

# ジブクレーンの生成軌道への追従とその改良

## —追従精度と追従速度の向上—

2015SC004 林 達也

指導教員：大石 泰章

### 1 はじめに

ジブクレーンは造船所や建築現場で用いられるクレーンの一種である。ジブクレーンは鉛直方向に伸びた主軸上に回転する水平ジブを有しており、そのジブ上を横行するトロリーから伸びたロープで吊り荷の運搬を可能とする構造となっている。

上記にあるようにジブクレーンは1本のロープで吊り荷を運搬する構造上、吊り荷の振動が大きくなるよう配慮する必要がある。そのためジブクレーンを動作させる際には通常経験と資格を有した作業員が必要であり、自動化に対する期待が高い。またクレーンの可動範囲内に他の機器や構造物がある環境で用いられる場合は、これらの障害物を回避して動作する必要がある。これに関しても自動化が求められている。過去のクレーンの軌道追従制御の研究として計算トルク法を用いたものがある [1], [2]。具体的には人工ポテンシャル法を用いて吊り荷の障害物回避を行うための軌道を生成し、生成軌道に基づき計算トルク法と最適ロバストサーボを用いることにより軌道追従を行う。しかし障害物付近では軌道追従精度が落ちる問題を有しており、課題であると言える。

本研究では文献 [1], [2] の制御法を発展させ、クレーンの動特性を考慮することにより追従精度の改善を行う。具体的には最急降下法で生成された軌道に対して、吊り荷が追従しやすいような軌道に変更を行う。それに加えて障害物に近づいた際に、遠心力が一定の値を超えないよう必要に応じて吊り荷の運搬速度を低速にすることで追従精度を向上させる。

### 2 制御対象と研究目的

#### 2.1 制御対象

本研究で想定する制御対象はジブクレーンを模した Quanser 社の 3 DOF Crane (以下、実験機) である。この実験機の概略図を図 1 に、用いるパラメータを表 1 にそれぞれ示す。

この実験機は鉛直方向に伸びた主軸、主軸上端から水平方向へ伸びたジブ、ジブ上を走行するトロリー、さらにそのトロリーから伸びた吊り荷ロープとその先端に取り付けられている吊り荷で構成されている。また実験機は3つの自由度を有しており、それぞれジブの円周方向の回転運動、トロリーの横行運動、吊り荷ロープの巻き上げ巻き下げ運動である。しかし本研究では表 1 で示したように吊り荷ロープの長さは一定と考え、ジブの円周方向の回転運動とトロリー横行運動の2つの自由度のみを用いて障害物回

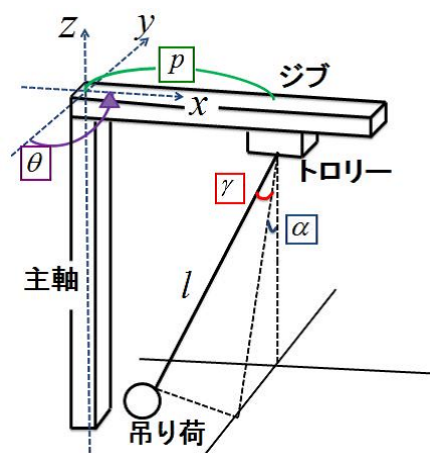


図 1 実験機概略図

表 1 パラメーター一覧

記号	名称	値 [単位]
$g$	重力加速度	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$M$	トロリー質量	0.6 [kg]
$p$	トロリー位置	$0 \leq p \leq 0.6$ [m]
$m$	吊り荷の質量	0.8680 [kg]
$J_\theta$	ジブの慣性モーメント	0.8771 [kgm <sup>2</sup> ]
$K_j$	ジブのトルク定数	0.0650
$K_t$	トロリーのトルク定数	0.0436
$I_j$	ジブへの入力電流	[A]
$I_t$	トロリーへの入力電流	[A]
$\theta$	ジブの回転角度	[rad]
$\alpha$	吊り荷ロープの円周方向の振れ角	[rad]
$\gamma$	吊り荷ロープの半径方向の振れ角	[rad]
$x$	吊り荷の $x$ 座標	[m]
$y$	吊り荷の $y$ 座標	[m]
$z$	吊り荷の $z$ 座標	[m]
$\Phi$	吊り荷速度の方位角	[rad]
$l$	吊り荷ロープ長	0.5 [m]
$s$	最急降下法で生成した座標ベクトル	
$n$	軌道変更後の座標ベクトル	
$i$	最急降下法で生成したステップ	

