自動クレーン用鉄鋼コイル位置認識装置の開発*

西部 邦彦^{*1}, 橋本 修^{*2}
山本 治正^{*2}, 藤原 直史^{*3}

Development of Automatic Coil Recognition System for Automated Crane

Kunihiko NISHIBE, Osamu HASHIMOTO,
Harumasa YAMAMOTO and Naofumi FUJIWARA

New Automatic Coil Recognition System has been developed for the purpose of full automated crane operation in the steel coil transportation fields where great demand for automation can be expected. The sensed information including the coil position and the dimensions from the Automatic Coil Recognition System are sent to the crane operating controller and these information will enable the crane to operate with full automatic mode from the transportation work of the coils on the trailer truck which has been forced to work manually. This report describes the summary of the Automatic Coil Recognition System, its algorithm and the result of performance test in accuracy.

Key Words: Recognition, Shape Measurement, Laser, Measurement and Control, Automated Crane, Steel Coil Transportation, Automation, Crane Operating Controller, Trailer Truck

1. 緒 言

産業界のあらゆる分野で活用している天井走行クレーンは、運転手不足解消、3K 職場からの作業者の解放を目指して、全自動化の方向に向かっている。すでに鉄鋼業界用、セメント原料用、ごみ処理用などの分野で全自動クレーンが開発され、稼働している。

特に大きな需要がある鉄鋼コイル(以下コイルと略記)搬送用クレーンの完全自動化を達成するには、コイル搬送時の振れ止め技術⁽¹⁾に加えて、コイル位置を非接触で自動認識する装置が必要となる。このコイル位置認識装置として、吉田ら⁽²⁾はナトリウムランプと画像処理技術を応用した装置を実用化し、星名ら⁽³⁾はレーザを縦、横にスキャンし、画像処理する方式の装置を実用化し、また軸丸ら⁽⁴⁾はハロゲンランプと画像処理技術を応用した装置を実用化している。

今回、著者らはクレーンに取付けたレーザ距離計を走査する方式の新しいコイル位置認識装置を開発した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本装置は小形で、梱包材で包んだコイルなど

にも適用できる。本装置によりトレーラにより運び込まれた複数のコイルの中心位置、大きさ、幅などを非接触で自動認識し、結果をクレーンコントローラに伝えることにより、従来は人手に頼っていたトレーラからのコイル搬入作業の自動化が可能となる。

本論文では、開発した認識装置の概要と、認識アルゴリズム、認識誤差、および認識精度試験結果に関して報告する。なお、実用化に当たってはクレーンの位置誤差が存在することを考慮し、認識装置単体における位置認識誤差は ± 20 mm 以内を目標とした。

2. 自動認識装置の概要

2.1 コイル位置認識方法 図1にコイル認識システムの一例を示す。図1において、コイルヤードに一時保管されたコイルの加工ラインへの搬入作業、同ラインからの製品コイルの一時保管用コイルヤードへの搬出作業は、それぞれのコイル位置、および保管場所の番地が既知であり、自動化は可能である。

しかしながら、トレーラにより搬入されたコイルの決められたヤードまでの搬入作業は従来人手に頼っていた。自動で搬入できない理由には以下がある。

(1) トレーラは人が運転するため、区分けされたトレーラヤード内の、決められた位置に停止する場合、

* 原稿受付 1998年2月9日。

*¹ 正員、日立機電工業(株) (☎ 661-8501 尼崎市下坂部 3-11-1)。*² 日立機電工業(株)。*³ 正員、金沢大学工学部 (☎ 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)。

Fig. 1 Automated crane system

Fig. 2 Procedure of automatic coil recognition

最大 ± 200 mm 程度の位置誤差が認められている。

(2) トレーラには一度に最大 4 個程度のコイルを積むことができるが、その積み位置は必ずしも定まっていらない。

本論文で述べるコイル位置認識装置は、このトレーラ上に搭載された複数のコイル位置、大きさなどを非接触で、かつ正確に計測することを目的としている。ただし、

- (1) コイル外形は円筒状
- (2) その中心軸方向とトレーラの長手方向が一致すること

を条件とする。図 2 にそのコイル位置認識方法を示す。クレーンのクラブに取付けたレーザ距離計を走査、すなわちクラブを横行することにより、トレーラにおける複数のコイルまでの距離分布を測定し、マイコンのメモリにストアする。その結果からコイルの中心座標、外径、幅などを計算し、クレーンコントローラに伝達する。

