

コンテナ荷役効率化のための 画像センサを用いたクレーンスプレッド揺れ抑止システム

Anti-sway system with an image sensor for efficient container handling

06D5103 川井 秀樹

指導教員 久保田 譲

SYNOPSIS

High speed and efficiency are highly important factors in handling containers at ports. It is well known that the ability to handle containers at high speed strongly depends on the anti-sway system employed. However, it is not easy to realize a high-performance anti-sway system due to a number of problems. High-speed operation of container cranes is continuously required for crane operators who work as container handlers at ports. Undesirable motion of a crane spreader can lower the work efficiency due to the prolonged strain to which operators are subjected. To overcome this problem, we propose an image sensor for spreader position measurement and construct an anti-sway system with the sensor and an anti-sway controller. The image sensor consists of a pair of landmark attached to the spreader, a CCD camera and PC installed in the trolley of the crane, and has the following several advantages. (1) The image sensor is safe for the operators due to passively measuring method. (2) It employs a specific landmark robust to change of the spreader height. (3) It uses a robust template matching method "Vector Code Correlation method", which is suitable for the landmark detection under outdoor light conditions. The employed anti-sway controller is a mass damper type in which a movable mass is installed on the spreader. The actuator acting on the movable mass applies inertial force to the spreader, which results in suppressing undesirable sway motion. The constructed anti-sway system is simple and can be easily applied to any crane system. We verified features of the image sensor through the fundamental experiments such as the position change of a crane spreader using a moving stage and the illumination condition change. Then, we confirmed that the maximum absolute error at 20m in height is within 3.3 mm in sway motion. In addition, we also confirmed that the anti-sway system constructed on a model crane could rapidly suppress undesirable sway motion in manual handling.

Keywords: Container Crane, Anti-sway system, Image sensor, Position measurement, Robust template matching

1. 序論

国際的な貨物輸送において、コンテナは主要な輸送手段である。近年、各港湾におけるコンテナの荷役量は、船舶の大型化に伴い増加しており、コストや時間の面からクレーンによる荷役作業の効率化が求められている¹⁾。荷役作業においては、スプレッド（コンテナを保持する装置）の揺れが効率化を低下させる要因の一つであるため、揺れ抑止システムが重要な要素技術となる。現在までに開発された揺れ抑止システムは、主に自動化向けのため、トロリ（スプレッドを移動させる装置）の移動制御による実現が多かった²⁾³⁾。しかし、トロリの移動制御は、トロリ上で長時間作業する操縦者に不快感を与えるため、手動操縦には導入し難い。同様に、従来のスプレッド位置計測センサも自動化向けであり、手動操縦との親和性は低い⁴⁾⁵⁾。現在、クレーンの自動化はコスト面から導入に限られており、手動操縦における効率化の需要は高い。

本研究では、手動操縦に親和性を持ちながら、高精度なスプレッドの位置計測を実現する画像センサを提案し、スプレッドに付加するタイプの揺れ抑止制御装置と統合する事で、手動操縦に適した揺れ抑止システムを構築する⁶⁾。

一般に、クレーンによる荷役作業は高精度な位置決め性能を要求するため、センサには揺れに対するミリオーダーの計測精度が必要とされる。本研究では、高い分解能を持つ事から、画像センサを採用している。画像センサを使用する場合、高精度な位置計測のためには、クレーンを使用する屋外環境で生じる照明条件の変化と、スプレッドの高さ変化への対応が必要となる。照明条件の変化に対しては、正規化相関法によるテンプレートマッチングがマシンビジョンの分野で幅広く使用されている。しかし、正規化相関法は部分的な照明条件の変化には弱く、屋外では太陽光などによる部分的なハレーションにより計測精度が低下してしまう恐れがある。また、高い計算コストから計測周期を低下させ、制御性能に影響を与える可能性もある。スプレッドの高さ変化に対しては、計測に使用する画像の拡大・縮小が考えられるが、処理画像の状態により、計測精度の低下が起ころう。

本研究では、部分的な照明変動にも頑健で、計算コストも小さいベクトル符号相関法⁷⁾と、スプレッドの高さ変化にも対応可能なランドマークを用いた画像センサを提案する。ベクトル符号相関法は濃度変化の傾きを3値に符号化する事で、部分的な照明条件の変化に対応している。ランドマークはその中心形状の見え方がカメラとの距離によって大きく変化しないため、全てのスプレッド高さで検出が可能となっている。画像センサはこのランドマークをスプレッド上に設置し、画像処理によりそれらの位置を検出する事で、スプレッドの揺れと高さを高精度

