

レーザポインタ入力型クレーンの偏差の無い軌道追従制御

Path tracking control of crane by laser pointer without position error

精密工学専攻 32号 土屋侑樹

Yuki Tsuchiya

1. 諸言

天井走行クレーンをはじめとするワイヤ懸垂系は、重量物を三次元搬送が簡単にできるため、工場や倉庫などで多く使われている。しかし、ワイヤ懸垂系では搬送物をワイヤで吊るすという特性や、操縦空間と操縦位置が別である特性により、振り子振動の発生や目標位置に対する行き過ぎが発生しやすいことが問題点として挙げられる。

これらの問題の解決策として、クレーンの自動化によって振り子振動の抑制した搬送を行う研究がされてきた。最適レギュレータ理論を応用した手法や、最短時間制御を行う手法、さらに、懸垂物の Jerk と移動テーブルの関係性に着目した制御移動手法などが提案されてきた。

また、クレーンの操縦はオペレータにより行われており、安全性はオペレータの感覚に依存する点も問題点といえる。一方で、常に環境が変化する場面では、人間の経路設計や状況把握の能力の方が自動化されたシステムよりも優れている。

そこで、本研究ではクレーンの操縦はオペレータが担当するものとし、振り子振動や目標位置の行き過ぎ、障害物との衝突防止を自動化することで、オペレータが簡単に操縦できる遠隔操作システムの開発を目指す。これまでに本研究では、カメラを用いたワイヤ振れ角センサによる揺れのフィードバック制御と、目標軌道によるフィードバック制御を併用した2段サーボシステムを開発し、振り子振動と行き過ぎを同時に防止できるシステムを開発した⁽¹⁾。また、クレーンの移動テーブルに取り付けたカメラを利用し、レーザ光を認識して追従するレーザポインタ型インターフェースを開発した⁽²⁾⁽³⁾。

従来のレーザポインタ型インターフェースにおいては、制御アルゴリズムが原因となり、レーザ光で設計した経路と、懸垂物の経路の間に誤差が生じてしまう問題がある。そこで、本論文では線長パラメータを用いた制御アルゴリズムを提案し、レーザポインタ型インターフェースに適用した際に、経路誤差による問題が解決するのか検証し、その有用性を確認する。

2. 遠隔操縦システムの概要

本研究で開発したクレーンの構成を Fig. 1 に示す。この天井走行クレーンは粗動系により X, Y 軸の二次元平面内で、自由に移動テーブルを動かすことが可能であり、オペレータの指令に基づいて懸垂物の搬送を行うことができる。また、搬送される移動テーブルには、微動系、カメラ三台が付いている。微動系は外乱の影響によって発生する振り子振動の抑制を行う。また、発生した振り角の検出を三台のカメラのうち、二台を用いて行っており、微動系による振り子振動抑制に利用している。残る一台については、懸垂物や障害物、レーザ光を観測するため、地上面に向けて下向きに取り付けられている。

本論文で用いる操縦法は、下向きのカメラによってレーザ光を検出している。それにより、自分で照射したレーザ光を追従するように自由にクレーンを操縦することが出来る。

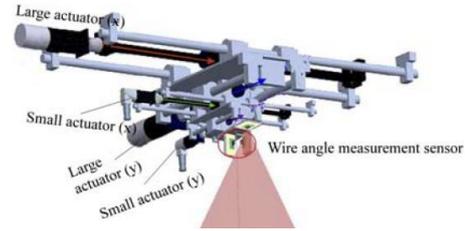


Fig. 1 Configuration of tele-operation system

3. 二段サーボシステムの概要

3.1 クレーンの制御モデル

Fig. 1 の実験装置の X 軸, Y 軸の各軸が直交していること、ワイヤの振れ角が非常に小さいと仮定すると、各軸で独立にモデル化することができる。この X 軸のモデルを Fig. 2 に示す。Fig. 2 の力学モデルを、微動系と粗動系、懸垂物について運動方程式で表すと、式(1)~(3)のように表わせる。ただし、式中のパラメータは Fig. 2 の中に従うものとし、 g は重力加速度とする。 F_f , F_c はそれぞれ微動系、粗動系のアクチュエータによって発生する力である。

$$F_f = (M_f + m)(\ddot{x}_c + \ddot{x}_f) + \{2l\dot{\varphi}_x + l\ddot{\varphi}_x\} \cos \varphi_x + (\dot{l} - l\dot{\varphi}_x^2) \sin \varphi_x \quad (1)$$

$$F_c = M_c \ddot{x}_c + F_f \quad (2)$$

$$ml^2 \ddot{\varphi}_x = -2ml\dot{\varphi}_x - ml(\ddot{x}_c + \ddot{x}_f \cos \varphi_x) \quad (3)$$