2・2 三角測量方式による距離分布測定 図 3 に距離分布測定原理を示す。平行ビーム状のレーザ 5 本を同時にコイルに照射すると、コイル表面またはトレーラ上面には 5 個のレーザスポットが生じる。イメー

Fig. 3 Principle of height distribution measurement

Fig. 4 Laser reflected spots on CCD image sensor

Fig. 5 Laser spots on coils and trailer

ジセンサにより必要な視野範囲に焦点を合せて観測すると、これらのスポット①～⑤は図 4 に示すように 5 本の二点鎖線上に結像する。このスポット結像位置は、反射点までの距離が近い場合は図の右方向に、遠い場合は図の左方向に結像する。このスポットが CCD イメージセンサのどの位置に結像するかを検出することにより、5 箇所の反射点までの距離を測定することができる。この方式を一般に三角測量方式と呼んでいる。

レーザ距離計は走査機構によりトレーラ長手方向に走査され、図 5 に示したようにコイルまたはトレーラまでの 5 箇所の距離分布データを毎秒 60 回サンプリング可能な仕様 (NTSC 規格のビデオ信号では垂直同期信号周波数が 60 Hz であるので、これに同期して信

Table 1 Distance resolution

L (m)	Area of Measured Distance L_m (m)	Distance Resolution (mm)
6	3 ~ 6	0.8 ~ 2.6
9	6 ~ 9	1.3 ~ 3.0
12	9 ~ 12	1.8 ~ 3.2
15	12 ~ 15	2.0 ~ 3.2

号を外部へ出力)とした。したがって、得られるデータの総数は60(サンプル/秒)×5(点)×走査時間(秒)となる。走査完了後、マイコンのメモリにストアされた距離分布データを基に認識演算を行う⁽⁶⁾ものである。

2・3 おもな構成要素 本装置のおもな構成要素には以下がある。

(1) レーザ距離計

投光器と受光器から成り、それぞれの仕様は以下となっている。

投光器

- ・光源：半導体レーザ(コリメータによりビーム状に照射)

- ・レーザ波長：786 nm(近赤外線)

- ・レーザパワー：50 mW(公称値)

(これはクラス3Bに相当し、規則では直視禁止レベル⁽⁷⁾となっている)

受光器

- ・受光素子：CCDイメージセンサ

- ・画素数：700×250画素

- ・フィルタ：バンドパス干渉フィルタ、赤外線フィルタ

寸法諸元

- ・距離計寸法、重量：1,300 W×700 D×300 H, 70 kg

- ・投光器本数： $n=5$ 本

- ・投光器間隔： $\delta x=150$ mm

- ・距離測定範囲： $L_m=3\sim 15$ m(図3参照)

n および δx の値はシミュレーションによりその最適値を求めた(詳細は付録を参照)。距離計の取付場所、すなわちトレーラとクレーン間距離 L (通常6~15 m程度)により測定すべき距離範囲 L_m の値は異なり表1となる。扱うコイル径は0.7~2.7 m位なので距離測定有効範囲は3 m位必要となる。測定距離 L_m により測定距離分解能は表1のように変化する。この分解能はイメージセンサの画素数、レーザのスポット径により決まる。

Fig. 6 Error distribution of laser-assisted range sensor

表1において最も分解能の悪い(測定距離 $L_m=12\sim 15$ m)場合における距離測定誤差の実測例を図6に示す。測定対象物、測定距離に応じて、ばらつきはあるものの、おおむね誤差は $\pm(3\sim 5)$ mm以内に入っている。

