

港湾クレーン用吊荷位置センサの開発

Development of Position Sensor for Quayside Cranes

技 術 本 部 吉 川 博 文^{*1} 国 光 智^{*1}
 広 島 製 作 所 星 名 博 光^{*2} 宮 田 紀 明^{*2}
 小 林 雅 人^{*3}

当社は、1996年に3点式レーザ光源と二次元 CCD カメラを利用して、吊荷の横行方向・走行方向の二次元位置を高精度に検出できる吊荷位置センサを開発し、レールマウント式橋形クレーン（RMGC）の自動運転システムに適用してきた。本センサは、トロリ上に設置した二次元 CCD カメラにより吊具上に設置したレーザ光源式ターゲットを検出するものである。検出されたカメラ視野中のターゲット位置は、吊荷の巻高さ等を基に、吊荷の横行方向・走行方向位置に変換される。本センサは、現在豪雨時の信頼性をより高めた9点式レーザ光源に改良され引き続き順調に高操業を続けている。

We developed a position sensor used a 3-element laser target and CCD cameras that detected 2-dimensional positioning (trolley travel position and gantry travel position) of hoisting accessories, and used the sensor for automatic operation of rail-mounted gantry cranes (RMGCs) in Hong Kong from 1996. The detection principle involves image processing. CCD cameras on the trolley image the laser target on the hoisting accessory. The image processing unit (IPU) detects pixel positions of the laser target. We then calculate 2-dimensional hoisting accessory positioning with the hoisting accessory's height. We now use a 9-element laser target for RMGCs that has high stability in hard rain.

1. ま え が き

近年、コンテナクレーンやトランスファクレーン等のコンテナを扱うクレーンでは、荷役作業の効率化のため、高速化や自動化が進められている。ここで、自動化の実現には、吊荷位置の正確な検出が重要となる。

当社は、1996年3点式レーザ光源と二次元 CCD カメラを使った吊荷の二次元位置（横行方向・走行方向）を高精度に検出できる吊荷位置センサを開発し、レールマウント式橋形クレーン（以下、RMGC と称す）の自動運転システムに適用してきた。

本センサは、トロリ上に設置した二次元 CCD カメラにより吊具上に設置したレーザ光源を検出するものであり、その性能と信頼性の高さにユーザの高い評価を得てきた。現在では、豪雨時においても揺ぎない高精度位置検出を実現した9点式レーザ光源に改良され、上記 RMGC の自動運転システムにおける振れ止め、位置決め技術の核として安定した高操業を支え続けている。

2. 吊荷位置検出方法

吊荷の位置や振れを制御する方法は、クレーンの動作を物理モデル化し、吊荷が振れない横行指令でトロリを動かすパターン振れ止め制御に始まり、現在では吊荷の正確な位置を検出して、振れや位置を制御するフィードバック振れ止め・位置決め制御へと進化してきている。ここでは、当社クレーンにて使用されてきた吊荷位置の検出方法を示すとともに、自動化における必要機能を検討する。

2.1 吊荷位置検出方法と課題

当社で利用されてきた吊荷位置検出方法を表1に示す。当初手動運転時の振れ止め制御を目的とした加速度計方式が利用されていたが、吊荷を着床させた際の大きな振動・衝撃に対する耐振性や地上の着床目標位置に対する絶対位置決めができないといった課題があり、最近ではほとんど利用されていない。その後、半導体技術の進歩に伴い高精度な二次元 CCD カメラや PSD カメラ及び高速な画像処理装置が利用できるようになり、かつ半導体レーザや高出力 LED も安価になったことから、横行方向及び走行方向の吊荷位置が高精度に検出できる二次元 CCD カメラや二次元 PSD カメラとレーザや LED 光源を組合せた検出器が利用されるようになった。検出対象に光源が利用されるのは、自然画像から吊荷の位置を検出することが困難であることと、検出目標を小さくして配置上の制約を少なくするためである。この方法の課題は、LED やレーザ等の光源の検出における太陽光の外乱対策と降雨時等の入射光量の低下対策である。当社は、広い波長特性を

表1 吊荷位置検出方法

Characteristics of position detecting device

主な用途	検出器	精 度	課 題	自動化対応
振れ止め	加速度計（一次元）	20～30 mm	耐振性、検出精度、絶対位置検出不可	×
位置決め	二次元 PSD カメラ + LED 光源	約 10 mm	太陽光外乱、降雨時の入射輝度低下、地上絶対位置との誤差	○
	二次元 CCD カメラ + レーザ光源	約 4 mm		○

