走行クレーンの自動衝突回避のための安全な停止制御*

山本 元司^{*1}, 本田 英司^{*2}, 毛利 彰^{*1}

Safe Emergency Stop Control for Overhead Crane

Motoji YAMAMOTO^{*3}, Eiji HONDA and Akira MOHRI^{*3} Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

This paper proposes a safe emergency stop control for a collision avoidance of gantry cranes. The crane mechanism is widely used for handling heavy load, however the load swings easily. This leads to possibilities of collision of load with obstacles during the crane work. Emergency stop for collision avoidance is, however, also very dangerous. Because residual sway after the stop is easy to be caused by the stop. Therefore, this paper presents an anti-sway control method when the emergency stop. The method is based on inverse dynamics of the crane system. Thus the inverse dynamics problem is also discussed. Using the inverse dynamics calculation and a real-time obstacle detection system, a feed-forward based emergency stop control method is proposed. Experimental result using the method shows an effectiveness for the emergency stop control problem.

Key Words: Overhead Crane, Emergency Stop, Anti-Sway Control, Inverse Dynamics

1. はじめに

走行型クレーンに代表されるクレーン装置は比較的単純なロープ吊り下げ型構造で搬送・位置決めが可能であり、特に重量物のハンドリングに多く用いられている。しかしながら、その多くが1本ロープもしくは等価的に1本ロープで懸垂物を吊り下げる構造のため、吊り荷が揺れやすいことが欠点となっている。このことにより作業効率を悪くし、また、熟練作業者を必要としている。また、特に吊り荷を移動する作業空間内に他の作業員や工作機械などの障害物が存在する場合、危険な作業となっている。このため、吊り荷をいったん、障害物と干渉しない位置まで垂直に上昇させ、次に水平に移動させ、目的位置上方でいったん静止させた後、垂直に降下させる吊り荷移動動作(図1のpath(a))が多くおこなわれている。このとき作業効率を上げるために、上昇しながら水平方向にも移動させる場合(図1のpath(b))は、障害物との干渉の危険性が増加する。本論文ではこのような作業においても安全な作業が実現できるクレーンの安全停止制御手法を提案する。

クレーン装置はロープ長さの変化によりその動特性

Fig. 1 Conventional and efficient paths of crane work

が大きく変わる非線形システムであり、振れ止めのための制御は簡単ではない。この走行型クレーンの振れ止め制御に関して、最適制御理論に基づく手法⁽¹⁾⁽²⁾や動作点近傍で線形化したのち最適レギュレータなどの線形制御則を適用する方法⁽³⁾⁽⁴⁾、線形制御則のゲインをロープ長さに応じて切り替える方法⁽⁵⁾、可変ロープ長を時変系と考え非線形制御則を適用する方法⁽⁶⁾などが提案されている。

障害物を考慮した安全なクレーン制御手法に関しては、オフラインで障害物環境をモデル化し、安全な経路を生成した後、クレーンをこの経路に沿って制御する手法は提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾ものの、本研究で検討するような、動作途中で緊急停止する場合において、揺れることなく安全に実時間で制御する手法を検討している研究はこれまでほとんどなされていない。一方、筆者らは走行型クレーンの逆動力学問題が解析的に解けることを示し、この逆動力学解に基づいて、非線形

* 原稿受付 2004 年 11 月 18 日。

^{*1} 正員、九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*2} 九州大学大学院工学府。

E-mail: yama@mech.kyushu-u.ac.jp

Fig. 2 Gantry crane model

動力学を線形化することで、ロープ長変化にもシステムの動力学が変化しない厳密に線形化された制御システムを導出している (9)(10)。

本論文では、この逆動力学計算を応用し、緊急停止に対しても揺れを生じない制御手法を提案する。ここで、目標軌道を緊急停止に応じて単純に変更し、制御しただけでは、停止位置で大きな残留振動を生成する可能性が高い。そこでまず、与えられた目標軌道に対して、吊り荷が揺れないようななめらかな修正軌道を実時間で作成し、この軌道に対する逆動力学問題を解く。この解を用いてクレーンのトロリー位置とロープ長を制御すれば、クレーン吊り荷系の非線形動力学が完全に補償されるため、揺れを生じないで安全に吊り荷を停止させることができる。

