする鋼材の端面中央部は、平坦であることを前提としている。このような前提が妥当であることは、開発前の予備調査において確認している。

Fig. 1 は、装置の原理を例示する概念図である。図に示すように、本装置は、被処理鋼材の断面プロファイルと端面の傾斜を測定し、測定結果をもとにバリがないものとした端面を仮想的に求め、この仮想端面の縁を面取り切削軌跡とする方式を採用している。

Fig. 1. Process for measuring billet face.

以下、この節では『鋼材端面の形状測定』、『面取り切削軌跡の算出』について述べる。

2.1 鋼材端面の形状測定

2.1.1 鋼材端面の平面方程式算出

熱間ソーにて鋼材を切断したときの端面は切断痕が残るが、基本的には平面状態である。そこで、本装置では三次元形状計測器により鋼材端面の三次元形状を測定し、その端面がなす平面方程式を算出する。このとき、あらかじめ基準原点および基準平面を設定しておき、この基準平面を測定系における $z=0$ の $x-y$ 平面とする。なお、 z は鋼材軸方向である。

鋼材端面の三次元形状データは (x, y, z) の三次元座標で表され、61440 ポイント (256 × 240 画素) が測定される。鋼材のサイズに応じて設定した座標範囲より n 個の座標

データを抽出し、最小二乗法にて下記の演算式から係数 a, b, c を求め、鋼材端面のなす平面方程式を算出する。算出に用いるデータの抽出領域としては、面積割合で端面全体の 50% の領域を端面中央部に設定することにより、バリを含まず、切断痕の影響を排除した平面方程式の算出を可能にした。

算出すべき平面方程式は、測定系の基準原点、基準平面に対して

$$z = f(x, y) = ax + by + c \quad (1)$$

として表すことができる。

抽出した n 個の座標値 (x_n, y_n, z_n) と (1) 式より求められる $f(x_n, y_n)$ の差の二乗和を S とすると

$$S = \sum_{k=1}^n \{z_k - f(x_k, y_k)\}^2 \quad (2)$$

S の値を最小にする a, b, c は、(2) 式の a, b, c で偏微分した結果を 0 とおくことにより求められ、結果を付録 1 に示す。

丸鋼材は客先の用途によっては、曲り矯正が施されている。大型の鋼材はプレスにて、小型のものは切断後に 2 ロール矯正機にて曲りが矯正されている。2 ロール矯正機にて矯正された鋼材の端面状態は Fig. 2 のように“おわん型 (カップ型)”になるが、底面部は比較的広い範囲で平面が得られるため、高精度の平面方程式の算出が可能である。ここでは、演算処理速度の制約から鋼材端面を平面として取り扱っているが、将来的には更なる演算処理速度の向上が期待できるので、カップ状端面を有する鋼材に対しては端面を平面ではなく曲面とみなすことにより一層の面取り精度向上が可能である。

Fig. 2. End face after 2 roll strainer process.

2.1.2 鋼材の外形プロファイル測定

本装置では処理鋼材を 1 本ごとに、外形プロファイルを測定することにより、圧延公差などの寸法公差の影響を受けない高精度な面取りを実現している点に特徴がある。

Fig. 3 は、外形プロファイル測定概念を示すものである。図に示すように、固定された鋼材に対して二次元レーザ距離計を 1 回転させることにより外形プロファイルを得

ている。このときの座標系は三次元形状計測で設定した系を用いる。レーザ距離計は 12rpm で回転し、Fig.1 のように端面外周部のバリを含んで計測しないように端面から長手方向に 50mm 離れた部位の外形プロファイルを測定している。鋼材外形プロファイルのデータは (x, y) の二次元座標で表され、1200 ポイント (0.3° ピッチ) を測定する。外形プロファイル座標 (x, y) は鋼材表面に対してレーザ光が垂直に入射された場合 (3) 式にて算出される。

$$\begin{aligned} x &= (R-d)\cos\theta \\ y &= (R-d)\sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 R は二次元レーザ距離計の回転半径、 d はレーザ距離計から鋼材までの距離、 θ はレーザ距離計の回転角度である。

Fig. 3. Measurement principle for profile.

