

視覚フィードバックによる天井走行クレーン制御

富田 隆之*, 吉田 靖夫**

Overhead Traveling Crane Control Using Visual Feedback

Takayuki TOMIDA* and Yasuo YOSHIDA **

(Received November 25, 2003)

This paper describes positioning and swing suppression of a suspended load which is carried by a overhead traveling crane with hoisting motion using visual feedback control. The test visual sensor model is a servo vision-unit with four-degree-of-freedom that has two CCD cameras and tracks the crane load. The overhead traveling crane model has five-degree-of-freedom of x, y trolley displacements, hoisting rope length, load swing and swing direction angles. The stereo vision-unit measuring the coordinate values of the suspended load is controlled to track the load. Using visual feedback data obtained from stereo vision-unit, positioning and swing suppression are controlled by actuating the trolley traveling and rope hoisting.

Keywords: visual feedback, stereo vision, overhead traveling crane, position control, vibration suppression control, digital control

1. 結 論

天井走行クレーンはいろいろな産業分野において広く利用されており、クレーン搬送品は作業効率と安全のため、揺れずにその目的位置にまで搬送されなければならない。熟練オペレータ不足、高精度化、安全性向上の要求に対応する方法として自動化運転が考えられる。自動化のためには揺れ角を計測するセンサーが必要である。巻上げ式天井クレーンの場合、ロープ巻上げの上下動をしながら揺れは2方向に生じるため、クレーン設置センサーは複雑なものとなる。ここでは、非接触センサーとして CCD カメラを用いたステレオビジョン装置を試作¹⁾⁴⁾し、視覚フィードバックによる天井クレーン制御を試みた。試作の視覚センサーは2台の CCD カメラを有する4自由度ステレオビジョン装置であり、天井クレーンは x, y 方向トロリー走行変位・巻上げロープ長・吊り荷揺れ角と揺れ方向の5自由度モデルである。ビジョン装置にて吊り荷3次元座標値を計測し吊り荷の追従制御を行なうと共に、トロリー走行と巻上げ制御操作により吊り荷の位置決めと揺れ振動防止を行なった結果を報告する。

2. 理 論

2. 1 モデルと運動方程式

図1は、視覚センサーと天井走行クレーンを示す。視覚センサーは2台の CCD カメラを用い、追跡(θ_1 、 θ_2)と注視(θ_3 、 θ_4)を行う。視覚センサーによってカメラで吊り荷を認識させた後、吊り荷の追跡注視と位置計測を行った。天井走行クレーンモデルは、直行する2つのスライドガイドレールを走行するトロリーと吊り荷巻上げ装置より構成される。トロリー位置 x と y は駆動モータのタコジェネレータで計測し、吊り荷振れ角 θ と振れ方向角 ϕ 、ロープ長さ l はカメラの視覚データより算出した吊り荷の3次元座標値から求めた。これらの情報をもとに連続時間系の極指定レギュレータコントローラをデジタル再設計で離散化して求めた可変デジタルゲインを用い、トロリー走行と、ロープ巻上げのモータ速度指令方式による吊り荷の位置決めと揺れ防止制御を行った。

走行クレーンの運動方程式は次式で表される。ここで、 x 方向と y 方向の揺れ角を α と β とする。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ 0 & M_{22} & 0 & M_{24} & M_{25} \\ M_{13} & 0 & M_{33} & 0 & 0 \\ M_{14} & M_{24} & 0 & M_{44} & 0 \\ M_{15} & M_{25} & 0 & 0 & M_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_\alpha \\ h_\beta \\ h_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \\ 0 \\ F_l \end{bmatrix} \dots (1)$$

*機械工学専攻大学院生(Graduate student, Department of Mechanical Engineering)

**機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

$$\begin{aligned}
M_{11} &= M_x + m, M_{13} = ml \cos \alpha \cos \beta, M_{14} = -ml \sin \alpha \sin \beta, \\
M_{15} &= m \sin \alpha \cos \beta, M_{22} = M_y + m, M_{24} = ml \cos \beta, \\
M_{25} &= m \sin \beta, M_{33} = ml^2 \cos^2 \beta, M_{44} = ml^2, M_{55} = m \\
h_x &= -ml \sin \alpha \cos \beta (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + 2m(-l\dot{\alpha}\dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta \\
&\quad + \dot{\alpha} \dot{l} \cos \alpha \cos \beta - \dot{\beta} \dot{l} \sin \alpha \sin \beta) \\
h_y &= -ml \sin \beta \cdot \dot{\beta}^2 + 2m\dot{\beta} \dot{l} \cos \beta \\
h_\alpha &= -2\dot{\alpha}\dot{\beta} ml^2 \cos \beta \sin \beta + 2\dot{\alpha} \dot{l} ml \cos^2 \beta + mgl \sin \alpha \cos \beta \\
h_\beta &= ml^2 \cos \beta \sin \beta \cdot \dot{\beta}^2 + 2\dot{\beta} \dot{l} ml + mgl \cos \alpha \sin \beta \\
h_l &= -ml(\dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta + \dot{\beta}^2) - mg \cos \alpha \cos \beta
\end{aligned}$$