に計測している。

さらに、本研究で採用した揺れ抑止制御装置は、スプレッド上に配置され、内部に移動可能な重りを搭載している。制御装置が重りを揺れの逆方向に移動させる事で、スプレッドの揺れは速やかに抑止される。この制御装置はトロリの移動制御を必要とせず、手動操縦との親和性も高い。本研究では、画像センサと制御装置を用いて、揺れ抑止システムを構築する。構築された揺れ抑止システムは、手動操縦との親和性を持ちながら、スプレッドの揺れ抑止を可能としている。

本論文は全7章で構成される。第1章は序論、第2章はシステム構成、第3章は画像センサ、第4章は揺れ抑止制御装置、第5章は実験とその結果、第6章は実環境に向けた画像センサの拡張、第7章は結論である。

2. システム構成

Fig.1 にクレーン上の本揺れ抑止システムの構成を示す。システムは、画像センサと揺れ抑止制御装置で構成されている。

画像センサはトロリに設置されたCCDカメラと画像処理を行う汎用PC、スプレッド上部に設置された2つのランドマークで構成されている。CCDカメラは撮像面をスプレッド側にした状態でトロリの下部に配置されており、その撮像対象となる2つのランドマークは、スプレッドの静止時にランドマーク間の中点がCCDカメラの光軸上に位置するように揺れ抑止制御装置上部に配置されている。

揺れ抑止制御装置はスプレッド上部に搭載されており、移動可能な重り、モータ、ベルトまたはボールスクリュー、緩衝用のバフファで構成されている。

3. 画像センサ

3.1. 計測原理

提案する画像センサの座標系は、カメラの光軸上のトロリ下部を計測原点 O_s とし、ランドマーク間の中点をスプレッド位置

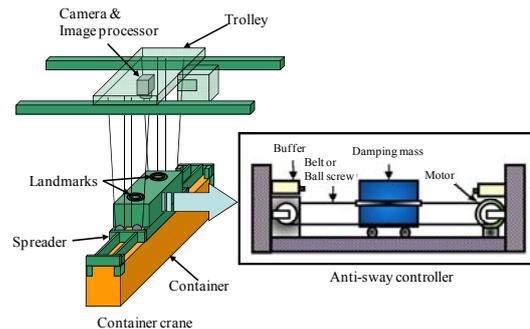


Fig.1 Schematic diagram of the proposed anti-sway system

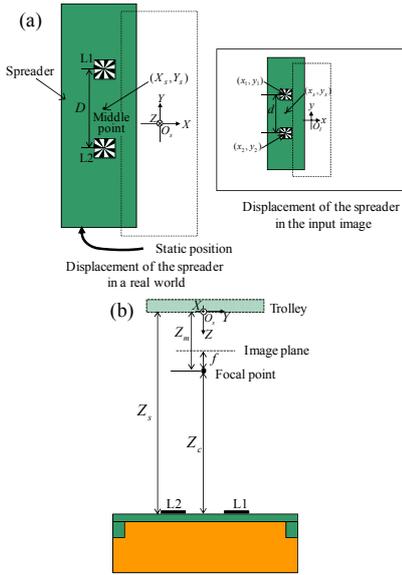


Fig.2 Principle for the spreader position measurement (a) sway measurement (b) height measurement

(X_s, Y_s, Z_s) として定義している。 X_s, Y_s はそれぞれ、トロリとクレーンの移動方向に対する揺れであり、 Z_s は O_s からのスプレッド高さを示している。

Fig.2に画像センサによるスプレッドの位置計測原理を示す。 Fig.2(a)は揺れが生じた際のスプレッド(同図左)とその時の入力画像(同図右)を示しており、スプレッドの揺れ (X_s, Y_s) は次の方法で計測される。まず、画像の中央を原点 O_I とし、画像処理により2つのランドマークの中心位置 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ を検出する。次に、得られた中心位置から画像中のランドマーク間の中点 (x_s, y_s) とその間の距離 d を次式で求める。

$$(x_s, y_s) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \dots \dots \dots (2)$$