避の制御を行う。

## 2.2 制御方法

制御目的は吊り荷が障害物に衝突せず、振動の少ない状態で吊り荷を初期位置から目標位置まで運搬することである。軌道追従制御には計算トルク法を用いるが、この方法では直接入力を加えることができない吊り荷の振れ角について制御することが不可能である。そこで計算トルク法では直接入力を加えることが可能なジブの旋回角度とトロリーの位置の制御のみを行い、振れ角については最適ロバスタサーボを用いることにより吊り荷の振れ止め制御を別に行う。これにより本来の目的である吊り荷の軌道追従を可能にする。

## 3 軌道生成

軌道生成を行うためにロボット工学で用いられる人工ポテンシャル法に最急降下法を適用することで障害物回避を可能とする軌道の生成を行う。本研究では障害物が2つある環境を想定する。ただし障害物はジブの高さより低いと仮定する。文献 [1], [2] と同様に2つの障害物の位置はそれぞれ  $(x_s^{(1)}, y_s^{(1)}) = (0.3, 0.2)$ ,  $(x_s^{(2)}, y_s^{(2)}) = (0.3, 0.35)$ , 吊り荷の初期位置は  $(x_o, y_o) = (0.4, 0.4)$ , 目標位置は  $(x_g, y_g) = (0.1, 0.1)$  とする。

### 3.1 ポテンシャル関数

人工ポテンシャル法で用いるポテンシャル関数を文献 [3], [4] に従い作成する。ポテンシャル関数は目標位置を表す引力ポテンシャル関数と障害物位置を表す斥力ポテンシャル関数を足しあわせて構成される。

### 3.2 最急降下法

3.1 節で作成したポテンシャル関数に初期位置  $(x_o, y_o)$  から出発して最急降下法を適用することにより障害物回避のための軌道の生成を行う。生成した軌道をポテンシャル関数の等高線に重ねてかいたものを図2に示す。

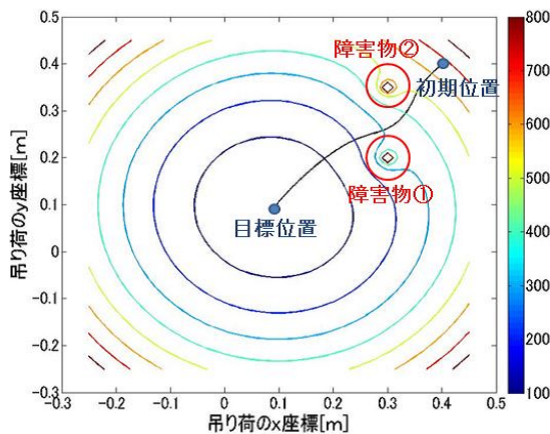


図2 ポテンシャル関数と生成された軌道

## 3.3 軌道の変更

3.2 節で生成した軌道に基づいて、より吊り荷の追従を行いやすい軌道に変更する。最急降下法で生成した  $i$  番目の点の座標を  $s(i)$  として。

$$n(i) = \frac{s(i) + s(i+10) + s(i+20)}{3} \quad (1)$$

を計算し、新たな軌道を求める。ただし軌道の最初と最後の10ステップは元の軌道をそのまま用いる。図3に軌道の変更を行った前と後の軌道の一部を表す。

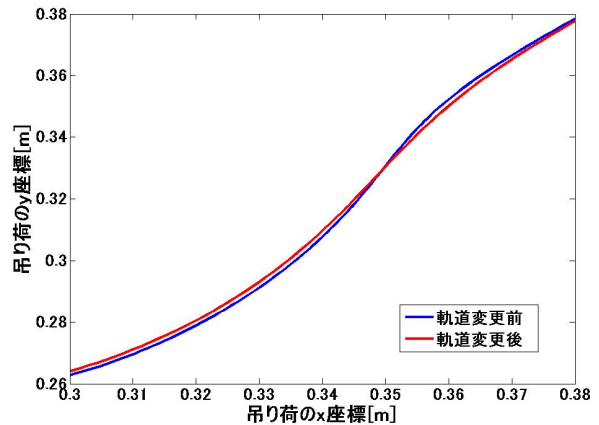


図3 軌道の変更

図3に見るように軌道の変更後の方が変更前よりも軌道の膨らみが減少しており、追従による振れが少なく追従が容易になると考えられる。

## 4 制御系設計

図1の  $\theta$ ,  $p$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  を一般化座標として Lagrange の運動方程式をたてる。