なお、レーザ距離計の取付位置はクレーンのクラブと一体化する方式(図2)が最も経済的で、メンテナンスも容易である。

(2) レーザ距離計移動装置

レーザ距離計をクレーンのクラブに取付ける場合は、クラブの横行モータが移動装置となる。

(3) エンコーダ

距離計の位置計測用に必要。

3. コイル位置認識原理

コイル位置認識原理を図7のコイル座標系を基に説明する。5本のレーザを結ぶ方向を x 軸、走査方向を y 軸、コイル高さ方向を z 軸とする。 $x-y$ 平面において、○または●印は距離分布の測定点であり、クラブの移動(走査)速度には加減速があるので、 y 方向は等間隔になるとは限らない。

3・1 認識前処理 マイクロコンピュータのメモリ内に蓄積された距離データにはコイル部分と、トレーラ部分、スキッド上などが混在している。レーザスポットがコイルの影になり、測定できない部分はメモリ内に区別してストアされる。コイル位置認識演算時にはこれらのデータすべてについて計算する必要はないため、認識前処理を行い、メモリ内のコイルが存在する番地の探索を以下の方法で行う。その後、コイルの存在する番地に対して認識計算を行う。

(1) トレーラ上面から距離計までの距離 L が既知(一定)であることを利用して、トレーラの上面を z

Fig. 7 Coordinates system

$=0$ に座標変換する(図3参照)。すなわち、

$$z = L - L_m \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L_m は距離計による各○または●印までの実測距離である。

メモリ内の距離データ z がコイル上のデータかどうかを判別するためのしきい値 α を定め、 z が

$$\alpha \leq z \dots\dots\dots (2)$$

となる場合はコイル上のデータであると判断する。最小コイル外径は700なので、 $\alpha=500$ とした。

(2) y の値ごとに、メモリ内の距離データ z を順に判別し、 x 方向5点のデータ中に式(2)となるデータが一点でも存在する行(y_s)をコイルの始端とする。

(3) 続いてメモリ内のデータを順に判別し、 x 方向5点のデータすべてが、式(2)を満足しない行(y_e)をコイルの終端とする。以上によりコイル存在部分が y_s から y_{e-1} までであることが明らかになった。

3.2 認識アルゴリズム 以下、図7により認識演算方法を説明する。

(1) コイル外径の概略値(D)の計算

$y=y_s$ におけるコイル上のデータを x 方向に検索し、 z の最大値 $z_{\max}$ を求める。同様に、すべてのコイル上データを検索し、 $z_{\max}$ を求める。最後に以上得られた $z_{\max}$ の平均値を求め、形状が既知であるスキッドの影響を次式により補正し、コイル外径の概略値(D)を求める。

$$D = z_{\max} - \delta \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 δ はスキッドによるコイルの浮上量である。図7からもわかるように、測定した $z_{\max}$ と実際の頂点とは必ずしも一致しないので、この値は概略値とな

る。

(2) コイル z 方向中心の概略値(z_o)の計算

前記で求めた外径の概略値 D とスキッドによるコイルの浮上量から次式により求める。

$$z_o = D/2 + \delta \dots\dots\dots (4)$$

ここで、外径の概略値を利用しているので、 z_o も概略値となる。

(3) コイル x 方向中心(x_o)の計算

コイル上の任意の二点を結び、その垂直二等分線と、すでに求めたコイル中心の z 座標(概略値)との交点から求める。コイルを円と仮定し、円周上の任意の2点の座標を例えば (x_1, z_1) , (x_2, z_2) とすると、

$$x_o = \frac{x_1 + x_2}{2} + \left[\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \right] \times \left[\frac{z_1 + z_2}{2} - z_o \right] \dots\dots\dots (5)$$

により求まる。コイル上には複数のデータが存在するので、上記計算はすべての組合せに対して行い、平均化する。概略値を用いて計算したので、この値は誤差を含むが、平均化すると誤差は相殺される。

