画像処理によるクレーンつり荷位置検出法*

村田 五雄^{*1}, 吉川 博文^{*2}
星名 博光^{*2}, 烏田 修之^{*2}Position Detection of Object Hanging from
a Crane by Image-Processing MethodItsuo MURATA, Hirofumi YOSHIKAWA,
Hiromitsu HOSHINA and Shuji KARASUDA

Although many researchers have investigated the antisway control of container cranes, a successful system has not yet been formulated. One obstacle is the development of an adequate sensor. Although potentiometers or acceleration sensors have been used for antisway control, these ones could not directly detect the position of the spreader of container cranes. We have succeeded the very precise antisway control of container cranes by developing the new sensor. This sensor consists of CCD camera, line marker on the spreader and image processing unit which can stably detect the target by the use of correlation method. In this paper, We report the results of fabrication of a new sensor for direct detection of the position of a moving object hanging from a crane.

Key Words: Position Sensor, Crane, Image Processing, Antisway Control, Window Tracking

1. ま え が き

コンテナクレーンの振れ止め制御は多くの人の関心と呼び、多くの研究がなされてきた。振れ止め制御を精度よく実施するためには、つり荷の振れ状態の観測が非常に重要になる。これまでのつり荷の振れ検出には、つりロープのトロリー近くの高さに一端を固定したポテンシオメータ方式や、つり具上に取付けた加速度計などが用いられていたが、どちらも高精度な検出は期待できず、最近のような高精度な振れ止め制御性能と高度な自動化レベルを要請されるようになると十分なものとなってきた。

ポテンシオメータ方式を使った報告もされているが⁽¹⁾、この方式では、検出したいつり具やつり荷の位置と検出している位置があまりに離れていたり、ポテンシオメータのバックラッシュなどのため、つりロープの上部の変位とつり荷付近ロープの変位が単純な比例関係にならないので、振れ状態を忠実に表しているとは言えない。

また、我々のこれまでの研究においても加速度計方式は、つり荷に直結したつり具に取付けてあるため物理的状态を忠実に検出してはいるけれど、傾くと重力加速度を拾ってしまうし、また振動などの高周波加速度を拾ってしまうなどの外乱が多く、特に1点つりや2重振れがあるところでは精度が出にくいという問題があった。

このような現状の振れセンサの欠点を解決する画像処理方式の振れセンサを開発したので、その概略を紹介する。

この方式により、つりロープが長くてもつり荷の振れが直接検出され、しかも高周波振動等がなく、必要な振れ状態がそのまま観測することができるようになった。

2. 問 題 と 条 件

画像処理方式で振れ状態を検出するためには、多くの問題を解決しなければ実現できない。どのような解決すべき条件があるのかを以下にまとめた。

- (1) 屋外の太陽光のもとでも使える。
- (2) 昼夜共に使えること。
- (3) カメラとつり荷(対象物)までの距離は数mから30mまで変化する。

* 原稿受付 平成4年12月28日。

^{*1} 正員、三菱重工業(株)広島研究所 (〒730 広島市中区江波沖町5-1)。

^{*2} 三菱重工業(株)広島製作所 (〒730 広島市中区江波沖町5-1)。

- (4) つり荷(対象物)は±数m振れることがある。
- (5) つり荷(対象物)を見失っても自動的に再キャッチできなければならない。
- (6) 検出精度は悪くても1cmは確保すること。
- (7) 特殊カメラは高価で実用的でないので、30 Hz, 512×512 メッシュ程度の CCD カメラで実現すること。
- (8) 検出遅れは100 ms 以内とする。

このような条件のもとで、つり具上に特殊マークをつける方法で考えてみた。特殊マークは簡単である必要があり、外乱対策が容易に施されるものが望ましい。またつり具上につけられるものである必要がある。コンテナクレーンの場合には、通常荷振れの方向は横行方向の一次元がほとんどである。このようなことから、スプレッド上に図1のような直線状の白マークをつけて、これを CCD カメラでとらえ振れ状態を検出することにした。

3. 振れ検出の原理と方法

3.1 振れ検出の原理 図2に示すように、帯状マークの左右移動を相関処理計算によって行う。すなわち、図2に示すような基準帯状データとカメラでとらえた帯状データとの相関関数を次式により求める。

$$h(\tau, y) = \int_{-a}^a f((x-\tau), y) \cdot g(x, y) dx \quad \cdots (1)$$

ここで、

f : 計測データ

g : 基準データ

h : 相関関数

a : 積分領域(視野の範囲)

y をどこか1点に固定して $h(\tau) = h(\tau, y)$ とあらためて書き表した場合、 τ を $(-a, a)$ の範囲で振らした時の最大値を示す時の τ を τ_0 と記し、 τ_0 を振れとみなす。