角度 α 、 β を微小とすると、運動方程式の右辺外力項がゼロである第3式と第4式は次式となる。

$$\ddot{x} + l\ddot{\alpha} + 2\dot{\alpha}\dot{l} + g\alpha = 0 \quad \dots(2)$$

$$\ddot{y} + l\ddot{\beta} + 2\dot{\beta}\dot{l} + g\beta = 0 \quad \dots(3)$$

ロープ変化 $\dot{l}$ が与えられているとき(2)式は x と α 、(3)式は y と β の動的連成をあらわす。

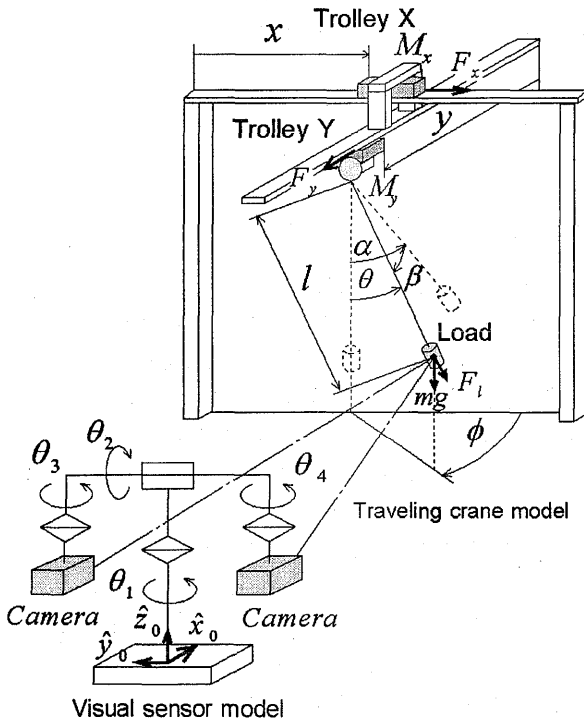


Fig. 1 Experimental apparatus

2. 2 制御方法

走行クレーンのロープ長 l が目標値 l_d に追従するような巻上げ指令速度 v_l を考える。 $\dot{l} = v_l$ をもとに、デジタルコントローラを求める。

$$v_{lk} = k_{ld}(l_d - l_k) \quad \dots(4)$$

ここで、 $k_{ld} = (1 - e^{\sigma T})/T$ はデジタルゲインであり、 $\sigma (< 0)$ は連続時間系における指定極である。

ロープの指定極が求められたので、次に、 x 、 y の各方向の位置決めと揺れ防止を考える。 $\ddot{x} = u_x$ 、 $\ddot{y} = u_y$ とし、トロリー駆動を速度指定方式とする。 x と α 、 y と β については各々(2)式と(3)式にて関係づけられているので、これらをもとに状態式を作成する。

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + bu_x \quad \dots(5)$$

$$\dot{\bar{y}} = A\bar{y} + bu_y \quad \dots(6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g/l & 0 & -2\dot{l}/l \end{bmatrix}$$

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}, \bar{y} = \begin{bmatrix} y \\ \beta \\ \dot{y} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1/l \end{bmatrix}$$

トロリー位置 x 、 y が目標値 x_d 、 y_d 、振れ角 α 、 β が目標値ゼロに追従するようなサーボコントローラは次式となる。

$$u_{xk} = G_d [x_d - x_k \quad -\alpha_k \quad -\dot{x}_k \quad -\dot{\alpha}_k]^T \quad \dots(7)$$

$$u_{yk} = G_d [y_d - y_k \quad -\beta_k \quad -\dot{y}_k \quad -\dot{\beta}_k]^T \quad \dots(8)$$

ここで、 $G_d = [k_{1d} \quad k_{2d} \quad k_{3d} \quad k_{4d}]$ はデジタルゲインであり、連続時間系での極指定により求めたアナログレギュレータゲイン G_a からデジタル再設計を行って求めることができる³⁴⁾。

$$G_d = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} G_a q \right)^{-1} G_a (I + p) \quad \dots(9)$$