本論文は以下のように構成される。まず、走行型クレーンの逆動力学解を示す。障害物を実時間で検出するためには適切なセンサシステムが必要である。そこで本研究で用いるステレオカメラによる障害物検出法について述べる。ここでは、実時間で吊り荷と障害物の干渉チェックが必要であり、このための計算量ができるだけ低減することが重要となる。そこで、この問題に適する高速な干渉チェック手法を提案する。さらに、衝突する危険があると判断されたときの衝突位置の予測と回避制御手法を示す。提案される手法はシミュレーションと実験により有効性が検討される。

2. 走行型クレーンの逆動力学

ここでは、クレーン機構を一種のマニピュレータと考えると、その逆動力学問題を解析する。この場合の逆動力学問題とは、吊り荷位置の運動が与えられた時に、その運動を実現するためのロープ長およびロープ繰り出し点位置の時間軌道を求め、さらにそれらの動作に必要な各アクチュエータのトルクを求める問題である。以下の議論では、図2に示す走行型クレーンについて述べるが、旋回型クレーンにおいてもほぼ同様の議論が可能である。また、ここでは簡単のために吊り荷は質点として扱い、ロープは吊り荷に比べて質量

が十分小さいとし、曲げモーメントを発生せず、伸びないものとして定式化を行う。

2.1 ロープ張力とロープ繰り出し点の計算 吊り荷位置を $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ とし、ロープ張力を $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ とする。このとき吊り荷の運動方程式は次式で表される。

$$m(\ddot{\mathbf{p}} - \mathbf{g}) = \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、 m は吊り荷の質量、 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ は重力加速度ベクトルである。

ロープ繰り出し点は横行桁とトロリーを操作することにより、図2の x - y 平面上を移動するものとする。このとき、ロープ繰り出し点位置を $\mathbf{q}$ とすると、 $\mathbf{q}$ は吊り荷位置 $\mathbf{p}$ から見てロープ張力 $\mathbf{f}$ の方向の延長線上にあり、式(1)を満たすので、

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} p_x - p_z \frac{\dot{p}_x}{\dot{p}_z + g} \\ p_y - p_z \frac{\dot{p}_y}{\dot{p}_z + g} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、吊り荷は重力加速度以上の加速度を下向きに発生できないので $\mathbf{p}$ は次式を満たす必要がある。

$$\ddot{p}_z > -g \quad (3)$$

上式を満たす吊り荷軌道 $\mathbf{p}(t)$ が与えられれば、式(2)によりロープ繰り出し点位置 (軌道) $\mathbf{q}(t)$ が決定される。

2.2 トロリーおよび横行桁の駆動力 ロープ繰り出し点の軌道とロープ張力により、トロリー駆動力の F_x および横行桁の駆動力 F_y を次式により計算することができる。

$$F_x = M_t \ddot{q}_x + m \ddot{p}_x \quad (4)$$

$$F_y = (M_g + M_t) \ddot{q}_y + m \ddot{p}_y \quad (5)$$

ここで、 M_t はトロリー質量、 M_g は横行桁質量を表す。また、ロープ長 l は

$$l = |\mathbf{q} - \mathbf{p}| \quad (6)$$

と書けるので、ロープを巻き上げるプーリーのトルク N は次式から求められる。

$$N = |f| r - I \ddot{r} \quad (7)$$

ただし、 r はプーリー半径、 I はプーリーの慣性モーメントである。

このようにして、吊り荷の軌道 $\mathbf{p}(t)$ が与えられたとき、式(2),(6)からロープ繰り出し点位置およびロープ長を、また式(4),(5),(7)からそれらを駆動する力とトルクを求めることができる。