2.2 面取り切削軌跡の算出

前項にて、鋼材端面のなす平面方程式： $z = ax+by+c$ および、鋼材の外形プロファイル座標 (x, y) を求めた。切削カッタホイールが面取り時に描く軌跡(面取り切削軌跡)は、バリの無い実体的な鋼材の端面輪郭座標であり Fig.4 に示すように、平面方程式に外形プロファイル座標を代入することにより求めることができる。Fig.5 にバリの付着した鋼材端面からバリの無い実体的な鋼材の端面形状を抽出した処理結果を示す。

3. 採用した光学測定器

3.1 イメージエンコーダ方式三次元形状測定器^{1),2),3)}

従来、光学式三次元形状測定には、光切断法、モアレ法などが用いられてきた⁴⁾。光切断法では比較的高精度の測

定が可能で、また、信頼性も高く、工場のインライン測定にも用いられている。しかし、スリット光画像からスリット光を抽出するプロセスが必要なため被測定対象面の状態、背景光などスリット光のコントラストを乱す外乱要因に対して影響を受けやすいという欠点がある。また、スリット光に対して平行に近い面ではスリット光の幅が広がることによって測定精度が低下する問題もある。

Fig. 4. Calculation process for cutting locus.

Fig. 5. Image after calculation.

これに対して、本装置で使用した三次元測定装置は光切断法と空間コード化法の両方の利点を併せ持った方式(イメージエンコーダ方式)を採用している。空間コード化法とは被測定対象面の各点を光源から照射される光の投光角度でコード化することによって形状を測定する方式である。この方式では被測定対象面の傾きによる影響を受けず、さらに被測定対象面の、すべての点の形状を密に求め得る特徴を有している。イメージエンコーダ方式三次元形状測定の原理については付録2を参照されたい。

本測定器は、このほかに次のような特徴も備えており、鋼材の端面形状測定に適していると言える。

二方向スリット光走査により死角を除去

鋼材端面周囲に比較的大きなバリが存在する場合、一方からのスリット光照射ではバリがスリット光をさえ

ぎって端面に照射されない死角部が発生する。鋼材を挟んで二方向からスリット光を照射することにより死角部の除去が可能である。

測定環境や被測定対象面の影響を受けにくい

イメージエンコーダ方式により、最大輝度画像(スリット光反射輝度+背景光反射輝度)から最小輝度画像(背景光反射輝度)を差し引いた画像が生成できるため、鋼材の表面状態、背景光などの影響を受けにくい。

三次元形状測定器の構成を Fig.6 に、仕様を Table 1 に示す。

Fig. 6. Construction of 3-D shape measuring system.

Table 1. Specification for 3-D shape measuring system.

Item	Specification
Field of vision (mm)	300 × 280
Working range (mm)	200
Resolution (mm)	0.5
Repeatability (mm)	X,Y axis : 0.93 Z axis : 0.015
Measurement time (sec)	4 (per 1 scan)
Source of laser light	• Semiconductor laser • Output power:5(mw) • Wave length:670(nm)

3.2 ホログラフィ式レーザ距離計⁵⁾

光学式レーザ距離計や変位計ではセンシング素子として PSD (Position Sensitive Device), CCD (Charge Coupled Device)を用いた三角測量方式を利用したものが一般的である。しかし、光沢を有する被測定対象面の測定では正反射光の影響により、大きな誤差が生ずる場合がある。たとえば、前記のような三角測量方式距離計では、受光素子に入射される反射レーザスポット径および強度によって測定精度が大きく影響される。したがって光沢面と非光沢面が混在する鋼材表面の測定には注意が必要であった。

一方、ホログラフィ技術を利用したレーザ距離計も上記と同様、正反射の問題を有するが、ここで採用したホログラフィ式レーザ距離計は、以下のような特徴を有するため正反射光の影響を排除することが可能である。