そして、これら (x_s, y_s) と d 、および既知であるランドマーク間の実距離 D から、 (X_s, Y_s) は(3)式により計測される。

$$(X_s, Y_s) = \left(\frac{D}{d} x_s, \frac{D}{d} y_s \right) \dots \dots \dots (3)$$

さらに、 Fig.2(b)はスプレッドの高さ Z_s を示している。この Z_s は、 O_s からカメラレンズの焦点までの距離 Z_m と、その焦点からスプレッドまでの距離 Z_c に分かれており、(4)式で求められる。

$$Z_s = \frac{D}{dp} f + Z_m \dots \dots \dots (4)$$

ここで、右辺の第1項は Z_c であり、 f は焦点距離、 p は画素サイズである。なお、 Z_m はセンサ設置時のキャリブレーションから既知としている。

3.2. ベクトル符号相関法

画像センサでは、照明条件の変化に頑健なベクトル符号相関法(Vector Code Correlation: VCC)によりランドマークを検出する。VCCは各画素の8近傍における濃度変化の傾きを用いて画像を符号化し、排他的論理和演算(XOR)に基づく単純な相関計算によりテンプレートと入力画像の部分画像との相違度を求め、対象を検出するテンプレートマッチングの一手法である。VCCの概要を Fig.3に示す。

Fig.3(a)では、入力画像における任意の1画素を符号化している。符号化では、まず、対象画素とその周辺8近傍画素に対して縦・横2方向のPrewittフィルタにより濃度変化の傾きを求める。そして、得られた傾きを2つの閾値 Th_1, Th_2 と比較し、3種類のベクトル符号(正:01, 0付近:00, 負:10)に変換する。 Fig.3(a)の例では、フィルタ演算により傾き-68, 68が得られ、横方向の傾き68は $Th_1=15$ を超えたため01に変換され、縦方向の

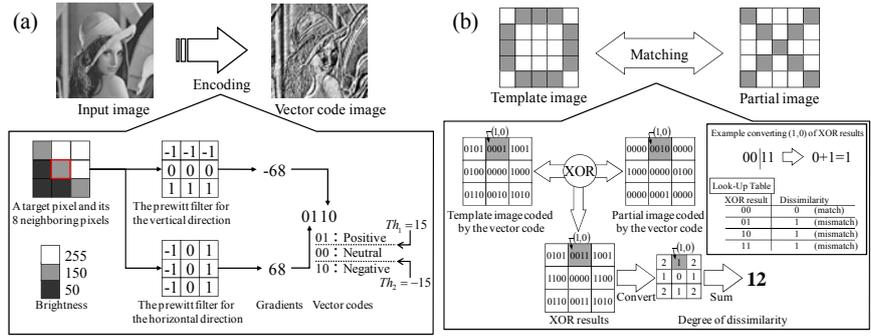


Fig.3 Scheme of the vector code correlation (a) Image encoding to the vector code image (b) Correlated calculation between vector code images

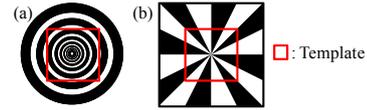


Fig.4 Landmarks robust to change of the spreader height (a) Landmark with concentric circles (b) Landmark with radial stripes

傾き-68は $Th_2=15$ を下回ったため10に変換されている。その結果、符号化後の画素情報は0110の4bitとなっている。VCCはこのような符号化を、テンプレートと入力画像の縁1画素を除いた全ての画素に対して行う。

Fig.3(b)に画像サイズ 5×5 のテンプレートと部分画像を用いた相関計算の一例を示す。相関計算では、始めに、符号化された 3×3 のテンプレートと部分画像に対してXOR演算を行う。次に、各画素のXOR結果を相違度に変換し、それらを合計して相違度12を得る。VCCはベクトル符号の一致を評価しており、XOR演算の特徴から、1組のベクトル符号に対する演算結果が00の場合は相違度0、それ以外は相違度1と定義している。座標(1,0)を例に、各画素におけるXOR結果の変換方法を示す。まず、XOR結果0011を縦横のベクトル符号に対応した2bit(00, 11)に分け、ルックアップテーブルにより、2bitごとの相違度0, 1を求める。そして、得られた相違度を足して、相違度1を得る。このように各符号の相違度を求め、 3×3 の相違度を合計する事で、2つの画像間の相違度12を得ている。