図1 スプレッド上の白線マーク

なす。

$$h(\tau_0) = \text{Max} \{h(\tau)\} \quad \cdots (2)$$

$$-a \leq \tau \leq a$$

3.2 相関基準データ ズーム倍率と巻高さから視野内のターゲット白線幅(L ドット)と基準データの幅(L')の関係は次のようにした。

$$L' = L + \beta \quad \cdots (3)$$

ここで β は、視野内の白線の幅が高さやズーム倍率の変化により L_1 ドットから L_2 ドットまでかわった時、基準データの幅はその範囲内の最大値より小さくならないようにしておく必要がある。よって、 β は次のように決められる。

$$\beta = \text{Max} \{L\} - \text{Min} \{L\} \quad \cdots (4)$$

よって基準データの幅は白線より広いことになる。このため、基準データの形状は重要になる。図3に示すように基本的な4形状を考えてみた。(a)のく形は最も単純であるが、 β の正の時 $\beta/2$ の範囲で白線が移動しても相関値が変化しないことになる。これを防ぐためには、基準データの形状が傾斜している必要がある。しかし、基準データと白線が中央で重なった時最も相関値が大きくなる必要があるから、(b)のように中央が凹形になっていることは許されず、凸になっていなければならない。よって、(c)か(d)の形が望ましい。(c)は中央で微係数が0に近くなるので、ピークに誤差が乗りやすいのでここを鋭利に検出したいときには(d)のようにすそを少しもち上げた形状にすれ

図2 帯状マークと計測データおよび基準データ

ばピークがキャッチしやすい。しかし、本論文のテーマである振れセンサでは(c)でも十分である。

3.3 ウィンドウ追尾と見失ったマークの再キャッチ 相関計算する範囲をウィンドウとして設定することによって、計算処理時間の短縮と余計な外乱を拾わなくてすむという特徴がある。ウィンドウの設定は、前回処理のターゲットの位置にウィンドウの中央が対応するように逐次移動させていく。

前回の白線の位置を Cn とすれば、ウィンドウの範囲 $[Sn, En]$ は次のように決められる。

$$\left. \begin{aligned} Sn &= Cn - \frac{N'}{2} \text{ (ドット)} \\ En &= Cn + \frac{N'}{2} \text{ (ドット)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

このようにしてウィンドウ方式により、白線マークを追尾してゆくことができるが、次のような原因から白線を見失う可能性がある。

- (1) 振れが大きすぎて視野が出てしまう。
- (2) 振れ速度が大きすぎてウィンドウ内通過時間が短すぎる。
- (3) 白線以外のものを白線とみなしてしまう瞬間がある。

これらの原因により、白線を見失った場合にも上記のウィンドウ方式より自動的に再復帰しなければならない。

(1) の場合には図4に示すように、まず見失った側

図3 基準データの形状の比較

の端点で一定時間(例えば数秒)待ち、それでもキャッチできない時は中央で待つ。また、(2)、(3)は、中央で待つことによりできるだけ早く再キャッチすることができる。

3.4 外乱の除去法 コンテナヤード内のような屋外で、しかも昼夜を問わず使用可能でなければ実用に供さない。相関処理方式自身がまず単なる2値化より外乱に強く、固定いき値では太陽の明るさの変化(雲や時間変化)や夜間照明になったりしても自動しぼりの範囲内で十分対応が可能となった。

ウィンドウ方式により、全体の視野の中には白線より明るいところがあってもウィンドウの中に入っていないと外乱にはならない効果があり、外乱にいつそう強くなっている。

1 スキャンごとに今回のずれ量と前回のずれ量を比較し、ずれ判定値以上のずれがあった場合には外乱とみなし、前回のずれ量をホールドする。

また、検出した白線のピーク位置だけでなく、相関関数値があるいき値以上になっている領域の幅が想定される白線の幅より大きくずれていたらやはりノイズ

図4 ウィンドウと再キャッチ

図5 水玉模様の外乱

と見なし、前回値をホールドする。

さらに、これらの外乱処理でもすり抜けるような外乱がある。図5のような水玉模様光が反射しているような場合である。このような外乱に対しては3・1節で述べた相関処理に対して、 y の値を3箇所設定して y_1, y_2, y_3 とする各計測値 $f(x, y_i)$ に対して $f_0(x)$ を次のように定義する。