*1 広島研究所搬送システム技術グループ

*3 鉄構技術部運搬機設計課

*2 鉄構技術部運搬機設計課主席

持つ太陽光の外乱に打勝つために、発光波長特性が狭いレーザ光源と光学式バンドパスフィルタを利用している。また、クレーンが横行・走行することに伴う吊荷の振れが発生するため、レーザ光源もこの振れ角度以上の広がり角がなければカメラ側に光が入射されず見失うという問題もある。この振れの角度は、RMGCの場合最大で横行方向約 20° 、走行方向約 10° であり、これによる光量低下を見越したレーザ出力や光学フィルタの検討が必要となる。また、降雨時は、レーザ射出面（防水用ガラス面）への水滴付着に起因する光の散乱が生じ輝度の大幅な低下を引起す。このため、吊荷上のレーザ光源は一定の発光面積又は水滴径以上の距離で配置された複数のレーザ素子により構成する必要がある、かつ発光面積や素子数の増加に伴う位置検出精度の低下対策も必要となる。

2.2 自動化での必要機能

前記位置検出方法の課題でも示したが、吊荷を自動荷役するためには、①地上着床、②多段積、③多段積された谷間への巻上げ・下げ、といった荷役動作を実現する必要がある。目標となる吊荷の着床位置は地上の絶対位置であり、多段積みされたコンテナの谷間へ荷を巻上げ下げする場合には、コンテナの積付け精度や1段目の着床精度、荷役途中の吊荷位置決め・振れ止め精度が重要となる。これら位置決め精度のかぎとなるのが吊荷位置センサの検出精度である。これに加え、従来の振れ止め制御が手動運転のアシスト的な機能であったのに対し、自動運転では吊荷位置センサからの情報ですべての動作を制御する必要がある、センサに要求される信頼性がけた違いに高くなる。このような点を考慮すると、自動化のための吊荷位置センサとして以下の機能が必要とされる。

- (1) 地上に対する吊荷絶対位置の検出機能
- (2) 全検出範囲における数 mm の高精度二次元位置検出機能
- (3) すべての環境条件及び長期の使用における検出の信頼性

3. レーザ光源式吊荷位置センサ

2章にも示したように自動化に対する必要機能を満足するため、当社では精度面で優れるレーザ光源と二次元 CCD カメラを利用した吊荷位置センサを採用している。以下その詳細について示す。

3.1 システム構成

図1に吊荷位置センサを構成する二次元 CCD カメラ及びレーザ光源の配置を示す。図2には画像処理装置の構成を、図3には9個の半導体レーザを使用したレーザ光源を示す。高精度な位置検出を実現するために、吊荷の全振れ角をカバーする広角カメラと高精度位置検出を行う狭角カメラの2種類の二次元 CCD カメラを左右各2台利用するとともに、検出タイミングの違いによる誤差をなくするため全カメラを同期駆動している。レーザ光源では、水滴による散乱対策として10 mm 間隔で合計9個の半導体レーザを配置するとともに、カメラ側には ± 10 nm の狭帯域バンドパスフィルタを採用し、画像処理装置には各カメラの電子シャッターを高速に自動制御する自動絞り機能を付加して検出輝度の安定化を図っている。

(1) 基本性能

表2に吊荷位置センサの基本性能を示す。狭角カメラを

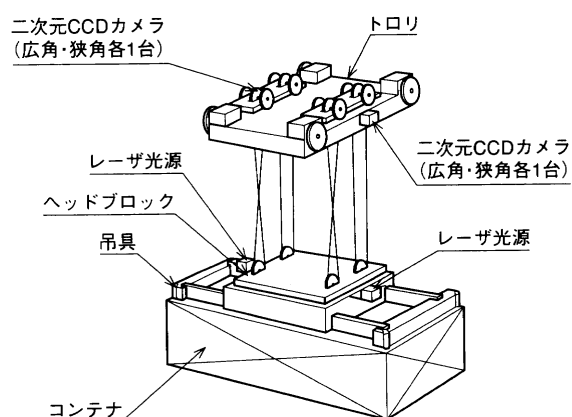


図1 レーザ光源式吊荷位置センサの構成 二次元 CCD カメラ及びレーザ光源の設置状況を示す。
Arrangement of optical instruments