VCCは局所領域の濃度変化に基づいた手法であり、部分的な照明条件の変化にも頑健性を有する⁷⁾。VCCは類似手法である増分符号相関法⁸⁾と比べ、次の2点の改良を加える事で、部分的な照明条件の変化に対する頑健性を向上させている。(1)8近傍の濃度変化を用いて傾きを求めている。(2)各画素で縦横2つの傾きを求め、それぞれ2bitで符号化している。照明条件の変化が起こり易い屋外環境での使用を考慮して、提案する画像センサはランドマーク検出にVCCを適用している。

3.3. スプレッドの高さ変化に頑健なランドマーク

画像センサでは、スプレッドの高さ変化により、カメラ画像内のランドマークに拡大・縮小が起こる。テンプレートマッチングにおいて、このような拡大・縮小はランドマークの検出位置のずれや誤検出の原因となる。これに対し画像センサは、 Fig.4に示す高さ変化に頑健な2つのランドマークを使用する。いずれも、ランドマーク中心部をテンプレートとして使用する事で、スプレッドの高さ変化に対する頑健性を実現している。 Fig.4(a)は、一定の比率で直径と線の太さが変化する同心円により構成された、同心円型ランドマークである。このランドマークは、同心円の持つ比率でスプレッドの高さが増減すると、中心部の形状がほぼ同一となる。さらに、スプレッドの回転に対しても頑健である。ただし、スプレッドの高さによっては形状が反転するため、テンプレート更新と併せて使用する。一方、 Fig.4(b)は中心から放射状に伸びた直線群によって構成された放射状型ランドマークである。これは、全ての高さで中心部の形状が同一であり、テンプレート更新を使用する必要がない。ただし、スプレッドの大きな回転に対しては弱いという特徴も併せ持つ。画像センサでは、実装するコンテナクレーンの状況に合わせて、いずれか、もしくはこれらを組み合わせて使用する。

4. 揺れ抑止制御装置

本揺れ抑止システムで採用している揺れ抑止制御装置は、搭載した重りをスプレッドの揺れと逆方向に移動させる事で、慣性力により揺れを抑止する。Fig.5 に提案する揺れ抑止制御装置を含む、クレーンのダイナミックモデルを示す。ここでは1方向の揺れを考える。Fig.5(a)に示すように、揺れ抑止制御装置は質量 m の重りと係数 k_d を持つばね、そして、減衰係数 C_d を持つダンパによってモデル化されている。また、本来スプレッドは複数のロープによって吊るされているが、ロープ長 l が十分長いと仮定し、単振り子としてモデル化されている。さらに、その振り角 θ も小さいとし、 $\sin\theta \approx \theta$ 、 $\cos\theta \approx 1$ 、スプレッドの揺れ $x = l\theta$ 、としている。その結果、Fig.5の運動方程式は(6)、(7)式となる。

$$(M+m)\ddot{x} + \frac{C_s}{l}\dot{x} + (M+m)gx = T - mgx_d - f_d l \quad \dots(6)$$

$$m\ddot{x}_d = -\frac{mg}{l}x + f_d - C_d\dot{x}_d - k_d x_d \quad \dots(7)$$

C_s はスプレッドの減衰定数、 T は外乱によるモーメント、 f_d はモータにより発生する力であり、 $f_d = k_m i$ となる(k_m :トルク定数、 i :モータの入力電流)。 (6)、(7)式に対する状態方程式を(8)式とする。

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= Ax_p + Bu + Dw \quad \dots(8) \\ y &= Cx_p \end{aligned}$$

ここで、 $x_p = [x \quad \dot{x} \quad x_d \quad \dot{x}_d]^T$ 、 $u = v$ (モータへの入力電圧)、 $w = T$ である。なお、 l は画像センサが計測するスプレッド高さ Z_s に相当するが、ここでは定数としている。揺れ抑止制御装置は、モデル化誤差に対してロバストなフィードバック制御系を構築する H_∞ 制御⁹⁾に基づいて設計されている。その設計方法とは、ノルム条件 $\|Z\|_\infty < \gamma (> 0)$ を満たす $K(s)$ を求める事である。