干渉縞を利用した測定方式

距離情報として反射光自身の干渉による干渉縞を利用していることから、反射光のスポット径および強度による測定精度への影響が少ない。

広範囲なレーザ照射許容角度

上記と合わせ、照射/反射レーザ光が同軸であることから、レーザ照射許容角度が 5 ~ 90°と広範囲である。

正反射光の排除

被測定対象面に対し適度に傾斜させて照射した時、拡散光のみを受光することができ、正反射光の影響を排除できる。

測定原理(付録3を参照)から、正反射光の影響を低減するには鋼材から屈折率異方性結晶に入射される反射光の入射角度が結晶の z 軸(光軸)と一致しないように光学系を設置することにより実現可能であると考えらる。そこで、Fig.7 のように、被測定鋼材表面に対してレーザ距離計の光学系ユニットを だけ傾斜させ測定精度を検証した。傾斜角と測定精度の対応を Table 2 に示す。Table 2 より光沢を有する被測定対象面に対して光学系を傾斜させることにより測定精度の向上が可能であることが確認できる。

Fig. 7. Profile measuring with gradient.

Table 2. Comparison depending on the gradient.

Test piece billet : 100mm , glare-surface				
Item	Accuracy of measurement			
Gradient: (deg)	0	5	10	15
Average (mm)	5.72	4.77	0.50	0.46
Peak level (p-p mm)	14.24	13.63	1.12	0.47

Fig.8 にホログラフィ式レーザ距離計の構成を、Table 3 に仕様を示す。

4. 装置構成

4.1 面取り装置

一般的な面取り方式としては Table 4 に示すようなものが挙げられる。本装置では以下に示す理由から三軸 NC 切

Table 4. General method for removing burr.

Burr removing Method	NC Grinding	NC Cutting	Lathe turning	Brushing
Shape of billets	Unfixed	Unfixed	Round	Round
Surface finish	Rough	Smooth	Smooth	Smooth
Demerit	• Impossible to remove large burr • Grindstones are worn out faster		Impossible to cut rectangular billets	Impossible to remove large burr

Fig. 8. Construction of holographic range finder.

Table 3. Specification of holographic range finder.

Item	Specification
Resolution (μ m)	15
Precision (μ m)	50
Measurement area (mm)	180
Measurement distance (mm)	280
Measurement angle (degree)	$\pm$ 85
Laser Spot diameter (μ m)	200 $\times$ 400

削方式を採用した .

- 良好な面取り仕上げ面を得ることが可能
- 重切削が可能
- 多軸制御が可能
- 位置決め精度が高く , 再現性が良好
- 上位プロコンおよびコントローラとのネットワーク構築が可能

4 . 2 全体装置

前節で述べた原理に基づいて試作した装置の構成と仕様を Fig.9 と Table 5 に , 外観を Fig.10, 11 に示す . Fig.9 に示すように , 測定系と切削系の座標軸を同じにするためベースプレートを共通化した .

Fig. 9. Construction of 3-D edge cutting control system.

Table 5. Specification of 3-D edge cutting control system.

Item	Specification
Shape	Round / Rectangular / Unfixed
Billet Size (mm)	Round:70 ~ 300 Rectangular:70 ~ 270
Length (m)	6 ~ 12
Weight (ton)	0.5 ~ 2
Accuracy of cutting width (mm)	2 ± 1 (Target value)

5 . 面取り実験結果

5 . 1 面取り精度

開発した装置にて鋼材を面取り切削した後の写真を Fig.12 に示す . オフラインテスト評価では , 面取り後のバリ取り残し有無の実体検査 , 面取り精度の検証として , 面取り後の最大面取り幅と最小面取り幅との差を算出し , Fig.13 のような度数分布表を作成した . 各々の結果の要点は以下のとおりである .

- (1) バリ取り残しは 0% であった .
- (2) 面取り代のバラツキ $\pm$ 1mm 以内を 90% 以上達成できることを確認した .

5 . 2 考 察

目標面取り仕様を満足しなかったものについて , 以下に推定原因を示す .

Fig. 10. Appearance of prototype system.

Fig. 11. Cutter wheel and 3-D measuring system.

Fig. 12. An example after edge cutting.

Fig. 13. Distribution of the difference between [Max.] and [Min.].