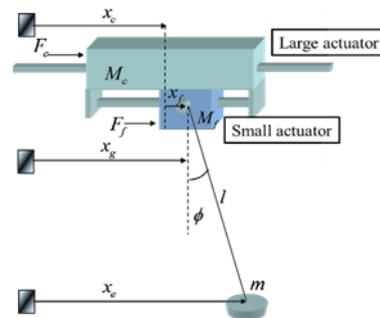


Fig. 2 Simplified dynamic model of crane system

3.2 Jerk を連続とした目標軌道

前節の式(1)~(3)から、振れ角、二次の項が微小である Fig. 2 における懸垂物位置と移動テーブル位置の関係は式(4)のように求めることができる。

$$x_g = x_e + \frac{l}{g - \dot{l}} \ddot{x}_e \quad (4)$$

速度は物理的に連続であるから、クレーンの速度 \dot{x}_g は連続な関数でなければならない。従って、懸垂物位置、ワイヤ長の変化の Jerk である \ddot{x}_e , \dot{l} は連続な関数となる。つまり、目標軌道を Jerk が連続となる三次関数を用いて加速区間、等速区間、減速区間に分け、式(4)を満たすような目標軌道が生成される。生成される懸垂物の目標速度の一例を Fig. 3 に示す。

ただし、 $2T$ は一つのサンプリング区間において加速、減速にかかる時間であり、 V_c は等速区間における速度で、それぞれアクチュエータの性能やクレーンの最大速度から算出された値を使用している。

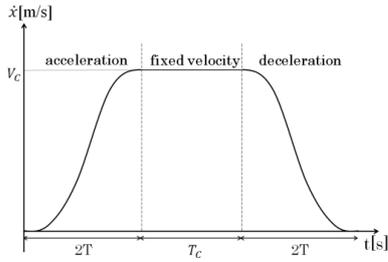


Fig. 3 Desired velocity of suspended object and wire length

4. レーザポインタ型インターフェース

4.1 レーザポインタによる目標位置入力

本システムでは輝度により、レーザ光の検出を行っている。また、懸垂物位置を始点とし、レーザ光が検出された座標を終点として、軌道生成を行っている。

本システムの操縦方法は、クレーンを搬送したい方向にレーザ光を照射するだけである。カメラによって照射されたレーザ光を検出し、レーザ光の位置を終点とする目標軌道が生成され、クレーンが移動する。レーザ光を認識している間は、現時点の懸垂物中心からレーザ光に向けて軌道が生成され続けるため、クレーンがレーザ光を追いかけるような形で移動する。目標位置が変更される度に新たな速度連続軌道が足しあわされるため、滑らかな目標軌道の生成ができ、さらにレーザ光の手振れによる影響も受けにくい軌道生成を実現している。

4.2 重ね合わせを用いた懸垂物の目標軌道生成

重ね合わせを用いた目標軌道の生成の概略図を Fig. 4 に示す。実際には、X 軸と Y 軸の二軸、それぞれに対して重ね合わせを用いて目標軌道生成を行い、クレーンを二次元平面で動作させる。

Fig. 4 の点 P_0 を初期位置として、 P_3 を目標位置としてレーザポインタで一直線の軌道を描くとする。また、その際にサンプリング点として P_1, P_2, P_3 を得られたとする。すると、区間 P_0-P_1 を移動するための速度軌道 V_1 、区間 P_1-P_2 を移動するための速度軌道 V_2 、区間 P_2-P_3 を移動するための速度軌道 V_3 が生成される。そして、それぞれの時間に速度全て (V_1-V_3) を足し合わせたものが、目標軌道となる。この目標軌道に従うことで目標位置にタイムロスや行き過ぎの無い搬送が可能となる。