$$K(s) := \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \quad \dots(9)$$

(6)、(7)式の各パラメータをTable1とすると、(9)式の各要素は以下の通りとなる。

$$A_c = \begin{bmatrix} -2.5234 & -0.5709 & -0.4550 & -2.4035 \\ 0.5100 & -4.3636 & -2.2421 & 1.3109 \\ -4.5748 & 5.0089 & -10.1794 & -3.2709 \\ -7.5437 & -3.4879 & -21.4871 & -43.4999 \end{bmatrix},$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0.8803 & -2.1623 \\ -13.7120 & -1.0277 \\ 12.2821 & -3.1357 \\ 4.8467 & -4.5473 \end{bmatrix},$$

$$C_c = [0.0602 \ 0.0658 \ 0.1519 \ -0.64], \quad D_c = [0 \ 0] \quad (10)$$

5. 実験

5.1. 画像センサの精度検証

画像センサの位置計測精度は、3.1で述べた(3)、(4)式から、 (x_s, y_s) と d に依存する。そこで、可動ステージを用いた実験によりこれらの計測精度を検証した。Fig.6は実験を行った2つの環境を示しており、ステージの移動部をスプレッドとみなしてFig.4(b)の放射状型ランドマークを設置している。この移動部を、Fig.6(a)ではカメラに対して前後に移動させ、Fig.6(b)では左右に移動させる事で、それぞれの環境でスプレッドの高さ変化と揺れを生じさせている。そして、画像センサにより (x_s, y_s) と d を計測し、計測に用いた画像から求めた真値と比較する事で、精度の検証を行った。この時、同時に照明条件の変化が計測精度に与える影響も検証するために、異なる3つの照明条件で計測を行った。Fig.7は実験に使用したテンプレート(a)と、各条件下における画像内のランドマーク(b)~(d)を示しており、(b)はテン

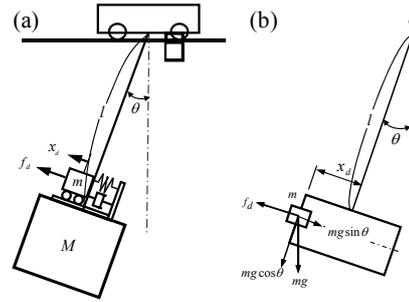


Fig.5 Dynamic model of the anti-sway controller (a) Schematic diagram (b) Geometrical representation

Table 1 Parameters for anti-sway controller design

Parameter	Value
C_s	0.005324[N's/m]
C_d	1.586[N's/m]
k_d	0.00095[N/m]
k_m	9.88[N/A]
M	0.565[kg]
m	0.095[kg]
l	0.40[m]

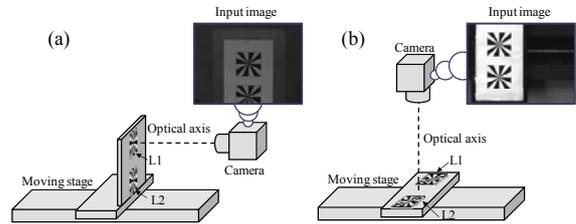


Fig.6 Experimental setups for evaluating measurement precision (a) setup for variation in height (b) setup for variation in displacement

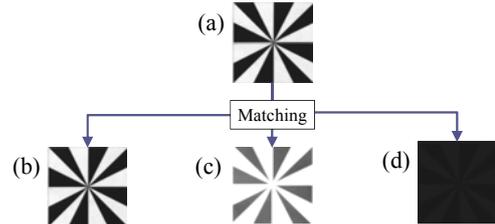


Fig.7 Template and landmarks under three lighting conditions (a) template obtained in an ordinary indoor condition (b) landmark in the same condition as the template (c) in a lighter condition (d) in a darker condition

Table 2 Sensor parameters used in the experiment

Parameter	Value
Camera image size (W×H)	640×480 [pixels]
Template size (W×H)	34×34 [pixels]
Pixel size: p	7.4 [μm/pixel]
Focal length: f	12.61 [mm]
Distance between landmarks: D	70 [mm]
Processing speed	110 [fps]

プレートと同一の照明条件、(c)は(b)に照明を加えた条件、(d)は照明を使用しない条件の画像となっている。実験時の画像センサのパラメータはTable2の通りである。画像センサの計測速度は、使用したカメラのフレームレートと同様の110[fps]である。

