

# レーザーポインタ入力型天井走行クレーンの軌跡追従制御

## Tracking control of overhead crane along the path drawn by a laser pointer

精密工学専攻 25号 佐藤洋稀

Hiroki Sato

### 1. 緒言

天井走行クレーンをはじめとするワイヤ懸垂系は、重量物の三次元な搬送が容易であるため、工場などで頻繁に利用されている。しかし、ワイヤ懸垂系は搬送物をワイヤで吊るすという特性から、懸垂物に振り子振動が生じたり、目標位置に対する行き過ぎが発生しやすいことが欠点として挙げられる。さらに、それらに対応した操縦にはオペレータの高度な技術が求められる。

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方法がある。最適レギュレータ理論を応用した最適追従系の一般設計法の提案や<sup>(1)</sup>、最短時間制御のクレーンにおける搬送への応用<sup>(2)(3)</sup>、さらに、懸垂物の Jerk と移動テーブルの関係に注目することで、目標位置で振動を残すことなく懸垂物を停止させる方法が提案された<sup>(4)</sup>。

しかし、外乱による振り子振動と目標位置での行き過ぎを同時に解決する研究は行われていない。また、クレーンの操縦はオペレータにより行われるため、搬送の効率や安全性はオペレータの経験と感覚に依存され、振り子振動や目標位置での行き過ぎ、障害物への衝突を起こしやすいといえる。人間の状況把握や搬送経路の決定は、常に状況が変化する作業をする場面においては自動化されたシステムよりも優れていると考えられる。

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での行き過ぎ、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、効率の良い遠隔操縦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フィードバック制御と、目標軌道によるフィードフォワード制御を併用した二段サーボシステムを開発し、懸垂物の振り子振動と目標位置での行き過ぎを同時に防止できるシステムを開発した<sup>(5)(6)</sup>。また、クレーンの移動テーブルに取り付けたカメラで懸垂物周辺の映像を俯瞰で取得し、その映像上でオペレータが目標位置を任意に指定してクレーンを操縦するシステムを開発した<sup>(7)(8)</sup>。

従来の研究で開発されたレーザーポインタ型インターフェースにおいて、制御アルゴリズムが原因で発生していたレーザー光と懸垂物の軌道に誤差が生じる問題がある。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、レーザーポインタ型インターフェースに適用した際に、発生する誤差が解消するのか検証し、その有用性について確認する。

### 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。クレーンは X, Y 軸の二次元平面内を自由に移動することができ、それぞれの軸に微動系と粗動系の二つの駆動系が移動テーブルを有する。粗動系はオペレータの指令に基づいて懸垂物の搬送を行い、微動系は外乱によって発生する振り子振動の抑制を行う。微動系にはワイヤの巻き取り機構が装着されており、

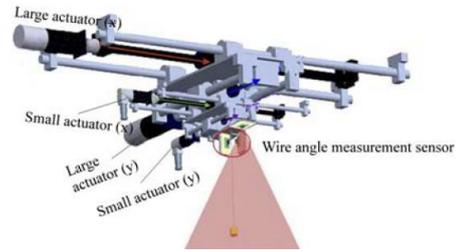


Fig.1 Configuration of tele-operation system

巻き取りによる障害物回避が可能となる。また、クレーンには三台のカメラが取り付けられており、微動系の移動テーブルに取り付けられた一台で懸垂物周辺の俯瞰映像を取得でき、オペレータがクレーンの操縦に用いる。残る二台のカメラで懸垂物を吊るすワイヤの振れ角を検出し、振り子振動の制御に用いる。

クレーンの操縦方法の一つにレーザーポインタ型インターフェースがある。取得した俯瞰映像から、輝度によりレーザー光を検出し、レーザーポインタで目標位置を指定する、もしくはレーザーポインタで描いた軌跡に沿って自由にクレーンを操縦することができる。

### 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、懸垂物それぞれについて運動方程式で表すと、式(1)~(3)のように表すことができる。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る発生力である。

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

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

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

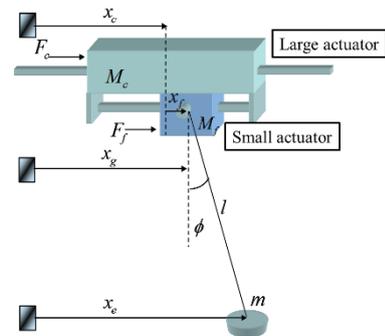


Fig.2 Simplified dynamic model of crane system

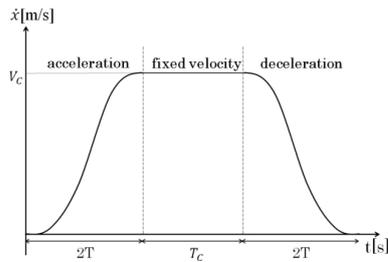


Fig.3 Desired velocity of suspended object and wire length

### 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。

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

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  $\ddot{x}_e$ ,  $\ddot{l}$  は連続な関数となる。そこで、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、減速にかける時間であり、 $V_c$  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。