$$f_0 = \sum_{i=1}^3 f(x, y_i) \dots\dots\dots (6)$$

$g(x, y)$ は、 y に対してコンスタントであるから相関関数 $h(\tau)$ を次式のようにあらためて定義する。

$$h(\tau) = \int_{-a}^a f_0(x-\tau)g(x)dx \dots\dots\dots (7)$$

この $h(\tau)$ のピークを示すときの τ を τ_0 としてズレ量とみなす。

もちろん、 y_i はあまり接近しないように視野内を4分割する境界あたりがよい。

3・5 精度の検討と許容最大振れ速度 コンテナクレーンの場合、ロープ長が変化するためカメラと対象物間の距離は数mから30m以上にまで変化する。いずれのロープ長にあっても、精度は最低10mmは

確保できるようにカメラの視野とウィンドウの大きさを決定しなければならない。CCDカメラのドット数は512×512であるから、10mmの精度を確保するためには視野を約5mにする必要がある。表1にロープ長5mから最大40mまでの範囲での検討を示す。ウィンドウは80ドット分を割り当てることにした。

同じロープ長の変化の中をどの程度の振れ速度まで許されるのかの検討結果を表2に示す。許容最大振れ速度はウィンドウの大きさの半分をスキャンタイムで割ったものとして求めた。この結果、必然的に許容最大振幅も決まることになる。ロープ長40mのときには処理能力は7m以上あり、視野の5m以上あるので、視野内の白線はすべて処理可能ということになる。

また、白線の太さはどの程度にするのがよいか、同じ条件のもとで白線の太さを30mmから90mmまで変化したときのドット数を表3に示す。白線のドット数は12ドット程度はあったほうがよいので、それを基準点として同表内に記入してある。ロープ長が30mまでは最低保証されているためには、白線幅90mm以上でなければならないが、できるだけ細いほう

表 1 精度検討結果(カメラの水平方向視野角7.32°として計算した結果)

Distance between Camera and Target L [mm]	Range of Vision of Camera X [mm]	Accuracy of Camera in Horizontal Direction y[mm/dot]	Scal of Window [mm]
5 000	6 39. 6	1. 25	1 00
1 0000	1 279. 3	2. 50	2 00
1 5000	1 918. 9	3. 75	3 00
2 0000	2 558. 6	5. 00	4 00
2 5000	3 198. 3	6. 25	5 00
3 0000	3 837. 9	7. 50	6 00
3 5000	4 477. 6	8. 75	7 00
4 0000	5 117. 2	10. 00	8 00

表 2 許容最大振れ速度(計算値)

Distance between Camera and Target L [mm]	Period T [s]	Permissible Maximum Sway Speed [m/s]	Permissible Maximum Sway Amplitude [mm]
5 000	4. 5	0. 45	± 321
1 0000	6. 4	0. 90	± 908
1 5000	7. 7	1. 36	±1 680
2 0000	8. 9	1. 82	±2 595
2 5000	10. 0	2. 27	±3 616
3 0000	10. 9	2. 73	±4 761
3 5000	11. 9	3. 18	±5 987
4 0000	12. 7	3. 64	±7 323

がズレ検出精度からは望ましいことから線幅は90 mmとした。

4. 実験結果と実機検証

4・1 白線の変位(重心位置) x と画面上の白線の幅の関係 図6に変位 x と画面上の白線の幅の関係を示す。

計算値の曲線は次のようにして導出した。

まず、つり荷の振れを単振り子とみなして式(8)のように表現する。すると、つり荷の水平方向の速度は式(9)のようになる。

$$x = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \dots\dots\dots (8)$$

$$V = \dot{x} = \frac{2\pi A}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

A : 振れ振幅

T : 振れ周期

x : 振れ変位

V : 振れ速度

t : 時間

式(8)を t について解く。

$$t = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{x}{A}\right) \dots\dots\dots (10)$$

式(10)を式(9)に代入して t を消去する。

$$V = \frac{2\pi A}{T} \cos\left\{\sin^{-1}\left(\frac{x}{A}\right)\right\} \dots\dots\dots (11)$$

TVカメラの撮影時間は1/30 secなので、TVカメラで撮影した画面上の白線の幅 D は次式で与えられる。

$$D = \frac{V \times 1000 \times 1/30 + 19 (\leftarrow \text{静止時の白線の幅})}{1.58} \dots\dots\dots (12)$$