2.3 吊り荷軌道に関する制約 式(2)から $\ddot{p}$ を含んでおり、式(4)~(7)から F_x, F_y, N が $\ddot{q}$ を含んでいることがわかる。したがって、それぞれのアクチュエータのトルクには $\ddot{p}$ の4階微分の項が含まれ、任意の入力（トルリ駆動力、プーリトルク）に対して吊り荷の運動は必ず4階微分可能な軌道となる。逆に、逆動力学計算をするためには吊り荷軌道 $\ddot{p}$ は4階微分可能なものでなければならない。また、軌道の始端と終端において吊り荷が静止するときは $\dot{p}=0, \dot{q}=0, l=0$ となる目標軌道を与える必要がある。

3. 軌道追従制御

ここでは、吊り荷の目標軌道 $p_d(t)$ が与えられた時に、逆動力学計算法を用いて吊り荷を目標軌道に追従させる制御手法を示す。

3.1 実時間軌道修正法 前章により、逆動力学計算を行うためには、吊り荷の目標軌道 p_d として4階微分可能ななめらかさを有するものを与えればよいことがわかった。しかし、ここでは緊急停止時など目標軌道が実時間で急に変化する場合や、吊り荷目標動作がジョイスティックなどで与えられる場合を考慮し、目標軌道 p_d のなめらかさを、はじめは指定しないことにする。この場合、一般には与えられた p_d に追従しかつ、4階微分可能である軌道 p が揺れないよう滑らかに軌道制御するために必要となる。そこで、ここでは p_d を次式であらわされる仮想的な内部モデルに入力し、これを実時間で計算することで、常に変化する目標軌道に対して4階微分可能ななめらかさを有する、新たな吊り荷目標軌道 p を得る。

$$\frac{d^4 p}{dt^4} = \alpha_0(p_d - p) - \alpha_1 \frac{dp}{dt} - \alpha_2 \frac{d^2 p}{dt^2} - \alpha_3 \frac{d^3 p}{dt^3} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ は内部モデルの特性を決める定数である。

3.2 逆動力学補償フィードフォワード制御 前節で得られた軌道 $p(t)$ を修正目標軌道と呼ぶことにする。この軌道を逆動力学計算式(2)~(7)に代入することで、修正目標軌道を実現するトルリ巻き上げトルク、トルリ駆動力やロープ長さ、トルリ位置を計算できる。これらの操作量をロープ長さ、トルリ位置のサーボ系目標軌道としてクレーンを制御する。このときのブロック線図を図3に示す。図の中で G は式(8)

$$G(s) = \frac{\alpha_0}{s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s} \quad (9)$$

である。図3に示すように、動力学モデルが正確で、外乱がない場合には図中のB（クレーン装置の動力学）の部分はA（逆動力学計算）の部分により補償される

Fig. 3 Feed-forward control based on inverse dynamics

Fig. 4 Feed-forward control (without disturbance)

ため、図4の形にあらわすことができる。ここで図中の P_s は吊り荷の出力軌道を示す。このとき、吊り荷の運動はロープ長さなどのパラメータ変化の影響を受けず、応答特性は内部モデルのみによって支配される。従って、パラメータ $\alpha_0 \sim \alpha_3$ を適切に選ぶことで、吊り荷を揺れることなく目標軌道に追従させることができる。ただし、ここで言う揺れとはトルリーから見た相対的な揺れではなく、作業座標系の目標軌道を基準とする揺れを意味している。

式(8)における $\alpha_0 \sim \alpha_3$ のパラメータは、例えば、内部モデルの極配置から求めることができる。ただし、内部モデルが安定となるためには、すべての極は左半平面になければならない。具体例として、内部モデルが複素平面において $(-a, 0)$ に4重極を持つときには、特性方程式が

$$s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 = (s+a)^4 = 0 \quad (10)$$

となるため、 $\alpha_0 = a^4, \alpha_1 = 4a^3, \alpha_2 = 6a^2, \alpha_3 = 4a$ が得られる。極を複素平面左側に配置するほど応答が速くなるが、横行桁、トルリー、プーリーの急激な運動が必要となる。実際には制御系の性能を考慮して極を配置する。