## 4. レーザーポインタ型インターフェース

### 4.1 レーザーポインタによる目標位置入力

レーザーポインタ型インターフェースの概要図を Fig.4 に示す。本システムでは輝度によりレーザー光の検出を行っており、懸垂物位置を始点、レーザー光が検出された座標を終点として目標軌道の生成を行っている。

本システムの操縦方法としては、クレーンを搬送したい方向にレーザー光を照射し、それをカメラで検出する。懸垂物の座標を始点とし、検出したレーザー光の座標を終点として目標軌道が生成され、クレーンが終点(目標位置)に移動する。クレーンはレーザー光の停止位置、もしくはレーザー光が最後に消えた位置を最終目標位置として移動するため、高精度な位置決めが可能である。輝度検出及び目標軌道生成はサンプリングタイム毎に行われており、生成した目標軌道を時々刻々と重ね合わせをすることによって滑らかな目標軌道の生成ができ、さらにレーザー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要図を Fig.5 に示す。実際は一軸方向のみではなく、X 軸と Y 軸それぞれについて重ね合わせを行い、クレーンを二次元平面で動作させている。

Fig.5 の点  $P_0$  を初期位置、点  $P_3$  を目標位置としてレーザーポインタで一直線に軌跡を描いたとする。また、輝度検出でサンプリング点  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  が得られたとする。すると、区間  $P_0$ - $P_1$  を動作する速度軌道  $V_1$  が生成される。同様にして区間  $P_1$ - $P_2$  に対して  $V_2$ 、区間  $P_2$ - $P_3$  に対して  $V_3$  が生成される。そして、それぞれが時々刻々と足し重ね合わせられて 1 つの目標軌道が得られる。この目標軌道に従うことで目標位置にタイ

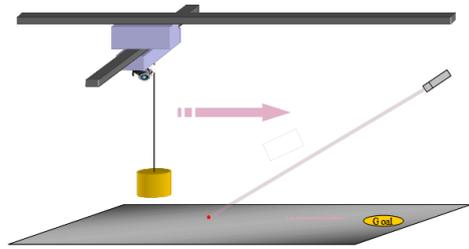


Fig.4 Schematic view of overhead crane by laser pointer

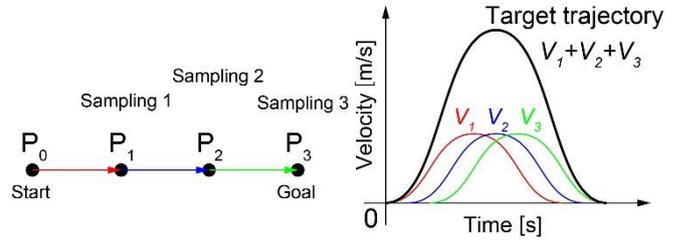


Fig.5 Superposition of target trajectory

ムロスや行き過ぎの無い搬送が可能となる。

しかし、時々刻々重ね合わせを行うことによって、レーザー光の軌跡と懸垂物の軌跡が一致しない場合がある。具体的には、レーザーポインタで軌跡を高速で描いたとき、曲線経路や屈曲経路において大きな誤差が発生する。

### 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、誤差が発生するという問題を挙げたが、その原因となっているのは、重ね合わせを時々刻々行っている制御則にある。レーザー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、0.03 秒毎に速度軌道が生成される。また、3.2 節で述べたように懸垂物の加速、減速には  $2T$  かかり、 $T=1$  [s] で設計されているため一つの区間を懸垂物が移動するには、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、次々と検出される最新のサンプリング点に向かって移動することになる。このとき、搬送物は経由すべき古いサンプリング点をショートカットするように動作し、誤差が発生する要因となっている。

そこで、本論文では重ね合わせを用いた制御則に線長パラメータを適用する制御則を提案する。それにより、これまではある時間においてある速度を達成するような制御だったが、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、目標軌道を生成する関数に搬送経路の長さを組み込むためのパラメータである。この制御によってレーザーを速く動かした場合でも、懸垂物はオペレータが指定した軌跡に追従した搬送が期待される。また、軌跡に追従するという特性から手振れの影響について考えられるが、レーザー光を速く動かした場合に手振れは発生しにくいこと、さらに手振れのような高周波の成分はサンプリングの際にカットされるため無視できると考えられる。