しかし、時々刻々と重ね合わせることによって、レーザ光の軌跡と懸垂物の軌跡が一致しない場合がある。レーザ光によって高速で軌道を描いた際などは、現時点での最終目標位置に向かって搬送してしまうために、設定経路と軌跡の間に大きな誤差が発生してしまう。

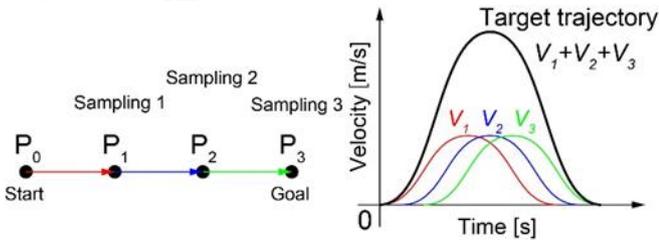


Fig. 4 Superposition of target trajectory

4.3 線長パラメータを用いた懸垂物の目標軌道生成

前節において、誤差が発生する問題を挙げたが、その原因となっているのは、二軸に分けて速度算出と重ね合わせを行っている制御則にある。レーザ光の輝度検出はサンプリングタイム毎に行われているため、レーザ光が照射されている限り 0.03 秒毎に速度軌道が生成される。

また、3.2 節で述べてように懸垂物の加速と減速には $2T$ かり、現在は $T = 1[s]$ で設計されているため一区間を懸垂物が移動するためには、距離に関わらず最低でも 4 秒を要する。よって、懸垂物が一つの区間を移動しきる前に、次のレーザ光が検出され、重ね合わせによって最新のサンプリング点に向かってしまう。このとき、搬送物は古いサンプリング点を短縮して動作していることが、誤差の要因となっている。

そこで、本論文では重ね合わせを用いた制御則に対して、線長パラメータを適用する新たな制御則を提案する。これにより、これまではある時間に速度を達成するような制御であったのが、ある位置においてある速度を達成するような制御が可能となる。ここで言う線長パラメータとは、目標軌道を生じさせる関数に搬送経路を取り組むためのパラメータである。この制御によってレーザを速く動かした場合でも、懸垂物はオペレータがレーザ光の軌跡に追従した搬送が可能になると期待される。また、軌跡に追従するという特性から手振れの影響が考えられるが、そこは後の実機検証において検証する。以下で線長パラメータによる速度制御の立式を行う。

まず線長パラメータ s に関して、その増分 Δs をレーザ光の k 番目サンプリングでの増分を $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ として式(9)のように定義する。また、線長パラメータ s_k や世界座標系の点 (x_k, y_k) の関係を(5)~(8)のように設定し、座標系における各パラメータの設定は Fig. 5 の通りである。

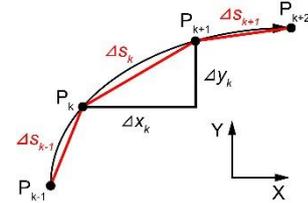


Fig. 5 Configurations of each parameter

$$\Delta s_k = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta y_k^2} \quad (5)$$

$$s_{k+1} = s_k + \Delta s_k \quad (6)$$

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \quad (7)$$

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k \quad (8)$$

次に、検出された座標 (x_k, y_k) に線長パラメータを用いて表現する。そのために、それぞれのサンプリング区間を直線近似することで、各座標を s の関数として式(9)、(10)のように表すことができる。式(9)、(10)を用いて補完されたサンプリング点は Fig. 6 のようになる。