ここで、

$$p = \left(I - \frac{T}{2} A \right)^{-1} \left(I + \frac{T}{2} A \right), q = T \left(I - \frac{T}{2} A \right)^{-1} b$$

トロリーの指令速度は(7)、(8)式を積分して得られる。

$$v_{xk} = v_{x,k-1} + u_{xk} T \quad \dots(10)$$

$$v_{yk} = v_{y,k-1} + u_{yk} T \quad \dots(11)$$

次に、ビジョン装置について述べる。吊り荷の3次元位置は、2つのカメラのCCD画像データ、焦点距離、装置の角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を用いて求めることができる。この吊り荷座標値は走行クレーンの制御に用いる一方、吊り荷を追従して注視制御を行うために用いる。すなわち、2つのカメラ光軸の交点が常に吊り荷中心と一致するような目標角度 $\theta_{1d} \sim \theta_{4d}$ を吊り荷3次元位置から逆運動学にて求める。 $\theta_1 \sim \theta_4$ を目標角 $\theta_{1d} \sim \theta_{4d}$ に追従するようなデジタルコントローラは $\ddot{\theta}_i = u_i$ ($i = 1 \sim 4$) より得られる。

$$u_{ik} = k_{c1}(\theta_{idk} - \theta_{ik}) - k_{c2}\dot{\theta}_{ik} \quad (i = 1 \sim 4) \quad \dots(12)$$

$$\begin{aligned} k_{c1} &= (1 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma k T) + e^{2\sigma k T}) / T^2 \\ k_{c2} &= (3 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma k T) - e^{2\sigma T}) / 2T \end{aligned}$$

ここで、 k_{c1} 、 k_{c2} はディジタルゲインであり、連続時間指定極 $s = \sigma(1 \pm jk)$ によって定められる。ビジョン装置の指令速度はこれを積分して得られる。

$$\mathbf{v}_{ik} = \mathbf{v}_{i,k-1} + \mathbf{u}_{ik}T \quad \dots(13)$$

図 2 にブロック線図を示す。

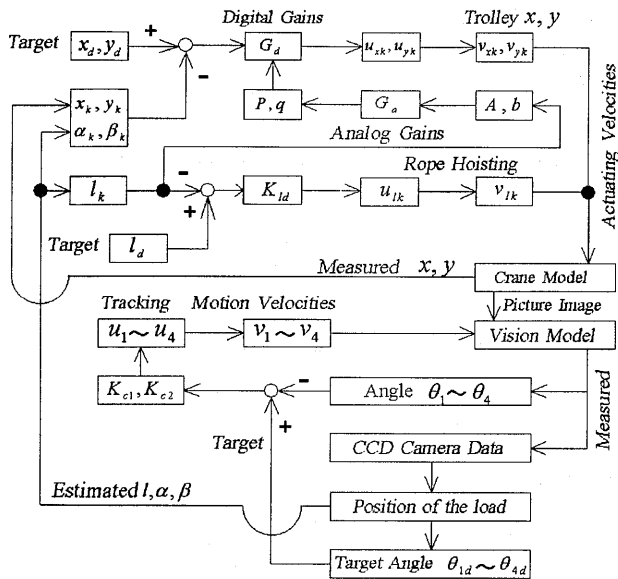


Fig. 2 Block Diagram

なお、角度 ϕ 、 θ および α 、 β は以下のようにして求めた。すなわち、トロリー変位を x 、 y 、吊り荷3次元位置を p_x 、 p_y 、 p_z とすると、揺れ角 θ 、揺れ方向 ϕ は次式となる。

$$\begin{aligned}\phi &= A \tan 2(p_y - y, p_x - x) \\ \theta &= A \tan 2\left(\sqrt{(p_x - x)^2 + (p_y - y)^2}, p_z\right) \\ \alpha &= A \tan 2(\cos \phi \sin \theta, \cos \theta) \\ \beta &= A \tan 2\left(\sin \phi \sin \theta, \sqrt{\cos^2 \theta + \cos^2 \phi \sin^2 \theta}\right)\end{aligned}$$

3. シミュレーションと実験結果

ロープ巻上げを伴うトロリー x および y による搬送について、制御ありなしの実験とシミュレーションを行った。

ビジョン装置の2台のカメラは、はじめに $\hat{y}_0$ 軸上に配置され、トロリー x 、 y の変位は $\hat{y}_0$ 、 $\hat{x}_0$ と各々平行で反対方向に走行させた。ビジョン装置とトロリー x までの距離は $\hat{x}_0$ 方向で約2.2mである。