まず線長パラメータ  $s$  に関して、その増分  $\Delta s$  をレーザー光の  $k$  番目サンプリングでの増分  $(\Delta x_k, \Delta y_k)$  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(10)~(12)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.6 の通りである。

$$\Delta s_k = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta y_k^2} \quad (9)$$

$$s_{k+1} = s_k + \Delta s_k \quad (10)$$

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \quad (11)$$

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k \quad (12)$$

Fig.6 Configurations of each parameter

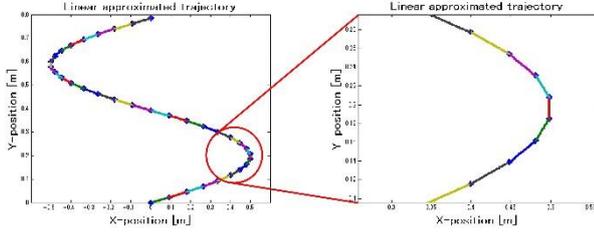


Fig.7 Laser trajectory of each simulation

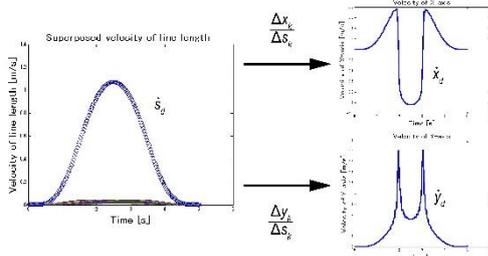


Fig.8 Laser trajectory of each simulation

次に、検出された座標 $(x_k, y_k)$ を初期位置からの搬送距離で表すために、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(13)、(14)のように表すことができる. 式(13)、(14)を用いて補完されたサンプリング点は Fig.7 のようになる.

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

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

ここで、式(13)、(14)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(15)、(16)のように決定することができる. 式(9)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.8 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ることができる.

$$\dot{x}_d = \frac{\partial x_d}{\partial s} = \frac{\Delta x_k}{\Delta s_k} \dot{s}_d \quad (15)$$

$$\dot{y}_d = \frac{\partial y_d}{\partial s} = \frac{\Delta y_k}{\Delta s_k} \dot{s}_d \quad (16)$$

式(15)、(16)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(17)、(18)のように表せる.

$$s = \frac{\Delta s_k}{\Delta x_k} (X - x_k) + s_k \quad (17)$$

$$s = \frac{\Delta s_k}{\Delta y_k} (Y - y_k) + s_k \quad (18)$$

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

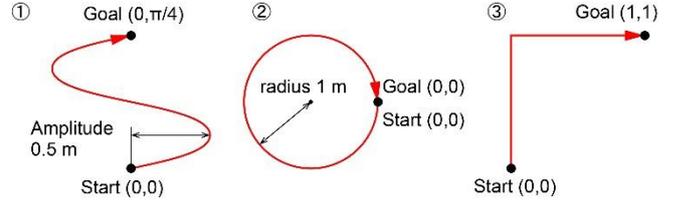


Fig.9 Laser trajectory of each simulation

## 5. 検証

### 5.1 シミュレータにおけるクレーンのパラメータ設定

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.

本シミュレータは、レーザーポインタ入力形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. また、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、レーザー光照射時間とレーザー光の軌跡を表す関数を任意に指定して検証を行う.

### 5.2 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. また、検証は誤差が発生しやすいと考えられる三種類の経路に関して行い、その内容と設定の詳細について以下に示す.

1) レーザーポインタ入力型インターフェースを使用し、障害物などの回避時に使用すると予想される Fig.9 のような経路での搬送を想定する.

① 振幅が 0.5 m の正弦曲線を描いた場合

② 半径が 1 m の円を描いた場合

③ Y 軸方向に 1 m の直線を描いた後に屈曲し、X 軸方向に 1 m の直線を描いた場合

以上の経路について検証を行い、実際のクレーンにおいても実現可能であるか検討し、提案手法の有効性を示す.

2) 本論文におけるシミュレーションでは、①~③いずれの場合についてもレーザー光で軌跡を描く時間は 1.02 秒とし、従来手法で大きな誤差が発生していたクレーンの動作に対してレーザー光が先行して入力される場合について検証する. 本研究の最終的な目標は、レーザー光のあらゆる軌跡に対して搬送物が完全に追従することで障害物等との衝突防止や、搬送効率の向上でオペレータの感覚に基づいて操縦可能な高い柔軟性を持ったシステムである.

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.