実験の結果、Fig.6(a)の環境でスプレッド高さを586[mm]から876[mm]まで変化させた際、誤差の最大値・最小値はそれぞれ、 x_s で0.0[pixel]、-1.0[pixel]、 y_s で0.8[pixel]、-0.4[pixel]、 d で0.8[pixel]、-1.5[pixel]となった。これらの誤差は小さく、画像センサがスプレッドの高さ変化に対応できていると判断できる。

Fig.8は、Fig.6(b)の環境でスプレッドの揺れが生じた際の計測誤差を示す。Fig.8(a)、(b)は x_s と y_s の計測誤差を、Fig.8(c)は d の計測誤差をそれぞれ示している。各グラフの横軸はスプレッドの変位を、縦軸は誤差を取り、Fig.6に示した3つの照明条件での誤差の平均値と最大値・最小値を合わせて示している。実験の結果、スプレッドの変位-100[mm]から+80[mm]までの変化の中で、誤差の最大値・最小値はそれぞれ、 x_s で1.5[pixel]、-1.5[pixel]、 y_s で1.0[pixel]、-1.0[pixel]、 d で1.0[pixel]、-2.0[pixel]となった。さ

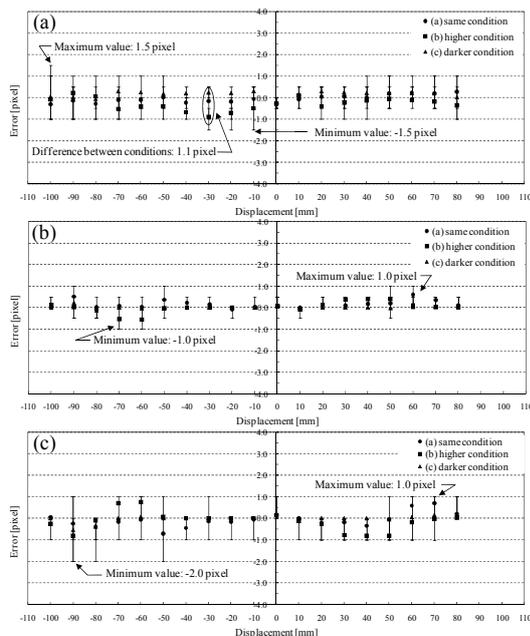


Fig.8 Experimental results when the landmark is swayed (a) measurement error of x_s , (b) measurement error of y_s , (c) measurement error of d

らに、計測点ごとの照明条件の変化による誤差の平均値の差は Fig.8 (a) の-30[mm]で最大 1.1[pixel]であり、照明条件の変化による誤差の変動は小さい。以上の事から、画像センサは照明条件の変化にも対応できていると言える。

さらに、実環境を想定した静的な計測実験を行った。実験は屋内の廊下で行い、スプレッダと見立てた板をカメラから 20[m]離れた位置に置き、横方向に 10[mm]ずつ移動させながら位置計測を行った。実験に使用した画像センサのパラメータは、 $p=5.5[\mu\text{m}]$, $f=50[\text{mm}]$, $D=800[\text{mm}]$ であり、それ以外は Table1 と同様である。実験の結果、スプレッダ位置(X_s, Y_s, Z_s)の絶対誤差の最大は、それぞれ、3.1[mm], 2.2[mm], 94.6[mm]となった。結果より、実環境においても画像センサはスプレッダの揺れに関して要求されるミリオーダーの精度を期待できる事が分かった。

5.2. モデルクレーン上での揺れ抑止

揺れ抑止システムの有用性を検証するため、モデルクレーン上で揺れ抑止制御を行った。Fig.9(a)は使用したモデルクレーンを示しており、システムは同図(b)に示すように配置されている。揺れ抑止制御装置はトロリの移動方向のスプレッダ揺れ X_s を抑止するように配置されており、画像センサは計測した X_s を制御装置に送信している。なお、PC はクレーン外部に設置されている。実験で使用した画像センサのパラメータは Table 2 と同様であり、制御装置のパラメータは Table 1 と(10)式の通りである。Fig.10 は揺れ抑止結果を示している。Fig.10(a)は、揺れ抑止制御装置を動作させず、手動操縦でスプレッダの高さ変化やトロリの移動を行った際に画像センサが計測したスプレッダの揺れである。この時、スプレッダの高さは 500[mm]から 750[mm]の間で変化させている。それに対し、Fig.10(b)は、揺れ抑止制御装置を動作させて、同様に操縦した際に計測したスプレッダの揺れである。両図ともに手動操縦のため、揺れの発生位置は異なるが、Fig.10(b)ではその揺れが速やかに抑止されている事が明らかである。制御装置はFig.10(c)に示す様に、揺れの発生時に大きく重りを移動させている。これにより、速やかな揺れ抑止が実現されている。