### 4.1 軌道追従制御

計算トルク法を適用し、ジブとトロリーを制御することにより吊り荷ロープの付け根を軌道に追従させる。上で得た運動方程式において  $\alpha \equiv 0$ ,  $\gamma \equiv 0$  としてジブとトロリーの動力学モデルを得る。状態変数を  $\xi_1 = [\theta \ p]^T$ , 入力を  $\tau = [I_j \ I_t]^T$  として、このモデルは

$$\tau = M(\xi_1)\ddot{\xi}_1 + V(\xi_1, \dot{\xi}_1) \quad (2)$$

と書く。ただし  $M(\xi_1)$  は  $2 \times 2$  の慣性行列を、 $V(\xi_1, \dot{\xi}_1)$  は  $2 \times 1$  の遠心力やコリオリ力を表す項である。

制御入力にはモデル化誤差や外乱の影響を考慮し、

$$\ddot{\xi}_1 = \ddot{\xi}_{1d} + k_v(\dot{\xi}_{1d} - \dot{\xi}_1) + k_p(\xi_{1d} - \xi_1) \quad (3)$$

という多次元のサーボ則で表される。また目標の位置  $\xi_{1d}$  と現在の位置  $\xi_1$  の追従誤差  $\xi_{1d} - \xi_1$  を  $e_1$  とおき

$$\ddot{\xi}_1 = \ddot{\xi}_{1d} + k_v e_1 + k_p e_1 \quad (4)$$

とする。

このとき速度ゲイン  $k_v$ , 位置ゲイン  $k_p$  に正の数を選べば誤差  $e_1$  は零に収束する [5]。

## 4.2 振れ止め制御

最適ロバストサーボを用いて吊り荷の振れ止め制御を行う。運動方程式の  $\ddot{\alpha}$ ,  $\ddot{\gamma}$  にかかわる部分に着目し,  $\theta \simeq 0$ ,  $p \simeq 0$ ,  $\alpha \simeq 0$ ,  $\gamma \simeq 0$  として線形化を行う。得られた式は状態変数を  $\xi_2 = [\alpha \ \gamma \ \dot{\alpha} \ \dot{\gamma}]^T$  として次のように書ける:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_2 = A\xi_2 + B\tau, \\ \eta = C\xi_2. \end{cases} \quad (5)$$

ただし行列はそれぞれ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{g}{l}(1 + \frac{m}{M}) & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-K_j p}{J_{\theta} l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_t}{Ml} \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である。

### 4.2.1 最適ロバストサーボ

サーボシステムを構成するための拡大系の状態変数を

$$\xi_{2e} = [\alpha \ \gamma \ \dot{\alpha} \ \dot{\gamma} \ w]^T \quad (6)$$

とする。ただし、目標と現在の振れ角との偏差を

$$e_2 = [\alpha_{\text{ref}} - \alpha \ \gamma_{\text{ref}} - \gamma] \quad (7)$$

として,  $w = \int_0^t e_2 dt$  である。振れ角の目標値を  $\xi_{2\text{ref}} = [\alpha_{\text{ref}} \ \gamma_{\text{ref}}] = [0, 0]$  とする。また  $w$ ,  $\xi_2$ ,  $\tau$  それぞれの定常値を  $w_{\infty}$ ,  $\xi_{2\infty}$ ,  $\tau_{\infty}$  とし,  $\tilde{\xi}_{2e} = [\xi_2 - \xi_{2\infty} \ w - w_{\infty}]^T$ ,  $\tilde{\tau} = \tau - \tau_{\infty}$  とする。

以上より拡大偏差システムは

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}}_{2e} = A_e \tilde{\xi}_{2e} + B_e \tilde{\tau}, \\ e_2 = C_e \tilde{\xi}_{2e} \end{cases} \quad (8)$$

とする。ただし

$$A_e = \begin{bmatrix} A & O_{4 \times 2} \\ -C & O_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad B_e = \begin{bmatrix} B \\ O_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad C_e = [-C \ O_{2 \times 2}]$$