(4) コイル外径(D)、 z 方向中心(z_o)の補正

x 方向の中心座標 x_o が求まると、上記で求めた D 及び z_o に対して幾何学的に補正することにより正しい値を計算する。

(5) コイル幅(W)の計算

認識前処理によって切り出した y の値 $y_s, y_{s-1}, y_e, y_{e-1}$ を用いて、次式より求めている。

$$W = (y_e + y_{e-1})/2 - (y_s + y_{s-1})/2 \dots\dots\dots (6)$$

(6) コイル y 方向中心(y_o)の計算

次式より求めている。

$$y_o = (y_{s-1} + y_s + y_{e-1} + y_e)/4 \dots\dots\dots (7)$$

3.3 認識計算誤差と対策 以上のアルゴリズムに沿って認識計算を行う場合に生じる誤差の検討、およびその対策内容に関して述べる。

(1) コイル外径(D)に関して

外径に与える主な誤差要因としては、図8のように

- (a) コイル製造時に生じるコイル端面の巻きずれ
- (b) 異物(例えば鳥、蛾など)の測定時の飛来
- (c) コイルバンドの影響

などがある。これらはいずれもノイズとして混入する。

例えば、巻きずれがあった場合、単純に式(3)により求めると、図9のように外径計算値は小さめとなる。本図において、計算結果が複数あるのは、巻き芯の径が複数種類あるためであり、巻きずれの外径に与える影響は D が大きいほど大きくなる。

しかし、ノイズが混入し、距離分布データが図10(a)のようになったとしても、一般にそのデータ数

Fig. 8 Error factors of coil recognition process

Fig. 9 Error ΔD caused by bossing of coil edge

は少ないので、(b)に示したように、 z の計算結果の頻度分布を求め、頻度の最も高いもののみを平均化処理することにより計算することとした。その結果、これらの外乱の影響を削除でき、安定したデータのみの抽出が可能となった。

その他の外径誤差要因には以下があり、それぞれの対策、検討内容を以下に示す。

(d) コイル巻き終わりの跳ね上がり(後述の図13参照)

外径とみなしても、実用的に問題なし。

(e) トレーラ、地面の上下の位置誤差(トレーラヤードの水平誤差)

クレーン据え付け後の初期調整時に定量的に把握し、 L の値を補正しておく。

(f) クレーンの走査用レールの上下の位置誤差、たわみ対策は上記(e)に同じ。

(g) レーザ距離計の距離測定誤差(図6参照)

この値はそのまま外径誤差となるが、大きくても5 mm程度であり、実用的には問題なし。

(h) 紙巻きコイル

測定結果は紙の厚みが加味されるので、それを含む外径となる。実用上は問題なし。

(2) コイル幅(W)に関して

(a) コイルの傾き

コイル幅に与える誤差として最も大きいのは図11

Fig. 10 Measured distance distribution toward z -axis and histogram Fig. 11 Observable coil width W_m when coil set inclined Fig. 12 Comparison between measured and estimated error ΔW

に示したようにコイルの y 方向の傾き θ の影響がある。コイル幅の誤差 ΔW の最大値は次式となる。

$$\Delta W = W_m - W \\ = W(1/\cos \theta - 1) + 4\delta x \tan \theta \quad \cdots \cdots (8)$$

この結果を実測値と比較して図示すると、図12となり、実測値と計算値はほぼ一致する。 θ が大きくなるに従い、 ΔW は大きくなる。

実コイルヤードにおいて、7 mのトレーラの位置ずれを測定したところ、最大でも ± 100 mm以下で、トレーラの傾きはたかだか約 $\pm 0.82^\circ$ であり、実質は問題にならない。

Fig. 13 Coil center recognition error Δx

その他の誤差要因には以下があり、それぞれの対策、検討結果を以下に示す。

(b) 異物(例えば、鳥、蛾など)の混入

混入場所がコイル端面でない場合は除去できるが、コイル端面に混入した場合は、除去不可である。ただし、この場合はコイル幅が広めに計算されるが、コイルは両側からつかんでハンドリングするため安全側となる。