これまで述べたように、開発した面取り制御装置は鋼材

端面の三次元形状を測定し、そのデータにもとづいて面取り切削軌跡を算出している。光学測定器の絶対精度はあらかじめ高精度に加工したテストピースを測定することによりカタログ値を満足していることを確認している。したがって、下記に示す原因により端面のなす平面方程式の算出精度が劣化し、最終的な面取り切削精度に大きく影響を与えていると考えられる。

- (1) 端面上の切削痕が著しく不均一
- (2) 切断時のソーブレードの歪みにより、切断面の平坦性が著しく低下
- (3) 2ロール矯正による丸棒鋼材端面の曲面化が顕著

6. 結 言

丸・角鋼材端面が斜め切断状態においても完全なバリ除去と均一な面取りが可能な三次元面取り制御装置を開発した。

開発した装置による工程材の面取り実験では、面取り代のバラツキが±1mm以内であることを確認した。

実験結果から、ここで開発した装置の実用性は十分に評価できるものであり、省人化のみならず、品質向上、安全性向上においても大きく貢献できると考える。

また、三次元形状測定は更なる処理速度向上により鋼材の端部・端面外観検査手段など他方面の分野にわたり応用可能と考える。

最後に、本開発において多大な御協力をいただいた大同特殊鋼(株)技術開発研究所および知多工場の関係諸氏、ならびに光学式測定器について技術的な面で御協力を頂いた、(株)浜野エンジニアリング殿、(株)オフィールジャパン殿に謝意を表します。

付録1 連立偏微分方程式の解

2項(2)式を最小にする a, b, c は(4)式の連立偏微分方程式を解くことにより求めることができ、結果を(5)式に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{S_z' \cdot S_{22} - S_z'' \cdot S_{12}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}} \\ b &= \frac{S_z'' \cdot S_{11} - S_z' \cdot S_{21}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$c = \bar{z} - a\bar{x} - b\bar{y}$$

ここで, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ は各々抽出した座標データ x, y, z の平均であり, $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ は

$$S_{11} = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2$$

$$S_{12} = S_{21} = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})$$

$$S_{22} = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2$$

$$S_{z'} = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(z_k - \bar{z})$$

$$S_{z''} = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})(z_k - \bar{z})$$

である⁶⁾。

付録2 イメージエンコーダ方式三次元形状測定器の測定原理^{2), 3)}

スリット光を被測定対象面に回転走査させながら照射し, 被測定対象物の直上から CCD カメラにて撮像する。イメージエンコーダにより被測定対象面上の各点をスリット光が通過した瞬間(その点が最も明るくなった瞬間)の投光角度 (x, y) により表される投光角度化画像 $Im(\theta)$ が生成され, 形状演算は (x, y) に基づいて行う。

ここでイメージエンコーダとは, CCD カメラより入力されるスリット光画像に対して各画素ごとに輝度のピークホールド処理をリアルタイムで行い, 各画素の一定時間内の最大輝度から構成される最大輝度画像を合成し, 同時に各画素が最大輝度を取ったタイミングでスリット光の投光角度信号をその画像に対応する値としてコード化し, 投光角度コード化画像を生成する装置である。投光角度コード化画像の各画素の値は, 被測定対象面の各点のスリット光走査回転軸に対する仰角に対応しており, CCD カメラのパースペクティブ効果 (perspective effect; 遠近効果) を無視すると, Fig.14 において被測定対象物の高さ形状は (6) 式のように求めることができる。

$$f(x, y) = z_0 - (x_0 - x) \tan \theta(x, y) \quad (6)$$

ここで, x_0 はスリット光走査回転軸の x 座標である。

CCD カメラは無限長の距離では測定対象を計測できないためパースペクティブ効果を生じ, カメラ近傍では実寸法より大きく, 遠方では実寸法より小さく測定される。そ

こで Fig.15 より, パースペクティブ効果補正を行った真の形状座標 (x_t, y_t, z_t) は (7), (8), (9) 式にて求めることができる。

Fig. 14. Measurement principle of 3-D shape measuring system.