式(11)において、本実験では $A=0.298$ m(画面より)、 $T=2.85$ secであった。

計算値と測定値が異なる原因は、図6より時間的に振幅 A が変化(減衰)するためと考えられる。

4・2 水玉模様反射光外乱の外乱処理の有効性

3・4節で述べたような水玉模様の外乱光は、雨の中などで発生しやすい。図5のような例に対しては、一本のラインでは白線の輝度は反射光に敗けてしまうことになる。最大ピークを示すところが白線から離れていれば単純な外乱と見なすことができるが、このよう

表 3 見かけの白線太さ

Distance between Camera and Target L [mm]	Apparent Width of White Line [dot]				
	①	②	③	④	⑤
5000	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2
10000	⑫ Standard	1.8	2.4	3.0	3.6
15000	8.0	⑫ Standard	1.6	2.0	2.4
20000	6.0	9.0	⑫ Standard	1.5	1.8
25000	4.8	7.2	9.6	⑫ Standard	14.4
30000	4.0	6.0	8.0	1.0	⑫ Standard
35000	3.1	5.1	6.8	8.5	10.2
40000	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0
Width of White Line	3.0 mm	4.5 mm	6.0 mm	7.5 mm	9.0 mm
					↑ Selected

図 6 変位 X と画面上の白線の幅の関係

図 7 3本線重ね合せによる外乱処理

図 8 計測結果例(下)

図 10 加速度計方式による振れ止め制御

図 9 振れ止め制御への応用

にランダムに分布している反射光のような場合は少しずつずれて移動していくような場合は区別がつきにくい。3・4 節で述べた外乱処理方式を適用すると、図 7 に示すようになり、白線のところを正しくピークとして取り出していることがわかる。

4・3 実機搭載による加速度計との比較 図 8 に実機コンテナクレーンに搭載してつり荷の振れ状態の計測結果を表す。同時に加速度計で計測した結果も比較のために並べた。加速度計による計測値は高周波がのって振れの状態を正しく表現していない。この高周波は、つり荷の 2 重振れが最大の原因であろうと思われる。これまでの制御では、この高周波成分をフィルタを通して除去していたために、時間遅れや荷役作業のサイクルタイムの伸長をきたす原因につながっていた。これに対して、本画像処理方式の振れ検出では、非常にスムーズなデータが得られていることがよくわかる。また、大きな振幅のところがカットされ、フラットになっているのは振れが大きすぎて視野からはずれたためであり、視野内にもどってきた時自然に復帰していることがよくわかり、3・3 節で述べたマーク

を見失った時の再キャッチ機能がよく働いていることを示している。

4・4 振れ止め制御に応用した実機検証 本画像処理方式の振れセンサを実機搭載して、振れ止め制御に応用した時のデータを図 9 に示す。ここで使用したコンテナクレーンの運転条件は、ロープ長の変化は 10 m→25 m、トロリー横行最大速度は 210 m/分のオーバパナマックスの第 4 世代コンテナクレーンである。図 9 からスプレッドの振れ (x_3) の制御が大変なめらかによくされていることがわかる。これは振れ検出の高性能化のたまものであると考えられる。この対比として、図 10 に加速度を使った方式の一例を示す。高周波成分を除去するフィルタの時間遅れがあり、制御性の悪さが顕著に出ている。

5. ま と め

クレーンつり荷の振れ状態を直接検出する画像処理方式を開発し、実機検証を行った。このセンサを応用したコンテナクレーンの振れ止め制御でもこれまで以上の高性能化の可能性も検証でき、本方式の振れセンサの有効性を立証できたと思う。

今後、本センサをフル活用してコンテナクレーンの高度自動化の実現に少しでも貢献できればと願っている。

文 献

- (1) 藤田・ほか 1 名, クレーンの振れ止め制御方式, 第 3 回ビークルオートメーションシンポジウム, (1980).
- (2) 土谷・ほか 4 名, 速度計測用空間フィルタの窓関数に関する解析とその実現方法, 計測自動制御学会論文集, 26-3(1990), 243-250.
- (3) 中島・ほか 2 名, 画像処理 [I], 計測と制御, 28-3(1989), 39-47.
- (4) 広瀬・ほか 2 名, パターン認識手法を用いた車間距離の測定, 計測自動制御学会論文集, 14-5(1978), 572-578.