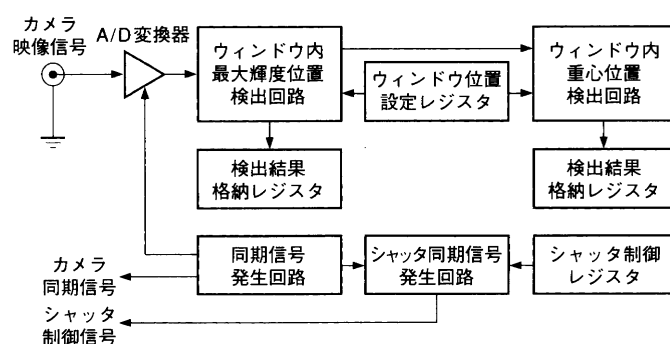


図2 画像処理装置の構成 画像処理装置の処理概要を示す。
Image processing flows

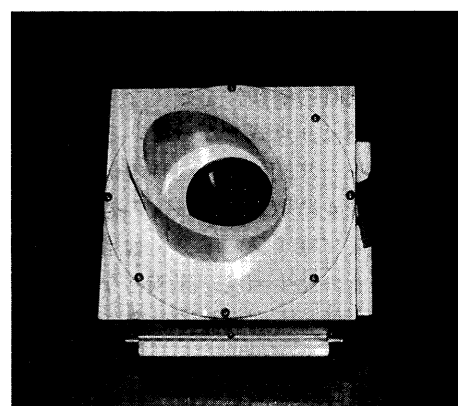


図3 レーザ光源 今回開発した多点式レーザ光源の外観を示す。
Photograph of laser target

利用した場合、横行方向で約4 mm の高精度な検出を実現している。また、図2に示す画像処理装置の検出アルゴリズムにおいて、複数の光源位置から光源の中心位置を算出する重心位置検出機能や検出位置のトラッキング機能及びトラッキング結果を基にした検出ウィンドウ設定機能等を採用し、太陽光の外乱除去やレーザ光源のレーザ素子数を増加したことによる検出精度の低下を防止している。さらに、図2に示した画像処理のほとんどを電子回路化したことにより、検出周期を従来の半分の $1/30$ sまで高速化して

表 2 吊荷位置センサの主要性能
Specifications of position sensor

項 目	性 能
検出周期	1 / 30 s
検出距離	3 ~ 50 m
検出精度 (広角) (狭角)	横行：≤10 mm 走行：≤13 mm 横行：≤ 4 mm 走行：≤ 5 mm
検出視野 (広角) (狭角)	23°×17° (横行×走行) 7°× 6° (同上)
光源出力	半導体レーザ約 20 mW 9 個
光源広がり角	23°×10° (横行×走行)

表 3 散水試験条件
Conditions of sprinkling test

(a) 散水条件		
項 目	シャワー	ミスト
水滴直径	2 mm	1 mm
散水量	200 mm/h	80 mm/h
散水範囲	光源部のみ	同左
(b) その他の条件		
光源－カメラ間距離	25 m	
計測周期	300 ms	
試験時間	3 min	
異常判定条件 (検出輝度[0-255])	検出輝度<150	

いる。

(2) 降雨における信頼性

1996 年から 4 年間 RMGC に適用したレーザ光源は 3 点式であったが、豪雨時の信頼性を確保なものとするため、現在ではレーザ光源は 9 点式となっている。表 3 に示す散水試験は、9 点式レーザ光源の豪雨時の信頼性を確認するために実施した。図 4 に示す散水試験の結果を見ると、9 点式のレーザ光源及び電子シャッタを利用した自動絞り機能の効果で検出不能の発生頻度が皆無となり、豪雨における信頼性が従来にも増して向上していることが分かる。

(3) 地上に対する絶対位置検出

地上に設置したレーザ式下げ振りの検出結果を基に、カメラ取付け時の誤差（取付け位置や傾き角度）をキャリブレーションしている。また、本吊荷位置センサでは検出できないクレーン本体構造の変形による誤差については、本センサを別途脚部に設置して横行方向の構造変形を検出するとともに、傾斜計を使って吊り荷重による鉛直方向の構造変形を検出している。これらすべての検出結果をもって地上に対する絶対位置の検出を実現している。なお、このような検出結果の確認は、コンテナを繰返し地上に着床する試験の着床誤差により評価されるが、この結果については 4 章の RMGC への適用と実績の中で説明する。