4. ステレオカメラによる障害物検出

クレーン作業中、作業域に急に他の作業者が入り込んだ場合を想定する。このような場合にクレーンの緊急停止制御を自動的におこなうためには、実時間で障害物の検出が必要となる。一般に3次元空間内で障害物の大きさや形状を実時間で検出することは容易ではない。ここでは適当な周期で吊り荷やロープと障害物の干渉の可能性はあるかないかを判定することに

Fig. 5 Three dimensional stereo camera

Fig. 6 Raw image by Digiclops

する。

この目的での障害物実時間検出のため、ここではステレオカメラ Digiclops (Point Grey 社製:図 5) を使用する。レーザー光を利用した検出システムも考えられるが、3次元空間での障害物検出を容易に実現できるものとして画像処理を用いるものを選んだ。Digiclops は、3つの CCD カメラより構成され、それぞれのカメラ画像における視差に基づき、カメラから物体表面上の点までの距離を求めることができる。対応する点は相関演算により見いだしている。Digiclops による一つの原画像を図 6 に、これに対応する 320×240 画素の距離画像を図 7 に示す。これは距離に応じた 0~255 のデータを、グレイスケールで表示したものとなっている。

Digiclops を利用して障害物を検出するための準備として次のことをおこなった。

- 1) 距離画像の数値から実際の距離への変換式作成
- 2) ノイズ除去処理
- 3) カメラ幾何関係のキャリブレーションデータ (カメラパラメータ) 取得

上記、1) と 2) の処理をおこなった後の距離画像データを $d(u_i, v_i)$ と書くことにし、これをセンサ空間における障害物情報と言うことにする。ただし、 u_i, v_i は画像ピクセルの座標 (整数値) を表す。

Fig. 7 Distance image by Digiclops

5. 衝突の予測と停止制御

5-1 緊急停止の必要性 クレーン作業中での障害物との干渉の問題を考えると、障害物に関する情報が既知かどうかにより、緊急停止制御の有用性の状況が異なる。ここでは既知とは障害物がモデル化されており、場所と形状が予めわかっている場合を意味する。このとき、表 1 で示すように、クレーンを手動で運転する場合、既知の固定障害物であっても、手動運転の不正確さにより、障害物と吊り荷の衝突の可能性がある。自動の緊急停止機能は望ましい。自律搬送車のようにシステムとしては軌道がほぼ既知の場合の移動障害物の場合でも、運転者がその動作を常に把握することは実際には困難なため、緊急停止機能は必要である。また、他の作業者が動き回っているような未知の移動障害物の場合の手動運転時ではこの緊急停止機能の必要性が高い。さらに、未知の移動障害物が存在する場合は、自動運転の場合においても重要な機能と考えられる。この研究では緊急停止機能の必要性が高い、未知の移動障害物がある場合に対応できる緊急停止システムを検討することにする。

5-2 吊り荷とロープの通過領域 実時間で緊急停止すべきかを判断するため、障害物の検出とともに吊り荷とロープの現在位置を知る必要がある。この吊り荷位置とロープ位置検出のために、前出の障害物検出で用いる Digiclops のような外界センサにより測定する方法が考えられる。しかしながら、この検出物体に関しては他の障害物と吊り荷またはロープとの確実な区別が困難であり、ロープは細いためその検出は難しいことから、ここではクレーンシステムの内界センサと目標軌道により吊り荷とロープの位置を推定する方法を採用することにする。以下、その方法を示す。

いま、実時間で吊り荷やロープの現在位置を推定し、その時点で障害物との干渉が判定できても衝突回避の意味では手後れである。従って、現在位置や現在の目標軌道の情報などから一定時間後の吊り荷とロープの位置を推定する必要がある。ここでは、クレーンを 3.2