$$x(s) = x_k + \frac{s - s_k}{\Delta s_k} \Delta x_k \quad (9)$$

$$y(s) = y_k + \frac{s - s_k}{\Delta s_k} \Delta y_k \quad (10)$$

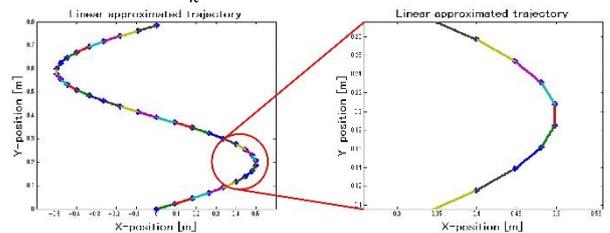


Fig. 6 Laser trajectory of each simulation

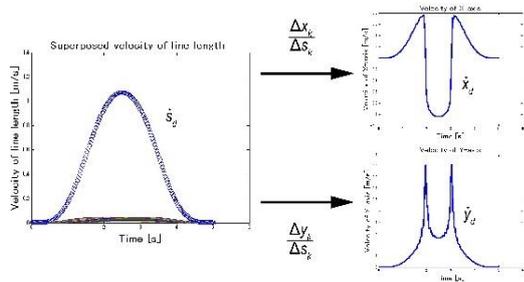


Fig. 7 Laser trajectory of each simulation

ここで、式(9)、(10)よりそれぞれを s に関して偏微分するとクレーンに与えるべき目標速度を式(11)、(12)のように決定できる。式(5)で定義した線長パラメータの増分に対して3.2節で述べた Jerk が連続な軌道生成を行い、前節で述べた重ね合わせを用いた目標軌道を生成することで、Fig. 7 のように線長速度が得られる。さらに、その線長速度に係数をかけると X 軸、Y 軸それぞれが達成すべき目標速度を求められる。

$$\dot{x}_d = \frac{\partial x_d}{\partial s} = \frac{\Delta x_k}{\Delta s_k} \dot{s}_d \quad (11)$$

$$\dot{y}_d = \frac{\partial y_d}{\partial s} = \frac{\Delta y_k}{\Delta s_k} \dot{s}_d \quad (12)$$

式(11)、(12)において、 \dot{s}_d は重ね合わせで生成された目標軌道であり、係数には k がついていることから、何番目のサンプリング区間を走行しているかが重要となる。よって、 k を判別するために搬送物の現在位置を取得し、それをもとに k の値を切り替えなくてはならない。その k の値を用いて搬送物の現在位置 (X, Y) として線長パラメータを逆算すると、式(13)、(14)のように表せる。

$$s = \frac{\Delta s_k}{\Delta x_k} (X - x_k) + s_k \quad (13)$$

$$s = \frac{\Delta s_k}{\Delta y_k} (Y - y_k) + s_k \quad (14)$$

4.4 シミュレーションによる検証

提案手法の有用性についてシミュレータで検証を行う。

本シミュレータは、レーザポインタ入力型インターフェースを用いての搬送を想定し、その搬送における搬送物、クレーンの移動テーブルの軌道や速度、加速度入力、搬送時間を検証することができる。

4.4.1 シミュレーション条件

従来の重ね合わせによる軌道生成法と、本論文で提案した線長パラメータを適用した軌道生成法でそれぞれ検証を行う。その内容と設定を以下に示す。

- 1) 本研究で開発したシミュレータにおいて設定したクレーンのパラメータを Table 1 に示す。基本的に使用しているパラメータは実験機のものに従って設定しており、レーザ光照射時間とレーザ光の軌跡を表す関数を任意に指定して検証を行う。

Table 1 Parameters of simulator

		Parameters of crane			
Wire length [m]		1.3			
Suspended mass [kg]		1.0			
Sampling time [s]		0.03			
Acceleration time T [s]		1			
Maximum velocity [m/s]	Large actuator	Small actuator			
	X	Y	X	Y	
	0.3	0.3	0.3	0.3	

- 2) レーザポインタ入力型インターフェースを使用し、経路誤差の発生しやすい円形経路とする。
[設定経路] 半径が 1m の円を描く経路
[経路入力時間] 1.02 秒
上記の経路について検証を行い、実際のクレーンで実現可能性があるかを、シミュレーションで確認する。
- 3) 4.3 節で述べた、搬送物が走行しているサンプリング区間の検出に関して、実験機ではエンコーダやカメラによってリアルタイムで搬送物の位置座標が検出できるが、本シミュレータ上では詳細な座標の取得が困難であるため、出力された X 軸、Y 軸の速度軌道をそれぞれ積分することで取得する。