(4) レーザ光源の耐振性

クレーンの荷役作業においては、吊荷部分に大きな振動・衝撃が加わるので、レーザ光源の耐振試験を実施した。

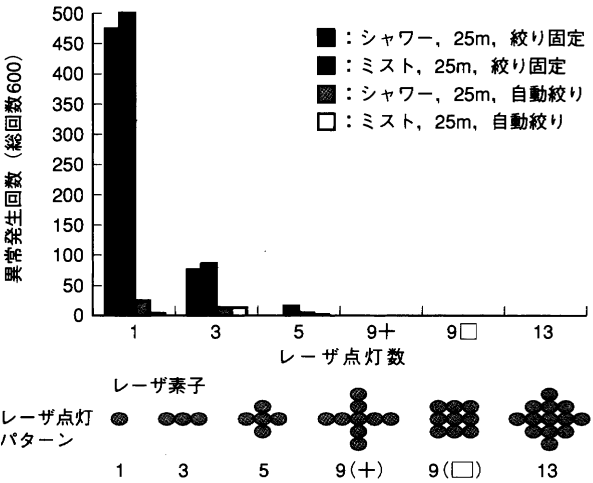


図 4 散水試験結果 レーザ光源の点灯数と散水試験による検出異常の発生回数を示す。
Relation between laser number and error counts for sprinkling test

表 4 耐振試験条件と結果
Conditions and result of vibration test

レーザ光源本体加振条件				試験結果
加振方向	加速度 (G _{0-p})	周波数 (Hz)	加振回数 (回)	
鉛直方向	0.6 (実機相当 1 倍)	42 Hz	2.7×10 ⁶	○
	3.0 (同 5 倍)	42 Hz	2.7×10 ⁶	○
水平方向	0.54 (同 2 倍)	100 Hz	3.2×10 ⁶	○
	1.27 (同 5 倍)	100 Hz	3.2×10 ⁶	○

表 4 に示す耐振試験条件は、実機においてレーザ光源本体に加わる振動の実測結果を基に決定したものである。表 4 の試験結果から、9 点式レーザ光源も RMGC 実機の振動下において 3 年以上の耐振性があることが証明された。

4. RMGC への適用と実績

吊荷位置センサは、1996 年より RMGC の自動運転システムに適用され、その高性能と信頼性の高さで 24 時間操業を支えてきた。1999 年 9 月からは、3 章に示した 9 点式レーザ光源や自動絞り機能を有する画像処理装置を引続き RMGC の自動運転システムに適用したので、その稼働状況を紹介する。この RMGC は、図 5 に示すように 6 段×12 列の蔵置に対応したクレーンであり、揚程 22 m、横行 46 m の移動範囲となっている。吊荷位置センサを構成する二次元 CCD カメラとレーザ光源は、トロリ及び吊具に設置されている。このクレーンの自動運転では、トラック上での最終的な荷のつかみ及び外し動作以外はすべて自動での荷役が可能となっている。自動運転による荷役の基本的な作業は、蔵置ヤードとトラック間でのコンテナ搬送作業及び、蔵置ヤード内でのコンテナの配置替えがある。これらの運転を高速、正確かつ安全に実現するためには、高精度な吊荷位置検出に加え、最適な運転経路制御や着床予測制御等の高度な制御が必要となる。このような高度な制御における本吊荷位置センサの役割と実荷役での性能について以下に示す。

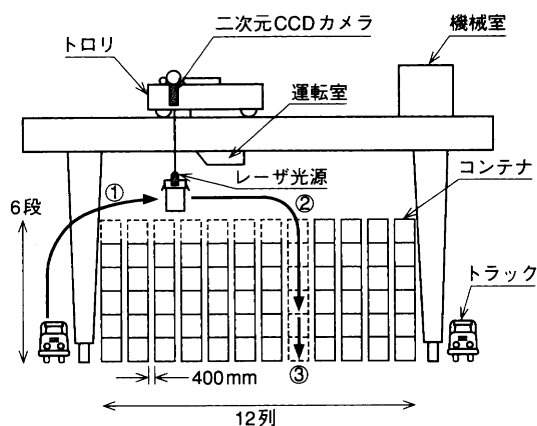


図5 レールマウント式橋形クレーンの概略と運転経路 クレーン及びコンテナ積付け状況と運転の概略を示す。
Overview of rail mounted gantry crane and trajectory of a container

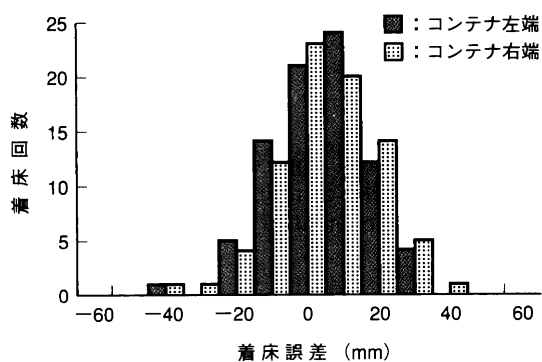


図6 着床誤差の分布 地上の目標位置に対し、81回の40フィートコンテナ着床試験を行った結果を示す。
Displacement of landing containers