Table 1 Classification of necessity of emergency stop for crane system

condition of operation	(◎=necessary, ○=desirable, ×=unnecessary)		
	known fixed	known moving obstacle	unknown fixed or moving obstacle
manual operation	○	◎	◎
automatic operation	×	×	◎

Fig. 8 Prediction of collision

節で示した方法により制御する。前述のように外乱がなく、トロリ位置とロープ長の速度軌道为目标軌道通りに制御できれば、クレーンの吊り荷 $p(t)$ はある時間遅れを伴いながら目標軌道 $p_d(t)$ に沿って移動する。例えば、図8左で時刻 t のときの目標軌道は点Aであるがこのときの吊り荷の位置は点Bにあり、 Δt 遅れて点A (=点C) を通過することになる。このことを利用して、 Δt 後での吊り荷とロープの通過領域を推定することにする。

ジョイスティックでの手動運転の場合に、吊り荷の目標速度（この積分値が目標軌道）を実時間で指定する場合を考える。このとき時刻 t での目標軌道点 $p_d(t)$ が衝突するとわかった時点（図8右図では時刻 t^* ）で目標軌道を吊り荷が停止する軌道に変更する。障害物に吊り荷が接触しないようにするため、安全距離だけ離れて停止する必要がある。また、吊り荷の大きさと、干渉チェックのための画像センサ更新周期を考慮すると、点 $p_d(t)$ を大きさを有する球と考えて障害物との干渉を考えればよい。ここでその球の半径 r を次のように見積もる。

$$r = r_L + r_{img} + r_{safe} \quad (11)$$

ここで、 r_L は吊り荷を完全に覆う球の半径、 r_{img} は画像センサ更新周期内での吊り荷の移動を考慮するための距離、 r_{safe} は障害物手前で停止するための安全距離を表す。ここで r_{img} を現在時刻での目標軌道の速度 $v_d(t)$ 、加速度 $a_d(t)$ 、画像センサ更新周期 T_{img} を用いて次のように見積もる。

$$r_{img} = v_d(t)T_{img} + \frac{a_d(t)}{2}T_{img}^2 \quad (|v_d(t) + a_d(t)T_{img}| < v_{d \max}) \quad (12)$$

$$r_{img} = v_{d \max}T_{img} \quad (|v_d(t) + a_d(t)T_{img}| > v_{d \max}) \quad (13)$$

Fig. 9 Obstacle searching area

ここで、 $v_{d \max}$ は吊り荷の最大移動速度であり、あらかじめ指定されているものとする。

次にロープと障害物の干渉を考える。搬送作業中、ロープは弛まないとする、吊り荷位置とトロリのロープ引き出し点を結んだ線分上にロープが存在する。このうち、吊り荷位置は目標軌道を通過するために、予測可能であるが、トロリ位置はそのときの目標軌道によりどのような動作をするか予測が難しい。ここでは吊り荷とトロリが静止状態から、トロリを動作させることにより Δt 時間で吊り荷が $v_{d \max}$ になる場合のロープの振れ角 θ を最大の振れ角と仮定し、このときのトロリと吊り荷の偏差を求める。このときの偏差 r_{dif} は振れ角が大きくなるとすると

$$r_{dif} = l \sin \theta = \frac{v_{d \max} l}{g \Delta t} \quad (14)$$

である。ここで Δt は遅れ時間に相当しており、(10)式の仮想内部モデルを設定することにより近似的値を予測することができる。例えば(10)式の場合は $\Delta t = 1/a$ と見積もることができる。干渉チェックのための領域は、図9に示すように上記の r_{dif} に画像センサ更新周期を考慮した距離を追加した半径 r_{rope} の持つ円筒領域とする。ここで r_{rope} は