4.4.2 結果

従来手法、提案手法でのシミュレーションによる懸垂物の軌道をそれぞれ Fig. 8、Fig. 9 に示す。従来手法では、クレーンの動作に対してレーザ光を速く動かしたため、レーザ光の軌跡に対して大きな誤差の発生が見られた。対して、提案手法ではレーザ光に追従した搬送が可能になっており、追従精度が大きく向上している。しかし、Fig. 9 より途中から僅かであるがサンプリング点から誤差が見られる。目標位置(0,0)に対して搬送物の到達した位置は $(-3.60 \times 10^{-2}, 1.89 \times 10^{-4})$ であった。この誤差の原因は4.2節3)で述べたように、搬送物の位置座標を積分により算出しているため、その際の誤差によるものであると考えられる。実験機では位置は各軸に取り付けられたエンコーダにより取得することが出来るため、積分計算による誤差は発生しない。

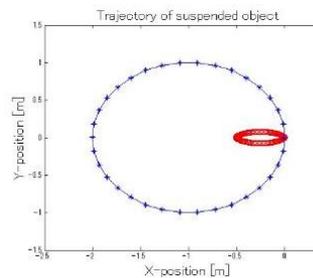


Fig. 8 Circular route with conventional method

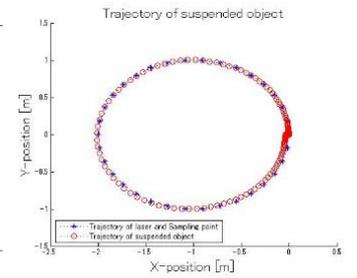


Fig. 9 Circular route with proposed method

5. 実機における検証

5.1 実現可能な指示軌道の生成

実際の環境では、レーザポインタによる入力は手動で行う。その際にやむを得ず手振れが発生してしまう。そのため、手振れを考慮した経路設計が必要である。

$$P_n = \sum \frac{r_k}{1+r} \quad (15)$$

高周波なノイズである手振れを除去するために、指示点 P に対して式(15)に示す移動平均処理を行う。その処理を行う前後の比較が Fig. 10 となる。処理前は手振れによる動きが見受けられる。対して、処理後は手振れによりノイズがなくなっている。そのため、短く、急停止、急発射を起こさない経路設計が出来る。

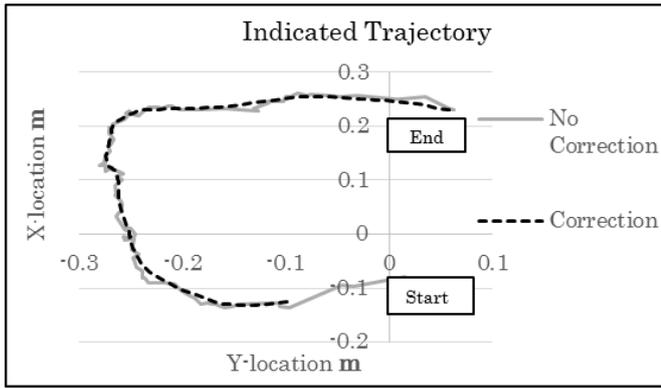


Fig. 10 Comparison of indicated trajectories

5.2 搬送実験

5.2.1 実験条件

提案手法が実現可能であることを実機による搬送実験によって検証する。

本実験を行った際の実験機のパラメータを Table 2 に示す。シミュレーション同様に、従来手法と提案手法の2つの実験を行う。実験経路は搬送経路も同様に、経路誤差が出やすい円形経路とし、レーザー光を手動で照射することによって描く。しかし、比較実験として2つの実験で同じ軌道を追従させたい。そのため、従来実験については提案手法の実験で取得したレーザー指示点の位置を入力し、追従させている。指示点は式(15)を用いて補正したものを利用する。実験結果で示した経路は処理を施した後の指示点で形成された経路である。

また、どちらの手法においても、カメラにより X 軸、Y 軸から角度を測定して振れ制御を加えている。クレーン軌道はクレーンモータのエンコーダより、ワイヤ振れ角はカメラにより測定した値を比較する。

Table 2 Parameters of machine

		Parameters of crane			
Wire length [m]	0.99				
Suspended mass [kg]	1.0				
Sampling time [s]	0.03				
Acceleration time T [s]	1				
Maximum velocity [m/s]	Large actuator		Small actuator		
	X	Y	X	Y	
	0.3	0.3	0.3	0.3	
Motion Vector	0.999		-0.0159		
	-0.0247		0.999		