4.1 着床予測制御と吊荷位置センサ

図5のようなコンテナ6段積み目の谷間へコンテナを降ろすためには、コンテナが正確に積付けられている必要がある。特に図5のRMGCでは、1段目のコンテナ着床精度として、クレーンの機械的な誤差も含めて ± 50 mm以内という高精度な着床精度が要求された。このように高精度な荷の着床において問題となるのは、風の外乱による振れの発生、及び巻ロープ長の長い位置で振れが発生するため振れ周期が長く減衰に時間が掛かること、着床直前に振れが許容精度を外れ、着床精度を満足できない状態が生じることである。この解決手段として、本自動運転システムでは、図5③の部分において現在の振れの位相と振幅から着床までの巻下げ所要時間後の吊荷の位置を予測し、吊荷の位置が設定範囲内に収まるタイミングで最終的な巻下げ動作を行っている。ここで、最も重要なキー技術となるのが、高精度かつ安定した吊荷位置の検出である。特に位置の検出精度に関しては一般に制御性能の10分の1以下が必要といわれており、本RMGCの仕様では約 ± 5 mmの精度が必要となる。これに対し、本吊荷位置センサでは、この予測制御が必要な巻位置（二次元 CCD カメラ～レーザ光源間の距離約 24 m）において約 ± 4 mmの検出精度

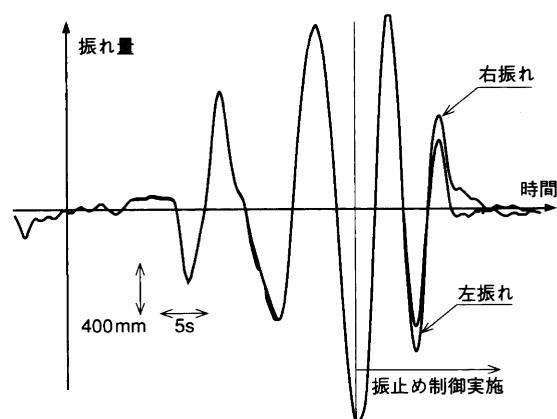


図7 実機での散水試験における振れ検出結果 実機での豪雨を想定した散水試験における吊荷振れの検出結果を示す。
Measurement of sway for sprinkling test at RMGC

を実現しており、制御側の要求を十分満足している。この着床制御を使った1段目コンテナの着床精度の試験結果を図6に示す。この試験では、幾つかの運転経路で繰返し自動運転を行い、このときの着床コンテナと地面目標位置との誤差を40フィートコンテナの端部位置で計測している。この図から分かるように81回の着床動作のうちすべてが ± 50 mm以内で、かつ80%以上が ± 20 mm以内の高精度に収まっており、本センサによる地上の目標位置に対する吊荷の絶対位置検出が高精度に実現されていることが分かる。さらに、降雨時の信頼性向上を目的としたレーザ光源の改良（素子数増加）後も、高精度な吊荷位置検出が実現されていることが実機にても確認された。

4.2 実機散水試験における安定性

今回紹介している吊荷位置センサの改良は、1999年9月にRMGC 24台のうち1台に適用された。適用に際し、基本的な調整後の1箇月間、24時間の実操業での確認運転が行われた。実操業に入る直前に最終的な吊荷位置センサの信頼性を確認するため、局地的な豪雨を想定した散水試験を実施した。試験の内容は、吊具上のレーザ光源に消火栓にて散水した状態で振れ止め試験を実施するというものである。このときの吊荷位置センサでの振れ検出波形を図7に示す。このときの散水状況では、運転室から吊具上のレーザ光源が肉眼では全く確認できないような状況にあったにもかかわらず、位置検出は正常に行われ、振れ止め制御も問題なく完了していることが分かる。この試験後の実操業においても、RMGCは大きな問題もなく順調に操業を継続している。

5. あ と が き

今回紹介した吊荷位置センサは、地上の目標位置に対する絶対位置検出を高精度に実現しているだけでなく、RMGCにおける4年間の実荷役における実績とその間の改良により、屋外における安定した動作が確認されている。当社では、今後本センサを核とした自動化により、荷役の効率化を推進していく予定である。