$$r_{rope} = r_{dif} + r_{img} + r_{safe} \quad (15)$$

干渉チェックの量を減らすために、障害物がある高さ ($h_{\max}$) 以上は存在しないとわかっている場合は、その高さ以上では干渉チェックをおこなわない。

Fig. 10 Camera and world coordinate frame

5.3 衝突可能性の判定 前節で推定された吊り荷およびロープ位置と、Digiclopsにより得られた障害物までの距離情報を用いて実時間での干渉チェックをおこなう。このとき、その方法として次の二つが考えられる。一つはDigiclopsから得られるセンサ空間での情報からワールド座標系での障害物の位置と形状を再現し、3次元の障害物マップを作成しこれを用いて干渉チェックをおこなう方法である。吊り荷とロープはワールド座標系で記述しているのが自然なので、容易に干渉チェックをおこなうことができる。もう一つの方法として、吊り荷とロープ位置の情報をセンサ空間にマッピングし、センサ空間内で干渉チェックをおこなうことが考えられる。前者の方法では、実時間ですべての障害物情報をセンサ空間からワールド座標系に変換し障害物マップを生成するため多大な計算時間を要する。後者の方法でもワールド座標系からセンサ空間への変換が必要であるが、変換データは吊り荷位置とロープ位置のみなので、後者の方が計算時間の点で有利であると考えられる。従って、ここではセンサ空間内で干渉チェックをする方法を採用し、以下ではワールド座標系で吊り荷位置とロープ位置をセンサ空間での値に変換する方法を示す。

まず、吊り荷とロープ存在位置をワールド座標系で離散点として ${}^w\mathbf{r}_i = ({}^wX_i, {}^wY_i, {}^wZ_i)^T$ と表記し、ワールド座標系でのカメラ原点を ${}^w\mathbf{r}_{c0}$ 、カメラ座標系での離散点の位置を ${}^c\mathbf{r}_i$ とすると、

$${}^w\mathbf{r}_i = {}^w\mathbf{r}_{c0} + {}^wR_C {}^c\mathbf{r}_i \quad (16)$$

wR_C はカメラ座標系からワールド座標系への回転変換行列である。この点 ${}^w\mathbf{r}_i$ をカメラ座標系で書くと

$${}^c\mathbf{r}_i = ({}^wR_C)^T ({}^w\mathbf{r}_i - {}^w\mathbf{r}_{c0}) \quad (17)$$

となる(図10参照)。カメラ座標系での点 ${}^c\mathbf{r}_i$ に対応する画像面座標 $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$ はカメラ座標と画像面座標が投影変換に従うとし、カメラ座標系における対応点を

${}^c\mathbf{r}_i = (c_{x_i}, c_{y_i}, c_{z_i})^T$ とすると

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_i \\ \hat{v}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{c_{x_i}}{c_{z_i}} f \\ \frac{c_{y_i}}{c_{z_i}} f \end{pmatrix} \quad (18)$$

ここで f はカメラの焦点距離を表す。ここで計算される座標点 $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$ は撮像面の位置をカメラ座標系で表現したものであり、4章で示した画像ピクセル座標値 (u_i, v_i) (u_i, v_i は整数値)への変換は

$$u_i = \text{int} \left(\frac{\hat{u}_i}{\hat{u}_{i\max}} \right) u_{i\max} \quad (19)$$

$$v_i = \text{int} \left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{v}_{i\max}} \right) v_{i\max} \quad (20)$$

となる。ただし $u_{i\max}, v_{i\max}$ は u, v 方向のピクセル最大値、 $\hat{u}_{i\max}, \hat{v}_{i\max}$ はセンサ面での u, v 方向の実寸値、 $\text{int}(\cdot)$ は実数 $\cdot$ を整数化する関数を表す。透視変換の幾何関係から、カメラから点 ${}^c\mathbf{r}_i$ までの距離 d_i は

$$d_i = \sqrt{c_{x_i}^2 + c_{y_i}^2 + c_{z_i}^2} \quad (21)$$

と書くことができる。以上よりワールド座標系での点が与えられたとき、画像面座標値 (u_i, v_i) での距離 d_i 、すなわちセンサ空間での値を計算することができる。これにより、センサからの障害物の距離情報 $\bar{d}_i$ が与えられたとき、もし

$$\bar{d}_i(u_i, v_i) > d_i(u_i, v_i) \quad (22)$$

であれば、障害物表面よりカメラ方向手前側に吊り荷とロープが存在することになり、このときに干渉の可能性はない。逆であれば干渉の可能性があるとわかる。これらの干渉可能性チェックは図9の探索域内のすべての離散点に対してになされる。