5.2.2 結果

従来手法、提案手法でのクレーン軌道を Fig. 11, Fig. 12 に示す。従来手法では指示円に対して大きな誤差が見られた。シミュレーションより軌道が大きいのは入力時間が大きいからだと思われる。また、揺れ角は X 軸方向が最大 $0.007[\text{rad}]$ 、Y 軸方向が最大 $0.011[\text{rad}]$ となっており、目視ではほとんど揺れを観測できない。対して、提案手法では指示円に対してほぼ誤差なく追従できていることがわかり、経路追従機能の大きな改善が見られる。しかし、最終停止位置に誤差が生じている。これは速度分割時に利用する実機軸とカメラ内の軸を変換する回転行列が要因として考えられる。また、揺れ角に関しては X 軸方向が最大 $0.018[\text{rad}]$ 、Y 軸方向が最大 $0.008[\text{rad}]$ となっており、最大値が増加している。しかし、目

視では揺れの発生はほとんど見て取れなかった。そのため、実用範囲内には収まっていると考えられる。

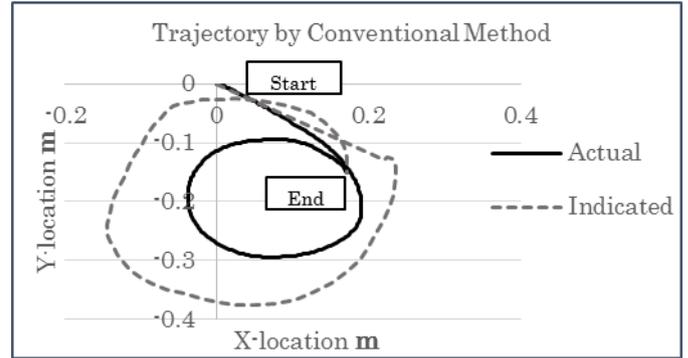


Fig. 11 Trajectory by conventional method

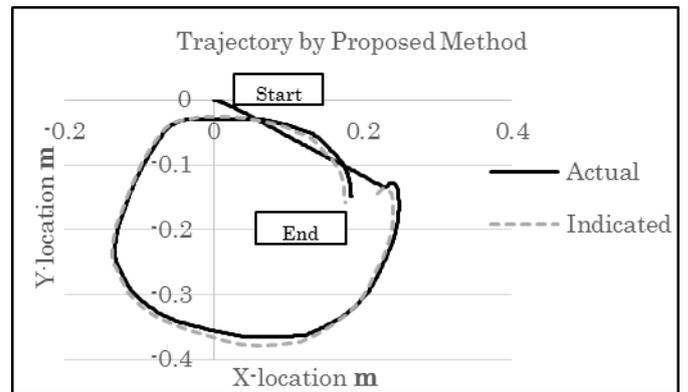


Fig. 12 Trajectory by proposed method

6. 結言

本論文では、クレーンを感覚的に操縦できるレーザーポインタ入力型インターフェースにおいて、重ね合わせを用いた目標軌道生成法に線長パラメータを適用した制御則の提案を行った。そして、シミュレーションと実機において実験を行い、従来手法と比較して、線長パラメータを用いた軌道生成法の有効性を検証した。

この検証を通してレーザーポインタの速度に関係なく経路を再現した軌道により搬送を行うことが出来ることを確認した。ただし、回転行列に依存する僅かな誤差や、揺れが従来手法に比べ大きいことなど改善点も見受けられた。

参考文献

- (1) 三浦昭也, 永楽俊吾, 大隅久, “CCD カメラによるワイヤ振れ角計測と懸垂物の振れ止め制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演会論文集, (2005) 1A-N-077.
- (2) 久保雅裕, 矢野詩知, 大隅久, “ワイヤ懸垂系の遠隔操縦システムの開発—操縦インターフェースの開発—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演会論文集, (2009) 2P1-H06.
- (3) Osumi, H., Kubo, M., Yano, S., Saito, K., “Development of Tele-operation System for a Crane without Overshoot in Positioning,” Proc. 2010 IROS, (2010) pp. 5799-5805.