実験でのサンプリングタイムは**0.2秒**、シミュレーションのルンゲタイムは**0.05秒**を用いた。ビジョン装置の視覚デ

一タは、実験においてはフィードバックデータとして使用されるが、シミュレーションにおいては考慮されていない。

下記において制御なしとは、トロリー x 、 y に加減速強制変位を与えて搬送させた場合であり、制御ありとはトロリーにフィードバックゲインを与えて搬送と揺れ制御を行った場合と定義する。従って、ロープ巻上げおよびビジョン装置は、上記で定義した制御ありなしに関わらず常に制御している。

制御フィードバックに関して、トロリー x 、 y については、 $s = -1 \pm j3$, -1 , -2 の4極、ロープ長 l については、 $s = -1$ の1極、ビジョン装置については、 $s = -4 \pm 4$ の2極を各々 $\theta_1 \sim \theta_4$ に指定して、これらをもとにデジタルゲインを求めた。走行クレーンのトロリー x および y は初期位置ゼロから目標位置 0.6m まで、ロープは初期長さ 1.25m から 1m までの巻き上げ搬送を行った。

図3から図7までは実験結果を実線で、シミュレーション結果を破線で、制御ありを太線で、制御なしを細線でそれぞれ示す。

図3はトロリー x の応答を示している。制御なしでは、実験開始後約3秒で目標位置 **0.6m** に到達するような強制変位を与えた。制御ありでは、約5秒後に目標位置に到達しすぎ行き過ぎの状態であるが、目標位置を保って停止している。図4トロリー y の応答を示している。制御なしでは、トロリー x と同様の強制変位を与えた。制御ありでは、約7秒後に目標位置手前近くに到達し、そのままの位置にて停止している。トロリー y の走行方向は、視覚センサーの両カメラの奥行き方向の移動に相当し、左右方向に比べ精度は良くない^(1,2)ことに起因すると考えられる。図5は吊り荷揺れ角を示している。制御なしでは最後まで **10deg** という大きな揺れ角が残っているが、制御ありでは約7秒後には揺れは **1deg** 程度に抑えられていることがわかる。図6は吊り荷揺れ方向を示している。図7はロープ長応答を示している。実験開始後約5秒後に目標長さ **1m** になっている。