なお、吊り荷についても障害物として検出される可能性がある。この場合、常に干渉していると判断されることになる。従って、これについては吊り荷の推定位置と形状情報(既知と仮定)を用いて障害物とは判定しないことにする。

5.4 緊急停止制御 クレーン運転中は上記の干渉チェックをDigiclopsの距離画像取得周期ごとにおこなう。干渉の可能性がない場合は、ジョイスティック等より得られた目標軌道 $\mathbf{P}_d$ を用いて、4章で示した制御手法により引き続き制御する。干渉の可能性があればその時点で目標速度を0とする。このときの制御手法も4章で示したものと同一である。不連続な目標速度を与えてもなめらかに吊り荷はその点で停止するように自動的に制御される。干渉チェックはこのときも継続されており、もし干渉の可能性がなくなれば、ジョイスティックなどで与えられている目標速度通りに目標軌道 $\mathbf{P}_d$ を設定する。

Fig. 11 Experimental gantry crane

Fig. 12 Trajectory of load for the experiment-1

Fig. 13 Trajectory of load for the experiment-2

6. クレーン動作実験

提案した逆動力学に基づく制御手法と実時間緊急停止制御手法により、障害物がない場合と、障害物として作業域内に人が移動する場合を想定した実験をおこなった。実験装置の概略寸法と座標系設定を図 11 示す。

一つ目の実験として吊り荷の目標軌道を、目標速度としてジョイスティックからの入力で与え、ロープ長一定として x - y 平面内を動作させた場合の吊り荷の動作軌跡を図 12 に示す。

この実験では障害物がない場合において、指定した目標軌道通りに揺れることなく軌道追従が実現できるかを確かめた。図の中で x, y それぞれの座標軸でジョイスティックからの目標軌道 $p_d = (x_d, y_d)$ 、揺れないで制御可能とするための修正目標軌道 $\hat{p}_d = (\hat{x}_d, \hat{y}_d)$ 、吊り荷の動作軌跡の測定値 $p = (x, y)$ をそれぞれ図中にプロットしている。

測定値は浜松フォトニクス製 PSD ポジションセンサを用いて吊り荷に検出用 LED を付けて吊り荷の絶対位置を測定した。吊り荷が多少回転することやこのセンサの測定誤差などから、位置測定誤差は 15mm 程

度である。この結果より、実時間で目標軌道が与えられる場合において、その目標軌道から遅れを伴いながら、ゆれをほとんど生じることなく提案制御手法により吊り荷が制御できることがわかる。

つぎに移動する障害物（人）がクレーン吊り荷動作域に侵入する場合に、提案した自動停止制御手法を適用したときの目標軌道と吊り荷位置測定値の実験結果を図 13 に示す。この実験では吊り荷の動作軌道の再現性を考えて、あらかじめ与えた y 軸に沿った直線軌道をロープ長一定で動作するように設定している。図 13 において $t = 3.5$ 秒付近で人が吊り荷動作軌道上に侵入したため、センサシステムが実時間検出し、その結果、停止のための目標軌道に自動変更し、実際の吊り荷軌道はこれに、揺れないで追従していることがわかる。

また、図 14 にはこの実験の様子を分解写真で示している。これらは左上の数字順に約 0.6 秒おきの写真であり、矢印の位置が吊り荷を示している。ここでは移動障害物として人が吊り荷移動方向に対して右側から接近し、吊り荷の移動軌道上で約 2.5 秒静止したのち、人が体勢を低くすることで吊り荷の元の目標軌道から人が外れる状況を実験している。実時間で障害物を検出し、吊り荷目標軌道を実時間で変更することで、吊り荷と障害物が衝突することなく安全に移動できていることがわかる。また、この移動の間、吊り荷はほとんど揺れることがなかった。