(3) コイル z 方向中心 (z_0) に関して

コイル外径時の誤差と全く同様なので割愛する。

(4) コイル x 方向中心 (x_0) に関して

(a) コイル巻き終わりの跳ね上がりの影響

この誤差を防止するには、巻き終わりを下にしてトレーに積み込むようにする必要がある。例えば、図13のような跳ね上がりがあった場合、跳ね上がり量を h とすると、誤差は次式となる。

$$|\Delta x| \approx h/2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

実測すると、 h は 20 mm 程度以下であり、実用上は問題にならない。

(b) 距離計の距離測定誤差

例えば、図14において、隣のレーザ光の距離測定誤差が Δz あったとすると、 x_0 の計算時に Δx の計算誤差が生じる。計算例を図15に示す。このように Δx はコイル外径 D により異なり、 D が大きいほど大きくなる。

この結果からもわかるように、距離測定誤差がわずかに生じただけで、 x_0 の計算誤差は拡大される。しかし、実際にはレーザは5本あり、多くのデータの平均値を採用するので、誤差は相殺され実用上は問題にならない。

(5) コイル y 方向中心 (y_0) に関して

コイル幅計算誤差と全く同様なので、割愛する。

(6) その他の誤差要因

(a) 外乱光の影響

蛍光灯、ナトリウムランプ、水銀灯下では全く問題なし。ただし、太陽光はレーザと同一波長の成分(786

Fig. 14 Calculation error Δx when Δz exists Fig. 15 Error Δx to Δz ($x_1=0, x_2=150$)

nm)を有するため、CCDセンサにノイズとして侵入する。実験によると、約4000 lx程度までは問題なかった。それ以上の太陽光に対しては、遮光が必要である。

(b) 距離計に対する振動の影響

統計的に演算処理するので、問題にはならない。

4. 認識精度試験結果

4.1 コイル片に対する基礎実験 認識装置をクレーンに搭載する前に、予備実験を実施した。実際のコイル片に対し、レーザ光を θ 傾けて照射し、CCDセンサの電子シャッタ速度を変更して、距離測定の可能な限界角度の測定を行った。

実験結果を図16に示す。本結果によるとシャッタ速度を増加するにしたがい、距離測定の可能な限界角度は小さくなる。一方、図17に示すように最小径 $D=700$ のコイルにおいて、円周上の少なくとも2点のレーザスポットがイメージセンサで集光できるコイル面の限界角度は $\theta \approx 25.4^\circ$ となる。

そこで、距離測定可能な限界角度が 25.4° 以上となるシャッタ速度を図16より求めると、シャッタ速度は1/500秒以下となる。ただし、シャッタ速度を遅くし過ぎると、 θ が 0° 近くるとき、イメージセンサへの入射光量が多過ぎる結果、距離測定誤差が多くなる。そこで、実機ではシャッタ速度を1/500秒とした。

4.2 環境温度変化に対する認識誤差 環境温度

Fig. 16 Critical observable angle for CCD image sensor

Fig. 17 Critical observable angle of at least two laser spots

Fig. 18 Coil center recognition error Δx to surrounding temperature

が変化した場合のレーザ素子に対するメーカー保証値は0～45℃であるが、実際にどの程度の余裕があるかを実験により検討した。レーザ距離計を恒温槽に設置し、環境温度を-3～60℃まで変化させ、複数種類のコイルに対して認識実験を実施した。認識誤差の内、 x 方向の誤差 Δx に関する実験結果を最大、最小のばらつきを含めて図18に示す。

本結果によると、-3～50℃においては、問題ないが、さらに高温にすると誤差が徐々に大きくなり、55℃を越えると目標値 ± 20 mmを逸脱することがわ

Table 2 Summary of accuracy test (mm)

	x_0	y_0	z_0	W	D
Max. of Error	+18	+20	+5	+17	+16
Min. of Error	-10	-11	-7	-6	-12
Standard Deviation	5.7	7.4	3.1	6.1	5.6