### 5.3 結果

正弦曲線を描く経路における従来手法、提案手法での懸垂物の軌道をそれぞれ Fig.7, Fig.8 に示す。従来手法では 4.3 節で述べたように、クレーンに対してレーザー光を速く動かしたために、搬送物は 0.5 m の振幅を描くことなく、最終目的位置に向かってほぼ直線的にショートカットするように動作した。対して、提案手法を用いた軌道生成法ではレーザー光の軌跡に追従して搬送が可能である結果が得られた。また、レーザー光が消えた最終目標位置において行き過ぎも発生することなく搬送が行われた。

次に、円を描く経路における従来手法、提案手法での懸垂物の軌道をそれぞれ Fig.9, Fig.10 に示す。従来手法では、正弦曲線の場合と同様の理由でレーザー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ー光に追従した搬送が可能であるが、Fig.10 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 5.2 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。しかし、実験機や実環境においては、位置座標は積分することなく取得可能であるため、この誤差は解消されると思われる。

最後に、途中で折れ曲がる屈曲した経路における従来手法、提案手法での懸垂物の軌道をそれぞれ Fig.11, Fig.12 に示す。従来手法では、やはり屈曲点を通ることなく最終目標位置に向かって搬送された。対して提案手法においては、屈曲点を通り搬送は成功したように見える。このときの X 軸、Y 軸の目標速度を Fig.13 に示す。Fig.13 から屈曲点において目標速度が極めて急な軌道になっていることが分かる。実環境においてこのような速度を出力することは不可能である。つまり、今回の提案手法は曲線のように滑らかで微分可能な経路において有効であると言える。

## 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、レーザーポインタ入力型インターフェースで操縦を行ったときのクレーンの移動テーブルや搬送物の軌道を検証するシミュレータの開発を行い、従来手法と提案手法を用いて曲線経路、円形経路、屈曲経路のそれぞれで搬送経路を比較し、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を動かす速度に因らず、レーザー光が描く軌跡に追従して搬送可能な目標軌道が生成できることを確認した。ただし、描く軌跡は曲線のように滑らかなものに限り、屈曲経路のように滑らかな経路では実現困難であることが明らかになった。

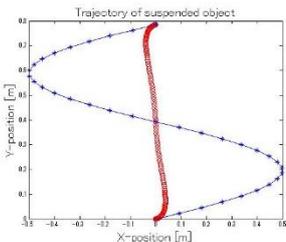


Fig.10 Route of sine curve with conventional method

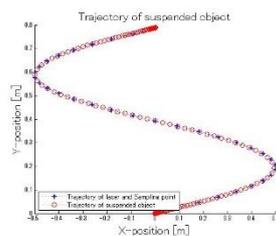


Fig.11 Route of sine curve with proposed method

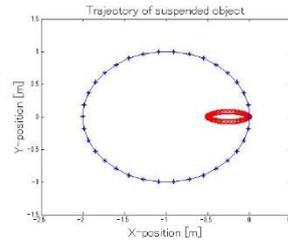


Fig.12 Circular route with conventional method

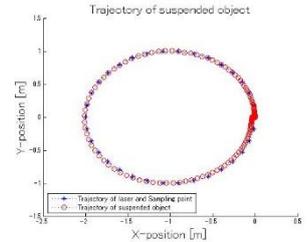


Fig.13 Circular route with proposed method

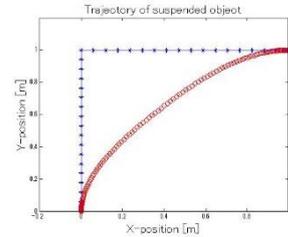


Fig.14 Bending route with conventional method

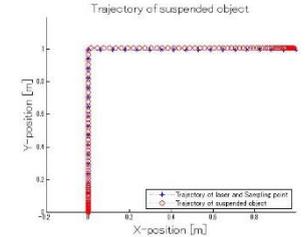


Fig.15 Bending route with proposed method

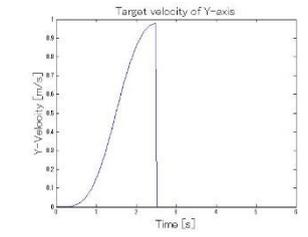
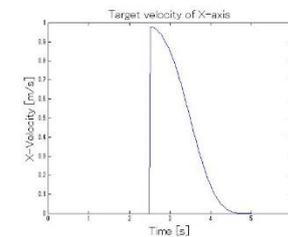


Fig.16 Target velocity in circular route with proposed method

## 参考文献

- (1) 武田常広, 北森俊行, “線形多入出力最適追従系の一般設計法,” 計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.4, (1978) pp. 13-18.
- (2) 美多, 金井, “トロリーの最大速度に注目したクレーンの最適運転法,” 計測自動制御学会論文集, Vol.15, No.6, (1979) pp. 125-130.
- (3) 美多勉, 金井隆, 須藤栄一, “クレーンの最短時間制御,” システムと制御, Vol.26, No.6, (1982) pp. 31-34.
- (4) 山本元司, 本田英司, 毛利彰, “走行クレーンのための安全な衝突回避制御,” 第9回ロボティクスシンポジウム, (2004) pp. 64-69.
- (5) Osumi,H., Miura,A., Eiraku,S., “Positioning of wire suspension system using CCD cameras,” Proc. 2005 IROS, (2005) pp. 1665-1670.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.