である。

行列  $B_e$  は変数  $p$  を含んでいる。そのため  $p$  の変動範囲を考慮する必要がある。ここではトルロー位置  $p$  は最大値 0.1[m], 最小値 0.57[m] の範囲で動くものとし, 下記の線形行列不等式を最大の  $p$  と最小の  $p$  に関して考えることによって,  $p$  に対するロバスト性を保証する:

$$\begin{bmatrix} -A_e X - B_e F - X A_e^T - F^T B_e^T & X Q_h & F^T R \\ Q_h X & I & 0 \\ R F & 0 & R \end{bmatrix} \succ 0. \quad (9)$$

ただし,  $Q_h Q_h^T$  は状態,  $R$  は入力に対する重み行列である。式 (9) および

$$\begin{bmatrix} Z & I \\ I & X \end{bmatrix} \succ 0 \quad (10)$$

を満足する  $X$ ,  $F$ ,  $Z$  が存在する範囲で trace  $Z$  を最小化することでゲイン  $K_e = [K \ G]$  を求める [6]。

### 4.2.2 シミュレーション結果

以上の制御手法を使ったときの軌道追従のシミュレーション結果を図 4 に示す。重み行列  $Q_h$ ,  $Q_h^T$  と  $R$  は文献 [1], [2] の値を利用する。

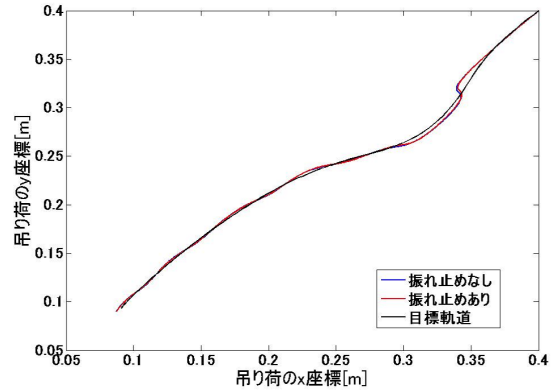


図 4 振れ止めを行った場合と行わない場合の吊り荷の軌道

図 4 より目標軌道との間にある程度の誤差があるものの, 初期位置から目標位置まで軌道追従をしていることがわかる。特に吊り荷の  $x$  座標が約 0.3[m] から 0.1[m] までの障害物のない範囲では十分精度よく目標軌道に追従できている。しかし  $x$  座標が約 0.38[m] から 0.3 [m] の障害物付近での軌道追従性が良くないことがわかる。また振れ止めの有無について注目してみると, 約 0.4[m] から 0.2[m] の障害物付近では振れ止めなしの方が目標軌道に近い部分があり, この範囲において振れ止めの効果が見られない。しかし 0.2[m] から 0.1[m] までの範囲では振れ止めの効果が見てとれる。

## 5 吊り荷の運搬速度の変更

4.2.2 節のシミュレーション結果より特に障害物付近において軌道追従性能を向上させる必要があると考えられる。本研究では最急降下法で求めた軌道のステップごとの  $x$  方向もしくは  $y$  方向への移動距離の合計が 0.02[m] を超えた点を選び出し, その各点における遠心力を計算する。遠心力の絶対値が 0.011[N] の値を超えたステップでは吊り荷運搬の低速化を行う。また超えないステップでは高速化を行うことにより効率化の向上も同時に行う。

吊り荷に働く遠心力  $F_c$  は次の式のように求められる [7]:

$$F_c = mv\dot{\Phi} = m \frac{\dot{x}\dot{y} - \dot{y}\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (11)$$

ただし吊り荷速度の方位角は吊り荷の速度ベクトルと  $x$  軸正方向とのなす角で、 $\Phi = \arctan(\frac{\dot{y}}{\dot{x}})$  である。また、吊り荷の速度は  $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$  である。吊り荷にかかる遠心力を図 5 に示す。

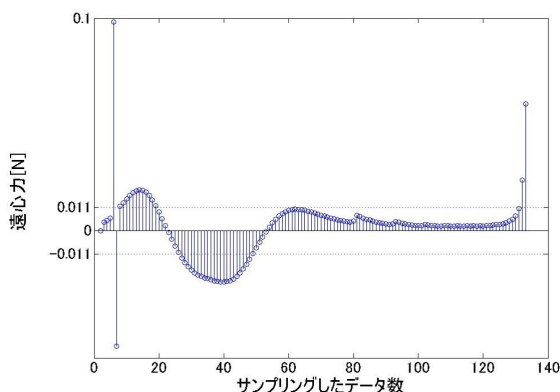


図 5 各ステップの遠心力

上記で求めた遠心力が大きくなりすぎる場合には、吊り荷の振れが大きくなり制御が困難になる。したがって、この制御困難な状況を未然に防止することで障害物付近の吊り荷の軌道追従性能を向上させることが可能である。具体的には、あるステップにおける遠心力が 0.01[N] 以上のとき、そのステップにかかる移動時間を 1 つ前のステップより 0.01 [s] 増やすことにより吊り荷の運搬速度の急激な加速を抑制する。また遠心力が 0.011[N] 以下のステップにおける移動時間は前のステップより 0.01[s] 減らすことにより、より効率的な運搬を目指す。ただしステップごとの移動時間の下限は 0.07[s]、上限は 0.15[s] とする。