Fig. 15. Rectification for perspective effect.

$$z_t(x, y) = \frac{z_0 - (x_0 - x) \tan \theta(x, y)}{1 + \frac{x}{a} \tan \theta(x, y)} \quad (7)$$

$$x_t = \left\{ 1 - \frac{z_t(x, y)}{a} \right\} x \quad (8)$$

$$y_t = \left\{ 1 - \frac{z_t(x, y)}{a} \right\} y \quad (9)$$

ただし, a は基準面とカメラ間の距離である。

付録3 ホログラフィ式レーザ距離計の測定原理

一般的にホログラフィ技術では光の干渉を利用している⁷⁾。本計測器に採用しているホログラフィ技術は自己干渉方式⁸⁾と呼ばれ, 光の干渉縞が生成されるまでのプロセスが簡素なため, 光学系ユニットは小型, かつ高信頼性を有する。

Fig.16 に示すように, 半導体レーザより照射された光は被測定対象面の鋼材表面で拡散光として反射され, 偏光子により互いに直交する2つの偏光に分けられる。その偏光が屈折率異方性結晶に入射されると, 入射角度の程度に応

じて二つの偏光に位相差が生じる。位相差が生じた二つの偏光は再び検光子により位相差を維持したまま合成されるため干渉縞が生ずる。この干渉縞を高解像度のラインセンサ (CCD) で受光し干渉縞の数と縞の間隔により鋼材までの距離を算出できる。演算処理においては高速 DSP (Digital Signal Processor) を使用し、測定速度 700 ポイント / sec を実現している⁵⁾。

Fig. 16. Inner view of holographic range finder.

ここで、屈折率異方性結晶 (optical anisotropy crystal) とは x, y, z 各軸方向の屈折率が $n_x = n_y = n_z$ であるという光学的性質を有している結晶であり、これを光学結晶中での現象を扱う上で一般的である屈折率楕円体⁹⁾に基づいて考える。ここで、 $n_x = n_y = n_0, n_z = n_e$ ($n_0 > n_e$) とすると、Fig.17 において、鋼材からの反射光が結晶軸に入射される方向を S とした場合、分けられた二つの偏光方向は各々、 x 軸方向、 $y-z$ 平面内にて y 軸より ϕ だけ傾いた d の方向である。これら二つの偏光に対する屈折率をそれぞれ $n_x (= n_0), n(\phi)$ とすると、

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} n^2(\phi) &= y^2 + z^2 \\ z &= n(\phi) \sin \phi \end{aligned} \quad (11)$$

であることから、

$$n(\phi) = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \phi + n_0^2 \sin^2 \phi}} \quad (12)$$

(ϕ : 屈折率異方性結晶へのレーザ光の入射角度) が導出される⁹⁾。

(12) 式より、 ϕ が 0° から 90° まで変化すると、 $n(\phi)$ は n_0 から n_e までの値をとることがわかる。したがって、

(1) $\phi = 0$ 、すなわち鋼材からの反射光が正反射光であるとき、 $n(\phi) = n_x = n_0$ となり屈折率異方性結晶内における二つの偏光は位相差を生じないため距離を測定することができない。

Fig. 17. Index ellipsoid.

(2) $\phi = 0$ 、すなわち鋼材からの反射光が拡散光であるとき、 $n(\phi) = n_x$ となり屈折率異方性結晶内における二つの偏光に位相差が生じ、距離を測定することが可能である。

(文 献)

- 1) 横浜野エンジニアリング: VOXELAN シリーズカタログ (1999)
- 2) 浜野治海: 自動化技術, 29 (1997), 57
- 3) 上杉満昭: 電気学会 産業計測制御研究会資料, C-90-34
- 4) 吉澤 徹: 光三次元計測 (1993), 38 [新技術コミュニケーションズ]
- 5) 株式会社フィールドジャパン: CONOPROBE カタログ (1999)
- 6) 小林道正ら: Mathematica による多変量解析 (1996), 18, [現代数学社]
- 7) 辻内順平: ホログラフィ (1997), [裳華房]
- 8) Y. Malet ら: Conoscopic Holography Application, (1997), [Optical Metrology Ltd.]
- 9) 西原浩ら: 光集積回路 (1985), 105 [オーム社]