Fig. 19 Summary of accuracy test in recognition

かった。なお、外径他の認識誤差に関しては、-3～60℃の範囲で特に問題はなかったので、詳細データは割愛する。

以上より、環境温度に対して多少の余裕はあるが、メーカー保証値以上の環境温度になる場合はレーザ光源部の冷却を要する。

4.3 認識精度試験結果 開発した認識装置をクレーンのクラブに搭載し、複数のコイルに対して認識精度試験を行った。試験対象コイルの外径(D)および幅(W)は $D=700\sim 2\,800$, $W=500\sim 2\,000$ とし、コイル位置を置き換えて多数回測定した結果を整理したものを図19および表2に示す。

なお、誤差を算出するための基準値は、巻尺および金尺などにより測定した。測定結果には多少のばらつきがあるものの、いずれのパラメータに関しても、目標値 ± 20 mmの誤差範囲に入っており、大変良好な結果となっている。

5. 結 論

レーザ距離計を走査する方式のコイル位置自動認識装置を開発した。クレーンのクラブに搭載し、複数のコイルに対して認識精度試験を行った結果、コイル中心座標、コイル幅、外径ともに認識誤差は ± 20 mm以下と実用的に全く問題ないことを確認した。

Fig. 20 Recognition error to number of laser beams

付 録

レーザ本数 n , およびその間隔 δx は, 以下のシミュレーション結果を元に決定した.

n の決定 n に関するシミュレーション条件は以下とした.

各 x, y, z にはそれぞれ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ の誤差があるとする. すなわち, 認識計算式(3)~(7)において,

x の代わりに $\Rightarrow x \pm \Delta x$

y の代わりに $\Rightarrow y \pm \Delta y$

z の代わりに $\Rightarrow z \pm \Delta z$

を代入する. $\delta x=150$ なる距離計に対し, $D=2\,300$, $W=600$ の場合のコイルに関して, $\theta=0\sim 2^\circ$ とランダムに変更し, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ をランダムに変更(ただし, 最大値 $=30$)した場合の, 認識誤差計算結果を図 20 に示す. 本結果より

$n=1$: 中心座標 x_0 が幾何学的に計算できないので, 不可.

$n=2$: 中心座標 x_0 が幾何学的には計算できるが, 誤差が大きく, 適用不可.

$n=3$: 中心座標に与える誤差が大きく, また万一レーザ 1 本に不具合があった場合は, $n=2$ となり, 誤差がさらに大きくなるため, 適用不可.

$n=4$: コイル中央にレーザ光がないため, 原点調整がしづらく, n を奇数とするほうがよい.

$n=5$: 上記の問題をクリアできるので, 実用的. 万一レーザ 1 本に不具合があっても, 余り問題にはならない.

$n=6$ 以上: これ以上レーザ本数を増加しても, 誤差を含んだデータが増加するだけで, 誤差低減には寄与しない.

上記理由より, $n=5$ とした.

δx の決定 δx に関しては図 4 において 5 個のレーザスポットを CCD イメージセンサで捕らえ, 分離して信号処理する必要性から, 130 以上とする必要がある. 一方, 広くするとレーザ距離計が大きくなるので, 実用性を考慮し, $\delta x=150$ とした.

文 献

- (1) 珍部弘・山本治正, 自動クレーン用フィードバック式新振れ止め制御の開発, 機講論, 12, No.948-3(1994-11), 298-300.
- (2) 吉田豊・赤嶺幸吉, クレーンの制御技術と今後の動向, クレーン, 25-11(1987), 2-10.
- (3) 星名博光・堀本孝治, 画像処理機能付自動天井クレーン, 産業機械(1992-6), 41-43.
- (4) 軸丸修一・赤崎宏, 自動倉庫クレーン用熱延製品(コイル)位置検出装置の開発, 日本非破壊検査協会第 7 回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集, (1992-7), 163-167.
- (5) 西部邦彦・橋本修・山本治正, 自動クレーン用鉄鋼コイル位置認識装置の開発, 機講論, 11, No.948-3(1994-11), 295-297.
- (6) 西部邦彦, 円柱状物体の位置測定方法, 特開平 06-074711.
- (7) (財)光産業技術振興協会, レーザ安全ガイドブック(改定版), (1992-1), 38-44, 新技術コミュニケーションズ.