6. 結論

本論文では、コンテナ荷役の効率化を実現するために、クレーンスプレッダの揺れ抑止システムについて述べた。従来の要素技術は自動化を目的として開発されている事から、手動操縦との親和性に問題があった。本研究では、計測精度の優れた画像センサを提案し、スプレッダに設置するタイプの揺れ抑止制御装置との統合により、手動操縦との親和性を持った揺れ抑止システムを構築した。

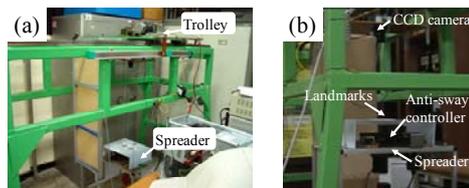


Fig.9 Crane model containing the proposed anti-sway system (a) overview image of the crane model (b) configuration of the anti-sway system

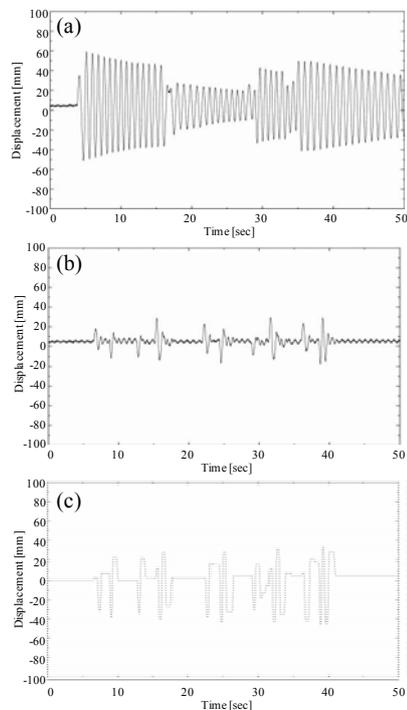


Fig.10 Experimental result of anti-sway control (a) sway motion of the crane without the anti-sway controller (b) sway motion with the anti-sway controller (c) Displacement of the damper mass

画像センサは、屋外で使用する際に問題となる照明条件の変化に対し、テンプレートマッチングの一手法であるベクトル符号相関法により対応した。さらに、スプレッダの高さ変化には、画像内の拡大・縮小に対し中心部の形状が変化しないランドマークを用いて対応した。実験から、画像センサの基本的な計測精度と共に、照明条件の変化やスプレッダの高さ変化への頑健性が証明された。さらに、実環境を想定した環境でも、要求されるミリオーダーの精度を実現できる事も示された。

揺れ抑止システムについては、モデルクレーン上にて行った制御実験から、手動操縦時における揺れ抑止性能が確認された。結果として、揺れ抑止システムはスプレッダの揺れを初期段階で抑止できた。この事から、クレーン荷役の効率化を実現する上で、本揺れ抑止システムが高い実用性を有すると言える。

参考文献

- 1) 手塚信一：港湾荷役, Vol.52 (2006) pp.340-348.
- 2) W. Cheng, et al.: Proc. of the ACC (1993) pp.2562-2566.
- 3) N. Nomura, et al.: Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan(D), Vol. 17 (1997) pp.1341-1347.
- 4) H. Yoshikawa, et al.: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, Vol. 38 (2001) pp. 67-72.
- 5) 吉田靖夫, 平野正樹, 富田隆之, 手嶋博文：計測自動制御学会論文集, Vol. 41 (2005) pp. 527-532.
- 6) H. Kawai et al.: Proc. SPIE, Vol. 6794 (2007) pp.67944Z
- 7) 川井秀樹, 崔龍雲, 伊与田健敏, 久保田謙：計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, Vol. 38 (2006) pp.55-56.
- 8) 村瀬一朗, 金子俊一, 五十嵐悟：電子情報通信学会誌 D-II, Vol. 83-D-II (2000) pp.1323-1331
- 9) 美多勉：H_∞制御, 昭晃堂 (1994) pp. 5-16.