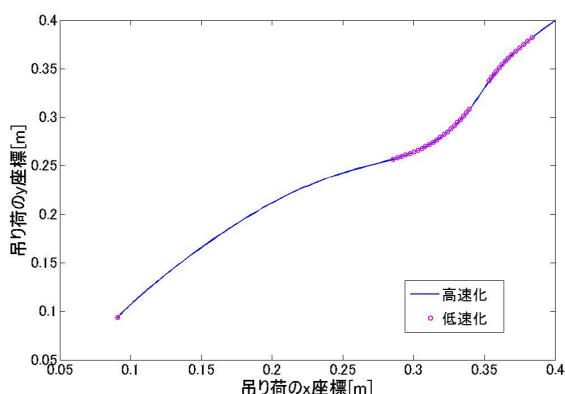


図 6 軌道上の低速化と高速化の適用箇所

図 6 に低速化を適用した軌道箇所を示す。障害物付近の  $x$  座標 0.38[m] から 0.28[m] の範囲で多く低速化が適用されていることがわかる。

## 6 運搬速度変更後のシミュレーション結果

5 節の方法で遠心力を判断基準に吊り荷の運搬速度の変更を行ったときのシミュレーション結果を図 7 に示す。運

搬にかかる時間は運搬速度変更前が約 9 [s]、運搬速度変更後が約 12.5 [s] である。

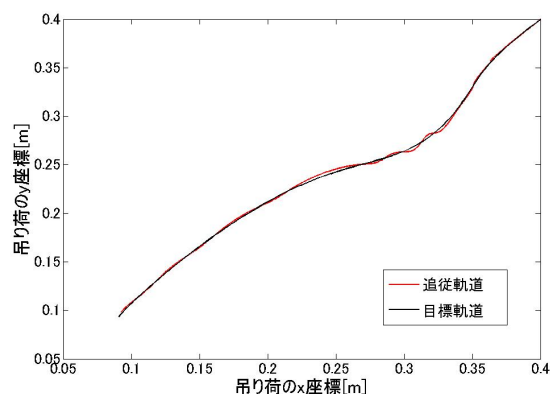


図 7 運搬速度変更後の吊り荷の軌道

図 4 の運搬速度変更前の軌道と、図 7 の運搬速度変更後の軌道を比較すると、運搬速度変更後の軌道の方が目標軌道に近づいていることが明らかである。

このことから遠心力を判断材料とした運搬速度変更の有用性が示された。

## 7 おわりに

本研究では人工ポテンシャル法を用いて吊り荷の障害物回避のための軌道を生成し、より追従しやすいよう軌道に変更を加えた。その軌道に吊り荷を追従させるために計算トルク法と最適ロバストサーボを適用した。また軌道上において運搬速度を徐々に減少させることで軌道追従性能を向上させた。また低速化だけでなく高速化を行うことにより運搬効率を向上させた。

## 参考文献

- [1] 伊藤大智: クレーンの障害物回避のための軌道生成と軌道追従, 南山大学大学院理工学研究科修士論文, 2015.
- [2] 林達也 他: クレーンの障害物回避のための軌道生成と軌道追従, システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 2016.
- [3] 彌城 他: ポテンシャル法によるロボット製品の障害物回避技術の開発, 三菱重工技報, 2014.
- [4] 中野 他: 『高知能移動ロボティクス』, 講談社サイエンティフィック, 2012.
- [5] John J. Craig: 『ロボティクス—機構・力学・制御—』, 共立出版, 1991.
- [6] 川田昌克: 『MATLAB/Simulink による現代制御入門』, 森北出版, 2011.
- [7] 子平 他: ニューラルネットによる移動ロボット車の遠心力を考慮した目標時間可変型走行制御アルゴリズム. 電子情報通信学会論文誌, pp. 1395-1403, 1995.