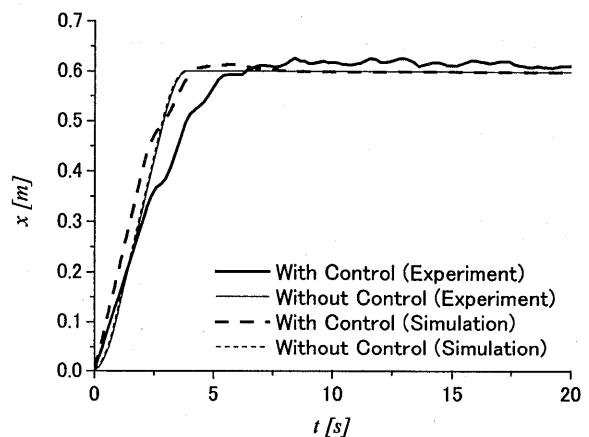


Fig.3 Response of trolley x displacement

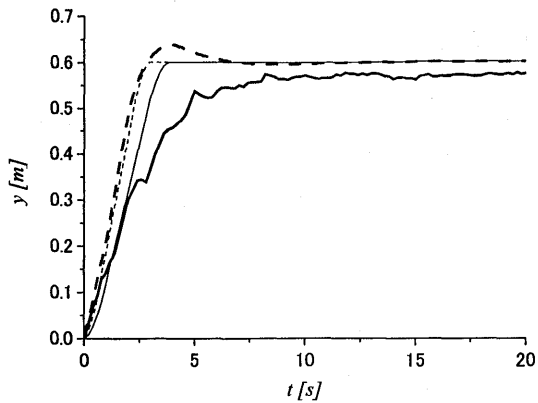


Fig. 4 Response of trolley y displacement

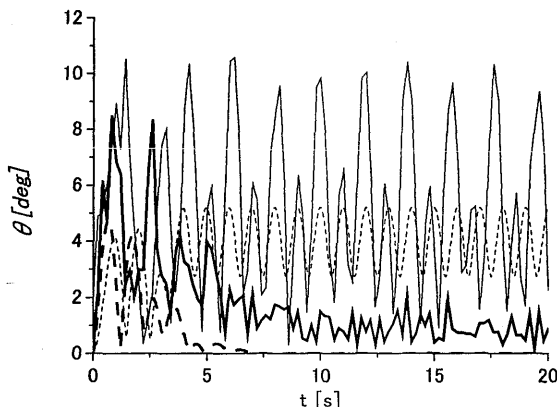


Fig. 5 Response of load swing angle

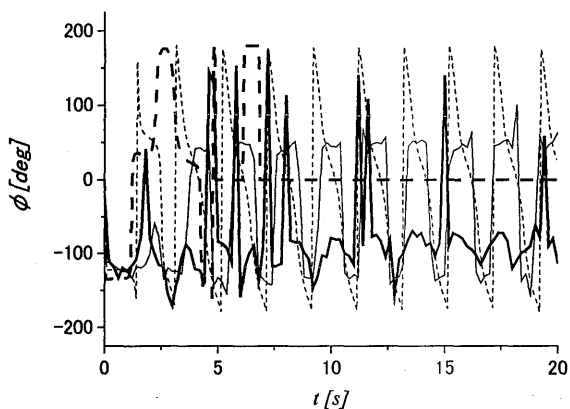


Fig. 6 Response of load swing direction

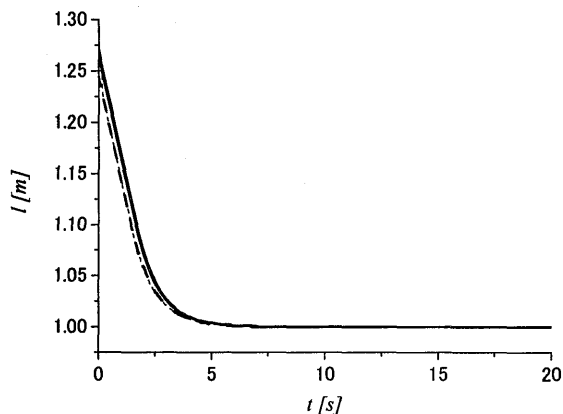


Fig. 7 Response of rope length

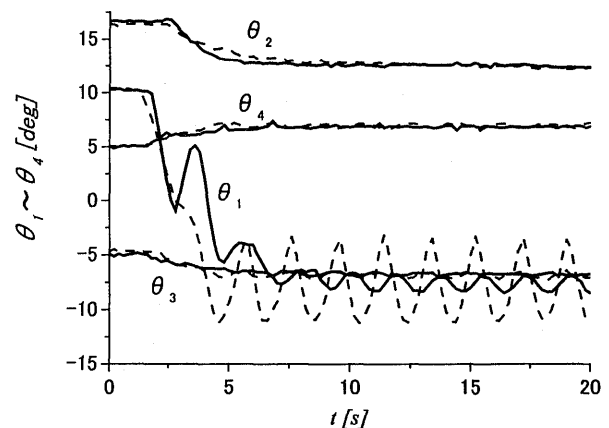


Fig. 8 Response of visual sensor actuating angles

図8は実験におけるビジョン装置の各駆動角を示している。実線は制御ありを破線は制御なしを示している。 θ_1 はトロリー x 、 θ_2 はロープ長、 θ_3 、 θ_4 はトロリー y とそれぞれの変化に応答して駆動していることがわかる。

4. まとめ

視覚センサにて吊り荷座標値を計測し、吊り荷追従制御を行うと共に、トロリー走行と巻上げ制御操作による吊り荷位置決めと揺れ防止を行い用いた制御手法が有効であることを示した。しかし、トロリー y の実験結果に示すように、ビジョン装置の奥行き方向の変位に対する精度向上が望まれる。これについては、ビジョン装置を走行クレーンに対する設置方法やズームレンズによる精度向上などが考えられ今後の課題である。

参考文献

- 1) 吉田靖夫, 谷口武, 青木孝志: 能動ステレオ視による移動点の実時間追跡, 中部大学工学部紀要, 第34巻, pp.1-5, 1998
- 2) 吉田靖夫, 谷口武: アクティブステレオビジョンによる3次元移動点の追従制御, 日本機械学会東海支部第47期総会講演会講演論文集, No.983-1, pp.281-282, 1998
- 3) 吉田靖夫, 平野正樹: ステレオ視による巻上げ式走行クレーンの制御, 日本機械学会東海支部第50期総会講演会講演論文集, No.013-1, pp.43-44, 2001
- 4) 吉田靖夫, 富田隆之, 手嶋博文: 走行クレーンの視覚フィードバック制御, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集, pp.269-270