なお、これらの実験において吊り荷の状態に関しては直接フィードバックをおこなっていないが、トロリ位置とロープ長に関しては逆動力学計算により得られた目標軌道を用いてローカルなフィードバック制御（PID によるサーボ制御）をおこなっている。また、センサ空間での障害物マップ更新周期は 200 ミリ秒であり、モータサーボ系の制御周期は 10 ミリ秒とした。

7. お わ り に

本研究では、天井走行クレーンの衝突回避システムを検討した。このシステムでは障害物の検出にはステレオカメラを用い、実時間でセンサ空間内障害物マップを生成する。クレーン吊り荷の運動を考慮し、このマップを用いることで、衝突の危険を検出する。もし、衝突の危険性があると判断された場合は実時間でめらかな軌道を生成する目標軌道修正をおこない、これに基づいて緊急停止をおこなう。吊り荷は逆動力学計算に基づく制御手法により制御されるため、緊急停止時も含めて揺れないで吊り荷を制御できる。提案した安全停止制御手法をクレーン動作実験に適用し、未知

Fig. 14 Emergency stop control experiment

障害物を吊り荷搬送途中で検出した場合でも揺れずに安全に吊り荷を停止できることがわかった。

提案した制御手法は吊り荷の状態を直接フィードバック制御する方法ではないため、風などの外乱によりいったん生じた揺れを止めることはできない。このような振れ止めをおこなうためには、本論文での緊急停止制御手法とともに例えば著者らの提案によるフィードバック制御手法⁽⁹⁾を併用することが考えられる。しかしながら、吊り荷の状態をフィードバックするためには、吊り荷の状態を実時間で正確に測定できる必要がある、これは簡単ではない。また、走行型クレーンが室内で運転される限りは、風などの外乱はほとんど考慮する必要がなく、提案のフィードフォワードを基本とする制御手法でも十分実用性があると考えられる。

文 献

- (1) Y. Sakawa and Y. Shindo, *Optimal Control of Container Cranes*, Automatica, Vol.18, No.3, (1982), pp257-266
- (2) 坂和愛幸, 天井走行クレーンのモデリングと最適制御, 計測自動制御学会論文集, 34 巻, 8 号, (1998), pp962-967
- (3) H. Lee, *Modeling and Control of a Three-Dimensional Overhead Crane*, ASME J. of DSC, Vol.120, (1998), pp471-476
- (4) 村田, 中島, 宮田, 西崎, 横行クレーンのサーボ系ふれ止め制御, 日本機械学会論文集 C 編, 61 巻, 582 号, (1995), pp513-518
- (5) 兼重, 北岡, 宗利, 寺嶋, 巻き上げ, カーブ軌道を有する天井クレーンの搬送制御, 日本機械学会論文集 C 編, 63 巻, 607 号, (1997), pp921-928
- (6) 小林, 田村, 巻き上げ式天井クレーンの非線形制御, 日本機械学会論文集 C 編, 58 巻, 548 号, (1992), pp1318-1326
- (7) 兼重明宏, 寺嶋一彦, 鈴木新雄, 殷雷, 障害物認識と経路計画を考慮した天井クレーンの自律化, 日本機械学会論文集 C 編, 64 巻, 618 号, (1998), pp487-494
- (8) 鈴木新雄, 寺嶋一彦, 天井クレーンのポテンシャル法を用いた三次元パスプランニング, 日本ロボット学会誌, 18 巻, 5 号, (2000), pp728-736
- (9) 柳井, 山本, 毛利, 逆動力計算に基づくクレーンのフィードバック制御, 計測自動制御学会論文集 37 巻 11 号, (2001), pp.1048-1055
- (10) N.Yanai, M.Yamamoto, A.Mohri, *Anti-Sway Control for Wire-Suspended Mechanism Based on Dynamics Compensation Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.3, (2002), pp.4287-4292